

Ispitivanje karakteristika vakuumske tlačne komore

Radić, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:043165>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Radić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Karlo Radić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na pomoći, savjetovanju i pristupačnosti tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem asistentu Ivanu Matasu na pomoći i savjetima tijekom mjerenja za eksperimentalni dio rada.

Neizmjereno hvala mojoj obitelji na razumijevanju i potpori tijekom cijelog mog studija i pisanja ovog rada.

Karlo Radić



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 brodstrojarski

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 23 - | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Radić** JMBAG: 0035205865

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje karakteristika vakuumske tlačne komore**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterisation of the vacuum pressure chamber**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja vakuumske tlačne komore u području 500 mbar do 1500 mbar. Postupak treba obuhvatiti određivanje propuštanja i mogućnost umjeravanja barometara u komori. Za ispitivanje će se koristiti postojeće mjerne linije u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM).

Potrebno je izraditi:

- Pregled metoda mjerenja malih tlakova i grubog vakuuma.
- Opis metoda generiranja malih tlakova i vakuuma.
- Mjernu liniju za ispitivanje koristeći mjerne uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM.
- Opis sheme spajanja ispitnog sustava s pomoćnim uređajima.
- Etalonski mjerni sustav za usporedbeno umjeravanje barometara korištenjem vakuumske tlačne komore Laboratorija za procesna mjerenja.
- Opis postupka umjeravanja barometara s rezultatima za barem dva mjerila.
- Opis postupka procjene mjerne nesigurnosti.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

28. rujna 2023.

30. studenoga 2023.

4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. FIZIKALNE OSNOVE I PODJELA VAKUUMA | 3 |
| 2.1. Fizikalne osnove | 3 |
| 2.2. Podjela vakuuma..... | 4 |
| 3. MJERILA VAKUUMA I TLAKA OKOLINE | 6 |
| 3.1. Cijevni manometri | 7 |
| 3.2. Mjerila s mehaničkom deformacijom | 9 |
| 3.3. Elektronički barometri | 12 |
| 3.4. Apsolutne tlačne vage | 13 |
| 4. METODE GENERIRANJA GRUBOG VAKUUMA I PRETLAKA | 15 |
| 4.1. Stapne pumpe | 15 |
| 4.2. Rotacijske pumpe..... | 16 |
| 4.3. Molekularne pumpe | 18 |
| 5. METODE UMJERAVANJA BAROMETARA | 20 |
| 5.1. The Organisation Internationale de Metrologie Legale (OIML)..... | 21 |
| 5.2. Metoda umjeravanja po OIML-u..... | 24 |
| 6. OPIS MJERNE LINIJE..... | 26 |
| 7. POSTUPCI UMJERAVANJA BAROMETARA I REZULTATI UMJERAVANJA | 31 |
| 7.1. Izračun mjerne nesigurnosti | 34 |
| 7.2. Prikaz i analiza rezultata umjeravanja | 36 |
| 8. ZAKLJUČAK | 43 |
| LITERATURA | 44 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Prikaz Toricellijevog eksperimenta..... | 1 |
| Slika 2. Spomenička skulptura Guerickeovog eksperimenta u Magdeburgu | 2 |
| Slika 3. Nazivi mjernih tlakova..... | 4 |
| Slika 4. Podjela vakuuma..... | 5 |
| Slika 5. Živin barometar u drvenom kućištu..... | 7 |
| Slika 6. Manometar s U-cijevi | 8 |
| Slika 7. Elastični elementi mjerila s mehaničkom deformacijom..... | 9 |
| Slika 8. Manometar s elastičnom šupljom cijevi - Bourdonova cijev..... | 10 |
| Slika 9. Konstrukcija kapacitativnog manometra | 11 |
| Slika 10. Shema kapacitativnog mosta | 11 |
| Slika 11. Otvoreno kućište elektroničkog barometra | 12 |
| Slika 12. Digitalni barometar Ruska 6200 u vlasništvu LPM-a | 13 |
| Slika 13. Princip rada apsolutne tlačne vage | 14 |
| Slika 14. Shema stapne vakuum pumpe | 15 |
| Slika 15. Promjena tlaka u komori (1) i u pumpi (2) prilikom ispumpavanja | 16 |
| Slika 16. Presjek jednostupanjske rotorske vakuum pumpe s krilcima..... | 17 |
| Slika 17. Faze rada rotacijske vakuum pumpe..... | 18 |
| Slika 18. Molekularno pumpanje pokretnim dijelom uskog kanala..... | 19 |
| Slika 19. Komorna molekularna pumpa | 19 |
| Slika 20. Lanac sljedivosti | 20 |
| Slika 21. Shema mjerne linije | 26 |
| Slika 22. Vakuumsko tlačna komora slovenskog proizvođača Kambič | 27 |
| Slika 23. Pumpa koja dolazi uz komoru | 28 |
| Slika 24. Etalonski barometar Vaisala (desno) i izvedba spoja na komoru (lijevo)..... | 29 |
| Slika 25. Ispitivani barometri marke Testo 176P1(lijevo) i uređaj za mjerenje temperature i vlage zraka Testo 175H1(desno) | 30 |
| Slika 26. Sastavljena mjerna linija | 30 |
| Slika 27. Ovisnost odstupanja i mjernih nesigurnosti o etalonskom tlaku - TEOKO9..... | 39 |
| Slika 28. Ovisnost odstupanja i mjernih nesigurnosti o etalonskom tlaku - TEOKO10..... | 42 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Maksimalna odstupanja po razredima točnosti..... | 22 |
| Tablica 2. Tehničke karakteristike vakuumske tlačne komore | 27 |
| Tablica 3. Tehničke karakteristike korištenih barometara | 29 |
| Tablica 4. Uvjeti okolnog zraka unutar i van komore | 31 |
| Tablica 5. Rezultati umjeravanja barometra TEOKO9..... | 32 |
| Tablica 6. Prikaz ispravljenih rezultata umjeravanja barometra TEOKO9 | 32 |
| Tablica 7. Rezultati umjeravanja barometra TEOKO10..... | 33 |
| Tablica 8. Prikaz ispravljenih rezultata umjeravanja barometra TEOKO10 | 33 |
| Tablica 9. Odstupanja i mjerne nesigurnosti etalona Vaisala PTB 220 | 35 |
| Tablica 10. Mjerna nesigurnost 1. točke..... | 36 |
| Tablica 11. Mjerna nesigurnost 2. točke..... | 37 |
| Tablica 12. Mjerna nesigurnost 3. točke..... | 37 |
| Tablica 13. Mjerna nesigurnost 4. točke..... | 37 |
| Tablica 14. Mjerna nesigurnost 5. točke..... | 38 |
| Tablica 15. Mjerna nesigurnost 6. točke..... | 38 |
| Tablica 16. Mjerna nesigurnost 1. točke..... | 39 |
| Tablica 17. Mjerna nesigurnost 2. točke..... | 40 |
| Tablica 18. Mjerna nesigurnost 3. točke..... | 40 |
| Tablica 19. Mjerna nesigurnost 4. točke..... | 40 |
| Tablica 20. Mjerna nesigurnost 5. točke..... | 41 |
| Tablica 21. Mjerna nesigurnost 6. točke..... | 41 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------------------|-------------------|---|
| p | Pa | Tlak |
| F | N | Sila |
| A | m ² | Površina |
| v | % | Vakuum izražen u postocima |
| p_0 | Pa | Atmosferski tlak |
| g | m ² /s | Gravitacijska konstanta |
| ρ | kg/m ³ | Gustoća |
| h | m | Visina |
| C | F | Električni kapacitet |
| V | m ³ | Volumen |
| v | m/s | Brzina |
| n | - | Broj mjerne točke |
| p_n | mbar | Nazivni tlak |
| p_e | mbar | Tlak etalona |
| p_i | mbar | Tlak ispitivanog mjerila |
| p_M | mbar | Stvarna vrijednost etalonskog tlaka |
| p_E | mbar | Izmjerena vrijednost pri umjeravanju |
| δp_V | mbar | Odstupanja dobivena zbog metode umjeravanja |
| U | mbar | Ukupna mjerna nesigurnost |
| k | - | Korekcijski faktor |
| u_E | mbar | Mjerna nesigurnost etalona |
| u_M | mbar | Mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila |
| $u_{\text{standard},E}$ | mbar | Mjerna nesigurnost propisana potvrdom o umjeravanju etalona |
| $u_{\text{stabilnost},E}$ | mbar | Mjerna nesigurnost zbog dugotrajne nestabilnosti |
| $u_{\text{rez},M}$ | mbar | Mjerna nesigurnost zbog rezolucije mjerila |
| $u_{\text{ponovljivost},V}$ | mbar | Mjerna nesigurnost s obzirom na ponovljivost |
| $u_{\text{histereza},V}$ | mbar | Mjerna nesigurnost u ovisnosti o histerezi |

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada dan je pregled mjerila atmosferskog tlaka, odnosno barometara, za njihovo područje mjerenja (grubi vakuum i mali tlakovi), princip rada, te konstrukcija uređaja. Također su opisane i metode generiranja grubog vakuuma i malih tlakova (stapne, rotacijske i molekularne pumpe).

U eksperimentalnom dijelu rada prvo su provjerene karakteristike nove vakuumske tlačne komore ispitivanjem najvišeg i najnižeg tlaka. Nakon toga je sastavljen mjerni sustav za ispitivanje barometara kojem je komora glavni dio. Provedena su mjerenja i napravljena analiza rezultata za dva mjerna instrumenta. Mjerna linija za izradu ovog rada je sastavljena od pumpe, vakuumske tlačne komore, barometra za umjeravanje, etalonskog barometra i uređaja za mjerenje okolnih uvjeta zraka. Napravljena je shema i dan opis spajanja mjerne linije. Umjeravana su dva barometra istog proizvođača Testo 176 P1 koji imaju raspon mjerenja od 600 – 1100 mbar. Za etalonsko mjerilo je uzet barometar Vaisala PTB 220. Napravljena su mjerenja za raspon od 860 – 1060 mbar te su tablično prikazani rezultati. Opisan je postupak procjene mjerne nesigurnosti te je napravljen proračun mjernih nesigurnosti koji je prikazan tablično i grafički kao dodatak odstupanjima.

Ključne riječi: barometri, umjeravanje barometara, mjerna nesigurnost

SUMMARY

In the introductory part of the paper, an overview of atmospheric pressure gauges, i.e. barometers, for their measurement area (rough vacuum and low pressures), the principle of operation, and the construction of the device is given. Methods of generating rough vacuum and low pressures (step, rotary and molecular pumps) are also described.

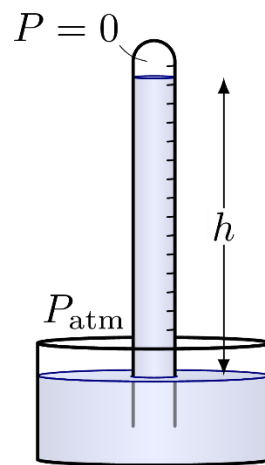
In the experimental part of the paper, the characteristics of the new vacuum pressure chamber were first checked by testing the highest and lowest pressure. After that, a measuring system was put together to test the barometer, the main part of which is the chamber. Measurements were carried out and the results were analyzed for two measuring instruments. The measuring line for this work is composed of a pump, a vacuum pressure chamber, a measuring barometer, a reference barometer and a device for measuring the surrounding air conditions. A diagram was created and a description of the connection of the measuring line was given. Two barometers of the same manufacturer, Testo 176 P1, which have a measurement range of 600-1100 mbar, were measured. The Vaisala PTB 220 barometer was used as the standard. Measurements were made for the range of 860 - 1060 mbar and the results are tabulated. The procedure for estimating the measurement uncertainty is described and the calculation of the measurement uncertainty is made, which is shown in tables and graphics as an addition to the deviations.

Key words: barometers, calibration of barometers, measurement uncertainty

1. UVOD

Vakuum je po klasičnoj definiciji prostor koji ne sadrži nikakvu tvar. Kada se govori o vakuumu misli se na tlak koji je manji od atmosferskog.

Povijest vakuuma počinje 1643. s Evangelistom Toricellijem koji je u svom laboratoriju postavio staklenu cijev koja je bila ispunjena živom te zatvorena s jedne strane u posudu koja je također bila popunjena živom kako je prikazano na slici 1:



Slika 1. Prikaz Toricellijevog eksperimenta

Toricelli je primjetio da živa nije u potpunosti iscurila iz cijevi, te pretpostavio kako okolišnji zrak djeluje na površinu žive u posudi i tako zaustavlja curenje žive iz cijevi. Tako je i definirao pojam atmosferskog tlaka. Kako se razina stupca žive u cijevi mijenjala iz dana u dan, shvatio je kako se mijenja i atmosferski tlak mijenja. Ovim eksperimentom je Toricelli, zapravo slučajno, postignuo vakuum u gornjem dijelu cijevi nakon što je dio žive iscurio iz nje. Uz to Toricelli je napravio prvi barometar za mjerenje atmosferskog tlaka.

Uz Toricellija u začetima vakuumske tehnike dao je doprinos Otto von Guericke sa svojim eksperimentom 1650. godine. On je povezo dvije šuplje brakene polukugle te iz njih isisao zrak. Zatim je povezo četveropreg konja na svaku polukuglu koji su ih pokušali razdvojiti, ali nisu uspjeli. Kako je u unutar volumena polukugli nastao vakuum, atmosferski tlak je ogromnom silom djelovao na polukugle, jačom čak i od dva četveroprega konja.



Slika 2. Spomenička skulptura Guerickeovog eksperimenta u Magdeburgu

Za ovaj eksperiment Guericke je koristio klipnu sisaljku koju je sam konstruirao 1640. godine. Iako se Galileu i Betu (16. st.) pripisuje izum prve vodene vakuum pumpe, Guericke je s ovim eksperimentom predstavio svijetu na zoran način moć vakuuma, te klipnu sisaljku kao instrument za njegovo postizanje.

Toricelli i Guericke nisu mogli predvidjeti da će jednog dana vakuum biti od velike važnosti u modernoj znanosti i tehnologiji, ali i da će se mjerila tlaka koristiti u svakodnevnom životu. Tako je primjena barometara iznimno važna u meteorološkim stanicama jer je atmosferski tlak usko povezan sa promjenama vremena. Tako meteorolozi mogu očitanjem tlaka dati kratkoročnu vremensku prognozu te bolje razumjeti kretanje vremenskih pojava. Također primjena barometara je važna i u avijaciji. Kako vrijednost atmosferskog tlaka opada sa porastom nadmorske visine, piloti mogu na lak način odrediti altitudu zrakoplova. Poznavanje atmosferskog tlaka važno je i za znanstvena istraživanja, navigaciju te industrijske procese.

