

Projekt sustava za umjerenje pretvornika apsolutnog tlaka do 2 bar

Peternel, Tin

Master's thesis / Diplomski rad

2025

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:235:956747>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tin Peternel

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

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

Student:

Tin Peternel

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. dipl. ing. Lovorki Grgec Bermanec, asistentima Ivanu Matasu i Alenu Jurišincu na pomoći pri mjerenjima i analizi dobivenih podataka, ažurnosti pri odgovaranju na postavljena pitanja te volji za upućivanjem korisnih i dobronamjernih savjeta koji su mi uveliko koristili pri pisanju ovoga diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se majci Valentini i ocu Zoranu, te braći i prijateljima na svojoj pomoći i podršci koju su mi pružili tijekom studija.

Tin Peternel



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarški

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tin Peternel** JMBAG: 0035206841

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sustava za umjeravanje pretvornika apsolutnog tlaka do 2 bar**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Project of a system for calibration of absolute pressure gauges up to 2 bar**

Opis zadatka:

Za potrebe umjeravanja mjerila apsolutnog tlaka potrebno je projektirati i realizirati etalonski sustav s vakuumsko-tlačnom komorom u mjernom području od 500 hPa do 2000 hPa. U radu koristiti postojeću mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Potrebno je izraditi:

- Pregled metoda mjerenja apsolutnog tlaka
- Pregled metoda za ispitivanje i umjeravanje mjerila apsolutnog tlaka
- Opis etalonskog mjernog sustava s barokomorom
- Opis etalonskog mjernog sustava s tlačnom vagom
- Postupak umjeravanja s prijedlogom pripadajućih mjernih listova
- Postupak za procjenu mjerne nesigurnosti
- Primjer umjeravanja s rezultatima

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studeni 2024.

Datum predaje rada:

30. siječnja 2025.

Predviđeni datumi obrane:

6., 7. i 10. veljače 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS KRATICA.....	VII
POPIS OZNAKA.....	VIII
SAŽETAK	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNE FIZIKALNE VELIČINE ZNAČAJNE ZA PODRUČJE MJERENJA TLAKA:.....	4
3. MJERILA APSOLUTNOG TLAKA:	6
3.1. Mjerila tlaka preko sile na poznatu površinu - Apsolutna tlačna vaga	7
3.2. Mjerila tlaka deformacijom – Bourdonove cijevi	9
3.3. Mjerila tlaka preko stupca tekućine – Živin barometar	11
3.4. Električni digitalni mjerni uređaji	12
4. METODE I SUSTAVI ZA UMJERAVANJE MJERILA APSOLUTNOG TLAKA:.....	13
4.1. Sljedivost pri umjeravanju mjernih uređaja.....	13
4.2. European Association of National Metrology Institutes EURAMET	15
4.2.1. EURAMET CG-3 postupak umjeravanja plinske tlačne vage:.....	15
4.2.2. EURAMET CG-17 postupak umjeravanja barometara:.....	20
5. PROCES UMJERAVANJA ETALONSKOG BAROMETRA RUSKA NA DHI PLINSKOJ TLAČNOJ VAGI:.....	21
5.1. <i>Mjerna nesigurnost:</i>	28
5.1.1. Barometar Ruska:	30
5.2. Analiza proširene mjerne nesigurnosti barometra Ruska:	39
6. PROCES UMJERAVANJA BAROMETARA BOSCH I TESTO U VAKUUMSKO-TLAČNOJ KOMORI ETALONSKIM BAROMETROM RUSKA:	40
6.1. Mjerna nesigurnost:.....	46
6.1.1. Barometar BOSCH:.....	47
6.1.2. Barometar TESTO:.....	58

6.2. Analiza proširene mjerne nesigurnosti barometara BOSCH BME 280 i TESTO 176P1:	69
7. ZAKLJUČAK:	72
8. LITERATURA:	73

POPIS SLIKA

Slika 1. Torricellijev pokus	2
Slika 2. Geurickeov pokus	2
Slika 3. Odnos i nazivi mjerenih tlakova.....	4
Slika 4. Sklop klipa i cilindra na tlačnoj vagi.....	7
Slika 5. Shema spajanja sustava tlačne vage.....	8
Slika 6. Dijagram naprezanja-Hookov zakon	9
Slika 7. Deformacijski elementi za mjerenje tlaka preko elastične deformacije.....	10
Slika 8. Bourdonova cijev	10
Slika 9. Živin barometar	11
Slika 10. Električni mjerač tlaka TESTO 176P1.....	12
Slika 11. Lanac sljedivosti.....	13
Slika 12. Plinska tlačna vaga DHI	18
Slika 13. Lanac sljedivosti za umjeravane barometre.....	19
Slika 14. Barometar Ruska	22
Slika 15. Utezi za plinsku tlačnu vagu.....	23
Slika 16. Otvorena/zatvorena plinska tlačna vaga	23
Slika 17. Pumpe za evakuaciju zraka pod staklenim zvonom	24
Slika 18. Regulator tlaka plina dušika plinske tlačne vage.....	24
Slika 19. Digitalni pokazivač tlaka plina dušika	25
Slika 20. Piranijev uređaj koji mjeri tlak zaostalog zraka pod staklenim zvonom.....	25
Slika 21. Pravokutna razdioba vjerojatnosti.....	29
Slika 22. Graf odnosa nazivnog tlaka i proširene mjerne nesigurnosti barometra Ruska	39
Slika 23. Barometar BOSCH.....	41
Slika 24. Barometar TESTO.....	42
Slika 25. Shema mjerne linije	43
Slika 26. Vakuumsko-tlačna pumpa Kambič	44
Slika 27. Vakuumsko-tlačna komora Kambič.....	44
Slika 28. Graf odnosa nazivnog tlaka i odstupanje od tlaka etalona barometra BOSCH	69

Slika 29. Graf odnosa nazivnog tlaka i odstupanja od tlaka etalona barometra TESTO70

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike plinske tlačne vage DHI.....	18
Tablica 2. Karakteristike barometra Ruska.....	21
Tablica 3. Očitane veličine pri umjeravanju barometra Ruska.....	26
Tablica 4. Izračunati podaci za barometar Ruska	27
Tablica 5. Mjerna nesigurnost u točki 1. barometra Ruska.....	30
Tablica 6. Mjerna nesigurnost u točki 2. barometra Ruska.....	31
Tablica 7. Mjerna nesigurnost u točki 3. barometra Ruska.....	32
Tablica 8. Mjerna nesigurnost u točki 4. barometra Ruska.....	33
Tablica 9. Mjerna nesigurnost u točki 5. barometra Ruska.....	34
Tablica 10. Mjerna nesigurnost u točki 6. barometra Ruska.....	35
Tablica 11. Mjerna nesigurnost u točki 7. barometra Ruska.....	36
Tablica 12. Mjerna nesigurnost u točki 8. barometra Ruska.....	37
Tablica 13. Mjerna nesigurnost u točki 9. barometra Ruska.....	38
Tablica 14. Proširena mjerna nesigurnost barometra Ruska	39
Tablica 15. Karakteristike barometra BOSCH.....	40
Tablica 16. Karakteristike barometra TESTO.....	41
Tablica 17. Karakteristike vakuumsko-tlačne komore Kambič	45
Tablica 18. Izmjereni podatci za etalonski barometar Ruska.....	46
Tablica 19. Izračunati podaci za barometar BOSCH BME 280	47
Tablica 20. Mjerna nesigurnost u točki 1. barometra BOSCH.....	48
Tablica 21. Mjerna nesigurnost u točki 2. barometra BOSCH.....	49
Tablica 22. Mjerna nesigurnost u točki 3. barometra BOSCH.....	50
Tablica 23. Mjerna nesigurnost u točki 4. barometra BOSCH.....	51
Tablica 24. Mjerna nesigurnost u točki 5. barometra BOSCH.....	52
Tablica 25. Mjerna nesigurnost u točki 6. barometra BOSCH.....	53
Tablica 26. Mjerna nesigurnost u točki 7. barometra BOSCH.....	54
Tablica 27. Mjerna nesigurnost u točki 8. barometra BOSCH.....	55
Tablica 28. Mjerna nesigurnost u točki 9. barometra BOSCH.....	56

Tablica 29. Mjerna nesigurnost u točki 10. barometra BOSCH.....	57
Tablica 30. Izračunati podaci za barometar TESTO 176P1	58
Tablica 31. Mjerna nesigurnost u točki 1. barometra TESTO	59
Tablica 32. Mjerna nesigurnost u točki 2. barometra TESTO	60
Tablica 33. Mjerna nesigurnost u točki 3. barometra TESTO	61
Tablica 34. Mjerna nesigurnost u točki 4. barometra TESTO	62
Tablica 35. Mjerna nesigurnost u točki 5. barometra TESTO	63
Tablica 36. Mjerna nesigurnost u točki 6. barometra TESTO	64
Tablica 37. Mjerna nesigurnost u točki 7. barometra TESTO	65
Tablica 38. Mjerna nesigurnost u točki 8. barometra TESTO	66
Tablica 39. Mjerna nesigurnost u točki 9. barometra TESTO	67
Tablica 40. Mjerna nesigurnost u točki 10. barometra TESTO	68
Tablica 41. Proširena mjerna nesigurnost barometra BOSCH	69
Tablica 42. Proširena mjerna nesigurnost barometra TESTO	70

POPIS KRATICA

OIML (eng. Organisation Internationale de Metrologie Legale)

(hrv. Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo)

DKD (njem. Deutscher Kalibrierdienst)

(hrv. Njemački servis za umjeravanje)

WELMEC (eng. Western European Legal Metrology Co-operation)

(hrv. Zapadnoeuropska suradnja u zakonskom mjeriteljstvu)

EURAMET (eng. European Association of National Metrology Institutes)

(hrv. Europska udruga nacionalnih mjeriteljskih ustanova)

ISO (eng. International Organization for Standardization)

(hrv. Međunarodna organizacija za normizaciju)

IEC (eng. International Electrotechnical Commission)

(hrv. Međunarodno elektrotehničko povjerenstvo)

CG (eng. Calibration Guideline)

(hrv. smjernice za umjeravanje)

DHI (DH Instruments)

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	[Pa]	tlak
F	[N]	sila
A	[m ²]	površina
p_a	[Pa]	apsolutni tlak
p_0	[Pa]	atmosferski tlak
p_p	[Pa]	pretlak
p_v	[Pa]	potlak
v	[%]	vakuum
ρ	[kg/m ²]	gustoća
g	[m ² /s]	ubrzanje Zemljine sile teže
h	[m]	visina
p_p	[Pa]	tlak pare
p_{abs}	[Pa]	apsolutni tlak mjeren na dnu klipa
m_i	[kg]	pojedinačna masa utega
A_p	[m ²]	efektivna površina spoja klip/cilindar
α_a	[K ⁻¹]	koeficijent temperaturne ekspanzije klipa
α_c	[K ⁻¹]	koeficijent temperaturne ekspanzije cilindra
t_s	[K]	temperatura spoja klip/cilindar
t_r	[K]	Referentna temperatura spoja klip/cilindar
μ	[Pa]	tlak zaostalog zraka
p_e	[Pa]	tlak etalona
p_m	[Pa]	srednji tlak
b	[mbar]	ponovljivost
h	[mbar]	histereza
u	[mbar]	mjerna nesigurnost
U	[mbar]	proširena mjerna nesigurnost
k	[/]	faktor prekrivanja
u_m	[mbar]	standardna mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila

u_e	[mbar]	standardna mjerna nesigurnost etalona
u_v	[mbar]	standardna mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja
u_{etalon}	[mbar]	mjerna nesigurnost etalona
$u_{ispitivanje}$	[mbar]	mjerna nesigurnost uvjeta pri ispitivanju
$u_{razlučivost}$	[mbar]	mjerna nesigurnost razlučivosti
$u_{nultočka}$	[mbar]	mjerna nesigurnost nultočke
$u_{ponovljivost}$	[mbar]	mjerna nesigurnost ponovljivosti
$u_{histereze}$	[mbar]	mjerna nesigurnost histereze
p_n	[mbar]	nazivni tlak
p_{eu}	[mbar]	tlak etalona uzlaznog slijeda
p_{es}	[mbar]	tlak etalona silaznog slijeda
p_{em}	[mbar]	srednji tlak etalona
p_u	[mbar]	tlak umjeravanog barometra uzlaznog slijed
p_s	[mbar]	tlak umjeravanog barometra silaznog slijed
p_u	[mbar]	srednji tlak umjeravanog barometra

SAŽETAK

Tema ovoga rada uspostava je lanca sljedivosti mjerila apsolutnoga tlaka do 2 bar. U uvodnom dijelu rada opisani su principi i metode po kojima se mjeri apsolutni tlak. Također, pojašnjene su bitne fizikalne veličine koje se koriste pri mjerenju apsolutnoga tlaka. Naglašena je potreba i način na koji se uspostavlja lanac sljedivosti uređaja koji mjere tlak. Za uspostavu lanca sljedivosti najbitnije je poznavati etalonsku opremu i njenu mjeru nesigurnosti zbog toga je u eksperimentalnom dijelu rada glavni zadatak izračunati mjernu nesigurnost etalonskih uređaja koji se koriste pri umjeravanju barometara. Umjeravanja su provedena po smjernicama EURAMET koja su opisana u dokumentima EURAMET CG-3 i EURAMET CG-17, a mjerna nesigurnost izračunata po postupku opisanom u dokumentu DKD-R6-1. Za umjeravanje etalonskog barometra *Ruska* korištena je plinska tlačna vaga DHI čiji je lanac sljedivosti poznat i iz kojega se lako došlo do njene mjerne nesigurnosti. Detaljno je opisan postupak umjeravanja etalonskog barometra *Ruska* na plinskoj tlačnoj vagi te je izračunata njegova mjerna nesigurnost u devet točaka u području od 100 do 2600 mbar apsolutnog tlaka. Nadalje, pristupilo se umjeravanju električnih digitalnih barometara BOSCH i TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom *Ruska* nakon čega je dobivena njihova mjerna nesigurnost za područje od 650 do 1100 mbar. Time je završen eksperimentalni dio rada i pristupilo se analizi koja je pokazala da svaka sljedeća karika u lancu sljedivosti ima tendenciju za većom mjernom nesigurnosti od prethodne.

Ključne riječi: apsolutni tlak, barometar, lanac sljedivosti, mjerna nesigurnost, plinska tlačna vaga, vakuumsko-tlačna komora...

SUMMARY

The topic of this paper is the establishment of the traceability chain for absolute pressure measurement standards up to 2 bar. The introduction outlines the principles and methods used for measuring absolute pressure. Additionally, it explains the key physical quantities involved in absolute pressure measurement. The need for and the approach to establishing a traceability chain for pressure measurement devices are emphasized. For the establishment of the traceability chain, it is crucial to understand the measurement uncertainty of each device within the chain. Therefore, the main task of the experimental part of the work is to calculate the measurement uncertainty of the devices used in calibration. The calibrations were carried out according to EURAMET guidelines described in the EURAMET CG-3 and EURAMET CG-17 documents, and the measurement uncertainty was calculated following the procedure outlined in the DKD-R6-1 document. For the calibration of the Ruska reference barometer, a gas pressure gauge DHI was used, with a well-established traceability chain, making it straightforward to determine its measurement uncertainty. The procedure for calibrating the Ruska reference barometer on the gas pressure gauge is described in detail, and its measurement uncertainty was calculated at nine points in the range from 100 to 2600 mbar. Furthermore, the calibration of the Bosch and Testo digital barometers was carried out in a barochamber using the Ruska reference barometer, resulting in the determination of their measurement uncertainty in the range from 650 to 1100 mbar. This concluded the experimental section of the paper, followed by an analysis showing that each subsequent link in the traceability chain tends to have a higher measurement uncertainty than the previous one.

Keywords: absolute pressure, barometer, chain of traceability, measurement uncertainty, gas pressure gauge, barochamber...

1. UVOD

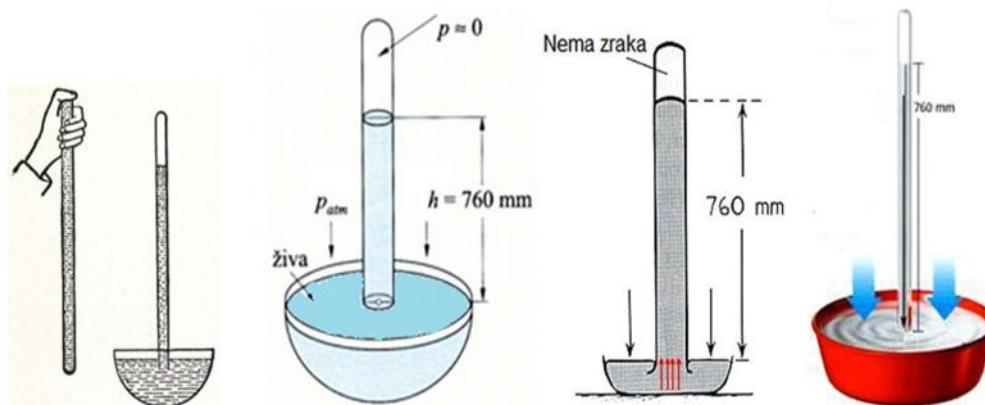
Veličina kojom se primarno bavi ovaj rad je tlak. Po definiciji tlak je djelovanje sile, F , na neku površinu, A . Oznaka za tlak je malo slovo p , a mjerna jedinica u SI sustavu Pascal [Pa] koja je izvedena iz mjerne jedinice za silu Newton [N] po jedinici za površinu [m^2].

$$p = \frac{F [\text{N}]}{A [\text{m}^2]} = [\text{Pa}] \quad (1)$$

Blaise Pascal (1623.-1662.) je bio francuski znanstvenik koji se bavio proučavanjem više područja, a najveći doprinos je dao na području meteorologije, hidrostatike, vjerojatnosti i tlaka. Uvidio je da s porastom visine tlak pada i zaključio da na nekoj beskonačnoj visini tlak teži u nulu odnosno postojanje vakuuma.

