

Sljedivost rezultata niskotlačnih mjerila mjerila tlaka do 350kPa

Perišić, Patrik

Undergraduate thesis / Završni 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:235:618128>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Patrik Perišić

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Patrik Perišić

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem svim svojim prijateljima koji su bili uz mene tijekom cijelog obrazovanja, od osnovne škole pa sve do prve diplome. Olakšavali su mi svakodnevicu i omogućili da s osmijehom idem u školu.

Zahvaljujem se bratu Domagoju koji mi je bio najveća potpora posljednjih mjesec dana jer su oni bili moralno najteži dosad. Zahvaljujem se baki Miroslavi koja mi je cijelo vrijeme držala fige, iako nikada nije znala kada imam ispit i naravno zahvaljujem i ostalim članovima obitelji koji su mi bili iznimna potpora kroz svih nepunih sedamnaest godina obrazovanja.

Patrik Perišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i 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 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Patrik Perišić** JMBAG: **0035233059**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sljedivost rezultata niskotlačnih mjerila tlaka do 350 kPa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Traceability of Low-Pressure Measuring Devices up to 350 kPa**

Opis zadatka:

U ovom radu potrebno je osmisliti i projektirati postupak za sljedivo umjeravanje mjerila tlaka do 350 kPa koristeći plinsku tlačnu vagu kao etalon. Umjeravanje treba predvidjeti za režim pretlak primjenjujući metodu usporedbe. Pri tome se koristi dostupna mjerna oprema iz Laboratorija za procesna mjerenja, a rad treba uključiti opis umjernih protokola te prijedlog pripadajućih mjernih listova.

Potrebno je izraditi:

- Pregled fizikalnih osnova mjerenja tlaka s fokusom na princip rada tlačnih vaga.
- Pregled teorijskih osnova za ispitivanje i umjeravanje mjerila tlaka, uključujući standardne metode i tehničke preporuke.
- Projektiranje i sastavljanje mjerne linije za umjeravanje mjerila tlaka u području od 0 do 350 kPa, uz detaljan opis sheme spajanja ispitnog sustava s pomoćnim uređajima.
- Proračun efektivnog tlaka uzimajući u obzir relevantne korekcije.
- Procjenu mjerne nesigurnosti rezultata umjeravanja.
- Opis postupka umjeravanja, s jasno definiranim koracima i uvjetima provođenja.
- Prikaz primjera rezultata umjeravanja, uključujući tablične i grafičke prikaze.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Sadržaj

Popis slika	III
Popis tablica	IV
Popis oznaka	V
Sažetak	VI
Summary	VII
1. Uvod.....	1
2. Tlak kao fizikalna veličina.....	2
3. Mjerenje tlaka	4
3.1. Povijest mjerenja tlaka.....	4
3.2. Metode mjerenja tlaka	5
4. Tlačne vage	7
4.1. Povijesni razvoj tlačnih vaga	7
4.2. Izvedbe i zahtjevi tlačnih vagi	10
4.2.1. Sklop klipa i cilindra	11
5. Pretvornici tlaka	14
5.1. Kapacitativni senzori	14
5.2. Promjenjivi linearni pretvornici.....	15
5.3. Pretvornici osjetljivi na opterećenje	16
5.4. Pretvornici tlaka s vibrirajućim strukturama	17
5.5. Pretvornici s direktnim rezonantnim senzorom tlaka	17
5.6. Piezoelektrični pretvornici tlaka.....	18
6. Umjeravanje mjerila tlaka.....	19
6.1. Preduvjeti za postupak umjeravanja	19
6.2. Metode umjeravanja	21
7. Projektiranje i sastavljanje mjerne linije	24
7.1. Tlačna vaga.....	24
7.1.1. Ručni regulator tlaka MPC1.....	24
7.1.2. TERMINAL PG7000	25
7.1.3. Set utega	26
7.1.4. Nosač utega	27
7.1.5. Sklop klip-cilindar.....	27
7.2. Pretvornik i kalibrator tlaka Druck DPI 515.....	29
7.3. Regulator tlaka Druck DPI 530	30

7.4.	Shema spajanja	31
8.	Proračun efektivnog tlaka	32
8.1.	Korekcija površine.....	32
8.2.	Korekcija sile.....	32
8.3.	Efektivni tlak	32
8.4.	Okolišni uvjeti prilikom umjeravanja.....	33
8.5.	Proračun efektivnog tlaka.....	34
9.	Procjena mjerne nesigurnosti	36
9.1.	Mjerna nesigurnost	36
9.2.	Procjena mjerne nesigurnosti tipa A	36
9.3.	Procjena mjerne nesigurnosti tipa B	37
10.	Rezultati umjeravanja	38
10.1.	Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 515.....	39
10.2.	Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 530.....	42
11.	Zaključak	45
	Literatura.....	46

Popis slika

Slika 1 Prikaz tlakova u odnosu na apsolutni	3
Slika 2 Podjela metoda mjerenja tlaka	6
Slika 3 Tlačna vaga – Parrot 1832. godina	7
Slika 4 Manometar – Desgoffe 1881. godina.....	8
Slika 5 Ruschholzova vaga	8
Slika 6 Stuckrathova vaga.....	9
Slika 7 Jednostavan sklop klipa i cilindra	11
Slika 8 Sklop klipa i cilindra s uvučenom izvedbom	12
Slika 9 Sklop klipa i cilindra s kontroliranim zazorom.....	12
Slika 10 Kapacitativni senzori	14
Slika 11 Promjenjivi linearni pretvornici	15
Slika 12 Pretvornici osjetljivi na opterećenje	16
Slika 13 Pretvornici tlaka s vibrirajućim strukturama	17
Slika 14 Pretvornici s direktnim rezonantnim senzorom tlaka	18
Slika 15 Piezoelektrični pretvornici tlaka	19
Slika 16 Vizualizacija metode A	21
Slika 17 Vizualizacija metode B	22
Slika 18 Vizualizacija metode C	22
Slika 19 Vizualizacija umjeravanja za slučaj dodatnog zatezanja	23
Slika 20 Detalj vizualizacije umjeravanja.....	23
Slika 21 Ručni regulator tlaka MPC1	25
Slika 22 Terminal PG 7000	25
Slika 23 Set utega.....	26
Slika 24 Nosač utega.....	27
Slika 25 Sklop klip-cilindar	28
Slika 26 Pretvornik tlaka Druck DPI 515 – donji uređaj sa slike	29
Slika 27 Pretvornik tlaka Druck DPI 530 – gornji uređaj na slici	30
Slika 28 Shema spajanja	31
Slika 29 Mjerna linija.....	31
Slika 30 Okolišni uvjeti očitani s mjerila apsolutnog tlaka, temperature i vlažnosti zraka	33
Slika 31 Razdioba nesigurnosti.....	37
Slika 32 Graf prikaza odstupanja umjeravanog uređaja DPI 515	40
Slika 33 Graf prikaza odstupanja umjeravanog uređaja DPI 530	43

Popis tablica

Tablica 1 Metode umjeravanja prema DKD-R 6-1	23
Tablica 2 Karakteristike utega.....	26
Tablica 3 Podaci o etalonu	28
Tablica 4 Okolišnji uvjeti.....	33
Tablica 5 mjerne točke	34
Tablica 6 Kombinacija utega korištena prilikom umjeravanja.....	34
Tablica 7 efektivni tlak.....	35
Tablica 8 Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 515	39
Tablica 9 Izračunate vrijednosti prilikom umjeravanja regulatora DPI 515	39

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
p	Pa	Tlak
V	m^3	Volumen
F	N	Sila
s	Kg	Masa
g	m/s^2	Ubrzanje sile teže
A	m^2	Površina
A_0	m^2	Efektivna površina pri 20°C i nultom tlaku
α_p	$^{\circ}C^{-1}$	Koeficijent temperaturene ekspanzije klipa
α_c	$^{\circ}C^{-1}$	Koeficijent temperaturene ekspanzije cilindra
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatura
λ	Pa^{-1}	Koeficijent distorzije
p_{ef}	Pa	Efektivni tlak
ρ_a	kg/m^3	Gustoća zraka
ρ_m	Jedinica	Gustoća utega
h	m	Razlika u visini između ispitivanog i etalonskog uređaja
ρ_f	kg/m^3	Gustoća fluida
θ	$^{\circ}$	Kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalnu os
Γ	m	Opseg klipa
c	N/m	Površinska napetost radnog medija

Sažetak

Cilj ovog završnog rada je osmisliti i projektirati postupak umjeravanja mjerila tlaka do 350kPa koristeći pritom plinsku tlačnu vagu kao etalon. Navedena tlačna vaga, interne oznake TLVAG09, kao radni medij koristi plin (u ovom slučaju čisti dušik) te je ujedno i državni etalon.

Ovim radom daje se pregled svih potrebnih teorijskih osnova ispitivanja i umjeravanja mjerila tlaka. Također daje se pregled proračuna efektivnog tlaka i procjena mjerne nesigurnosti.

Najznačajniji pravilnici i upute za umjeravanje su pravilnici EUROMET-a i DKD-a, na temelju kojih je sklapana mjerna linija čija shema je prikazana u radu i vršilo se umjeravanje prema DKD-R 6-1 metodi A. Umjeravani uređaji su Druck DPI 515 i Druck DPI530.

Po završetku eksperimentalnog djela zadatka, dobiveni podaci obrađeni su tablično i grafički.

Zahvaljujući ovom postupku mogli smo na kućišta oba uređaja staviti oznake o umjeravanju.

Ključne riječi: umjeravanje, tlačna vaga, TLVAG09, DPI 515, DPI 530, regulator tlaka, efektivni tlak, mjerna nesigurnost

Summary

The aim of this thesis is to design and develop a calibration procedure for pressure measuring instruments up to 350 kPa using a gas-operated pressure balance as the standard. The mentioned pressure balance, internally designated as TLVAG09, uses gas (in this case, pure nitrogen) as the operating medium and serves as the national standard.

This work provides an overview of all necessary theoretical foundations for testing and calibrating pressure measuring instruments. Additionally, it includes an analysis of effective pressure calculations and an estimation of measurement uncertainty.

The most significant regulations and calibration guidelines are those of EUROMET and DKD, which served as the basis for constructing the measurement setup, whose schematic is presented in this paper. The calibration was performed according to the DKD-R 6-1 Method A. The calibrated devices were Druck DPI 515 and Druck DPI 530.

Upon completion of the experimental part of the study, the obtained data were processed both in tabular and graphical form. Thanks to this procedure, calibration labels could be affixed to the housings of both devices.

Keywords: calibration, pressure balance, TLVAG09, DPI 515, DPI 530, pressure regulator, effective pressure, measurement uncertainty

1. Uvod

Mjerenje različitih fizičkih veličina ima izuzetno važnu ulogu u suvremenom svijetu, jer omogućuje preciznu kontrolu i unaprjeđenje brojnih tehnoloških i znanstvenih procesa. Potreba za mjerenjem prisutna je u gotovo svim aspektima ljudskog djelovanja – od trgovine, zdravstva i meteorologije do raznih industrijskih sektora. Bez točnih i pouzdanih mjerenja ne bi bilo moguće razvijati, testirati i implementirati tehničke sustave, pri čemu je preciznost ključna u svim fazama, od dizajna i proizvodnje do konačne kontrole kvalitete. Suvremeni tehnološki sustavi zahtijevaju visoku razinu točnosti, što se postiže primjenom sofisticiranih mjernih instrumenata. Pouzdanost i objektivnost mjerenja ovise o pravilnom odabiru metode, ispravnom rukovanju uređajem te njegovom redovitom održavanju i umjeravanju pomoću etalona, čime se osigurava sljedivost rezultata prema međunarodnim i nacionalnim standardima.

Mjerenje tlaka u industriji postalo je ključno s početkom Industrijske revolucije, kada je bilo nužno pratiti tlak vodene pare u parnim strojevima kako bi se osigurala njihova maksimalna učinkovitost i sigurnost. Od tada se potreba za preciznim mjerenjem tlaka kontinuirano povećava, uz zahtjeve za što širim rasponima i većom osjetljivošću mjernih uređaja. Danas se sustavi za mjerenje tlaka koriste u širokom spektru industrijskih sektora, uključujući nuklearnu, farmaceutsku, energetsku, poluvodičku, optičku, ventilacijsku, zrakoplovnu i automobilsku industriju. Točni i pouzdani mjerni sustavi omogućuju kontrolu ključnih parametara industrijskih procesa, čime se osigurava njihova učinkovitost, sigurnost i usklađenost s propisanim standardima.

Osim u industriji, precizno mjerenje tlaka ima važnu primjenu i u medicini, gdje se koristi za praćenje vitalnih funkcija pacijenata, te u znanstvenim istraživanjima koja zahtijevaju visoku razinu preciznosti. Kako bi se osiguralo da su mjerenja što bliža stvarnim vrijednostima, uređaje je potrebno redovito održavati, umjeravati i testirati. Umjeravanjem se ne samo utvrđuje pogreška pokazivanja mjernog instrumenta, već i osigurava njegova usklađenost s međunarodnim normama, čime se postiže pouzdanost i sljedivost rezultata. S obzirom na sve veće zahtjeve moderne tehnologije, razvoj preciznih i inteligentnih mjernih sustava postaje ključan za daljnji napredak u industriji, znanosti i svakodnevnom životu.

2. Tlak kao fizikalna veličina

Tlak se definira kao normalna sila koja djeluje na jedinicu površine sustava. Za fluidne sustave (kapljevite i plinovite) tlak na površinu spremnika ili površini mjerne membrane posljedica je kumulativnog efekta djelovanja molekula koje udaraju na stijenku spremnika, izazivajući pritom normalnu silu na stijenku. Za ravnotežni fluid tlak je definiran jednadžbom [1]

$$p = \frac{dFn}{dA}$$

pri čemu je diferencijal „dA“ najmanja površina ploštine za koju su efekti fluida isti kao i u cijelome kontinuumu. U SI sustavu mjernih jedinica, jedinica za tlak je pascal. Za njega vrijedi [1]:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Ona je izvedena iz prethodne jednadžbe. Prema tome, tlak od 1 Pa je onaj tlak koji proizvodi silu od 1 N na površinu od 1 m². To je vrlo mala jedinica za tlak. Stoga se definira jedinica za tlak koja se naziva se bar. Ona nije službena jedinica u SI – sustavu, ali se zbog svoje praktičnosti uvriježila u struci. Za nju vrijedi [1]:

$$1 \text{ bar} = 10^5$$

Tlakovi se mogu mjeriti različitim mehaničkim ili električnim uređajima. Kao što su mehanički uređaji poznati kao Bourdonovi manometri, koji su jednostavne mehaničke naprave kalibrirane za izravno očitavanje tlaka. Električni uređaji pretvaraju progib fleksibilne dijafragme u električni izlazni signal kalibriranog naponskog manometra. Također visina stupca tekućine može se koristiti za mjerenje tlaka. Ovisno o gustoći pojedinog medija koji se nalazi u cijevi visina stupca medija biti će drugačija, tj. ako se pretpostavi konstantna gustoća tekućine, tlak možemo izračunati prema formuli [1]:

$$p = \rho gh$$

Također povijesno nam je iznimno značajna visina stupca žive kao mjerna jedinica, ali o tome ćemo malo kasnije pričati. Za nju vrijedi da je [1]:

$$1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$$

U fizici se još često spominje i fizikalna atmosfera, koja je definirana kao (1):

$$1 \text{ Atm} = 760 \text{ mmHg} = 101325 \text{ Pa}$$

Pretlak, potlak i apsolutni tlak

Tlak unutar spremnika može biti veći, manji ili eventualno jednak tlaku okoliša.