Uz sve navedeno većina današnjih kućanstava ima mjerila tlaka, temperature i vlažnosti koji su međusobno povezani. Stoga možemo reći kako bi današnji život bio nezamisliv bez primjene vakuumskih i tlačnih sustava te njihovih mjerila.

2. FIZIKALNE OSNOVE I PODJELA VAKUUMA

2.1. Fizikalne osnove

Ključna fizikalna veličina u vakuumskoj tehnici jest pritisak ili tlak. Tlak je definiran kao veličina kojom sila djeluje na neku površinu. Mjerna jedinica tlaka u SI sustavu je paskal [Pa] ili njutn po metru kvadratnom [N/m^2]. U nastavku je prikazana formula pomoću koje se računa tlak:

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

p – tlak [Pa]

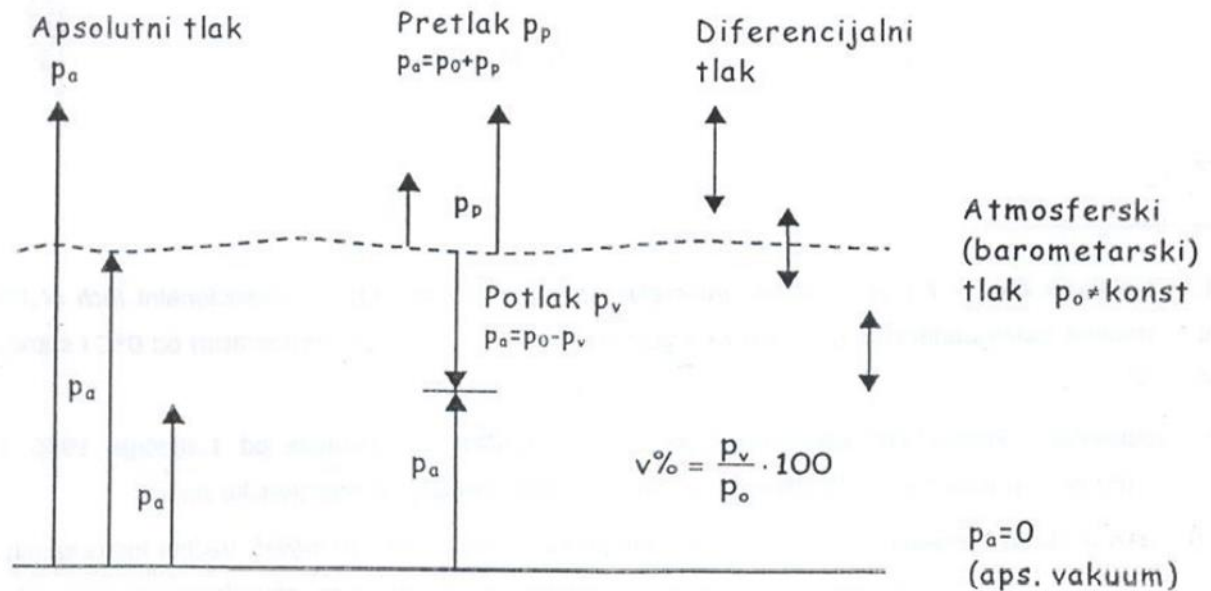
F – sila [N]

A – površina [m^2]

Kod određivanja vrijednosti mjerenog tlaka od ključne važnosti je znati početnu vrijednost tlaka prilikom mjerenja odnosno veličinu tlaka s kojom uspoređujemo dobiveni rezultat mjerenja, pa tako razlikujemo:

- Atmosferski tlak – težina kojom zračni omotač Zemlje djeluje na njenu površinu. Kako je težina omotača podložna brojnim utjecajima, atmosferski tlak se neprestano mijenja. Brojnim mjerenjima je utvrđeno kako je njegov iznos stalan na površini zemlje za određenu temperaturu. Tako je pri temperaturi od 15°C vrijednost atmosferskog tlaka 101325 Pa
- Vakuum (zrakoprazan prostor) - ako posuda ne sadrži niti jednu molekulu, tlak u njoj ima iznos nula (apsolutna nula = 100% vakuum)
- Relativni tlak - tlak mjeren s obzirom na neki referentni tlak (često atmosferski)
- Apsolutni tlak - tlak mjeren na skali koja koristi apsolutnu nulu kao referentnu vrijednost
- Pretlak - razlika tlakova mjerenih na dva mjesta u prostoru koja daje tlak veći od atmosferskog tlaka. Obično se mjerenje vrši u razlici atmosferskog tlaka i nekog višeg tlaka

- Potlak (ili podtlak) - razlika tlakova mjerenih na dva mjesta u prostoru koja daje tlak manji od atmosferskog tlaka



Slika 3. Nazivi mjernih tlakova

Na slici 3 je dana i formula za izračun vakuuma u postocima :

$$v\% = \frac{p_v}{p_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

v – vakuum izražen u postocima (0% - atmosferski tlak, 100% - apsolutni vakuum) [%]

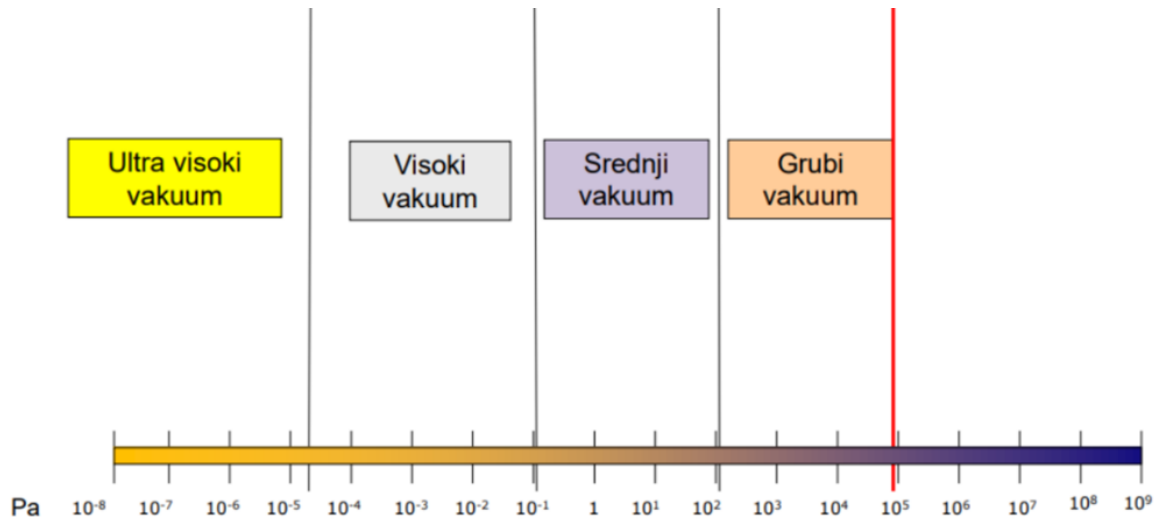
p_v – potlak [Pa]

p_0 – atmosferski tlak [Pa]

2.2. Podjela vakuuma

S obzirom na apsolutni tlak, neovisno o volumenu posude i temperaturi plina, vakuum možemo podijeliti na nekoliko vrsta kao što je prikazano na slici 4:

- Grubi vakuum – područje apsolutnog tlaka od 10^5 do 10^2 Pa
- Srednji vakuum – područje apsolutnog tlaka od 10^2 do 10^{-1} Pa
- Visoki vakuum – područje apsolutnog tlaka od 10^{-1} do 10^{-5} Pa
- Izuzetno visoki vakuum – područje apsolutnog tlaka $< 10^{-5}$ Pa



Slika 4. Podjela vakuuma

Apsolutni vakuum (0 Pa) je samo teorijski zamisliv, te ga u stvarnim uvjetima nije moguće postići. To bi značilo da u volumenu ne postoji niti jedna čestica, odnosno atom tvari, što je dakako nemoguće prvenstveno zbog tehničkih razloga : problemi brtvljenja (dolazi do upuštanja čestica – obrnuto nego kod pretlačnih sustava), problemi povratnog strujanja, desorpcija čestica plina sa stijenki posuda (javlja se pri niskim tlakovima) i mnogih drugih razloga. U laboratorijima diljem svijeta znanstvenici i inženjeri koriste sofisticirane vakuumske sustave u kojima su uspjeli postignuti vakuum od oko 10^{-12} Pa što je najviši vakuum postignut. Za postizanje takvog vakuuma korištene su tehnike kao što su kriogeno pumpanje i turbomolekularno pumpanje kojima se uklanjaju zaostali plinovi iz volumena posuda.

3. MJERILA VAKUUMA I TLAKA OKOLINE

Metode mjerenja grubog vakuuma i tlaka okoline mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine: direktnu i indirektnu metodu.

Direktnom metoda se obično koristi kod mjerenja vakuuma u rasponu od 10^{-4} do 10^5 paskala te malih tlakova. Kod ove metode se mjeri sila, najčešće mehanička deformacija mjernog elementa, te takva očitavanja tlaka ne ovise o vrsti plina. Ovi mjerači se obično sastoje od dva glavna dijela: jedan je senzor pritiska, a drugi je uređaj za napajanje senzora i mjerenje električnog signala iz njega.

Glavna podjela direktnih mjerila s obzirom na princip mjerenja je:

- Mehanička deformacija (membranska, Bourdonova cijev, promjena otpora)
- Djelovanje sile na poznatu površinu (plinske tlačne vage, hidraulične tlačne vage)
- Stupac tekućine (živin manometar, vodeni manometar)

Indirektnom metodom se mjerenje može izvesti neposredno tako da mjerači budu umjereni u odnosu na neku mjerljivu veličinu. Tlak se određuje korištenjem jednadžbe stanja idealnog plina, te očitavanja tlaka primjenom ovih metoda ovise o vrsti plina.

Temeljna podjela indirektnih mjerila s obzirom na princip mjerenja je:

- Ionizacija (vruća katoda, hladna katoda)
- Toplinska vodljivost (Piranijevo mjerilo, Termopar)
- Viskozitet (rotirajuća cijev)

Kako je već rečeno prije svakog mjerenja potrebno je odabrati optimalan instrument koji zadovoljava uvjete u tlačnom sustavu. Prije svega potrebno je poznavati gornju i donju granicu mjerenja pritiska mjerila odnosno najvišu i najnižu vrijednost koje instrument može ispravno očitati i podnijeti bez oštećenja. Također potrebno je poznavati preciznost mjernog instrumenta, njegovo mjerno odstupanje.

Od ostalih parametara treba uzeti u obzir da mjerilo može predstavljati izvor zagađenja u tlačnom sustavu. Mjerilo tlaka može biti izvor toplinske energije ako se neki dio mjerila prilikom mjerenja zagrijava, tako dolazi do toplinske neravnoteže između tlačne komore i samog mjerila te očitavanja mogu biti neispravna.

Mjerila s vremenom mijenjaju svoje radne karakteristike i posljedično daju netočne rezultate. Stoga je sva mjerila potrebno ponovno umjeriti nakon određenog vremenskog razdoblja.

3.1. Cijevni manometri

3.1.1. Živin barometar

Njihova povijest vuče još iz 17. stoljeća kada je Evangelista Torricelli napravio prvi živin barometar. U staklenoj cijevi, zatvorenoj s jedne strane, nalazi se živa te je ona uronjena u posudu koja je također ispunjena živom. Koliki dio žive će iscuriti iz cijevi njenim uranjanjem u posudu ovisi o atmosferskom tlaku. On pritišće i radi ravnotežu sa težinom žive u cijevi. Kada se ravnoteža postigla, možemo jednostavno očitati visinu stupca žive te preračunati u vrijednost atmosferskog tlaka. Standardni atmosferski tlak tako u milimetrima stupca žive iznosi 760 mmHg što je ekvivalentno 101325 Pa. Obično se uz samu staklenu cijev nalaze i mjerila temperature i vlažnosti okolnog zraka.



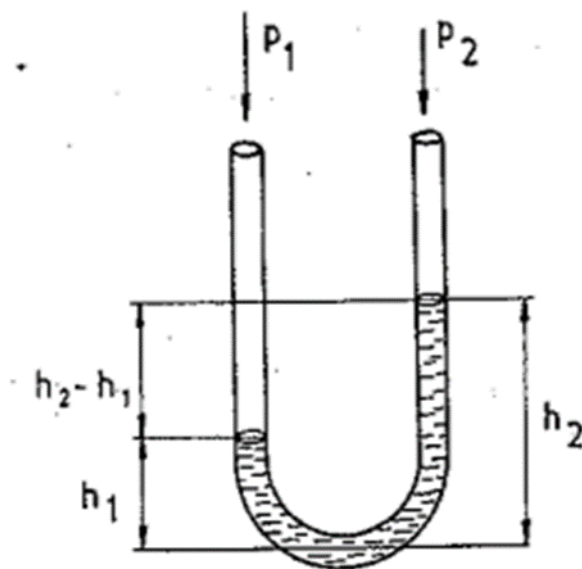
Slika 5. Živin barometar u drvenom kućištu

Glavno odličje živinog barometra je njegova preciznost i pouzdanost pri mjerenju atmosferskog tlaka, ali ovakvi barometri imaju puno nedostataka. Zbog njegovih velikih dimenzija (preko 0,8m u visinu) te staklene cijevi vrlo je osjetljiv na oštećenja te nespretnan za transport s jednog

mjernog mjesta na drugo. Na ovim barometrima sva mjerenja se trebaju isčitavati okom s iscrtanog mjerila na cijevi, te raditi daljnje pretvorbe iz milimetara stupca žive u paskale. Uz sve navedeno, poteškoće s održavanjem živinih barometara kao i toksičnost živine pare dovelo je do udaljavanja od korištenja ovakvih barometara.

3.1.2. Manometar s U-cijevi

Ovakvi manometri se zasnivaju na mjerenju razine tekućine u cijevima te spadaju među prve metode mjerenja tlaka odnosno vakuuma. S obzirom na jednostavnost postupka i nisku cijenu metoda je vrlo precizna. Glavna izvedba ovakvih uređaja je U-cijev. Obična staklena cijev se savije u obliku slova „U“ te se ispuni tekućinom. Jedan kraj cijevi se spoji na prostor u kojem želimo izmjeriti tlak dok se drugi kraj cijevi ostavi ili spoji na prostor gdje nam je poznat tlak.