Tlak je fizikalna veličina koja je uvijek pozitivna. Kada bi tlak bio 0 Pa govorili bi o potpunom vakuumu koji je u praksi nemoguće postići. U praksi se tlak dijeli u dva područja pretlaka i podtlaka ovisno o tome je li tlak sustava veći ili manji od atmosferskog tlaka. O ovim fizikalnim veličinama detaljnije će biti riječi u narednome poglavlju. U ovom radu tlakovi koje ćemo mjeriti bit će u području podtlaka i pretlaka.

Uz Pascala važan doprinos u istraživanju područja tlakova učinili su talijanski matematičar, fizičar **Evangelista Torricelli** (1608.-1647.) i njemački fizičar, inženjer **Otto von Guericke** (1602.-1686.). Torricelli je 1643. izumio živin barometar za mjerenje atmosferskog tlaka zraka tako što je u staklenu cijev ulio živu te ju nakon toga okrenuo u posudu sa živom. Nakon okretanja staklene cijevi razina žive u cijevi je pala jer se dio žive izlio u posudu sa živom, a u gornjem dijelu staklene cijevi nastao je vakuum u kojem su zapravo bile živine pare pod vrlo niskim tlakom. Kako je posuda sa živom bila otvorena prema atmosferi zbog djelovanja atmosferskoga zraka nije došlo do istjecanja cijeloga stupca žive iz staklene cijevi. Time je Torricelli dokazao da u okolini djeluje tlak zraka odnosno atmosferski tlak. Nakon nekoliko dana primijetio je da se razina žive u staklenoj cijevi mijenja te je zaključio da je i atmosferski tlak zraka promjenjiv ovisno o vremenskim uvjetima.



Slika 1. Torricelijev pokus

Otto von Guericke je 1654. dokazao snagu vakuuma odnosno atmosferskoga tlaka tako što je dvije bakrene polukugle spojio i zabrtvio namašćenom kožom te iz njih evakuirao zrak sisaljkom čime je dobio vakuum. Zatim je upregao četiri para konja koja su trebala rastaviti kuglu tako da svaki četveropreg vuče svoju polukuglu kako bi silom pobijedili snagu vakuuma no to im nije pošlo za rukom. Guericke je time dokazao da na okolinu djeluje zapravo vrlo veliki tlak atmosferskoga zraka.

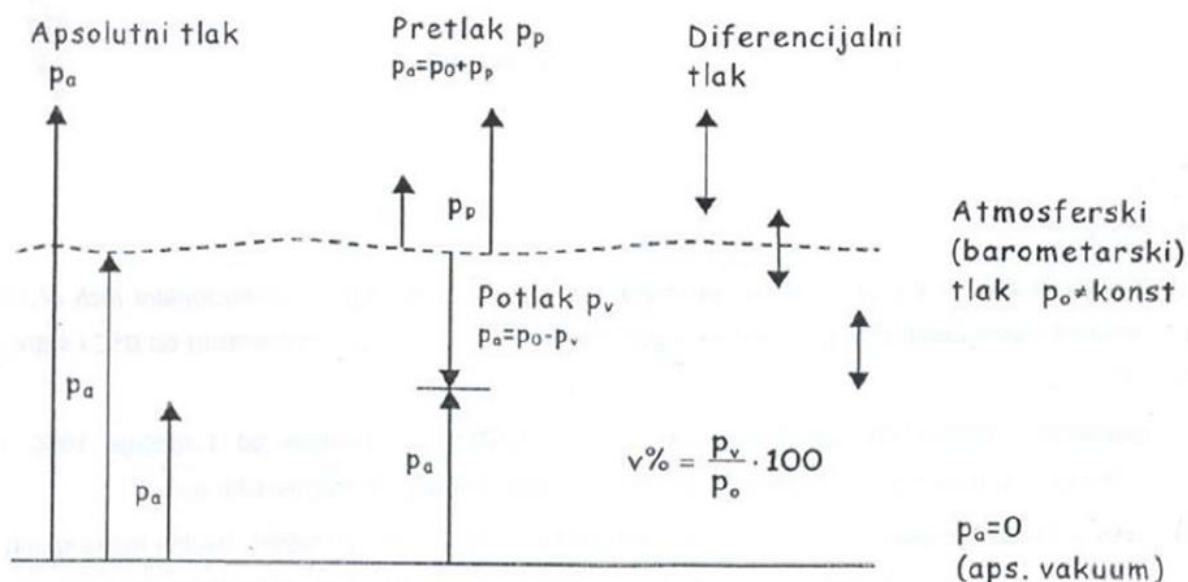


Slika 2. Geurickeov pokus

U praksi često djeluje neka velika sila na malu površinu pa tlak često bude i do nekoliko desetaka tisuća **Pa** što **Pa** čini nepraktičnom mjernom jedinicom pa se često koristi neslužbena mjerna jedinica za tlak **bar**. **Bar** iznosi 10^5 **Pa** što ga čini puno primjenjivijom mjernom jedinicom za tlak u praksi. Tlak je veličina koja je bitna u više područja: meteorologiji, vulkanizerstvu, opremi pod tlakom (npr. kotlovi, spremnici) i drugim djelatnostima tehničke struke. Za ljude i opremu koji se nalaze u blizini opreme pod tlakom vrlo je bitno da je iznos tlaka poznat kako ne bi došlo do kvara opreme ili u najgorem slučaju eksplozije i ozljeda ljudi u blizini. Iz toga proizlazi da je tlak vrlo bitno kontrolirati kako bi se prevenirale i spriječile neželjene posljedice. Zbog toga je uspostavljen sustav kontrole i sljedivosti mjernih instrumenata tlaka (manometara, barometara...) o kojem će biti više riječi u nastavku ovoga rada.

2. OSNOVNE FIZIKALNE VELIČINE ZNAČAJNE ZA PODRUČJE MJERENJA TLAKA:

Kako bi dalje mogli razvijati model mjerenja i kontrole tlaka potrebno je definirati nekoliko fizikalnih veličina bitnih za mjerenje tlaka. Tlak, p , je dakle djelovanje sile na neku površinu i osnovna mjerna jedinica mu je **Pa**, a često se koristi mnogo praktičnija alternativna mjerna jedinica **bar** koja iznosi 10^5 **Pa**. Tlak je fizikalna veličina koja je uvijek pozitivna odnosno veća od 0 **Pa**. **Apsolutni tlak**, p_a , je tlak mjereno od apsolutne 0 na kojoj je tlak 0 **Pa**. **Relativni tlak** je tlak koji uspoređujemo s nekim referentnim tlakom, a najčešće je to atmosferski tlak. Područje tlaka dijeli se na područje pretlaka i područje podtlaka, a kao referentni tlak odnosno granica ova dva područja uzima se atmosferski tlak. **Atmosferski tlak**, p_0 , je tlak kojim sila teže zračnoga omotača pritišće površinu Zemlje, nije konstantan nego se mijenja ovisno o nekoliko parametara (temperaturi, vlažnosti zraka, položaju, visini...). Za atmosferski tlak uzima se iznos tlaka zraka pri 15 °C i on iznosi 101325 **Pa**. Na slici 3. zorno je prikazan odnos definiranih veličina i poslužit će za lakše razumijevanje ostalih fizikalnih veličina koje treba definirati.



Slika 3. Odnos i nazivi mjerenih tlakova

Pretlak, p_p , je razlika dvaju mjerena tlaka u nekom prostoru koja je veća od apsolutnoga tlaka. Najčešće pretlak predstavlja razliku nekog referentnog tlaka, većeg od atmosferskog, i atmosferskoga tlaka.

Podtlak, p_v , je razlika dvaju mjerena tlaka u nekom prostoru koja je manja od apsolutnoga tlaka. Najčešće podtlak predstavlja razliku nekog referentnog tlaka, manjeg od atmosferskog, i atmosferskoga tlaka.

Sljedeća fizikalna veličina koja je prikazana na slici je **vakuum**. Vakuum je definiran kao omjer podtlaka i atmosferskog tlaka.

$$v = \frac{p_v [\text{Pa}]}{p_0 [\text{Pa}]} = [\%] \quad (2)$$

Vakuum se za razliku od ostalih prethodno definiranih fizikalnih veličina ne izražava u **Pa** već u postotcima [%]. Iz jednadžbe (2) jasno je da je za 100 % vakuum, takozvani apsolutni vakuum, potreban podtlak jednak atmosferskom tlaku. A za slučaj kada nema podtlaka nema ni vakuuma odnosno on iznosi 0 % što je stanje jednako kada vlada atmosferski tlak. Apsolutni vakuum postoji samo u teoriji u praksi ga je nemoguće postići jer to bi bilo stanje u kojemu se iz nekog prostora evakuirala i zadnja molekula odnosno atom zraka ili nekoga drugoga plina, a što je nemoguće ostvariti zbog tehničkih nedostataka opreme s kojom se postiže vakuum. Područje vakuuma dijeli se na pet područja. **Grubi vakuum** je područje apsolutnog tlaka koje se nalazi u granicama od 10^5 do 10^2 **Pa**. Nakon područja grubog vakuuma slijedi **srednji vakuum** čije je područje apsolutnog tlaka od 10^2 do 10^{-1} **Pa**. Slijedi, **visoki vakuum** čije je područje apsolutnog tlaka od 10^{-1} do 10^{-5} **Pa**. Zadnje ostaje područje **izuzetno visokoga vakuuma** koji je u području apsolutnog tlaka manjeg od 10^{-5} **Pa** do tlaka apsolutne 0. U praksi je do sad postignut najdublji vakuum od 10^{-12} **Pa**.

U ovom radu bit će razmatran tlak u području od blagog pretlaka do gruboga vakuuma.

3. MJERILA APSOLUTNOG TLAKA:

Za mjerenje tlaka koriste se razne metode i uređaji. Uređaji za mjerenje tlaka imaju dvije bitne značajke jedna je mjerno područje na kojem uređaj mjeri tlak, a drugi rezolucija mjerenja tlaka. Pod mjerno područje u kojem se mjeri tlak misli se na gornju i donju granicu tlaka koju uređaj može točno izmjeriti. Rezolucija prikazuje koliko je uređaj precizan odnosno osjetljiv na promjene tlaka, što je rezolucija veća to uređaj ima bolji osjetnik promjene tlaka. Ovisno o području mjerenja tlak odabire se prikladna rezolucija mjerila tlaka. Kod mjerila koja imaju veće područje mjerenja tlaka pogodne su manje rezolucije jer je i sam uređaj manje osjetljiv na promjenu tlaka, dok su za mjerila koja mjere usko područje tlakova pogodne što manje rezolucije mjerila kako bi se dobili što precizniji podatci mjerenja. Najčešći uređaji koji služe za mjerenje tlaka su manometri, barometri, diferencijalni mjerači tlaka i električni senzori za mjerenje tlaka. Barometar služi za mjerenje atmosferskoga tlaka, dok manometar mjeri odstupanje od atmosferskoga tlaka bilo ono negativno podtlak ili pozitivno pretlak. Ako manometar mjeri područje tlaka manjeg od atmosferskoga naziva ga se i vakuummetrom. Uređaji za mjerenje tlaka djeluju na principu direktne ili indirektno metode.

Direktnom metodom mjeri se područje apsolutnog tlaka od 10^5 do 10^{-4} Pa (grubog, srednjeg i visokog vakuuma). Uređaji koji tlak mjere direktnom metodom imaju senzor pritiska i uređaj za napajanje te očitavanje električnog signala iz senzora. Kod uređaja koji mjere tlak direktnom metodom na rezultat ne utječe vrsta plina kojoj mjerimo tlak. Direktnom metodom dobivamo rezultat na tri glavna principa:

1. mjerenjem sile koja djeluje na poznatu površinu (plinske, hidrauličke i uljne tlačne vage)
2. mjerenjem deformacije mijeha, membrane ili Bourdonove cijevi
3. mjerenjem stupca tekućine (uljni, vodeni, živini manometri)

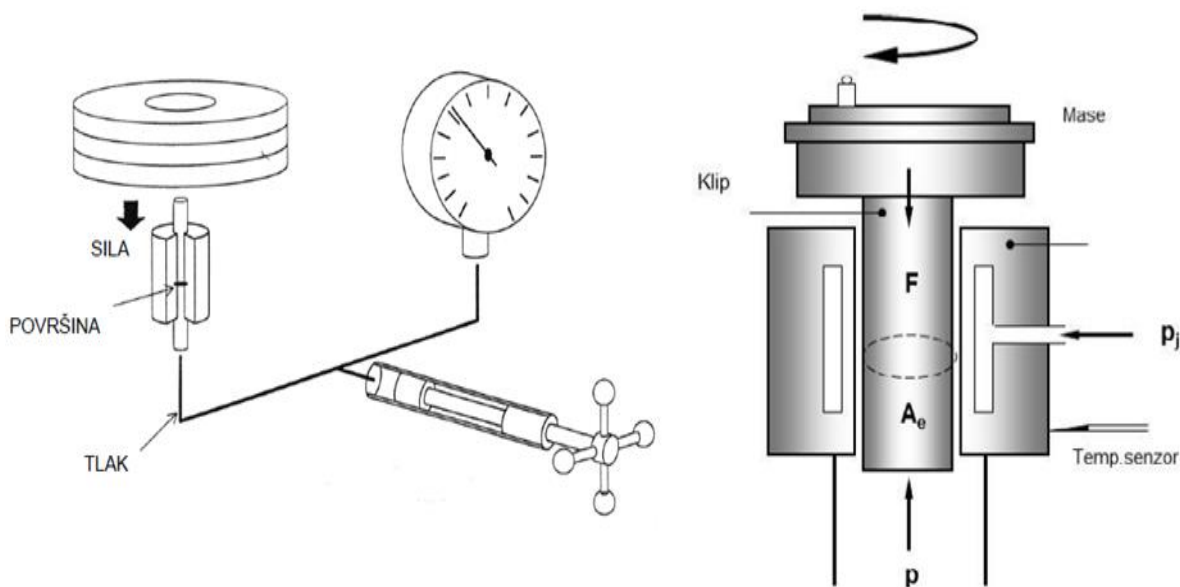
Indirektna metoda koristi se mjerenjem neke druge mjerljive veličine kako bi se jednadžbom stanja idealnoga plina došlo do iznosa tlaka. Indirektnom metodom mjeri se područje tlaka od 10^5 do i 10^{-12} Pa što pokriva područje od tlakova većih od atmosferskog do ultra visokoga vakuuma. Pri mjerenju indirektnom metodom vrsta plina kojoj mjerimo tlak utječe na rezultate mjerenja. Uređaji koji indirektno mjere tlak rade najčešće na tri principa:

1. mjerenjem viskoziteta (levitirajuća loptica rotirajuća cijev)
2. mjerenjem ionizacije (vruća i hladna katoda)
3. mjerenjem toplinske vodljivosti (termopar i Piranijev manometar)

Nadalje će biti detaljnije opisani načini rada pojedinih uređaja za mjerenje apsolutnog tlaka.