Instrument kojim se mjeri tlak okoliša naziva se barometar, a tlak očitani s njega naziva se barometarskim tlakom i označavamo ga s p_{ok} . [1]

Instrument koji pokazuje koliko je tlak u nekom spremniku veći od tlaka okoliša nazivamo manometrom, a tlak koji on pokazuje nazivamo pretlakom ili nadtlakom i označavamo ga s p_{pr} . pa nam je u tome slučaju apsolutni tlak za točku A (p_A) jednak zbroju tlakova očitanih s manometra i barometra. [1]

$$p_A = p_{ok} + p_{pr}$$

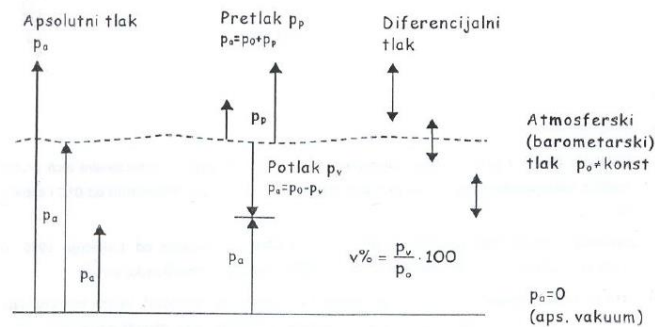
Ako je u spremniku tlak niži od tlaka okoliša instrument koji registrira za koliko je tlak u spremniku niži od okolišnog tlaka nazivamo vakuumetar, a tlak koji on registrira nazivamo potlakom i označava se sa p_{po} . U ovome slučaju nam apsolutni tlak za točku B iznosi (1):

$$p_B = p_{ok} + p_{po}$$

Često se tlak u potlačnim postrojenjima izražava kao vakuum u postocima, što je zapravo omjer pokazivanja dvaju instrumenata, vakuumetra i barometra. [1]

$$V\% = \frac{p_{po}}{p_{ok}} * 100\%$$

Kvalitativni prikaz njihovih odnosa izgleda ovako:



Slika 1 Prikaz tlakova u odnosu na apsolutni

3. Mjerenje tlaka

3.1. Povijest mjerenja tlaka

Aristotel je rekao: „Priroda se boji praznoga prostora.“ Kada je tvrdio da pravi vakuum jednostavno ne može postojati jer bi ga okolna tvar instantno popunila. Na našu sreću bio je u krivu, ali zbog statusa navedenog filozofa rijetki su se usudili tvrditi suprotno, a čak i ako jesu njihovo razmišljanje brzo je bilo opovrgnuto. Zbog toga je postojanje zraka kao takvog bilo ignorirano ili brzo opovrgnuto. Na primjer grčki filozof Anaximenes tvrdio je da je sve napravljeno od zraka koji samo mijenja svoje agregatno stanje ovisno o tlaku pod koji je podvrgnut. Do tog zaključka došao je promatrajući vodu kako isparava kada joj se narine veći tlak. Stoga je tvrdio da su lakše rijeđe tvari načinjene od toplijeg zraka, a gušće, krute tvari od hladnijega zraka.

Postojanje zraka dakle bilo je osporavano preko dvije tisuće godina sve dok proučavanje istog nije postalo nužno. Naime talijanski rudari susreli su se sa problemom da njihove pumpe ne mogu dignuti vodu na visinu višu od 10,3 m. Galileo Galilei tvrdio je, vodeći se Aristotelovom idejom, da je to zato što sisanje zraka iz cijevi vakuum ispunjavamo vodom, ali da je ta sila limitirana i ne možemo ju podići na više od 10,3 m. Tada je Gasparo Berti proveo jednostavan, ali opet briljantan eksperiment kako bi dokazao Galilleu da je to moguće.

Berti je visoku cijev u potpunosti ispunio vodom i postavio u bazen sa oba kraja cijevi zatvorenima. Doljnja strana cijevi tada je otvorena i voda se izlila u bazen sve dok razina vode koja je ostala u bazenu nije iznosila 10,3 m. S obzirom da je na vrhu posude sada ostala praznina i zrak nije ušao u posudu. Berti je uspio stvoriti vakuum.

Bertijev eksperiment je sa drugog stajališta odlučio promotriti Evangelista Torricelli koji se nije fokusirao na prazan prostor unutar cijevi već na vodu u bazenu. Shvatio je da jedino što može utjecati na to da razina vode u cijevi ne padne niže jest zrak koji djeluje na vodu u bazenu. Odnosno da se na razini vodenog stupca od 10,3 m postigla ravnoteža između atmosferskoga tlaka i visine stupca vode. Ta ideja nije bila prihvaćena jer su Galileo i ostali smatrali da zrak nema masu i ne daje nikakav tlak. Zbog toga je Torricelli odlučio ponoviti Bertijev eksperiment, ali ovoga puta sa živom. Zbog toga što je živa gušća od vode razina žive u cijevi pala je znatno niže od razine vode. Točnije na 760 mm. Time je eksperiment znatno smanjen i dokazano je da je masa odlučujući faktor u njemu. Tada je također izjavio da mi svi živimo potopljeni na dnu oceana zraka, koji neupitno ima masu. Ovaj uređaj smatra se prvim barometrom ikada napravljenim.

Konačnu potvrdu Torricelijevom eksperimentu dao je Blaise Pascal koji je eksperiment proveo na planini i time utvrdio da je razina žive u cijevi manja, budući da je atmosferski tlak pao s porastom nadmorske visine. Time se više apsolutno nije moglo opovrgnuti da i zrak ima svoju masu i da apsolutno utječe na tlak. Zbog toga ga i u današnjim razmatranjima apsolutno moramo uvrstiti u bilancu.

Dakle možemo zaključiti da je atmosferski tlak ovisan o stupcu zraka koji se nalazi iznad točke u kojoj se provodi ispitivanje. Odnosno on je najveći na razini mora i iznosi 101325 Pa pri okolišnoj temperaturi od 0 °C.

Uz sve navedene ličnosti kroz povijest su nam također iznimno značajni i Otto Von Guericke i Robert Boyle.

Von Guericke, njemački fizičar i izumitelj, proslavio se eksperimentom s *Magdeburškim poluloptama* 1654. godine, kada je pomoću svoje vakuumske pumpe uklonio zrak između dvije metalne polulopte. Atmosferski tlak bio je toliko snažan da ih ni 16 konja nije moglo razdvojiti, što je dramatično pokazalo postojanje i moć zračnog tlaka. Njegovi pokusi bili su revolucionarni jer su dokazali da vakuum može postojati i potaknuli razvoj novih mjernih uređaja.

S druge strane, Robert Boyle, engleski znanstvenik, 1660-ih je, zajedno s Robertom Hookeom, unaprijedio vakuumsku pumpu i proučavao ponašanje plinova. Njegov najvažniji doprinos bio je *Boyleov zakon*, koji kaže da se volumen plina smanjuje kako raste tlak, pod uvjetom da je temperatura konstantna. Odnosno dokazao je da vrijedi relacija:

$$pV = konst.$$

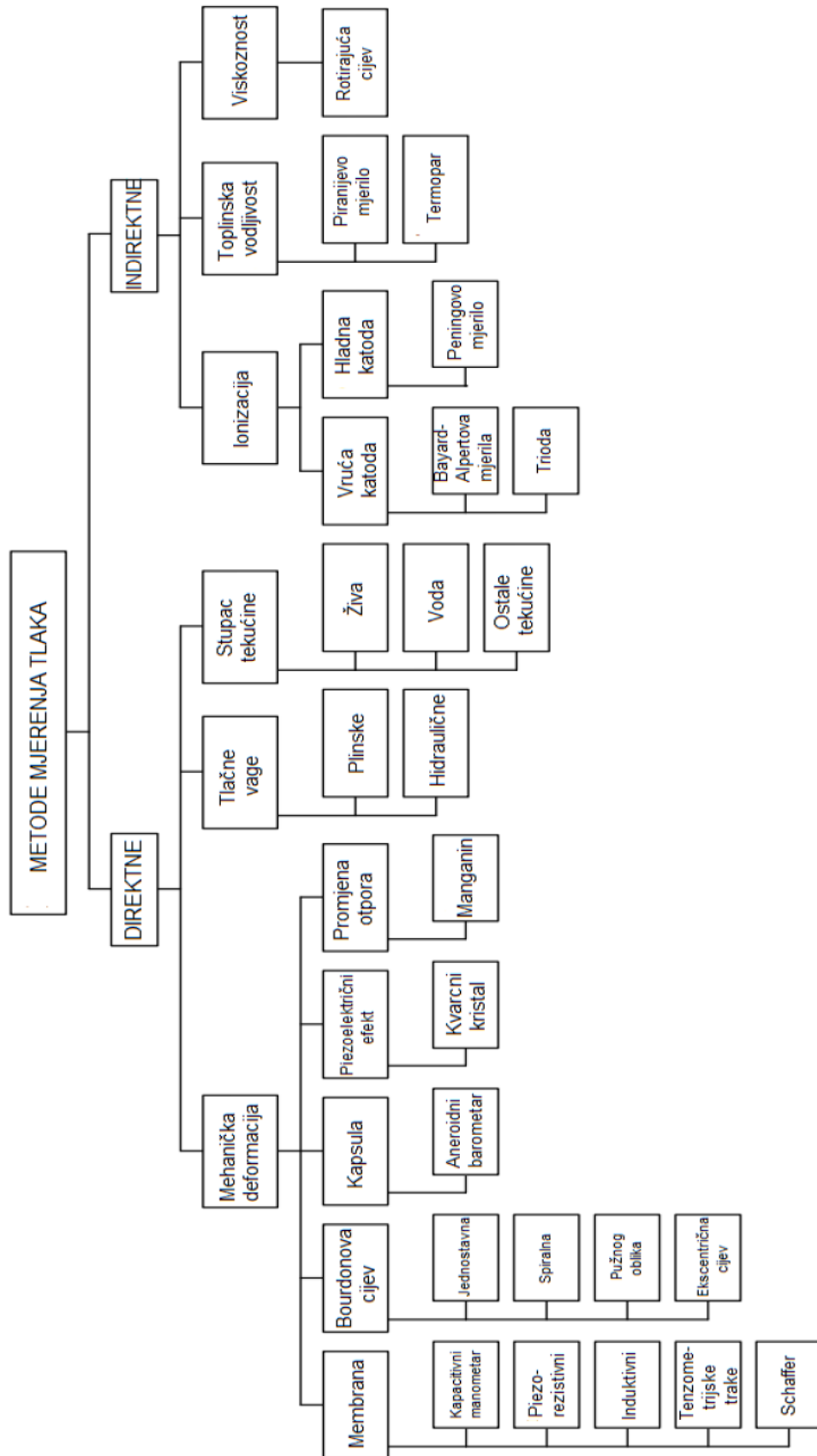
Taj zakon bio je temelj za razvoj termodinamike i omogućio preciznije mjerenje tlaka. Zajedno, njih dvojica pomaknuli su granice tadašnjeg znanja i otvorili put modernim instrumentima koji se i danas koriste u znanstvenim i industrijskim primjenama.

3.2. Metode mjerenja tlaka

Mjerila tlaka igraju ključnu ulogu u znanstvenim istraživanjima i industrijskim primjenama, a njihova evolucija traje već više od dva stoljeća. Kroz povijest su razvijeni brojni različiti principi mjerenja statičkog tlaka, od mehaničkih instrumenata do sofisticiranih elektroničkih senzora. Današnje metode mjerenja tlaka i vakuuma mogu se klasificirati prema različitim fizikalnim principima, pri čemu se posebna pažnja posvećuje onima koji omogućuju visoku preciznost i pouzdanost rezultata. Primarni etaloni tlaka temelje se na metodama koje osiguravaju najmanje mjerne nesigurnosti i najbolju ponovljivost, čime postaju referentne točke za kalibraciju ostalih mjernih instrumenata. Iako mjerila tlaka značajno variraju u svojim karakteristikama, od jednostavnih Bourdonovih cijevi do složenih rezonantnih i kvantnih senzora, njihova primjena ostaje neizostavna u laboratorijima, industriji i meteorologiji. Daljnji razvoj tehnologije omogućuje sve preciznije mjerenje tlaka, s ciljem smanjenja nesigurnosti i proširenja raspona primjena u znanstvenim i tehnološkim sustavima.

Područja mjerenja tlaka kreću se sve od 10^{-8} pa do 10^9 Pa.

Principi mjerenja na kojima se temelji razvoj primarnih etalona tlaka prikazani su na slici 3.1



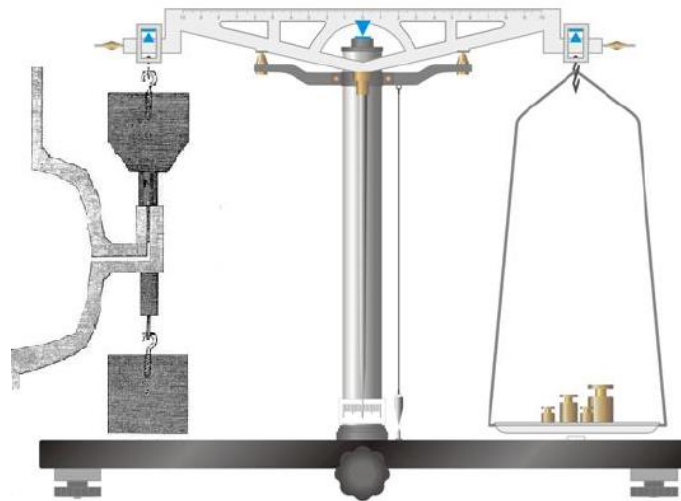
Slika 2 Podjela metoda mjerenja tlaka

4. Tlačne vage

Iako su živini barometri bili precizni, također su bili i nepraktični za mnoge industrijske i znanstvene primjene. Tijekom industrijske revolucije u 18. i 19. stoljeću kako su se razvijali parni strojevi, hidraulički uređaji i druge tehnologije tako je i rasla potreba za preciznim mjerenjem tlaka. Kako bi se mogli mjeriti visoki tlakovi u industrijskim procesima u to doba osmišljen je klipni mehanizam koji je temelj današnjih tlačnih vaga.

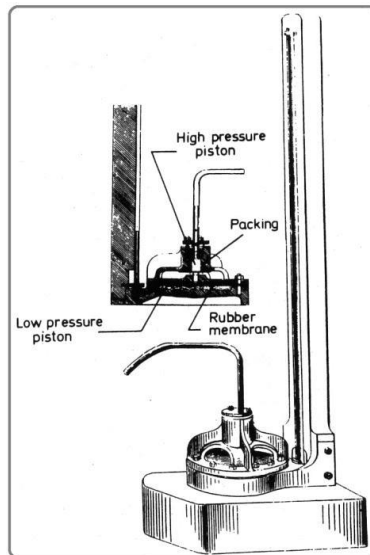
4.1. Povijesni razvoj tlačnih vaga

Parrot je provodio studije na različitim materijalima podvrgnutim tlaku od približno 10MPa. Za mjerenje tlaka koristio je čelični sklop klipa i cilindra opterećen odabranim utezima postavljenim na ruci analitičke vage. Zanimljivo je primijetiti da tlačna vaga direktno mjeri tlak, budući da se razvija u tlačnoj komori. [2]



Slika 3 Tlačna vaga – Parrot 1832. godina

U radu Galy-Cazalat (1846) opisan je uređaj koji kombinira živin stupac i hidraulički sklop klipa i cilindra za množenje tlaka, a koji se koristio za mjerenje diferencijalnih tlakova. Visoki tlak djelovao je na mali sklop klipa i cilindra, dok je niski tlak bio primijenjen na veći sklop klipa i cilindra, a tlak se ovdje mjerio manometrom sa stupcem živine. Sličan uređaj izradio je Desgoffe, a koristio se pri tlakovima do 100 MPa. [2]

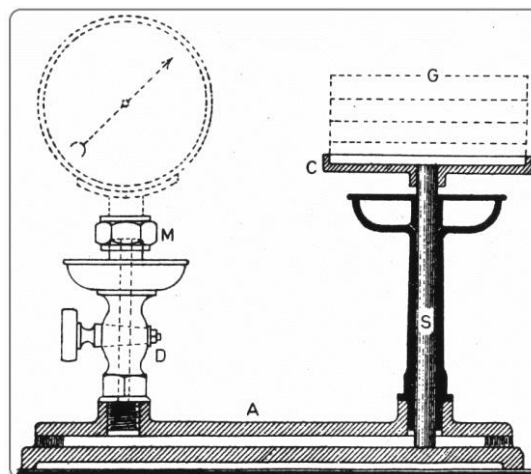


Slika 4 Manometar – Desgoffe 1881. godina

Seyss je 1869. godine uspio napraviti instrument s automatskim dodavanjem opterećenja. Cilindar je sadržavao dva koncentrična klipova, a sila je dodavana klipovima pomoću šipke i jarma. Nekorišteni utezi visili su sa potpornog okvira. Kako bi tlak rastao, klipovi bi dizali utege jednog po jednog.