Slika 6. Manometar s U-cijevi

Atmosferski tlak ili poznati tlak su veći od tlaka kojeg želimo izmjeriti te samim time pritišću tekućinu u cijevi. Tako možemo izmjeriti razliku u stupcima tekućine kako je prikazano na slici. Poznavajući svojstva tekućine unutar manometra potrebno je samo izračunati nepoznati tlak pomoću izraza:

$$p_2 = p_1 - \rho_{tek} \cdot g (h_2 - h_1) \quad (3)$$

Ako je cijev na drugom kraju otvorena prema okolišu tada je referentni tlak atmosferski i te se izvedbe nazivaju otvorenima. Otvorene izvedbe obično mogu mjeriti vakuum do 100 Pa. To je

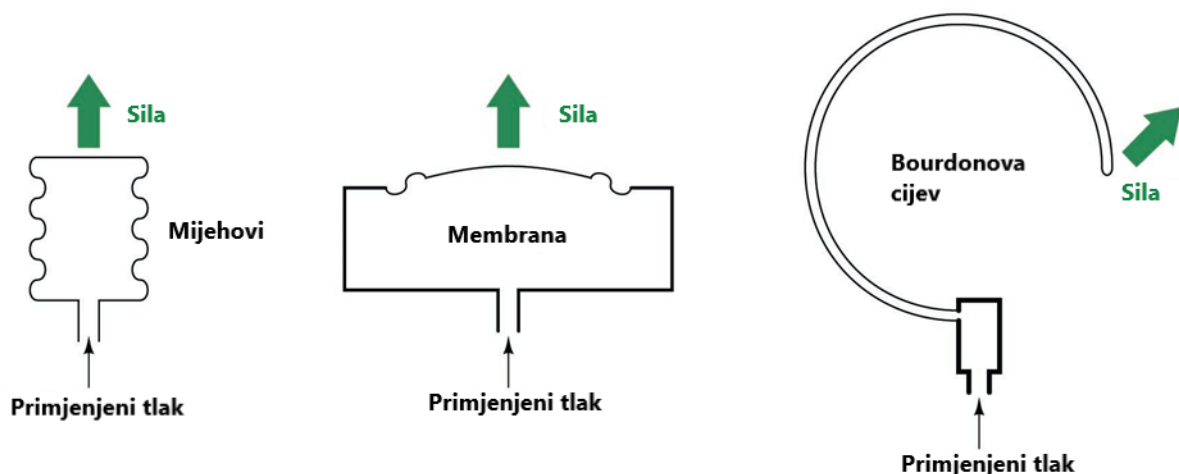
jednostavnija izvedba, ali je manje precizna iz razloga što se atmosferski tlak neprestano mijenja i ne predstavlja dobar standard. Iz tog razloga se cijev zatvara s jedne strane te iznad zatvorenog kraka djeluje samo para tekućine, najčešće žive ili ulja. Takve izvedbe se nazivaju zatvorenima i preciznije su od otvorenih. Sa živinim zatvorenim manometrom kojemu je duljina kraka 0,9 m moguće je mjeriti tlak do 0,85 bar.

3.2. Mjerila s mehaničkom deformacijom

Čvrsta tijela imaju osobinu prenošenja vanjske sile isključivo u pravcu i smjeru sile. Pri djelovanju sile se deformira čvrsto tijelo i takve deformacije se mogu podijeliti u dvije kategorije: elastične deformacije i plastične deformacije. Kod elastičnih deformacija nastupaju promjene koje nakon prestanka djelovanja sile u potpunosti nestaju, dok kod plastičnih deformacija te promjene ostaju i nakon prestanka djelovanja sile.

Pri mjerenju vakuuma se promatraju elastične deformacije koje nastaju pri razlici tlaka. Te deformacije će biti linearno povezane sa vanjskom silom, odnosno razlikom tlaka, preko Hookovog zakona. Samim time će se odrediti i domena mjerenja, kako ne bi oštetili uređaj prevelikom razlikom tlakova.

Postoje više vrsta deformacijskih manometra, a međusobno se razlikuju vrstom elastičnog elementa i načinom određivanja veličine deformacije. Neki od karakterističnih elemenata su prikazani na slici:



Slika 7. Elastični elementi mjerila s mehaničkom deformacijom

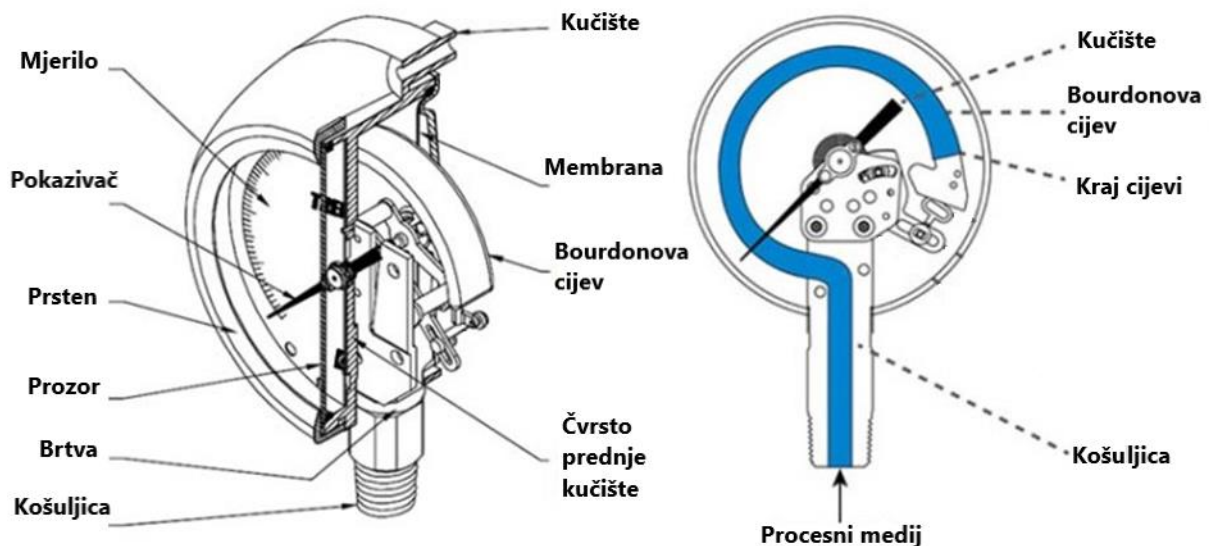
Deformacijski manometri mjere apsolutni tlak i spadaju pod apsolutne manometre. Zbog toga im je prednost da se kalibracija može izvršiti na inertnom plinu, a zatim primijeniti za mjerenje

korozivnog ili toksičnog plina. Također se pri mjerenju ne koriste nikakvi fluidi i time se osigurava čista sredina mjerenja bez dodatnih supstanci.

3.2.1. Manometri s elastičnom šupljom cijevi – Bourdonova cijev

Elastični element u ovim manometrima je šuplja cijev u obliku spirale koja je najčešće izrađena od bakrene legure s dobrim elastičnim svojstvima. Spirala se pod djelovanjem vanjskog atmosferskog tlaka deformira te pomoću mehanizma pomiče pokazivačku iglu i na skali možemo očitati nepoznati tlak.

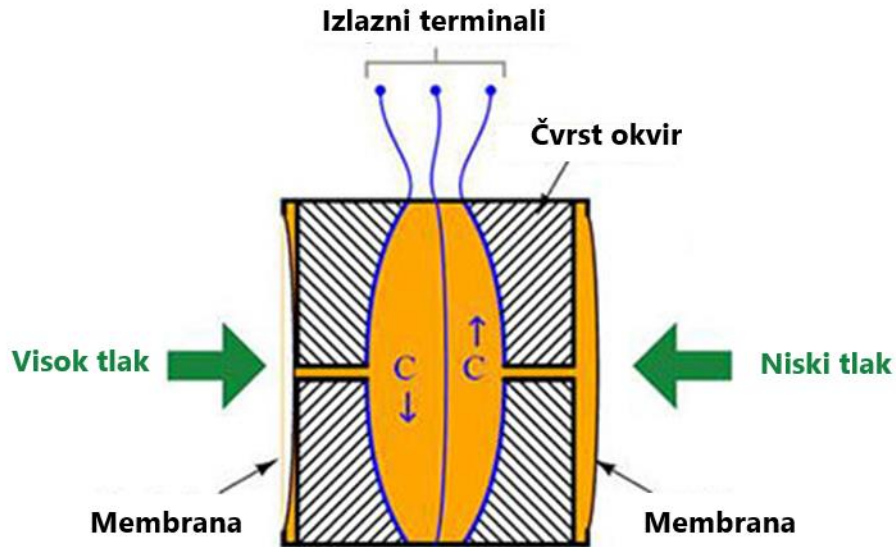
Skala elastičnog manometra kalibrira od vrlo malog pa sve do atmosferskog tlaka. Takvi manometri imaju velike greške mjerenja $\pm 2 - 5\%$.



Slika 8. Manometar s elastičnom šupljom cijevi - Bourdonova cijev

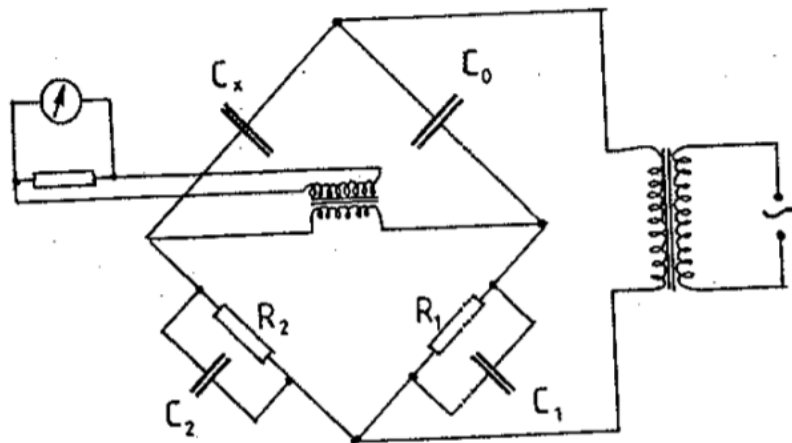
3.2.2. Kapacitivni manometar

Kapacitivni manometri sadrže ravnu membranu od elastičnog metala koja je postavljena između dvije komore u kojima vladaju različiti tlakovi. Također uz membranu su postavljene dvije elektrode sa malim razmakom te skupa sa membranom čine sklop električnog kondenzatora. Pod utjecajem razlike tlaka javlja se elastična deformacija membrane što uzrokuje promjenu električnog kapaciteta. Ovakvi manometri mogu mjeriti tlak od atmosferskog pa sve do 10^{-2} Pa.



Slika 9. Konstrukcija kapacitivnog manometra

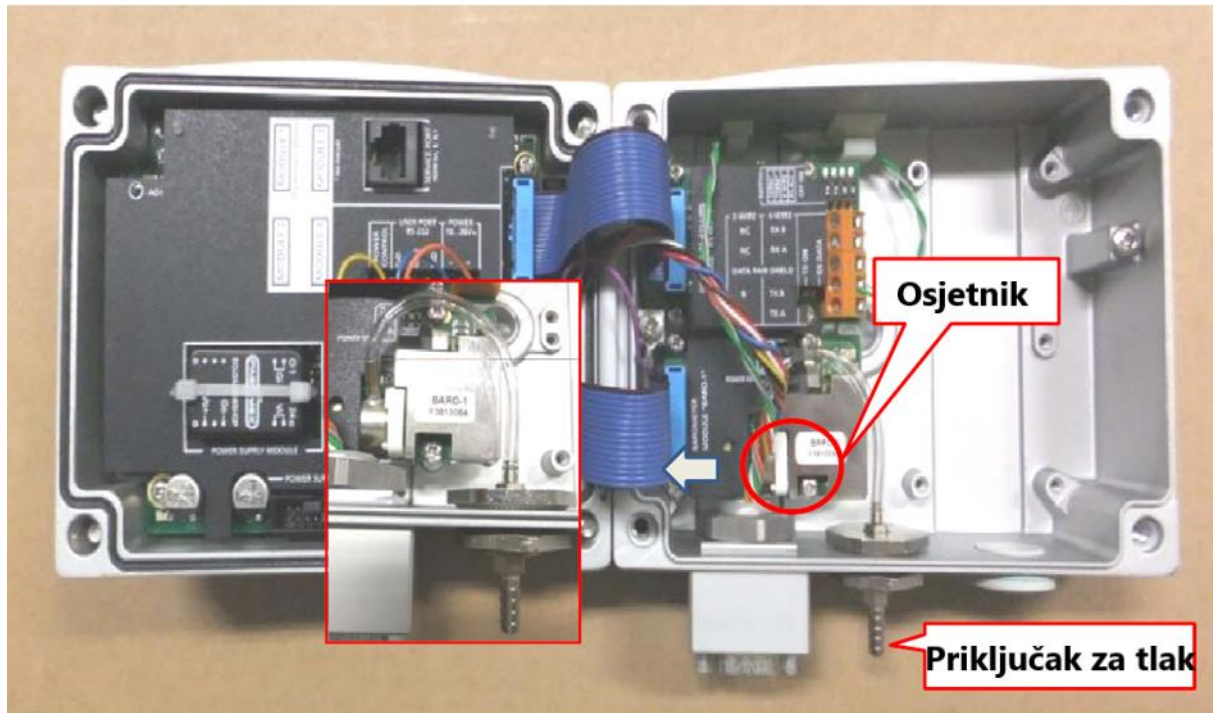
Za mjerenje električnog kapaciteta koristi se kapacitivni most gdje se na jednoj grani nalazi kondenzator kapacitivnog manometra (C_x), a u drugoj grani kondenzator koji ima kapacitet približno jednak kapacitetu sa opuštenom membranom (C_0). Smanjenjem protoka struje kroz dijagonalu mosta se uspostavlja balans u mostu te se to očitava i preračunava u vrijednosti tlaka.



Slika 10. Shema kapacitivnog mosta

3.3. Elektronički barometri

Elektronički ili digitalni barometri rade na principu kapacitivnog manometra kako je opisano u prethodnom poglavlju. Oni pretvaraju signal iz senzora u električnu veličinu iz koje se može dobiti vrijednost atmosferskog tlaka. Ove barometre odlikuje visoka točnost i rezolucija mjerenja koja obično ide do nekoliko decimala. Rezultati na digitalnim barometrima su zorno prikazani na monitoru. Mnogi električni barometri su opremljeni sa dodatnim značajkama osim osnovnog mjerenja tlaka kao što su mjerenje temperature i vlažnosti.



