

# Projekt sustava za umjerenje mjerila tlaka s automatskom regulacijom

---

**Matas, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:376652>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Matas**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

## **Projekt sustava za umjeravanje mjerila tlaka s automatskom regulacijom**

Mentorica:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Student:

Ivan Matas

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentorici, izv. prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec, na pomoći, savjetima i podršci pri izradi ovog rada. Zahvalio bih se također i laborantu, gospodinu Jošku Zelku, na uputama i pomoći pri provedbi mjerenja.

Ivan Matas



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Matas** Mat. br.: 0035194633

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sustava za umjeravanje mjerila tlaka s automatskom regulacijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of pressure calibration system with automatic regulation**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati etalonski sustav za sljedivo umjeravanje mjerila tlaka korištenjem kalibratora tlaka visokog razreda točnosti (Druck DPI 515) kao etalona. Predvidjeti umjeravanje u režimu pretlak do 7 MPa metodom usporedbe. U radu koristiti dijelove postojeće mjerne opreme Laboratorija za procesna mjerenja te opisati umjerne protokole s prijedlogom pripadajućih mjernih listova.

Izraditi:

- Pregled fizikalnih osnova mjerenja tlaka.
- Pregled teorijskih podloga za ispitivanje i umjeravanje mjerila tlaka.
- Projektiranje i sastavljanje mjerne linije za umjeravanje mjerila tlaka u području od 0 do 7 MPa uz opis sheme spajanja ispitnog sustava sa pomoćnim uređajima.
- Proračun efektivnog tlaka na temelju rezultata umjeravanja tlačnom vagom.
- Opis postupka umjeravanja.
- Primjere u obliku rezultata umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

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

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

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA .....	5
SAŽETAK.....	6
1. UVOD.....	7
2. TLAK.....	8
2.1 Definicija tlaka .....	8
2.2 Mjerenje tlaka .....	8
2.3 Metode mjerenja tlaka .....	9
3. TLAČNE VAGE .....	11
3.1 Općenito o tlačnim vagama .....	11
3.2 Tlačna vaga DHI PG 7000.....	12
3.2.1 Općenito.....	12
3.2.2 Model PC 7100/7600-200.....	13
4. PRETVORNICI TLAKA .....	21
4.1 Općenito o pretvornicima tlaka .....	21
4.1.1 Kapacitivni pretvornici tlaka .....	21
4.1.2 Otpornički pretvornici tlaka.....	22
4.1.3 Piezoelektrični pretvornici tlaka .....	23
4.2 Pretvornik i kalibrator tlaka Druck DPI 515 .....	23
4.2.1 Opis i funkcije.....	23
4.2.2 Tehničke specifikacije .....	25
5. UMJERAVANJE PRETVORNIKA I KALIBRATORA TLAKA DRUCK DPI 515 .....	27
5.1 Osnovni pojmovi .....	27
5.1.1 Umjeravanje.....	27
5.1.2 Sljedivost .....	27
5.1.3 Mjerni etalon.....	27

---

5.2 Upute za umjeravanje pretvornika tlaka .....	28
5.2.1 Referentni i radni mjerni etalon .....	28
5.2.2 Zahtjevi na uređaj koji se umjerava .....	28
5.2.3 Okolišni uvjeti .....	29
5.2.4 Metode umjeravanja .....	29
5.3 Postupak umjeravanja.....	31
5.4 Izračun efektivnog tlaka tlačne vage .....	36
5.4.1 Prikaz izračunatih efektivnih tlakova za sve točke umjeravanja .....	38
5.5 Rezultati umjeravanja pretvornika tlaka DPI 515 .....	39
6. UMJERAVANJE KALIBRATORA TLAKA DRUCK DPI 615 .....	42
6.1 Općeniti podaci o kalibratoru tlaka Druck DPI 615 .....	42
6.1.1 Izvedba DPI 615 PC .....	42
6.1.2 Tehničke specifikacije .....	43
6.2 Postupak umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615 .....	45
6.3 Rezultati umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615 .....	48
7. ZAKLJUČAK .....	51
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	53

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Prikaz tlakova u odnosu na različite referentne vrijednosti .....	9
Slika 2.2 Podjela metoda mjerenja .....	10
Slika 3.1 Shema tlačne vage.....	11
Slika 3.2 Ručni regulator tlaka MPC1 .....	14
Slika 3.3 Terminal .....	14
Slika 3.4 Set utega.....	16
Slika 3.5 Platforma tlačne vage s nosačem utega.....	16
Slika 3.6 Presjek dijelova sklopa klip-cilindar .....	19
Slika 3.7 Presjek sklopa klip-cilindar .....	20
Slika 4.1 Kapacitivni pretvornik tlaka.....	22
Slika 4.2 Shema otporničkog pretvornika tlaka .....	22
Slika 4.3 Shema piezoelektričnog pretvornika tlaka .....	23
Slika 4.4 Pretvornik tlaka DPI 515 u načinu mjerenja tlaka .....	24
Slika 4.5 DPI 515 u načinu generiranja tlaka .....	25
Slika 5.1 Grafički prikaz metode A.....	31
Slika 5.2 Detalj Z sa slike 5.1.....	31
Slika 5.3 Linija za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515 .....	33
Slika 5.4 Shema linije za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515.....	33
Slika 5.5 Dijagramski prikaz rezultata umjeravanja prevornika tlaka DPI 515.....	41
Slika 6.1 Kalibrator tlaka DPI 615 u načinu mjerenja tlaka.....	43
Slika 6.2 Grafički prikaz metode B.....	46
Slika 6.3 Linija za umjeravanje kalibratora tlaka DPI 615 .....	47
Slika 6.4 Shema linije za umjeravanje kalibratora tlaka DPI 615.....	47



## POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Uvjeti okoliša pri umjeravanju .....	15
Tablica 3.2 Podaci o masama .....	15
Tablica 3.3 Podaci o etalonu .....	20
Tablica 5.1 Metode umjeravanja .....	30
Tablica 5.2 Odabrane mjerne točke.....	34
Tablica 5.3 Kombinacije utega.....	37
Tablica 5.4 Izračunati efektivni tlakovi.....	38
Tablica 5.5 Rezultati umjeravanja pretvornika tlaka DPI 515 .....	40
Tablica 6.1 Rezultati umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615 .....	48

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$p$	[Pa]	tlak
$F_n$	[N]	normalna sila na površinu
$A$	[m <sup>2</sup> ]	površina
$w$	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup> ]	specifična težina
$h$	[m]	razlika u visini
$m$	[kg]	masa
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	ubrzanje sile teže
$A_{ef}$	[m <sup>2</sup> ]	efektivna površina pri efektivnom tlaku
$A_0(20;0)$	[m <sup>2</sup> ]	efektivna površina pri 20 °C i nultom tlaku
$\alpha_p$	[°C <sup>-1</sup> ]	koeficijent temperaturne ekspanzije klipa
$\alpha_c$	[°C <sup>-1</sup> ]	koeficijent temperaturne ekspanzije cilindra
$\lambda$	[Pa <sup>-1</sup> ]	koeficijent distorzije
$V$	[m <sup>3</sup> ]	volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida
$\Gamma$	[m]	opseg klipa
$p_{ef}$	[Pa]	efektivni tlak
$\vartheta$	[°C]	temperatura sklopa pri ispitivanju
$\rho_a$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća zraka okoline
$\rho_{mi}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća i-tog utega stavljenog na sklop
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	gustoća radnog medija
$m_i$	[kg]	masa i-tog utega stavljenog na sklop
$\theta$	[°]	kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalnu
$c$	[N/m]	površinska napetost radnog medija

## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je projektiranje sustava tj. mjerne linije za umjeravanje mjerila tlaka te po mogućnosti automatizacija cijelog procesa. Za tu svrhu koristit će se pretvornik i kalibrator tlaka visoke točnosti, Druck DPI 515, koji će se umjeriti pomoću plinske tlačne vage PG 7000 i koji će dalje služiti kao generator tlaka u sustavu.

Najprije se prolazi kroz teorijske osnove mjerenja tlaka te se upoznaje sa načinom funkcioniranja opreme koja će se koristiti, pogotovo pretvornika tlaka DPI 515, koji će biti središnja jedinica sustava za umjeravanje. Također se detaljno upoznaje s postupkom umjeravanja prema Priručniku DKD-R 6-1, kako bi se uspješno moglo izvršiti umjeravanje.

Nakon teorijskog dijela, prelazi se na laboratorijski rad. U Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a najprije će se sastaviti linija za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515 pomoću tlačne vage PG 7000 u mjernom području do 70 bar, kako bi se on kasnije mogao koristiti kao etalon za umjeravanje drugih uređaja. Nakon umjeravanja tog pretvornika i obrade rezultata, sastavlja se nova linija za umjeravanje, koja koristi pretvornik DPI 515 kao etalon, a umjeravani uređaj je kalibrator tlaka, Druck DPI 615. Umjeravanje će se također vršiti u mjernom području do 70 bar.

Tako sastavljena mjerna linija moći će se koristiti za umjeravanje drugih pretvornika tlaka, a postoji i mogućnost automatizacije cijelog procesa jer se pretvornik tlaka DPI 515 može programirati da sam generira unaprijed zadane tlakove.

Ključne riječi: umjeravanje, pretvornik, mjerenje, tlak

## 1. UVOD

Mjerenje različitih veličina ima vrlo važnu ulogu u današnjem svijetu te se potreba za nekom vrstom mjerenja javlja u gotovo svim područjima ljudskog djelovanja, od trgovine, preko medicine i meteorologije do različitih grana industrije. Razvoj i ostvarivanje tehničkih sustava je nemoguće bez mjerenja i to u svim fazama počevši od konstrukcije pa sve do kontrole. Najmodernija tehnologija zahtijeva veliku točnost mjerenja, a za to su nam potrebni pouzdani instrumenti. Objektivnost i pouzdanost mjerenja osigurava se pravilnim odabirom metode mjerenja i ispravnim rukovanjem mjernim uređajem, koji mora biti redovito umjeravan uz pomoć etalona.

Mjerenje tlaka u industrijske svrhe započelo je s Industrijskom revolucijom u kojoj je bilo bitno mjeriti tlak vodene pare koja je pokretala parni stroj, kako bi se dobila što veća snaga. Od tada neprestano raste potreba za što točnijim mjerenjem u što većim rasponima tlakova. Neke od industrija u kojima se koriste uređaji za mjerenje tlaka su: nuklearna, farmaceutuska, energetska, poluvodička, optička, ventilacijska, zrakoplovna, automobilska itd. Mjerenjem tlaka osiguravamo određene parametre potrebne za izvođenje industrijskog procesa ili osiguravamo cijelo postrojenje od oštećenja koje može prouzročiti odstupanje tlaka od dozvoljene vrijednosti. Kako bi bili sigurni da su naša mjerenja što bliže stvarnoj vrijednosti, uređaje moramo redovno održavati i umjeravati. Umjeravanjem saznajemo pogrešku pokazivanja mjernog instrumenta i sljedivost prema međunarodnim i nacionalnim etalonima.

## 2. TLAK

### 2.1. Definicija tlaka

Tlak je, općenito, normalna sila koja djeluje na jedinicu površine sustava. U tekućinama i plinovima, tlak je posljedica kumulativnog djelovanja molekula fluida na stijenkama spremnika u kojem se nalaze. Formula kojom se opisuje veza između tlaka, sile i površine za ravnotežni fluid je:

$$p = \frac{dF_n}{dA} \quad (1)$$

Diferencijal površine  $dA$  je najmanja površina ploštine za koju su efekti fluida isti kao i u cijelom kontinuumu[1]. Sila je vektorska veličina, pa ima veličinu i smjer te u općenitom smislu možemo reći da postoje tri nezavisne komponente tlaka koje djeluju na površinu. Pošto se sva mjerila tlaka koriste za mjerenje tlaka u fluidu, tenzore naprezanja, koji bi se pojavili u krutim tijelima, možemo zanemariti. U mehanici fluida tlak je definiran formulom:

$$dp = -w \cdot dh \quad (2)$$

gdje je  $w$  oznaka za specifičnu težinu, a  $dh$  diferencijal visine. Sva osnovna mjerenja tlaka se zasnivaju na jednadžbama (1) i (2) [2].

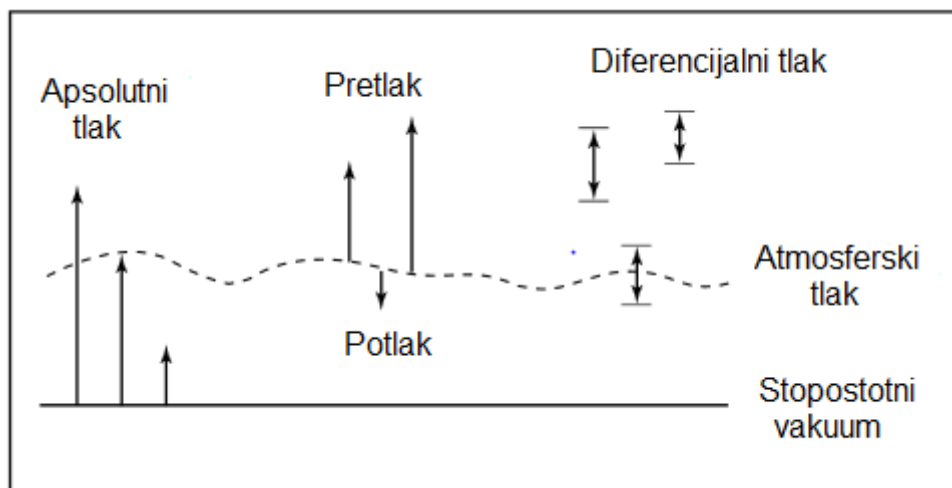
Mjerna jedinica za tlak u SI-sustavu je paskal [Pa], koji označava djelovanje sile od 1 N na površinu od  $1 \text{ m}^2$ . Uz paskal koristi se i jedinica bar [bar] [1].