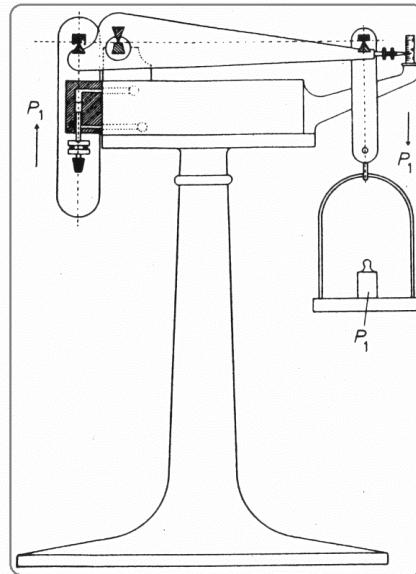
Godine 1893. Amagat je konstruirao prvu tlačnu vagu sa rotirajućim klipom kako bi smanjio trenje o površinu cilindra i tako povećao osjetljivost tlačne vage. Time je uspio mjeriti tlakove do 300 MPa. Bio je prvi koji se zalagao za pažljivu izradu i precizno mjerenje cilindričnih površina kako bi smanjio propuštanje fluida i zbog toga njegov model smatramo pretačom modernih dvostruko-rasponskih vaga.

Ruschholz je osmislio vagu koja ima slične značajke kao i današnje moderne tlačne vage. Točnije klip s ravnim opterećenjem s vrha, rotacija za smanjivanje trenja, integrirani ventil i priključak za testne mjerne te spremnik za ulje. Kompaktan uređaj koji se koristi za umjeravanje Bourdonovih mjeraca tlaka. [2]



Slika 5 Ruschholzova vaga

Stuckrathova vaga, iako nije imala mogućnost rotacije klipa, ima preciznost procijenjenu na oko 0,04% na 25 MPa.



Slika 6 Stuckrathova vaga

Kako se povećavao radni tlak, problem s procurivanjem fluida postajao je sve veći. Razlozi za to bili su dvojadi: poteškoće pri izradi klipa i cilindra s izuzetno malim radijalnim zazorom i učinak elastične deformacije kod jednostavnog sklopa klipa i cilindra primjenom tlaka. Efekt procurivanja mogao se donekle ublažiti odabirom viskoznijeg fluida, ali time negativno utječemo na osjetljivost vage.

Zbog toga je Bridgman 1911. predložio i uspješno upotrijebio sklop klipa i cilindra s uvučenom izvedbom. S druge strane, Newhall je 1953. adaptirao rješenje sklopa klipa i cilindra s kontroliranom zazorom.

1964. Dadson i Greig predstavili su tlačnu vagu sa zrakom koja je aktualna i dan danas. Karakteristike te vage bile su neujednačenost u geometriji cilindra i klipa, nagib osi klipa u odnosu na okomitu os. Također Dadson i suradnici su 1965. razvili opće izraze za ovisnost efektivne površine o tlaku, uključujući i geometrijske deformacije.

Do sredine i kraja 1970-ih, pneumatske tlačne vage našle su primjenu u nacionalnim laboratorijima za standarde te postale predmet intenzivnih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja. Heydemann i Welch detaljno su opisali uporabu tih vaga kao primarnih standarda 1975.

Krajem 1970-ih i početkom 1980-ih započela su bilateralna međusobna uspoređivanja tlačnih vaga poganjenih plinom. Razlike između nominalno istih tlakova u rasponu od 40 kPa do 5 MPa obično su bile oko 10 ppm ili manje, dok su nesigurnosti pojedinih instrumenata bile barem dvostruko veće.

Do sredine 1980-ih pažnja je bila usmjerena na usporedbu sposobnosti nacionalnih laboratorija u mjerenju efektivnih površina tlačnih vaga u apsolutnom i relativnom modu za tlakove od 10 kPa do 110 kPa. Rezultati su pokazali da su vrijednosti efektivnih površina iznad 40 kPa u apsolutnom modu grupirane unutar raspona od 10 ppm. Popularna metoda za mjerenje malih diferencijalnih tlakova bila je uporaba dvostrukih tlačnih vaga. [2]

Tijekom 1980-ih, razvijene su tlačne vage s većim promjerima (nominalno 35 mm) i manjim radijalnim zazorima (oko 1 μm), s nesigurnostima usporedivima s onima iz manometrije, za tlakove do 1 MPa. Zahtijevale su visoku preciznost, uključujući okruglost klipa i cilindra unutar 0,1 μm , ravnost unutar 0,15 μm te mjerenje promjera s nesigurnošću od $\pm 0,05 \mu\text{m}$ ili boljom. Usporedbe ovih vaga s manometrima pokazale su razlike od 3 ppm do 30 ppm. [2]

4.2. Izvedbe i zahtjevi tlačnih vagi

Tlačna vaga sastoji se od klipa i cilindra te sustava za nanošenje poznatog vertikalnog opterećenja na klip. Klipni mehanizam ključan je dio instrumenta budući da se preko njega proračunava efektivna površina na koju djeluje sila.

Princip rada vrlo je jednostavan. S jedne strane nalazi se klip s vlastitom masom, na koji se dodaju precizno definirani utezi, dok se s druge strane dovodi fluid, najčešće dušik ili bijelo ulje. Kada tlak fluida postane dovoljno visok da podigne klip zajedno s utegom, pri čemu se klip može slobodno rotirati, kažemo da je vaga u ravnoteži. Tlak unutar sustava, koji je potreban za podizanje klipa, može se izračunati pomoću sljedeće formule [3]:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m * g}{A}$$

U ovoj formuli, m predstavlja masu klipa i dodatnih utega, g je ubrzanje gravitacije, a A efektivna površina klipa. Tlak koji se očitava je manometarski, budući da zrak koji okružuje klip dodatno doprinosi ukupnom tlaku. Između klipa i cilindra ostavljena je mala zračnost, koja omogućuje klipu da se neprekidno rotira bez dodirivanja stijenki cilindra.

Materijali koji se koriste za izradu tlačnih vaga moraju biti pomno odabrani i imati veliku tlačnu čvrstoću i jako malu termalnu ekspanziju. S gledišta klipa i cilindra, koriste se najčešće volfram-karbid s različitim postotcima kobalta. Površinska obrada kontaktnih površina izvodi se na red veličina ispod mikrometra. Između klipa i cilindra zračnost mora biti između 0,2 μm i 1 μm . Ako je razmak između klipa i cilindra premalen, onda neće doći do slobodne rotacije, već će se povećati sile trenja između klipa i cilindra, tj. rad vage bit će nestabilan. Povoljno nam je imati tanak sloj fluida između klipa i cilindra jer on ne samo da nam smanjuje efekt trenja već podmazuje sklop klipa i cilindra. Negativna strana toga je da može doći do istjecanja fluida iz sustava zbog čega je potrebno održavati konstantan tlak u sustavu. Iz navedenoga je jasno kolika je važnost brtvi. Najvažnija brtva nalazi se na dnu cilindra i ona mora osigurati stalan pritisak čak i pri velikim tlakovima na duže vrijeme.

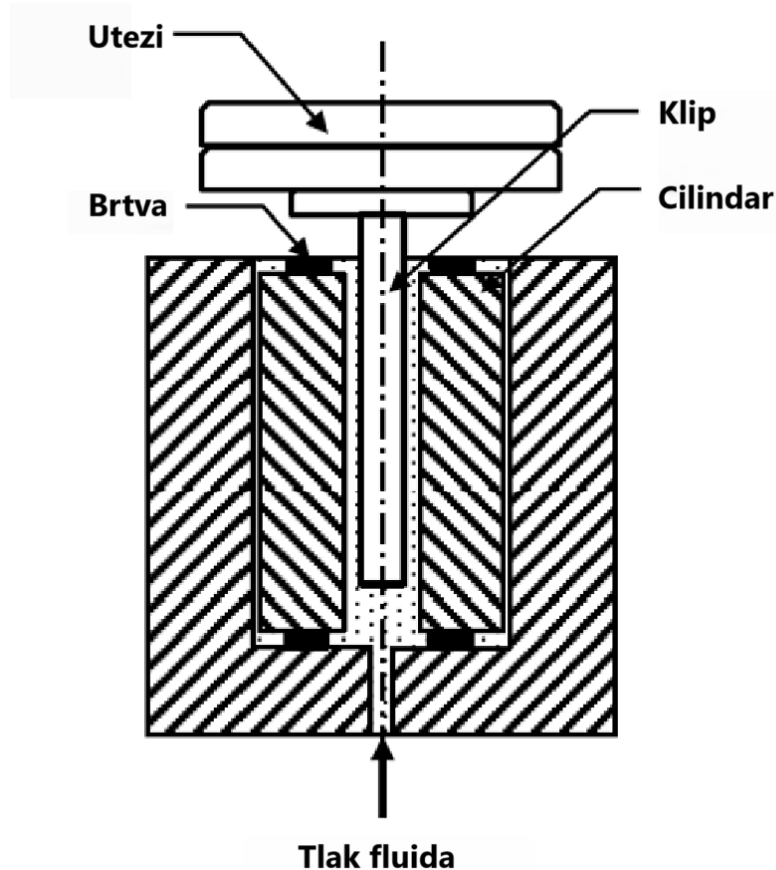
Također je od velike važnosti da efektivna površina bude iznimno precizne geometrije. Ona pri atmosferskome tlaku mora biti konstantna duž cijeloga spoja klipa i cilindra. Dopuštene tolerancije su samo do 100 nm zakrivljenosti na promjeru klipa od 1 do 50 mm.

Sklop klipa i cilindra mora biti konstruiran tako da komponente (npr. matica za pričvršćivanje cilindra i tlačna brtva koja se ugrađuje u cilindar) ne vrše značajnu silu na cilindar, jer to može uzrokovati nepredvidive deformacije.

4.2.1. Sklop klipa i cilindra

Sklop klipa i cilindra može bit izveden na tri načina:

1) Jednostavan sklop klipa i cilindra



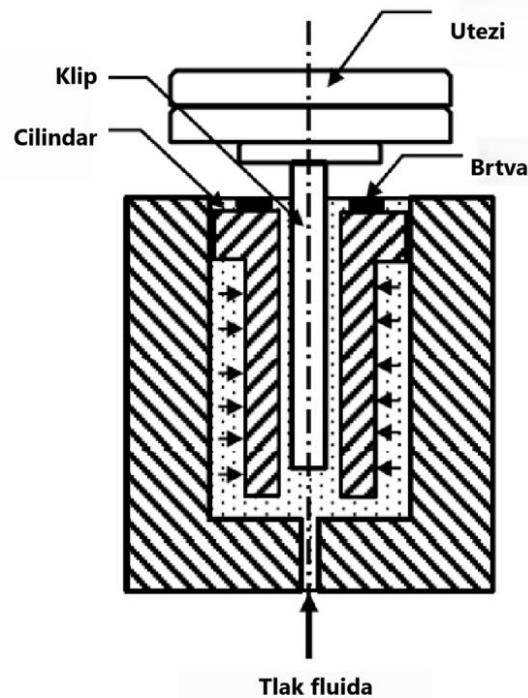
Slika 7 Jednostavan sklop klipa i cilindra

Djelovanje fluida za prijenos tlaka na bazu klipa i duž zahvatne duljine klipa i cilindra uzrokuje mehaničke deformacije koje ovise o tlaku, geometriji i fizikalnim svojstvima materijala primjenjenih za izradu sklopa. Takva izvedba može dovesti do prekomjernog propuštanja fluida pri visokim tlakovima. Zbog toga ovakav se sklop može koristiti za mjerenje tlaka do 800 MPa.

Kako bi se riješio problem prekomjernog propuštanja fluida razvijena su dva dodatna mehanizma. [2]

2) Sklop klipa i cilindra s uvučenom izvedbom

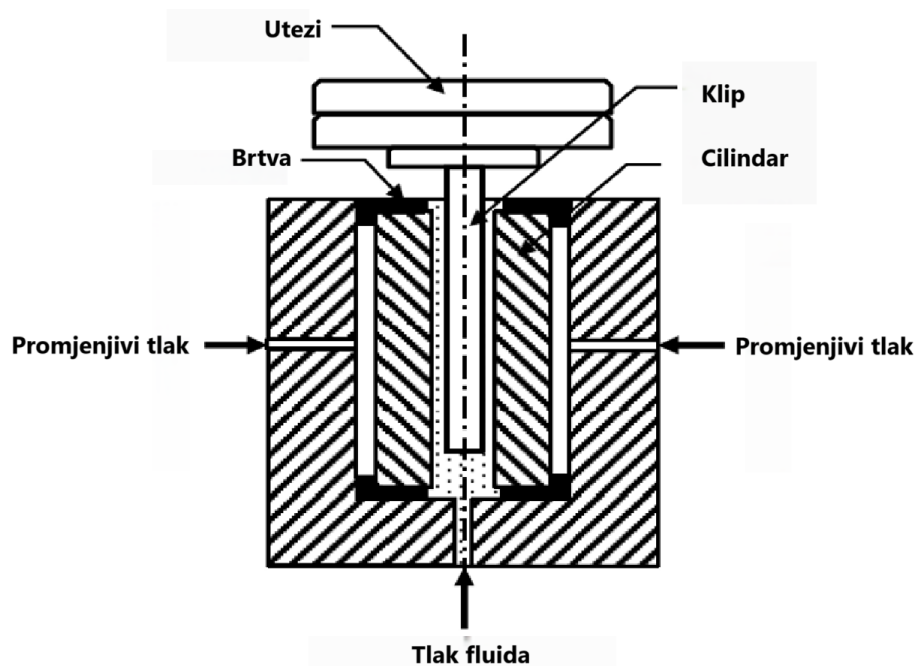
U ovoj izvedbi fluid za prijenos tlaka djeluje ne samo na bazu klipa i duž zahvatne duljine klipa i cilindra, već i na vanjsku površinu cilindra. Time se smanjuje zračnost između klipa i cilindra zbog deformacije cilindra koja je proporcionalna diferencijalnom tlaku između tlaka nanesenog na vanjski dio cilindra i onog u prostoru između klipa i cilindra. Ovakav primjer tlačnih vaga danas se smatra zastarjelim i više se ne koristi.



Slika 8 Sklop klipa i cilindra s uvučenom izvedbom

3) Sklop klipa i cilindra s kontroliranim zazorom

Kod tlačnih vaga s kontroliranim zazorom promjenjivi tlak „Jacket Pressure“ (koji je generiran, kontroliran i mjereno od zasebnog sustava) se postavlja na točno definiranu površinu sa vanjske strane cilindra. Ovime postizemo kontrolu promjera zračnosti između klipa i cilindra. Iako ova konfiguracija u teoriji može pokriti jako širok interval tlaka, u praksi se rijetko koristi jer je komercijalno teško dostupan i znatno je teže njime upravljati nego sa prijašnje dvije konstrukcije, a li su jedine koje mogu sigurno mjeriti tlakove iznad 1 GPa. [2]



Slika 9 Sklop klipa i cilindra s kontroliranim zazorom

Tijekom mjerenja tlaka klip mora biti u konstantnoj rotaciji kako bi se smanjila mogućnost da dođe do trenja između cilindra i klipa. Sama rotacija može se aplicirati ručno ili automatski, a odgovarajuća frekvencija okretanja mora biti pomno izračunata. Uobičajeno ona iznosi oko 30 okretaja po minuti.

Što se utega tiče, oni su najčešće izrađeni od nehrđajućega čelika te se na vagu trebaju dodavati na vrh klipa automatski ili mogu biti postavljeni rukom, ali moramo biti vrlo oprezni prilikom rukovanja njima kako ne bi došlo do oštećenja. Time bismo ugrozili njihovu preciznu izvedbu jer u tom slučaju usmjerenje sile ne bi bilo u smjeru vertikalne osi klipa. Što bi nam smanjivalo stabilnost sustava prilikom rotacije klipa.

Što se medija tiče tlačne vage dijele se na one koje rade s uljem, vodom ili na one koje rade s plinovima (npr. dušik). Kod vaga koje za radni medij imaju plin, moguća je evakuacija okolnog prostora oko sklopa klipa i cilindra. To nam omogućuje mjerenje apsolutnog, odnosno manometarskog tlaka. S druge strane, vage koje kao radni medij koriste ulje imaju manju sklonost propuštanju pa samim time i veću sigurnost.

Osim mjerenja tlaka prilikom mjerenja moramo imati na umu da nam i razni drugi parametri utječu na rezultate, kao što su položaj klipa u sklopu, brzina rotacije omjer pada klipa s tlakom i temperaturom. Nadalje, na sklop klipa i cilindra mora biti ugrađen senzor temperature, jer se promjenom temperature mijenja efektivna površina.