Slika 11. Otvoreno kućište elektroničkog barometra

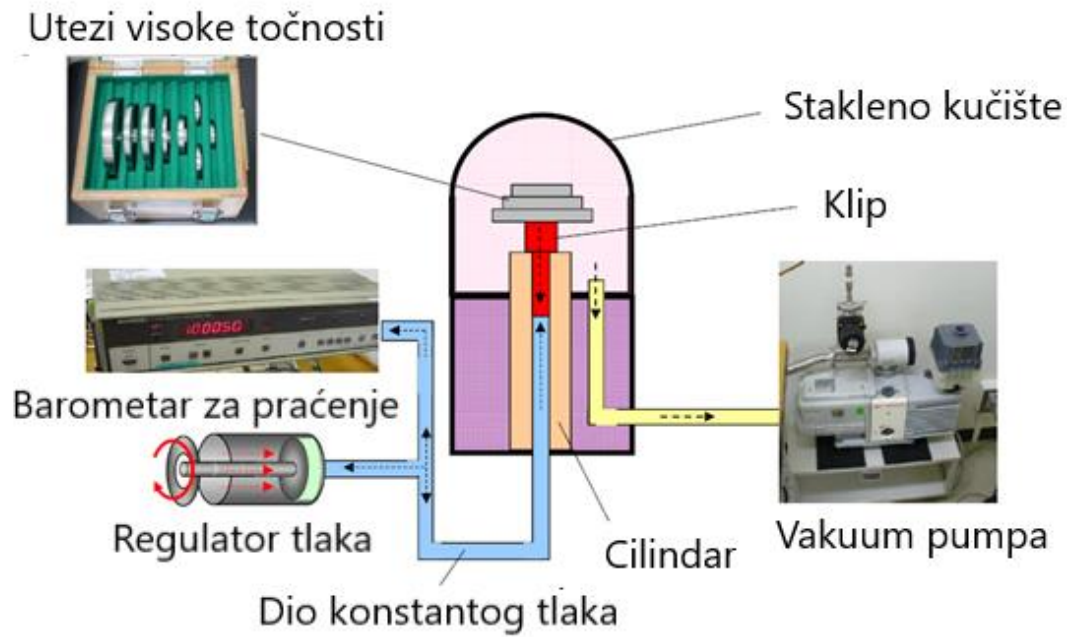
Neki elektronički barometri uključuju mogućnosti bilježenja podataka, omogućujući korisnicima bilježenje i analizu tlaka tijekom vremena. Značajke povezivanja, kao što su USB ili Bluetooth, omogućuju prijenos podataka na druge uređaje za daljnju analizu ili dijeljenje. Elektronički barometri su kompaktni i malih dimenzija, što ih čini pogodnima za terenski rad i primjene u kojima je bitna mobilnost. Kao izvor napajanja kod elektroničkih barometara se obično koriste baterije. Potrošnja energije ovih uređaja je općenito niska, što osigurava učinkovit rad tijekom duljeg razdoblja.



Slika 12. Digitalni barometar Ruska 6200 u vlasništvu LPM-a

3.4. Apsolutne tlačne vage

Ovakvi barometri se najčešće koriste kao etaloni za umjeravanje drugih barometara te se koriste u meteorološkim laboratorijima gdje je visoka preciznost mjerenja tlaka potrebna. Imaju najvišu točnost mjerenja koja odgovara standardima CIMO-a (Commission for Instruments and Methods of Observation). Oni rade na jednostavnom principu izjednačavanja primijenjene poznate sile na površinu i nepoznatog tlaka. Tipična konstrukcija ovakvog barometra prikazana je na slici 13.



Slika 13. Princip rada apsolutne tlačne vage

Na cilindar koji je fino obrađen na nizak stupanj hrapavosti se postavljaju utezi poznate mase. Masa tih utega je unaprijed izmjerena iznimno visokom točnošću i preciznošću. Taj cilindar se poklopi staklenim kućištem te se iz njega pumpom isušuje sav zrak i napravi vakuum. Utezi svojom masom i silom teže rade silu na površinu cilindra te se tako može vrlo precizno odrediti poznati tlak. S druge strane spojimo tlak koji želimo izmjeriti te ga stavljamo u ravnotežu s poznatim tlakom od utega.

Apsolutne tlačne vage mogu mjeriti tlak u širokom rasponu. Raspon tlaka koji određena apsolutna tlačna vaga može mjeriti ovisi o njenom dizajnu i namjeni. Kako bi se zadržala preciznost i točnost mjerenja, one moraju biti postavljene u kontroliranim uvjetima temperature te minimalnim vibracijama.

4. METODE GENERIRANJA GRUBOG VAKUUMA I PRETLAKA

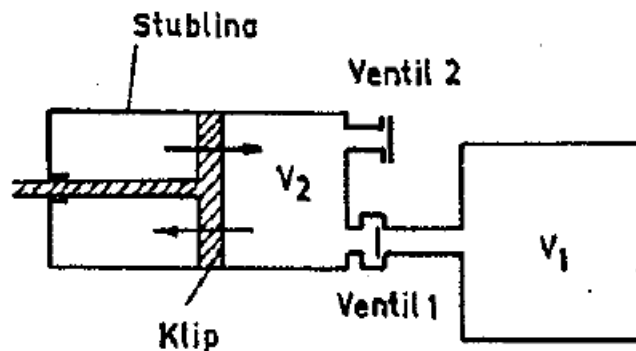
Za promjenu tlaka unutar sustava obično se koriste varijacije pumpi i kompresora. Za postizanje grubog vakuuma i malih tlakova, odnosno pretlaka, koriste se pumpe. Kompresori se koriste za postizanje većih tlakova u sustavu te ih zato u ovom radu nećemo ni spominjati.

Vakuumpumpe, uređaji za generiranje vakuuma, su osnovni dio vakuumnog sustava. Temeljni princip rada pumpe je izbacivanje molekula plina iz zatvorenog prostora, vakuumske komore, čime se smanjuje tlak unutar istog. Princip postizanja pretlaka je isti osim što umjesto ispumpavanja zraka iz sustava, pumpe okolni zrak upumpavaju u sustav te se tako povisuje tlak u sustavu.

Radi jednostavnosti objašnjavanja sve pumpe će biti opisane za postizanje vakuuma u sustavu.

4.1. Stapne pumpe

Stapne pumpe spadaju u najranije razvijene vrste mehaničkih pumpi. Jednostavan tip ove pumpe pokazan je na slici 14:

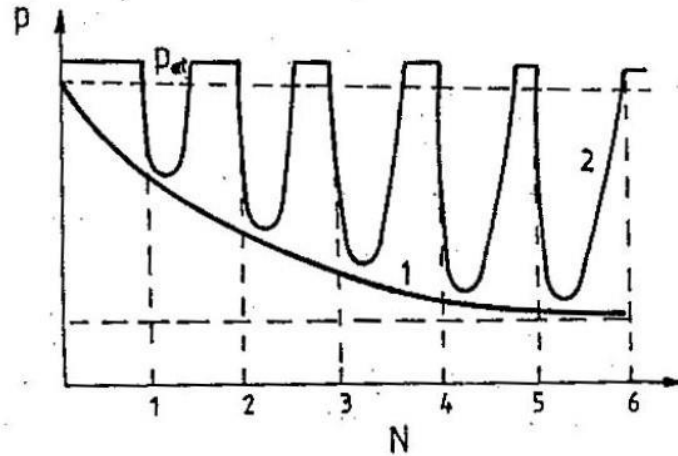


Slika 14. Shema stapne vakuumpumpe

Postupak ispumpavanja volumena V_1 izvodi se pomicanjem stapa unutar cilindra pumpe. U početnom položaju stap se nalazi na lijevoj strani, ventil 1 je otvoren te je volumen V_2 ispunjen plinom. Pomicanjem stapa udesno zatvara se ventil 1 i dolazi do kompresije plina.

U trenutku kada mu tlak postane veći od atmosferskog, ventil 2 se otvara i plin izlazi u okoliš. Povlačenjem stapa dolazi do stvaranja podtlaka te se zbog utjecaja atmosferskog tlaka ventil 2 zatvara. U trenu kada tlak u cilindru, odnosno volumenu V_2 postane manji od onog u vakuum komori, dolazi do otvaranja ventila 1 te ulaska plina iz vakuum komore u prostor cilindra.

Ovaj postupak se ponavlja, čime se uklanja plin iz vakuum komore te se time u njoj smanjuje tlak. Promjena tlaka u vakuum komori i pumpi za vrijeme rada pumpe pokazan je na slici 15., gdje krivulja 1 predstavlja tlak u vakuum komori, a krivulja 2 tlak u pumpi.



Slika 15. Promjena tlaka u komori (1) i u pumpi (2) prilikom ispumpavanja

Većina stapnih pumpi postiže tlak reda $10^0 - 10^2$ mbar. Razlog zašto je nemoguće postići manje vrijednosti je činjenica da postoji propuštanje plina kroz zazor između stapa i cilindra, te također zbog toga što postoji određena količina plina koja zaostaje u cilindru kada se stap pomakne u krajnji desni položaj. Brzina ispumpavanja ovih pumpi je veoma mala.

4.2. Rotacijske pumpe

Mehanizam rada rotacijskih pumpi se zasniva na istom principu kao i stapne pumpe. Ali, umjesto linearnog oscilatornog kretanja klipa u cilindru, kod ovih pumpi kompresija se izvodi rotacijskim kretanjem rotora složene konstrukcije postavljenog unutar cilindričnog statora pumpe.

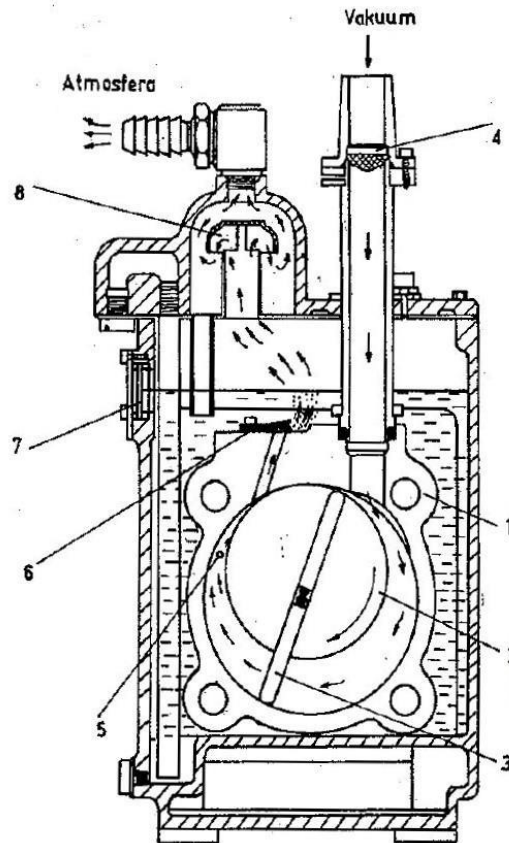
Postoji više vrsta rotacijskih vakuum pumpi s obzirom na njihovu konstrukciju:

- Rotacijske pumpe s krilcima u rotoru
- Vakuum pumpe s vodenim prstenom
- Dvorotorske vakuum pumpe

Princip rada je sličan kod svih navedenih izvedbi, stoga ćemo ga detaljnije objasniti na primjeru jednostupanjske rotacijske pumpe s krilcima u rotoru.

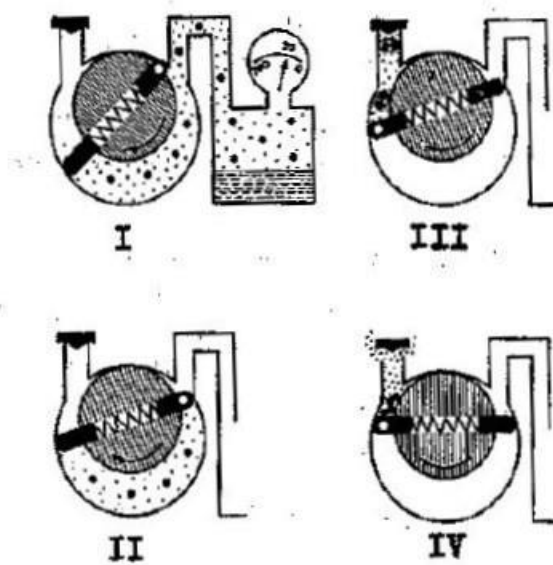
Kod jednostupanjskih rotacijskih pumpi s krilcima u rotoru, rotor je postavljen unutar cilindričnog statora. Rotor se okreće oko osovine koja je paralelna s osi cilindra, tako da do

kontakta sa statorom dolazi samo duž jedne linije. Kontakt se postiže malim zazorom između visoko poliranih površina. U rotoru postoje žljebovi, unutar kojih se nalaze krilca. Krilca također naliježu na površinu statora pod utjecajem opruga i dijele prostor statora na dva ili više odvojenih dijelova, ovisno o broju krilca.



Slika 16. Presjek jednostupanjske rotorske vakuum pumpe s krilcima

Pojedini stupnjevi rada pumpe pokazani su na slici 17. Pri okretu rotora u naznačenom smjeru, u poziciji I krilca su postavljena tako da plin u vakuum komori ulazi u zapremninu pumpe. U poziciji II krilce zatvara spoj prema vakuum komori i izolira određenu količinu plina u prostoru ograničenom krilcima, rotorom i statorom. Daljnjim okretanjem rotora ova zapremnina se smanjuje, čime dolazi do rasta tlaka plina u njoj. U poziciji III taj odvojeni prostor se spaja s izlazom iz pumpe gdje se nalazi izlazni ventil. U trenutku kada tlak plina u zapremnini postane veći od atmosferskog, ventil se otvara i stlačeni plin izlazi u okoliš (pozicija IV). U vrijeme dok je jedna polovica sustava u fazi izbacivanja stlačenog plina, druga prima nove količine plina iz vakuum komore.