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

### 2.2. Mjerenje tlaka

Uređaji za mjerenje tlaka rade tako da mjere tlak u odnosu na neki referentni tlak. Kada u nekom spremniku ne bi bilo ni jedne molekule fluida, tlak bi bio nula, odnosno govorili bi o stopostotnom vakuumu. Tlak, koji se mjeri na skali, koja koristi nultu vrijednost tlaka kao referentnu vrijednost, zovemo apsolutni tlak. Najčešće u inženjerskoj praksi koristimo atmosferski tlak od  $101325 \text{ Pa}$  kao referentnu vrijednost. Koliko je tlak u nekom

spremniku veći od atmosferskog, govori nam pretlak, a ukoliko je tlak u spremniku manji od atmosferskog, govorimo o potlaku. Referentna vrijednost ne mora nužno biti nula ili atmosferski tlak. Ako koristimo neku drugu vrijednost kao referentnu govorimo o diferencijalnom tlaku. Odnos navedenih tlakova je prikazan na slici 2.1 [3].



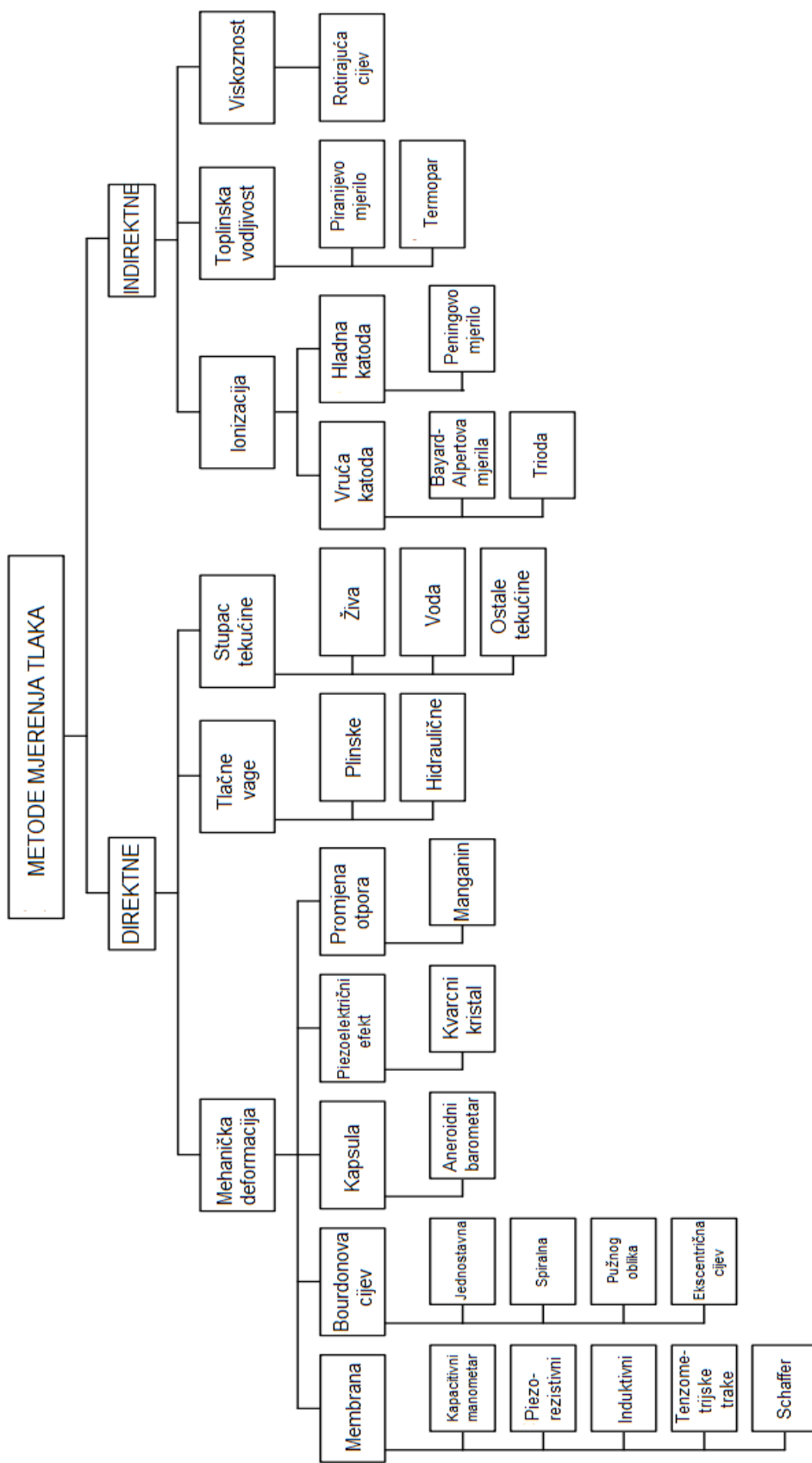
Slika 2.1 Prikaz tlakova u odnosu na različite referentne vrijednosti

### 2.3. Metode mjerenja tlaka

Tlak se može mjeriti različitim metodama koje se zasnivaju na različitim principima. Metode mjerenja tlaka zasnivaju se na sljedećim principima:

- 1) Djelovanje sile na poznatu površinu
- 2) Stupac tekućine
- 3) Mehanička deformacija
- 4) Fizikalna svojstva

Na principu djelovanja sile na poznatu površinu zasnivaju se plinske i uljne tlačne vage. Kod mjerenja tlaka pomoću stupca tekućina najčešće se koriste živa i voda. Na principu mehaničke deformacije zasnivaju se mjerenja pomoću Bourdonove cijevi, membrane, kapsule i piezoelektričnog efekta[2]. Kad se radi o jako malim tlakovima, mehanička deformacija je praktički nezamjetna te se tlak tada mjeri tako da se mjeri neko fizikalno svojstvo fluida, koje ovisi o količini molekula u fluidu, kao što su ionizacija, toplinska vodljivost ili viskoznost. Jedna od mogućih podjela metoda mjerenja tlaka prikazana je na slici 2.2 [3].



Slika 2.2 Podjela metoda mjerenja tlaka

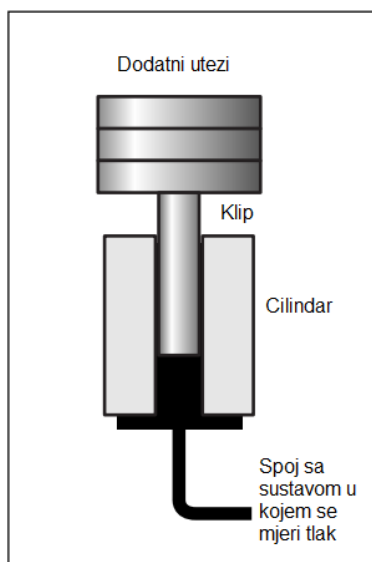
### 3. TLAČNE VAGE

#### 3.1. Općenito o tlačnim vagama

Tlačne vage su se počele koristiti prije otprilike 150 godina. To su bili razni uređaji na kojima se dobivao željeni tlak djelovanjem poznate sile na poznatu površinu. Razvoj tlačnih vaga bio je potican industrijskom primjenom parnih strojeva, kod kojih je bilo potrebno znati kako se ponašaju plinovi i tekućine pri različitim temperaturama i tlakovima[2]. Tlačne vage se danas koriste se za mjerenje tlaka između 3 kPa (plinske tlačne vage) i 1 GPa (uljne tlačne vage). Sastoje se od precizno izrađenog sklopa klip-cilindar i dodatnih utega, koji su spojeni na sustav u kojemu se mjeri tlak (slika 2.2). Računanje tlaka u sustavu zasniva se na osnovnoj jednadžbi (1):

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A_{ef}} \quad (3)$$

gdje je  $m$  masa cilindra, osnovnog i dodatnih utega,  $g$  lokalna gravitacijska konstanta, a  $A_{ef}$  efektivna površina, tj. površina fluida između klipa i cilindra. Ova jednadžba daje pretlak ako su klip i utezi okruženi zrakom pri atmosferskom tlaku. Ako sklop klip-cilindar i utege stavimo unutar vakuumske komore, onda tlačna vaga pokazuje apsolutni tlak[3].



Slika 3.1 Osnovna shema tlačne vage

Princip rada tlačne vage zasniva se na promjeni hidrostatskog tlaka. S donje strane klipa dovodi se fluid pod tlakom (najčešće dušik ili bijelo ulje), sve dok se ne postigne



dovoljna sila da podigne klip s utezima. Klip pritom rotira kako bi se eliminiralo trenje između klipa i cilindra. Kada klip slobodno rotira, vaga je u ravnoteži s tlakom u sustavu, te taj tlak možemo računati iz jednadžbe (3), uz dodatne korekcije[2]. Ako razmak između klipa i cilindra premali, klip neće slobodno rotirati i trenje će uzrokovati velike greške u rezultatima mjerenja. Ako je taj razmak prevelik, previše fluida će istjecati iz sustava što će uzrokovati pad tlaka u sustavu[3]. Prema tome glavni zahtjevi za sklop klip-cilindar su:

- Materijal mora imati mali koeficijent temperaturne ekspanzije i dobro podnositi naprezanja kako ne bi došlo do plastične deformacije ili klipa ili cilindra (najpogodniji materijali su čelik, volfram karbid i keramika)
- Završna obrada površina mora imati jako male tolerancije (mikronski nivo)
- Razmak između klipa i cilindra mora biti konstantan i između 0,5 i 1  $\mu\text{m}$ , da ne dođe do trenja [2]

## 3.2. Tlačna vaga DHI PG 7000

### 3.2.1 Općenito

U ovom projektu je, kao etalon za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515, korištena tlačna vaga DHI PG7000 tj. točnije njena izvedba PC7100/7600-200.

Tlačne vage su zbog svog principa rada i dugoročne stabilnosti nezamjenjivi alat za precizno mjerenje visokih tlakova. Tlačna vaga PG 7000 je razvijena u skladu sa sljedećim ciljevima:

- osigurati mogućnost preciznog mjerenja kako bi se ostvarili sve veći zahtjevi za točnošću
- uključiti u sustav automatsko praćenje okolišnih i radnih uvjeta, kako bi imali samostojeći sustav koji pokazuje ispravne vrijednosti tlaka s obzirom na okolišnje uvjete
- smanjiti što je više moguće utjecaj mjeritelja i time povećati dosljednost mjerenja

- poboljšati ergonomiju tlačne vage kako bi se njome lakše rukovalo i tako povećala produktivnost[4]

PG 7000 ima 3 osnovne verzije: uljna tlačna vaga, plinska tlačna vaga za mjerenje pretlaka i plinska tlačna vaga za mjerenje apsolutnog tlaka. Mijenjanjem sklopa klip-cilindar možemo mjeriti u različitim mjernim rasponima. Svaka verzija može biti opremljena automatskim ili ručnim regulatorom tlačnog medija koji dolazi s doljnje strane klipa, te integriranim terminalom kojim se upravlja svim funkcijama tlačne vage i koji mjeri radne i okolišne parametre (relativna vlažnost, temperatura i tlak zraka). Napajanje sustava se nalazi u sklopu terminala te je tako odvojeno od tlačne vage kako ne bi utjecalo na temperaturu sklopa klip-cilindar, a time i na rezultate mjerenja[4].

### 3.2.2 Model PC 7100/7600-200

U Laboratoriju za procesna mjerenja na FSB-u korišten je model tlačne vage PG7000 koji se sastoji od sljedećih komponenata:

- 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

#### RUČNI REGULATOR MPC1

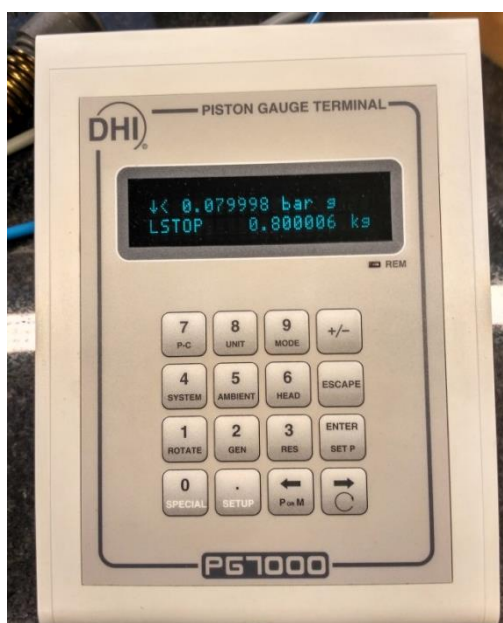
Ručni regulator MPC1, prikazan na slici 3.2, služi za kontroliranje koliko radnog medija želimo da uđe u sustav tlačne vage. Kada otvorimo dovodni ventil, radni medij ulazi u sustav i kada na pokazivaču vidimo da je ušla željena količina, zatavaramo sustav pritiskom na gumb. Kada opteretimo vagu, možemo finim regulatorom postići točno željeni tlak. Po završetku mjerenja postoji ispusni ventil za odzračivanje sustava.



Slika 3.2 Ručni regulator tlaka MPC1

### TERMINAL PG7000

Terminal za upravljanje (slika 3.3) je opremljen ekranom i tipkovnicom, te se pomoću njega upravlja svim funkcijama tlačne vage i nadzire njen rad. Neke od funkcija terminala su: prikaz okolišnih parametara (temperatura i tlak zraka, relativna vlažnost) i parametara rada tlačne vage (brzina vrtnje i pozicija klipa); pohrana podataka o sklopu klip cilindar i setu utega; računanje tlaka i mase uz zadane korekcije; indikacija mjeritelju kada je sustav pogodan za očitavanje[4].