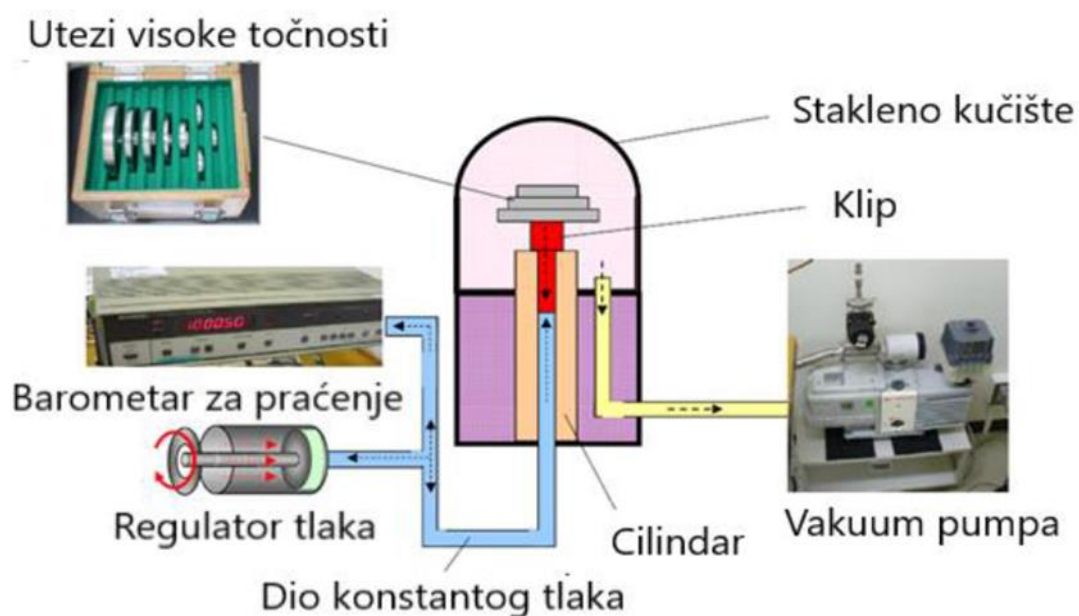
3.1. Mjerila tlaka preko sile na poznatu površinu - Apsolutna tlačna vaga

Mjerila tlaka koja mjere kolikom silom tlak djeluje na neku poznatu površinu su vrlo precizni i osjetljivi uređaji koji se najčešće koriste za umjeravanje etalonskih mjerila tlaka najčešće u laboratorijima jer su vrlo osjetljive na vibracije i promjene temperature. Predstavnici ove vrste mjerila su apsolutne tlačne vage koje mogu biti plinske, hidrauličke ili uljne. Plinske, hidrauličke i uljne vage rade na istome principu, razlika je samo u tome što koriste drugačije fluide kojima se uravnotežuje teret na klipu tlačne vage. Plinske tlačne vage se koriste za umjeravanje pri tlakovima do 140 **bara**. Hidrauličke tlačne vage se koriste za umjeravanje pri tlakovima od 0.5 **bara** do 700 **bara**. Uljne tlačne vage se koriste za umjeravanje pri tlakovima od 1 **bar** do 4000 **bara**. Vidljivo je da apsolutne tlačne vage služe za umjeravanje etalona u širokom spektru tlakova. Tlačne vage se sastoje od cilindra i klipa koji se uravnotežuju utezima i tlakom fluida tako da kad je ravnoteža uspostavljena klip pliva u cilindru. Sklop klipa i cilindar mora biti vrlo precizno izrađen u toleranciji zazora od 1 do 0,5 μm i konstantan po dužini dodirne površine kako ne bi došlo do dodira između njih. Klip rotira konstantnom brzinom unutar cilindra kako bi se umanjio utjecaj trenja u sklopu klipa i cilindra, a time smanjila mjerna nesigurnost koje bi trenje uzrokovalo.



Slika 4. Sklop klipa i cilindra na tlačnoj vagi

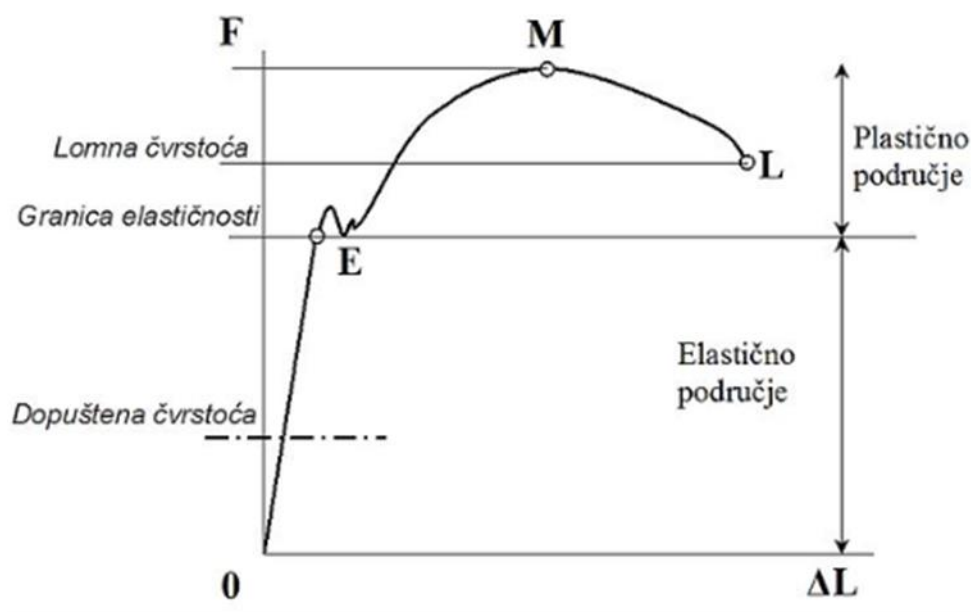
Uz klip i cilindar sustav tlačne vage ima: stakleno zvono koje izolira sustav od atmosferskog tlaka, vakuum pumpu koja evakuira preostali zrak ispod staklenog zvona, utege koji se postavljaju na klip, kontrolni barometar koji mjeri narinuti tlak fluida potreban za uravnoteženje tlačne vage te regulatora tlaka kojim uravnotežujemo utege i tlak.



Slika 5. Shema spajanja sustava tlačne vage

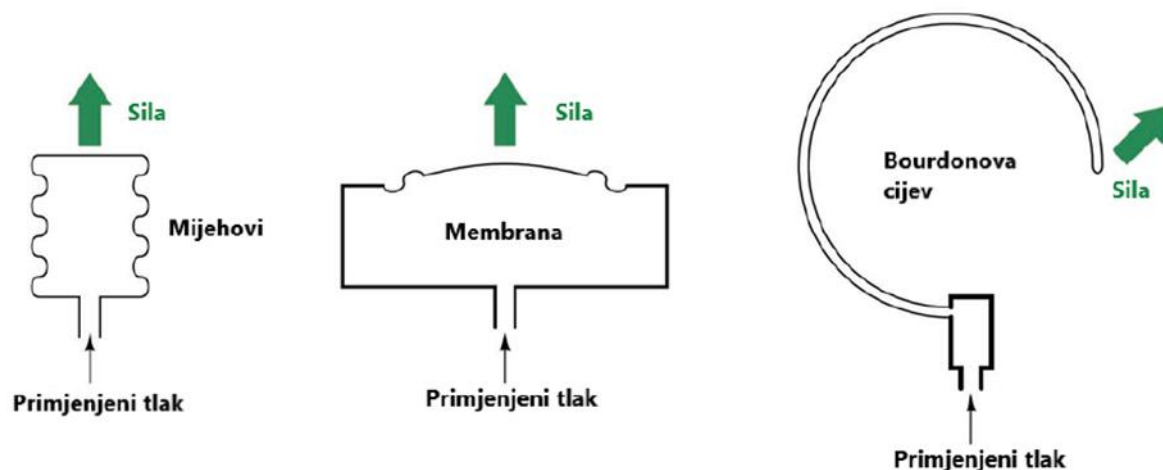
3.2. Mjerila tlaka deformacijom – Bourdonove cijevi

Uređaji koji mjere tlak na principu deformacije spadaju u uređaje koji tlak mjere direktnom metodom. Ovi uređaji rade na principu elastične deformacije koja se uvijek događa u smjeru djelovanja sile. Deformacijske mjerne uređaje krasi brzi odziv i visoka preciznost, ali nažalost uzak spektar mjerljivih tlakova. Područje na kojem uređaj mjeri tlak određeno je Hookovim zakonom koji linearno povezuje elastičnu deformaciju i silu koja ju uzrokuje. Ako ovakav uređaj bude preopterećen tlakom deformacija prelazi iz elastičnog u plastično područje što uzrokuje trajnu deformaciju mjernog elementa i kvar uređaja. Dakle mjerno područje tlaka deformacijskih uređaja ograničeno je granicom elastične deformacije. Ovi uređaji pogodni su za mjerenje tlakova za koje znamo da su u dozvoljenom području i često se koriste u praksi. Prednost im je što ne sadrže fluid pa ih je lako transportirati bez straha od kvara uređaja.



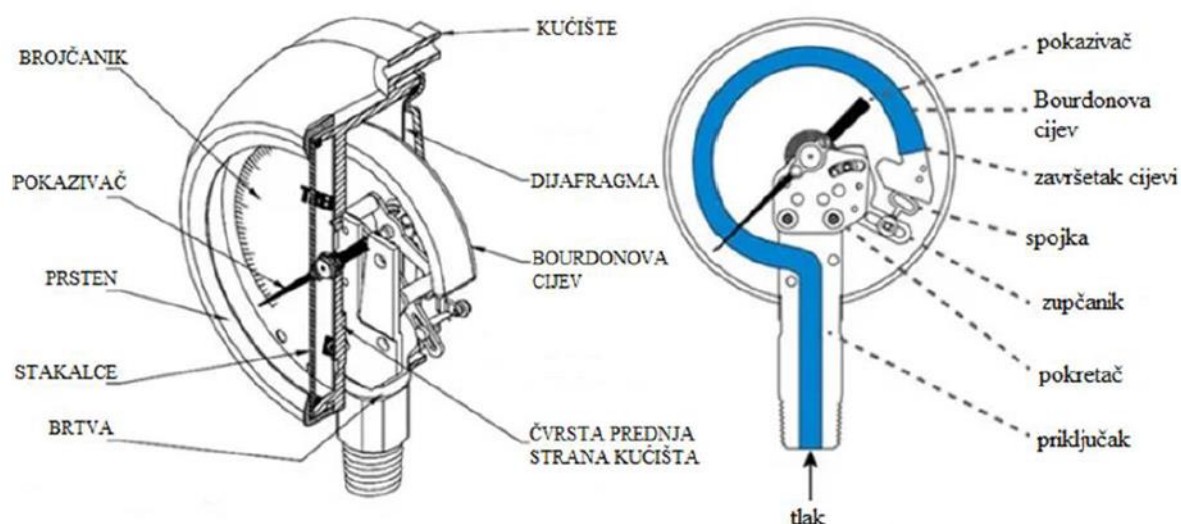
Slika 6. Dijagram naprezanja-Hookov zakon

Deformacijski mjerni uređaji tlaka sadrže mjerne elemente koji su mijeh, membrana (dijafragma) i cijev. Ovi mjerni elementi izrađuju se iz legura bakra (bronce), berilija, tantala ili titana ovisno o području tlaka koji je potrebno mjeriti.



Slika 7. Deformacijski elementi za mjerenje tlaka preko elastične deformacije

Na primjeru Bourdonove cijevi detaljnije će biti pojašnjen rad ovih uređaja. Bourdonova cijev je pravokutna šuplja cijev savijena u spiralu najčešće izrađena od bakrenih legura (bronci) koje imaju dobra deformacijska svojstva. Na jednom kraju Bourdonove cijevi nalazi se priključak kojim se dovodi plin pod tlakom koji je potrebno izmjeriti. Bourdonova cijev se pod utjecajem tlaka plina deformira (dodatno savija ili ispravlja ovisno o tlaku) što uzrokuje pomak drugog kraja Bourdonove cijevi koji je povezan sa pokazivačem što dovodi do jednostavnog očitavanja iznosa tlaka plina na brojčaniku.



Slika 8. Bourdonova cijev

3.3. Mjerila tlaka preko stupca tekućine – Živin barometar

Uređaji koji mjere tlak na principu mjerenja stupca tekućine pripadaju uređajima koji tlak mjere direktnom metodom. Mjerači tlaka preko stupca tekućine zasnivaju se na saznanjima koje je u svom pokusu dokazao Torricelli 1643. godine, a koji je već detaljnije opisan u uvodu ovoga rada. Torricelli je u svome pokusu koristio prvi živin barometar. Ovakvi uređaji su najstariji uređaji namijenjeni mjerenju tlaka, a koriste se do danas. Dugotrajnost uporabe ovih uređaja je u tome što su vrlo jednostavne konstrukcije koja se sastoji od staklene cijevi, posude za tekućinu i tekućine u njoj. Ovi uređaji uzevši u obzir cijenu i preciznost daju vrlo pouzdane podatke za mjerenje tlakova u rasponu od 10^2 do 10^5 Pa. Tekućina koja se koristi u cijevnim barometrima je živa. Živin barometar svoju široku primjenu duguje velikoj gustoći žive, $\rho_z=13546$ kg/m³, tako da je za mjerenje istoga tlaka potrebna skala očitavanja tlaka otprilike 13,5 puta manja od one koja bi bila potrebna ako bi se tlak mjerio vodenim stupcem. Živini barometri najčešće se koriste za mjerenje atmosferskog tlaka. Mana živinog barometra je što su pare žive otrovne za ljude. Živini barometri su obično visine oko 0,8 m što ih čini nepraktičnim za mjerenja tlaka u malim prostorima i velika je mogućnost oštećenja cijevi. Za očitavanje tlaka preko živinog barometra potrebno je vizualno odrediti razinu žive u cijevi te se time dobiva tlak izražen u visini milimetara stupca žive kojega treba preračunati u Pascale. Otežan transport je još jedan razlog zbog čega se živini barometri danas zamjenjuju barometrima koji su praktičniji za korištenje.



Slika 9. Živin barometar

3.4. Električni digitalni mjerni uređaji

Danas ova mjerila imaju široku primjenu zbog svoje jednostavnosti, pouzdanosti i kompaktnosti. Ovakvi uređaji za mjerenje tlaka najčešće se koriste piezoelektričnim elementima ili poluvodičima. Uređaji koji rade na principu piezoelektričnog efekta rade tako da se pri djelovanju tlaka stvara električni naboj koji se prenosi na električni senzor s kojega se preko naboja očitava iznos tlaka. Kapacitivni senzor tlaka je senzor tlaka koji koristi kapacitivnosti kao veličinu kojom se preko osjetilnog elementa mjeri tlak. Kapacitivni senzori tlaka koriste okrugli metalni ili pozlaćeni film kao elektrodu kondenzatora, koji se pri promjeni tlaka deformira i tada se kapacitivnost formirana između filma i fiksne elektrode mijenja. Promjena kapaciteta se prenosi električnim signalom kojim se očitava tlak. Uz tlak električni senzori imaju mogućnost mjerenja vlažnosti i temperature što je prednost ovakvih uređaja. Vrlo su precizni jer imaju mogućnost velike rezolucije prikaza izmjerenoga tlaka na ekranu. Električni senzori tlaka lako se prenose i povezuju na duge uređaje, također posjeduju mogućnost memorije izmjerenih podataka koja omogućava naknadnu analizu memoriranih podataka na nekom drugom uređaju. Prednost je i brzi odziv na promjenu mjerenoga tlaka, a pogodni su i za automatizaciju što ih čini vrlo praktičnim mjerilima tlaka za potrebe industrije. Mana ovakvih uređaja je što uređaji imaju potrebu za vanjskim napajanjem, u pravilu baterijom, i podložni su temperaturnom utjecaju okoline.

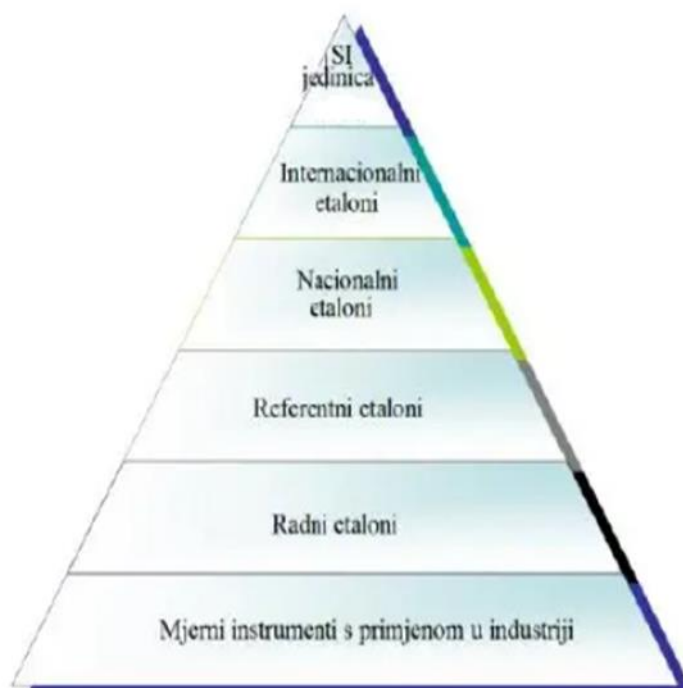


Slika 10. Električni mjerač tlaka TESTO 176P1

4. METODE I SUSTAVI ZA UMJERAVANJE MJERILA APSOLUTNOG TLAKA:

4.1. Sljedivost pri umjeravanju mjernih uređaja

Vremenom dolazi do odstupanja svih mjerila tlaka pa je potrebno provesti umjeravanje po propisanim procedurama koje su određene za svaki tip mjerila tlaka. Umjeravanje ili kalibracija je sustavni postupak potvrđivanja i prilagođavanja očitavanja mjernog uređaja radi usklađivanja s priznatim standardom, odnosno etalonom što jamči točne i pouzdane rezultate mjerenja tlaka. Kako se u ovome radu govori o umjeravanju mjerila apsolutnoga tlaka nadalje će biti riječi o umjeravanju barometara. Kod umjeravanja uređaja bitno je uspostaviti lanac sljedivosti mjerila. Sljedivost omogućava da se pri umjeravanju uređaja poveže s referencom na mjerilo preko kojega se umjerava uređaj. Svako mjerilo u lancu sljedivosti ima svoju mjernu nesigurnost koja pridonosi ukupnoj mjernoj nesigurnosti na umjeranom uređaju i treba ju uzeti u obzir. Iz toga slijedi da mjerna nesigurnost raste niz lanac sljedivosti.



Slika 11. Lanac sljedivosti

Svaki uređaj nakon umjeravanja dobiva potvrdu o umjeravanju i naljepnicu na kojoj piše datum kada je provedeno umjeravanje i oznaka metode kojom je provedeno umjeravanje uređaja.