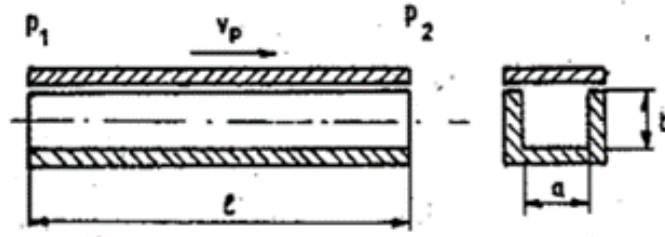
Slika 17. Faze rada rotacijske vakuum pumpe

Donji granični tlak koji se može postići ovom pumpom je reda veličine $10^{-2} - 10^{-1}$ mbar. Vrijednost graničnog tlaka je ograničena propuštanjem plina po površinama nalijeganja statora i rotora, odnosno statora i krilaca, kao i povratnim strujanjem plina iz atmosfere u pumpu. Kako bi se ovi procesi smanjili, najčešće se cijeli stator uranja u komoru s uljem. To ulje istovremeno podmazuje sve dijelove pumpe i formira tanki sloj ulja između rotora i statora.

Na ovom principu rade i ostale vrste rotacijskih pumpi kod kojih se postiže i puno veća brzina ispušavanja. Primjerice kod vakuum pumpi s vodenim prstenom ona može doseći i do 8000 m^3/h .

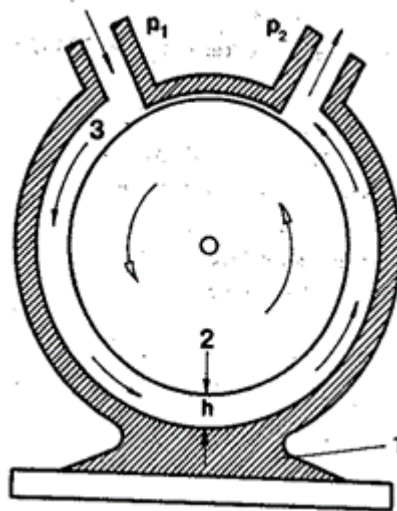
4.3. Molekularne pumpe

Molekularnim pumpama smatraju se naprave kod kojih se efekt pumpanja postiže prijenosom impulsa s pokretnih dijelova pumpe na molekule fluida. Fizikalno gledajući, princip rada se može opisati teorijom sudara atomskih čestica s površinom tijela u pokretu. Zorniji prikaz postizanja efekta pumpanja prikazan je sljedećom slikom.



Slika 18. Molekularno pumpanje pokretnim dijelom uskog kanala

Kod uskog statičnog kanala gornja ploha se giba paralelno s osi kanala brzinom v_p . Molekule fluida u kanalu se sudaraju s gornjom pokretnom površinom i tada primaju komponentu impulsa u smjeru kretanja pokretne površine. Na taj način se postiže razlika u tlakovima p_1 i p_2 na početku i kraju kanala.



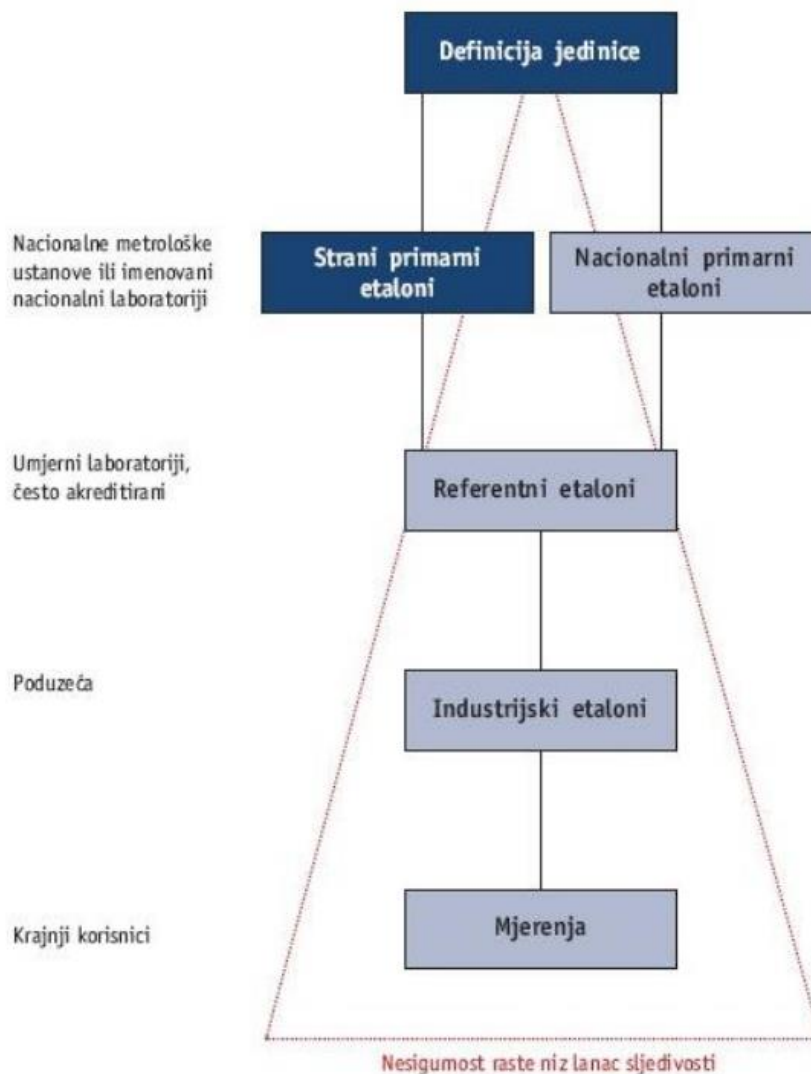
Slika 19. Komorna molekularna pumpa

Takav princip se primjenjuje kod jednostavne molekularne pumpe s komorom koja se sastoji od statora 1, rotora 2 i komore 3. U gornjem kratko dijelu nalazi se sićušan zazor koji pruža veliki otpor protoku fluida. Pri velikim brzinama rotora, molekule fluida apsorbiraju tangencijalnu komponentu brzine rotora nakon sudara i udaraju u stator. Postupak se višestruko ponavlja te se molekule usmjeravaju prema izlaznom otvoru pumpe, odnosno prema tlaku p_2 .

5. METODE UMJERAVANJA BAROMETARA

Umjeravanje ili kalibracija je sustavni postupak potvrđivanja i prilagođavanja očitavanja barometra radi usklađivanja s priznatim standardom, odnosno etalonom. Ovaj proces osigurava da mjerni instrument pruža pouzdana i točna mjerenja tlaka. Umjeravanje je glavni mehanizam za osiguravanje mjerne sljedivosti instrumenata.

Sljedivost predstavlja svojstvo mjernog rezultata pri čemu se rezultat može povezati s referencom kroz dokumentirani neprekinuti lanac kalibracija, od kojih svaka pridonosi mjernoj nesigurnosti [VIM]. Ovaj proces u konačnici osigurava da mjerni instrument pruža pouzdana i točna mjerenja tlaka.



Slika 20. Lanac sljedivosti

Umjeravanja mjernih instrumenata se vrše zbog:

- Osiguravanja sljedivosti mjernih instrumenata
- Utvrđivanja sukladnosti s drugim mjerilima
- Osiguravanja točnosti očitavanja mjernih instrumenata
- Dokazivanja pouzdanosti mjerila

Nakon uspješnog umjeravanja izdaje se potvrda o umjeravanju, a na uređaj se lijepi naljepnica na kojoj piše datum umjeravanja i oznaka za metodu kojom se uređaj umjerio.

Postoje razne organizacije koje daju smjernice vezane za procese umjeravanja poput:

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

Te organizacije su se udružile u usklađivanju kriterija umjeravanja i metoda ispitivanja.

U ovom radu će se umjeravanje vršiti po OIML-ovim smjernicama stoga će se njihova publikacija detaljno opisati.

5.1. The Organisation Internationale de Metrologie Legale (OIML)

The Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML) je svjetska, međuvladina organizacija čija je glavna zadaća usklađivanje propisa i mjeriteljskih kontrola koje primjenjuje nacionalne mjeriteljske službe ili povezane organizacije svojih država članica. [14]

Publikacije OIML-a mogu se podijeliti u dvije kategorije:

- Međunarodne preporuke (OIML R) predstavljaju propise koji se zahtijevaju od dotičnih mjernih instrumenata, specifikacija metoda i opreme za provjeru njihove sukladnosti; države članice OIML-a bi se trebale pridržavati ovih propisa što je više moguće
- Međunarodni dokumenti (OIML D) koji su informativnog karaktera za pomoć i poboljšanje pri mjerenju

Izbjegavanje kontradiktornih zahtjeva između OIML-a i drugih organizacija (poput ISO-a i IEC-a) postignuto je sporazumnim dogovorom kako bi proizvođači i korisnici mjernih instrumenata mogli vršiti umjeravanje po više publikacija istodobno.

Ova preporuka specificira tehničke i mjeriteljske karakteristike koje su instrumenti potrebni imati za mjerenje atmosferskog okolnog tlaka, njihovu kalibraciju te naknadnu verifikaciju. Primjenjiva je za barometre koji se koriste u laboratorijima, industrijskim postrojenjima i meteorološkim stanicama, te su manjeg razreda točnosti. Odnosi se na barometre čiji je raspon mjerenja pogodan za tlakove koji se javljaju na nadmorskim visinama između -200m i +2000m. Ova preporuka nije namijenjena za mjerne instrumente koji se koriste kao nacionalni standardi.

5.1.1. Razredi točnosti

Za živine barometre i barometre s elastičnim elementima postoje tri razreda točnosti. U sljedećoj tablici su dane najveća moguća odstupanja rezultata mjerenja za svaki razred točnosti.

Tablica 1. Maksimalna odstupanja po razredima točnosti

| Razred točnosti | Najveća moguća pogreška izmjerene vrijednosti nakon uzimanja u obzir korekcija za temperaturu i gravitaciju |
|-----------------|---|
| 0,02 | $\pm 0,02$ kPa ($\pm 0,2$ hPa) |
| 0,05 | $\pm 0,05$ kPa ($\pm 0,5$ hPa) |
| 0,1 | $\pm 0,10$ kPa ($\pm 1,0$ hPa) |

Najveće odstupanje koje se javlja u radu je jednako najvećem odstupanju u verifikaciji instrumenta. Također pri korištenju raznih konstanti za izračun tlaka one trebaju biti zadane na takvoj preciznosti da zbroj odstupanja koja se javljaju korištenjem tih konstanti bude manji od 10% najvećeg mogućeg odstupanja za dani instrument. Uzeto je u obzir da je konstanta gravitacije za odabranu lokaciju mjerenja dovoljno precizno određena kako ne bi značajno utjecala na ukupno odstupanje.

5.1.2. Tehnički zahtjevi

Općenito bi barometri trebali moći podnijeti transport s jednog mjesta na drugi bez oštećenja te tako da se ne pojave nova odstupanja koja bi povećala najveće moguće odstupanje na veće od granica prikazanih u Tablici 1.

Ako je konstrukcija barometra ili komore takva da se unutar njega može zadržati tlak na vrijednosti različitoj od tlaka okoline, tada nepropusnost mora biti takva da se najveći dopušteni gornji ili donji tlak koji barometar može mjeriti ne promjeni za najveće moguće odstupanje unutar perioda od jedne minute.

Kako će se u ovom radu ispitivati barometri s elastičnim elementima, tehnički zahtjevi za živine barometre se neće detaljnije opisivati.

5.1.2.1. Tehnički zahtjevi za barometre s elastičnim elementima

Elastični elementi barometra mogu biti raznih oblika (npr. membrana ili Bourdonova cijev) te moraju biti napravljeni od materijala čija svojstva zadovoljavaju potrebe ove preporuke. Instrument mora biti konstruiran tako da mehanizam za nuliranje i podešavanje osjetljivosti ne bude lako dostupan korisniku tijekom mjerenja. Također instrument mora sadržavati neke mehanizme za temperaturnu kompenzaciju, primjerice bimetalne trake, tako da budu ispunjeni zahtjevi za odstupanja koji su prije opisani.

Za olakšano kalibriranje i ispitivanje mjernih instrumenata njihova kućišta mogu biti zatvorena u posebnoj hermetički zatvorenoj komori s prozorom za promatranje. Tako se tlak može generirati u komori i biti primijenjen na senzorni element barometra kroz ventilacijsku cijev koja se pričvršćuje na komoru prigušnim spojevima. Svi spojevi u ovakvom sustavu moraju biti nepropusni do mjere kako je ranije opisano.

Barometri koji u sebi imaju električne komponente koje mogu utjecati na mjerne karakteristike moraju biti konstruirani tako da ne utječu na odstupanje više od 25% najvećeg dopuštenog odstupanja za taj instrument.

Svi instrumenti koji su osjetljivi na oštećenja kod primjene vrijednosti tlaka izvan granica njihovog radnog područja moraju imati graničnike za preopterećenje. Također barometri bi trebali dolaziti s uputama za korištenje koje bi trebale sadržavati detaljan opis instalacije, transporta i uporabe uređaja. Ako je potrebno u uputama se treba nalaziti i tablica za temperaturna odstupanja.

Barometri koji imaju digitalne i analogne čitače moraju omogućavati očitavanja do vrijednosti tlaka 0,01 kPa (0,1 hPa) ili manje za instrumente razreda točnosti 0,02 i 0,05, i do vrijednosti tlaka 0,02 kPa (0,2 hPa) ili manje za instrumente razreda točnosti 0,1. Na uređaju mora biti jasno naznačena mjerna jedinica u kojoj uređaj prikazuje izmjereni tlak. Također ako je instrument digitalan visina brojki na zaslonu mora biti veća od 3 mm, te u slučaju nestanka ili kvara izvora napajanja na zaslonu mora biti prikazan znak upozorenja.

5.1.2.2. Dodatne oznake

Na barometrima mora biti jasno označen njihov serijski broj, naziv proizvođača, godina proizvodnje i model. Također treba biti vidljiva oznaka verifikacije umjeravanja ako ona postoji. Takve oznake bi trebale biti udaljene od mjerne skale kako ne bi došlo do zabune.

Za barometre s elastičnim elementima treba biti jasno označen njihov radni položaj (smjer postavljanja u odnosu na vertikalnu) i raspon tlaka. Na uređaju bi trebalo biti napisano na prikladnom vidljivom mjestu ako je za njega potrebna temperaturna korekcija.

5.2. Metoda umjeravanja po OIML-u

Kako bi se ostvario puni mjerni potencijal svi barometri trebaju biti umjereni prije njihova korištenja te ponovno umjereni u redovitim vremenskim intervalima kroz njihov vijek. Ako se kojim slučajem barometar ošteti ili pokvari, nakon njegovog popravka bi se trebao ponovno umjeriti.