Slika 3.3 Terminal

SET UTEGA

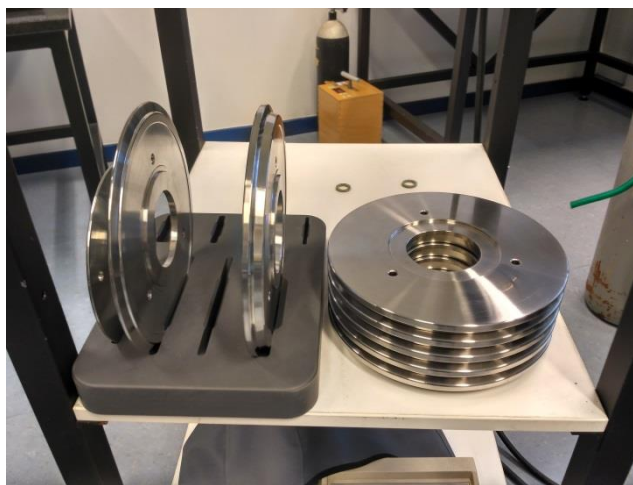
Set utega od 35 kg sastoji se od osnovnog utega, dodatka i 13 utega od 100 g do 5 kg. Umjeren je u Nacionalnom umjernom laboratoriju za masu i gustoću, u potpunosti u skladu s OIML R 111-1 metodom izravne usporedbe (ABBA). Mjerne nesigurnosti su procijenjene u skladu s ISO/IEC Guide 98-3 i EA-4/02, te su iskazane kao proširene mjerne nesigurnosti. One su dobivene množenjem standardne mjerne nesigurnosti s faktorom pokrivanja  $k=2$ , što odgovara razini povjerenja od 95 %. Podaci iz umjernice prikazani su u tablicama 3.1 i 3.2[5]. Set utega prikazan je na slici 3.4.

Tablica 3.1 Uvjeti okoliša pri umjeravanju

	od	do	Mjerna nesigurnost
<b>Tlak zraka [hPa]</b>	<b>1000,5</b>	<b>1012,1</b>	<b>±1,5</b>
<b>Temperatura zraka [°C]</b>	<b>21,5</b>	<b>22,3</b>	<b>±0,2</b>
<b>Relativna vlažnost [%]</b>	<b>49,4</b>	<b>54,5</b>	<b>±1,3</b>

Tablica 3.2 Podaci o masama

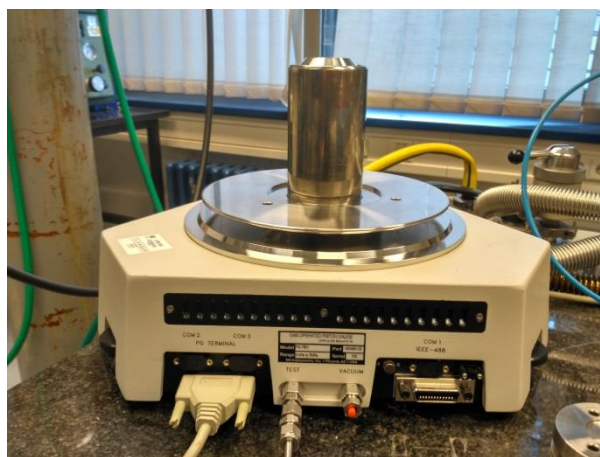
	Oznaka na utegu	Masa utega [g]	Nesigurnost mase [g]	Nominalni tlak [bar]	Gustoća utega [kg/m <sup>3</sup> ]	Nesigurnost gustoće [kg/m <sup>3</sup> ]
original utezi	o.u.	200,00350	0,1000	0,400	10080,0	75
	dodatak	300,00340	0,0000	0,600	7975,0	75
	dodatak	0,00000	0,0000	0,000	7975,0	75
	1	100,00330	0,0104	0,200	7975,0	75
	2	200,00330	0,0139	0,400	7975,0	75
	3	200,00580	0,0076	0,400	7975,0	75
	4	500,00580	0,0012	1,000	7975,0	75
	5	1000,00840	0,0089	2,001	7975,0	75
	6	2000,01950	0,0091	4,001	7975,0	75
	7	2000,02620	0,0142	4,001	7975,0	75
	8	4500,02540	0,0128	9,003	7975,0	75
	9	5000,04120	0,0100	10,003	7975,0	75
	10	5000,05370	0,0232	10,003	7975,0	75
	11	5000,00790	0,0115	10,003	7975,0	75
12	5000,03370	0,0091	10,003	7975,0	75	
13	5000,02370	0,0141	10,003	7975,0	75	



**Slika 3.4 Set utega**

### NOSAČ UTEGA

Sljedivost mase očuvana je putem osnovne jedinice kilogram (kg) preko referentnog seta utega R100 mjenjenog od strane Troemner Calibration Services, koji ostvaruju izravnu sljedivost prema National Institute of Standards and Technology (NIST)[6]. Slika 3.5 prikazuje nosač utega na platformi.



**Slika 3.5 Platforma tlačne vage s nosačem utega**

### SKLOP KLIP-CILINDAR

Sljedivost tlaka ostvarena je kroz osnovne jedinice mase [kg] i dužine [m], te izvedene jedinice za akceleraciju uslijed gravitacije [ $m/s^2$ ]. Sljedivost površine je ostvarena preko Fluke-ovog umjernog slijeda za klip-cilindar iz 2010. godine prema National Institute of

Standards and Technology (NIST), SAD; Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Njemačka i Laboratoire National D'Essais (LNE), Francuska. Lokalna vrijednost gravitacije je određena prema procjeni od strane National Geodetic Survey[6].

Uvjeti umjeravanja su bili:

- 4 sata je bilo dopušteno za stabilizaciju temperature instrumenta
- temperatura zraka: 21-25 °C
- relativna vlažnost: 10-70 %
- tlak zraka: 96-100 kPa
- radni medij: dušik

Efektivna površina sklopa klip-cilindar tlačne vage PC7100/7600-200 je određena „crossfloat“ metodom usporedbe s laboratorijskim radnim etalom, te pri 20 °C i nultom opterećenju iznosi:

$$A(20;0) = 49.018918 \text{ mm}^2$$

gdje je:

$$A(\vartheta; p) = A_0(20; 0) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \cdot (1 + \lambda \cdot p)$$

uz:

$$(\alpha_p + \alpha_c) = (9 \cdot 10^{-6})^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\lambda = -2,35 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$$

$(\alpha_p + \alpha_c)$  – koeficijent temperaturne ekspanzije

$\lambda$  – koeficijent distorzije

Koristeći gornje izraze i vrijednosti, efektivna površina se može izračunati za radne tlakove i temperature s nesigurnošću od  $\pm 16,0$  ppm[6].

Ovaj sklop klip-cilindar se može koristiti za mjerenje tlakova u rasponu od 40 do 70000 kPa s mjernom nesigurnošću boljom od  $\pm(2 \text{ Pa} + 20 \text{ ppm})$ , temeljenoj na mjernim nesigurnostima opisanim u Technical Note 7920TN01, Revision D, June 2005[6].

Svi tehnički podaci o sklopu klip-cilindar iz umjernice[6]:

Oznaka sklopa:

- Serijski broj: 1768
- Model: PC-7100/7600-200
- Broj umjernice: 1500128773

Karakteristike sklopa klip-cilindar:

- Nominalni KN: 200 kPa/kg
- Koeficijent distorzije ( $\lambda$ ):  $-2,35 \cdot 10^{-6} \text{ Mpa}^{-1}$
- Koeficijent temperaturne ekspanzije:  $(9 \cdot 10^{-6}) \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Minimalni radni tlak (pretlak): 40 kPa (5,8 psi)
- Minimalni radni tlak (apsolutni): 100 kPa (14,5 psi)
- Maksimalni radni tlak (sa 50 kg utega): 10000 kPa (1500 psi)
- Mjerna nesigurnost tlaka:  $\pm(2 \text{ Pa} + 20 \text{ ppm})$
- Radni medij: dušik ( $\text{N}_2$ )
- Brzina propadanja (35 kg): 1mm/min
- Vrijeme plutanja (od +2,5 do -2,5 mm): 5 min
- Izmjerena brzina propadanja za opterećenje od 35 kg: 0,88 mm/min
- Referentna visina: dno klipa
- Smjer vrtnje: u smjeru kazaljke na satu
- Ograničenje brzine vrtnje:  $10\text{-}30 \text{ min}^{-1}$

Karakterisitke klipa:

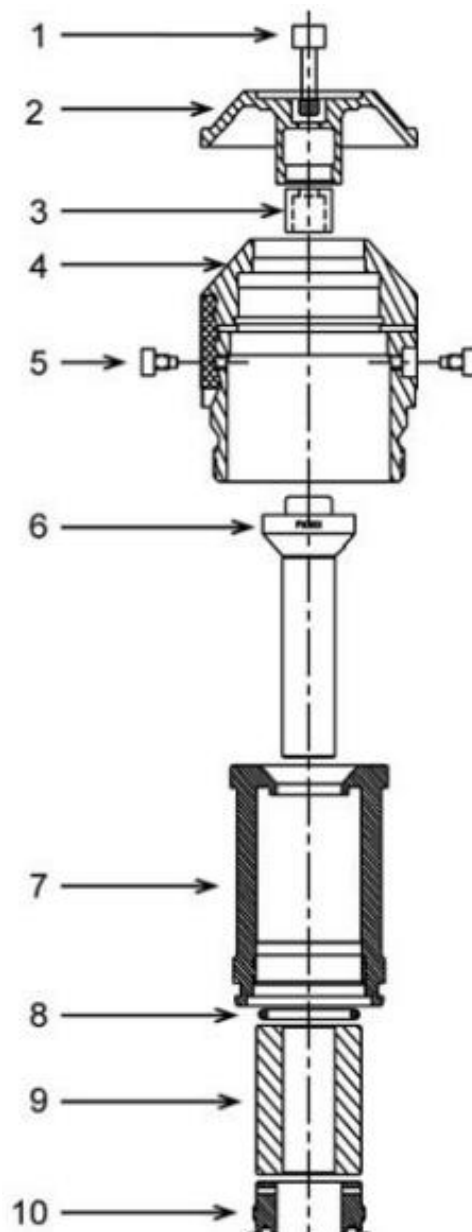
- Nominalni promjer: 7,9 mm
- Materijali: klip – volfram karbid  
glava – 304 L nehrđajući čelik  
poklopac – titan  
vijci i masa – 304 L nehrđajući čelik
- Ekvivalentna gustoća:  $8030 \text{ kg/m}^3$
- Linearni koeficijent temperaturne ekspanzije:  $(4,5 \cdot 10^{-6}) \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Youngov modul:  $6 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
- Poisson omjer: 0,22

Karakterisitke cilindra:

- Materijal: volfram karbid
- Linearni koeficijent temperaturne ekspanzije:  $(4,5 \cdot 10^{-6}) \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Youngov modul:  $6 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

- Poisson omjer: 0,22
- Konfiguracija: uvučena

Slika 3.6 prikazuje presjek dijelova sklopa klip cilindar: vijak za pritezanje poklopca glave (1), poklopac glave (2), dodatna masa za prilagodbu (3), kućište sklopa (4), pričvršni vijci (5), glava klipa (6), rukavac cilindra (7), O-ring (8), cilindar (9) i matica rukavca (10)[7].



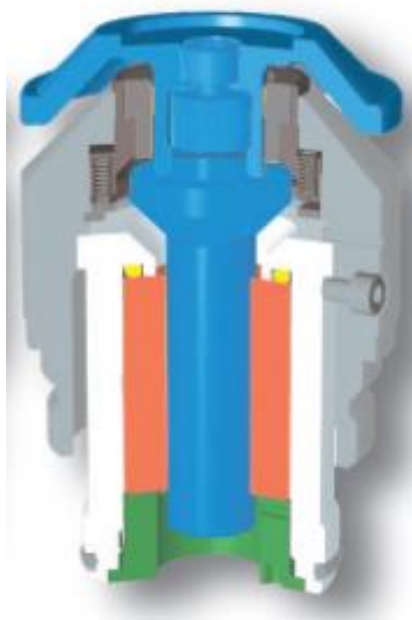
Slika 3.6 Presjek dijelova sklopa klip-cilindar



Tablica 3.3 prikazuje podatke o etalonu potrebne za daljnje umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515., a slika 3.7 prikazuje 3D-presjek sklopa klip-cilindar.