Razlozi zbog kojih se provodi umjeravanje mjerila su:

- Uspostavljanje sljedivosti
- Osiguravanje usklađenosti očitavanja s drugim mjerenjima
- Osiguranje i određivanje točnosti očitavanja mjernog instrumenta
- Provjera pouzdanosti mjerila

Smjernice za umjeravanje uređaja daju nekoliko svjetskih organizacija:

- **OIML** (eng. The organisation Internationale de Metrologie Legale)
- **DKD** (njem. Deutscher Kalibrierdienst)
- **WELMEC** (eng. European Cooperation in Legal Metrology)
- **EURAMET** (eng. European Association of National Metrology Institutes)

Sve organizacije su usuglasile postupke tako da umjeravanje po smjernicama jedne organizacije ne pobija umjeravanje po smjernicama drugih organizacija. U ovome radu umjeravanje barometara će biti provedeno po smjernicama koje je propisala **EURAMET** organizacija.

Procedure umjeravanja mjernih uređaja:

A-procedura umjeravanja je najdetaljniji i sastoji se od 4 slijeda umjeravanja. Prvi i treći slijed su uzlazni, a drugi i četvrti slijed silazni.

B-procedura umjeravanja sastoji se od 3 slijeda umjeravanja. Prvi i treći slijed su uzlazni, a drugi slijed silazni.

C-procedura umjeravanja sastoji se od 2 slijeda umjeravanja. Prvi je uzlazni, a drugi silazni.

Procedura A će se koristiti pri umjeravanju etalonskog barometra na plinskoj tlačnoj vagi, a procedura C pri umjeravanju barometara u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom.

4.2. European Association of National Metrology Institutes EURAMET

EURAMET je Europska udruga nacionalnih mjeriteljskih ustanova koja daje smjernice i podršku svima zainteresiranim pri umjeravanju mjernih instrumenata koji mjere tlak. Postupci koji su propisani EURAMET-om valjani su i priznati od svih drugih gore spomenutih organizacija. U ovome radu koristit će se plinska tlačna vaga za umjeravanje etalonskog barometra kojim će se naknadno umjeravati barometri u vakuumsko-tlačnoj komori. Za umjeravanje plinske tlačne vage na drugoj tlačnoj vagi EURAMET propisuje postupak opisan u dokumentu EURAMET CG-3, dok je postupak umjeravanja etalonskog barometra na plinskoj tlačnoj vagi i postupak umjeravanja barometra etalonskim barometrom opisan u dokumentu EURAMET CG-17. Ova dva dokumenta poslužit će kao predlošci za postupak umjeravanja barometara po propisanim smjernicama koje su napisane u njima. Nakon provedenog postupka umjeravanja za svaki barometar potrebno je odrediti proširenu mjernu nesigurnost U koja će se u ovome radu odrediti preko postupka koji propisuje DKD u svojem dokumentu DKD-R6-1. Nadalje će biti pobrojane bitne stavke ovih dokumenata koje je potrebno poštovati pri postupcima umjeravanja tlačnih vaga i barometara.

4.2.1. EURAMET CG-3 postupak umjeravanja plinske tlačne vage:

U ovom dokumentu EURAMET detaljno propisuje radnje koje je potrebno provesti pri postupku umjeravanja plinske tlačne vage na tlačnoj vagi. Dokumentom su propisani postupci za plinske i hidrauličke tlačne vage, a kako će se u ovom radu koristiti plinska tlačna vaga postupke za hidrauličke tlačne vage neće se detaljnije iznositi iako je vrlo sličan postupku za plinske. Plinska tlačna vaga radi na principu direktne metode mjerenjem sile na poznatu površinu. Tlačna vaga se dovodi u stanje plutanja klipa u cilindru uravnoteženjem tlaka plina koji djeluje unutar cilindra na klip i poznate težine utega koji se nalaze na klipu poznate površine, nakon čega se mjeri tlak plina uređajem koji želimo umjeriti kako bi se odredilo njegovo odstupanje od izračunatog tlaka preko sile teže utega i površine klipa. Nakon što se odredi odstupanje umjeravane plinske tlačne vage ona će poslužiti kao etalonsko mjerilo za umjeravanje etalonskog barometra za postupak daljnjeg umjeravanja barometara u vakuumsko-tlačnoj komori time će se dobiti jasan lanac sljedivosti čija važnost je već naglašena u ovome radu.

Pri umjeravanju klip je pogonjen elektromotorom i rotira unutar cilindra kako bi se umanjila mjerna nesigurnost koja bi nastala zbog trenja spoja klipa i cilindra. Kod tlačnih vaga koje iznad klipa pod staklenim zvonom stvaraju vakuum pri izračunu tlaka potrebno je uzeti u obzir tlak zaostalog zraka. Proračun za plinsku tlačnu vagu moguće je vrši po dvije metode manometarska i apsolutna. U ovome radu bit će korištena plinska tlačna vaga koja je umjeravana po apsolutnoj metodi koja mjeri apsolutni tlak, a dana je pod točkom 3.9. [10].

$$p_{abs} = \frac{\sum_i m_i \cdot g}{A_p \cdot [1 + (\alpha_a + \alpha_c) \cdot (t - t_r)]} + \mu \quad (3)$$

p_{abs} - apsolutni tlak mjeren na dnu klipa [Pa]

m_i - pojedinačna masa utega [kg]

g - ubrzanje Zemljine sile teže; 9,80665 [m/s^2]

A_p - efektivna površina spoja klip/cilindar na referentnoj temperaturi i tlaku [m^2]

α_a - koeficijent temperaturne ekspanzije klipa [K^{-1}]

α_c - koeficijent temperaturne ekspanzije cilindra [K^{-1}]

t - temperatura spoja klip/cilindar pri umjeravanju [K]

t_r - referentna temperatura spoja klip/cilindar, obično 20 °C [K]

μ - tlak zaostalog zraka [Pa]

Zahtjevi pri umjeravanju plinske tlačne vage, točka 4. [10]:

- temperatura okoline mora biti između 15-25 °C i stabilizirana $\pm 2^\circ\text{C}$
- reducirati otvaranje vrata i kretanje osoblja u prostoru gdje se vrši umjeravanje kako bi se smanjio utjecaj na proces
- uređaj koji umjeravamo postaviti što bliže tlačnoj vagi
- tlačnu vagu postaviti na stabilan, masivan stol koji je potrebno poravnati libelom
- umanjiti visinsku razliku između tlačne vage i umjeravanog instrumenta
- osigurati okomitost klipa pri punom opterećenju
- koristiti čisti suhi plin bez uljnih primjesa (dušik)
- prilagoditi tlak plina rasponu tlaka uređaja koji se umjeravaju
- očistiti cijevi od tekućine (ulja)

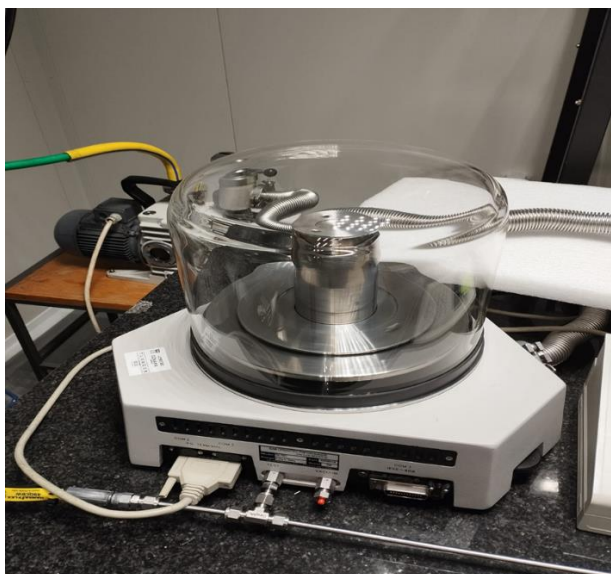
- za priključke koristiti kratke cijevi širokog promjera, kritičnije kod niskoga tlaka
- instalirati odgovarajući sustav za mjerenje temperature na spoju klip/cilindar
- za stvaranje vakuuma pod staklenim zvonom koristiti čistu pumpu ili mehaničku rotacijsku pumpu sa sifonom
- pod staklenim zvonom potrebno je postići vakuum manji od 10 Pa ili 10^{-5} od izmjerenog tlaka, osim ako proizvođač nije naveo drugačije
- poznat niz sljedivosti umjeravanja tlačne vage
- vaga mora imati manju mjernu nesigurnost od pretpostavljene za uređaj koji se umjerava
- tlačna vaga mora biti instalirana u prostoru gdje će se vršiti umjeravanje najmanje 12 sati prije početka procesa umjeravanja
- provjeriti sadrži li ulje nečistoće, ako sadrži očistiti cijevi i zamijeniti ulje
- provjeriti pokretljivost klipa pomoću vretena klip s pola postavljenih utega na sebi pri zatvorenom tlačnom krugu, trebao bi se moći kretati gore-dolje po cijelom rasponu pomaka
- očistiti površine klipa i cilindra odgovarajućim sredstvom i posušiti krpom, provjeriti postoje li neka oštećenja na površini, podmazati površine
- za ručno rotirajuće vage potrebno je napraviti test rotacije tako da se na klip postave 2/10 mase utega odgovarajuće za mjerenje maksimalnoga tlaka koji se zatim zarotira te bi kod ispravne tlačne vage trebao rotirati brzinom od 30 okretaja u minuti najmanje 3 minute; ako sustav ne ispuni te uvjete potrebno je očistiti površine klipa i cilindra
- provjeriti brzinu spuštanja klipa s gornjeg na donji položaj, koja pri maksimalnom tlaku treba biti veća od 3 minute, ako se klip spusti prije potrebno je provjeriti nepropusnost tlačnih vodova
- prije početka rada potrebno je uključiti pumpu da radi 30 minuta na maksimalnom tlaku kako bi se uklonila sva vodena para ispod staklenog zvona
- kod ručno rotirajućih vaga provjeriti ima li smjer rotacije utjecaj na izmjerene rezultate i navesti smjer u kojem je vršena rotacija utega

Nakon što su provedeni svi zahtjevi pri umjeravanju plinske tlačne vage počinje se s postupkom umjeravanja metodom unakrsnog plutanja.

Plinska tlačna vaga „DHI“ interne oznake TLVAG-09 u vlasništvu LPM (laboratorija za procesna mjerenja) koja će poslužiti za umjeravanje etalonskog barometra umjeravana je apsolutnom metodom koja u obzir uzima i promjenu efektivne površine spoja klip/cilindar uzrokovane promjenom temperature spoja.

Tablica 1. Tehničke karakteristike plinske tlačne vage DHI

Plinska tlačna vaga DHI	
PROIZVOĐAČ	DH Instruments
TVORNIČKI BROJ	703
TIP	PG-7601
MJERNO PODRUČJE	5 kPa – 7 kPa
VLASNIK	LPM-FSB
LABARATORIJSKA OZNAKA	TLVAG09
MEDIJ	DUŠIK

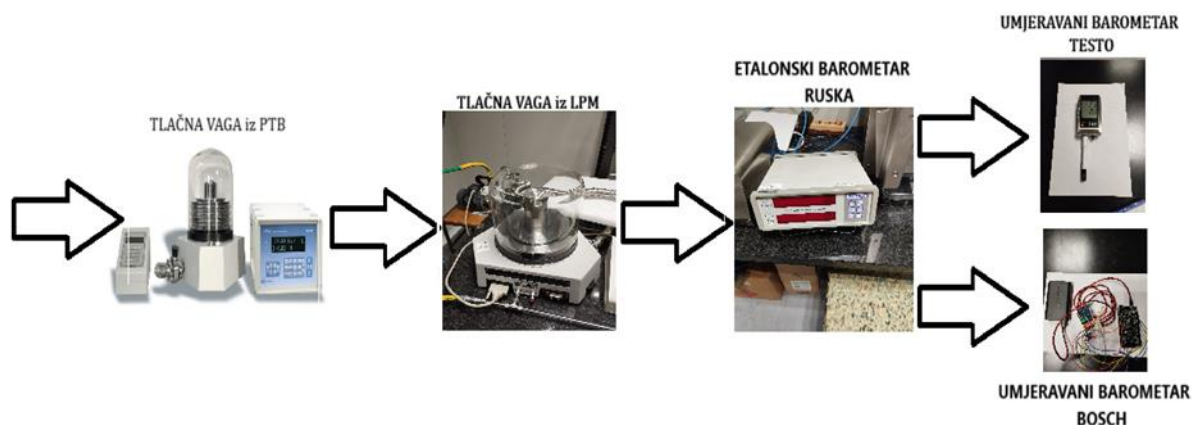
**Slika 12. Plinska tlačna vaga DHI**

TLVAG-9 je umjeravana od 4. do 7. 10. 2022. u Njemačkoj, Braunschweig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Nationales Metrologieinstitut.

Opis procesa umjeravanja plinske tlačne vage prema [10]:

1. Otvoriti stakleno zvono i otvoriti oba ventila.
2. Postaviti odgovarajuće utege na obje tlačne vage.
3. Podesiti tlak i mase kako bi se uravnotežile vage.
4. Zatvoriti ventil umjeravane vage.
5. Zatvoriti i evakuirati zrak pod staklenim zvonima.
6. Prilagodbom tlaka uravnotežiti tlačne vage.
7. Očitati tlakove s manometara nakon što su vage uravnotežene kako bi se mogla odrediti nesigurnost.
8. Zabilježiti referentne brojeve utega obje vage primijenjenih za umjeravanje tlačne vage.
9. Zabilježiti temperaturu sklopa klip/cilindar obje vage kako bi se mogla izračunati efektivna površina.
10. Zabilježiti zaostali tlak pod staklenim zvonima obje vage.

Nakon provedenog umjeravanja plinske tlačne vage TLVAG-09 dobivena je njena mjerna nesigurnost koja iznosi $0,5 \cdot 10^{-4} \cdot p$. Podatak o mjerne nesigurnosti plinske tlačne vage bitan je zbog lanca sljedivosti koji je potrebno uspostaviti pri daljnjem umjeravanju barometara.



Slika 13. Lanac sljedivosti za umjeravane barometre

Nakon što je izvršen postupak umjeravanja plinska tlačna vaga i dobivena njena nesigurnost slijedi postupak umjeravanja etalonskog barometra na umjerenoj plinskoj tlačnoj vagi. Tim etalonskim barometrom provesti će se postupak umjeravanja barometara u vakuumsko-tlačnoj komori. Postupci umjeravanja barometara plinskom tlačnom vagom i barometara etalonskim barometrom opisani su u predlošku **EURAMET CG-17**. Za izračun mjerne nesigurnosti umjeranih barometara u ovome radu će se koristiti DKD-ov predložak **DKD-R6-1**.

4.2.2. EURAMET CG-17 postupak umjeravanja barometara:**Zahtjevi pri umjeravanju barometra, točka 5. [11]:**

- zaštiti opremu od izravnog sunčevog zračenja
- identificirati opremu koja se koristi pri mjerenju
- umjeravani barometar postaviti što bliže etalonu kojim se vrši umjeravanje
- provjeriti podudarnost mjernog područja etalona i umjeravanog barometra
- temperatura okoline mora biti između 18-28 °C i stabilizirana ± 1 °C
- potrebno bilježiti tlak, temperaturu i apsolutnu vlažnost okolnog zraka
- prije početka umjeravanja uključiti opremu i pričekati da se izjednače temperature okoliša i uređaja
- odrediti točke umjeravanja s obzirom na mjerno područje etalona i umjeravanog barometra
- prije početka umjeravanja provjeriti nepropusnost uređaja tako što se narine maksimalan tlak koji uređaj mora zadržati 1 minutu, postupak ponoviti dva puta
- vrijeme između mjerenja dvije uzastopne točke treba biti približno jednako i veće od 30 sekundi
- očitanje podataka izvršiti najmanje 30 sekundi nakon uspostave željenoga tlaka
- podešavanje tlakova u ponovljenim serijama mjerenja treba biti u granicama tlakova od 1% početne serije mjerenja
- pri umjeravanju potrebno je bilježiti: tlak koji pokazuje etalon ili veličine kojima se računa stvaran tlak (npr. kod tlačne vage masa korištenih utega i temperatura spoja klip/cilindar) i indikaciju umjeravanog barometra

5. PROCES UMJERAVANJA ETALONSKOG BAROMETRA RUSKA NA DHI PLINSKOJ TLAČNOJ VAGI:

Nakon što je plinska tlačna vaga umjerena može se njome provesti daljnje umjeravanje etalonskog barometra. Postupak umjeravanja etalonskog barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi DHI izvršeno je 30. 10. 2024. po smjernicama iz EURAMET CG-3.

Tablica 2. Karakteristike barometra Ruska

Barometar Ruska	
PROIZVOĐAČ	Ruska
TVORNIČKI BROJ (serijski broj)	L0128 (43153)
TIP	6220
MJERNO PODRUČJE	0 mbar – 2600 mbar
VLASNIK	LPM-FSB
LABARATORIJSKA OZNAKA	TLPRE-09
PODJELA MJERNE SKALE	0,01 mbar
MJERNA JEDINICA	mbar (hPa)

Barometar Ruska je u vlasništvu LPM-FSB riječ je o elektroničkom digitalnom mjerilu tlaka sa rezolucijom od **0,01 mbar** interne oznake TLPRE-09. Mjerno područje Ruska barometra je u rasponu od **0** do **2600 mbar**. U ovome radu barometar Ruska će poslužiti kao etalonski barometar za umjeravanje barometara u vakuumsko-tlačnoj komori, no i njega je prije toga potrebno umjeriti pa će za to poslužiti plinska tlačna vaga čiji je proces umjeravanja prethodno objašnjen.