Kada se odredi razred točnosti te su ispitani svi tehnički zahtjevi koje mjerni instrument i mjerna linija mora imati može se početi sa umjeravanjem. Barometar koji se umjerava bi trebao biti u uvjetima ispitivanja barem 10 sati prije početka samog umjeravanja. Prilikom umjeravanja barometar se mora koristiti isključivo prema uputama za korištenje.

Broj mjernih točaka odnosno tlakova na kojima se ispituje barometar ovisi o linearnosti samog instrumenta prema iskustvu i testovima procjene. Trebaju postojati barem 4 mjerne točke na različitim tlakovima kroz cijelo radno područje mjernog instrumenta u intervalima ne većim od 5 kPa. Između mjernih točaka tlak se treba mijenjati postepeno, tako da intenzitet promjene tlaka ne prelazi 0,5 kPa po minuti. Pri svakoj mjernoj točki tlak se mora držati stabilnim barem 5 minuta prije samog očitavanja.

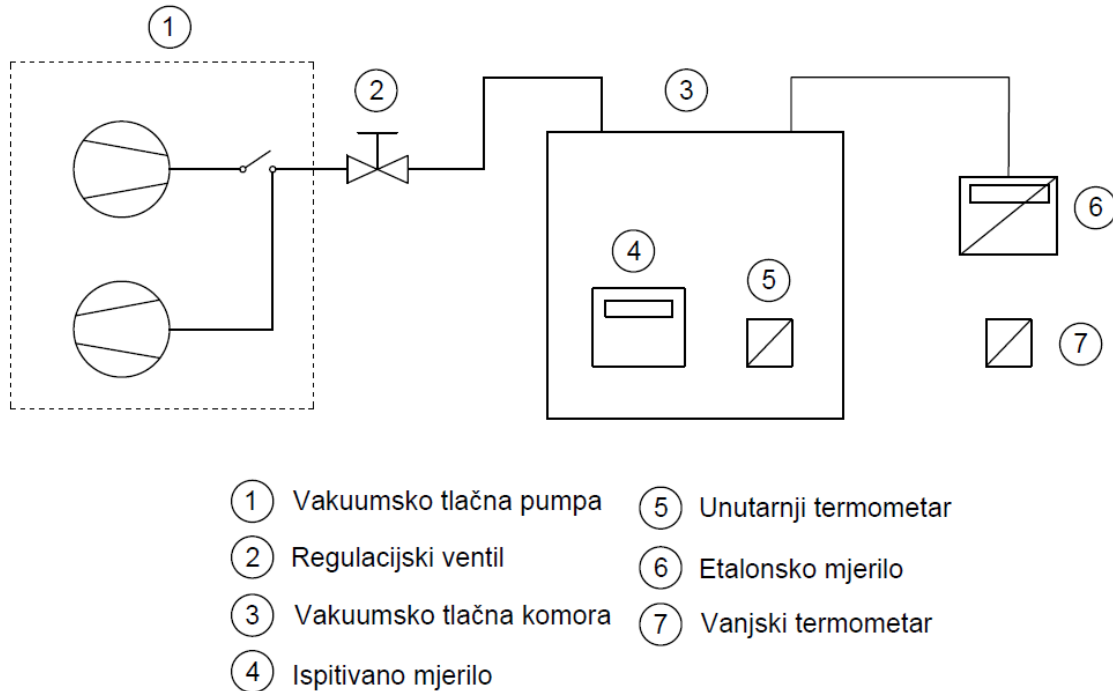
Kako je već rečeno nakon umjeravanja se izdaje potvrda o umjeravanju. Svaka potvrda o umjeravanju treba imati sljedeće informacije:

- Ime nadležnog ispitivačkog tijela
- Ime vlasnika barometra koji se ispituje
- Naziv proizvođača
- Broj ili kod uzorka umjeravanja
- Pripadajući razred točnosti
- Kratki opis umjeravanog barometra
- Serijski broj instrumenta

- Serijski broj pomagala pri umjeravanju poput termometra
- Godina proizvodnje barometra
- Raspon tlakova umjeravanja
- Raspon temperatura umjeravanja
- Kratki opis provedenog umjeravanja
- Sljedivost i najveće moguće odstupanje tlaka i temperature prema standardu koji je korišten
- Korekcije za svaki ispitni tlak, izračunate uzimanjem srednje dobivene vrijednosti za rastuće i padajuće tlakove
- Histereza pri svakom ispitnom tlaku, izražena kao razlika između srednjih vrijednosti odstupanja za padajuće tlakove i srednjih vrijednosti odstupanja za rastuće tlakove
- Datum umjeravanja
- Preporučeni datum ponovnog umjeravanja

6. OPIS MJERNE LINIJE

Mjerna linija je postavljena u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM). Sustav za umjeravanje se sastoji od: pumpe, vakuumske tlačne komore, barometra koji želimo umjeriti, etalonskog barometra te uređaja za mjerenje okolnih uvjeta zraka.



Slika 21. Shema mjerne linije

Temeljni dio linije je vakuumska tlačna komora u kojoj se nalazi barometar koji želimo ispitati te uređaj za mjerenje temperature i vlage okolnog zraka. Tlak u sustavu se generira pomoću pumpe koja može generirati vakuum ili tlak. Nakon postizanja željenog tlaka regulacijskim ventilom ga reguliramo ili držimo konstantnim. Pumpa s regulacijskim ventilom je spojena na komoru pomoću fleksibilne cijevi i priključka s klampom radi osiguranog brtvljenja. Na isti način se na komoru spaja i etalonski barometar pomoću kojeg se vrši umjeravanje. Uz etalonski barometar postavljen je još jedan uređaj za mjerenje temperature i vlage vanjskog okolnog zraka kako bi mogli usporediti uvjete unutar i izvan komore.

Slika 24. prikazuje vakuumska tlačna komora sa transparentnim staklenim vratima koja nam služi kao pomoć u umjeravanju barometara. Transparentna staklena vrata nam omogućavaju da vidimo vrijednosti koje pokazuju barometri unutar komore. Ovakav pristup umjeravanja barometara u zatvorenoj komori nam omogućuje smanjenje nesigurnosti i bolju ponovljivost

izmjerenih vrijednosti. Također prednost komore je što se u nju mogu postaviti više od jednog uređaja te ih simultano ispitivati.



Slika 22. Vakuumsko tlačna komora slovenskog proizvođača Kambič

Kako je komora dizajnirana da se u njoj može stvoriti vakuum i tlak na vratima se nalazi brtva i mehanički zaključni mehanizam s polugom. Komora je sa stražnje strane opremljena s nekoliko priključaka na koju se spajaju pumpa i vanjski mjerači. Na stražnjoj strani nalazi se i prevodnica za napajanje i kontrolu uređaja te sigurnosni ventil.

Tablica 2. Tehničke karakteristike vakuumske tlačne komore

| Vakuumsko tlačna komora | |
|-------------------------|--------------------|
| Proizvođač | Kambič |
| Model | VTK-02 |
| Vlasnik | FSB – LPM |
| Vanjske dimenzije | 600 x 565 x 450 mm |
| Unutarnje dimenzije | 500 x 400 x 300 mm |
| Maksimalni radni tlak | 1300 mbar |
| Minimalni radni tlak | 500 mbar |

Pumpa je na komoru spojena fleksibilnom cijevi te nam ona osigurava stvaranje pritiska u cijelom području od 500 – 1300 mbar. Prekidač na pumpi koji se okreće u dva smjera određujemo da li će stvarati vakuum ili tlak u komori. Ispod prekidača nalazi se i ventil kojeg možemo zatvoriti i tako držati željeni tlak postignut pumpom. Otvaranjem i zatvaranjem tog ventila možemo vršiti finu regulaciju tlaka u komori. Prije sastavljanja mjerne linije provjerili smo karakteristike komore. To smo napravili tako da smo ispitali stabilnost najvišeg i najnižeg mogućeg tlaka u komori.



Slika 23. Pumpa koja dolazi uz komoru

Etalonski barometar, proizvođača Vaisala i tipa PTB220, je spojen preko malene cjevčice na vakuum crijevo koje je zatim priključkom s klampom spojeno na komoru. Ovakav spoj nam je osigurao bolje brtvljenje i veću točnost mjerenja. Unutar komore postavili smo ispitivani barometar proizvođača Testo, tipa 176P1. Oba ispitivana barometra su istog tipa. U tablici 3. dane su tehničke karakteristike etalonskog i ispitivanih barometara. Kako možemo vidjeti etalonski barometar ima šire mjerno područje kao i veću rezoluciju očitavanja mjerenja.

Tablica 3. Tehničke karakteristike korištenih barometara

| Mjerilo | Umjeravani barometar | Umjeravani barometar | Etalonski barometar |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Proizvođač | Testo | Testo | Vaisala |
| Model | 176P1 | PTB 220 | PTB 220 |
| Vlasnik | FSB - LPM | FSB - LPM | FSB - LPM |
| Laboratorijska oznaka | TEOKO9 | TEOKO10 | TLPRE01 |
| Mjerno područje | 600 - 1100 | 600 - 1100 | 500 - 1100 |
| Rezolucija | 0,1 | 0,1 | 0,01 |
| Jedinica tlaka | mbar | mbar | mbar |



Slika 24. Etalonski barometar Vaisala (desno) i izvedba spoja na komoru (lijevo)

Okolna temperatura zraka i vlažnost mjerena su uređajima proizvođača Testo 175H1 od kojih je jedan postavljen unutar komore, dok je drugi postavljen izvan komore.



Slika 25. Ispitivani barometri marke Testo 176P1(lijevo) i uređaj za mjerenje temperature i vlage zraka Testo 175H1(desno)



Slika 26. Sastavljena mjerna linija

7. POSTUPCI UMJERAVANJA BAROMETARA I REZULTATI

UMJERAVANJA

Nakon postavljanja mjerne linije i ispitili smo tehničke zahtjeve uređaja po OIML-ovom standardu. Kako je mjerno područje ispitivanih barometara od 600 – 1100 mbar vakuumsko tlačnu komoru smo natlačili na granične tlakove te provjerili da li ih drži konstantnim barem 60 sekundi. Odlučili smo umjeriti barometre u 6 točaka, stoga su odabrane točke počevši od 1060 mbar s korakom od 40 mbar sve do 860 mbar.

Tijekom mjerenja uređaji za mjerenje temperature i vlage su bilježili vrijednosti temperature i vlage okolnog zraka te osrednjene vrijednosti možemo vidjeti u tablici 4. Također prije početka mjerenja izmjeren je tlak prostorije koji je iznosio 976,5 mbar.

Tablica 4. Uvjeti okolnog zraka unutar i van komore

| | Unutar komore (TEOKO13) | Van komore (TEOKO11) |
|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Temperatura zraka [°C] | 20,3 | 19,9 |
| Vlažnost zraka [%] | 61,8 | 62,3 |

Za početak mjerenja postavili smo ispitivani barometar s oznakom TEOKO9 u komoru. Komoru smo natlačili na najvišu mjernu točku odnosno 1060 mbar i očitali vrijednosti na ispitivanom i etalonskom barometru. Prelaskom na drugu mjernu točku regulacijskim ventilom smo ispuštali zrak iz komore te tako snižavali tlak u komori. Kada smo postigli željeni tlak zatvorili smo regulacijski ventil, pričekali da se sustav ustabilji te očitali vrijednosti s barometara. Za točke koje su ispod tlaka zraka prostorije pumpom smo ispumpavali zrak i tako dodatno snižavali tlak u komori radeći grubi vakuum unutar nje. Postupak smo ponavljali sve do 860 mbar što je ujedno i zadnja mjerna točka. Na 860 mbar smo ponovili očitavanje vrijednosti nakon 3 minute. Vraćajući se prema vrijednosti tlaka prve mjerne točke uključivali smo pumpu tako da upuhuje zrak u komoru te tako povećavali tlak unutar nje. Nakon što smo završili mjerenja za prvi barometar u komoru smo stavili barometar s oznakom TEOKO10 i po istom postupku krenuli s njegovim ispitivanjem. Mjerenje je započelo u 11 sati i 40 minuta, a završilo je u 14 sati i 50 minuta.

U tablicama 5. i 6. dani prikazani su izmjereni tlakovi po svim mjernim točkama te izračunata odstupanja u svakoj točki.

Tablica 5. Rezultati umjeravanja barometra TEOKO9

| Mjerna točka | Nazivni tlak | Etalonski barometar | Ispitivani barometar | Etalonski barometar | Ispitivani barometar |
|--------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| n | p_n | $p_{e,s}$ - silazno | $p_{i,s}$ - silazno | $p_{e,u}$ - uzlazno | $p_{i,u}$ - uzlazno |
| [-] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] |
| 1 | 1060 | 1060,16 | 1061,7 | 1059,82 | 1061,4 |
| 2 | 1020 | 1020,04 | 1021,7 | 1019,77 | 1021,4 |
| 3 | 980 | 979,95 | 981,6 | 979,99 | 981,7 |
| 4 | 940 | 939,93 | 941,6 | 939,61 | 941,3 |
| 5 | 900 | 900,12 | 901,9 | 900,27 | 901,9 |
| 6 | 860 | 859,75 | 861,4 | 859,75 | 861,4 |

Zbog velikog volumena komore i ne toliko precizne regulacije pumpe javljali su se problemi prilikom uspostave istih vrijednosti tlakova na etalonskom barometru silazno i uzlazno. Primjerice prilikom zaustavljanja pumpe koja je bila u procesu ispumpavanja zraka iz komore javilo bi se povratno strujanje iz cijevi pumpe te bi se dio zraka vratio nazad u komoru. Time bi se u nekoj mjeri povećao tlak unutar komore kojeg smo imali namjeru sniziti.

Kako bi ispravili grešku odlučili smo interpolirati vrijednosti uzlaznog tlaka etalonskog i ispitivanog mjerila tako da se vrijednosti uzlaznog i silaznog etalonskog tlaka izjednače. Time smo dobili jednu vrijednost tlaka pokazivanu na etalonskom barometru te možemo s lakoćom odrediti srednju vrijednost, odstupanje i histerezu.