Tablica 3.3 Podaci o etalonu

Podaci o etalonu (iz umjernice)	Oznaka	Iznos	Jedinica	Nesigurnost (k=2)
Efektivna površina	$A(20;0)$	$4,901892 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^2$	$2,70 \cdot 10^{-8}$
Koeficijent distorzije	$\lambda$	$-2,350000 \cdot 10^{-7}$	$\text{bar}^{-1}$	0
Volumen za koji se radi korekcija	$V$	0,000000	$\text{m}^3$	0,5
Ubrzanje sile teže za LPM	$g$	9,806650	$\text{m/s}^2$	0,00002
Opseg klipa	$\Gamma$	$2,481285 \cdot 10^{-2}$	m	0
Koeficijent temp.ekspanzije	$\alpha_{p+c}$	$9,00 \cdot 10^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$



Slika 3.7 Presjek sklopa klip-cilindar

## 4. PRETVORNICI TLAKA

### 4.1. Općenito o pretvornicima tlaka

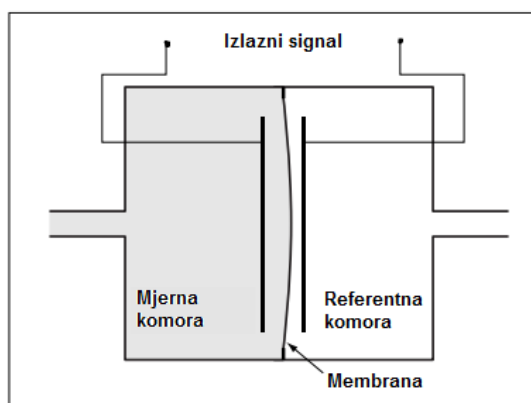
Pretvornici tlaka su uređaji za pretvaranje mjerenog tlaka u električni signal proporcionalan mjerenom tlaku. Ovisno u modelu pretvornika izlazni signal može biti: struja, napon ili frekvencija. Tlak narinut na pretvornik uzrokuje deformaciju mehaničkih osjetila unutar pretvornika, čiji se pomak od ravnotežnog stanja može mjeriti, a iskazuje se električnim signalom, najčešće u rasponu od 4 do 20 mA. Pretvornici tlaka se upotrebljavaju za sve raspone tlakova i sve režime mjerenja tlaka. Najčešće korišteni pretvornici tlaka su:

- 1) kapacitivni
- 2) otpornički (piezorezistivni)
- 3) piezoelektrični[2]

#### 4.1.1. Kapacitivni pretvornici tlaka

Kapacitivni pretvornici tlaka rade na principu promjene kapaciteta kondenzatora. Metalna membrana smještena je između statičkih pločica koje su spojene na izvor struje, čineći dva odvojena kondenzatora. I membrana i pločice su izolirane kako bi dielektrička svojstva ostala konstantna. Uslijed tlaka se membrana deformira i mijenja se kapacitet oba kondenzatora. Izvedba kapacitivnog pretvornika s simetrično postavljenim pločicama je prikazana na slici 4.1. U izvedbi sa slike pretvornik mjeri diferencijalni tlak, a ako je u referentnoj komori vakuum onda pretvornik mjeri apsolutni tlak[3].

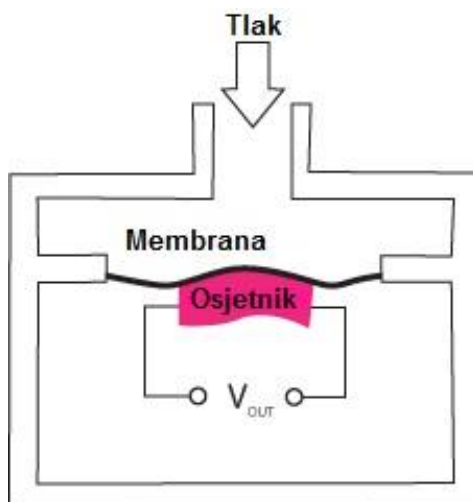
Ovi pretvornici se najčešće koriste za mjerenje tlaka u raspon od  $10^{-3}$  Pa do  $10^7$  Pa, te općenito imaju dobru ponovljivost, linearnost i rezoluciju. Također se mogu koristiti u širokom rasponu temperatura, ako im je elektronika odvojena od mjernog sklopa[3].



Slika 4.1 Kapacitivni pretvornik tlaka

#### 4.1.2. Otpornički pretvornici tlaka

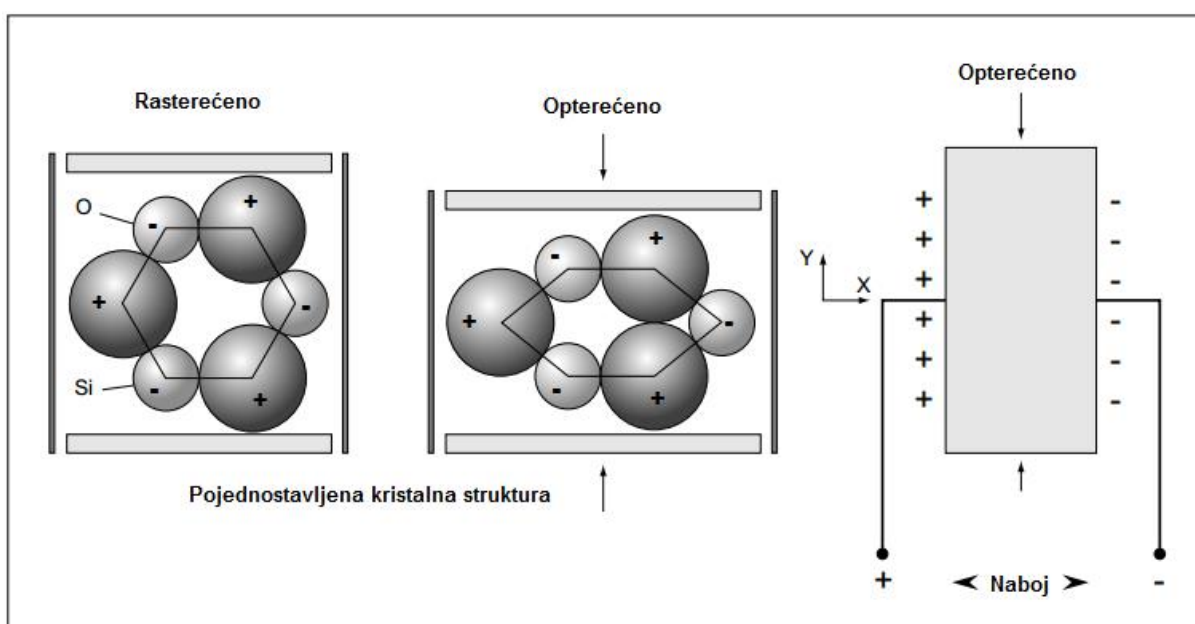
Princip rada otporničkih pretvornika tlaka se zasniva na promjeni otpora materijala uslijed tlačnog ili vlačnog naprezanja. Taj fenomen zove se piezo-otpornost i karakterističan je za većinu vodiča i poluvodiča. Kada je metalna žica vlačno opterećena, ona se produljuje i njen poprečni presjek se smanjuje što uzrokuje povećanje njenog otpora za iznos koji ovisi o geometriji i piezo-otpornosti materijala. Taj princip se primjenjuje kod pretvornika tlaka, tako što se uslijed narinutog tlaka membrana deformira, a s njom i osjetnik naprezanja čiji se otpor mijenja sukladno tome[3]. Na slici 4.2 je prikazana shema rada jednog otporničkog pretvornika tlaka.



Slika 4.2 Shema otporničkog pretvornika tlaka

### 4.1.3. Piezoelektrični pretvornici tlaka

Ovi pretvornici rade na principu piezoelektričnog efekta. To je pojava stvaranja električnog naboja, a time i napona, na površini posebno odrezanog kristala na kojeg djeluje tlačna sila. Stvoreno električno polje proporcionalno je narinutom tlaku. Najčešće se koristi kvarcni kristal, a još je moguće koristiti i neke vrste keramike. Piezoelektrični pretvornici imaju vrlo kratko vrijeme odziva, pa su pogodni za mjerenje dinamičkog tlaka visoke frekvencije. Na slici 4.3. prikazana je shema transverzalnog piezoelektričnog pretvornika tlaka, kod kojeg sila na materijal u smjeru y-osi stvara naboj u smjeru x-osi[3].



Slika 4.3 Shema piezoelektričnog pretvornika tlaka

## 4.2. Pretvornik i kalibrator tlaka Druck DPI 515

### 4.2.1. Opis i funkcije

DPI 515 kompaktan i funkcionalan pretvornik tlaka, s ugrađenom najsuvremenijom mjernom i regulacijskom tehnologijom. Više procesora, napredni softver i veliki ekran čine ga jednostavnim za korištenje i održavanje. Ovo je prvi pretvornik tlaka, koji nudi automatsku kompenzaciju regulacijskog ventila, što omogućuje pouzdan rad s različitim tlačnim sustavima tokom dužeg vremenskog perioda[8].

Ovaj pretvornik tlaka je opremljen silikonskim senzorom i digitalnom kompenzacijom, te je sposoban za umjeravanja visoke točnosti u širokom rasponu tlakova. Visoka rezolucija je ostvarena dobrim performansama, samo-kalibrirajućom elektronikom i ekranom sa mogućnošću prikaza 7 znamenaka rezultata[8].

DPI 515 može mjeriti (Measure mode) i generirati (Control mode) tlak. Obje funkcije se mogu izvoditi u dva mjerna područja: do 2 bar i do 135 bar. Oba raspona su potpuno nezavisna, sa zasebnim ulazima i izlazima. Ta dva mjerna područja odabrana su između sljedećih ponuđenih tlakova: 70, 200, 350, 700 mbar, 1, 2, 3,5, 7, 10, 20, 35, 70, 100, 135, 210 bar pretlaka. Bilo koja dva tlaka mogu se odabrati za mjerno područje, bez obzira na razmak među njima[8]. Slika 4.4 prikazuje pretvornik u funkciji mjerenja tlaka u rasponu do 135 bar.



**Slika 4.4 Pretvornik tlaka DPI 515 u načinu mjerenja tlaka**

Još neke od funkcija pretvornika su: mogućnost testiranja sklopki za otvaranje i zatavaranje tlačnih ventila (Pressure switch test), detektiranje propuštanja sustava (Leak test), mogućnost programiranja pretvornika za izvođenje rutinskih radnji i procedura, kako bi se uštedilo vrijeme i smanjile proceduralne greške[8].

Također uređaj nudi prikaz rezultata na LCD ekranu u 24 različite jedinice (psi, bar, mbar, Pa, hPa, kPa, MPa, kgf/cm<sup>2</sup>, kgf/m<sup>2</sup>, mmHg, cmHg, mHg, inHg, mmH<sub>2</sub>O, cmH<sub>2</sub>O, mH<sub>2</sub>O, inH<sub>2</sub>O<sup>20</sup>, inH<sub>2</sub>O<sup>04</sup>, inH<sub>2</sub>O<sup>60</sup>, ftH<sub>2</sub>O<sup>20</sup>, ftH<sub>2</sub>O<sup>04</sup>, lb/ft<sup>2</sup>, torr, atm) i sučelje na 6 različitim jezika (engleski, njemački, španjolski, talijanski, portugalski i francuski)[8].

Kada je uređaj u mjernom načinu (Measure mode), sustav u kojem mjerimo tlak spojen je na ulazni ventil pretvornika. Izlazni ventil je preko prigušnika otvoren prema okolišu, te se otvara tek kada želimo isprazniti sustav. Tlak u sustavu se očitava na ekranu pretvornika.

U načinu u kojem DPI 515 generira tlak (Control mode), uređaj je spojen na izvor radnog medija (boca s dušikom) preko ulaznog ventila, a na izlazni ventil je spojen neki uređaj kojeg želimo umjeravati. U uređaj putem tipkovnice unesemo koji tlak želimo generirati (Setpoint), a sustav automatskom regulacijom ulaznog i izlaznog ventila, postigne željeni tlak (Controlled pressure). Također se može namjestiti brzina postizanja željenog tlaka (Rate). Slika 4.5 prikazuje uređaj pri generiranju tlaka od 10 bar.



Slika 4.5 DPI 515 u načinu generiranja tlaka

#### 4.2.2. Tehničke specifikacije

##### RASPON TLAKOVA

- 70, 200, 350, 700 mbar, 1, 2, 3,5, 7, 10, 20, 35, 70, 100, 135, 210 bar pretlaka
- 1, 3, 5, 10, 15, 30, 50, 100, 300, 1000, 2000, 3000 psi pretlaka

##### PREOPTEREĆENJE

- 10 % iznad vršne vrijednosti tlaka (samo u mjernom načinu)

##### NAPAJANJE

- 90 – 260 V AC, 50 – 60 Hz
- Nazivna snaga: 60 VA

##### TEMPERATURA

- Radna: 5 – 50 °C
- Za vrijeme umjeravanja: 23 °C

- Za skladištenje: -20 – 60 °C

#### RADNI MEDIJ

- Čisti, suhi i nekorozivni plin; preporuča se zrak ili dušik
- Veličina čestica: manja od 20 mikrona
- Svi tragovi ulja i vlaga se moraju ukloniti

#### STABILNOST MJERENJA TLAKA

- 0,02 % od očitavanja godišnje za raspon tlaka između 35 i 350 mbar
- 0,01 % od očitavanja godišnje za raspon tlaka između 0,7 i 210 bar

#### STABILNOST GENERIRANJA TLAKA

- 0,7 - 70 bar: bolje od 0,001 % raspona
- Iznad 70 bar: bolje od 0,0015 % raspona
- Ispod 70 bar: bolje od 0,003 % raspona

#### VRIJEME ZAGRIJAVANJA

- 15 min

#### DIMENZIJE I TEŽINA

- Širina x visina x dužina: 390 x 132 x 300
- Cca. 9 kg

#### TOČNOST

- Pretpostavlja se redovito nuliranje uređaja i uključuje nelinearnosti, histerezu, ponovljivost i utjecaj temperature između 18 i 28 °C (dodatnih 0,004 % cijele skale za temperature između 10 i 45 °C)
- 0,01 % cijele skale za raspon tlakova između 0,7 i 210 bar
- 0,03 % cijele skale za raspon tlakova ispod 0,7 bar[8]

## **5. UMJERAVANJE PRETVORNIKA I KALIBRATORA TLAKA DRUCK DPI 515**

### **5.1. Osnovni pojmovi**

#### **5.1.1. Umjeravanje**

Umjeravanje je niz operacija kojima se, pod određenim uvjetima, uspostavlja veza između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti koje pokazuje etalon[2]. Svi mjerni instrumenti trebaju biti redovito umjeravani kako bi se mogla uočiti promjena njihovih svojstava[3].