Tlačne se vage zbog svoje visoke točnosti koriste kao etaloni i služe za umjeravanje drugih instrumenata za mjerenje tlaka. [2]

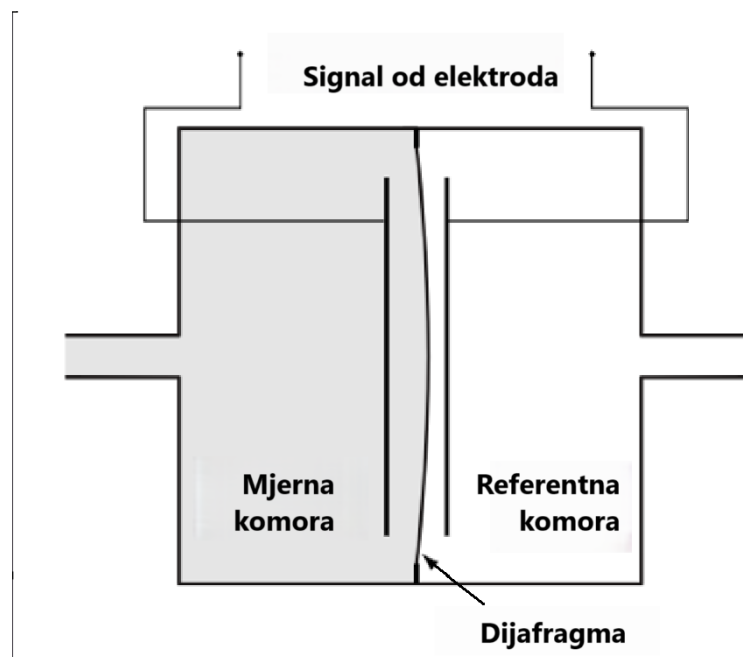
5. Pretvornici tlaka

Pretvornici tlaka su uređaji koji mjere tlak i na osnovu njega stvaraju ekvivalentni električni signal. Uređaji mjere tlak pomoću deformacije mehaničkih osjetnika. Naime, djelovanjem tlaka dolazi do pomaka osjetila izvan ravnotežnog stanja, a taj pomak se iskazuje električnim signalom.. Taj izlazni signal može biti: struja, frekvencija ili napon. Ovakvi uređaji upotrebljavaju se za sve raspone tlakova i sve režime mjerenja. Najčešće korišteni tipovi pretvornika tlaka su [3]:

- Kapacitativni
- Promjenjivi linearni pretvornici,
- Pretvornici osjetljivi na opterećenje,
- Pretvornici tlaka s vibrirajućim strukturama
- Pretvornici s direktnim rezonantnim sensorom tlaka
- Piezoelektrični

5.1. Kapacitativni senzori

Ovi se senzori obično koriste u kombinaciji s membranom koja može činiti jednu ploču kondenzatora, dok pokrov pod tlakom čini drugu ploču. To zahtijeva da ta dva dijela budu električki izolirana te da dielektrična svojstva ostanu konstantna. U praksi, ovo može biti izazovno jer su mnoge radne tekućine vodljive. Zbog toga se često koriste izolacijske membrane koje prenose tlak putem nevodljive tekućine.



Slika 10 Kapacitativni senzori

Simetrični dizajn prikazan na slici omogućuje linearniji odnos između tlaka i električnog izlaza te olakšava mjerenje diferencijalnih tlakova. Za mjerenje apsolutnog tlaka referentna komora se evakuira. Metalizirana membrana i dvije elektrode čine dva kondenzatora koji su uključeni u AC mostni krug. Kada se tlak primijeni na jednu stranu membrane, ona se savija, mijenjajući kapacitivnost.

Mnogi moderni kapacitativni membranski mjeraci tlaka koriste jednostrani dizajn s dvostrukim elektrodama, gdje su dvije kapacitativne elektrode smještene na jednoj keramičkoj ploči, obično u obliku "bikovog oka", na referentnoj strani uređaja. Ovaj dizajn smanjuje utjecaj kontaminacije i kemijskih reakcija između tlaka i elektroda, što omogućuje mjerenja i s korozivnim plinovima.

apacitivni membranski uređaji spadaju među najčešće korištene i najprilagodljivije pretvornike tlaka. Rade u rasponu tlaka:

$$\text{od } 10^{-3} \text{ Pa do } 10^7 \text{ Pa}$$

te imaju dobru ponovljivost, linearnost i rezoluciju. Odlikuju se velikom otpornošću na prekomjerne tlakove i proširenim temperaturnim rasponom kada se koriste s udaljenom elektronikom. Kada se koriste kao vakuumski mjerači, imaju prednost u odnosu na mnoge druge vakuumske senzore jer slabo ovise o sastavu plina – zapravo, ta ovisnost nije svojstvena samoj tehnici već je uzrokovana toplinskom transpiracijom. Međutim, mogu biti veći i skuplji u usporedbi s drugim pretvornicima. [3]

5.2. Promjenjivi linearni pretvornici

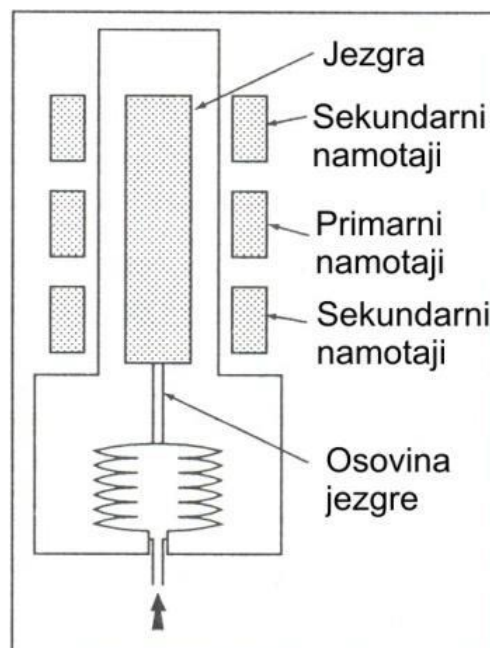
To su induktivni senzori položaja koji se mogu povezati s deformirajućim elementima poput membrane ili mijeha. Sastoje se od cilindra izrađenog od feromagnetskog materijala koji se pomiče unutar cijevi s tri odvojene zavojnice. Središnja zavojnica se pobuđuje izmjeničnim naponom, dok se s obje strane nalaze dvije senzorske zavojnice.

Kako se magnetski cilindar pomiče unutar cijevi, mijenja se magnetska sprega, što omogućuje dobivanje linearnog odnosa između položaja cilindra i izlaznog signala uz odgovarajuću elektroniku, koja može uključivati i temperaturnu kompenzaciju. Ova tehnika omogućuje detekciju pomaka od manje od jednog milimetra do nekoliko stotina milimetara u specijaliziranim primjenama.

Ovi senzori koriste se u pretvornicima tlaka koji rade u rasponu

$$\text{od } 0,01 \text{ Pa do } 10 \text{ MPa.}$$

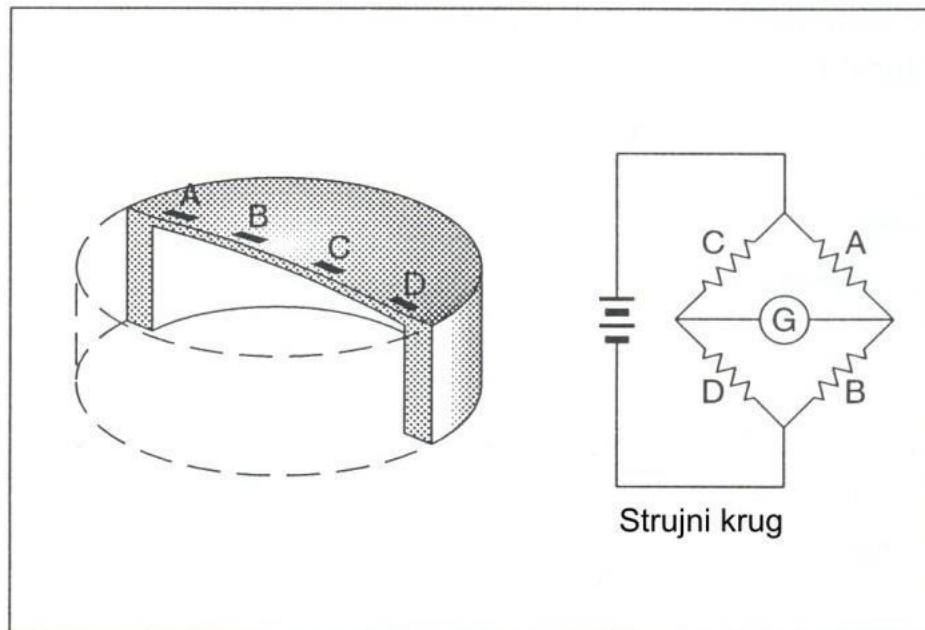
Cilindar je pričvršćen na središnji dio membrane ili kraj mijeha, što može dodati masu i potencijalno povećati krutost sustava. Također, suprotni kraj može zahtijevati dodatnu potporu. U usporedbi s kapacitivnim sensorima, ovakvi senzori mogu biti osjetljiviji na ubrzanje i vibracije te imati niži frekvencijski odziv. Najčešće su dostupni kao manometarski ili diferencijalni senzori, dok su apsolutni modeli složeniji za izvedbu. [3]



Slika 11 Promjenjivi linearni pretvornici

5.3. Pretvornici osjetljivi na opterećenje

Mjerači deformacije (strain gauges) senzori su čiji se električni otpor mijenja kada su podvrgnuti mehaničkom naprezanju, bilo istezanju ili kompresiji. Ova svojstva ih čine izuzetno korisnima za mjerenje tlaka, gdje se najčešće koriste pričvršćeni na membranu senzora tlaka kako bi registrirali njen pomak uzrokovan djelovanjem tlaka. Četiri takva mjerača obično su spojena u Wheatstoneov most, što omogućuje povećanje osjetljivosti i smanjenje utjecaja vanjskih faktora poput temperaturnih promjena. [3]



Slika 12 Pretvornici osjetljivi na opterećenje

Fenomen koji omogućuje rad ovih senzora poznat je kao piezo-rezistivni efekt, pri kojem dolazi do promjene električnog otpora materijala uslijed mehaničkog naprezanja. Ovaj efekt je znatno izraženiji u poluvodičima nego u metalima – otprilike 50 puta jači – što poluvodičke mjerače deformacije čini osjetljivijima i pogodnijima za mjerenje tlaka. U kontekstu senzora tlaka, termin "piezo-rezistivni senzori" obično se odnosi na poluvodičke senzore izrađene od silicija.

Moderni piezo-rezistivni senzori tlaka često se izrađuju monolitno, korištenjem tehnika sličnih onima za proizvodnju integriranih krugova. Cijela membrana senzora izrađuje se od silicija, a određena područja se dopiraju borom kako bi se stvorili senzori naprezanja unutar strukture. Silicij se pokazao izuzetno pogodnim za ovu primjenu zbog svojih izvrsnih elastičnih svojstava, velike otpornosti na preopterećenje i niske histereze. Osim toga, silicij ima visoku čvrstoću, sličnu čeliku, ali znatno manju masu, što omogućuje brz odziv senzora i smanjuje njegovu osjetljivost na vibracije i ubrzanja.

Međutim, kako bi se povećala otpornost senzora na agresivne medije koji bi mogli oštetiti silicij, piezo-rezistivni senzori tlaka često se smještaju u uljem ispunjene komore. Tlak se prenosi na silicijski senzor pomoću tankih metalnih membrana, najčešće izrađenih od nehrđajućeg čelika. Osim zaštite od korozivnih tvari, ovo rješenje pruža i dodatnu mehaničku prigušenost, čime se smanjuje mogućnost neželjenog "zvonjenja" senzora pri naglim promjenama tlaka.

Strain gauge senzori tlaka dostupni su u različitim izvedbama s raznim izlaznim signalima, uključujući 4–20 mA, 0–100 mV i 0–5 V. Pokrivaju širok raspon tlaka od približno 1 kPa do 100 MPa te se mogu koristiti za apsolutna, manometarska i diferencijalna mjerenja. Njihova preciznost, pouzdanost i

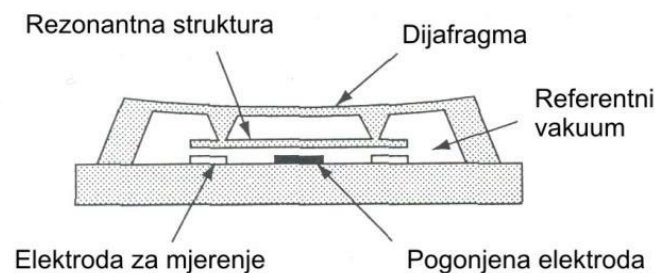
otpornost na preopterećenje čine ih jednim od najčešće korištenih tipova pretvornika tlaka u industriji i znanstvenim primjenama. [3]

5.4. Pretvornici tlaka s vibrirajućim strukturama

Vibracijski senzori tlaka rade na principu promjene rezonantne frekvencije vibrirajućih elemenata koji su povezani s membranom ili drugim osjetljivim dijelom senzora. Kada tlak deformira membranu, mijenja se napetost vibrirajućeg elementa, što uzrokuje pomak njegove rezonantne frekvencije. Ovaj efekt omogućuje vrlo precizno određivanje tlaka, jer se čak i male promjene frekvencije mogu detektirati i analizirati.

U većini slučajeva vibrirajući element nije izravno izložen tlaku, već se nalazi iza ili unutar deformirajućeg dijela senzora, čime se smanjuje utjecaj gustoće medija na mjerenje. Kod ranijih izvedbi koristile su se tanke žice razapete između dijelova membrane ili mijeha, dok noviji modeli koriste samonosive rezonantne strukture, poput pojedinačnih ili višestrukih nosača. Kristalni kvarc se često koristi zbog niske histereze i stabilnosti kroz dulje vremensko razdoblje.

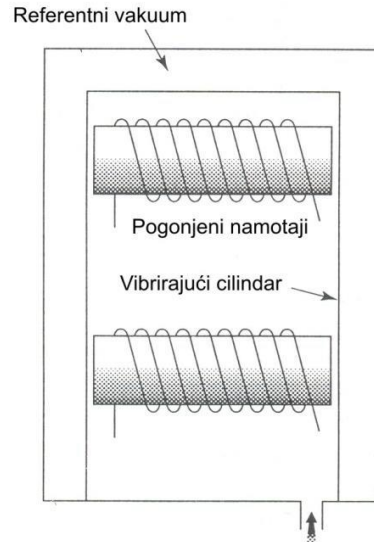
Senzori temeljeni na vibracijskim strukturama primjenjuju se u situacijama koje zahtijevaju visoku preciznost i pouzdanost, a posebno su pogodni za digitalne sustave kontrole. Dostupni su modeli koji mogu mjeriti tlak do nekoliko stotina MPa, no potrebno je osigurati temperaturnu kompenzaciju kako bi se održala stabilnost mjerenja. Također, zbog mehaničkih svojstava konstrukcije, senzori mogu biti osjetljivi na promjene položaja tijekom rada. [3]



Slika 13 Pretvornici tlaka s vibrirajućim strukturama

5.5. Pretvornici s direktnim rezonantnim senzorom tlaka

Kod ovih senzora tlak se primjenjuje izravno na vibrirajući dio senzora, za razliku od drugih rezonantnih uređaja gdje se mjeri utjecaj deformacije membrane na rezonator. Upotreba rezonantnih struktura omogućuje senzorima visoku stabilnost i preciznost.



Slika 14 Pretvornici s direktnim rezonantnim senzorom tlaka

Rezonantna frekvencija senzora može se mijenjati ovisno o gustoći fluida, što omogućuje određivanje tlaka ako je sastav fluida poznat, ili se može mijenjati zbog naprezanja koje uzrokuje tlak. Najčešće korištene rezonantne strukture uključuju cilindrične metalne komore ispunjene plinom ili kvarcne kristale posebno oblikovane za promjene frekvencije pod utjecajem tlaka.

Jedna vrsta senzora koristi vibrirajuću komoru ispunjenu tlakom plina, gdje se rezonancija inducira elektromagnetski. Ovi senzori mogu biti osjetljivi na gustoću plina, što znači da je njihova preciznost najbolja kada se koriste s čistim plinovima, poput dušika. Na primjer, zamjena laboratorijskog zraka s 50% relativne vlažnosti čistim dušikom može uzrokovati odstupanje mjerenja od oko 0,05%. Također, važno je izbjegavati cijevi od materijala poput gume ili najlona, koji mogu ispuštati vlagu i uzrokovati kondenzaciju unutar senzora.