Tablica 6. Prikaz ispravljenih rezultata umjeravanja barometra TEOKO9

| Mjerna točka | Etalonski barometar | Ispitivani barometar | Ispitivani barometar | Srednja vrijednost | Odstupanje | Histereza |
|--------------|---------------------|----------------------|--|--------------------|-------------|---------------------|
| n | $p_{e,s}$ - silazno | $p_{i,s}$ - silazno | $p_{i,u}$ - uzlazno (interpolirani) | p_s | $p_e - p_s$ | $p_{i,s} - p_{i,u}$ |
| [-] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] |
| 1 | 1060,16 | 1061,7 | 1061,7 | 1061,70 | -1,54 | 0 |
| 2 | 1020,04 | 1021,7 | 1021,7 | 1021,70 | -1,66 | 0 |
| 3 | 979,95 | 981,6 | 981,7 | 981,65 | -1,7 | -0,1 |
| 4 | 939,93 | 941,6 | 941,6 | 941,60 | -1,67 | 0 |
| 5 | 900,12 | 901,9 | 901,8 | 901,85 | -1,73 | 0,1 |
| 6 | 859,75 | 861,4 | 861,4 | 861,40 | -1,65 | 0 |

Isti postupak smo ponovili i za drugi ispitivani barometar TEOKO10. U sljedećim tablicama su prikazani rezultati mjerenja koje smo dobili:

Tablica 7. Rezultati umjeravanja barometra TEOKO10

| Mjerna točka | Nazivni tlak | Etalonski barometar | Ispitivani barometar | Etalonski barometar | Ispitivani barometar |
|--------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| n | p_n | $p_{e,s}$ - silazno | $p_{i,s}$ - silazno | $p_{e,u}$ - uzlazno | $p_{i,u}$ - uzlazno |
| [-] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] |
| 1 | 1060 | 1060,09 | 1061,7 | 1059,82 | 1061,4 |
| 2 | 1020 | 1020,03 | 1021,7 | 1019,74 | 1021,4 |
| 3 | 980 | 979,95 | 981,6 | 980,00 | 981,7 |
| 4 | 940 | 939,93 | 941,6 | 939,60 | 941,2 |
| 5 | 900 | 900,14 | 901,8 | 900,31 | 902,0 |
| 6 | 860 | 859,75 | 861,4 | 859,75 | 861,4 |

Tablica 8. Prikaz ispravljenih rezultata umjeravanja barometra TEOKO10

| Mjerna točka | Etalonski barometar | Ispitivani barometar | Ispitivani barometar | Srednja vrijednost | Odstupanje | Histereza |
|--------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------|---------------------|
| n | $p_{e,s}$ - silazno | $p_{i,s}$ - silazno | $p_{i,u}$ - uzlazno (interpolirani) | p_s | $p_e - p_s$ | $p_{i,s} - p_{i,u}$ |
| [-] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] | [mbar] |
| 1 | 1060,09 | 1061,7 | 1061,7 | 1061,70 | -1,61 | 0 |
| 2 | 1020,03 | 1021,7 | 1021,7 | 1021,70 | -1,67 | 0 |
| 3 | 979,95 | 981,6 | 981,6 | 981,60 | -1,65 | 0 |
| 4 | 939,93 | 941,6 | 941,5 | 941,55 | -1,62 | 0,1 |
| 5 | 900,14 | 901,8 | 901,8 | 901,80 | -1,66 | 0 |
| 6 | 859,75 | 861,4 | 861,4 | 861,40 | -1,65 | 0 |

7.1. Izračun mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost je parametar koji se pripisuje rezultatu mjerenja, te tako dobivamo raspon vrijednosti koje je moguće dodijeliti rezultatu mjerenja. U ovom radu će se kao pomoć uzeti smjernice DKD R6-1. Za izračun stvarne vrijednosti prilikom umjeravanja mjerila uzimaju se u obzir tlak izmjeren etalonskim mjerilom, tlak izmjeren umjeranim mjerilom te razlika tlaka u ovisnosti o odabranoj metodi umjeravanja:

$$\Delta p = p_M - p_E + \delta p_v \quad (4)$$

Tako je potrebno izračunati mjernu nesigurnost tlaka etalona, tlaka umjeravanog mjerila i metode umjeravanja. Ukupna mjerna nesigurnost se zatim računa prema izrazu:

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

gdje je:

k – korekcijski faktor (odabran je $k = 2$)

u_E – Standardna mjerna nesigurnost etalona

u_M – Standardna mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila

u_v – Standardna mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja

7.1.1. Mjerna nesigurnost etalona (u_E)

Mjerna nesigurnost etalona dana je vrijednostima podataka s njegovog prethodnog umjeravanja. Uz podatke s prethodnog umjeravanja treba uzeti u obzir i mjernu nesigurnost zbog dugotrajne nestabilnosti, odnosno nestabilnosti koja je nastala od zadnjeg umjeravanja etalona. Tako se tlak etalona može odrediti sljedećim izrazom:

$$p_E = \delta p_{\text{standard,E}} + \delta p_{\text{stabilnost,E}}$$

Dok se njegova mjerna nesigurnost određuje izrazom:

$$u_M = \sqrt{u_{\text{standard,E}}^2 + u_{\text{stabilnost,E}}^2}$$

gdje je:

$u_{\text{standard,E}}$ – mjerna nesigurnost propisana potvrdom o umjeravanju etalona

$u_{\text{stabilnost,E}}$ – mjerna nesigurnost zbog dugotrajne nestabilnosti

Mjerne nesigurnosti za etalonsko mjerilo su izvučene iz njegove umjernice koja je rađena u prvom mjesecu 2023. godine. Prema podacima o etalonskom uređaju Vaisala PTB 220 širina distribucije se povećava za 0,1 mbar/god. Kako je od umjeravanja etalonskog mjerila prošlo približno godinu dana, za širinu distribucije kod mjerne nesigurnosti zbog dugotrajne nestabilnosti uzeto je 0,1 mbar.

Tablica 9. Odstupanja i mjerne nesigurnosti etalona Vaisala PTB 220

| Tlak etalona | Srednja vrijednost očitavanja | Odstupanja | Nesigurnost umjeravanja |
|--------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|
| p_e | p_s | $p_s - p_e$ | U |
| hPa | hPa | hPa | hPa |
| 950,113 | 950,31 | 0,200 | 0,057 |
| 970,115 | 970,33 | 0,213 | 0,056 |
| 990,120 | 990,33 | 0,205 | 0,057 |
| 1000,121 | 1000,32 | 0,202 | 0,058 |
| 1010,122 | 1010,32 | 0,193 | 0,058 |
| 1020,122 | 1020,32 | 0,198 | 0,059 |
| 1030,124 | 1030,32 | 0,198 | 0,060 |
| 1060,126 | 1060,31 | 0,181 | 0,061 |
| 1100,131 | 1100,30 | 0,169 | 0,063 |

7.1.2. Mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila (u_M)

Rezultati umjeravanja ovise o više faktora: rezolucija mjerila, temperaturna ovisnost komponenata, vrijeme umjeravanja, varijacije nultočke. Iskustveno je pretpostavljeno kako će na mjernu nesigurnost umjeravanog mjerila iznimno malo utjecati temperaturna ovisnost umjeravanja, vrijeme umjeravanja te varijacija nultočke, ona je računata samo s obzirom na rezoluciju mjerila.

Tako se mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila računa sljedećim izrazom:

$$u_M = u_{\text{rez},M} \quad (6)$$

gdje je:

$u_{\text{rez},M}$ – mjerna nesigurnost zbog rezolucije mjerila

7.1.3. Mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja (u_v)

Na odstupanje vrijednosti rezultata utječu i ponovljivost mjerenja te histereza. U ovom mjerenju nije bilo moguće izračunati ponovljivost jer nismo imali dva uzastopna mjerenja od najniže do najviše vrijednosti tlaka mjernih točaka. Iz tog razloga se ponovljivost pretpostavila sa vrijednošću širine distribucije 0,2 mbar. Za širinu distribucije mjerne nesigurnosti u ovisnosti o histerezi uzeli smo najveću vrijednost izračunate histereze: 0,1 mbar. Sljedećim jednadžbama dajemo doprinos mjerne nesigurnosti zbog odabrane metode umjeravanja:

$$\delta p_v = \delta p_{\text{ponovljivost},v} + \delta p_{\text{histereza},v} \quad (7)$$

$$u_M = \sqrt{u_{\text{ponovljivost},v}^2 + u_{\text{histereza},v}^2} \quad (8)$$

gdje je :

$u_{\text{ponovljivost},v}$ – mjerna nesigurnost s obzirom na ponovljivost

$u_{\text{histereza},v}$ – mjerna nesigurnost u ovisnosti o histerezi

7.2. Prikaz i analiza rezultata umjeravanja

7.2.1. Rezultati umjeravanja barometra Testo 176 P1 (TEOKO9)

U nastavku su prikazani izračuni, prema prije navedenom postupku, mjernih nesigurnosti po mjernim točkama.

Tablica 10. Mjerna nesigurnost 1. točke

| Mjerna točka 1 | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|---------------------|-------------|------------------------|---|-----------------------|-----------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard},E}$ | 1060,16 | 0,030593229 | 2 | 0,015296614 | 1 | 0,015296614 | 0,000234 |
| $\delta p_{\text{stabilnost},E}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_E | 1060,16 | | | | | Σ | 0,000866 |
| $p_{\text{rez},M}$ | 1060,16 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_M | 1060,16 | | | | | Σ | 0,000833 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost},v}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,003333 |
| $\delta p_{\text{histereza},v}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| δp_v | 0 | | | | | Σ | 0,003436 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0717 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0359 |

Tablica 11. Mjerna nesigurnost 2. točke

| Mjerna točka 2 | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|---------------------|-------------|------------------------|---|-----------------------|-----------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 1020,04 | 0,029322771 | 2 | 0,014661385 | 1 | 0,014661385 | 0,000215 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_E | 1020,04 | | | | | Σ | 0,000861 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 1020,04 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_M | 1020,04 | | | | | Σ | 0,000833 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,003333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,003436 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ (k=2) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Tablica 12. Mjerna nesigurnost 3. točke

| Mjerna točka 3 | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-------------|------------------------|---|-----------------------|-----------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 979,95 | 0,028394879 | 2 | 0,01419744 | 1 | 0,01419744 | 0,000202 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_E | 979,95 | | | | | Σ | 0,000857 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 979,95 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_M | 979,95 | | | | | Σ | 0,000833 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,003333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,003436 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ (k=2) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Tablica 13. Mjerna nesigurnost 4. točke

| Mjerna točka 4 | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-------------|------------------------|---|-----------------------|-----------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 939,93 | 0,028452438 | 2 | 0,014226219 | 1 | 0,014226219 | 0,000202 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_E | 939,93 | | | | | Σ | 0,000858 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 939,93 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_M | 939,93 | | | | | Σ | 0,000833 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,003333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,003436 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ (k=2) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Tablica 14. Mjerna nesigurnost 5. točke

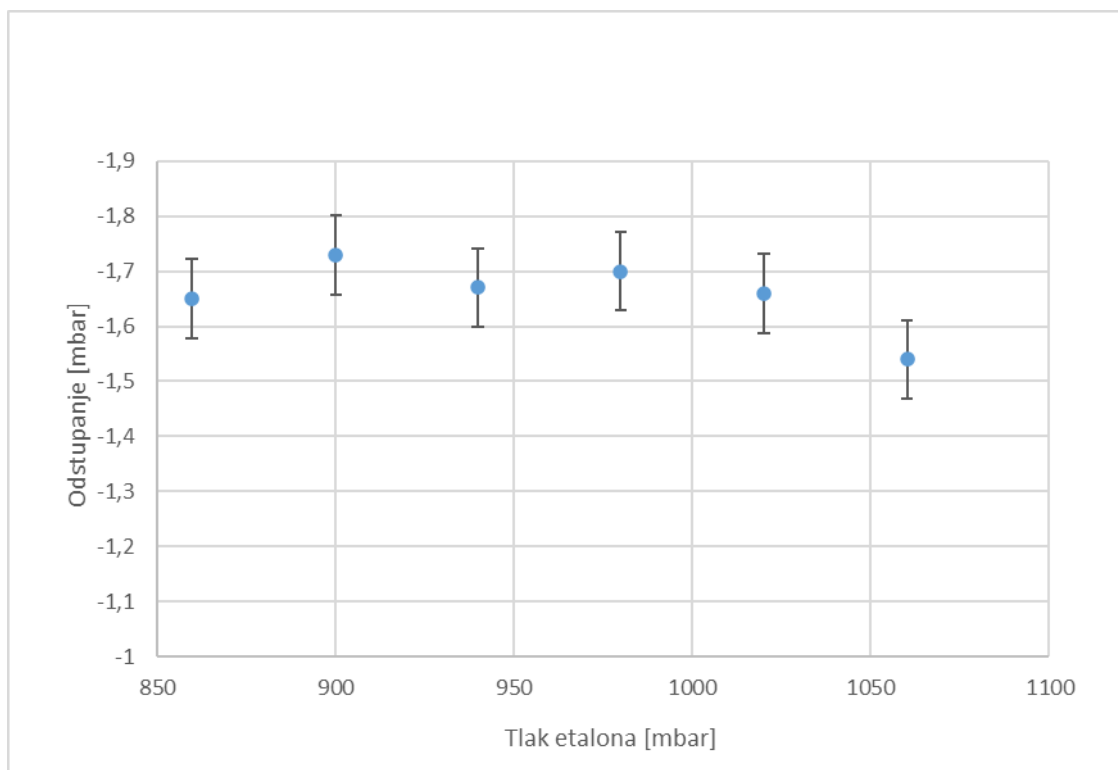
| Mjerna točka 5 | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-------------|------------------------|--|----------------------------|-----------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 900,12 | 0,028856579 | 2 | 0,014428289 | 1 | 0,014428289 | 0,000208 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_E | 900,12 | | | | | Σ | 0,000859 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 900,12 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_M | 900,12 | | | | | Σ | 0,000833 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,003333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,003436 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Tablica 15. Mjerna nesigurnost 6. točke

| Mjerna točka 6 | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-------------|------------------------|--|----------------------------|-----------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 859,75 | 0,029266405 | 2 | 0,014633202 | 1 | 0,014633202 | 0,000214 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_E | 859,75 | | | | | Σ | 0,00086 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 859,75 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| p_M | 859,75 | | | | | Σ | 0,000833 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,003333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,000833 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,003436 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Analizom podataka možemo vidjeti kako najveći doprinos mjernoj nesigurnosti daje upravo ponovljivost. Kako je ona izračunata prema iskustvenim podacima te su oni određeni na strani sigurnosti, možemo reći kako bi realna mjerna nesigurnost, ako bi ponovili mjerenje i izračunali ponovljivost, bila manja. Vidimo kako je mjerna nesigurnost u ovisnosti o histerezi znatno manja od mjerne nesigurnosti ponovljivosti te samim time manje utječe na ukupnu nesigurnost odabrane metode mjerenja. Mjerne nesigurnosti etalona su približno jednake mjernoj nesigurnosti zbog rezolucije umjeravanog uređaja te su za red veličine manje od mjerne nesigurnosti ponovljivosti. Prilikom idućeg umjeravanja bilo bi potrebno odraditi više mjerenja za pojedinu mjernu točku kako bi mogli izračunati ponovljivost. Samim time dobili bi točnije rezultate te smanjili ukupnu mjernu nesigurnost barometra.