Slika 14. Barometar Ruska

Oprema za umjeravanje postavljena je u skladu sa zahtjevima za umjeravanje etalonskog barometra na plinskoj tlačnoj vagi po preporukama EURAMET CG-17. Uzevši u obzir mjerno područje umjeravanog barometra Ruska određeno je da će se uređaj umjeravati na područje tlaka od **100 do 2600 mbar**, s korakom između točaka od **300 mbar** što je ukupno 9 točaka po slijedu mjerenja. Kako bi se pokrilo cijelo područje mjerenja umjeravanog barometra korak između predzadnje i zadnje točke je **400 mbar**. Plinska tlačna vaga se prvo testirala na nepropuštanje tako što je narinut maksimalan tlak koji će se mjeriti od **2600 mbar** kojeg je uspješno zadržala dvije minute. Time se utvrdilo da je sustav nepropustan i pristupilo se samom procesu umjeravanja. Konstrukcija plinske tlačne vage je takva da je za svaku točku umjeravanja potrebno otvoriti plinsku tlačnu vagu zatim ručno postaviti utege odgovarajuće težine na klip i nakon toga postaviti stakleno zvono kako bi zatvorili plinsku tlačnu vagu.



Slika 15. Utezi za plinsku tlačnu vazu



Slika 16. Otvorena/zatvorena plinska tlačna vaga

Kada se plinska tlačna vaga zatvorila potrebno je evakuirati zrak koji se nalazi ispod staklenog zvona. Evakuacija zraka ispod staklenog zvona vrši se trima pumpama. Uljna pumpa služi za evakuaciju zraka u području grubog vakuuma, a kad se on postigne uljna pumpa se gasi. Nakon nje evakuaciju preuzima membranska i turbomolekularna pumpe koje dovodi tlak pod staklenim zvonom do područja srednjeg vakuuma.

Pri korištenju membranske i turbomolekularne pumpe potrebno je prespojiti cijev uljne pumpe kako ne bi došlo do otjecanja zaostalog ulja, iz uljne pumpe, u cijevi membranske i turbomolekularne pumpe.



Slika 17. Pumpe za evakuaciju zraka pod staklenim zvonom

Nakon evakuacije zraka pod staklenim zvonom pumpama, regulacijom tlaka plina dušika postiže se plutanje klipa i cilindra tako da se uravnoteže mase utega na stapu i tlak plina dušika koji je u cilindru.



Slika 18. Regulator tlaka plina dušika plinske tlačne vage

Kada se postigne ravnoteža sklopa klipa/cilindra plinske tlačne vage potrebno je očitati vrijednost tlaka koji je bio potreban za uravnoteženje mase utega. Plinska tlačna vaga ima svoj uređaj za očitavanje toga tlaka i prikazan je na slici ispod.



Slika 19. Digitalni pokazivač tlaka plina dušika

Kada se sustav stabilizira nakon pola minute bilježe se rezultati koje pokazuju mjerni uređaji. Digitalni pokazivač plinske tlačne vage pokazuje tlak etalona, p_e , u ovom slučaju tlak plina dušika i temperaturu, t_s , sklopa klipa/cilindra. Tlak etalona, p_e , u sebi već sadrži korekciju zbog promjene efektivne površine, A_{ef} , spoja klipa/cilindra i tlak zaostalog zraka pod staklenim zvonom, μ . Tako da u ovom slučaju uređaj sam mjeri apsolutni tlak, p_{abs} , koji odgovara vrijednosti tlaka etalona, p_e .

Očitanje zaostalog tlaka pod staklenim zvonom vidljivo je na Piranijevom uređaju prikazanom na slici ispod.



Slika 20. Piranijev uređaj koji mjeri tlak zaostalog zraka pod staklenim zvonom

Nakon provedena četiri niza mjerenja u svakom po 9. točaka dobiveni su sljedeći rezultati. Temperatura okolišnog tlaka je bila konstantno 24 °C.

Tablica 3. Očitane veličine pri umjeravanju barometra Ruska

Točka	Tlak etalona (tlačne vage) p_e [mbar]	Tlak barometra p_e [mbar] Uzlazni	Tlak barometra p_e [mbar] Silazni	Tlak barometra p_e [mbar] Uzlazni	Tlak barometra p_e [mbar] Silazni	Srednja tlak p_m [mbar]	Temperatura spoja klip/cilindar t_s [°C]	Zaostali tlak μ [Pa]	Masa utega m [kg]
1.	100,020	99,9	99,85	99,85	99,85	99,86	24,1	0,86	0,2
2.	400,060	400,03	399,88	400,02	399,89	399,96	24,2	0,84	3,2
3.	700,099	700,01	699,92	699,81	699,86	699,90	24,3	0,72	6,2
4.	1000,139	1000,02	999,99	999,93	1000,01	999,99	24,3	0,79	9,2
5.	1300,178	1299,99	1300,03	1299,92	1300,03	1299,99	24,4	0,83	12,2
6.	1600,216	1600,04	1600,03	1600,03	1600,04	1600,04	24,4	0,79	15,2
7.	1900,225	1900,05	1900,08	1900,03	1900,06	1900,06	24,4	0,83	18,2
8.	2200,295	2200,06	2200,07	2200,05	2200,07	2200,06	24,4	0,81	21,2
9.	2600,345	2600,02	2600,02	2600,03	2600,03	2600,03	24,5	0,75	25,2

Iz očitanih podataka odredi se:

- odstupanje koje je jednako razlici srednjeg tlaka, p_m , kojeg mjeri umjeravani barometar i tlaka etalona, p_e
- ponovljivost, b , koja predstavlja apsolutnu vrijednost maksimalne razlike uzlaznih ili silaznih sljedova
- histereza, h , koja je razlika tlakova umjeravanog barometra u silaznoj i uzlaznoj seriji

- nesigurnost umjeravanja, U , je parametar koji se pripisuje rezultatu mjerenja i predstavlja raspon vrijednosti koje je moguće dodijeliti rezultatu mjerenja

Tablica 4. Izračunati podaci za barometar Ruska

Točka	Odstupanje $p_m - p_e$ [mbar]	Ponovljivost b [mbar]	Histereza h [mbar]	Nesigurnost umjeravanja U [mbar]
1.	-0,160	0,050	0,025	0,044
2.	-0,100	0,010	0,140	0,089
3.	-0,199	0,200	0,070	0,132
4.	-0,149	0,090	0,055	0,088
5.	-0,188	0,070	0,075	0,098
6.	-0,176	0,010	0,010	0,095
7.	-0,195	0,020	0,030	0,113
8.	-0,235	0,010	0,015	0,127
9.	-0,315	0,010	0,000	0,149

Faktori koji utječu na izračun mjerne nesigurnosti bit će detaljnije opisani.

5.1. Mjerna nesigurnost:

Mjerna nesigurnost, U , je parametar koji se pripisuje rezultatu mjerenja i predstavlja raspon vrijednosti koje je moguće dodijeliti rezultatu mjerenja. U ovome radu mjerna nesigurnost će se računati po smjernicama koje je propisao DKD u dokumentu **DKD-R6-1**. Na proširenu mjernu nesigurnost utječe izmjereni tlak etalona koji uzrokuje mjernu nesigurnost etalona, izmjereni tlak umjeravanog barometra koji uzrokuje mjerna nesigurnost umjeravanog barometra i razlika tlakova zbog metode koja se koristi pri umjeravanju koja uzrokuje mjernu nesigurnost metode umjeravanja.

$$\Delta p = p_M - p_e + \delta p_V \quad (4)$$

$$U = k \cdot \sqrt{u_M^2 + u_e^2 + u_V^2} \quad (5)$$

k – faktor prekrivanja (prema DKD-R 6-1 odabran je $k=2$)

u_M – standardna mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila (barometar)

u_e – standardna mjerna nesigurnost etalona (tlačna vaga)

u_V – standardna mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja

Pod mjernom nesigurnosti etalona, u_e , podrazumijeva se mjerna nesigurnost zbog mjerne nesigurnosti uređaja na kojem se etalon umjeravao u ovom slučaju je to mjerna nesigurnost tlačne vage te ona iznosi $0,5 \cdot 10^{-4} \cdot p_{ei}$. Uz to etalon ukupnoj mjernoj nesigurnosti pridonosi i reakcijom etalona na uvjete pri kojima se etalon koristi te se ona računaj prema $2 \cdot 1,1 \cdot p_{ei} \cdot f_{to}$. Izmjereni tlak u zadanoj točki i predstavlja veličinu p_{ei} , a f_{to} je faktor utjecaja nejednolikosti temperature okoline i za ova mjerenja će iznositi 1, odnosno neće utjecati na mjernu nesigurnost.

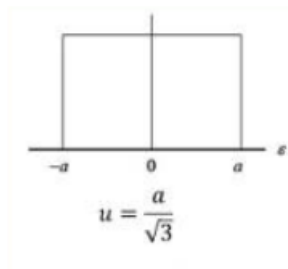
Mjernu nesigurnost mjerila, u_M , čine mjerna nesigurnost: rezolucija mjerila, temperaturne ovisnosti komponenata, vremena umjeravanja, visinske razlike i odstupanja od nultočke. Utjecaj nesigurnosti mjerila zbog temperaturne ovisnosti komponenata, vremena umjeravanja i visinske razlike je zanemariva te se one neće uzimati u obzir u ovome radu.

Mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja, u_v , u sebi sadrži mjernu nesigurnost zbog ponovljivosti i histereze. Ponovljivost predstavlja veličinu koja nam govori kolika je razlika očitanoa tlaka između dva ista bilo uzlazna ili silazna niza prilikom umjeravanja. Dok histereza pokazuje razliku u očitaniu tlaka između uzlaznog i silaznog niza pri umjeravanju.

Kada se raspiše mjerna nesigurnost U ona izgleda ovako:

$$U = k \sqrt{u_{\text{etalon}}^2 + u_{\text{ispitivanje}}^2 + u_{\text{razlučivost}}^2 + u_{\text{nultočka}}^2 + u_{\text{ponovljivost}}^2 + u_{\text{histereza}}^2} \quad (6)$$

Mjerna nesigurnost, U , najbolje je opisana pravokutnom razdiobom vjerojatnosti. Gdje je vrijednost ograničena svojom gornjom a^+ i donjom a^- vrijednošću, a jednaka je vjerojatnost za pojavu bilo koje vrijednosti između tih granica.



Slika 21. Pravokutna razdioba vjerojatnosti

Dakle standardna mjerna nesigurnost, u_i , za svaki parametar će biti ovisna o nekom ulaznom podatku a .

5.1.1. Barometar Ruska:

Ulazni podaci dani su u tablici 4. ili izračunati po prethodno raspisanim formulama. U tablici ispod prikazani su podaci korišteni za računanje proširene mjerne nesigurnosti barometra Ruska u točki 1. Na tlačnoj vagi očitana je vrijednost tlaka od **100,02 mbar** koja u ovom slučaju predstavlja tlak etalona u prvoj točki gdje je nazivni tlak **100 mbar**. U točki 1. osrednjeni tlak za sva četiri slijeda mjerenja iznosi **99,86 mbar**. Točka 1. je nultočka ovoga umjeravanja i kao takva će se uzeti u obzir pri izračunu mjerne nesigurnosti koja je rezultat odstupanja od nultočke u narednim točkama umjeravanja.

Tablica 5. Mjerna nesigurnost u točki 1. barometra Ruska

Točka 1. $p_{e1}=100,020$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,005001	2	0,0025	0,00000625
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,00220044	$\sqrt{3}$	0,00127	0,00000161
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Histereza	0,025	$2\sqrt{3}$	0,00722	0,00005209
			Σu^2	0,0048503
			$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$	0,044

Iz tablice za točku 1. vidljivo je da je najveći doprinos proširenoj mjernoj nesigurnosti uzrokovan zbog mjerne nesigurnosti nultočke i ponovljivosti mjerenja u točki 1.

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati umjeravanja barometra Ruska u točki 2. u kojoj je nazivni tlak **400 mbar**. Plinska tlačna vaga u 2. točki očitava tlak etalona od **400,06 mbar**, a osrednjeni tlak na umjeravanom barometru Ruska za sva četiri slijeda mjerenja iznosi **399,96 mbar**.

Tablica 6. Mjerna nesigurnost u točki 2. barometra Ruska

Točka 2. $p_{e2}=400,060$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,020003	2	0,01	0,00010003
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,00880132	$\sqrt{3}$	0,00508	0,00002582
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultocke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Histereza	0,140	$2\sqrt{3}$	0,04042	0,00163361
Σu^2				0,00198451
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,089

Iz tablice za točku 2. vidljivo je da proširenoj mjernoj nesigurnosti najviše pridonose mjerne nesigurnosti uzrokovane histerezom te odstupanjem u nultocki.

Situaciju pri umjeravanju barometra Ruska u točki 3. prikazuje tablica ispod. Nazivni tlak u točki 3. je **700 mbar**. Osrednjeni tlak za sva četiri niza mjerenja iznosi **699,90 mbar**, dok je plinska tlačna vaga izmjerila tlak od **700,099 mbar**.

Tablica 7. Mjerna nesigurnost u točki 3. barometra Ruska

Točka 3. $p_{e3}=700,099$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,03500495	2	0,0175	0,00030634
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,001540218	$\sqrt{3}$	0,00889	0,00007908
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,20	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,070	$2\sqrt{3}$	0,02021	0,00040840
Σu^2				0,00434443
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,132

Iz prethodne tablice vidljivo je da proširenoj mjernoj nesigurnosti u točki 3. najviše doprinose mjerne nesigurnosti zbog ponovljivosti mjerenja i odstupanja nultočke.

Tablica ispod prikazuje podatke izmjerene pri umjeravanju barometra Ruska u točki 4. gdje je nazivni tlak **1000 mbar**. Norma propisuje da pri umjeravanju barometara jedna točka mora biti na **1000 mbar** pa je to uzeto u obzir pri određivanju nazivnih tlakova u točkama umjeravanja. Tlačna vaga u točki 4. mjeri etalonski tlak od **1000,139 mbar**, dok osrednjeni tlak za sva četiri slijeda mjerenja iznosi **1000,01 mbar**.

Tablica 8. Mjerna nesigurnost u točki 4. barometra Ruska

Točka 4. $p_{e4}=1000,139$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,05000695	2	0,025	0,00062517
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,02200306	$\sqrt{3}$	0,0127	0,00016139
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,09	$2\sqrt{3}$	0,02598	0,00067512
Histereza	0,055	$2\sqrt{3}$	0,01588	0,00025213
Σu^2				0,00193051
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,088

Iz gornje tablice za umjeravanje barometra Ruska u točki 4. vidljivo je da najveći doprinos proširenoj mjernoj nesigurnosti daju mjerne nesigurnosti zbog ponovljivosti, histereze i odstupanja nultočke.

U sljedećoj tablici prikazani su podaci bitni za izračun mjerene nesigurnosti pri umjeravanju barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi u točki 5. gdje je nazivni tlak **1300 mbar**. Tlak etalona u ovom slučaju plinske tlačne vage u točki 5. je **1300,178 mbar**, a osrednjena vrijednost u sva četiri slijeda mjerenja na umjeravanom barometru Ruska iznosi **1299,99 mbar**.

Tablica 9. Mjerna nesigurnost u točki 5. barometra Ruska

Točka 5. $p_{e5}=1300,178$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,0650089	2	0,0325	0,00105654
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,02860392	$\sqrt{3}$	0,01652	0,00027275
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,07	$2\sqrt{3}$	0,02021	0,00040840
Histereza	0,075	$2\sqrt{3}$	0,02165	0,00046883
Σu^2				0,00242322
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,098

Iz gornje tablice vidljivo je da proširenoj mjernoj nesigurnosti u točki 5. značajno pridonose mjerne nesigurnosti uzrokovane histerezom, ponovljivosti i odstupanja nultočke.

Ispod se nalazi tablica s podacima za izračun mjerne nesigurnosti u točki 6. gdje je nazivni tlak **1600 mbar**. Plinska tlačna vaga pokazuje etalonski tlak **1600,216 mbar**, a osrednjena vrijednost tlaka izračunata za sva četiri slijeda mjerenja barometra Ruska u točki 6. iznosi **1600,04 mbar**.

Tablica 10. Mjerna nesigurnost u točki 6. barometra Ruska

Točka 6. $p_{e6}=1600,216$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,0800108	2	0,04001	0,00160043
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0352047	$\sqrt{3}$	0,02033	0,00041315
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Histereza	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Σu^2				0,00224696
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,095

Iz tablice za izračun mjerne nesigurnosti u točki 6. vidljivo je da značajan doprinos proširenoj mjernoj nesigurnosti daje mjerna nesigurnost uzrokovana etalomom.