Drugi tip senzora koristi inverzni piezoelektrični efekt – električni naboj izaziva vibraciju kvarcnog kristala. Kada je senzor uronjen u fluid, radijalna sila tlaka mijenja njegovu rezonantnu frekvenciju. Ovi senzori su manje osjetljivi na promjene gustoće fluida od rezonantnih komora i često se koriste s izolacijskim membranama kako bi se kvarc zaštitio od agresivnih medija. [3]

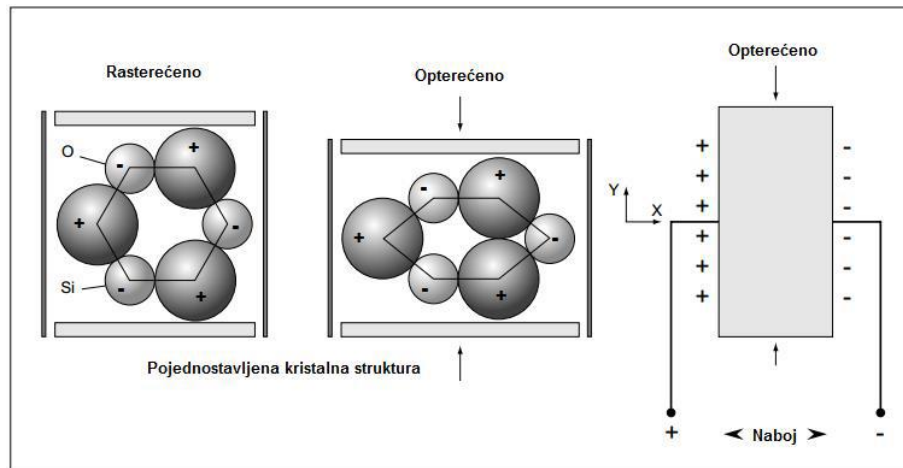
5.6. Piezoelektrični pretvornici tlaka

Određeni kristalni materijali, kada su izloženi naprezanju uslijed vanjskog tlaka, razvijaju napon na svojim površinama. Ovaj piezoelektrični efekt može se koristiti za mjerenje tlaka, iako napon brzo opada, pa je potrebno koristiti visokoomski pojačavač naboja za njegovo bilježenje. Ovi senzori sami generiraju signal i ne zahtijevaju vanjsko napajanje.

Odlikuju se vrlo brzom reakcijom, što ih čini prikladnima za mjerenje dinamičkog tlaka i vršnih vrijednosti tlaka, ali nisu pogodni za mjerenje stalnog tlaka. Glavni materijal koji se koristi je kvarc, iako određene keramike također pokazuju piezoelektrični efekt.

Najčešća primjena ovih senzora je mjerenje visokofrekventnih promjena tlaka, poput onih u komorama za izgaranje motora.. Također su sposobni izdržati visoke prenapone.

Slika prikazuje transverzalni piezoelektrični efekt (za razliku od longitudinalnog), gdje opterećenje u smjeru y rezultira električnim nabojem u smjeru x. [3]



Slika 15 Piezoelektrični pretvornici tlaka

6. Umjeravanje mjerila tlaka

6.1. Preduvjeti za postupak umjeravanja

Kako bismo uopće mogli započeti ispravno umjeravanje nekog mjerila, moramo zadovoljiti određene preduvjete.

Prvo i osnovno je da se umjeravanje vrši u za to pogodnom okolišu, tj. u laboratorijskim stabilnim uvjetima. Preporučuje se da tijekom umjeravanja nema nikakvih vibracija. Upravo iz tog razloga se laboratoriji za ovakva ispitivanja često smještaju u podrum. Umjeravanje se može provesti tek nakon što se temperature okoliša i umjeranog uređaja izjednače, uzimajući u obzir i vrijeme potrebno za zagrijavanje samog uređaja. Temperatura okoliša treba biti stabilna, s odstupanjima do najviše 1 K, te mora biti unutar raspona od 18 do 28 °C, pri čemu je potrebno tijekom umjeravanja kontinuirano pratiti temperaturu. Također, ukoliko gustoća zraka utječe na rezultate mjerenja, osim temperature zraka, potrebno je bilježiti i atmosferski tlak te relativnu vlažnost zraka. [5]

Zatim je značajno odabrati prikladan mjerni etalon za naše umjeravanje. Ako su nam potrebne velike točnosti, onda bi umjeravanje bilo pogodno za raditi pomoću nacionalnoga etalona. U suprotnom, ako nam nisu potrebne velike točnosti, možemo se koristiti bilo kojim etalom koji smatramo prikladnim za određenu situaciju. Naravno moramo osigurati i kvalitetan spoj ispitivanog mjerila s etalonskim.

Tlak moramo generirati najboljom mogućom metodom za mjerenje tlaka u određenom području, a rezultate je dovoljno zapisivati rukom na papir. Ipak, većina modernih kvalitetnijih uređaja spojeni su s računalom na kojemu se rezultati automatski mjere i prate.

I na kraju, važno je da proces umjeravanja provodi stručna i za to obučena osoba kako bi rezultati bili dosljedni i da se prilikom izračuna rezultata mjerenja koriste pravilni proračuni.

Metode umjeravanja tlaka

Upute koje treba pratiti prilikom umjeravanja predlaže „Europska udruga nacionalnih mjeriteljskih ustanova (EURAMET)“ i one su:

- EURAMET cg-17 (Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers) [4]
- DKD-R 6-1 (Calibration of Pressure Gauges) [5]

Za izradu ovog rada korištena je DKD-R 6-1, metoda A.

Nakon što smo se upoznali s funkcionalnim mogućnostima kako etalonskog tako i umjeravanog uređaja, potrebno je izvršiti vanjsku i funkcionalnu provjeru prije početka ispitivanja.

Primjeri vanjske provjere su [5]:

- provjera oštećenja
- čistoća uređaja
- provjera čitljivosti očitavanja
- provjera tehničke dokumentacije

Primjeri funkcionalne provjere [5]:

- provjera nepropusnosti cijevi
- provjeru električnih instalacija
- provjeru funkcije nuliranja sustava
- postavljanje elemenata mjerne linije u definirane položaje
- provjeru svih funkcija uređaja

Pri provođenju ispitivanja moraju biti zadovoljeni i sljedeći kriteriji [5]:

- Ispitivano mjerilo tlaka, ako je moguće, treba umjeriti kao cjelinu, uključujući cijelu mjernu liniju.
- Prilikom umjeravanja treba uzeti u obzir položaj mjerila tlaka.
- Umjeravanje se provodi na jednoliko raspoređenim mjernim točkama unutar zadanog raspona tlakova.
- Ovisno o željenoj preciznosti i nesigurnosti mjerenja, provodi se jedno ili više ponovljenih mjerenja.
- Ako nije dovoljno poznata ovisnost ispitivanog mjerila tlaka o zakretnom momentu stezanja tijekom montaže, dodatnim stezanjem treba osigurati ponovljivost ispitivanja, a zabilježiti i vrijednost primijenjenog momenta.
- Visinska razlika između etalona i ispitivanog mjerila tlaka treba biti što manja, a ako je značajna, mora se uzeti u obzir pri izračunima.

Također, važno je voditi računa o mjernim rasponima etalona i ispitivanog mjerila tlaka, odnosno o tlakovima koje mogu očitavati. Na temelju toga, mjerne točke za ispitivanje određuju se prema [5]:

- karakteristikama ispitivanog mjerila tlaka
- karakteristikama etalona.

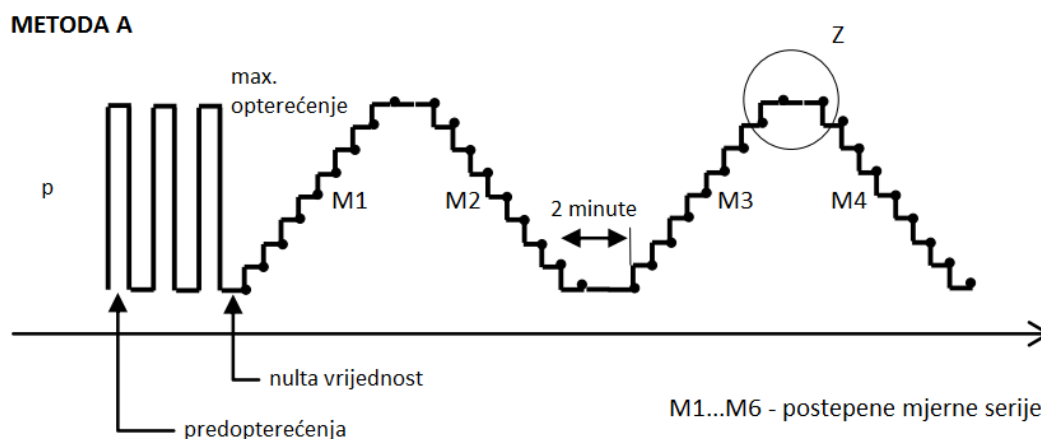
6.2. Metode umjeravanja

Vrijeme potrebno za stabilizaciju tlaka na najvećoj vrijednosti, kao i vrijeme između dva predopterećenja, ne smije biti kraće od 30 sekundi. Nakon završetka predopterećenja, uređaji moraju biti vraćeni na nulu, odnosno na razinu atmosferskog tlaka. Također, prijelaz između dvije susjedne mjerne točke trebao bi trajati najmanje 30 sekundi. Ovo je posebno važno pri umjeravanju Bourdonovog manometra, kod kojeg je potrebno lagano „kucnuti“ kako bi se smanjio utjecaj trenja koje može utjecati na kazaljku pokazivača tlaka.

Ovisno o željenoj preciznosti umjeravanja, razlikuju se tri metode prema DKD-R standardu [5]

- Metoda A
- Metoda B
- Metoda C

Razlika među metodama leži u broju predopterećenja prije postupnog povećanja i smanjenja tlaka te u minimalnom broju mjernih točaka. Metoda A je najzahtjevnija, ali osigurava najtočnije rezultate, dok je Metoda C najjednostavnija za provedbu, no njezini rezultati su najmanje pouzdani [5]



Slika 16 Vizualizacija metode A

Za potrebe ovog rada korištena je Metoda A pri umjeravanju pretvornika tlaka, zbog čega će biti ukratko opisana.

Ova metoda, iako najzahtjevnija, osigurava najtočnije rezultate te omogućuje utvrđivanje sistemske greške i ponovljivosti ispitivanog mjerila tlaka. Pripremni postupci su već ranije opisani, pa će ovdje biti prikazan samo tijek umjeravanja.

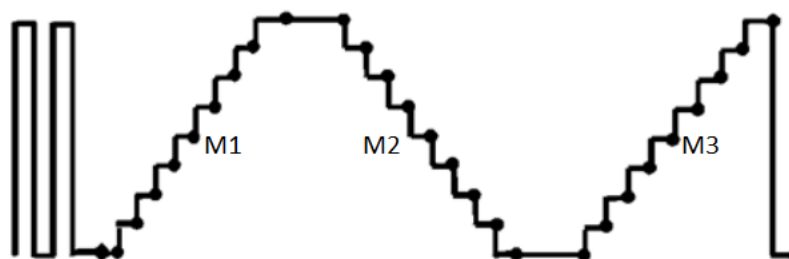
Postupak započinje uspostavljanjem mjerne linije i očitavanjem nulte vrijednosti tlaka. Slijedi trostruko predopterećenje sustava do maksimalnog tlaka umjeravanja, uz poštivanje propisanih vremenskih odrednica. Nakon toga provode se četiri mjerne serije [5]:

1. Prva serija (uzlazna) – tlak se postupno povećava do gornjeg limita.
2. Čekanje – minimalno dvije minute (za Bourdonov manometar pet minuta).
3. Druga serija (silazna) – tlak se postupno smanjuje do nulte vrijednosti.
4. Ponovljeni ciklus – ako je bilo potrebno dodatno stezanje mjerne linije, provodi se još jedan ciklus uzlazne i silazne serije.

Rezultati umjeravanja metodom A uključuju [5]:

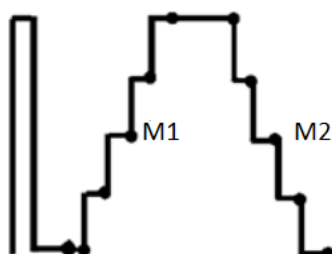
- tlak etalona
- ulazne i silazne vrijednosti mjerila
- srednju vrijednost
- odstupanje
- ponovljivost
- histerezu
- nesigurnost umjeravanja

METODA B

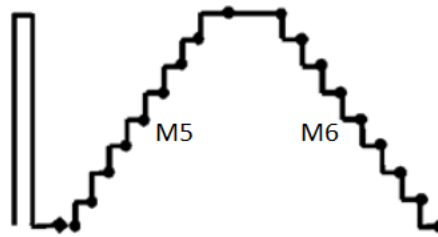


Slika 17 Vizualizacija metode B

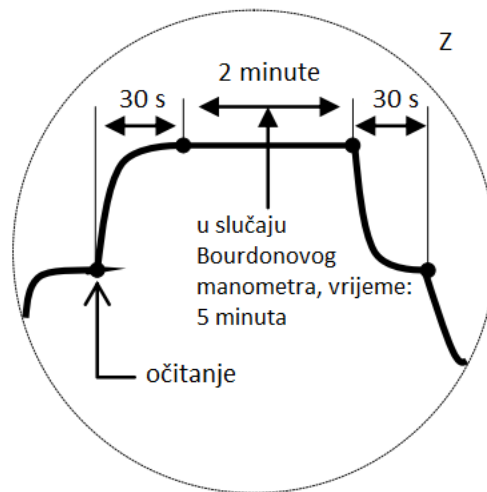
METODA C



Slika 18 Vizualizacija metode C



Slika 19 Vizualizacija umjeravanja za slučaj dodatnog zatezanja



Slika 20 Detalj vizualizacije umjeravanja

Iz grafova pojedinih metoda jasno su vidljive razlike između istih, ali kako bismo ih pobliže predočili usporedba je prikazana u sljedećoj tablici [5]:

Tablica 1 Metode umjeravanja prema DKD-R 6-1

Metoda	Razred (klasa) točnosti	Minimalni broj mjernih točaka s nulom ulaz/silaz	Broj predopterećenja	Vrijeme ostvarivanja tlaka	Vrijeme zastoja u konačnoj vrijednosti mjernog područja	Broj mjernih serija	
						uzlazno	silazno
A	<0,1	9	3	>30	2	2	2
B	0,1...0,6	9	2	>30	2	2	1
C	>0,6	5	1	>30	2	1	1

7. Projektiranje i sastavljanje mjerne linije

Sva mjerenja potrebna za izradu ovog završnog rada odrađena su u aboratoriju za procesna i toplinska mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu i to na privremenoj lokaciji zbog preseljenja fakulteta. Uvjeti u laboratoriju nisu bili idealni zbog povremenih pojava vibracija zbog djelovanja vanjskih faktora, ali su, uz dozu opreza, strpljivosti i iskustva asistenta u procesu mjerenja, odrađena zadovoljavajuće.

7.1. Tlačna vaga

Za izradu ovog rada korištena je tlačna vaga DHI PG7000, model PC7100/7600-200, koja služi kao državni etalon za mjerenje tlaka, interna oznaka vage je TLVAG09. Ovaj uređaj omogućuje mjerenja tlaka u rasponu od vakuuma do 500 MPa uz nisku nesigurnost mjerenja. Kalibracija se može provoditi automatski ili poluautomatski, a uređaj ima mogućnost praćenja referentnog tlaka u stvarnom vremenu. [6]

TLVAG09 koristi klipno-cilindrične module koji omogućuju brzu izmjenu raspona bez alata, smanjuju potrebu za rastavljanjem te poboljšavaju ponovljivost mjerenja. Sklop klipa i cilindra jednostavne je izvedbe. Ugrađeni senzori prate ambijentalne uvjete poput temperature, tlaka, vlage i vakuuma te nadziru položaj i rotaciju klipa. Daljinska komunikacija ostvaruje se putem RS-232 i IEEE 488 sučelja, a softver podržava verifikaciju i kalibraciju senzora. [6]

Sustav generiranja tlaka olakšava precizno upravljanje, dok preloading funkcija omogućuje pravovremenu prilagodbu tlaka. Maseni setovi izrađeni su od nehrđajućeg čelika. Dostupni su ručni i automatski sustavi mase s binarnim progresijama te pneumatskim upravljanjem. [6]

Tlačna vaga TLVAG09 sastoji se od [7]:

- ručni regulator tlaka MPC1 (do 70 bar)
- terminal za upravljanje
- set utega od 35 kg
- nosač utega
- sklop klip-cilindar
- stakleno zvono i vakuumska pumpa (opcija za mjerenja apsolutnog tlaka)
- set cijevi za spajanje s drugim uređajima

Svi podaci o tlačnoj vagi izvučeni su iz njezine umjernice (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig) koja vrijedi do 2027. godine.