Iako su parametri podešavanja određeni umjeravanjem, ne treba mješati ta dva pojma. Podešavanje ili ugađanje je mijenjanje svojstava uređaja kako bi njegovo pokazivanje bilo unutar određenih granica[3].

#### **5.1.2. Sljedivost**

Po definiciji, sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona, koje ga dovodi u vezu s navedenim referentnim etalonima (državnim ili međunarodnim) putem neprekinutih lanaca usporedbi s utvrđenim nesigurnostima[2].

Sljedivost daje pouzdanost rezultatima umjeravanja. Potrebno je da su mjerne nesigurnosti prilikom svake usporedbe u neprekinutom lancu, precizno izračunate, kako ne bi došlo do narušavanja sljedivosti. Međutim prilikom umjeravanja treba imati na umu da ako posjedujemo sljedivi uređaj, to ne podrazumijeva samo po sebi da će i naša mjerenja biti sljediva, jer trebamo uzeti u obzir svojstva etalona i stručnost osoblja, koje je obavljalo prijašnje usporedbe[3].

#### **5.1.3. Mjerni etalon**

Mjerni etalon je ostvarenje definicije pojedine veličine, s iskazanom vrijednošću veličine i pripadajućom mjernom nesigurnosti. Razlikujemo više vrsta etalona: državni, primarni, sekundarni, referentni, radni, prijenosni[9].



Primarni etalon je mjerni etalon koji je uspostavljen primarnim mjernim postupkom ili je stvoren kao predmet odabran dogovorom[9]. Smatra se da ima najveću mjeriteljsku kvalitetu, te služi za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima iste veličine.

Državni etalon je etalon koji je određen u nekoj državi za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima iste veličine.

Sekundarni etalon dobiven je usporedbom s primarnim etalom mjerene veličine, a referentni etalon je mjerni etalon najviše mjeriteljske kvalitete, koji služi za umjeravanje drugih uređaja na nekoj lokaciji ili u nekom poduzeću[3]

Radni etalon se koristi za redovito umjeravanje ili ovjeravanje mjerila ili mjernih sustava[9].

Prijenosni etalon je posebne konstrukcije te je namijenjen za prijenos na različite lokacije[9]

## **5.2. Upute za umjeravanje pretvornika tlaka**

Sva mjerila tlaka, osim tlačnih vaga, umjeravaju se metodom usporedbe. Europska udruga nacionalnih mjeriteljskih ustanova (EURAMET) predlaže sljedeće dvije upute za umjeravanje:

- EURAMET cg-17 (Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers)[10]
- DKD-R 6-1 (Calibration of Pressure Gauges)

Pretvornik i kalibrator tlaka Druck DPI 515 umjeren je po uputama iz Priručnika DKD-R 6-1 (Deutscher Kalibrierdienst).

### **5.2.1. Referentni i radni mjerni etalon**

Umjeravanje se izvodi direktnom usporedbom izmjerene vrijednosti tlaka sa vrijednošću referentnog ili radnog etalona, koji mora biti direktno ili indirektno sljediv prema državnom mjernom etalonu. Referentni etalon je u ovom slučaju tlačna vaga, a može biti i tekućinski manometar. Ti etaloni se redovito umjeravaju te se za njih izdaje umjernica, odnosno potvrda o umjeravanju u kojoj je navedena standardna mjerna nesigurnost u referentnim uvjetima (standardna gravitacijska konstanta i 20 °C). Ako se umjeravanje vrši u uvjetima koji nisu referentni, moramo uvesti određene korekcije u izračun. Preporuka je da

mjerna nesigurnost referentnog ili radnog etalona ne prelazi  $1/3$  očekivane mjerne nesigurnosti umjeravanog uređaja[11].

### 5.2.2. *Zahtjevi na uređaj koji se umjerava*

Umjeravanje provodimo pod pretpostavkom da umjeravani uređaj, u trenutku umjeravanja, radi u skladu s opće prihvaćenim pravilima tehnologije i u skladu s pojedinim

specifikacijama navedenim u tehničkoj dokumentaciji, danoj od strane proizvođača. Prije umjeravanja treba provesti vanjsku provjeru uređaja i testirati uređaj[11].

Vanjska provjera obuhvaća:

- vizualnu provjeru oštećenja
- provjeru čistoće uređaja
- vizualnu provjeru čitljivosti očitavanja
- provjera postojanja svih dokumenata potrebnih za umjeravanje (tehnička dokumentacija, upute za korištenje)

Testiranje uređaja obuhvaća:

- provjeru nepropusnosti cijevi
- provjeru električnih instalacija
- provjeru funkcije nuliranja sustava
- postavljanje elemenata mjerne linije u definirane položaje
- provjeru svih funkcija uređaja[11]

### 5.2.3. *Okolišni uvjeti*

Umjeravanje se smije provoditi tek nakon što se izjednače temperature okoliša i umjeravanog uređaja, a treba uzeti u obzir i vrijeme potrebno za zagrijavanje umjeravanog uređaja. Temperatura okoliša treba biti stabilna s odstupanjima od najviše 1 K; mora ležati u intervalu između 18 i 28 °C te ju je potrebno tokom umjeravanja evidentirati. Također, ako gustoća zraka utječe na rezultat mjerenja, treba osim temperature zraka evidentirati i atmosferski tlak i relativnu vlažnost zraka[11].

#### 5.2.4. Metode umjeravanja

Umjeravanje je potrebno izvesti odjednom, u jednom slijedu mjerenja, ako je to moguće. Točke mjerenja treba jednoliko raspodjeliti tako da pokrivaju cijelu mjernu skalu umjeravanog uređaja, te ovisno o očekivanoj mjernoj nesigurnosti treba provesti jedno ili više mjerenja. Također, treba uzeti u obzir i da li položaj instrumenata utječe na njihova pokazivanja. Usporedba između vrijednosti koje pokazuje umjeravani uređaj i vrijednosti koje

pokazuje referentni ili radni etalon može se provesti tako da se tlak podesi prema vrijednostima koje pokazuje etalon ili prema vrijednostima koje pokazuje umjeravani uređaj.

Trajanje predopterećenja na najvećoj vrijednosti treba i vrijeme između dva predopterećenja treba biti najmanje 30 sekundi. Nakon predopterećenja i nakon postizanja stacionarnog stanja, umjeravani uređaj treba nulirati. Vrijeme između dvije uzastopne mjerne točke, tj. vrijeme između dva unosa tlaka, mora biti jednako između svih točki i ne manje od 30 sekundi. Očitavanje na umjeravanom uređaju se treba očitati najranije 30 sekundi nakon promjena vrijednosti. Prema DKD-R 6-1 postoje 3 metode umjeravanja, čija su obilježja prikazana u tablici 5.1[11].

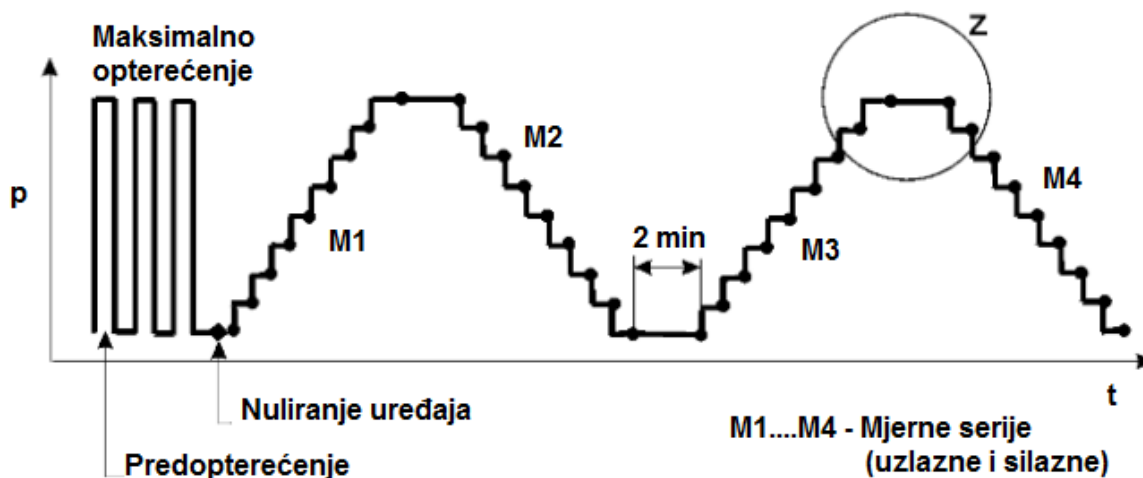
Tablica 5.1 Metode umjeravanja

Metoda umjeravanja	Očekivana mjerna nesigurnost (u % mjernog raspona) (*)	Broj mjernih točaka (uzlazno/silazno, uključujući nulu)	Broj predopterećenja	Vrijeme ostvarivanja tlaka (s) (**)	Vrijeme čekanja na gornjoj vrijednosti	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

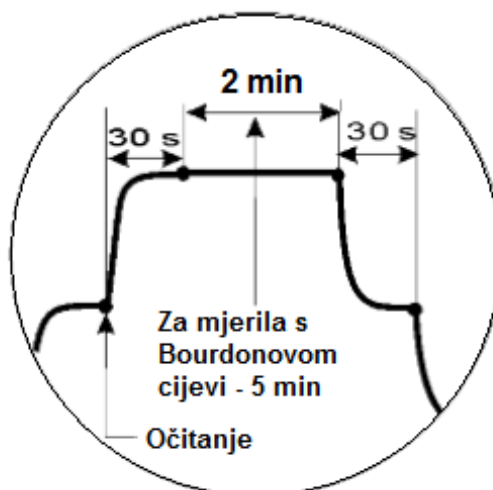
(\*) Podaci o točnosti od strane proizvođača se najčešće iskazuju kao postotak mjernog raspona, pa je i ovdje mjerni raspon uzet kao referentna vrijednost za odabir metode umjeravanja.

(\*\*) Prije očitavanja treba pričekati dok se vrijednosti očitavanja na etalonu i umjeravanom uređaju ne ustale[11].

Za projekt je odabrana metoda A, te je grafički prikazana na slici 3.1.



Slika 5.1 Grafički prikaz metode A



Slika 5.2 Detalj Z sa slike 4.1

### 5.3. Postupak umjeravanja

Kalibrator i pretvornik tlaka DPI 515 bilo je potrebno umjeriti kako bi se pomoću njega mogli umjeravati drugi uređaji tj. da bi on služio kao etalon. U našem projektu je, za umjeravanje, odabrana metoda A sa 9 točaka i sa 4 mjerne serije; dvije uzlazne i dvije silazne (kako je prikazano na slici 5.1). Ta metoda ima najviše mjerenja pa je time i najpreciznija. Mjerne točke su jednoliko raspoređene u rasponu od 0 do 70 bara, što je prikazano u tablici 5.2. Umjeravanje smo vršili pomoću tlačne vage PG 7000 (etalon), a kao radni medij koristili smo dušik visoke čistoće.

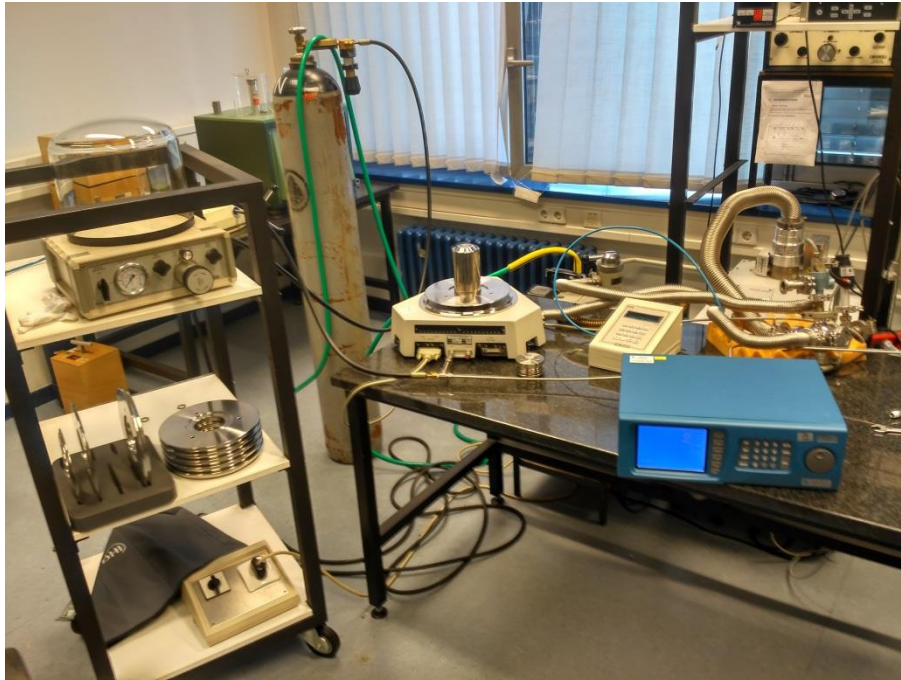
Procedura pripreme mjerne linije sastojala se od sljedećih koraka:

- 1) Rastavljanje i provjera čistoće sklopa klip-cilindar
- 2) Spajanje izvora radnog medija (boca s dušikom) s etalomom (tlačna vaga PG7000) te spajanje etalona s umjeravanim uređajem (DPI 515)
- 3) Puštanje radnog medija preko ručnog regulatora MPC1 u sustav za umjeravanje

Nakon pripreme je procedura umjeravanja obuhvaćala:

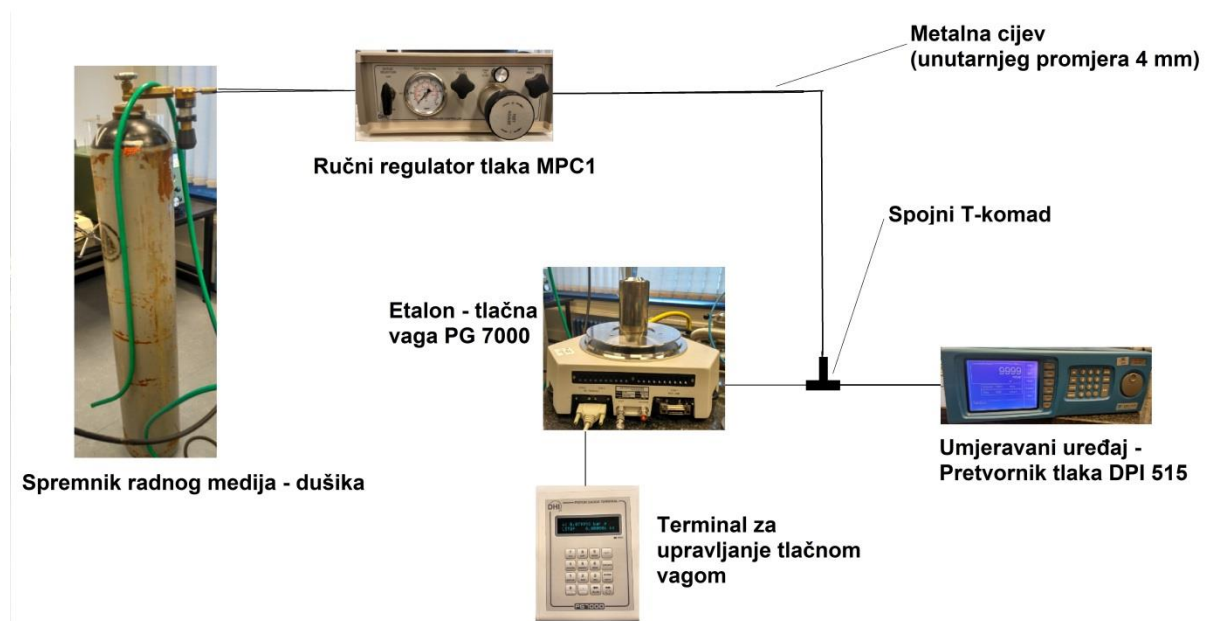
- 1) Tri puta maksimalno opterećenje sustava stavljanjem svih utega na tlačnu vagu
- 2) Postavljanje određene kombinacije utega na tlačnu vagu i očitavanje tlaka koji se ustali na pretvorniku tlak DPI 515
- 3) Ponavljanje prethodnog postupka za sve četiri mjerne serije (2 uzlazne i 2 silazne) i upisivanje podataka u tablicu
- 4) Računanje efektivnog tlaka tlačne vage za određenu kombinaciju utega pomoću Excel tablice
- 5) Računanje srednje vrijednosti, ponovljivosti, histereze, odstupanja, koeficijenta prijenosa i mjerne nesigurnosti
- 6) Prikaz rezultata umjeravanja u dijagramu

Slika 5.3 prikazuje liniju za umjeravanje u Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a, koja je korištena u ovom projektu za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515.



Slika 5.3 Linija za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515

Na slici 5.4 je shematski prikaz linije za umjeravanje.



Slika 5.4 Shema linije za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515

Tablica 5.2 Odabrane mjerne točke

<b>Mjerne točke</b>	<b>Tlak [mbar]</b>
<b>1</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>5000</b>
<b>3</b>	<b>10000</b>
<b>4</b>	<b>20000</b>
<b>5</b>	<b>30000</b>
<b>6</b>	<b>40000</b>
<b>7</b>	<b>50000</b>
<b>8</b>	<b>60000</b>
<b>9</b>	<b>70000</b>

U tablici 4.3 su prikazane sve kombinacije utega korištene na tlačnoj vagi za dobivanje odabranih mjernih točaka za umjeravanje pretvornika tlaka DPI 515.

Tablica 5.3 Kombinacije utega – nastavak na sljedećoj strani

Mjerni slijed	Broj mjernih točaka	Oznaka utega	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1 1	1 2	1 3	Provjera [mbar]
		Masa utega [kg]	0.1	0.2	0.2	0.5	1	2	2	4.5	5	5	5	5	5	
		Očitavanje na DPI 515 [mbar]														
M1	1	0,000														0,000
	2	5002						6								5001
	3	10003				4		6	7							10001
	4	20006				4		6	7		9					20002
	5	30009				4		6	7		9	10				30004
	6	40011				4		6	7		9	10	1 1			40005
	7	50014				4		6	7		9	10	1 1	1 2		50006
	8	60017				4		6	7		9	10	1 1	1 2	1 3	60008
	9	70018	1	2	3	4		6	7	8	9	10	1 1	1 2	1 3	70009
M2	10	70018	1	2	3	4		6	7	8	9	10	1 1	1 2	1 3	70009
	11	60016				4		6	7		9	10	1 1	1 2	1 3	60008
	12	50013				4		6	7		9	10	1 1	1 2		50006
	13	40010				4		6	7		9	10	1 1			40005
	14	30008				4		6	7		9	10				30004
	15	20005				4		6	7		9					20002
	16	10003				4		6	7							10001
	17	5001						6								5001
	18	0,000														0,000
M3	19	0,000														0,000
	20	5002						6								5001
	21	10003				4		6	7							10001
	22	20006				4		6	7		9					20002
	23	30009				4		6	7		9	10				30004
	24	40011				4		6	7		9	10	1 1			40005
	25	50013				4		6	7		9	10	1 1	1 2		50006



	26	60017				4		6	7		9	10	1 1	1 2	1 3	60008
	27	70019	1	2	3	4		6	7	8	9	10	1 1	1 2	1 3	70009
<b>M4</b>	28	70018	1	2	3	4		6	7	8	9	10	1 1	1 2	1 3	70009
	29	60016				4		6	7		9	10	1 1	1 2	1 3	60008
	30	50013				4		6	7		9	10	1 1	1 2		50006
	31	40010				4		6	7		9	10	1 1			40005
	32	30008				4		6	7		9	10				30004
	33	20005				4		6	7		9					20002
	34	10003				4		6	7							10001
	35	5001						6								5001
	36	0,000														0,000

#### 5.4. Izračun efektivnog tlaka tlačne vage

Proračun efektivnog tlaka se zasniva na osnovnoj jednadžbi tlaka (1), uzimajući u obzir bitne korekcije koje se odnose na:

- 1) površinu (temperaturno rastezanje klipa i cilindra te njihova elastična deformacija uslijed djelovanja tlaka)
- 2) silu (različito gravitacijsko ubrzanje, uzgonsko djelovanje zraka i radnog fluida, površinska napetost radnog fluida i razlika u visini stupca fluida)
- 3) tlak okoline (korekcije ovisne o režimu rada: pretlak ili apsolutni tlak)[2]

##### 1) KOREKCIJA POVRŠINE

Korekcija površine prikazana je jednadžbom (4):

$$A_{ef} = A_0(20; 0) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \cdot (1 + \lambda \cdot p_{ef}) \quad (4)$$

gdje je:

$A_0$  – efektivna površina pri 20 °C i nultom tlaku, koju daje proizvođač, [m<sup>2</sup>]

$\alpha_p$  – koeficijent temperaturne ekspanzije klipa, [°C<sup>-1</sup>]

$\alpha_c$  – koeficijent temperaturne ekspanzije cilindra, [°C<sup>-1</sup>]

$\vartheta$  – temperatura sklopa za vrijeme ispitivanja, [°C]

$\lambda$  – koeficijent distorzije, [bar<sup>-1</sup>]

$p_{ef}$  – efektivni iznos tlaka generiran na sklopu, [bar]

2) KOREKCIJA SILE

Korekcija sile kojom utezi djeluju na tlačnu vagu u općem slučaju obuhvaća: korekciju zbog uzgonskog djelovanja zraka i radnog medija, korekciju zbog statičkog tlaka stupca fluida, korekciju zbog površinske napetosti radnog medija i korekciju zbog različite vrijednosti gravitacijske konstante[2].

$$F = \left[ \sum_i \left[ m_i \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}} \right) \right] + (hA_0 - V) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c \quad (5)$$

Uz:

$m_i$  – prava masa i-tog utega postavljenog na sklop, [kg]

$\rho_a$  – gustoća zraka okoline, [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{m_i}$  – gustoća i-tog utega, [kg/m<sup>3</sup>]

$h$  – razlika visini između etalonskog i ispitivanog sklopa, [m]

$V$  – volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida, [m<sup>3</sup>]

$\rho_f$  – gustoća radnog medija, [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  – iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja, [m/s<sup>2</sup>]

$\theta$  – kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu, [°]

$\Gamma$  – opseg klipa, [m]

$c$  – površinska napetost radnog medija, [N/m]

Uvrštavanjem jednadžbi (4) i (5) u jednadžbu (1), dobijemo općenitu jednadžbu za računanje efektivnog tlaka tlačne vage (6):

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}} \right) \right] + (hA_0 - V) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c}{A_0(20;0) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \cdot (1 + \lambda \cdot p_{ef})} \quad (6)$$

U ovom projektu zanemarena je korekcija zbog uzgonskog djelovanja i površinske napetosti radnog medija jer je kao radni medij korišten dušik čija je gustoća vrlo slična gustoći zraka pri atmosferskom tlaku. Također, os klipa je bila paralelna s vertikalom i nije bilo razlike u visinama između etalona i umjeravanog uređaja, jer su stajali na istom stolu.

Uzevši u obzir navedena zanemarenja, jednadžba (6) prelazi u jednadžbu (7), s kojom su računati efektivni tlakovi:

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m_i}} \right) \right] \right] \cdot g}{A_0(20;0) [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(\vartheta - 20^\circ\text{C})] \cdot (1 + \lambda \cdot p_e)} \quad (7)$$

#### 5.4.1. Prikaz izračunatih efektivnih tlakova za sve točke umjeravanja

Prema gornjoj jednadžbi (7) računati su efektivni tlakovi (prikazani u tablici 5.4). Okolišni uvjeti u Laboratoriju za procesna mjerenja u vrijeme umjeravanja bili su:

- Temperatura zraka: 23,8 °C
- Tlak zraka: 1014 mbar
- Relativna vlažnost: 40 %
- Gravitacijska konstanta: 9,80665 m/s<sup>2</sup>

Tablica 5.4 Izračunati efektivni tlakovi – nastavak na sljedećoj stranici

Mjerni slijed	Broj Ispitne točke	Sila [N]	Efektivna površina [m <sup>2</sup> ]	Efektivni tlak [mbar]
M1	1	0,000000	4,90206·10 <sup>-5</sup>	0,000000
	2	24,5132383	4,90205·10 <sup>-5</sup>	5000,606
	3	49,0265315	4,90205·10 <sup>-5</sup>	10001,235
	4	98,0528943	4,90204·10 <sup>-5</sup>	20002,482
	5	147,0793797	4,90202·10 <sup>-5</sup>	30003,801
	6	196,1054161	4,90201·10 <sup>-5</sup>	40005,076
	7	245,1317054	4,90200·10 <sup>-5</sup>	50006,449
	8	294,1578966	4,90199·10 <sup>-5</sup>	60007,850
	9	343,1842261	4,90198·10 <sup>-5</sup>	70009,325
M2	10	343,1842261	4,90198·10 <sup>-5</sup>	70009,325
	11	294,1578966	4,90199·10 <sup>-5</sup>	60007,850
	12	245,1317054	4,90200·10 <sup>-5</sup>	50006,449
	13	196,1054161	4,90201·10 <sup>-5</sup>	40005,076
	14	147,0793797	4,90202·10 <sup>-5</sup>	30003,801
	15	98,0528943	4,90204·10 <sup>-5</sup>	20002,482
	16	49,0265315	4,90205·10 <sup>-5</sup>	10001,235
	17	24,5132383	4,90205·10 <sup>-5</sup>	5000,606
	18	0,000000	4,90206·10 <sup>-5</sup>	0,000000
M3	19	0,000000	4,90206·10 <sup>-5</sup>	0,000000
	20	24,5132383	4,90205·10 <sup>-5</sup>	5000,606

	21	49,0265315	$4,90205 \cdot 10^{-5}$	10001,235
	22	98,0528943	$4,90204 \cdot 10^{-5}$	20002,482
	23	147,0793797	$4,90202 \cdot 10^{-5}$	30003,801
	24	196,1054161	$4,90201 \cdot 10^{-5}$	40005,076
	25	245,1317054	$4,90200 \cdot 10^{-5}$	50006,449
	26	294,1578966	$4,90199 \cdot 10^{-5}$	60007,850
	27	343,1842261	$4,90198 \cdot 10^{-5}$	70009,325
M4	28	343,1842261	$4,90198 \cdot 10^{-5}$	70009,325
	29	294,1578966	$4,90199 \cdot 10^{-5}$	60007,850
	30	245,1317054	$4,90200 \cdot 10^{-5}$	50006,449
	31	196,1054161	$4,90201 \cdot 10^{-5}$	40005,076
	32	147,0793797	$4,90202 \cdot 10^{-5}$	30003,801
	33	98,0528943	$4,90204 \cdot 10^{-5}$	20002,482
	34	49,0265315	$4,90205 \cdot 10^{-5}$	10001,235
	35	24,5132383	$4,90205 \cdot 10^{-5}$	5000,606
	36	0,0000000	$4,90206 \cdot 10^{-5}$	0,000000

Gustoća zraka s obzirom na okolišne uvjete računata je po formuli:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p_o - 0,009024 \cdot RH \cdot e^{0,0612 \cdot \vartheta_o}}{273,15 + \vartheta_o} \quad (8)$$

gdje je:

$RH$  – relativna vlažnost zraka, [%]

$p_o$  – tlak zraka okoline, [mbar]

$\vartheta_o$  – temperatura okoline, [°C]

Gustoća zraka je s obzirom na konstantne okolišne uvjete za sve točke umjeravanja iznosila  $1,186 \text{ kg/m}^3$ .