Sljedeća tablica prikazuje podatke pri umjeravanju barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi u točki 7. pri nazivnom tlaku od **1900 mbar**. Plinska tlačna vaga u točki 7. mjeri etalonski tlak od **1900,255 mbar**, a osrednjena vrijednost tlaka za sva četiri niza mjerenja barometra Ruska iznosi **1900,06 mbar**.

Tablica 11. Mjerna nesigurnost u točki 7. barometra Ruska

Točka 7. $p_{e7}=1900,255$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,09501275	2	0,04751	0,00225686
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,04180561	$\sqrt{3}$	0,02414	0,00058261
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,00577	0,00003334
Histereza	0,03	$2\sqrt{3}$	0,00866	0,00007501
Σu^2				0,00316452
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,113

Iz priložene tablice vidljivo je da proširenoj mjernoj nesigurnosti u točki 7. najviše pridonose mjerne nesigurnosti uzrokovane etalomom kao njegova mjerna nesigurnost i uvjetima etalona pri umjeravanju te mjerna nesigurnost uzrokovana odstupanjem od nultočke.

Tablica ispod prikazuje podatke za izračun ukupne mjerne nesigurnosti u točki 8. pri umjeravanju barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi pri nazivnom tlaku od **2200 mbar**. Plinska tlačna vaga u točki 8. mjeri etalonski tlak od **2200,295 mbar**, dok osrednjena vrijednost tlaka za sva četiri slijeda mjerenja na barometru Ruska iznosi **2200,06 mbar**.

Tablica 12. Mjerna nesigurnost u točki 8. barometra Ruska

Točka 8. $p_{e8}=2200,295$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,11001475	2	0,05501	0,00302581
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,04840649	$\sqrt{3}$	0,02795	0,00078112
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Histereza	0,015	$2\sqrt{3}$	0,00433	0,00001875
Σu^2				0,00405072
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,127

U točki 8. proširenoj mjernoj nesigurnosti najviše pridonose mjerne nesigurnosti etalona i uvjeti ispitivanja koji utječu na etalon te odstupanje od nultočke.

Tablica za točku 9. prikazuje podatke pri umjeravanju barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi pri nazivnom tlaku **2600 mbar**. Plinska tlačna vaga mjeri etalonski tlak od **2600,343 mbar**, a osrednjena vrijednost tlaka za sva četiri slijeda mjerenja na barometru Ruska iznosi **2600,03 mbar** u točki 9.

Tablica 13. Mjerna nesigurnost u točki 9. barometra Ruska

Točka 9. $p_{e9}=2600,343$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,13001725	2	0,06501	0,00422612
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,05720759	$\sqrt{3}$	0,03303	0,00109098
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Odstupanje od nultočke	0,05	$2\sqrt{3}$	0,01444	0,00020837
Ponovljivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,00289	0,00000833
Histereza	0,000	$2\sqrt{3}$	0,00000	0,00000000
Σu^2				0,00554214
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,149

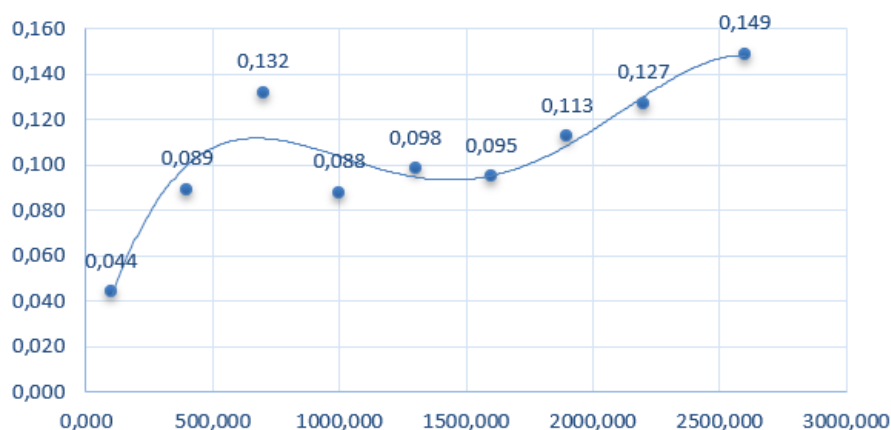
Iz gornje tablice vidljivo je da proširenoj mjernoj nesigurnosti u točki 9. barometra Ruska najviše pridonose mjerne nesigurnosti etalona i uvjeta pri ispitivanju koji utječu na etalon te odstupanje od nultočke.

5.2. Analiza proširene mjerne nesigurnosti barometra Ruska:

Tablica 14. Proširena mjerna nesigurnost barometra Ruska

Točka	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Ukupna mjerna nesigurnost U [mbar]	0,044	0,089	0,132	0,088	0,098	0,095	0,113	0,127	0,149

Odnos nazivnog tlaka i mjerne nesigurnosti



Slika 22. Graf odnosa nazivnog tlaka i proširene mjerne nesigurnosti barometra Ruska

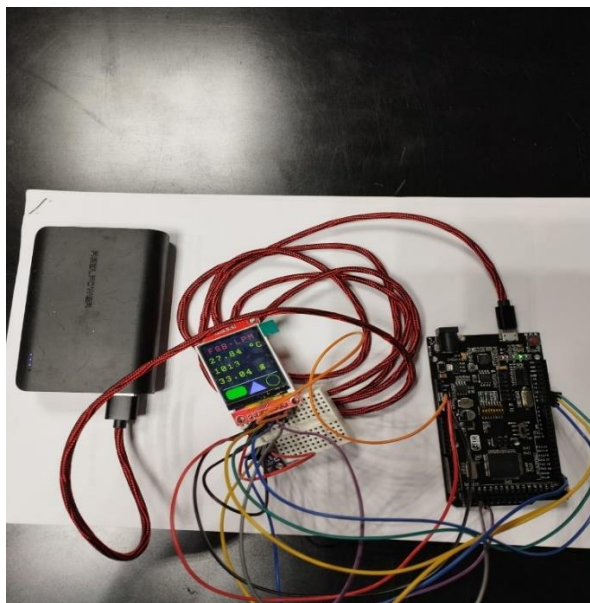
Iz grafa je vidljivo da proširena mjerna nesigurnost barometra Ruska ima tendenciju rasta s povećanjem nazivnog tlaka. To je posljedica toga što je mjerna nesigurnost etalona za ovaj slučaj plinske tlačne vage funkcija tlaka $0,5 \cdot 10^{-4} \cdot p$ te ona s povećanjem nazivnog tlaka u točkama umjeravanja sve više pridonosi ukupnoj mjernoj nesigurnosti. Ostale mjerne nesigurnosti su neovisne o tlaku i njihov iznos ovisi od točke do točke no uvijek je istog reda veličine. Lokalni maksimum u priloženom grafu za točku 3. pri nazivnom tlaku od **700 mbar** uzrokovan je skokom mjerne nesigurnosti zbog ponovljivosti u toj točki. Podaci su interpolirani kako bi se mogli koristiti pri umjeravanju barometara u vakuumsko-tlačnoj komori.

6. PROCES UMJERAVANJA BAROMETARA BOSCH I TESTO U VAKUUMSKO-TLAČNOJ KOMORI ETALONSKIM BAROMETROM RUSKA:

Zadatak ovog dijela rada je eksperimentom izmjeriti mjernu nesigurnost barometara **BOSCH BME 280** i **TESTO 176P1** u području apsolutnog tlaka od **500** do **2000 mbar**. Postupak je proveden 14. 11. 2024. po smjernicama iz dokumenta EURAMET CG-17 po kojima je proveden i postupak umjeravanja etalonskog barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi, a mjerna nesigurnost izračunata postupkom koji je bio korišten pri izračunu mjerne nesigurnosti barometra Ruska, a opisan je u dokumentu **DKD-R6-1**. Kako su ti postupci već obrađeni u prošleme poglavlju neće se ponovno objašnjavati.

Tablica 15. Karakteristike barometra BOSCH

Barometar BOSCH BME 280	
PROIZVOĐAČ	BOSCH
TVORNIČKI BROJ (serijski broj)	GYBMEP
TIP	BME 280
MJERNO PODRUČJE	300 mbar – 1100 mbar
VLASNIK	LPM-FSB
LABARATORIJSKA OZNAKA	-
PODJELA MJERNE SKALE	0,01 mbar
MJERNA JEDINICA	mbar (hPa)



Slika 23. Barometar BOSCH

Barometar BOSCH nema vlasti izvor napajanja već je osmišljen sustav napajanja kojim je na njega spojena baterija. Uz tlak električni barometri imaju sposobnost mjerenja vlažnosti i temperature.

Tablica 16. Karakteristike barometra TESTO

Barometar TESTO 176P1	
PROIZVOĐAČ	TESTO
TVORNIČKI BROJ (serijski broj)	41002889 0721
TIP	176P1
MJERNO PODRUČJE	600 mbar – 1100 mbar
VLASNIK	LPM-FSB
LABARATORIJSKA OZNAKA	TEOKO10
PODJELA MJERNE SKALE	0,1 mbar
MJERNA JEDINICA	mbar (hPa)

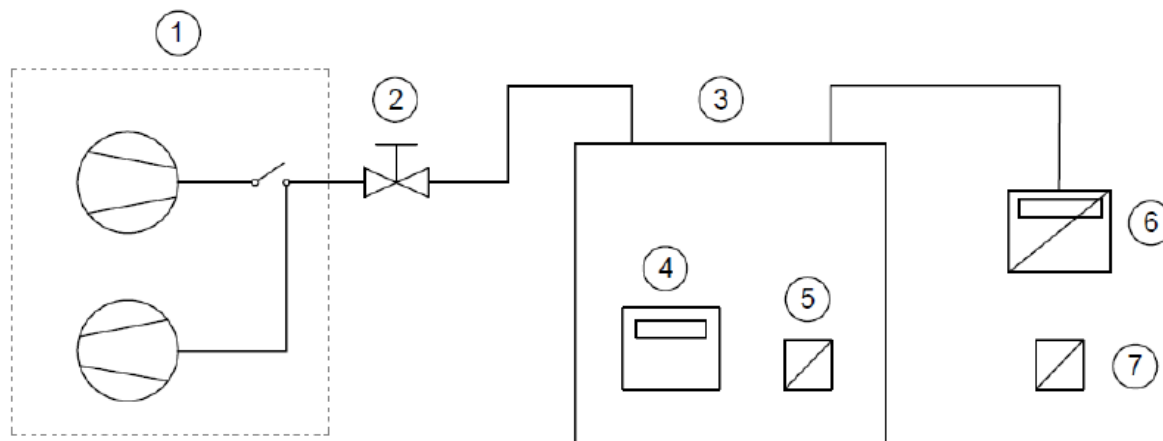
Iz specifikacija barometara vidljivo je da barometar BOSCH ima rezoluciju za red veličine veću od barometra TESTO. Iz te činjenice proizlazi pretpostavka da će mjerna nesigurnost barometra TESTO biti veća od barometra BOSCH.



Slika 24. Barometar TESTO

Barometar Ruska čiji je postupak umjeravanja pokazan u prethodnom poglavlju koristit će se kao etalonski barometar u ovome poglavlju. Mjerna nesigurnost etalonskog barometra Ruska poznata je za devet točaka u području tlaka od **100 do 2600 mbar**. Kako bi dobili mjernu nesigurnost etalonskog barometra za točke umjeravanja barometara u vakuumsko-tlačnoj komori interpolirat će se podatci mjerne nesigurnosti točaka pri kojima je umjeravan etalonski barometar. Barometar BOSCH namijenjen je za mjerenje tlaka u području od **300 do 1100 mbar**, a barometar TESTO ima sposobnost mjerenja tlaka od **600 do 1100 mbar**. Da bi se moglo napraviti istovremeno umjeravanje u vakuumsko-tlačnoj komori oba barometra odabrano je područje umjeravanja od **650 do 1100 mbar**. Područje umjeravanja barometara podijeljeno je na 10 točaka s korakom od **50 mbar**. Za umjeravanje barometara u vakuumsko-tlačnoj komori korištena je procedura C koja se sastoji od dva slijeda umjeravanja rastućeg i padajućeg.

Uz etalonski barometar Ruska, umjeravane barometre BOSCH i TESTO mjerna linija još ima vakuumsko-tlačnu komoru, vakuumsko-tlačnu pumpu s regulacijskim ventilom, vanjski i unutarnji termometar.



- | | |
|---------------------------|------------------------|
| ① Vakuumsko tlačna pumpa | ⑤ Unutarnji termometar |
| ② Regulacijski ventil | ⑥ Etalonsko mjerilo |
| ③ Vakuumsko tlačna komora | ⑦ Vanjski termometar |
| ④ Ispitivano mjerilo | |

Slika 25. Shema mjerne linije

Vakuumsko-tlačna komora i pumpa su komponente istoga sustava za generiranje vakuuma i blagog pretlaka proizvođača Kambić. U komori se generira vakuum ili tlak vakuumsko-tlačnom pumpom koja je spojena cijevima na komoru preko klapne s brtvom kako bi se spriječio povrat zraka nakon što se pumpa isključi. Regulacijskim ventilom koji se nalazi na pumpi upravlja se radom pumpe. Kako se pri mjerenju ne bi prekoračila propisana brzina mijenjanja tlaka od točke do točke regulacijski ventil je otvoren tijekom rada pumpe sve dok u komori nije postignut tlak od **780 mbar**, nakon toga ventil je potrebno potpuno zatvoriti za postizanje dubljeg vakuuma.



Slika 26. Vakuumsko-tlačna pumpa Kambič

Komora je masivnog dizajna sa staklenim vratima koja se zatvaraju mehaničkim mehanizmom s navojem i polugom, a propuštanje sprječava brtva. Sa zadnje strane komore nalazi se sigurnosti ventil i priključak cijevi s pumpe.



Slika 27. Vakuumsko-tlačna komora Kambič

Specifikacije vakuumsko-tlačne komore dane su u tablici ispod.

Tablica 17. Karakteristike vakuumsko-tlačne komore Kambič

Vakuumsko-tlačna komora Kambič	
PROIZVOĐAČ	Kambič
MODEL	VTK-02
PODRUČJE RADNOG TLAKA	500 mbar – 1300 mbar
VLASNIK	LPM-FSB
VANJSKE DIMENZIJE (mm)	600x565x450
UNUTARNJE DIMENZIJE (mm)	500x400x300

Prije početka umjeravanja potrebno je provjeriti nepropusnost sustava. Za provjeru nepropusnosti komore narinut je tlak od **1100 mbar** te nakon dvije minute nije zabilježeno popuštanje. Proveden je postupak ispitivanja najnižeg tlaka koji komora može podnijeti, ustanovljeno je da komora bez problema trpi tlak od **483 mbar** što je i bolje od propisanog tlaka u specifikacijama koji iznosi **500 mbar**. Nakon toga barometri se stavljaju u vakuumsko-tlačnu komoru te se ona zatvara preko poluge s navojem koji se zateže dok brtva na vratima dozvoljava zatezanje. Nakon toga tlak unutar komore spušta se na tlak ispod **650 mbar** te započinje umjeravanje uzlaznim nizom na točki 1. kojoj je nazivni tlak **650 mbar** svaka sljedeća točka je za **50 mbar** veća. Uzlazni slijed završava s točkom 10. nazivnog tlaka **1100 mbar**, te nakon njega slijedi padajući slijed istog koraka do tlaka od **650 mbar**. Za svaku točku potrebno je očitati izmjerene podatke kako bi se oni mogli analizirati pri umjeravanju barometara. Podaci se očitavaju nakon što se tlak u sustavu uravnoteži.

6.1. Mjerna nesigurnost:

Postupak za određivanje mjerne nesigurnosti pri umjeravanju barometara **BOSCH BME 280** i **TESTO 176P1** isti je onome koji se koristio u prošleme poglavlju pri umjeravanju etalonskog barometra Ruska na plinskoj tlačnoj vagi DHI. Kako se pri ovome umjeravanju koristi C procedura koja ima samo jedan uzlazni i jedan silazni slijed potrebno je osmisliti princip po kojemu će se računati ponovljivost, *b*. Za izračun ponovljivosti nakon provedenog umjeravanja ponovno se narinuo tlak od **1000 mbar** te ga se usporedilo s točkom 8. u prvom slijedu pri kojem se uzlazno išlo od točke do točke. Temperatura je bila konstantna oko 24 °C.

Tablica 18. Izmjereni podatci za etalonski barometar Ruska

Točka	Nazivni tlak p_n [mbar]	Tlak etalona p_{eu} [mbar] Uzlazni	Tlak etalona p_{es} [mbar] Silazni	Srednja tlak etalona p_{em} [mbar]
1.	650	649,96	650,01	649,985
2.	700	699,92	700,01	699,965
3.	750	750,02	750,01	750,015
4.	800	799,04	800,03	799,535
5.	850	850,00	850,03	850,015
6.	900	899,91	900,06	899,985
7.	950	949,98	950,09	950,035
8.	1000	999,99	1000,06	1000,025
9.	1050	1050,07	1050,04	1050,055
10.	1100	1100,02	1100,4	1100,210

U tablici iznad prikazani su podaci za etalonski barometar Ruska pri umjeravanju za uzlazni i silazni slijed. U daljnjoj analizi za tlak etalona po točkama gledat će se izračunati srednji tlak etalona.