Nesigurnost etalona iznosi:

$$U_e = 0,5 * 10^{-4} * p$$

7.1.1. Ručni regulator tlaka MPC1

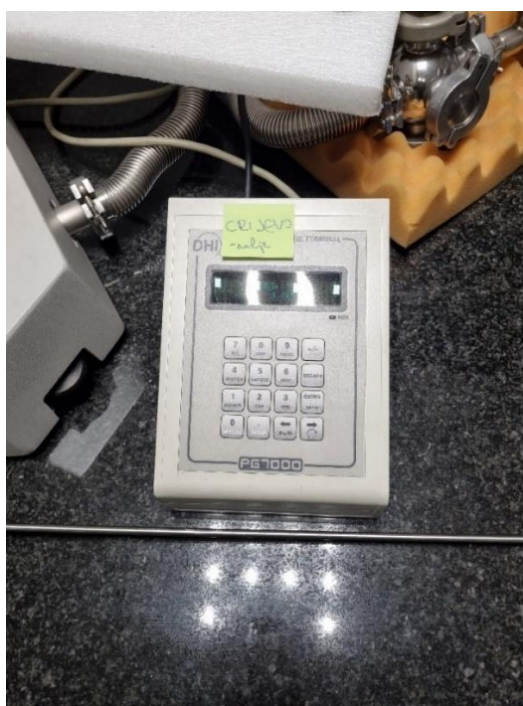
Ručni regulator MPC1 koristi se za kontrolu količine radnog medija koji ulazi u sustav tlačne vage. Otvaranjem dovodnog ventila medij ulazi u sustav, a kada pokazivač prikaže željenu količinu, sustav se zatvara pritiskom na gumb. Nakon opterećenja vage, fini regulator omogućuje precizno podešavanje tlaka. Po završetku mjerenja ispusni ventil služi za odzračivanje sustava.



Slika 21 Ručni regulator tlaka MPC1

7.1.2. TERMINAL PG7000

Upravljački terminal opremljen je ekranom i tipkovnicom te omogućuje upravljanje svim funkcijama tlačne vage i nadzor njenog rada. Njegove funkcije uključuju prikaz okolišnih parametara (temperatura, tlak zraka, relativna vlažnost) i parametara rada vage (brzina vrtnje i pozicija klipa), pohranu podataka o klipno-cilindričnom sklopu i setu utega, izračun tlaka i mase uz zadane korekcije te indikaciju kada je sustav spreman za očitavanje. [7]



Slika 22 Terminal PG 7000

7.1.3. Set utega

Set utega mase 35 kg sastoji se od osnovnog utega, dodatka i 13 utega mase od 100 g do 5 kg.



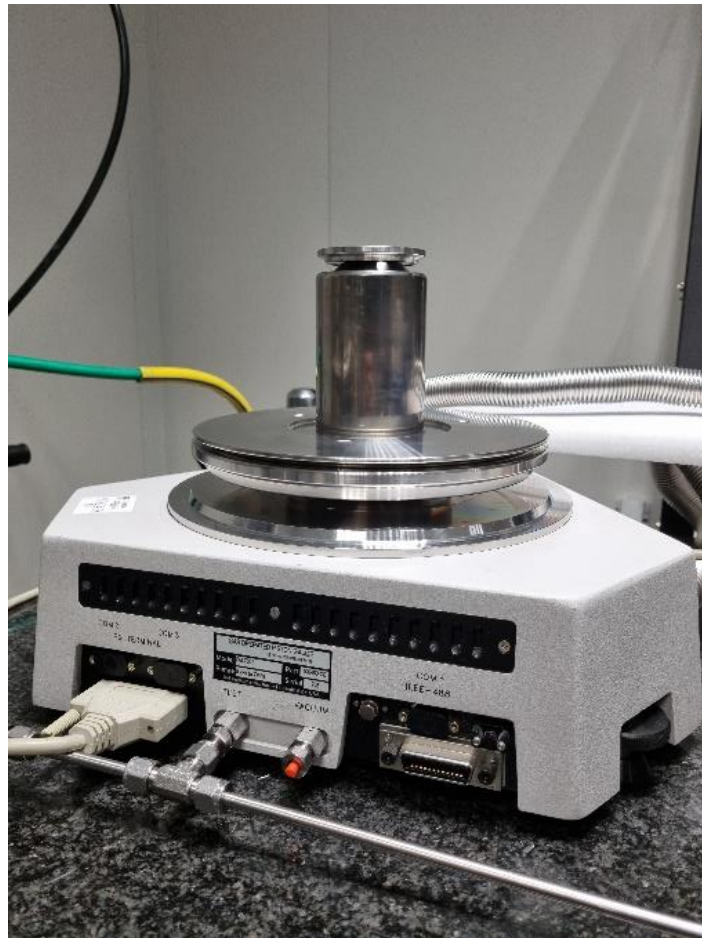
Slika 23 Set utega

Mase i ostale karakteristike utega dane su tablicom [9]:

Tablica 2 Karakteristike utega

	Oznaka na utegu	Masa utega [g]	Nesigurnost mase [g]	Nominalni tlak [bar]	Gustoća utega [kg/m ³]	Nesigurnost gustoće [kg/m ³]
	o.u.	499,9964	0,1	0,05	10080	75
	dodatak	299,9886	0	0,03	7975	75
	dodatak	0	0	0	7975	75
originalni utezi	1	100,0021	0,0004	0,01	7975	75
	2	200,0037	0,0006	0,02	7975	75
	3	199,99	0,0006	0,02	7975	75
	4	499,9912	0,0015	0,05	7975	75
	5	1000,0051	0,0025	0,1	7975	75
	6	2000,0128	0,0058	0,2	7975	75
	7	2000,0153	0,0046	0,2	7975	75
	8	4500,0207	0,0067	0,45	7975	75
	9	5000,0259	0,0089	0,5	7975	75
	10	5000,0251	0,0086	0,5	7975	75
	11	5000,0213	0,0072	0,5	7975	75
	12	5000,0322	0,0077	0,5	7975	75
	13	5000,0242	0,009	0,5	7975	75

7.1.4. Nosač utega

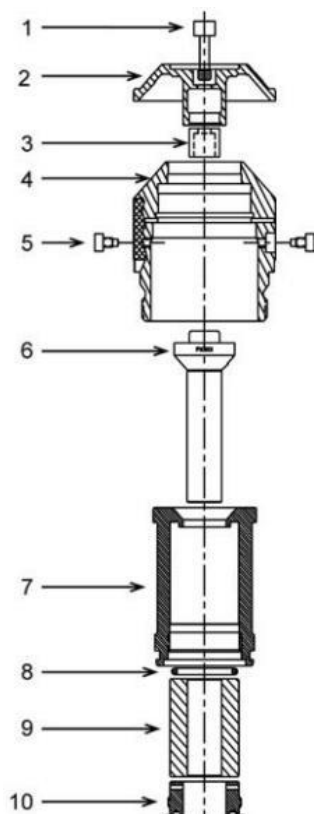


Slika 24 Nosač utega

7.1.5. Sklop klip-cilindar

Sklop je jednostavne izvedbe i izađen je od sljedećih komponenti:

1. Glave
2. Poklopac glave
3. Dodatna masa za prilagodbu
4. Kućište sklopa
5. Pričvrtni vijci
6. Glava klipa
7. Rukavac cilindra
8. O-ring
9. Cilindar
10. Matica rukavca



Slika 25 Sklop klip-cilindar

Podaci o etalonu koji su nam potrebni za daljnji proračun su sljedeći [9]:

Tablica 3 Podaci o etalonu

Podaci o etalonu (iz umjernice)	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost (k=2)
Efektivna površina	A_0	9,80E-04	m ²	0
Koeficijent distorzije	l	4,200000E-07	bar ⁻¹	0
Volumen za koji se radi korekcija	v	3,20E-05	m ³	0,5
Ubrzanje sile teže za LPM	g	9,806622	m/s ²	0
Opseg klipa	G	1,11E-01	m	0
Koeficijent temp.ekspanzije	$\alpha_{\rho+c}$	9,00E-06	°C ⁻¹	0

7.2. Pretvornik i kalibrator tlaka Druck DPI 515

DPI 515 je kompaktan pretvornik tlaka koji kombinira naprednu mjernu i regulacijsku tehnologiju. Zahvaljujući višeprocorskom sustavu, sofisticiranom softveru i velikom ekranu, uređaj je jednostavan za korištenje i održavanje. To je prvi pretvornik tlaka s automatskom kompenzacijom regulacijskog ventila, što omogućuje stabilan rad u različitim tlačnim sustavima tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Opremljen je silikonskim senzorom i digitalnom kompenzacijom te omogućuje visoko precizna umjeravanja u širokom rasponu tlakova. Visoka rezolucija postiže se pomoću samokalibrirajuće elektronike i ekrana koji može prikazati rezultate sa sedam znamenaka. [10]

DPI 515 može raditi u dva načina: mjerenje tlaka (Measure mode) i generiranje tlaka (Control mode). Ove funkcije dostupne su u dva neovisna mjerna područja, do 2 bar i do 135 bar, pri čemu svako ima zaseban ulaz i izlaz. Korisnik može odabrati bilo koja dva tlaka unutar ponuđenog raspona (od 70 mbar do 210 bar), bez obzira na razmak između njih. U načinu mjerenja, sustav koji se ispituje spaja se na ulazni ventil pretvornika, dok je izlazni ventil otvoren prema okolišu i aktivira se samo kada je potrebno isprazniti sustav. U načinu generiranja tlaka, pretvornik je povezan s izvorom radnog medija, a željeni tlak se postavlja putem tipkovnice. Sustav automatski regulira ulazne i izlazne ventile kako bi postigao zadanu vrijednost tlaka, uz mogućnost podešavanja brzine postizanja tlaka. [10]

DPI 515 nudi dodatne funkcije, poput testiranja sklopki tlačnih ventila (Pressure switch test), detekcije propuštanja sustava (Leak test) te programiranja rutinskih postupaka za optimizaciju rada i smanjenje pogrešaka. Rezultati mjerenja mogu se prikazati na LCD ekranu u 24 različite jedinice. Također, sučelje podržava šest jezika, uključujući engleski, njemački, španjolski i francuski. [10]

Točnost mu je:

- 0,01 % cijele skale za raspon tlakova između 0,7 i 210 bar
- 0,03 % cijele skale za raspon tlakova ispod 0,7 bar [10]



Slika 26 Pretvornik tlaka Druck DPI 515 – donji uređaj sa slike

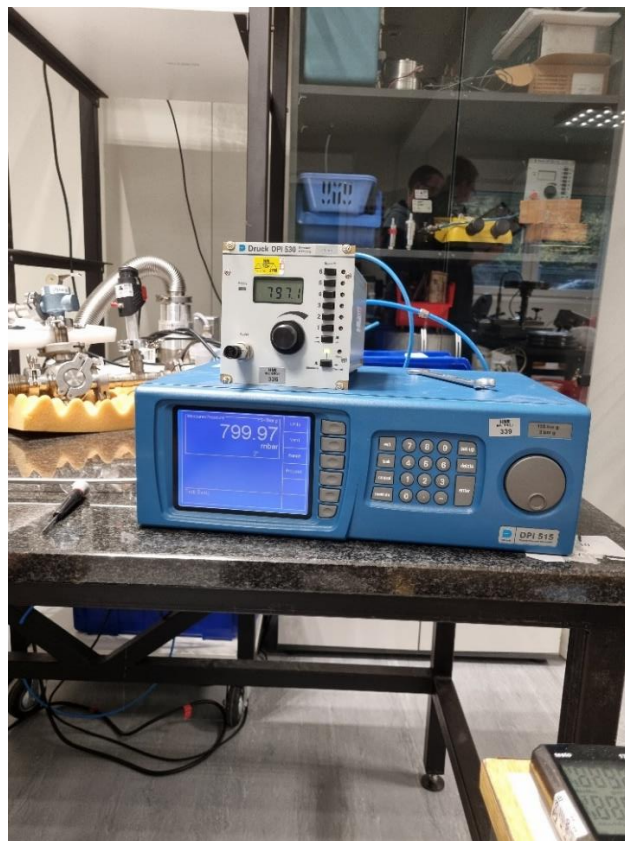
7.3. Regulator tlaka Druck DPI 530

Druck DPI 530 je brzi, digitalni pneumatski regulator tlaka zatvorene petlje, dizajniran za preciznu kontrolu tlaka u različitim primjenama, uključujući kalibraciju, ispitivanje nepropusnosti i opću pneumatsku regulaciju. Uređaj je smješten u Euro sub-rack modulu visine 3U, što omogućuje jednostavnu integraciju u laboratorijske ili industrijske sustave. [11]

Ključne značajke DPI 530: [12]

- Raspon tlaka: Dostupan u rasponima do 300 psi (20 bara), pokrivajući širok spektar primjena.
- Stabilnost kontrole: Postiže stabilnost kontrole od 0,01% pune skale, osiguravajući visoku preciznost u regulaciji tlaka.
- Preciznost: Preciznost od 0,1% pune skale omogućuje pouzdana mjerenja u zahtjevnim uvjetima.
- Načini kontrole: Omogućuje ručnu i automatsku kontrolu tlaka, prilagođavajući se različitim potrebama korisnika.
- Zaslom: Opremljen 4,5-znamenkastim LCD zaslonom koji prikazuje postavljenu ili izmjerenu vrijednost u šest odabranih jedinica tlaka, olakšavajući praćenje i podešavanje parametara.
- Kompatibilnost: Može se koristiti samostalno ili u kombinaciji s visokopreciznim pokazivačima tlaka, poput Druck DPI 605R, za poboljšanu točnost mjerenja.

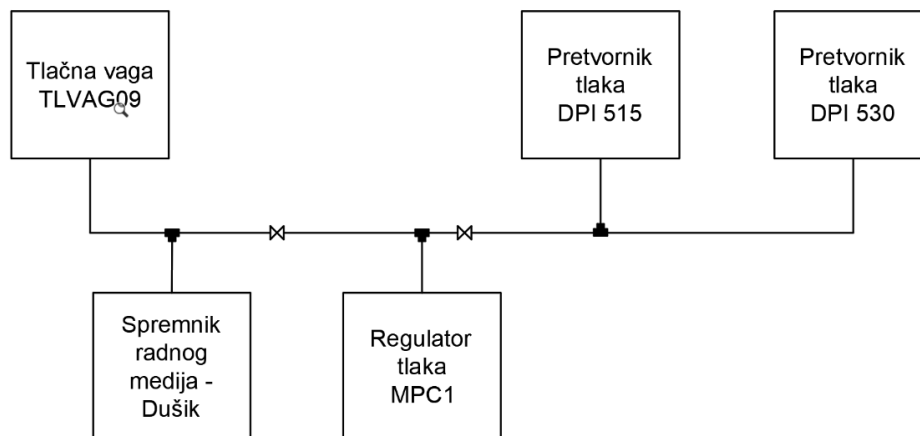
DPI 530 pruža ekonomično rješenje za aplikacije koje zahtijevaju stabilan izvor tlaka, a njegova brza odzivnost i jednostavnost korištenja čine ga pogodnim za laboratorijsku i industrijsku upotrebu [12]



Slika 27 Pretvornik tlaka Druck DPI 530 – gornji uređaj na slici

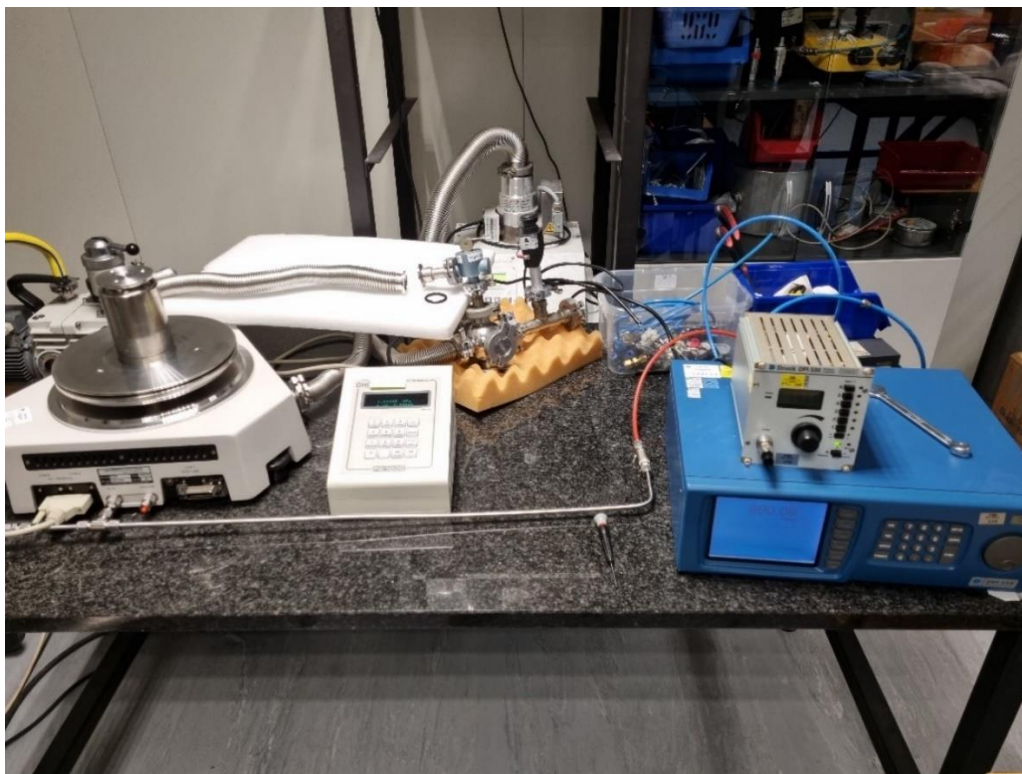
7.4. Shema spajanja

Sve navedene komponente povezane su setom cijevi, a postavljen je T-komad pomoću kojeg se može paralelno umjeravati jedan i drugi uređaj s etalonskim.