Iz tablice 5.4 možemo vidjeti da su efektivni tlakovi za sva četiri mjerna slijeda jednaki, što je posljedica jednakih okolišnih uvjeta tijekom cijelog postupka umjeravanja.

## 5.5. Rezultati umjeravanja pretvornika tlaka DPI 515

Obrada rezultata umjeravanja obuhvaćala je računanje srednje vrijednosti očitavanja na pretvorniku tlaka DPI 515, ponovljivosti, histereze, odstupanja, koeficijenta prijenosa i mjerne nesigurnosti. Svi rezultati prikazani su u tablici 5.5.

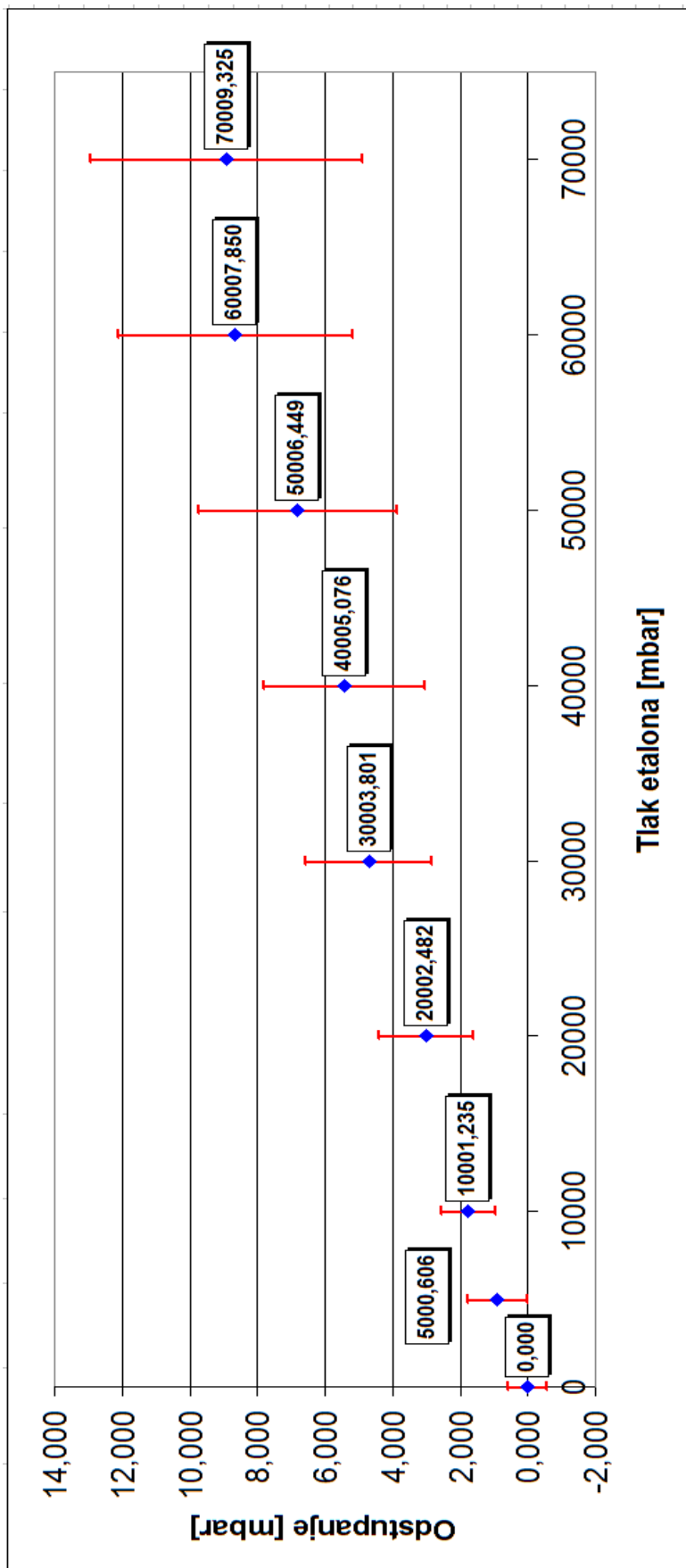
Tablica 5.5 Rezultati umjeravanja pretvornika tlaka DPI 515– 1. dio

Tlak etalona [mbar]	Očitanje na DPI 515 [mbar]				Srednja vrijednost očitavanja [mbar]
	M1	M2	M3	M4	
0,000	0	0	0	0	0,000
5000,606	5002	5001	5002	5001	5001,500
10001,235	10003	10003	10003	10003	10003,000
20002,482	20006	20005	20006	20005	20005,500
30003,801	30009	30008	30009	30008	30008,500
40005,076	40011	40010	40011	40010	40010,500
50006,449	50014	50013	50013	50013	50013,250
60007,850	60017	60016	60017	60016	60016,500
70009,325	70018	70018	70019	70018	70018,250

Tablica 5.5 Rezultati umjeravanja pretvornika tlaka DPI 515 – 2. dio

Tlak etalona [mbar]	Ponovljivost [mbar]	Histereza [mbar]	Koef. prijenosa [-]	Odstupanje [mbar]	Nesigurnost [mbar]
0,000	0	0	-	0,000	0,577
5000,606	0	1	1,00018	0,894	0,863
10001,235	0	0	1,00018	1,765	0,805
20002,482	0	1	1,00015	3,018	1,388
30003,801	0	1	1,00016	4,699	1,871
40005,076	0	1	1,00014	5,424	2,388
50006,449	1	0,5	1,00014	6,801	2,936
60007,850	0	1	1,00014	8,650	3,464
70009,325	1	0,5	1,00013	8,925	4,021

Iz tablice 5.5 može se vidjeti da rezultati umjeravanja pokazuju odličnu ponovljivost i vrlo malu histerezu, a odstupanje od tlaka etalona se približno linearno povećava s porastom tlaka. Također, može se vidjeti da samo kod dviju točaka umjeravanja očitavanje umjeravanog uređaja odstupa od tlaka etalona više od dopuštenog odstupanja, koje iznosi 0,01 % od cijele skale tj. 7 mbar. To se događa pri vrlo visokom tlaku (60 i 70 bar), te se može pripisati problemu brtvljenja ulaznih i izlaznih ventila. Na slici 5.5 prikazani su rezultati umjeravanja u dijagramu. Svakom tlaku etalona pridruženo je pripadajuće odstupanje umjeravanog uređaja DPI 515 uz odgovarajuću mjernu nesigurnost.



Slika 5.5 Dijagramski prikaz rezultata umjerenja pretvornika tlaka DPI 515

## **6. UMJERAVANJE KALIBRATORA TLAKA DRUCK DPI 615**

### **6.1. Općeniti podaci o kalibratoru tlaka Druck DPI 615**

Kalibrator tlaka DPI 615 može mjeriti i prikazati, ovisno o izvedbi, pneumatski ili hidraulički tlak u sustavu na koji je spojen preko testnog ulaza ili preko dodatno spojenog osjetnika tlaka. Može mjeriti apsolutni tlak ili pretlak u rasponu od 2,5 do 700 bar. Uređaj također može generirati pneumatski tlak u rasponu od -1 do 20 bar, te hidraulički tlak do 400 bar. Električni ulazi na prednjoj strani uređaja omogućuju mjerenje do  $\pm 50$  V istosmjerne struje i do 55 mA, a električni izlazi omogućuju generiranje istosmjerne struje do 10 ili do 24 V te do maksimalno 24 mA[12].

Integrirani unutarnji senzor mjeri okolišnu temperaturu, a spajanjem dodatnih senzora tlaka može se proširiti mjerno područje i omogućiti mjerenje diferencijalnog tlaka. Ovisno i izvedbi uređaj se napaja pomoću 6 baterija veličine C ili pomoću punjivih baterija i punjača[12].

Kućište uređaja je vodootporno, te se na prednjoj strani nalazi ručka koja omogućuje jednostavno prenošenje uređaja na lokaciju mjerenja. Sa stražnje strane se nalazi remen, pa se uređaj može nositi i na ramenu. Ekran uređaja ima mogućnost istovremenog prikaza i tlaka na ulaznom ventilu i tlaka na izlaznom ventilu[12].

#### **6.1.1. Izvedba DPI 615 PC**

Laboratorij za procesna mjerenja na FSB-u posjeduje izvedbu kalibrатора tlaka DPI 615 koja mjeri i generira pneumatski tlak (PC - Pressure calibrator). Kao radni medij korišten je dušik visoke čistoće, isti kao i kod umjeravanja pretvornika DPI 515. Ova izvedba opremljena je punjivim litijevim baterijama te ima ručnu pumpu za generiranje tlaka u rasponu od -850 mbar do 20 bar. Također, ima mogućnost finog podešavanja tlaka i ispusni ventil koji može odjednom ili kontrolirano ispuštati radni medij iz sustava[12]. Na slici 6.1 prikazan je DPI 615 PC u načinu mjerenja tlaka.



Slika 6.1 Kalibrator tlaka DPI 615 u načinu mjerenja tlaka

### 6.1.2. Tehničke specifikacije

#### Maksimalni dopušteni tlak

- Mjerno područje do 20 bar: 1,75x veći od cijele skale
- Mjerno područje do 350 bar: 1,2x veći od cijele skale
- Mjerno područje do 400 bar: 1,5x veći od cijele skale
- Sva ostala područja: 2x veći od cijele skale

#### Točnost (uključuje nelinearnost, histerezu i ponovljivost)

- Do  $\pm 70$  mbar: 0,05 % cijele skale
- Do  $\pm 150$  bar: 0,05 % raspona tlaka
- 200 mbar – 20 bar: 0,025 % cijele skale



Utjecaj temperature

- $\pm 0,004$  % od očitavanja/ $^{\circ}\text{C}$

Napajanje

- Punjive NiCad baterije (20 sati rada) i punjač/adapter koji napaja uređaj dok puni baterije

Naponski ulaz

- Raspon:  $\pm 50$  V
- Preciznost:  $\pm 0,05$  % od očitavanja,  $\pm 0,004$  % cijele skale
- Rezolucija: maksimalno 100  $\mu\text{V}$

Naponski izlaz

- Raspon:  $\pm 10$  V;  $\pm 24$  V
- Preciznost:  $\pm 0,1$  %;  $\pm 5$  %
- Jakost: 10 mA; 26 mA

Strujni ulaz

- Raspon:  $\pm 55$  mA
- Preciznost:  $\pm 0,05$  % od očitavanja,  $\pm 0,004$  % cijele skale
- Rezolucija: maksimalno 1  $\mu\text{A}$

Strujni izlaz

- Raspon: 24 mA
- Preciznost:  $\pm 0,05$  % od očitavanja,  $\pm 0,01$  % cijele skale
- Rezolucija: maksimalno 1  $\mu\text{A}$

### LCD Ekran

- Veličina: (60 x 60) mm
- Očitanje:  $\pm 99999$
- Brzina očitavanja: 2 očitavanja/s

### Temperaturni uvjeti

- Radna temperatura: od -10 do 50 °C
- Temperatura pri umjeravanju: od -10 do 40 °C
- Temperatura skladištenja: od -20 do 60 °C
- Temperatura na kojoj je uređaj umjeren: 21 °C  $\pm$  2 °C

### Dimenzije uređaja

- Veličina: (300 x 170 x 140) mm
- Masa: 3 kg[12]

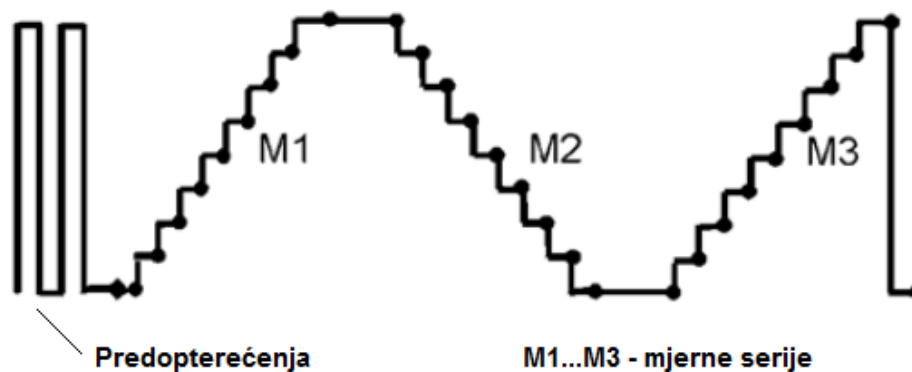
## **6.2. Postupak umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615**

Kalibrator tlaka DPI 615 umjeren je u području do 70 bar i to po uputama iz Priručnika DKD-R 6-1 (Deutscher Kalibrierdienst). Taj postupak detaljno je opisan u poglavlju 5.2.

Kod umjeravanja ovog kalibratora kao etalon korišten je prethodno umjeren pretvornik i kalibrator tlaka DPI 515. Kao radni medij korišten je dušik visoke čistoće, a umjeravanje se vršilo po B metodi iz priručnika DKD-R 6-1. Okolišni uvjeti u Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a za vrijeme umjeravanja bili su:

- Temperatura zraka: 24 °C
- Tlak zraka: 1014 mbar

Metoda B se sastoji od tri mjerna slijeda (dva uzlazna i jedan silazni), a svaki slijed od 9 točaka jednoliko raspoređenih u rasponu između 0 i 70 bar. Raspored točaka prikazan je u tablici 5.2. Shematski prikaz metode B prikazan je na slici 6.2.