6.1.1. Barometar BOSCH:

Specifikacije barometra **BOSCH BME 280** dane su u prošlom poglavlju. Ispod se nalazi tablica s očitanim podacima pri umjeravanju barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori koristeći se etalonskim barometrom Ruska.

Tablica 19. Izračunati podaci za barometar BOSCH BME 280

Točka	Nazivni tlak p_n [mbar]	Srednja tlak etalona p_{em} [mbar]	Tlak barometra BOSCH p_u [mbar] Uzlazni	Tlak barometra BOSCH p_s [mbar] Silazni	Srednja tlak barometra BOSCH p_m [mbar]	Odstupanje $p_m - p_e$ [mbar]	Ponovljivost b [mbar]	Histereza h [mbar]
1.	650	649,985	650,81	650,83	650,820	0,835	0,02	0,02
2.	700	699,965	700,88	700,98	700,930	0,965	0,02	0,10
3.	750	750,015	751,05	751,08	751,065	1,050	0,02	0,03
4.	800	799,535	801,06	801,25	801,155	1,620	0,02	0,19
5.	850	850,015	851,17	851,30	851,235	1,220	0,02	0,13
6.	900	899,985	901,08	901,34	901,210	1,225	0,02	0,26
7.	950	950,035	951,20	951,4	951,300	1,265	0,02	0,20
8.	1000	1000,025	1001,10	1001,33	1001,215	1,190	0,02	0,23
9.	1050	1050,055	1051,10	1051,17	1051,135	1,080	0,02	0,07
10.	1100	1100,210	1100,91	1100,96	1100,935	0,725	0,02	0,05

U ovom slučaju postoji samo uzlazni i silazni niz pa se za potrebe izračuna ponovljivosti ponovilo mjerenje za **1000 mbar** gdje je izmjeren tlak na BOSCH barometru od **1001,12 mbar**. Kako je ponovljivost, b , apsolutna vrijednost razlike istih vrijednosti nazivnih tlakova na uzlaznim ili silaznim nizovima, u ovom slučaju će se ponovljivost uzeti u obzir kao razlika rezultata mjerenja uzlaznog niza u točki 8. i ponovljenog mjerenja na 1000 mbar.

Ponovljivost, b , će biti konstantna za sve točke i iznositi će **0,02 mbar** za umjeravanje BOSCH barometra. Kako u proceduri C ne postoji izračun ponovljivosti za svaku točku posebno tako neće biti uzeta u obzir ni mjerna nesigurnost uvjetovana odstupanjem od nultočke. Dakle na ukupnu mjernu nesigurnost barometra utjecat će mjerna nesigurnost etalona, uvjeta pri ispitivanju, razlučivosti umjeravanog barometra, ponovljivosti i histereze.

U tablici ispod nalaze se podaci za barometar BOSCH pri umjeravanju u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 1. pri nazivnom tlaku **650 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska za točku 1. iznosi **649.985 mbar**, dok je srednji tlak očitani s barometra BOSCH **650,82 mbar**.

Tablica 20. Mjerna nesigurnost u točki 1. barometra BOSCH

Točka 1. $p_{e1}=649,985$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1152583	2	0,057629	0,00332112
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0142997	$\sqrt{3}$	0,008256	0,00006816
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Σu^2				0,00346430
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,118

Iz analize gornje tablice vidljivo je da na proširenu mjernu nesigurnost u točki 1. najviše utječe mjerna nesigurnost etalona.

U sljedećoj tablici prikazani su podaci pri umjeravanju barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 2. nazivnog tlaka **700 mbar**. Etalonski barometar Ruska u točki 2. mjeri srednji tlak od **699,965 mbar**, dok je osrednjena vrijednost umjeravanog barometra BOSCH za oba slijeda **700,930 mbar**.

Tablica 21. Mjerna nesigurnost u točki 2. barometra BOSCH

Točka 2. $p_{e2}=699,965$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1152385	2	0,057619	0,00331998
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0153992	$\sqrt{3}$	0,008891	0,00007905
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,10	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Σu^2				0,00427418
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,131

U točki 2. proširenoj mjernoj nesigurnosti barometra BOSCH najviše pridonosi mjerna nesigurnost etalona i mjerna nesigurnost histereze.

Tablica ispod prikazuje izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 3. nazivnog tlaka **750 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska je **750,015 mbar**, a srednja vrijednost tlaka umjeravanog barometra BOSCH **751,065 mbar**.

Tablica 22. Mjerna nesigurnost u točki 3. barometra BOSCH

Točka 3. $p_{e2}=750,015$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1147017	2	0,057351	0,00328912
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0165003	$\sqrt{3}$	0,009527	0,00009076
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,03	$2\sqrt{3}$	0,008661	0,00007501
Σu^2				0,00349657
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,118

Iz gornje tablice je vidljivo da proširena mjerna nesigurnost umjeravanog barometra BOSCH u točki 3. najviše ovisi o mjernoj nesigurnosti etalonskog barometra Ruska.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska za točku 4. nazivnog tlaka **800 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska je **799,535 mbar**, a srednji tlak umjeravanog barometra BOSCH **801,155 mbar**.

Tablica 23. Mjerna nesigurnost u točki 4. barometra BOSCH

Točka 4. $p_{e4}=799,535$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1137587	2	0,056879	0,00323526
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0175898	$\sqrt{3}$	0,010156	0,00010314
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,19	$2\sqrt{3}$	0,054853	0,00300885
Σu^2				0,00638893
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,160

Pri umjeravanju barometra BOSCH u točki 4. njegovoj proširenoj mjernoj nesigurnosti najviše pridonosi mjerna nesigurnost etalona i histereze što je vidljivo iz gornje tablice.

U tablici ispod prikazani su podaci točke 5. za izračun ukupne mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska pri nazivnim tlaku **850 mbar**. U toči 5. srednji tlak etalonskog barometra Ruska je **850,015 mbar**, dok je osrednjen tlak umjeravanog barometra BOSCH za oba slijeda 851,235 **mbar**.

Tablica 24. Mjerna nesigurnost u točki 5. barometra BOSCH

Točka 5. $p_{e5}=850,015$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1124698	2	0,056235	0,00316236
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0187003	$\sqrt{3}$	0,010797	0,00011658
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,13	$2\sqrt{3}$	0,037531	0,00140858
Σu^2				0,00472919
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,138

Iz tablice za izračun proširene mjerne nesigurnosti barometra BOSCH u točki 5. vidi se da najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost etalona i histereze.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 6. nazivnog tlaka **900 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska je **899,985 mbar**, a srednji tlak umjeravanog barometra BOSCH **901,210 mbar**.

Tablica 25. Mjerna nesigurnost u točki 6. barometra BOSCH

Točka 6. $p_{e6}=899,985$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1109558	2	0,055478	0,00307780
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0197997	$\sqrt{3}$	0,011432	0,00013068
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,26	$2\sqrt{3}$	0,075062	0,00563430
Σu^2				0,00888446
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,189

Iz gornje tablice vidi se da na proširenu mjernu nesigurnost barometra BOSCH u točki 6. najviše utječe mjerna nesigurnost uzrokovana histerezom i etalomom.

Iduća tablica prikazuje podatke za izračun proširene mjerne nesigurnosti umjeravanog barometara BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom ruska u točki 7. pri nazivnom tlaku **950 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska iznosi **950,035 mbar**, a srednji tlak umjeravanog barometra BOSCH iznosi **951,300 mbar** u točki 7.

Tablica 26. Mjerna nesigurnost u točki 7. barometra BOSCH

Točka 7. $p_{e7}=950,035$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1092837	2	0,054642	0,00298573
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0209008	$\sqrt{3}$	0,012067	0,00014562
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,20	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Σu^2				0,00650694
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,161

Iz priložene tablice za točku 7. vidljivo je da na proširenu mjernu nesigurnost barometra BOSCH najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost histereze i etalona.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH u točki 8. etalonskim barometrom Ruska u vakuumsko-tlačnoj komori pri nazivnim tlakom od **1000 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska za točku 8. iznosi **1000,025 mbar**, a osrednjeni tlak za oba slijeda na umjeravanom barometru BOSCH iznosi **1001,215 mbar**.

Tablica 27. Mjerna nesigurnost u točki 8. barometra BOSCH

Točka 8. $p_{e8}=1000,025$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1075334	2	0,053767	0,00289086
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0220006	$\sqrt{3}$	0,012702	0,00016135
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,23	$2\sqrt{3}$	0,066401	0,00440909
Σu^2				0,00750298
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,173

Iz gornje tablice vidi se da na proširenu mjernu nesigurnost barometra BOSCH u točki 8. najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost histereze i etalona.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 9. pri nazivnom tlaku **1050 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska u točki 9. iznosi **1050,055 mbar**, a osrednjeni tlak umjeravanog barometra BOSCH iznosi **1051,135 mbar**.

Tablica 28. Mjerna nesigurnost u točki 9. barometra BOSCH

Točka 9. $p_{e9}=1050,055$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1057707	2	0,052885	0,00279686
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0231012	$\sqrt{3}$	0,013338	0,00017790
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,07	$2\sqrt{3}$	0,020209	0,00040840
Σu^2				0,00342484
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,117

Iz gornje tablice vidljivo je da u točki 9. najveći doprinos proširenoj mjernoj nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH čini mjerna nesigurnost etalona i histereze.

Donja tablica prikazuje podatke točke 10. za izračun proširene mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra BOSCH u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska pri nazivnom tlaku od **1100 mbar**. Srednji tlak umjeravanog barometra BOSCH za oba slijeda iznosi **1100,935 mbar**; srednji tlak etalona Ruska za točku 10. iznosi **1100,210 mbar**.

Tablica 29. Mjerna nesigurnost u točki 10. barometra BOSCH

Točka 10. $p_{e10}=1100,210$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1040561	2	0,052028	0,00270692
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0242046	$\sqrt{3}$	0,013975	0,00019530
Razlučivost	0,01	$2\sqrt{3}$	0,002887	0,00000833
Ponovljivost	0,02	$2\sqrt{3}$	0,005774	0,00003334
Histereza	0,05	$2\sqrt{3}$	0,014435	0,00020837
Σu^2				0,00315226
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,112

Iz gornje tablice za točku 10. vidi se da na ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra BOSCH najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost zbog etalona i histereze.

Analiza podataka mjerne nesigurnosti barometra **BOSCH BME 280** bit će napravljena nakon izračuna mjerne nesigurnosti barometra **TESTO 176P1** kako bi se moglo usporediti podatke u analizi.

6.1.2. Barometar TESTO:

Specifikacije barometra TESTO 176P1 dane su u prošlom poglavlju. Ispod se nalazi tablica s očitanim podacima pri umjeravanju barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori koristeći se etalonskim barometrom Ruska.

Tablica 30. Izračunati podaci za barometar TESTO 176P1

Točka	Nazivni tlak p_n [mbar]	Srednja tlak etalona p_{em} [mbar]	Tlak barometra TESTO p_u [mbar] Uzlazni	Tlak barometra TESTO p_s [mbar] Silazni	Srednja tlak barometra TESTO p_m [mbar]	Odstupanje $p_m - p_e$ [mbar]	Ponovljivost b [mbar]	Histereza h [mbar]
1.	650	649,985	652,20	652,20	652,20	2,22	0,2	0,00
2.	700	699,965	702,10	702,20	702,15	2,19	0,2	0,10
3.	750	750,015	752,20	752,20	752,20	2,19	0,2	0,00
4.	800	799,535	802,10	802,20	802,15	2,62	0,2	0,10
5.	850	850,015	852,40	852,20	852,30	2,28	0,2	-0,20
6.	900	899,985	902,50	902,30	902,40	2,41	0,2	-0,20
7.	950	950,035	952,20	952,20	952,20	2,17	0,2	0,00
8.	1000	1000,025	1002,20	1002,15	1002,15	2,13	0,2	0,10
9.	1050	1050,055	1052,00	1052,05	1052,05	1,99	0,2	0,10
10.	1100	1100,210	1102,00	1101,85	1101,85	1,64	0,2	0,30

I u ovom slučaju postoje samo uzlazni i silazni niz pa se za potrebe izračuna ponovljivosti ponovilo mjerenje za **1000 mbar** gdje je izmjeren tlak na umjeravanom TESTO barometru iznosa **1002,00 mbar**. Kako je ponovljivost, b , apsolutna vrijednost razlike istih vrijednosti nazivnih tlakova na uzlaznim ili silaznim nizovima, u ovom slučaju će se ponovljivost uzeti u obzir kao razlika rezultata mjerenja uzlaznog niza u točki 8. i ponovljenog mjerenja na **1000**

mbar. Ponovljivost, b , će biti konstantna za sve točke i iznositi će **0,2 mbar** za umjeravanje TESTO barometra. Kako u proceduri C ne postoji izračun ponovljivosti za svaku točku posebno tako neće biti uzeta u obzir ni mjerna nesigurnost uvjetovana odstupanjem od nultočke. Dakle na ukupnu mjernu nesigurnost barometra TESTO utjecat će mjerna nesigurnost etalona, uvjeta pri ispitivanju, razlučivosti umjeravanog barometra, ponovljivosti i histereze.

U tablici ispod nalaze se podaci za izračun proširene mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 1. pri nazivnom tlaku od **650 mbar**. Srednja vrijednost tlaka etalona u točki 1. iznosi **649,985 mbar**, a srednja vrijednost umjeravanog barometra TESTO za oba slijeda iznosi **652,20 mbar**.

Tablica 31. Mjerna nesigurnost u točki 1. barometra TESTO

Točka 1. $p_{e1}=649,985$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1152583	2	0,057629	0,00332112
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,0142997	$\sqrt{3}$	0,008256	0,00006816
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,0	$2\sqrt{3}$	0,00000	0,00000000
Σu^2				0,00755667
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,174

Iz gornje tablice vidljivo je da u točki 1. na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra TESTO najviše utječe mjerna nesigurnost etalona, ponovljivosti i razlučivosti dok ne postoji mjerna nesigurnost uzrokovana histerezom za ovaj slučaj.

Iduća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO etalonskim barometrom Ruska u vakuumsko-tlačnoj komori u točki 2. pri nazivnom tlaku **700 mbar**. Srednja vrijednost tlaka etalona iznosi **699,965 mbar**, dok je osrednjena vrijednost tlaka umjeravanog barometra TESTO **702,15 mbar** u točki 2.

Tablica 32. Mjerna nesigurnost u točki 2. barometra TESTO

Točka 2. $p_{e2}=699,965$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,11523853	2	0,057619	0,00331998
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,01539923	$\sqrt{3}$	0,008891	0,00007905
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Σu^2				0,00839989
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,183

Gornje tablice za točku 2. jasno prikazuje da na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra TESTO najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost etalona i ponovljivosti.

Tablica ispod prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 3. Nazivni tlak u točki 3. iznosi **750 mbar**, etalonski srednji tlak iznosi **750,015 mbar**, dok je osrednjeni tlak umjeravanog barometra TESTO za oba slijeda **752,20 mbar**.

Tablica 33. Mjerna nesigurnost u točki 3. barometra TESTO

Točka 3. $p_{e3}=750,015$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,11470174	2	0,057351	0,00328912
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,01650033	$\sqrt{3}$	0,009527	0,00009076
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,0	$2\sqrt{3}$	0,00000	0,00000000
			Σu^2	0,00754727
			$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$	0,174

Iz gornje tablice za točku 3. vidi se da na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska najviše utječe mjerna nesigurnost etalona i ponovljivosti dok mjerne nesigurnosti histereze nema.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 4. nazivnog tlaka **800 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska je **799,535 mbar**, a srednji tlak umjeravanog barometra TESTO **802,10 mbar**.

Tablica 34. Mjerna nesigurnost u točki 4. barometra TESTO

Točka 4. $p_{e4}=799,535$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,1137587	2	0,056879	0,00323526
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,01758977	$\sqrt{3}$	0,010156	0,00010314
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Σu^2				0,00833926
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,183

U gornjoj tablici vidljivo je da na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra Ruska najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost uzrokovana etalom i ponovljivošću.

Sljedeća tablica prikazuje podatke u točki 5. za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska pri nazivnom tlaku od **850 mbar**. Srednji tlak etalona za točku 5. iznosi **850,015 mbar**, a osrednjeni tlak umjeravanog barometra TESTO za oba slijeda iznosi **852,30 mbar**.

Tablica 35. Mjerna nesigurnost u točki 5. barometra TESTO

Točka 5. $p_{e5}=850,015$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,11246977	2	0,056235	0,00316236
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,01870033	$\sqrt{3}$	0,010797	0,00011658
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Σu^2				0,01078023
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,208

Gornja tablica prikazuje da u točki 5. na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra TESTO najviše utječe mjerna nesigurnost etalona, ponovljivosti i histereze.

Iduća tablica prikazuje podatke za izračun proširene mjerne nesigurnosti umjeravanog barometara TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom ruska u točki 6. pri nazivnom tlaku **900 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska iznosi **899,985 mbar**, a srednji tlak umjeravanog barometra TESTO iznosi **902,40 mbar** u točki 6.

Tablica 36. Mjerna nesigurnost u točki 6. barometra TESTO

Točka 6. $p_{e6}=899,985$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,11095578	2	0,055478	0,00307780
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,01979967	$\sqrt{3}$	0,011432	0,00013068
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Σu^2				0,01070977
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,207

Tablica za točku 6. pokazuje da na proširenu mjernu nesigurnost barometra TESTO najviše utječe mjerna nesigurnost etalona, ponovljivosti i histereze.