Slika 28 Shema spajanja

U stvarnosti je to izgledalo ovako:



Slika 29 Mjerna linija

8. Proračun efektivnog tlaka

Navedeni proračun izveden je iz početne jednadžbe za tlak.

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Kako bismo došli do što točnijeg rezultata, potrebno je uvesti određene korekcije. One se odnose na površinu, silu i na tlak okoline.

8.1. Korekcija površine

$$A_{ef} = A_0(20; 0) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\vartheta - 20^\circ\text{C})] * (1 + \lambda * p_{ef}) \quad (2)$$

A_0 – efektivna površina pri 20°C i nultom tlaku, koju daje proizvođač... [m²]

α_p – koeficijent temperaturne ekspanzije klipa... [°C⁻¹]

α_c – koeficijent temperaturne ekspanzije cilindra... [°C⁻¹]

ϑ – temperatura sklopa za vrijeme ispitivanja... [°C]

λ – koeficijent distorzije... [bar⁻¹]

p_{ef} – efektivni iznos tlaka generiran u sklopu... [bar]

8.2. Korekcija sile

$$F = [\sum_i [m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}}\right) + (hA_0 - V) * (\rho_f - \rho_a)] * g * \cos\Theta + \Gamma * c \quad (3)$$

m_i – masa utega postavljenog u sklop... [kg]

ρ_i – gustoća zraka okoline... [kg/m³]

ρ_{m_i} - gustoća utega [kg/m³]

h - razlika u visini između ispitivanog i etalonskog uređaja... [m]

V - volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida... [m³]

ρ_f - gustoća radnog medija... [kg/m³]

g - iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja... [m/s²]

Θ - kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu... [°]

Γ - opseg klipa... [m]

c - površinska napetost radnog medija... [N/m]

8.3. Efektivni tlak

Uvrštavanjem jednadžbi (2) i (3) u jednadžbu (1) dobivamo izraz za efektivni tlak. U ovom slučaju možemo uvesti dodatna postavljenja. Ona su da je zanemarena uzgonska sila i površinska napetost radnog medija jer je kao radni medij korišten dušik čija je gustoća vrlo slična gustoći zraka pri

atmosferskome tlaku. Također je zanemaren i kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalnu, budući da je os klipa bila paralelna s vertikalom te nije bilo razlike u visinama između umjeravanoga mjerila i etalona ili je ona bila zanemariva.

Primjenjivanjem navedenih pojednostavljenja dolazimo do sljedeće jednadžbe:

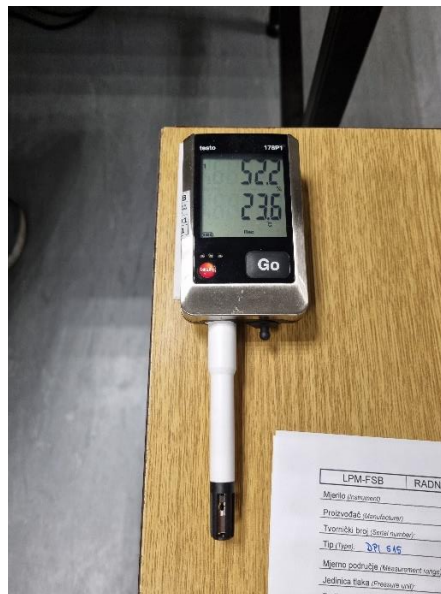
$$p_e = \frac{\left[\sum_i \left[m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}} \right) \right] \right] * g}{A_0(20;0) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\vartheta - 20^\circ\text{C})] * (1 + \lambda * p_e \alpha)} \quad (4)$$

8.4. Okolišni uvjeti prilikom umjeravanja

Prije početka mjerenja, mjerilom apsolutnog tlaka, temperature i vlažnosti zraka određeni su okolišni uvjeti u LPM-u prilikom umjeravanja.

Tablica 4 Okolišnji uvjeti

Temperatura zraka (°C)	23±1
Relativna vlažnost (%)	52±3
Tlak zraka (hPa)	1009±1



Slika 30 Okolišni uvjeti očitani s mjerila apsolutnog tlaka, temperature i vlažnosti zraka

Gravitacijska konstanta za LPM iznosi:

$$g = 9,806622 \text{ m/s}^2$$

Gustoća zraka izračunata pomoću očitanih okolišnjih uvjeta:

$$\rho_a = \frac{0,34848 * \rho_0 - 0,009024 * RH * e^{0,0612 * \vartheta_0}}{273,15 + \vartheta_0} = 1,181 \text{ [kg/m}^3 \text{]} \quad (5)$$

RH - relativna vlažnost zraka... [%]

p_0 - tlak zraka okoline... [mbar]

ϑ_0 - temperatura okoline... [°C]

8.5. Proračun efektivnog tlaka

Budući da su sva četiri slijeda rađena s istim utezima u nepromijenjenim uvjetima možemo zaključiti da će isto tako i proračunati efektivni tlak biti jednak za sve mase. Dakle, efektivni tlak je proračunat u 9 mjernih točaka, a one su:

Tablica 5 mjerne točke

Mjerne točke	Tlak [mbar]
1	0
2	400
3	800
4	1000
5	1200
6	1400
7	1600
8	1800
9	2000

Navedene mjerne točke postignute se sljedećim kombinacijama utega:

Tablica 6 Kombinacija utega korištena prilikom umjeravanja

Mjerna točka	kombinacija utega
1	-
2	o.u.+dodatak+2+5+6
3	o.u.+dodatak+2+6+9
4	o.u.+dodatak+2+6+7+9
5	o.u.+dodatak+2+5+9+10
6	o.u.+dodatak+2+5+6+9+10
7	o.u.+dodatak+2+9+10+11
8	o.u.+dodatak+2+6+9+10+11
9	o.u.+dodatak+2+6+7+9+10+11

Pojedinosti o svakom utegu navedenom u tablici 6 možemo iščitati iz tablice 2

Proračun efektivnog tlaka izveden je pomoću „Microsoft Excela“, a dobiveni rezultati nalaze se u tablici:

Tablica 7 efektivni tlak

Mjerna točka	efektivna sila [N]	Efektivna površina [m ²]	efektivni tlak [mbar]
1	0	9.80526×10^{-4}	0
2	39,23	9.80526×10^{-4}	400,11
3	78,46	9.80526×10^{-4}	800,23
4	98,08	9.80526×10^{-4}	1000,29
5	117,69	9.80527×10^{-4}	1200,35
6	137,31	9.80527×10^{-4}	1400,40
7	156,92	9.80527×10^{-4}	1600,46
8	176,54	9.80527×10^{-4}	1800,52
9	196,16	9.80527×10^{-4}	2000,58

9. Procjena mjerne nesigurnosti

9.1. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost predstavlja veličinu koja se pridodaje rezultatu mjerenja kako bi se osigurala njegova točnost i cjelovitost. Bez nje, rezultati mjerenja ne bi bili potpuno pouzdani. Definira se kao rasipanje vrijednosti koje se vežu uz izmjerenu veličinu, odražavajući razinu sumnje u točnost rezultata. Da bi se mjerna nesigurnost mogla kvantificirati, potrebno ju je opisati pomoću dva ključna parametra:

- Interval nesigurnosti, koji određuje širinu područja unutar kojeg se očekuje da se stvarna vrijednost nalazi
- Razina pouzdanosti, koja izražava vjerojatnost da stvarna vrijednost leži unutar tog intervala

Mjerna nesigurnost proizlazi iz različitih izvora pogrešaka koje nastaju tijekom mjerenja, a koje je potrebno uzeti u obzir prilikom procjene rezultata. Najčešći uzroci nesigurnosti uključuju:

- Odabranu metodu mjerenja, njena pojednostavljenja i pretpostavke
- Utjecaj okolišnih čimbenika poput temperature i vlažnosti
- Pristranost i vještinu osobe koja provodi mjerenje
- Nereprezentativno uzorkovanje
- Nepravilnosti mjernih instrumenata (npr. šum, trošenje)
- Nesigurnost samih mjernih uređaja
- Pouzdanost referentnih etalona i mjernih sustava (sljedivost)
- Prirodne karakteristike mjerene veličine, poput slabe ponovljivosti, nestabilnosti i oscilacija

Metode procjene mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost može se procijeniti na dva osnovna načina:

1. Procjena tipa A – temelji se na statističkoj analizi podataka dobivenih ponovljenim mjerenjima
2. Procjena tipa B – temelji se na podacima iz drugih izvora, poput proizvođačkih specifikacija, prijašnjih mjerenja i stručnih procjena

U praksi se često koriste obje metode kako bi se dobila što preciznija procjena nesigurnosti.

9.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A

Mjerna nesigurnost tipa A temelji se na statističkoj obradi rezultata višestrukih ponavljanja mjerenja iste veličine. U ovoj metodi, nesigurnost se procjenjuje izračunom srednje vrijednosti i standardne devijacije podataka. [13]

Matematički izrazi koji se koriste uključuju:

- Eksperimentalna standardna devijacija pojedinačnih mjerenja:

- $$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{i,k}$$

- Eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti:

$$s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

- Eksperimentalno standardno odstupanje od vrijednosti:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{N}}$$

9.3. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B

Mjerna nesigurnost tipa B temelji se na prethodno poznatim podacima iz vanjskih izvora, kao što su:

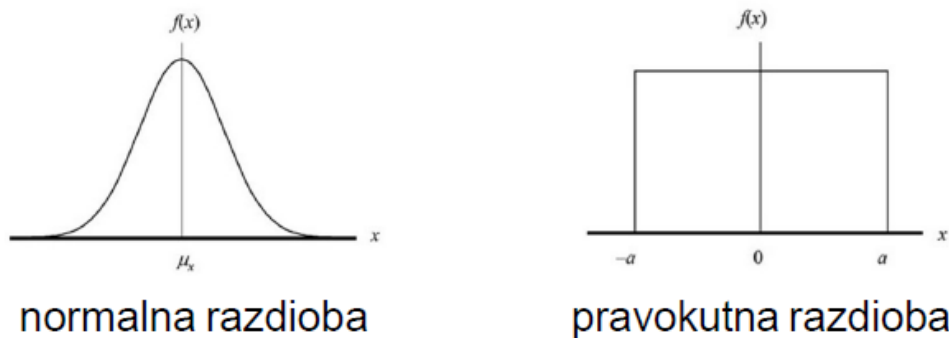
- Kalibracijski certifikati i umjerenice
- Tehničke specifikacije proizvođača
- Upute za uporabu mjernih instrumenata
- Prethodna iskustva i stručna procjena

U slučajevima kada je mjerna nesigurnost već izražena kao proširena nesigurnost, potrebno ju je podijeliti s faktorom pokrivanja kako bi se dobila standardna nesigurnost. Ova metoda zahtijeva manje računске obrade, ali se oslanja na pouzdanost dostupnih referentnih podataka.

Ako se pretpostavlja da nesigurnost proizlazi iz pravokutne razdiobe podataka, standardna nesigurnost računa se pomoću izraza [13]:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

gdje je a širina intervala unutar kojeg se očekuje da se nalazi stvarna vrijednost.



Slika 31 Razdioba nesigurnosti

10. Rezultati umjeravanja

Umjeravanje je izvršeno prema DKD-R 6-1 metodi A koja je prethodno opisana u točki 6.2. Za ovaj proces odabrano je 9 radnih točaka koje se ponavljaju u dvije uzlazne i u dvije silazne serije. Metoda je slikovno predočena na slici 6.1. Budući da moramo umjeravati dva mjerila ukupno ćemo morati zapisati 72 točke koje ćemo kasnije analizirati. Radne točke raspoređene su tako da ravnomjerno pokrivaju interval od 0 do 2000 mbar. Točna pozicija svake točke navedena je u tablici 5.

Postupak umjeravanja započeo je vanjskom i funkcionalnom provjerom sustava (pobliže objašnjeno u točki).

Zatim smo spojili sve komponente sustava u jednu cjelinu i preko ručnog regulatora MPC1 napunili sustav.

Kako norma nalaže, sustav je prvo potrebno predopteretiti kako bismo izbjegli moguća odstupanja u kasnijim serijama mjerenja. Predopterećenje vrši se postavljanjem svih utega na tlačnu vagu tri puta i zadržavanjem na maksimalnoj vrijednosti 30 sekundi. Zatim je potrebno mjerila pustiti minutu da se stabiliziraju te ih nulirati nakon čega možemo započeti proces umjeravanja.

Postavljanjem odgovarajućih utega na etalonsku tlačnu vagu TLVAG09 postizemo željene radne točke na kojima očitavamo tlak. Ovaj postupak ponavljamo za oba umjeravana mjerila na sve četiri mjerne serije.

S obzirom na specifičnu kombinaciju utega korištenih za postizanje tlaka u pojedinim radnim točkama, možemo za njih izračunati odgovarajući efektivni tlak. Na kraju obrađujemo dobivene rezultate te ih prikazujemo tablično i grafički.

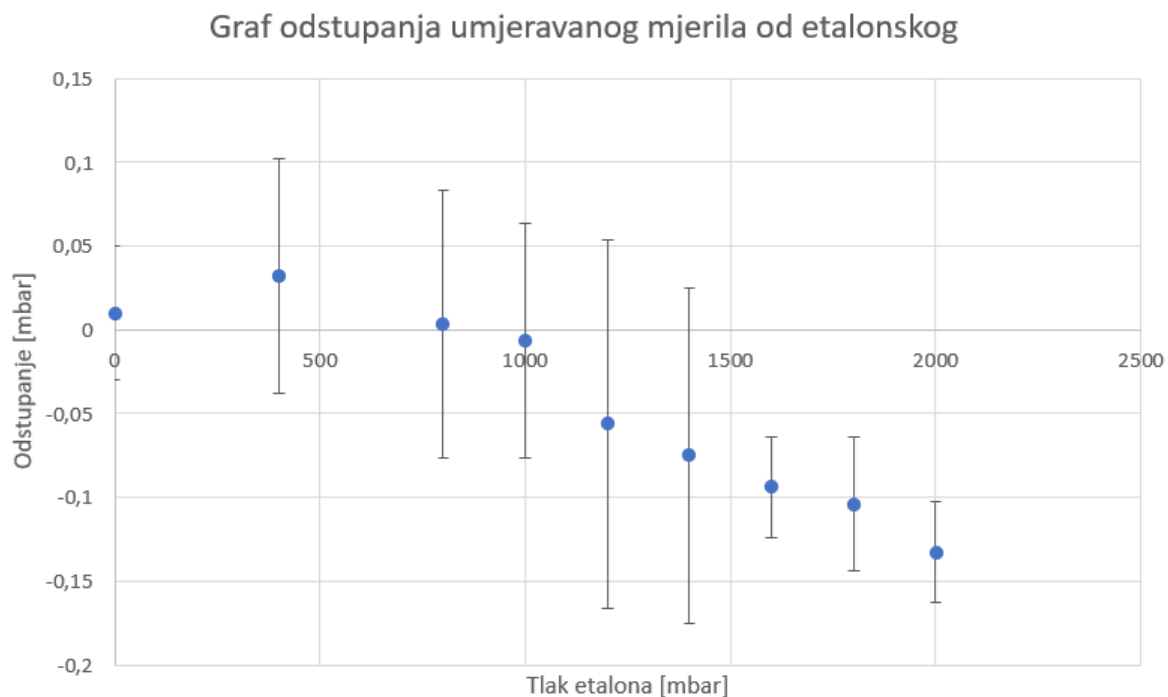
10.1. Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 515

Tablica 8 Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 515

Radna točka	Tlak etalona (mbar)	Tlak umjeravanog uređaja (mbar)			
		$M1$	$M2$	$M3$	$M4$
	p				
1	0,000	0,00	0,00	0,00	0,04
2	399,998	399,99	400,08	399,99	400,04
3	799,997	799,97	800,06	799,94	800,01
4	999,997	999,96	1000,05	999,94	999,99
5	1199,996	1199,95	1200,01	1199,91	1199,97
6	1399,995	1399,93	1399,98	1399,90	1399,95
7	1599,994	1599,90	1599,92	1599,87	1599,91
8	1799,994	1799,88	1799,92	1799,86	1799,88
9	1999,993	1999,87	1999,87	1999,84	1999,84

Tablica 9 Izračunate vrijednosti prilikom umjeravanja regulatora DPI 515

BR.	Srednja vrijednost (mbar)	Mjerni odmak (mbar)	Histereza, h1 (mbar)	Histereza, h2 (mbar)	Srednja vrijednost histereze (mbar)	Ponovljivost, b1 (mbar)	Ponovljivost, b2 (mbar)	Srednja vrijednost ponovljivosti (mbar)	Nesigurnost umjeravanja (mbar)
	M_{sr}	$M_{sr} - p_e$	$M2 - M1$	$M4 - M3$	h_{sr}	$M3 - M1$	$M4 - M2$	b_{sr}	U
1	0,01	0,01	0	0,04	0,02	0	0,04	0,04	0,026
2	400,03	0,032	0,09	0,05	0,07	0	-0,04	0,04	0,052
3	800	0,003	0,09	0,07	0,08	-0,03	-0,05	0,05	0,071
4	999,99	-0,007	0,09	0,05	0,07	-0,02	-0,06	0,06	0,078
5	1199,94	-0,056	0,06	0,06	0,11	-0,04	-0,04	0,06	0,099
6	1399,92	-0,075	0,05	0,05	0,1	-0,03	-0,03	0,07	0,106
7	1599,9	-0,094	0,02	0,04	0,03	-0,03	-0,01	0,03	0,093
8	1799,89	-0,104	0,04	0,02	0,03	-0,02	-0,04	0,04	0,105
9	1999,86	-0,133	0	0	0	-0,03	-0,03	0,03	0,114



Slika 32 Graf prikaza odstupanja umjeravanog uređaja DPI 515

Nesigurnost navedena u tablici je proširena nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%

Po završetku umjeravanja na kućište instrumenta nalijepljena je umjerna oznaka 2-0056/24-11.