Na sljedećoj slici možemo vidjeti ovisnost odstupanja i njihovih mjernih nesigurnosti s obzirom na etalonski tlak. Odstupanja su približno jednaka kao i mjerne nesigurnosti pri pojedinim vrijednostima tlaka.



Slika 27. Ovisnost odstupanja i mjernih nesigurnosti o etalonskom tlaku - TEOKO9

7.2.2. Rezultati umjeravanja barometra Testo 176 P1 (TEOKO10)

Rezultati umjeravanja barometra TEOKO10 su približno jednaki rezultatima za barometar TEOKO9. U idućim tablicama su prikazani rezultati njegovog umjeravanja:

Tablica 16. Mjerna nesigurnost 1. točke

| Mjerna točka 1 | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|---------------------|-------------|------------------------|--|----------------------------|------------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(v)$ | u^2 |
| $p_{standard,E}$ | 1060,09 | 0,030591608 | 2 | 0,015295804 | 1 | 0,015295804 | 0,000234 |
| $\delta p_{stabilnost,E}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_E | 1060,09 | | | | | Σ | 0,0008656 |
| $p_{rez,M}$ | 1060,09 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_M | 1060,09 | | | | | Σ | 0,0008333 |
| $\delta p_{ponovljivost,V}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,0033333 |
| $\delta p_{histereza,V}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| δp_v | 0 | | | | | Σ | 0,0034359 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0717 |
| | | | | | | Mjerna nesigurnost - u | 0,0359 |

Tablica 17. Mjerna nesigurnost 2. točke

| Mjerna točka 2 | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|---------------------|-------------|------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{standard,E}$ | 1020,03 | 0,029322322 | 2 | 0,014661161 | 1 | 0,014661161 | 0,0002149 |
| $\delta p_{stabilnost,E}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_E | 1020,03 | | | | | Σ | 0,0008606 |
| $p_{rez,M}$ | 1020,03 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_M | 1020,03 | | | | | Σ | 0,0008333 |
| $\delta p_{ponovljivost,V}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,0033333 |
| $\delta p_{histereza,V}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,0034359 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | | Mjerna nesigurnost - u | 0,0358 |

Tablica 18. Mjerna nesigurnost 3. točke

| Mjerna točka 3 | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------------|-------------|------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{standard,E}$ | 979,95 | 0,028394879 | 2 | 0,01419744 | 1 | 0,01419744 | 0,0002016 |
| $\delta p_{stabilnost,E}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_E | 979,95 | | | | | Σ | 0,0008574 |
| $p_{rez,M}$ | 979,95 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_M | 979,95 | | | | | Σ | 0,0008333 |
| $\delta p_{ponovljivost,V}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,0033333 |
| $\delta p_{histereza,V}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,0034359 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | | Mjerna nesigurnost - u | 0,0358 |

Tablica 19. Mjerna nesigurnost 4. točke

| Mjerna točka 4 | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------------|-------------|------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varijanca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{standard,E}$ | 939,93 | 0,028452438 | 2 | 0,014226219 | 1 | 0,014226219 | 0,0002024 |
| $\delta p_{stabilnost,E}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_E | 939,93 | | | | | Σ | 0,0008576 |
| $p_{rez,M}$ | 939,93 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_M | 939,93 | | | | | Σ | 0,0008333 |
| $\delta p_{ponovljivost,V}$ | 0 | 0,2 | $2\sqrt{3}$ | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,0033333 |
| $\delta p_{histereza,V}$ | 0 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,0034359 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | | Mjerna nesigurnost - u | 0,0358 |

Tablica 20. Mjerna nesigurnost 5. točke

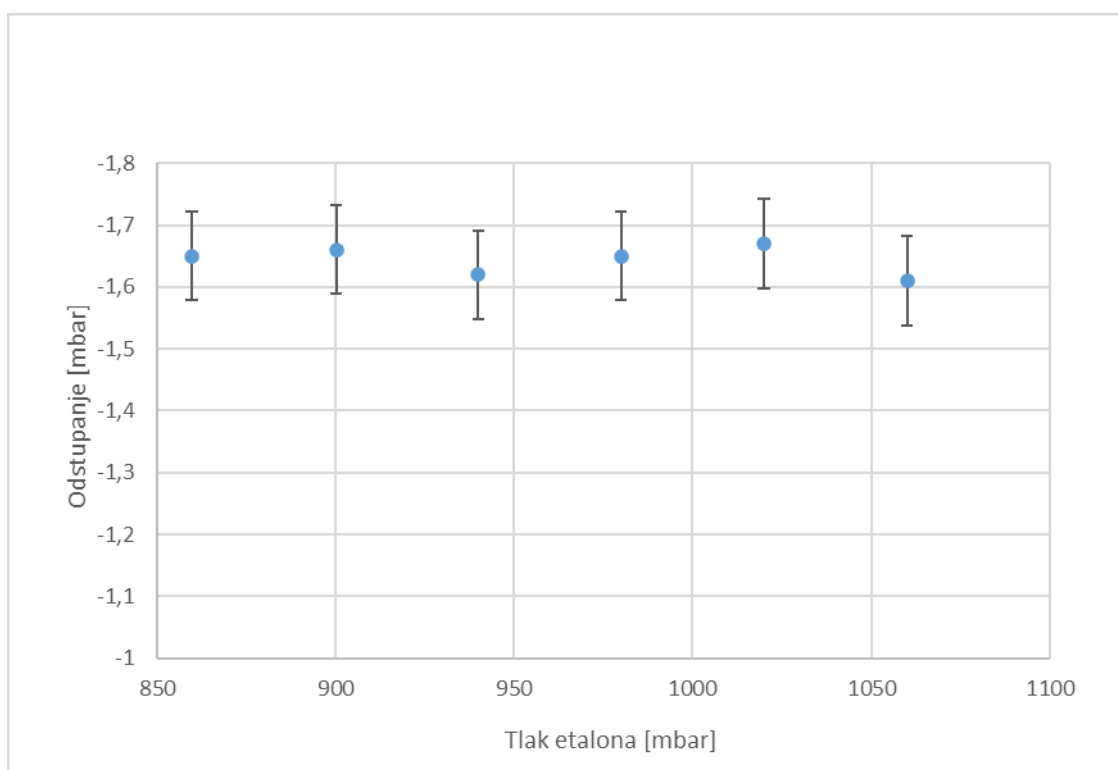
| Mjerna točka 5 | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-----------|------------------------|---|-----------------------|------------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varianca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 900,14 | 0,028856376 | 2 | 0,014428188 | 1 | 0,014428188 | 0,0002082 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | 2√3 | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_E | 900,14 | | | | | Σ | 0,0008589 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 900,14 | 0,1 | 2√3 | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_M | 900,14 | | | | | Σ | 0,0008333 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | 2√3 | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,0033333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | 2√3 | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,0034359 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Tablica 21. Mjerna nesigurnost 6. točke

| Mjerna točka 6 | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|---------------------|-----------|------------------------|---|-----------------------|------------------|
| Ulazne veličine | Procjena | Širina distribucije | Djelitelj | Standardna nesigurnost | Koef. osjetljivosti | Doprinos nesigurnosti | Varianca |
| X_i | x_i [mbar] | $2a$ | - | $u(x_i)$ | c_i | $u_i(y)$ | u^2 |
| $p_{\text{standard,E}}$ | 859,75 | 0,029266405 | 2 | 0,014633202 | 1 | 0,014633202 | 0,0002141 |
| $\delta p_{\text{stabilnost,E}}$ | 0 | 0,1 | 2√3 | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_E | 859,75 | | | | | Σ | 0,0008604 |
| $p_{\text{rez,M}}$ | 859,75 | 0,1 | 2√3 | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| p_M | 859,75 | | | | | Σ | 0,0008333 |
| $\delta p_{\text{ponovljivost,V}}$ | 0 | 0,2 | 2√3 | 0,057735027 | 1 | 0,057735027 | 0,0033333 |
| $\delta p_{\text{histereza,V}}$ | 0 | 0,1 | 2√3 | 0,028867513 | 1 | 0,028867513 | 0,0008333 |
| δp_V | 0 | | | | | Σ | 0,0034359 |
| Δp | 0 | | | | Proširena mjerna nesigurnost - $U = k \cdot u$ ($k=2$) | | 0,0716 |
| | | | | | Mjerna nesigurnost - u | | 0,0358 |

Kao i kod barometra TEOKO9 pri analizi podataka za barometar TEOKO10 uočeno je kako na njegovu ukupnu mjernu nesigurnost najviše utječe ponovljivost koju smo i za ovaj uređaj pretpostavili. Ponovnim umjeravanjem ovog barometra također bi trebalo odraditi više mjerenja za pojedine vrijednosti tlaka te izračunati stvarnu ponovljivost.

Na sljedećoj slici dana je ovisnost odstupanja i mjernih nesigurnosti za pojedine vrijednosti tlaka određenih etalonskim mjerilom:



Slika 28. Ovisnost odstupanja i mjernih nesigurnosti o etalonskom tlaku - TEOKO10

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio ispitati karakteristike nove vakuumske tlačne komore. To se napravilo ispitivanjem najvišeg i najnižeg tlaka. Potrebno je bilo napraviti mjernu liniju za ispitivanje barometara u kojoj je komora glavni dio. Opisane su metode mjerenja malih tlakova i grubog vakuuma. Mjerila atmosferskog tlaka, odnosno barometri, su temeljni instrumenti u područjima poput meteorologije, avijacije te u mnogim znanstvenim istraživanjima i industrijskim procesima. Mjerila s vremenom mijenjaju svoje radne karakteristike i posljedično daju netočne rezultate. Iz tog razloga ih je potrebno umjeravati u određenim vremenskim razdobljima. Za generiranje malih tlakova i grubog vakuuma se koriste pumpe poput: stapnih, rotacijskih i molekularnih pumpi.

Umjeravanje ili kalibracija je sustavni postupak potvrđivanja i prilagođavanja očitavanja barometra radi usklađivanja s priznatim standardom, odnosno etalom. Za izradu ovog rada mjerna linija je sačinjavala vakuumsku tlačnu komoru, pumpu za grubi vakuum i mali pretlak, etalonski i ispitivani barometar. Također su korišteni i uređaji za mjerenje temperature i vlage okolnog zraka. Umjeravana su dva barometra proizvođača Testo 176P1 u šest mjernih točaka. Prilikom postupka umjeravanja javio se problem povratnog strujanja u komoru prilikom prestanka rada pumpe te je bilo potrebno dugo vremena da se tlak unutar komore ustabilji. Razlog tomu leži u velikom volumenu same komore. Posljedično se nisu mogli dobiti identični tlakovi prilikom ponovljenog mjerenja za pojedinu mjernu točku. Tako se napravila interpolacija vrijednosti tlaka umjeravanih mjerila te su se izračunala odstupanja i histereze za svaku mjernu točku.

Mjerne nesigurnosti su računane prema smjernicama DKD-a. Postoje brojni čimbenici koji utječu na mjerne nesigurnosti od kojih, prilikom umjeravanja barometara, najviše utječu ponovljivost mjerenja i histereza. Kako su barometri TEOKO9 i TEOKO10 istog tipa, njihovi rezultati umjeravanja su približno jednaki. Odstupanja i mjerne nesigurnosti po pojedinim vrijednostima tlaka su približno jednake te nisu velike u odnosu na ispitivani tlak. Mjerna nesigurnost zbog ponovljivosti najviše doprinosi ukupnoj mjernoj nesigurnosti iz razloga što ona nije računata nego je pretpostavljena prema iskustvenim podacima. Možemo zaključiti kako bi ponovnim umjeravanjem uređaja trebalo odraditi više mjerenja po mjernim točkama te izračunati stvarnu vrijednost ponovljivost. Tako bi se dobili točniji rezultati te manje mjerne nesigurnosti samih uređaja.

LITERATURA

- [1] Grgec Bermanec, L. : Podloge s predavanja Vakuumska tehnika, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [2] Kupera, M.; Cobić, B.: Fizika i tehnika vakuuma, Naučna knjiga Beograd, 1998.
- [3] The Institute of Measurement and Control: Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, London, 1988.
- [4] Bell, S.: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, National Physical Laboratory, United Kingdom, 1999.
- [5] Zakonsko mjeriteljstvo, Državni zavod za mjeriteljstvo. Dostupno na: <https://dzm.gov.hr/cesta-pitanja/zakonsko-mjeriteljstvo-95/95>
- [6] Dedić V.: Projekt etalonskog sustava za usporedno umjeravanje mjerila vakuuma, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [7] Pressure and Vacuum Chamber used for Calibration of Weather Stations across the US, 2022. Dostupno na: <https://www.sanatron.com/our-work-2/pressure-and-vacuum-chamber-used-for-calibration-of-weather-stations-across-the-us.php>
- [8] Japan Meteorological Agency, Calibration of Barometers (Theory and Practice), Tokyo, 2013.
- [9] Berman, A.: Methods for Vacuum Gauge Calibration, ScienceDirect, 1985.
- [10] Sabljčić, L.: Projekt sustava za umjeravanje mjerila vakuuma, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [11] Deutscher Kalibrierdienst: Calibration of Pressure Gauges, Guideline DKD-R 6-1, Accreditation Body of the Deutscher Kalibrierdienst, 2014
- [12] Araki, S: Calibration of Barometers, Japan Meteorological Agency, Tokyo, 2013.
- [13] Grgec Bermanec, L.: Razvoj i karakterizacija primarnog etalona tlaka, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2006.
- [14] International Recommendation: Barometers, OIML R 97, Organisation International de Metrologie Legale, 1990.

- [15] Quayle, T.; Burman, J.; Heron, B.: MetService of New Zealand Adopts Vaisala Digital Barometer Primary Pressure Standard, Meteorological Service of New Zealand Limited, New Zealand, 2004.
- [16] Van der Veen, A.; Cox, M.G.: Good practice in evaluating measurement uncertainty, EMUE, 2021.
- [17] Vaidya, S.: Uncertainty Calculations of Pressure Calibration, 2023. Dostupno na: <https://instrumentationtools.com/uncertainty-calculations-of-pressure-calibration/#uncertainty-calculations>