Sljedeća tablica prikazuje za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u vakuumsko-tlačnoj komori etalonskim barometrom Ruska u točki 7. pri nazivnom tlaku **950 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska u točki 7. iznosi **950,035 mbar**, a osrednjeni tlak umjeravanog barometra TESTO iznosi **952,20 mbar**.

Tablica 37. Mjerna nesigurnost u točki 7. barometra TESTO

Točka 7. $p_{e7}=950,035$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,10928368	2	0,054642	0,00298573
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,02090077	$\sqrt{3}$	0,012067	0,00014562
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,0	$2\sqrt{3}$	0,00000	0,00000000
Σu^2				0,00729874
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,171

Iz gornje tablice vidljivo je da u točki 7. najveći doprinos proširenoj mjernoj nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO čini mjerna nesigurnost etalona i ponovljivost, dok je mjerne nesigurnosti zbog histereze nema.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u točki 8. etalonskim barometrom Ruska u vakuumsko-tlačnoj komori pri nazivnim tlakom od **1000 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska za točku 8. iznosi **1000,025 mbar**, a osrednjeni tlak za oba slijeda na umjeravanom barometru TESTO iznosi **1002,15 mbar**.

Tablica 38. Mjerna nesigurnost u točki 8. barometra TESTO

Točka 8. $p_{e8}=1000,025$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,10753337	2	0,0543767	0,00289086
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,02200055	$\sqrt{3}$	0,012702	0,00016135
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Σu^2				0,00805307
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,179

Iz gornje tablice za točku 8. vidljivo je da na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra TESTO najveći utjecaj ima mjerna nesigurnost etalona i ponovljivosti.

Sljedeća tablica prikazuje podatke za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO u točki 9. etalonskim barometrom Ruska u vakuumsko-tlačnoj komori pri nazivnom tlaku **1050 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska u točki 9. iznosi **1050,055 mbar**, a osrednjeni tlak umjeravanog barometra TESTO iznosi **1052,05 mbar**.

Tablica 39. Mjerna nesigurnost u točki 9. barometra TESTO

Točka 9. $p_{e9}=1050,055$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,10577072	2	0,052885	0,00279686
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,02310121	$\sqrt{3}$	0,013338	0,00017790
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Σu^2				0,00797562
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,179

Tablica za točku 9. pokazuje da na proširenu mjernu nesigurnost barometra TESTO najviše utječe mjerna nesigurnost etalona i ponovljivosti.

Sljedeća tablica prikazuje za izračun mjerne nesigurnosti umjeravanog barometra TESTO etalonskim barometrom Ruska u vakuumsko-tlačnoj komori u točki 10. pri nazivnom tlaku **1100 mbar**. Srednji tlak etalonskog barometra Ruska u točki 10. iznosi **1100,210 mbar**, a osrednjeni tlak umjeravanog barometra TESTO iznosi **1101,85 mbar**.

Tablica 40. Mjerna nesigurnost u točki 10. barometra TESTO

Točka 10. $p_{e10}=1100,210$ mbar				
Utjecajna veličina	Podatak [mbar]	Faktor dijeljenja	Nesigurnost $u = \frac{\text{podatak}}{\text{faktor dijeljenja}}$ [mbar]	u^2
Etalon	0,10405613	2	0,052028	0,00270692
Etalon pod uvjetima ispitivanja	0,02420462	$\sqrt{3}$	0,013975	0,00019530
Razlučivost	0,1	$2\sqrt{3}$	0,02887	0,00083348
Ponovljivost	0,2	$2\sqrt{3}$	0,05774	0,00333391
Histereza	0,3	$2\sqrt{3}$	0,08661	0,00750129
Σu^2				0,01457090
$U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2}, (k=2)$				0,241

Gornja tablica prikazuje da u točki 10. na proširenu mjernu nesigurnost umjeravanog barometra TESTO najviše utječe mjerna nesigurnost histereze, ponovljivosti i etalona.

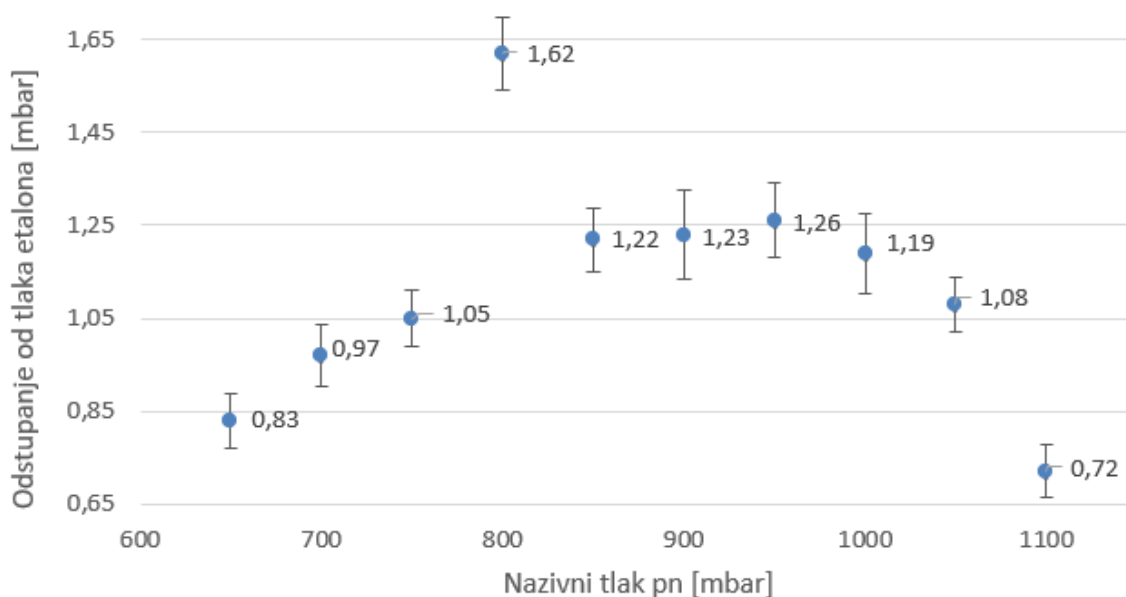
6.2. Analiza proširene mjerne nesigurnosti barometara BOSCH BME 280 i TESTO 176P1:

U ovome djelu rada bit će napravljena analiza proširena mjerne nesigurnosti po točkama za umjeravane barometre BOSCH BME 280 i TESTO 176P1 te usporedba dobivenih rezultata.

Prvo će se analizirati podaci proširene mjerne nesigurnosti za barometar BOSCH.

Tablica 41. Proširena mjerna nesigurnost barometra BOSCH

Točka	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Proširena mjerna nesigurnost U [mbar]	0,118	0,131	0,118	0,160	0,138	0,189	0,161	0,173	0,117	0,112



Slika 28. Graf odnosa nazivnog tlaka i odstupanje od tlaka etalona barometra BOSCH

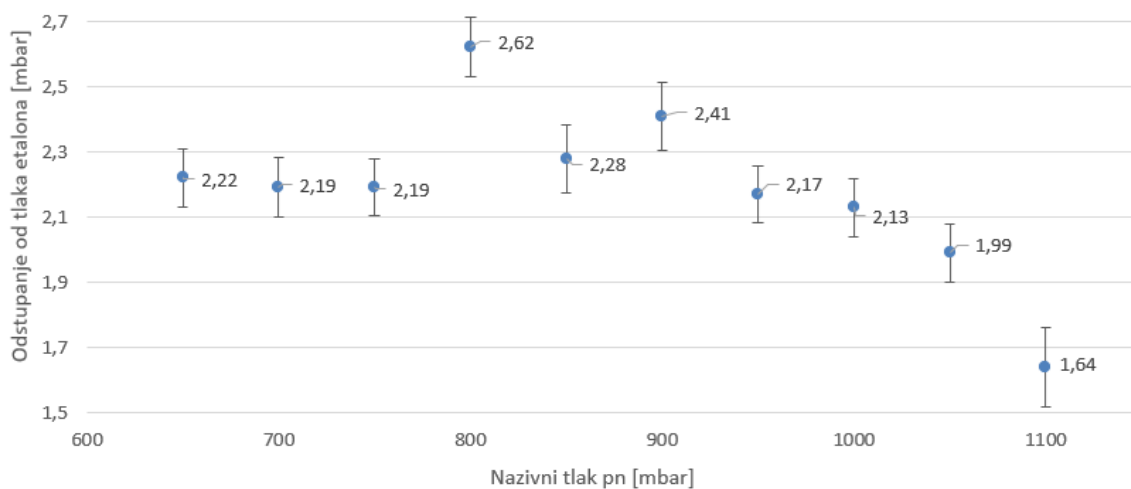
Iz gore prikazanih podataka vidljivo je da odstupanje i proširena mjerna nesigurnost za barometar BOSCH nemaju jasan trend ovisnosti o promjeni nazivnog tlaka u području nazivnog tlaka od **650 mbar** do **1100 mbar**. Vrijednost proširene mjerne nesigurnosti u tom području varira od **0,189 mbar** do **0,112 mbar**. Na proširenu mjerna nesigurnost barometra BOSCH najviše su utjecale mjerne nesigurnosti etalona i histereze. Razlučivost barometra BOSCH istog

je reda veličine kao razlučivost barometra Ruska **0,01 mbar** pa u ovom slučaju mjerna nesigurnost rezolucije ne čini veliki utjecaj na ukupnu mjernu nesigurnost. Zahvaljujući dobroj razlučivosti mjerne nesigurnosti ponovljivosti i histereze imaju manji utjecaj na proširenu mjernu nesigurnost.

Ispod se nalaze podaci izračuna proširene mjerne nesigurnosti barometra TESTO.

Tablica 42. Proširena mjerna nesigurnost barometra TESTO

Točka	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Proširena mjerna nesigurnost U [mbar]	0,174	0,183	0,174	0,183	0,208	0,207	0,171	0,179	0,179	0,241



Slika 29. Graf odnosa nazivnog tlaka i odstupanja od tlaka etalona barometra TESTO

I kod barometra TESTO proširena mjerna nesigurnost i odstupanje nemaju izravan trend ovisnosti o nazivnom tlaku za područje nazivnog tlaka od **650 mbar** do **1100 mbar**. Vrijednost proširene mjerne nesigurnosti za to područje kreće se u granicama od **0,171 mbar** do **0,241 mbar**. Vidljivo je da barometar TESTO ima veću proširenu mjernu nesigurnost od barometra BOSCH. Proširena mjernu nesigurnost barometra TESTO uveliko ovisi o mjernim nesigurnostima etalona, histereze i ponovljivosti. S obzirom da je barometar TESTO umjeravan

istovremeno istim etalonskim barometrom Ruska, istom metodom i pri istim uvjetima jasno je da uvjeti pri umjeravanju i metoda ne mogu biti uzroci veće mjerne nesigurnosti barometra TESTO od barometra BOSCH. Uzrok veće proširene mjerne nesigurnosti barometra TESTO je u tome što je njegova razlučivost od **0,1 mbar** reda veličine manja od razlučivosti etalonskog barometra Ruska i barometra BOSCH. Manja razlučivost barometru TESTO uzrokuje povećanje mjerne nesigurnosti razlučivosti, ponovljivosti i histereze što na kraju uzrokuje rast proširene mjerne nesigurnosti barometra TESTO.

Oba umjeravana barometra imaju veću proširenu mjernu nesigurnost od etalonskog barometra Ruska što je bilo za očekivati s obzirom da je bio uspostavljen lanac sljedivosti mjerne nesigurnosti u kojem svaka sljedeća karika ima veću mjernu nesigurnost od prethodne karike.

Ovom analizom završava se eksperimentalni dio rada.

7. ZAKLJUČAK:

Tlak je fizikalna veličina koja može prouzročiti havariju opreme ili ozljeda operatere koji se nalaze u blizini opreme pod tlakom stoga je bitno uspostaviti način kontrole tlaka. Tlak se kontrolira tako što se mjeri mjernim uređajima namijenjenima za mjerenje tlaka, a koji se služe raznim metodama. Da bi ti uređaji bili od koristi potrebno je znati koliko rezultat koji oni daju svojim mjerenjem odstupa od stvarnog tlaka. Kako bi se odredilo odstupanje potrebno je uspostaviti lanac sljedivosti kojim će se dobiti proširena mjerna nesigurnost mjernog uređaja. Uspostavom lanca sljedivosti dolazi do toga da je u svaki mjerni uređaj uračunata mjerna nesigurnost uređaja koji su se koristili za umjeravanje etalona kojim se umjerio taj uređaj. Iz toga proizlazi da svaka sljedeća karika u lancu sljedivosti ima veću mjernu nesigurnost od prethodne karike jer je u njoj sadržana i mjerna nesigurnost te prethodne karike. Mjerna nesigurnost ovisi o nazivnom tlaku i moguće je usporediti mjerne nesigurnosti uređaja samo za isti nazivni tlak. Kako bi se dokazale ove pretpostavke u radu je bilo potrebno izvršiti umjeravanje uređaja za mjerenje apsolutnog tlak. Prvo se umjeravo barometar Ruska na plinskoj tlačnoj vagi DHI za područje tlaka od 100 do 2600 mbar podijeljeno u 9 točaka s korakom od 300 mbar. Zatim se tim etalonskim barometrom Ruska pristupilo umjeravanju barometra BOSCH BME 280 i TESTO 176P1 u vakumsko-tlačnoj komori u 10 točaka s korakom od 50 mbar za područje tlaka od 650 do 1100 mbar što je bilo ograničeno mjernim područjem samih barometara. Mjerni sustavi korišteni za umjeravanje na plinskoj tlačnoj vagi i vakuumsko-tlačnoj komori su u vlasništvu Laboratorija za procesna mjerenja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje te je mjerenje vršeno u njihovim prostorijama. Iz tih primjera koje se eksperimentalno analiziralo vidljivo je da plinska tlačna vaga DHI ima najmanju mjernu nesigurnost. Zatim slijedi etalonski barometar Ruska koji se umjeravao na plinskoj tlačnoj vagi te time ima veću mjernu nesigurnost od nje pri svakom nazivnom tlaku. Barometri BOSCH BME 280 i TESTO 176P1 imaju veću proširenu mjernu nesigurnost od etalonskog barometra Ruska jer je u njihovim proširenim mjernim nesigurnostima sadržana mjerna nesigurnost etalonskog barometra Ruska u kojem je pak sadržana mjerna nesigurnost plinske tlačne vage DHI koja u sebi sadrži sve mjerne nesigurnosti uređaja koji su prethodili u lancu sljedivosti do njenog umjeravanja. Uređaji koji bi se umjeravali barometrima BOSCH i TESTO imali bi veću mjernu nesigurnost od njihove. Razlika između umjeravanih barometara BOSCH i TESTO je u tome što TESTO ima razlučivost reda veličine manju od barometra BOSCH što uvelike utječe na to da barometar TESTO ima nešto veću proširenu mjernu nesigurnost.

8. LITERATURA:

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Blaise_Pascal
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Evangelista_Torricelli
- [3] <https://prirodopolis.hr/torricelli.html>
- [4] https://hr.wikipedia.org/wiki/Otto_von_Guericke
- [5] [Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja \(mjerenja u energetici\); D. Zvizdić, L.G. Bermanec; FSB, Laboratorij za procesna mjerenja, Zagreb](#)
- [6] [Thomas, A. M.; Cross, J. L.: U-Tube Manometers for Medium-Vacuum Measurements, Journal of Vacuum Science and Technology, 2000.](#)
- [7] [Sabljčić, L.: Projekt sustava za umjeravanje mjerila vakuuma, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.](#)
- [8] https://hr.wikipedia.org/wiki/Piezoelektri%C4%8Dni_efekt
- [9] [International Recommendation: Barometers, OIML R 97, Organisation International de Metrologie Legale, 1990.](#)
- [10] [I-CAL-GUI-003_Calibration_Guide_No._3_web | PDF | Calibration | Pressure Measurement](#)
- [11] [I-CAL-GUI-017 Calibration Guide No. 17 Web | PDF | Calibration | Pressure Measurement](#)
- [12] [PRESSURE GAUGE DKD-R - 6-1 - 2016 - Englisch | PDF | Calibration | Pressure Measurement](#)
- [13] [POTVRDA O UMJERAVANJU PLINSKE TLAČNE VAGE-KALIBRIERSCHIN VOM 2022-11-24 KALIBRIEZEICHEN PBT 30052/22](#)
- [14] [POTVRDA O UMJERAVANJU BAROMETRA br. 2-0053/24-10](#)
- [15] [Radić, K.: Ispitivanje karakteristika vauumsko tlačne komore, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.](#)
- [16] [Mijić, I.: Projekt sustava za umjeravanje mjerila tlaka okoline, Završni zadatak, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2024.](#)
- [17] [Comparison in gas media \(absolute and gauge mode\) in the range from 25 kPa TO 200 kPa \(EURAMET. MP-K8\); C. Wuethrich, S. Alisic, A. Altintas, I. Van Andel, A.A. Eltawil, P. Farár; Metrologia 53, 07017](#)
- [18] [MjeriteljstvoUkratko3.pdf](#)