Također na idućoj stranici možemo vidjeti i službeni dokument potvrde o umjeravanju uređaja DPI 515 koji dokazuje cijelu priču.

Stranica 2 potvrde o umjeravanju 2-0056/24-11

**1. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:**

Vrsta mjerila:	regulator tlaka		
Mjerno područje:	0	2000	mbar
Razred točnosti:	0.01	%	
Dopušteno odstupanje:	0.20	mbar	
Podjela skale:	0.01	mbar	
Jedinica tlaka:	mbar		

2. Podaci o etalonu:

Naziv etalona:	Tlačna vaga "DHI"
Interna oznaka:	TLVAG-09
Nesigurnost etalona:	$0.5 \times 10^{-4} \times p$
Sljedivost:	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

3. Umjerna procedura:

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip A) proceduri.

4. Uvjeti umjeravanja:

Temperatura okoline:	(23±1) °C	Tlačni medij:	dušik
Tlak okoline:	(1009±1) mbar	Pozicija ispitivanog mjerila:	vodoravna
Relativna vlažnost okoline:	(52±1) %rv		

5. Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona P_e mbar	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost M mbar	Odstupanje M- P_e mbar	Ponovljivost b mbar	Histereza h mbar	Nesigurnost umjeravanja U mbar
		Uzlazno mbar	Silazno mbar	Uzlazno mbar	Silazno mbar					
1	0.000	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.010	0.040	0.020	0.026
2	399.998	399.99	400.08	399.99	400.04	400.03	0.032	0.040	0.070	0.052
3	799.997	799.97	800.06	799.94	800.01	800.00	0.003	0.050	0.080	0.071
4	999.997	999.96	1000.05	999.94	999.99	999.99	-0.007	0.060	0.070	0.078
5	1199.996	1199.85	1200.01	1199.91	1199.97	1199.94	-0.056	0.060	0.110	0.099
6	1399.995	1399.83	1399.98	1399.90	1399.95	1399.92	-0.075	0.070	0.100	0.106
7	1599.994	1599.90	1599.92	1599.87	1599.91	1599.90	-0.094	0.030	0.030	0.093
8	1799.994	1799.88	1799.92	1799.86	1799.88	1799.89	-0.104	0.040	0.030	0.105
9	1999.993	1999.87	1999.87	1999.84	1999.84	1999.86	-0.133	0.030	0.000	0.114

6. Mjerna nesigurnost:

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

7. Označavanje instrumenta:

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.

----- Kraj Potvrde o umjeravanju -----

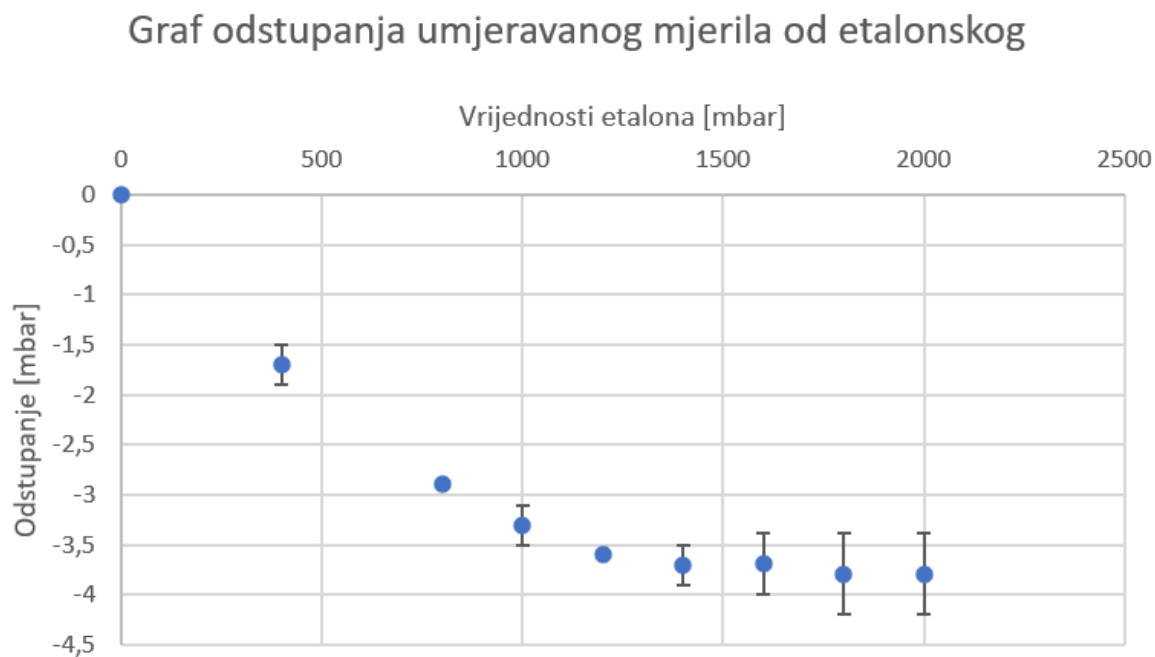
10.2. Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 530

Tablica 10 Rezultati umjeravanja regulatora tlaka DPI 530

Radna točka	Tlak etalona (mbar)	Tlak umjeravanog uređaja (mbar)			
		p_e	$M1$	$M2$	$M3$
1	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
2	400,00	398,3	398,3	398,2	398,3
3	800,00	797,1	797,1	797,1	797,1
4	1000,00	996,7	996,7	996,6	996,7
5	1200,00	1196,4	1196,4	1196,4	1196,4
6	1400,00	1396,3	1396,2	1396,3	1396,3
7	1599,99	1596,2	1596,4	1596,2	1596,3
8	1799,99	1796,1	1796,1	1796,3	1796,2
9	1999,99	1996,1	1996,1	1996,3	1996,3

Tablica 11 Izračunate vrijednosti prilikom umjeravanja regulatora tlaka DPI 530

BR.	Srednja vrijednost (mbar)	Mjerni odmak (mbar)	Histereza, h1 (mbar)	Histereza, h2 (mbar)	Srednja vrijednost histereze (mbar)	Ponovljivost, b1 (mbar)	Ponovljivost, b2 (mbar)	Srednja vrijednost ponovljivosti (mbar)	Nesigurnost umjeravanja (mbar)
	M_{sr}	$M_{sr} - p_e$	$M2 - M1$	$M4 - M3$	h_{sr}	$M3 - M1$	$M4 - M2$	b_{sr}	U
1	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
2	398,3	-1,70	0,00	0,10	0,05	-0,10	0,00	0,10	0,09
3	797,1	-2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
4	996,7	-3,30	0,00	0,10	0,05	-0,10	0,00	0,10	0,10
5	1196,4	-3,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
6	1396,3	-3,70	-0,10	0,00	0,05	0,00	0,10	0,10	0,12
7	1596,3	-3,69	0,20	0,10	0,15	0,00	-0,10	0,10	0,15
8	1796,2	-3,79	0,00	-0,10	0,05	0,2	0,10	0,20	0,17
9	1996,2	-3,79	0,00	0,00	0,00	0,2	0,20	0,20	0,17



Slika 33 Graf prikaza odstupanja umjeravanog uređaja DPI 530

Nesigurnost navedena u tablici je proširena nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%

Po završetku umjeravanja na kućište instrumenta nalijepljena je umjerna oznaka 2-0057/24-11.

Također na idućoj stranici možemo vidjeti i službeni dokument potvrde o umjeravanju uređaja DPI 530 koji dokazuje cijelu priču.

Stranica 2 potvrde o umjeravanju 2-0057/24-11

**1. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:**

Vrsta mjerila:	regulator tlaka		
Mjerno područje:	0	2000	mbar
Razred točnosti:	0.1	%	
Dopušteno odstupanje:	2.0	mbar	
Podjela skale:	0.1	mbar	
Jedinica tlaka:	mbar		

2. Podaci o etalonu:

Naziv etalona:	Tlačna vaga "DHI"
Interna oznaka:	TLVAG-09
Nesigurnost etalona:	$0.5 \times 10^{-4} \times p$
Sljedivost:	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

3. Umjerna procedura:

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip A) proceduri.

4. Uvjeti umjeravanja:

Temperatura okoline:	$(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$	Tlačni medij:	dušik
Tlak okoline:	$(1009 \pm 1) \text{ mbar}$	Pozicija ispitivanog mjerila:	vodoravna
Relativna vlažnost okoline:	$(52 \pm 1) \% \text{rv}$		

5. Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e mbar	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost M mbar	Odstupanje M- p_e mbar	Ponovljivost b mbar	Histereza h mbar	Nesigurnost umjeravanja U mbar
		Uzlazno mbar	Silazno mbar	Uzlazno mbar	Silazno mbar					
1	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.06	
2	400.00	398.3	398.3	398.2	398.3	398.3	-1.70	0.10	0.09	
3	800.00	797.1	797.1	797.1	797.1	797.1	-2.90	0.00	0.07	
4	1000.00	996.7	996.7	996.6	996.7	996.7	-3.30	0.10	0.10	
5	1200.00	1196.4	1196.4	1196.4	1196.4	1196.4	-3.60	0.00	0.09	
6	1400.00	1396.3	1396.2	1396.3	1396.3	1396.3	-3.70	0.10	0.12	
7	1599.99	1596.2	1596.4	1596.2	1596.3	1596.3	-3.69	0.10	0.15	
8	1799.99	1796.1	1796.1	1796.3	1796.2	1796.2	-3.79	0.20	0.17	
9	1999.99	1996.1	1996.1	1996.3	1996.3	1996.2	-3.79	0.20	0.17	

6. Mjerna nesigurnost:

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

7. Označavanje instrumenta:

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.

-----Kraj Potvrde o umjeravanju -----

11. Zaključak

Kroz ovaj rad dan je pregled povijesnog razvoja te fizikalnih osnova mjerenja tlaka s fokusom na principu rada tlačnih vaga. Također budući da su u procesu umjeravanja korišteni i pretvornici tlaka dan je pregled vrsta i opisana je njihova funkcionalnost.

Zatim je dan pregled teorijskih osnova potrebnih za ispitivanje i umjeravanje mjerila tlaka, uključujući standardne metode i tehničke preporuke. Na osnovu preporuka osmišljena je mjerna linija i projektiran je postupak umjeravanja. Umjeravanja su se vršila na temelju DKD-R 6-1 metode A.

Umjeravanja su izvršena u za to pogodnom okolišu, tj. u laboratorijskim stabilnim uvjetima. Kao etalon za proces umjeravanja odabrana je tlačna plinska vaga proizvođača DHI interne oznake TLVAG09. Tlak je generiran najboljom mogućom metodom za mjerenje tlaka u području do 350kPa. Umjeravana su dva regulatora tlaka DPI 515 i DPI 530.

Mjerna linija projektirana je i sastavljena od tlačne vage sa svim njoj pripradnim komponentama, dva regulatora tlaka, spreminka dušika kao izvornog tlaka te spojnim T-komadima koji su nam omogućili da istodobno mjerimo tlak i na pretvorniku tlaka DPI 515 i na DPI 530.

Na osnovu okolišnih uvjeta koji su u tom trenutku vladali u laboratoriju i utega koje su korišteni za generiranje tlaka proračunata je efektivna sila, efektivna površina i na kraju efektivni tlak. Budući da su okolišnji uvjeti ostali nepromijenjeni tokom čitavog procesa umjeravanja te vrijednosti su proračunate samo za prvi krug ponavljanja. Za ostale smo pretpostavili da su dobivene vrijednosti jednake. Iz rezultata je vidljivo da iako je efektivna sila rasla od 0 N do gotovo 200 N, promjene u efektivnoj površini su male. Vidljive su tek na devetoj decimali kvadratnoga metra. Efektivni tlak u skladu je sa očekivanim i ne odstupa značajno od tlaka etalona.

Na temelju tlaka etalona i tlaka umjerivanog uređaja u svakoj od devet mjernih točaka možemo proračunati histerezu ponovljivost te u konačnici nesigurnost umjeravanja. Dobiveni rezultati za DPI 515 pokazuju da je uređaj vrhunske točnosti i da su odstupanja u odnosu na etalon mala. U pravilu su njegova očitavanja bila nešto niža u odnosu na etalonska. Također iz rezultata je također jasno vidljivo da je uređaj DPI 530 lošije kvalitete. Kod većih tlakova pogreška mu je očitana na više od 3 Pa, ali to je i dalje unutar dopuštenih granica. Također kako je bilo i očekivano mjerna nesigurnost je manja koda DPI 515 nego DPI 530. Iz svega navedenog možemo zaključiti da je DPI 515 bolji instrument

Budući da su rezultati mjerenja za oba uređaja bili unutar dopuštenih granica, po završetku mjerenja na kućišta su im nalijepljene umjerne oznake.

Literatura

- [1] Galović, A.: Termodinamika I, Fakultet Strojarsstva i brodogradnje, Zagreb 2021.
- [2] Shaker, A.S.G.: An investigation and performance characterization of pressure balances as primary standards for pressure measurements, 2014.
- [3] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, The Institute of Measurement and Control, London, 1998.
- [4] EURAMET: Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers (EURAMET cg-17,v.01), 2007.
- [5] Deutscher Kalibrierdienst (DKD): Guideline DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges, Accreditation Body of the Deutscher Kalibrierdienst (DKD) at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt in co-operation with its Technical Committee „Pressure and Vacuum“, 2003.
- [6] Fluke, PG7601 Piston Gauge
- [7] Fluke, PG7000 Series Piston Gauges, Technical data
- [8] Fluke, PG7000 piston-cylinder modules summary of pressure measurement specifications
- [9] Umjernica za tlačnu vagu TLVAG09 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
- [10] DPI 515 Precision Pressure Controller/Calibrator User Manual, Druck Limited, 2005.
- [11] DPI 530 Precision Pressure Controller/Calibrator User Manual, Druck Limited, 2002.
- [12] AvionTEq, Druck DPI 530 specifications sheet, Leicester 2003.
- [13] Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (Mjerenja u energetici), D Zvizdić, LG Bermanec, FSB, Laboratorij za procesna mjerenja, Zagreb
- [14] LG Bermanec, M Katic, D Zvizdic: Characterization of gas pressure balances at LPM, Measurement, 2019., 136, 689-693