Slika 6.2 Grafički prikaz metode B

Postupak pripreme mjerne linije sastojao od sljedećih radnji:

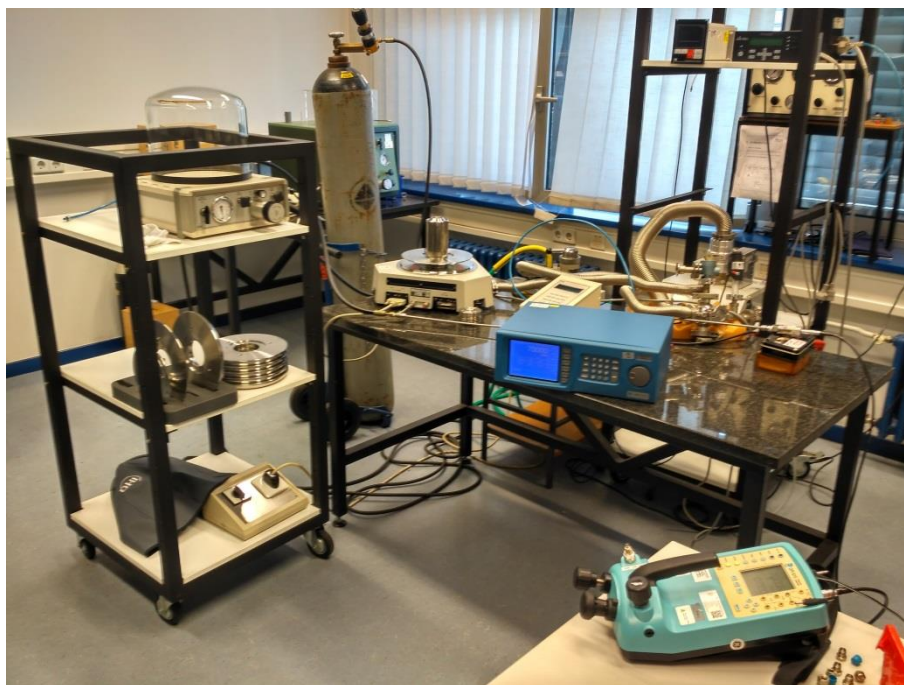
- 1) Pretvornik DPI 515 je upaljen i ostavljen 15 minuta da se temperira
- 2) Izvor radnog medija (dušika) spojen je na pretvornik DPI 515 preko ručnog regulatora tlaka MPC1
- 3) Pretvornik DPI 515 je preko dodatnog pretvornika tlaka spojen na kalibrator DPI 615
- 4) Radni medij (dušik) je pušten u sustav, te je njegova količina regulirana pomoću regulatora MPC1

Umjeravanje se sastojalo od sljedećih radnji:

- 1) Dva puta je pretvornikom DPI 515 generiran najveći tlak od 70 bara i ispražnjen sustav (predopterećenja)
- 2) Na pretvorniku DPI 515 je u načinu generiranja tlaka (Control mode) namještena željena vrijednost tlaka (Setpoint) u mbar i brzina kojom se postiže ta vrijednost (Rate) u mbar/s
- 3) Kada DPI 515 postigne željenu vrijednost, tada se na pretvorniku DPI 615 očita njegovo pokazivanje i zapiše u mjernu podlogu
- 4) Postupak je ponovljen za sve mjerne točke u svim mjernim slijedovima
- 5) Izračunata je srednja vrijednost, ponovljivost, histereza, odstupanje, koeficijent prijenosa i mjerna nesigurnost

## 6) Rezultati umjeravanja su prikazani tablično i u dijagramu

Mjerna linija za umjeravanje kalibratora tlaka DPI 615 u Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a prikazana je na slici 6.3, a njena shema na slici 6.4.



Slika 6.3 Linija za umjeravanje kalibratora tlaka DPI 615



Slika 6.4 Shema linije za umjeravanje kalibratora tlaka DPI 615

### 6.3. Rezultati umjeravanja

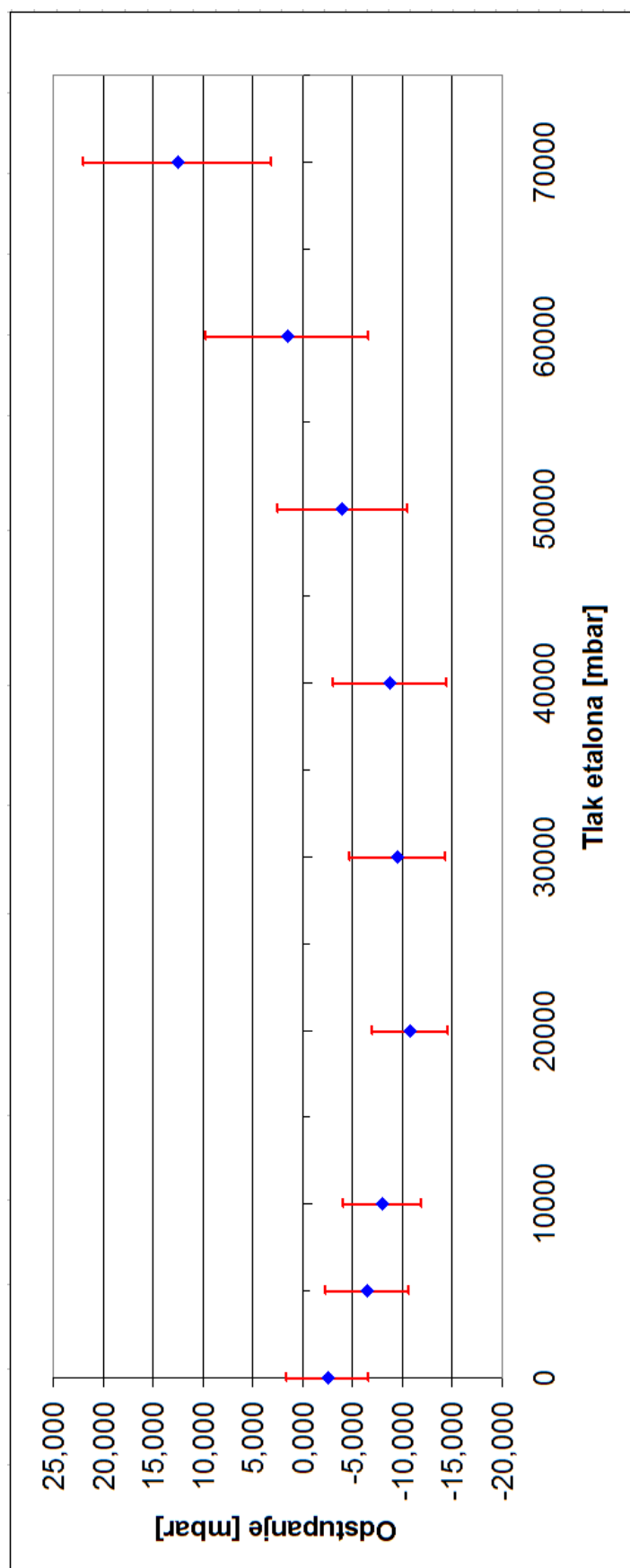
Rezultati umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615 prikazani su u tablici 6.1, te na dijagramu na slici 6.5. Kod dijagramskog prikaza je svakom tlaku etalona pridruženo odstupanje umjeravanog uređaja i pripadajuća mjerna nesigurnost. Mjerna nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ( $k=2$ ), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95 %.

Tablica 6.1 Rezultati umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615 – 1. dio

Tlak etalona [mbar]	Očitanje na DPI 615			Srednja vrijednost očitavanja [mbar]
	M1 [mbar]	M2 [mbar]	M3 [mbar]	
0	0	-5	0	-2,500
5000	4996	4991	4996	4993,500
10000	9994	9990	9994	9992,000
20000	19990	19989	19989	19989,250
30000	29989	29991	29991	29990,500
40000	39991	39990	39994	39991,250
50000	49995	49996	49997	49996,000
60000	60000	60000	60006	60001,500
70000	70009	70013	70015	70012,500

Tablica 6.1 Rezultati umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615 – 2. dio

Tlak etalona [mbar]	Odstupanje [mbar]	Ponovljivost [mbar]	Histereza [mbar]	Koef. prijenosa [-]	Mjerna nesigurnost [mbar]
0	-2,500	0	5	-	4,123
5000	-6,500	0	5	0,99870	4,162
10000	-8,000	0	4	0,99920	3,909
20000	-10,750	1	1	0,99946	3,799
30000	-9,500	2	2	0,99968	4,776
40000	-8,750	3	1	0,99978	5,692
50000	-4,000	2	1	0,99992	6,496
60000	1,500	6	0	1,00003	8,158
70000	12,500	6	4	1,00018	9,405



Slika 6.5 Dijagramski prikaz rezultata umjeravanja kalibratora tlaka DPI 615

Iz rezultata umjeravanja se može zaključiti da je umjeravani uređaj u cijelom rasponu tlakova unutar dopuštenog odstupanja, koje je određeno razredom točnosti uređaja, a iznosi 0,025% od cijele skale tlakova tj. 17,5 mbar. Ponovljivost je sve lošija s porastom tlaka, a iz dijagrama na slici 6.5 vidimo nelinearnost rezultata.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazane su teorijske osnove mjerenja tlaka, te je stavljen naglasak na mjerenje pomoću pretvornika tlaka i način na koji se oni umjeravaju prema priručniku DKD-R 6-1. U središtu pozornosti bio je pretvornik i kalibrator tlaka Druck DPI 515, koji osim mjerenja tlaka može i sam generirati tlak te tako služiti kao etalon za umjeravanje drugih pretvornika. Cilj završnog rada bio je sastaviti mjernu liniju kojom će se pomoću tog pretvornika tlaka moći umjeravati drugi pretvornici.

Kako bi se znale mjerne značajke pretvornika tlaka DPI 515 te osigurala mjerna sljedivost, najprije ga je bilo potrebno umjeriti u mjernom području do 70 bar uređajem većeg razreda točnosti. Kao etalon je korištena plinska tlačna vaga DHI PG 7000, a umjeravanje se vršilo po A metodi iz priručnika DKD-R 6-1. Rezultati umjeravanja su pokazali da je uređaj vrlo precizan, te da tek na vrlo visokom tlaku odstupanje malo prelazi dopuštenu vrijednost. Također, može se vidjeti da odstupanje približno linearano raste s porastom tlaka. Nakon provedenog umjeravanja bilo je moguće uspostaviti mjernu liniju koja će koristiti pretvornik i kalibrator tlaka DPI 515 kao etalon i koja će se koristiti za umjeravanje drugih pretvornika tlaka u području do 70 bar.

Da bi se isprobalo funkcioniranje mjerne linije, na njoj je umjeren kalibrator tlaka DPI 615, koristeći B metodu, te su rezultati pokazali da je odstupanje od etalona u cijelom mjernom području unutar dopuštenog. Ipak, mjerna nesigurnost je veća nego kod umjeravanja pretvornika DPI 515, jer uređaj pripada nižem razredu točnosti. Također, pretvornik DPI 615 ima lošiju ponovljivost i veću histerezu, te odstupanje ne raste linearno s porastom tlaka.

Pri pokušaju automatizacije procesa umjeravanja, došlo je do problema jer pretvornik DPI 515 nije mogao postići točno zadani tlak. To se dogodilo zbog propuštanja brtvi ulaznog i izlaznog ventila, koja je zbog starosti izgubila svoja prvotna svojstva. Nakon zamjene brtve, ventili u ponovno propuštali previše radnog medija iz ili u sustav jer su imale veću zračnost u odnosu na originalne brtve. Stoga se ispostavilo da je jedino rješenje, narudžba novih originalnih ventila, što nije bilo moguće u vremenskom okviru ovog rada. Iz tog razloga proces se nije mogao automatizirati, jer kako se tlak nije mogao ustaliti na generatoru tlaka tako se ni očitavanje na umjeravanom uređaju nije moglo ustaliti, pa sustav nije mogao sam zabilježiti očitavanje, već se očitavanje vršilo kada bi se tlak na etalonu dovoljno približio zadanoj vrijednosti, što je dovelo do veće mjerne nesigurnosti.



## LITERATURA

- [1] Galović, A.: Termodinamika 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [2] FSB - Laboratorij za procesna mjerenja: Podloge za vježbe iz kolegija Mjerenja u energetici
- [3] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, The Institute of Measurement and Control, London, 1998.
- [4] Brošura za tlačnu vagu PG7000, DH Instruments, a Fluke Company, 2007. (<http://www.calpower.it/products/pdf/bropg7k.pdf>)
- [5] Potvrda o umjeravanju br. 11/16, Utezi za tlačnu vagu, Hrvatski mjeriteljski institut, 2016.
- [6] Calibration report no. 1500128773, Calibration of: Model PC-7100/7600-200 KN=200 kPa/kg Piston Cylinder No. 1768, Fluke Calibration, 2012.
- [7] PG 7000 Operation and Maintenance Manual, DH Instruments, Inc., 1998.-2002.
- [8] DPI 515 Precision Pressure Controller/Calibrator User Manual, Druck Limited, 2005.
- [9] JCGM, JCGM 200:2008 Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM), prijevod 3. izdanja (International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)), Mirko Vuković, Zagreb, 2009.
- [10] EURAMET: Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers (EURAMET cg-17,v.01), 2007.
- [11] 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.
- [12] Druck DPI 610/615 Portable Pressure Calibrator Series User manual – K415, GE sensing, 2008.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc