

# **Usporedba plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava do 7 MPa**

---

**Popović, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*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:235:473178>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Ivan Popović

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Ivan Popović

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na stručnoj i nesebičnoj pomoći pri izradi ovog rada, kao i djelatnicima Laboratorija za procesna mjerjenja za ukazanu pomoć pri mjerjenjima koja su bila potrebna za izradu ovog rada.

Zahvale upućujem svojoj obitelji koja me neizmjerno podržavala tokom cijelog studija.

Ivan Popović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Ivan Popović

Mat. br.: 0035177249

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

Usporedba plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava do 7 MPa

Naslov rada na engleskom jeziku:

Comparison of gas and oil standard pressure system up to 7 MPa

Opis zadatka:

Prema zahtjevima međunarodnih normi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorijskih postupaka, laboratorij mora imati postupke za praćenje kvalitete rezultata svojih ispitivanja i umjeravanja. Kvalitet rezultata može se pratiti unutrašnjim ili vanjskim mjerama kontrole kvalitete. Unutrašnje mjerene kontrole kvalitete između ostalog obuhvaćaju ponovljivost i obnovljivost rezultata dok se vanjske u pravilu odnose na provedbu međulaboratorijskih usporedbi i ispitivanja sposobnosti. U ovom radu potrebno je usporediti dva etalonska tlačna sustava do 7 MPa korištenjem pretvornika tlaka kao prijenosnog etalona te analizirati rezultate dobivene korištenjem različitih tlačnih medija (ulje i plin).

Potrebno je:

- opisati etalonske tlačne sustave koji koriste ulje i plin kao tlačni medij,
- dati pregled statističkih metoda za ocjenu rezultata umjeravanja,
- opisati metode umjeravanja, provedbu mjerjenja i procjenu mjerne nesigurnosti,
- provesti umjeravanja koristeći različite tlačne medije (dušik i ulje),
- izraditi proračune efektivnog tlaka i budžete mjerne nesigurnosti,
- analizirati rezultate provedenih umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zdao:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. TLAČNE VAGE .....	3
2.1. Tlačne vase kao etaloni tlaka.....	3
2.2. Osnove fizike tlačne vase .....	5
2.2.1. Idealni sustav.....	5
2.2.2. Realni sustav .....	7
2.3. Metode umjeravanja tlačnih vaga .....	8
2.3.1. Određivanje efektivne površine .....	9
2.3.2. Određivanje koeficijenta elastične deformacije.....	10
2.3.2.1. Teorijsko određivanje .....	10
2.3.2.2. Eksperimentalno određivanje.....	10
3. METODE PROCJENE MJERNE NESIGURNOSTI .....	11
3.1. Definicije i procjena mjerne nesigurnosti .....	11
3.1.1. Procjena nesigurnosti tipa A .....	11
3.1.2. Procjena nesigurnosti tipa B .....	12
3.2. Određivanje sastavljene normalne nesigurnosti.....	13
3.2.1. Nekorelirane ulazne veličine.....	13
3.2.2. Korelirane ulazne veličine .....	13
3.3. Određivanje proširene nesigurnosti .....	14
4. STATISTIČKE METODE ZA OCJENU REZULTATA UMJERAVANJA .....	15
5. OPIS MJERNIH LINIJA I PROVEDBE UMJERAVANJA .....	16
5.1. Plinski etalonski tlačni sustav .....	16
5.1.1. Opis i glavne karakteristike mjerne linije .....	16
5.1.2. Princip rada mjerne linije.....	19
5.1.3. Postupak mjerjenja .....	20
5.1.4. Proračun efektivnog tlaka .....	21
5.2. Uljni etalonski tlačni sustav .....	22
5.2.1. Opis i glavne karakteristike mjerne linije .....	22
5.2.2. Princip rada mjerne linije.....	24
5.2.3. Postupak mjerjenja .....	25
5.2.4. Proračun efektivnog tlaka .....	26
6. ANALIZA REZULTATA UMJERAVANJA.....	27
6.1. Plinski etalonski tlačni sustav .....	28
6.1.1. Karakteristike korištenih masa.....	28

6.1.2.	Prikaz korištenih kombinacija utega i efektivnog tlaka .....	29
6.1.3.	Prikaz izračuna efektivnog tlaka.....	30
6.1.4.	Budžeti mjerne nesigurnosti.....	31
6.2.	Uljni etalonski tlačni sustav .....	37
6.2.1.	Karakteristike korištenih masa.....	37
6.2.2.	Prikaz korištenih kombinacija utega i efektivnog tlaka .....	38
6.2.3.	Prikaz izračuna efektivnog tlaka.....	39
6.2.4.	Budžeti mjerne nesigurnosti.....	40
6.3.	Usporedba plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava .....	46
7.	ZAKLJUČAK.....	50

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Direktne metode mjerena tlaka [2] .....	2
Slika 2.	Indirektne metode mjerena tlaka [2] .....	2
Slika 3.	Vrste i područja primjene tlačnih vaga [1] .....	3
Slika 4.	Osnovne konfiguracije tlačne vase [1] .....	5
Slika 5.	Shematski prikaz idealnog sklopa klip/cilindar [2] .....	5
Slika 6.	Shematski prikaz realnog sklopa klip/cilindar [2] .....	7
Slika 7.	Prikaz plinske etalonske mjerne linije .....	17
Slika 8.	Plinska etalonska mjerna linija .....	18
Slika 9.	Prikaz uljne etalonske mjerne linije .....	22
Slika 10.	Uljna etalonska mjerna linija .....	24
Slika 11.	Prikaz odstupanja plinskog etalonskog sustava za ispitne točke .....	36
Slika 12.	Prikaz odstupanja uljnog etalonskog sustava za ispitne točke .....	45
Slika 13.	Prikaz odstupanja uljnog i plinskog etalonskog sustava .....	48

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Pregled nekih statističkih metoda za ocjenu rezultata umjeravanja [6] .....	15
Tablica 2.	Karakteristike plinske tlačne vase.....	18
Tablica 3.	Karakteristike pretvornika tlaka .....	19
Tablica 4.	Karakteristike pokazivača .....	19
Tablica 5.	Karakteristike uljne tlačne vase .....	23
Tablica 6.	Karakteristike masa kod plinskog etalonskog sustava .....	28
Tablica 7.	Prikaz kombinacija utega kod plinskog etalonskog sustava .....	29
Tablica 8.	Proračun efektivnog tlaka za plinski etalonski sustav.....	30
Tablica 9.	Mjerna nesigurnost po točkama za plinski etalonski sustav.....	31
Tablica 10.	Prikaz mjernih nesigurnosti i odstupanja plinskog etalonskog sustava .....	35
Tablica 11.	Karakteristike masa kod uljnog etalonskog sustava.....	37
Tablica 12.	Proračun efektivnog tlaka za uljni etalonski sustav .....	39
Tablica 13.	Mjerna nesigurnost po točkama za uljni etalonski sustav .....	40
Tablica 14.	Prikaz mjernih nesigurnosti i odstupanja uljnog etalonskog sustava .....	44
Tablica 15.	Usporedba odstupanja plinskog i uljnog etalonskog sustava .....	46
Tablica 16.	Usporedba mjernih nesigurnosti kod plinskog i uljnog etalonskog sustava .....	47
Tablica 17.	Ocjena rezultata umjeravanja .....	49

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{m}^2$	površina
$A_0$	$\text{m}^2$	efektivna površina sklopa pri nultom tlaku
$A_e$	$\text{m}^2$	efektivna površina
$c$	$\text{N}/\text{m}$	površinska napetost radnog medija
$E_n$	-	faktor odstupanja normaliziran u odnosu na iskazanu nesigurnost
$F$	$\text{N}$	sila
$f$	$\text{N}$	masena sila
$g$	$\text{m}/\text{s}^2$	gravitacija
$h$	$\text{m}$	visina
$m_i$	$\text{kg}$	prava masa i-tog utega postavljenog na sklop
$p$	$\text{Pa}$	tlak
$p_e$	$\text{Pa}$	efektivni tlak
$p_{abs}$	$\text{Pa}$	apsolutni tlak
$r$	$\text{mm}$	polumjer klipa
$r'$	$\text{mm}$	polumjer koji pripada neutralnoj površini
$t$	$^\circ\text{C}$	temperatura
$T$	$\text{K}$	termodinamička temperatura
$t_r$	$^\circ\text{C}$	referentna temperatura
$u$	-	standardna nesigurnost
$U$	-	proširena nesigurnost
$u_c$	-	sastavljena standardna nesigurnost
$v$	$\text{m}^3$	volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida
$w$	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$	specifična težina
$W$	$\text{N}$	sila trenja
$x$	-	iznos odstupanja na plinskom etalonskom sustavu
$X$	-	iznos odstupanja na uljnom etalonskom sustavu
$\alpha_K$	$^\circ\text{C}^{-1}$	koeficijent temperaturnog rastezanja klipa
$\alpha_c$	$^\circ\text{C}^{-1}$	koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra
$\Gamma$	$\text{m}$	opseg klipa
$\lambda$	$\text{Pa}^{-1}$	koeficijent elastične deformacije
$\rho_a$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća zraka okoline
$\rho_{mi}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća i-tog utega
$\rho_f$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća radnog medija
$\rho_{N2}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća dušika
$\rho_U$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća ulja

## SAŽETAK

U ovom radu napravljena je usporedba plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava do 7 MPa koristeći pretvornik tlaka kao prijenosni etalon. Usporedba je provedena na sustavima koji se nalaze u sklopu Laboratorijskog procesnog mjerjenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

U uvodnim poglavljima prikazan je pregled teorijskih osnova mjerjenja tlaka s posebnim osvrtom na tlačne vase kao primarne etalone tlaka.

Nakon teorijskih osnova dani su matematički modeli za proračun efektivnog tlaka za oba etalonska tlačna sustava. Prikazane su metode procjene mjerne nesigurnosti korištene pri analizi rezultata, kao i statističke metode za ocjenu rezultata umjeravanja.

Shematski su prikazane i opisane mjerne linije te su navedene karakteristike korištenih komponenti. Objašnjen je princip rada mjernih linija i sam postupak mjerjenja kojim su dobiveni rezultati potrebni za usporedbu navedenih etalonskih tlačnih sustava.

Analiza rezultata, kao glavni dio ovog rada, napravljena je pomoću matematičkih modela i metoda prikazanih u uvodnim poglavljima. Prikazane su karakteristike pripadajućih masa korištenih pri umjeravanju, proračunati efektivni tlakovi za oba sustava i mjerne nesigurnosti za sve točke mjerjenja.

Glavni indikator za usporedbu navedenih etalonskih tlačnih sustava je razlika proračunatih odstupanja sustava. Analizom dobivenih odstupanja dobiven je konačni uvid u trenutno stanje etalonskih tlačnih sustava koji se koriste u laboratoriju prema kojem su predloženi daljnji koraci za unaprjeđenje opisanih sustava i ponovno ispitivanje.

Svrha navedenih ispitivanja bila je unutarnja kontrola kvalitete etalona tlaka u Laboratoriju za procesna mjerjenja.

*Ključne riječi: mjerenje tlaka, etalonski tlačni sustavi, tlačne vase, merna nesigurnost, unutarnja kontrola kvalitete laboratorija.*

## SUMMARY

This paper deals with the comparison of gas and oil standard pressure system up to 7 MPa using pressure calibrator as a portable standard. This comparison was carried out using the systems placed in Laboratory for thermal measurements at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Theoretical bases in pressure measurements are shown in the opening chapters, focusing on piston gauges.

After the theoretical bases, mathematical models for effective pressure calculations are given for both gas and oil standard pressure system. Calculation methods for measurement uncertainties and statistical methods for calibration feedback which are used in result analysis are also shown in this chapter.

Measurement facilities have been described and the characteristics of the equipment used for calibration are given. The operating principle and measurement procedure are also explained in this chapter.

The result analysis, as the main part of this thesis, has been conducted using mathematical models and procedures described in the opening chapters. Mass sets characteristics used for calibration are given and effective pressures and measure uncertainties are calculated, for all measure points in both gas and oil standard pressure system.

The main indicator for the comparison of mentioned standard pressure systems is the divergence in system deviation. The analysis of the obtained deviation gave an overview of the current state of standard pressure systems used in a laboratory and, based on those results, further steps for improving the above-described systems are proposed.

The main goal of the described calibration was the internal quality control for pressure standards used in Laboratory for thermal measurements.

*Key words:* *pressure measurement, standard pressure systems, piston gauges, measurement uncertainty, internal quality control.*

## 1. UVOD

Tlak je u osnovi mehanički pojam koji se može u potpunosti opisati u terminima osnovnih SI jedinica duljine, mase i vremena. Za fluid u mirovanju definira se kao normalna sila,  $F$ , na jedinicu površine  $A$  [1]:

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

Kao vektorska veličina, sila ima svoju veličinu i smjer, pa općenito postoje tri nezavisne komponente tlaka tj. naprezanja koje djeluju na površinu. Kad se promatraju unutarnje sile u krutom tijelu to može biti od važnosti pa su za opisivanje sila u materijalu općenito potrebni tenzori naprezanja. Budući da se svi etaloni tlaka koriste za mjerjenje tlaka u fluidu a ne u krutim tijelima tenzori naprezanja ne moraju biti korišteni [1].

U mehanici fluida tlak je specifična težina,  $w$ , prema visini,  $h$ :

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

Sva osnovna mjerjenja tlaka se temelje na te dvije definicije.

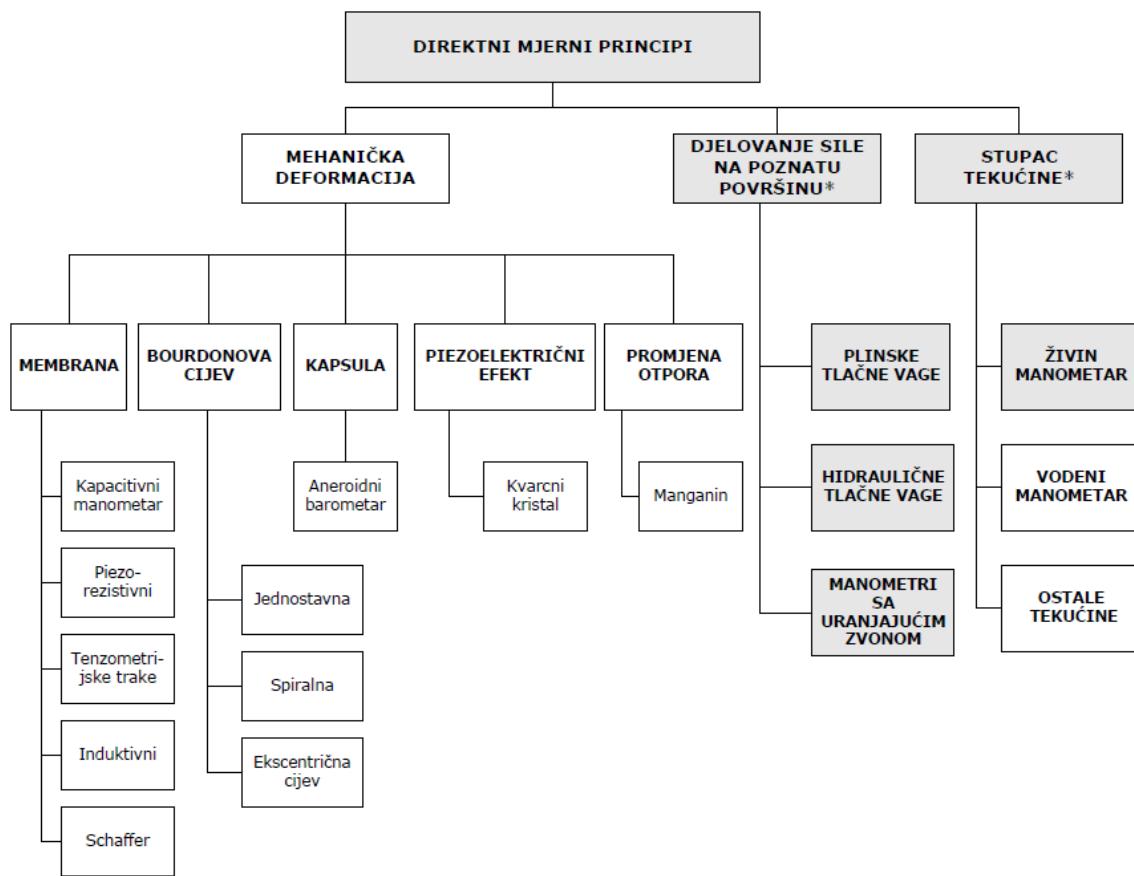
Tlak je općenito rezultat djelovanja molekula unutar nekog fluida na stjenke posude. Ako posuda ne sadrži niti jednu molekulu tlak u njoj ima iznos nula (100% vakuum). Tlak mјeren na skali koja koristi absolutnu nulu kao referentnu vrijednost zove se absolutni tlak dok se tlak koji koristi tlak okoline kao referentnu vrijednost naziva pretlak [1].

U ovom radu isključivo se mjeri tlak u odnosu na tlak okoline.

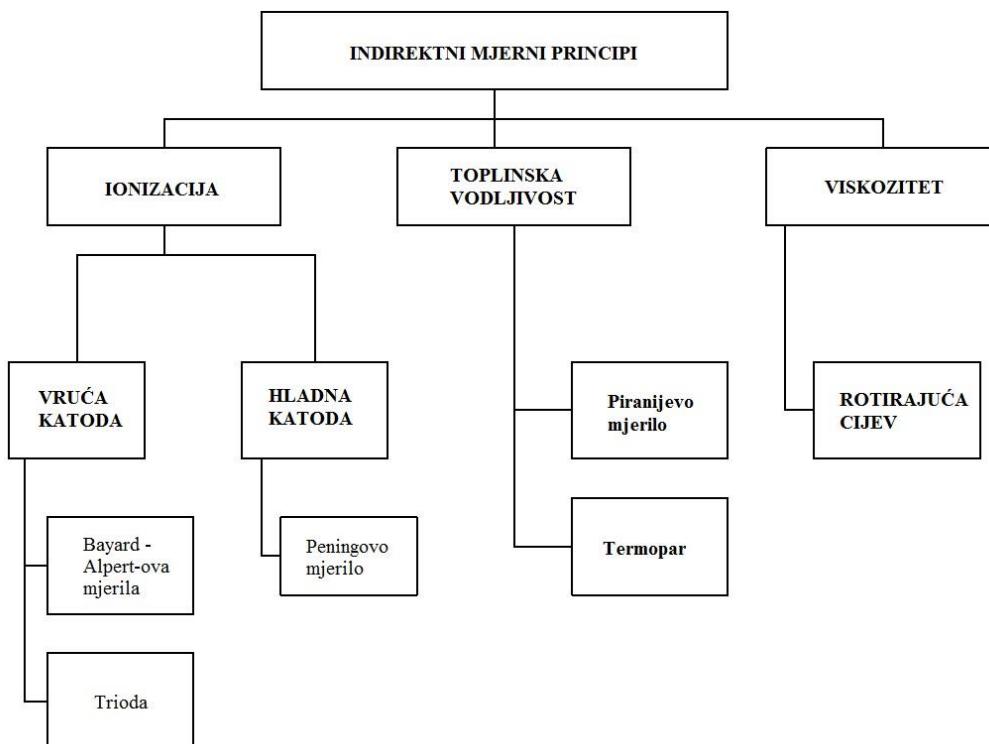
Jedinica za mjerjenje tlaka spada u grupu izvedenih jedinica SI s posebnim nazivima i znakom. Mjerna jedinica za tlak naziva se Paskal (Pa), a njena veza s drugim jedinicama je  $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2$ . Iznimno su dopuštene jedinice za mjerjenje tlaka izvan SI sustava, a to su bar ( $10^5 \text{ Pa}$ ) i milimetar stupca žive ( $133,322 \text{ Pa}$ ) [1].

Niti jedna definicija tlaka nije upotrebljiva u stvarnosti sve dok nije prevedena u mjerljive karakteristike. Mjerila tlaka u znanosti i industriji razvijaju se gotovo 200 godina i do danas je razvijen velik broj različitih principa mjerjenja statičkog tlaka. Klasifikaciju današnjih metoda mjerjenja tlaka i vakuma prikazuju [Slika 1] i [Slika 2]. Mjerjenja dinamičkih i parcijalnih tlakova ovdje nisu obuhvaćena [2].

Mjerila tlaka koja rade na tim principima značajno variraju u nesigurnostima koje postižu. Metode na slici označene zvjezdicom temelj su razvoja primarnih etalona tlaka jer dokazano mogu mjeriti tlak s najmanjim nesigurnostima i najboljom ponovljivošću [2].



Slika 1. Direktne metode mjerjenja tlaka [2]



Slika 2. Indirektne metode mjerjenja tlaka [2]

## 2. TLAČNE VAGE

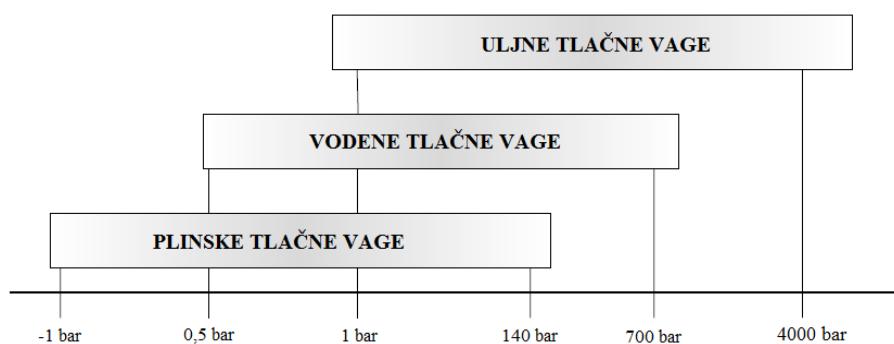
### 2.1. Tlačne vage kao etaloni tlaka

Etaloni tlaka su baza svim mjerjenjima tlaka. Ovisno o nesigurnosti sa kojom bilo koje mjerjenje tlaka mora biti izvršeno tražena oprema značajno varira u dizajnu i cijeni. Primarni etaloni tlaka u pravilu omogućavaju najmanje nesigurnosti ali su vrlo skupi i nisu nosivi [2].

Najmanje nesigurnosti mjerjenja tlaka u području od  $10^{-1}$  do  $10^5$  Pa postižu se korištenjem cijevnih manometara punjenih živom i plinskih tlačnih vaga koji se oboje koriste kao primarni etaloni u tom području. U usporedbi sa živinim manometrima plinske tlačne vage su relativno nove, osobito kao primarni etaloni [2].

U području od  $10^5$  do  $10^9$  Pa mjerjenja tlaka kao primarni etaloni koriste se plinske i hidraulične tlačne (vodene i uljne) vage raznolikog dizajna. Kako tlak raste iznad  $10^6$  Pa deformacija klipa i cilindra obično postaje glavni izvor nesigurnosti i mora biti uračunata u modeliranju efektivne površine. Tlačne vage jednostavnijeg dizajna najlakše su za modeliranje, ali na višim tlakovima one postaju neupotrebljive zbog širenja procjepa između klipa i cilindra. U području iznad  $2,6 \cdot 10^9$  Pa tlačne vage kao primarni etaloni tlaka ne postoje, a za proširenje mjerne sposobnosti tlaka koriste se druge tehnike [2].

Jedan od značajnih faktora razvoja tlačnih vaga kao primarnih etalona posljednjih godina je veliko proširenje područja mjerjenja tlaka i napredak i u teoretskim osnovama i u problemima njihovog dizajna i tehnika primjere. Današnje tlačne vage konstantno se unaprjeđuju po pitanju materijala i geometrije sklopa, metoda postavljanja utega na klip te točnosti pridruženih mjerjenja koja se odnose na mjerjenja temperature, pozicije klipa, propadanja rotacije itd [2].



Slika 3. Vrste i područja primjene tlačnih vaga [1]

Pojam tlačna vaga u pravilu podrazumijeva skup sljedećih komponenti: sklop klip/cilindar, utezi, postolje i sustav za regulaciju tlaka. Kada se radi o razvoju etalonskih linija na kojima sklopovi klip/cilindar služe za prijenos površine na druge tlačne vase te se komponente kombiniraju i nadopunjavaju prema potrebi i zato se naziv tlačna vaga ne koristi nego se upotrebljava pojam etalonska mjerna linija [2].

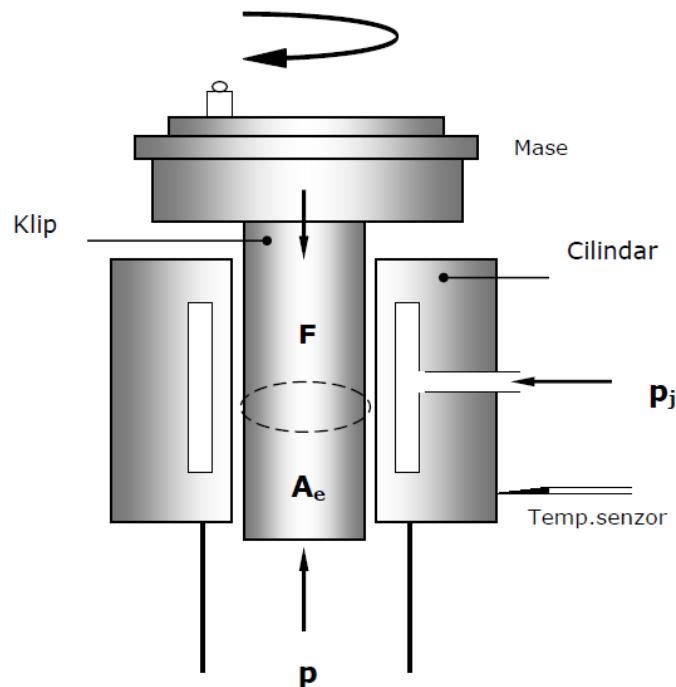
Princip rada temelji se na zakonu promjene hidrostatičkog tlaka. Sklop se sastoji od precizno izrađenog okomitog klipa, izrađenog na mikronske tolerancije koji je umetnut u blisko prilagođeni cilindar [Slika 4], oboje poznatih poprečno presječnih površina. Ta dva elementa određuju površinu koja se zove "efektivna površina". Mase poznate težine se postavljaju na vrh slobodnog klipa koji je također dio opterećenja. Na donji kraj klipa dovodi se fluid pod tlakom, najčešće dušik ili bijelo ulje, sve dok se ne razvije dovoljna sila da podigne klip sa utezima. Kada klip slobodno rotira u cilindru vaga je u ravnoteži sa nepoznatim tlakom u sistemu. Postoji istjecanje fluida iz sistema kroz procjep između klipa i cilindra. Film fluida omogućava neophodno podmazivanje između te dvije površine. Klip rotira da eliminira trenje. Zbog istjecanja fluida tlak u sistemu mora biti kontinuirano dodavan da bi održavao klip sa utezima u plutajućem stanju. To se često postiže upotrebom promjenjivog volumena koji funkcioniра na principu Boyle-ovog zakona [1].

Sklop klip-cilindar je glavni dio svake tlačne vase. Glavni zahtjevi na izradu sklopa su [1]:

- materijal koji ima mali koeficijent temperaturne ekspanzije i koji dobro podnosi naprezanja (volfram karbid, čelik, keramika)
- površine izrađene na mikronskom nivou
- mali i konstantni međuprostor između klipa i cilindra (od  $0,5 \mu\text{m}$  do  $1 \mu\text{m}$ , bez trenja između ta dva dijela).

Danas prevladavaju tri osnovne konfiguracije koje su prikazane na [Slika 4] [1]:

- Jednostavna konfiguracija ( $p_j=0$ )
- Uvučena ( $p_j=p$ )
- Tlakom kontrolirani zazor ( $p_j \neq p$ )



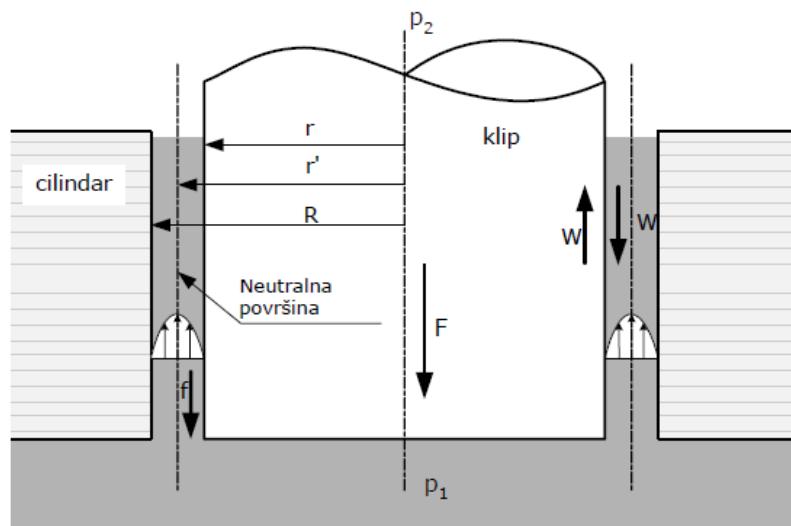
Slika 4. Osnovne konfiguracije tlačne vase [1]

## 2.2. Osnove fizike tlačne vase

Teorija sklopa klip/cilindar tlačne vase odnosi se na izravnu primjenu zakona dinamike fluida ovisno o vrsti radnog medija tlačne vase [2].

### 2.2.1. Idealni sustav

Na idealnom sklopu klip/cilindar, površina savršeno kružnog poprečnog presjeka bila bi izložena konstantom hidrostatski tlačenom fluidu. U idealnom sustavu fluid bi bio nezavisan i djelovao bi samo preko dna klipa [2].



Slika 5. Shematski prikaz idealnog sklopa klip/cilindar [2]

Pretpostavka je da klip radijusa  $r$  i cilindar radijusa  $R$  imaju savršeno glatke i ravne cilindrične površine, te da su im osi vertikalne. Tlak koji mjerimo  $p_1$  raspoređen je na dnu klipa dok je vrh klipa izložen atmosferskom tlaku [Slika 5]. Izjednačavanjem sila u stanju ravnoteže vrijedi [2]:

$$F = \pi \cdot r^2 \cdot (p_1 - p_2) + W \quad (3)$$

Gdje je  $F$  vertikalna sila koja djeluje na klip kao posljedica mase i gravitacijskog ubrzanja, a  $W$  predstavlja силу trenja nastalu na bočnoj stjenci cilindra [2].

Pretpostavljajući normalne zakone viskoznog fluida vertikalna komponenta brzine fluida u međuprostoru je nula na rubnim površinama, ima maksimum na polovici i sila trenja je tu nula, pa radijus  $r'$  označava površinu koja se zove neutralna površina [2].

Izjednačavanjem sila koje djeluju na stupac fluida na kružnom presjeku između površine klipa i neutralne površine i označavanjem sile  $f$  nastale zbog njegove mase dobivamo dopunska jednakost [2]:

$$f + W = \pi \cdot (r'^2 - r^2) \cdot (p_1 - p_2) \quad (4)$$

Odatle:

$$p_1 - p_2 = \frac{F + f}{\pi \cdot r'^2} \quad (5)$$

Treba napomenuti da opterećenje uključuje zajedno težinu klipa i težinu stupca fluida koji se nalazi u prostoru između površine klipa i neutralne površine. Zbog malih dimenzija zapora težinu fluida se zanemaruje [2].

Za takav totalno hipotetski laboratorijski sustav, i nepokretan klip, izraz za određivanje tlaka glasi [2] :

$$p_e = \frac{F}{A_e} \quad (6)$$

Gdje  $p_e$  označava razliku tlaka koji mjerimo i tlaka okoline i naziva se „efektivni tlak“ a veličina kojom primjenjena sila mora biti podijeljena da se izvede primjenjeni tlak tj. površina  $(r'^2\pi)$  koja se prepoznaje u jednadžbi (5) zove se „efektivna površina“ sklopa klip/cilindar [2]:

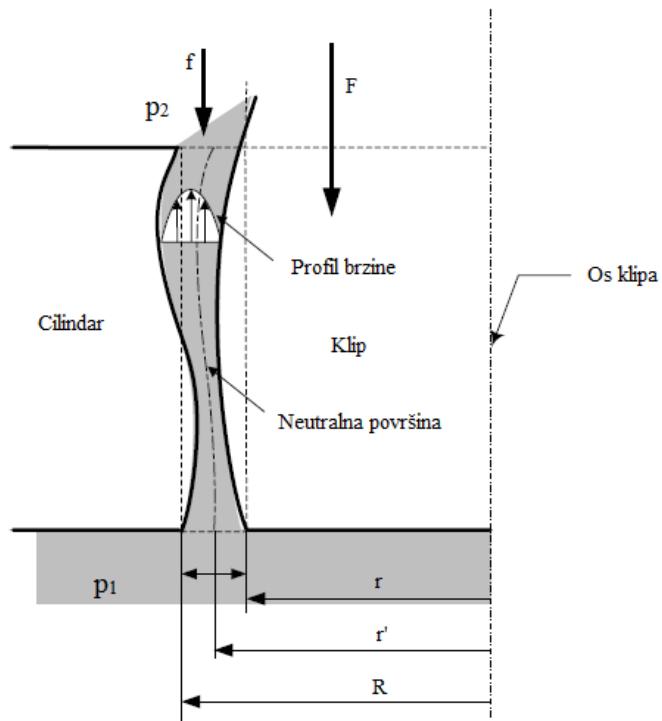
$$A_e = \pi \cdot r'^2 \quad (7)$$

Pojam efektivne površine sklopa je uveden da eliminira nepoznatu silu koja je posljedica viskoznog toka fluida između klipa i cilindra [2].

U gornjim relacijama nigdje nije definirana vrijednost  $r'$  i u literaturi se koriste određene aproksimacije za izračun točne vrijednosti. U realnim sustavima postoji ovisnost efektivne površine o tlaku i temperaturi te će one, kao i aproksimacija veličine  $r'$ , biti uključena u konačnu jednadžbu za efektivni tlak kod realnih sustava [2].

### 2.2.2. Realni sustav

U realnom laboratorijskom sustavu poznata su brojna odstupanja i klipa i cilindra od idealnog oblika. Razlozi su u nesavršenoj geometriji sklopa, rotirajućem klipu te dinamičkoj ravnoteži. Naime, klip je u ravnoteži ne onda kada se ne miče vertikalno nego kada propada u svom prirodnom omjeru. Pri tome klip rotira da se izbjegne trenje zbog direktnog kontakta sa stjenkama cilindra [2].



Slika 6. Shematski prikaz realnog sklopa klip/cilindar [2]

Uzimajući u obzir bitne korekcije koje se odnose na [1]:

- površinu (utjecaj temperature tj. temperaturno rastezanje klipa i cilindra te pojavu elastične deformacije zbog djelovanja tlaka)
- silu (varijacije gravitacijskog ubrzanja, uzgonsko djelovanje zraka i radnog fluida, površinsku napetost radnog fluida, te razliku u visini stupca)
- tlak okoline (korekcije ovise o režimu rada koji može biti pretlak ili absolutni tlak) jednadžba (6) postavljena za idealni sklop, režim pretlak prema [3] prelazi u puno realniju korelaciju:

$$p_e = \frac{\left[ \sum_i \left[ m_i \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) + (h \cdot A_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c \right]}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e) \cdot [1 + (\alpha_K + \alpha_c) \cdot (t - 20)]} \quad (8)$$

gdje je:

- $p_e$  efektivan iznos tlaka generiran na sklop
- $m_i$  prava masa i-tog utega postavljenog na sklop
- $g$  iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja
- $\rho_a$  gustoća zraka okoline
- $\rho_{mi}$  gustoća i-tog utega
- $\rho_f$  gustoća radnog medija
- $\alpha_K$  koeficijent temperaturnog rastezanja klipa
- $\alpha_c$  koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra
- $A_0$  efektivna površina sklopa pri nultom tlaku
- $t$  temperature sklopa za vrijeme ispitivanja
- $t_r$  referentna temperatura pri kojoj je mjerena  $A_0$
- $\lambda$  koeficijent elastične deformacije
- $\theta$  kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu
- $v$  volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida
- $h$  razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa
- $\Gamma$  opseg klipa
- $c$  površinska napetost radnog medija

### 2.3. Metode umjeravanja tlačnih vaga

Karakterizacija tlačnih vaga kao etalona tlaka je kompleksan postupak i zahtjeva pažljivu procjenu svih slučajnih i sistematskih faktora. Postupak umjeravanja sklopa svodi se na [2]:

- umjeravanje masa utega i klipa
- određivanje efektivne površine sklopa
- određivanje koeficijenta elastične deformacije
- određivanje ostalih karakteristika

Umjeravanje mase utega i plutajućih elemenata povjerava se laboratoriju ovlaštenom za takva mjerjenja. Aktualni istraživački problemi odnose se na precizno određivanje efektivne površine i elastične deformacije sklopa klip/cilindar kao funkcije primijenjenog tlaka. Određivanje ostalih karakteristika rutinski je ali nezaobilazan posao [2].

### 2.3.1. Određivanje efektivne površine

Metode određivanja efektivne površine tlačne vase dijele se u dvije osnovne grupe [2]:

1. one u kojima je rezultat dobiven iz primarnih načela, tj. bez povezanosti sa ostalim etalonima
2. one u kojima je rezultat dobiven metodama usporedbe sa nekim drugim fundamentalnim etalonima tlaka

Metode iz prve grupe uglavnom su ograničene na razvoj primarnih i nacionalnih etalona i odnose se na izravno određivanje preko osnovnih SI jedinica mase i duljine uz prikladni matematički model, tj. bez povezanosti sa ostalim etalonima tlaka [2].

Metode iz druge grupe su od velike važnosti kod umjeravanja etalona koji se koriste kao sekundarni i radni etaloni [2].

U metode grupe 1. spadaju [2]:

- Direktno određivanje površine iz dimenzionalnih mjerena (mjerena klipa i cilindra duž osi, mjerena odstupanja kružnosti i ravnosti koja doprinose nesigurnosti konačnog rezultata)
- Određivanje površine koristeći efekt elastične deformacije (uzima u obzir druge uzroke dimenzionalnih promjena koje nastaju zbog elastičnih deformacija nastalih zbog djelovanja tlaka kojem je sklop izložen i koje su funkcije narunutog tlaka i koje u pravilu rastu s tlakom)

Metode 2. grupe podrazumijevaju usporedbu sa nekim neovisnim etalonom, tj. u pravilu sa drugom tlačnom vagom ili cijevnim manometrom. Danas prevladavaju metode direktne usporedbe sa etalonskom tlačnom vagom („cross-floating“) dok su mješovite usporedbe prihvaćene u primjenama sa posebnim razlogom [2].

Metode usporedbe dvije tlačne vase („cross-floating“) podrazumijevaju prijenos efektivne površine jednog sklopa na drugi. Princip usporedbe je postavljanje dva sklopa, etalonskog i ispitivanog na zajednički tlačni sustav. Kada se mase obje vase podese tako da oba klipa plivaju u referentnim položajima omjer njihovih ukupnih opterećenja predstavlja omjer njihovih efektivnih površina [2].

Metode izvođenja cross-floatinga dijele se u dvije grupe koje se razlikuju prema tehnikama koje identificiraju stanje ravnoteže [2]:

- Metoda propadanja
- Metoda mjerena razlike tlaka

---

Metode proračuna efektivne površine sklopa klip/cilindar [2]:

- p-metoda (izračun efektivne površine vrši se obrtanjem jednadžbe (8))
- $\Delta p$ -metoda (temelji se na proračunu prirasta tlaka)

### 2.3.2. *Određivanje koeficijenta elastične deformacije*

Koeficijent elastične deformacije,  $\lambda$ , koji se pojavljuje u jednadžbi (8) je vrlo važan parametar sklopa pogotovo u radu na visokim tlakovima. Ovisi o dizajnu sklopa i drugim radnim parametrima. Može se određivati teorijski ili eksperimentalno [2].

#### 2.3.2.1. *Teorijsko određivanje*

Teorijske metode temelje se na traženju  $\lambda$  analitičkim ili numeričkim rješenjem sustava diferencijalnih jednadžbi. Najraširenija je metoda pojednostavljenog proračuna korištenjem Lame-ove jednadžbe koja predstavlja linearu distribuciju tlaka u procjepu sklopa klip/cilindar [4].

U posljednjih nekoliko godina razvijeni su proračuni korištenjem metoda konačnih elemenata.

#### 2.3.2.2. *Eksperimentalno određivanje*

Tehnike koje se najčešće koriste za određivanje koeficijenta elastične deformacije efektivne površine sklopa klip/cilindar su [2]:

- Crossfloating
- Metoda sličnosti
- Metode protjecanja

Nedostatci eksperimentalnih metoda se nadopunjaju razvojem nove klase računskih tehniku za predviđanje efekta deformacije. Općenito,  $\lambda$  vrijednosti dobivene usporedbom dva sklopa sličnih efektivnih površina se dobro slažu sa vrijednostima dobivenim iterativnim metodama [2].

### 3. METODE PROCJENE MJERNE NESIGURNOSTI

#### 3.1. Definicije i procjena mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost definira se kao parametar pridružen mjernom rezultatu koji označava rasipanje vrijednosti, što se smije razborito pripisati mjernej veličini [5]. Mnogi su izvori mjerne nesigurnosti, no prema preporukama sastavnice mjerne nesigurnosti svrstavaju se u dvije osnovne skupine (skupina A i skupina B) [1].

Izvori nesigurnosti u mjerenuju [2]:

- nepotpuno određenje mjerne veličine
- nesavršeno ostvarenje određenja mjerne veličine
- nedovoljno poznavanje djelovanja uvjeta okoliša na mjerenuje ili nesavršeno mjerenuje uvjeta okoliša
- konačno razlučivanje instrumenta ili prag pokretljivosti
- netočne vrijednosti mjernih etalona
- netočne vrijednosti konstanti i drugih parametara dobivenih iz vanjskih izvora i korištenih u proračunu
- približna određenja i pretpostavke uključene u mjernej metodu i postupak
- promjene ponovljenih opažanja mjerene veličine u očigledno istovjetnim uvjetima

##### 3.1.1. Procjena nesigurnosti tipa A

Nesigurnost tipa A određuje se eksperimentalno, ponavljanjem mjerenuje i računanjem standardnog odstupanja ( $\sigma$ ) rezultata ponovljenih mjerenuja [2].

Obrada rezultata temelji se na matematičkoj statistici. Niz od  $n$  ponovljenih mjerenuja smatramo slučajnim uzorkom osnovnog skupa od beskonačno mnogo mogućih rezultata mjerenuja iste (vremenski nepromjenjive) mjerne veličine. Aritmetička sredina uzorka ( $\bar{x}$ ) i standardno odstupanje ( $\sigma$ ) slučajne su varijable i razlikuju se od uzorka do uzorka. Aritmetičke sredine uzorka gomilaju se oko aritmetičke sredine osnovnog skupa ( $\mu$ ) prema određenim zakonitostima (npr. normalna razdioba ili Studentova razdioba). Na temelju tih zakona može se izračunati kolika je vjerojatnost da se slučajna varijabla nalazi u nekom rasponu vrijednosti, npr. u intervalu simetrično postavljenom u odnosu na aritmetičku sredinu osnovnog skupa  $\mu$ . Pod vjerojatnošću nekog događaja podrazumijeva se omjer broja ostvarenja tog događaja i broja svih mogućih drugih događaja koji čine osnovni skup [2].

Zadatak mjeritelja je da na temelju ograničenog broja mjerena odnosno na temelju parametara uzorka procjeni aritmetičku sredinu osnovnog skupa tj. vrijednost mjerene veličine (uz pretpostavku da su sve sustavne pogreške jednake nuli). Aritmetička sredina uzorka najbolje aproksimira pravu vrijednost mjerene veličine ali općenito nije jednaka (pravoj) vrijednosti mjerene veličine, i ne znamo da li se i koliko od nje razlikuje. Međutim na temelju poznatih parametara uzorka i zakonitosti njihove razdiobe može se procijeniti raspon vrijednosti, tzv. interval pouzdanosti, u kojem očekujemo s unaprijed odabranom pouzdanošću da se nalazi prava vrijednost mjerene veličine [2].

Normalna ili Gaussova razdioba je najvažnija i najčešća razdioba u primjeni matematičke statistike. To je zvonolika simetrična, jednotjedena funkcija kontinuirane slučajne varijable  $x$ , jednoznačno određena dvama parametrima (aritmetičkom sredinom osnovnog skupa  $\mu$  i standardnim odstupanjem  $\sigma$ ) [2].

### 3.1.2. Procjena nesigurnosti tipa B

Generalno, sve komponente nesigurnosti mogli bi odrediti eksperimentalno pa bi sve one bile nesigurnosti tipa A, ali zbog ograničenog vremena i sredstava mjeri rezultat je često proizvod samo jednog mjerena, pa se nesigurnost procjenjuje na temelju informacije kojom raspolažemo iz drugih izvora [2].

Procjena nesigurnosti tipa B može se temeljiti na [2]:

- specifikacijama mjerne opreme
- podatcima o umjeravanju mjerila
- nesigurnosti korištenih podataka koji su preuzeti iz određenih izvora
- podatcima o ponovljivosti i obnovljivosti
- podatcima o ranije provedenim sličnim mjerenjima
- iskustvu i znanju o svojstvima relevantnih mjerila i mernih objekata
- raznim drugim informacijama kao što su: zaokruživanje, razlučivost i histereza

### 3.2. Određivanje sastavljene normalne nesigurnosti

Mjerena veličina  $Y$  ovisi o više ulaznih veličina  $X_1, X_2, \dots, X_n$  prema funkciji  $f$  koje mogu biti međusobno neovisne (nekorelirane) ili korelirane [2].

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (9)$$

#### 3.2.1. Nekorelirane ulazne veličine

U ovom slučaju promjena jedne od veličina ne uzrokuje promjenu niti jedne od preostalih ulaznih veličina. Sastavljena normalna nesigurnost veličine  $y$  označena kao  $u_c(y)$  jednaka je pozitivnoj vrijednosti drugog korijena sastavljene varijance [2]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (10)$$

a  $u(x_i)$  su normalne nesigurnosti ulaznih veličina  $x_1, x_2, \dots, x_n$  koje se procjenjuju i mogu biti tipa A ili tipa B. Jednadžba (10) se temelji na prvom približenju Taylorovog reda. Kada je funkcija  $f$  značajno nelinearna potrebno je računati i sa višim članovima Taylorovog reda [2].

Parcijalne derivacije u jednadžbi (10) nazivaju se koeficijenti osjetljivosti  $c_i$  i određuju se za vrijednosti  $X_i=x_i$ . Koeficijenti osjetljivosti pokazuju za koliko se promijeni procijenjena veličina  $y$  kad se pojedina od procijenjenih veličina  $x_1, x_2, \dots, x_n$  promijeni za mali iznos  $\Delta x_i$  [2].

#### 3.2.2. Korelirane ulazne veličine

Ako ulazne veličine nisu međusobno neovisne, dakle koreliraju sastavljena varijancija računa se prema jednadžbi (11). Ovdje je izdvojen poseban slučaj kada sve ulazne veličine koreliraju sa koreacijskim koeficijentom 1 [2].

$$u_c^2(y) = \left( \sum_{i=1}^n c_i \cdot u(x_i) \right)^2 = \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2 \quad (11)$$

Sastavljena standardna nesigurnost  $u_c(y)$  u tom slučaju je jednostavno jednaka pozitivnom drugom korijenu linearног zbroja članova koji predstavljaju promjenu procjene izlazne veličine  $y$  proizvedene standardnom nesigurnošću svake od procjena ulaznih veličina  $x_i$  [2].

### 3.3. Određivanje proširene nesigurnosti

Proširena nesigurnost označava se sa  $U$ , a dobiva se množenjem sastavljene normalne nesigurnosti  $u_c(y)$  faktorom proširenja  $k$  [2]:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (12)$$

Izbor faktora proširenja ovisi o razini pouzdanosti koja se želi dosegnuti. Kada je vjerojatnosna razdioba približno normalna i broj stupnjeva slobode dovoljno velik  $k$  obično iznosi 2 ili 3 što redom odgovara razini pouzdanosti od 95% odnosno 99%. Razina vjerojatnosti od 95% znači da je vjerojatnost 1:20 da će (prava) vrijednost mjerene veličine biti izvan raspona određenog proširenom nesigurnošću, odnosno 19:20 da će biti unutar tog raspona. Za komponentu proširene nesigurnosti ne vrijedi zakon geometrijskog zbrajanja. Zato pravilan postupak određivanja proširene nesigurnosti zahtjeva da se prvo izračuna ukupna standardna nesigurnost i tek na kraju pomnoži sa odgovarajućim faktorom proširenja [2].

## 4. STATISTIČKE METODE ZA OCJENU REZULTATA UMJERAVANJA

Rezultati provedenih mjerenja često se moraju pretvoriti u statistički proračun izvedbe radi lakšeg tumačenja i mogućnosti usporedbe sa zadanim ciljevima. Cilj je da se utvrdi odstupanje od dodijeljene vrijednosti na način kako bi se omogućila usporedba s kriterijima izvedbe. U nastavku [Tablica 1] prikazane su neke statističke metode za ocjenu rezultata umjeravanja.

**Tablica 1. Pregled nekih statističkih metoda za ocjenu rezultata umjeravanja [6]**

razlika	$D$	$D = (x - X)$	$x$ - rezultat sudionika $X$ - dodijeljena vrijednost
postotna razlika	$D\%$	$D\% = \frac{(x - X)}{X} \times 100$	
$z$ vrijednost	$z$	$z = \frac{(x - X)}{\hat{\sigma}}$	$\hat{\sigma}$ - standardno odstupanje ocjenjivanja sposobnosti
$z'$ vrijednost	$z'$	$z' = \frac{(x - X)}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + u_x^2}}$	$u_x$ - mjerna nesigurnost dodijeljene vrijednosti
zeta vrijednost	$\zeta$	$\zeta = \frac{(x - X)}{\sqrt{u_x^2 + u_x^2}}$	$u_x$ - procjena mjerne nesigurnosti sudionikovog rezultata $x$
$E_n$ broj	$E_n$	$E_n = \frac{(x - X)}{\sqrt{U_x^2 + U_x^2}}$	$U_x$ - proširena mjerna nesigurnost dodijeljene vrijednosti $X$ (utvrđena u referentnom laboratoriju) $U_x$ - proširena mjerna nesigurnost sudionikovog rezultata $x$
$E_z$ vrijednost	$E_z$	$E_{z-} = \frac{x - (X - U_x)}{U_x}$ $E_{z+} = \frac{x - (X + U_x)}{U_x}$	

Za ocjenu rezultata umjeravanja u ovom radu koristiti će se statistička metoda koja uključuje izračun  $E_n$  statističke vrijednosti.

## 5. OPIS MJERNIH LINIJA I PROVEDBE UMJERAVANJA

U ovom poglavlju opisan je eksperimentalni dio koji je izveden u Laboratoriju za procesna mjerena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Opisane su mjerne linije i postupci umjeravanja tlačnih vaga koji koriste ulje i plin kao tlačni medij pomoću prijenosnog etalona, pretvornika tlaka. Također su dani izrazi za proračun efektivnog tlaka, dok su ostale veličine preuzete iz prethodnih umjeravanja tlačnih vaga (npr. koeficijent elastične deformacije).

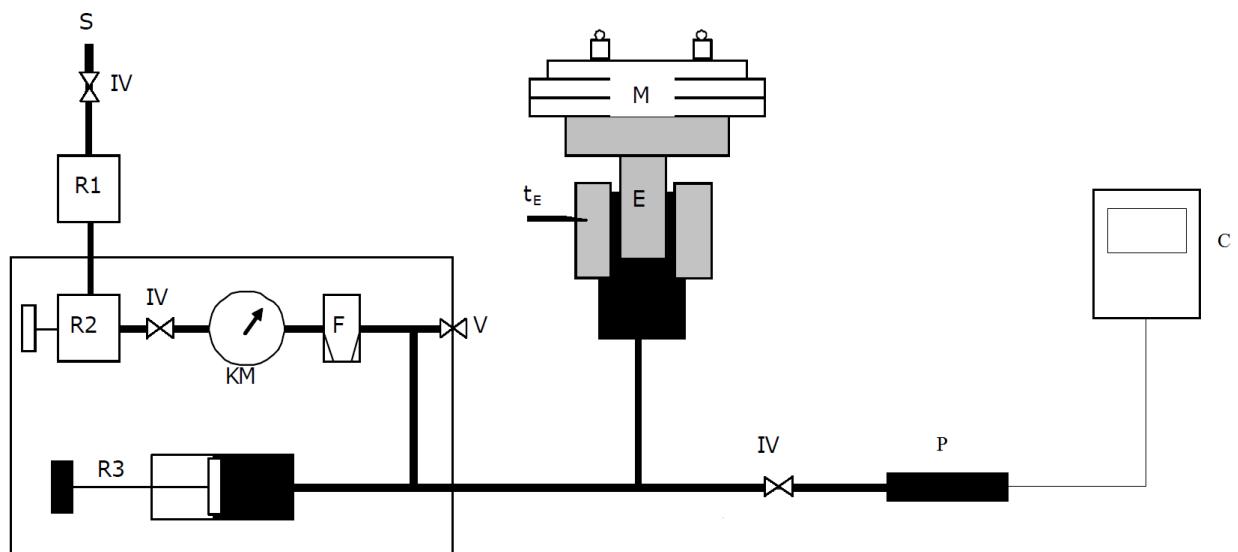
Rezultati dobiveni mjerjenjima na spomenutim mernim linijama korišteni su u postupku procjene mjerne nesigurnosti i za usporedbu ta dva etalonska tlačna sustava.

Prikaz rezultata mjerena, rezultati proračuna efektivnog tlaka i rezultati proračuna budžeta mjerne nesigurnosti dani su u šestom poglavlju.

### 5.1. Plinski etalonski tlačni sustav

#### 5.1.1. Opis i glavne karakteristike mjerne linije

Ovaj etalonski tlačni sustav koristi dušik kao radni medij. Na njemu su provedena mjerena tlaka i prema jednadžbi danoj u nastavku proračunati efektivni tlakovi. Ova tlačna linija može se koristiti i za umjeravanje ostalih mjerila tlaka u području do 70 bar. Mjerna linija prikazana je na [Slika 7].



**Slika 7. Prikaz plinske etalonske mjerne linije**

Glavni dijelovi mjerne linije [Slika 7]:

S	Izvor tlaka	IV	Izolacijski ventil
R1	Regulator tlaka	E	Etalonski sklop klip/cilindar
R2	Precizni regulator	t <sub>E</sub>	Termometar etalonskog sklopa
F	Filter	P	Pretvornik tlaka
KM	Kontrolni manometar	C	Pokazivač tlaka
R3	Promjenjivi volumen	M	Mase (set utega)

Ostali dijelovi linije:

- Postolje za etalonski sklop klip/cilindar s priključcima za ostalu opremu
- Barometar
- Higrometar
- Termometar
- Set malih utega
- Oprema tlačne vase za prikaz položaja klipa i ostalih parametara

Glavni dio mjerne linije je etalonski sklop klip/cilindar.

**Tablica 2. Karakteristike plinske tlačne vase****Proizvodač/oznaka tlačne vase**

DHI/PG-7601

**Mjerno područje**

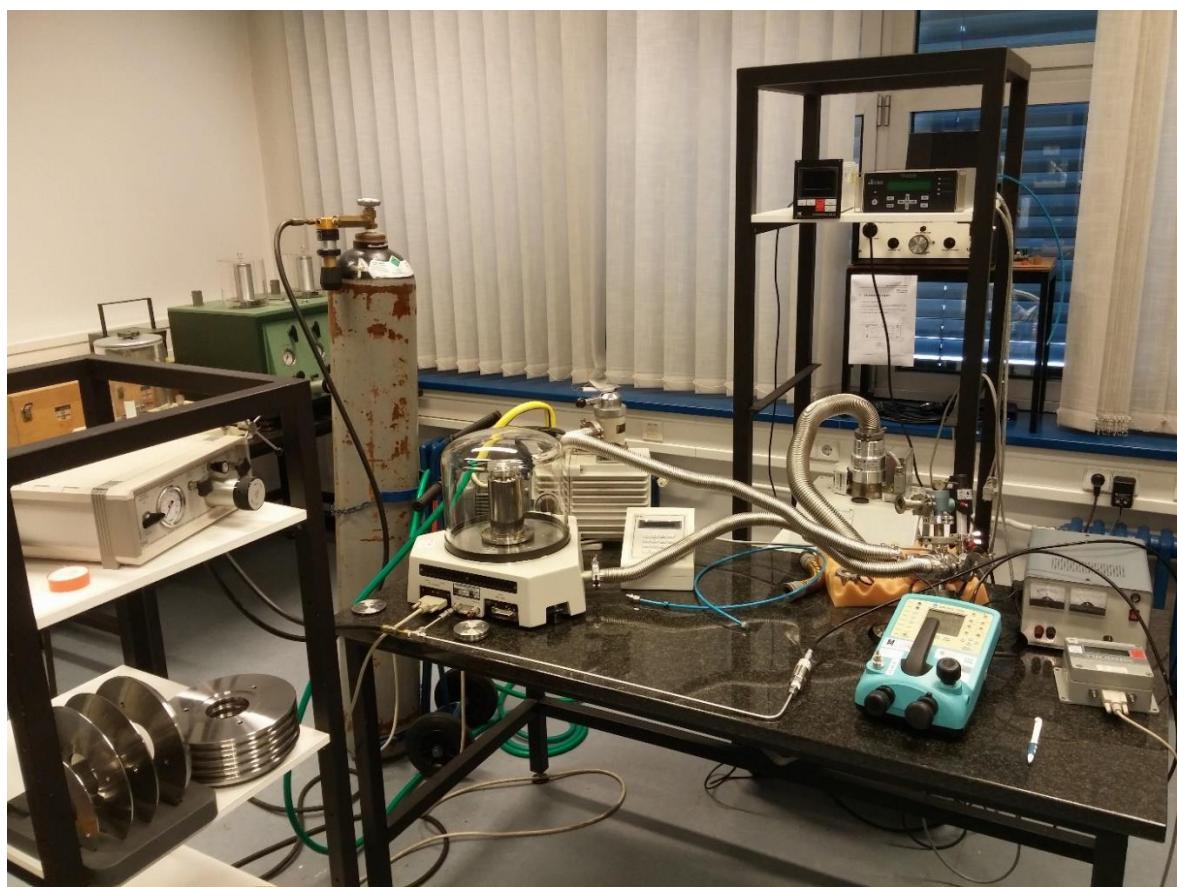
0-7 MPa

**Materijal klipa**

Volfram karbid

**Materijal cilindra**

Čelik

**Efektivna površina** $4.901892 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ **Koeficijent toplinskog rastezanja klipa i cilindra** $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ **Opseg klipa** $2.481285 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ **Koeficijent distorzije (elastične deformacije)** $-2.35 \cdot 10^{-7} \text{ bar}^{-1}$ **Volumen za korekciju zbog uzgonskog djelovanja dušika** $0 \text{ m}^3$ **Slika 8. Plinska etalonska mjerna linija**

### 5.1.2. Princip rada mjerne linije

Tlak tlačnog medija (dušika) smanjuje se prvo pomoću grubljeg regulatora  $R1$  a zatim se vrlo precizno podešava na željeni nominalni tlak koristeći regulator  $R2$ . Iako se koristi dušik iznimno visoke čistoće (99.999%) on prolazi kroz filter,  $F$ , prije ulaska u sklop klip/cilindar da bi se zadržale čestice vode, ulja ili praštine.

Tlak u sustavu generira se pomoću sklopa klip/cilindar, dodajući potrebnu masu. Dodatna masa dodaje se pomoću pripadajućeg seta utega.

U sustav je spojen pretvornik tlaka sa pripadajućim pokazivačem [Tablica 4] na kojem se očitava izmjereni tlak na etalonskoj liniji. Spomenuti pretvornik tlaka [Tablica 3] koristi se kao prijenosni etalon za usporedbu opisane etalonske linije sa uljnom etalonskom linijom koja će biti opisana u nastavku.

**Tablica 3. Karakteristike pretvornika tlaka**

Proizvodač	Druck
Tip	Solid Type B
Mjerno područje	0 – 135 bar
Razred točnosti	0.025%

**Tablica 4. Karakteristike pokazivača**

Proizvodač	Druck
Tip	DPI 615
Podjela skale	0.01 bar

### **5.1.3. Postupak mjerena**

Nakon spajanja mjerne linije prikazane na [Slika 8] napravljena su dva niza mjerena tlaka u rasponu od 0 do 70 bar u 8 točaka, pravilo raspoređenih u mjernom području.

Za svaku točku stanje ravnoteže postignuto je dodavanjem utega iz pripadajućeg seta na sklop klip/cilindar. Stanje ravnoteže postignuto je kad se klip nađe u traženom položaju, a to se očitalo pomoću pripadajuće opreme priključene na tlačnu vagu.

Za vrijeme mjerena klip rotira da se izbjegne trenje zbog direktnog kontakta sa stjenkama cilindra. Vrijeme rotacije automatski regulira sam sustav tlačne vase, a rotacija klipa vrši se pomoću ugrađenog elektromotora.

Kada je postignuto stanje ravnoteže za svaku točku se zapisuju kombinacije korištenih utega i očitani tlak na pokazivaču. Temperatura okoliša, tlak okoliša i relativna vlažnost očitani su neposredno prije samog mjerena.

Nakon izvršenog mjerena izračunati su efektivni tlakovi za opisani etalonski sklop.

### 5.1.4. Proračun efektivnog tlaka

Primjenom jednadžbe (8) na plinski etalonski sklop (indeks P) određen je efektivni tlak generiran na etalonskoj vagi koja koristi plin kao radni medij:

$$p_{eP} = \frac{\left[ \sum_{Pi} \left[ m_{Pi} \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mPi}} \right) + (h \cdot A_P - v_P) \cdot (\rho_{N_2} - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta_P \right]}{A_{0P} \cdot [1 + (\alpha_{KP} + \alpha_{CP}) \cdot (t_P - 20)]} \quad (13)$$

gdje su:

- $p_{eP}$  efektivan iznos tlaka generiran na sklopu
- $m_{Pi}$  prava masa i-tog utega postavljenog na sklop
- $g$  iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja
- $\rho_a$  gustoća zraka okoline
- $\rho_{mi}$  gustoća i-tog utega
- $\rho_{N_2}$  gustoća radnog medija
- $\alpha_{KP}$  koeficijent temperaturnog rastezanja klipa
- $\alpha_{CP}$  koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra
- $A_{0P}$  efektivna površina sklopa pri nultom tlaku
- $t_P$  temperature sklopa za vrijeme ispitivanja
- $\theta_P$  kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu
- $v_P$  volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida
- $h$  razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa

Mase svih utega izmjerene su u Laboratoriju za masu koji je nositelj državnog etalona mase, sljediv prema međunarodnim etalonima. Efektivan površina, korekcijski volumen i koeficijenti toplinskog naprezanja poznati su iz izvješća o umjeravanju etalonskog sklopa. Vrijednost lokalnog gravitacijskog ubrzanja poznata je iz prijašnjih mjerena.

Gustoća dušika za različite tlakove proračunata je prema:

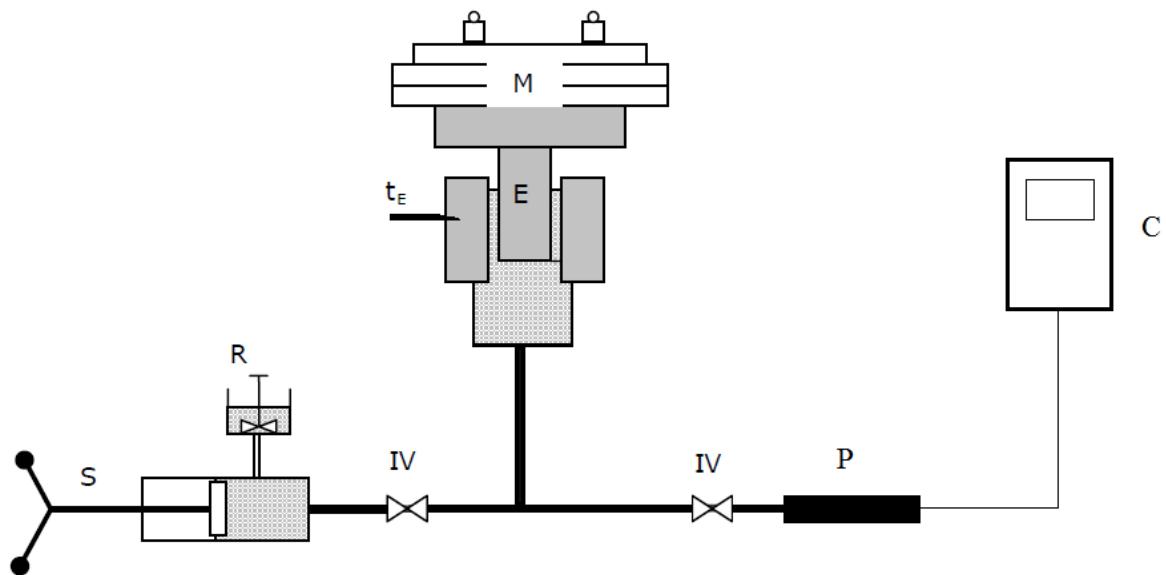
$$\rho_{N2,p,t} = \rho_{N2,20^{\circ}\text{C},1\text{bar}} \cdot \left[ \frac{p_{abs} \cdot (T + 20K)}{1 \text{ bar} \cdot (T + t)} \right] \quad (14)$$

gdje je  $T=273.15 \text{ K}$ ,  $\rho_{N2,20^{\circ}\text{C},1\text{bar}}$  gustoća dušika pri  $20^{\circ}\text{C}$  i tlaku od 1 bar,  $p_{abs}$  je absolutni tlak u sustavu koji se računa kao zbroj efektivnog tlaka i tlaka okoline.

## 5.2. Uljni etalonski tlačni sustav

### 5.2.1. Opis i glavne karakteristike mjerne linije

Ovaj etalonski tlačni sustav koristi ulje kao radni medij. Na njemu su provedena mjerena tlaka i prema jednadžbi danoj u nastavku proračunati efektivni tlakovi. Ova tlačna linija može se koristiti i za umjeravanje ostalih mjerila tlaka u području do 70 bar.



Slika 9. Prikaz uljne etalonske mjerne linije

Glavni dijelovi mjerne linije [Slika 9]:

S	Regulator tlaka	IV	Izolacijski ventil
R	Izvor tlaka	E	Etalonski sklop klip/cilindar
M	Mase (set utega)	t <sub>E</sub>	Termometar etalonskog sklopa
P	Pretvornik tlaka	C	Pokazivač tlaka

Ostali dijelovi linije:

- Postolje za etalonski sklop klip/cilindar
- Set malih utega
- Barometar
- Higrometar
- Termometar
- Pomično mjerilo

Glavni dio mjerne linije je etalonski sklop klip/cilindar.

**Tablica 5. Karakteristike uljne tlačne vase****Proizvodač/oznaka tlačne vase**

Pressurements/X0013

**Mjerno područje**

0-7 MPa

**Materijal klipa**

Volfram karbid

**Materijal cilindra**

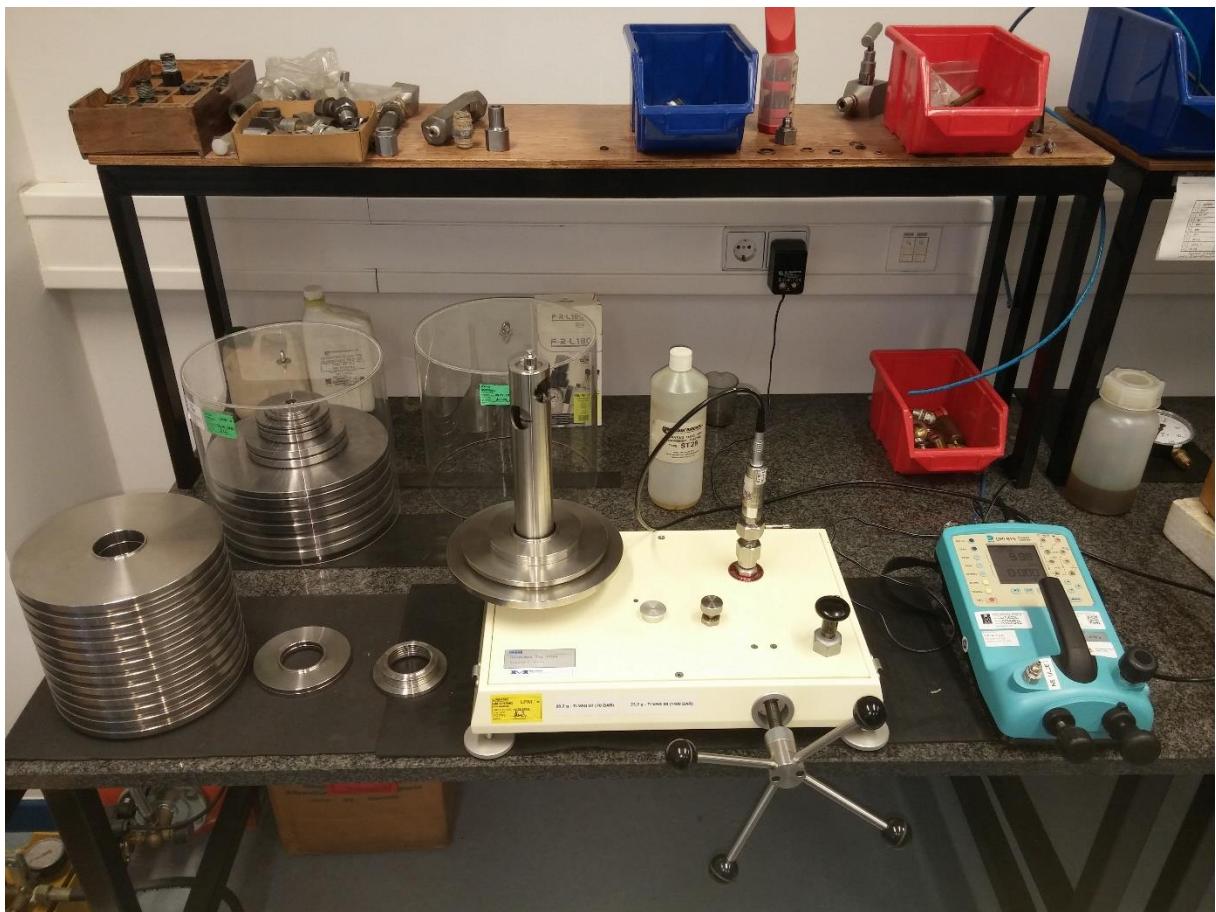
Čelik

**Efektivna površina** $8.07208 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ **Gustoća ulja**914 kg/m<sup>3</sup>**Površinska napetost ulja** $3.12 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$ **Koeficijent toplinskog rastezanja klipa i cilindra** $1.66 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ **Opseg klipa** $3.184106 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ **Koeficijent distorzije (elastične deformacije)**0 bar<sup>-1</sup>**Volumen za korekciju zbog uzgonskog djelovanja dušika** $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$

### 5.2.2. Princip rada mjerne linije

Princip rada ove mjerne linije sličan je kao i one opisane u prethodnom poglavlju osim što je izvor tlaka ulje kojemu se ručno podiže tlak na samoj tlačnoj vagi. Tlak u sustavu se i u ovom slučaju generira dodavanjem utega na sklop klip/cilindar.

Na ovaj sustav spojen je pretvornik tlaka s pripadajućim pokazivačem koji se koristi kao prijenosni etalon da bi se navedene tlačne vase (plinska i uljna) mogle uspoređivati. Karakteristike pretvornika tlaka i pokazivača dane su u [Tablica 3] i [Tablica 4].



Slika 10. Uljna etalonska mjerna linija

**5.2.3. Postupak mjeranja**

Postupak mjeranja potpuno je isti kao i za prethodni plinski etalonski sustav.

Korištena uljna tlačna vaga nešto je starija od opisane plinske tlačne vase tako da se rotacija klipa vršila ručno.

Ravnotežni položaj kod ove tlačne vase očitava se bez dodatne opreme već se zna točan položaj klipa u kojem se on nađe kad je u ravnotežnom položaju.

Nakon izvršenog mjeranja izračunati su efektivni tlakovi za opisani etalonski sklop.

### 5.2.4. Proračun efektivnog tlaka

Primjenom jednadžbe (8) na uljni etalonski sklop (indeks U) određen je efektivni tlak generiran na etalonskoj vagi koja koristi ulje kao radni medij:

$$p_{eU} = \frac{\left[ \sum_{Ui} \left[ m_{Ui} \cdot \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mUi}} \right) + (h \cdot A_{0U} - v_U) \cdot (\rho_U - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta_U + \Gamma_U \cdot c_U \right]}{A_{0U} \cdot (1 + \lambda_U \cdot p_{eU}) \cdot [1 + (\alpha_{KU} + \alpha_{cU}) \cdot (t_U - 20)]} \quad (15)$$

gdje su:

$p_{eU}$  efektivan iznos tlaka generiran na sklopu

$m_{Ui}$  prava masa i-tog utega postavljenog na sklop

$g$  iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja

$\rho_a$  gustoća zraka okoline

$\rho_{mi}$  gustoća i-tog utega

$\rho_U$  gustoća radnog medija

$\alpha_{KU}$  koeficijent temperaturnog rastezanja klipa

$\alpha_{cU}$  koeficijent temperaturnog rastezanja cilindra

$A_{0U}$  efektivna površina sklopa pri nultom tlaku

$t_U$  temperature sklopa za vrijeme ispitivanja

$\lambda_U$  koeficijent elastične deformacije

$\theta_U$  kut nagiba osi klipa u odnosu na vertikalu

$v_U$  volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida

$h$  razlika visina etalonskog i ispitivanog sklopa

$\Gamma_U$  opseg klipa

$c_U$  površinska napetost radnog medija

## 6. ANALIZA REZULTATA UMJERAVANJA

U okviru ovog rada ispitivana su dva etalonska tlačna sustava do 7 MPa. Karakteristike komponenti oba etalonska sustava prikazane su u tablicama [Tablica 2], [Tablica 3], [Tablica 4], [Tablica 5]. Prikaz etalonskih tlačnih sustava dan je u prethodnim poglavlju [Slika 7], [Slika 9]. Prijenosni etalon, u ovom slučaju pretvornik tlaka s pripadajućim pokazivačem, sastavni je dio oba etalonska sustava i korišten je za usporedbu dvije tlačne vase, uljne i plinske.

U ovom poglavlju biti će prikazani rezultati umjeravanja navedenih etalonskih sustava i prikazati će se:

- Karakteristike masa korištenih pri umjeravanju
- Efektivni tlakovi za oba sustava
- Budžeti mjernih nesigurnosti
- Usporedba dvaju etalonskih sustava

Za proračune navedenih vrijednosti korišteni su matematički modeli prikazani u trećem i četvrtom poglavlju.

Za procjenu rezultata umjeravanja koristiti će se statistička metoda koja uključuje izračun  $E_n$  statističke vrijednosti.

## 6.1. Plinski etalonski tlačni sustav

### 6.1.1. Karakteristike korištenih masa

Tablica 6. Karakteristike masa kod plinskog etalonskog sustava

Oznaka utega	Masa utega (g)	Nesigurnost mase (g)	Nominalni tlak (bar)	Gustoća utega (kg/m <sup>3</sup> )	Nesigurnost gustoće (kg/m <sup>3</sup> )
o.u.	200,00350	0,1000	0,400	10080,0	75
dodatak	300,00340	0,0000	0,600	7975,0	75
1	100,00110	0,0004	0,200	7975,0	75
2	199,99820	0,0006	0,400	7975,0	75
3	200,00160	0,0006	0,400	7975,0	75
4	500,0031	0,0015	1,000	7975,0	75
5	1000,013	0,0025	2,001	7975,0	75
6	2000,026	0,0058	4,001	7975,0	75
7	2000,026	0,0046	4,001	7975,0	75
8	4500,024	0,0067	9,002	7975,0	75
9	5000,044	0,0089	10,003	7975,0	75
10	5000,062	0,0086	10,003	7975,0	75
11	5000,011	0,0072	10,003	7975,0	75
12	5000,044	0,0077	10,003	7975,0	75
13	5000,035	0,0090	10,003	7975,0	75

### 6.1.2. Prikaz korištenih kombinacija utega i efektivnog tlaka

**Tablica 7. Prikaz kombinacija utega kod plinskog etalonskog sustava**

Broj ispitnih točaka	Tlak (bar)	Oznaka korištenog utega [Tablica 6]										Temperatura sklopa (°C)	Efektivni tlak (bar)
1	0,00											24,3	0,00
2	10,00	4		6	7							24,3	10,001
3	20,00	4		6	7		9					24,3	20,002
4	30,00	4		6	7		9	10				24,3	30,002
5	40,00	4		6	7		9	10	11			24,3	40,003
6	50,00	4		6	7		9	10	11	12		24,3	50,004
7	60,00	4		6	7		9	10	11	12	13	24,3	60,005
8	70,00		5	6	7	8	9	10	11	12	13	24,3	70,006

### 6.1.3. Prikaz izračuna efektivnog tlaka

Proračun efektivnog tlaka za plinski etalonski sustav proveden je prema jednadžbi (13). Radi boljeg prikaza rezultata odvojen je proračun sile i efektivne površine.

Gustoća dušika, potrebna za izračun efektivnog tlaka, računa se prema jednadžbi (14) prikazanoj u prethodnom poglavlju.

**Tablica 8. Proračun efektivnog tlaka za plinski etalonski sustav**

Broj ispitnih točaka	Gustoća zraka (kg/m <sup>3</sup> )	Sila (N)	Efektivna površina (m <sup>2</sup> )	Efektivni tlak (bar)
1	1,18	0,00	$4,90208 \cdot 10^{-5}$	0,00
2	1,18	49,024	$4,90207 \cdot 10^{-5}$	10,001
3	1,18	98,049	$4,90206 \cdot 10^{-5}$	20,002
4	1,18	147,073	$4,90205 \cdot 10^{-5}$	30,002
5	1,18	196,097	$4,90204 \cdot 10^{-5}$	40,003
6	1,18	245,121	$4,90202 \cdot 10^{-5}$	50,004
7	1,18	294,145	$4,90201 \cdot 10^{-5}$	60,005
8	1,18	343,170	$4,90200 \cdot 10^{-5}$	70,006

### 6.1.4. Budžeti mjerne nesigurnosti

Ovdje će se prikazati izračun budžeta mjerne nesigurnosti za sve ispitne točke. Mjerna nesigurnost proračunata je kao proširena mjerna nesigurnost i za proračun je korišten pripadajući matematički model prikazan u trećem poglavlju.

**Tablica 9. Mjerna nesigurnost po točkama za plinski etalonski sustav**

Ispitna točka 2, p=10,001 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,00040003	0,5	0,00000004
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00022002	0,57737	0,00000002
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )				0,00002506
Mjerna nesigurnost (bar)				0,010

Nastavak tablice je na idućoj stranici.

Ispitna točka 3, p=20,002 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,00080006	0,5	0,00000016
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00044003	0,57737	0,00000006
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )
				0,00001689
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,008
Ispitna točka 4, p=30,002 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,0012001	0,5	0,00000036
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00066005	0,57737	0,00000015
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )
				0,00001717
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,008

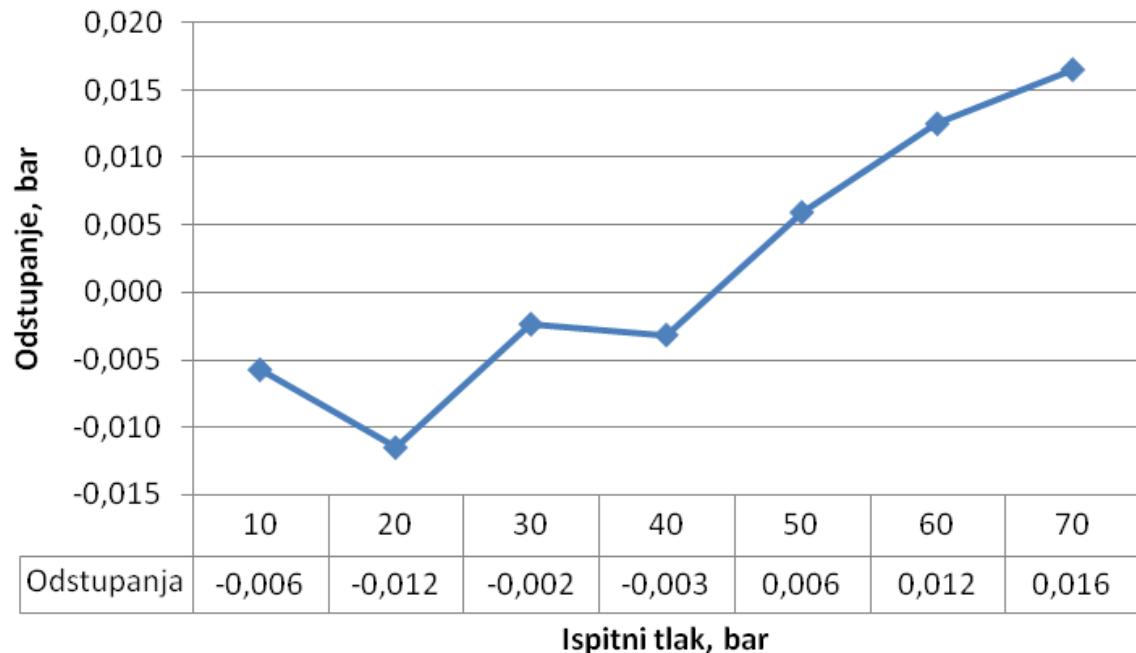
Ispitna točka 5, p=40,003 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar $^2$ )
Etalon	Umjernica	0,00160013	0,5	0,00000064
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00088007	0,57737	0,00000026
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar $^2$ )
				0,00001715
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,008
Ispitna točka 6, p=50,004 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar $^2$ )
Etalon	Umjernica	0,00200016	0,5	0,000001
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00110009	0,57737	0,0000004
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar $^2$ )
				0,00001807
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,009

Ispitna točka 7, p=60,005 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,0024002	0,5	0,00000144
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00132011	0,57737	0,00000058
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	-0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )
				0,00002703
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,010
Ispitna točka 8, p=70,006 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,00280024	0,5	0,00000196
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00154013	0,57737	0,00000079
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Ponovljivost	Mjerenje	0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )
				0,00002776
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,011

Tablica 10. Prikaz mjernih nesigurnosti i odstupanja plinskog etalonskog sustava

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona (bar)	Pokazivanje pokazivača (bar)			Srednja vrijednost (bar)	Odstupanje (bar)	Ponovljivost (bar)	Histereza (bar)	Nesigurnost umjeravanja (bar)
		Uzlazno	Silazno	Uzlazno					
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,008
2	10,001	9,990	10,000	9,990	9,995	-0,006	0,000	0,010	0,010
3	20,002	19,990	19,990	19,990	19,990	-0,012	0,000	0,000	0,008
4	30,002	30,000	30,000	30,000	30,000	-0,002	0,000	0,000	0,008
5	40,003	40,000	40,000	40,000	40,000	-0,003	0,000	0,000	0,008
6	50,004	50,010	50,010	50,010	50,010	0,006	0,000	0,000	0,009
7	60,005	60,020	60,020	60,010	60,018	0,012	-0,010	0,000	0,010
8	70,006	70,020	70,020	70,030	70,023	0,016	0,010	0,000	0,011

U gornjoj tablici [Tablica 10] dan je cjeloviti prikaz mjernih nesigurnosti za sve ispitne točke. Prikazane su i analizirane vrijednosti dobivene mjerenjem na plinskoj etalonskoj liniji i vidljiva su odstupanja kod svih ispitnih točki.



**Slika 11. Prikaz odstupanja plinskog etalonskog sustava za ispitne točke**

Iz danog prikaza odstupanja vidljivo je da su odstupanja plinskog etalonskog sustava najveća pri većim tlakovima.

Detaljnija analiza rezultata biti će prikazana na kraju ovog poglavlja kod usporedbe plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava.

## 6.2. Uljni etalonski tlačni sustav

### 6.2.1. Karakteristike korištenih masa

Tablica 11. Karakteristike masa kod uljnog etalonskog sustava

Oznaka utega	Masa utega (g)	Nominalni tlak (bar)	Gustoća utega (kg/m <sup>3</sup> )
o.u.	959,2140	0,12	8280,0
dodatak	256,0940	0,34	7900,0
1	4112,8128	5,0	7900,0
2	4112,5678	5,0	7900,0
3	4112,8028	5,0	7900,0
4	4112,6378	5,0	7900,0
5	4112,7578	5,0	7900,0
6	4112,5428	5,0	7900,0
7	4112,7428	5,0	7900,0
8	4112,7328	5,0	7900,0
9	4112,7478	5,0	7900,0
10	4112,7428	5,0	7900,0
11	4112,7978	5,0	7900,0
12	4112,7878	5,0	7900,0
13	4112,6178	5,0	7900,0
14	2056,3739	2,5	7900,0
15	411,2788	0,5	7900,0
16	411,2793	0,5	7900,0

### 6.2.2. Prikaz korištenih kombinacija utega i efektivnog tlaka

Broj ispitnih točaka	Tlak (bar)	Oznaka korištenog utega [Tablica 6]																Dodatak (g)	Temperatura sklopa (°C)	Efektivni tlak (bar)
1	0,00																	20,2	24,1	0,00
2	10,00	1															14 15 16	20,2	24,1	10,006
3	20,00	1	2	3													14 15 16	20,2	24,1	19,996
4	30,00	1	2	3	4	5											14 15 16	20,2	24,1	29,986
5	40,00	1	2	3	4	5	6	7									14 15 16	20,2	24,1	39,976
6	50,00	1	2	3	4	5	6	7	8	9							14 15 16	20,2	24,1	49,967
7	60,00	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					14 15 16	20,2	24,1	59,957
8	70,00	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15 16	20,2	24,1	69,948	

### 6.2.3. Prikaz izračuna efektivnog tlaka

Proračun efektivnog tlaka za uljni etalonski sustav proveden je prema jednadžbi (15). Radi boljeg prikaza rezultata i u ovom slučaju odvojen je proračun sile i efektivne površine.

Razlika visine između masa i pretvornika iznosi 150 milimetara.

**Tablica 12. Proračun efektivnog tlaka za uljni etalonski sustav**

Broj ispitnih točaka	Gustoća zraka (kg/m <sup>3</sup> )	Sila (N)	Efektivna površina (m <sup>2</sup> )	Efektivni tlak (bar)
1	1,17	0,00	8,072629·10 <sup>-5</sup>	0,00
2	1,17	80,664	8,072629·10 <sup>-5</sup>	10,006
3	1,17	161,311	8,072629·10 <sup>-5</sup>	19,996
4	1,17	241,960	8,072629·10 <sup>-5</sup>	29,986
5	1,17	322,607	8,072629·10 <sup>-5</sup>	39,976
6	1,17	403,255	8,072629·10 <sup>-5</sup>	49,967
7	1,17	483,905	8,072629·10 <sup>-5</sup>	59,957
8	1,17	564,553	8,072629·10 <sup>-5</sup>	69,948

#### **6.2.4. Budžeti mjerne nesigurnosti**

Ovdje će se prikazati izračun budžeta mjerne nesigurnosti za sve ispitne točke. Mjerena nesigurnost, kao i kod prethodnog etalonskog sustava, proračunata je kao proširena mjerena nesigurnost i za proračun je korišten pripadajući matematički model prikazan u trećem poglavljju.

**Tablica 13. Mjerena nesigurnost po točkama za uljni etalonski sustav**

Ispitna točka 2, p=10,005 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,00060029	0,5	0,00000009
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00022011	0,57737	0,00000002
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )				0,00000851
Mjerena nesigurnost (bar)				0,006

Nastavak tablice je na idućoj stranici.

Ispitna točka 3, p=19,996 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,00119973	0,5	0,00000036
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,0004399	0,57737	0,00000006
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )
				0,00000883
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,006
Ispitna točka 4, p=29,986 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar <sup>2</sup> )
Etalon	Umjernica	0,00179918	0,5	0,00000081
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,0006597	0,57737	0,00000015
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar <sup>2</sup> )
				0,00000936
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,006

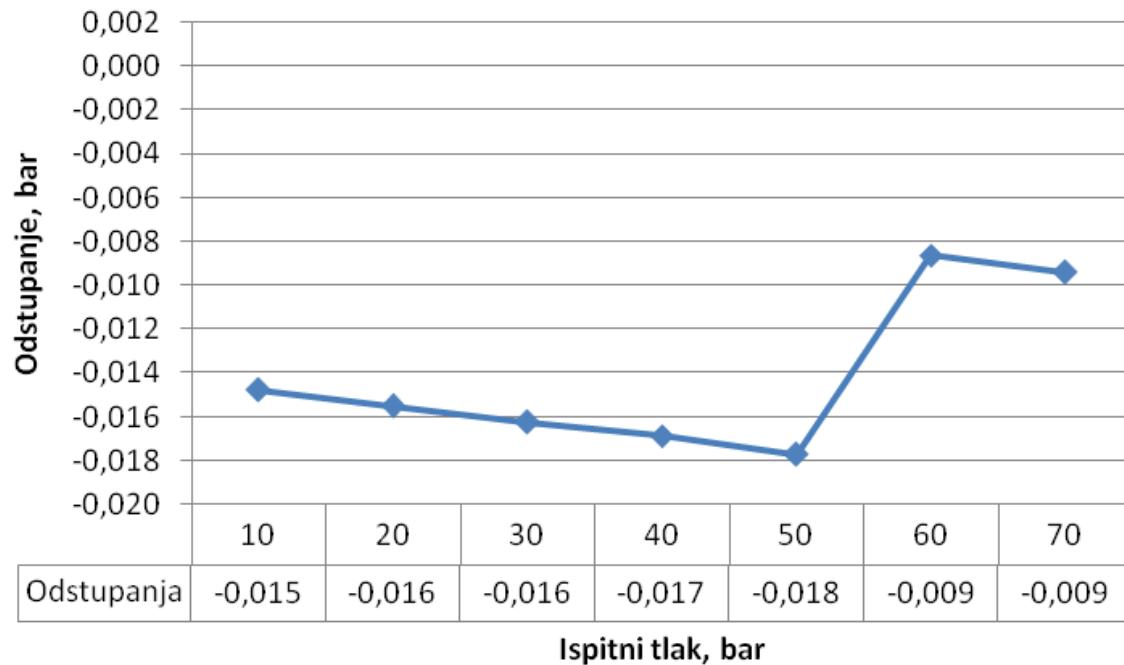
Ispitna točka 5, p=39,977 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar $^2$ )
Etalon	Umjernica	0,00239861	0,5	0,00000144
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00087949	0,57737	0,00000026
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar $^2$ )
				0,00001010
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,006
Ispitna točka 6, p=49,968 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar $^2$ )
Etalon	Umjernica	0,00299806	0,5	0,00000225
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00109929	0,57737	0,00000040
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar $^2$ )
				0,00001105
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,007

Ispitna točka 7, p=59,959 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar $^2$ )
Etalon	Umjernica	0,00359752	0,5	0,00000324
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00131909	0,57737	0,00000058
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar $^2$ )
				0,00001222
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,007
Ispitna točka 8, p=69,949 bar				
Utjecajna veličina	Izvor	Vrijednost (bar)	Faktor	$u^2$ (bar $^2$ )
Etalon	Umjernica	0,00419696	0,5	0,00000440
Etalon pod uvjetima ispitivanja	Mjerenje	0,00153889	0,57737	0,00000079
Razlučivost pokazivača	Indikacija	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Ponovljivost	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
Histereza	Mjerenje	0,00	0,2887	0,00
				Suma $u^2$ (bar $^2$ )
				0,00001359
				Mjerna nesigurnost (bar)
				0,007

Tablica 14. Prikaz mjernih nesigurnosti i odstupanja uljnog etalonskog sustava

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona (bar)	Pokazivanje pokazivača (bar)			Srednja vrijednost (bar)	Odstupanje (bar)	Ponovljivost (bar)	Histereza (bar)	Nesigurnost umjeravanja (bar)
		Uzlazno	Silazno	Uzlazno					
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006
2	10,005	9,990	9,990	9,990	9,990	-0,015	0,000	0,000	0,006
3	19,996	19,980	19,980	19,980	19,980	-0,016	0,000	0,000	0,006
4	29,986	29,970	29,970	29,970	29,970	-0,016	0,000	0,000	0,006
5	39,977	39,960	39,960	39,960	39,960	-0,017	0,000	0,000	0,006
6	49,968	49,950	49,950	49,950	49,950	-0,018	0,000	0,000	0,007
7	59,959	59,950	59,950	59,950	59,950	-0,009	0,000	0,000	0,007
8	69,949	69,940	69,940	69,940	69,940	-0,009	0,000	0,000	0,007

U gornjoj tablici [Tablica 14] dan je cjeloviti prikaz mjernih nesigurnosti za sve ispitne točke. Prikazane su i analizirane vrijednosti dobivene mjerenjem na uljnoj etalonskoj liniji i vidljiva su odstupanja kod svih ispitnih točki.



**Slika 12. Prikaz odstupanja uljnog etalonskog sustava za ispitne točke**

Prema danom prikazu odstupanja uljnog etalonskog sustava vidljivo je veće odstupanje pri nižim tlakovima koje naglo opada s porastom tlaka.

Detaljnija analiza odstupanja i mjerne nesigurnosti biti će prikazana u narednom poglavlju gdje će se usporediti rezultati oba opisana etalonska sustava.

### 6.3. Usporedba plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava

U ovom poglavlju biti će prikazana usporedba rezultata dobivenih na plinskom i uljnom etalonskom sustavu. Glavni indikator prema kojem se vrši usporedba je razlika odstupanja ova dva sustava.

Također će se prikazati kretanje mjerne nesigurnosti za oba sustava i dati će se usporedba pomoću statističke vrijednosti  $E_n$ .

Važno je naglasiti da je za umjeravanje etalonskih sustava korišten pretvornik tlaka kao prijenosni etalon sa pripadajućim pokazivačem.

**Tablica 15. Usporedba odstupanja plinskog i uljnog etalonskog sustava**

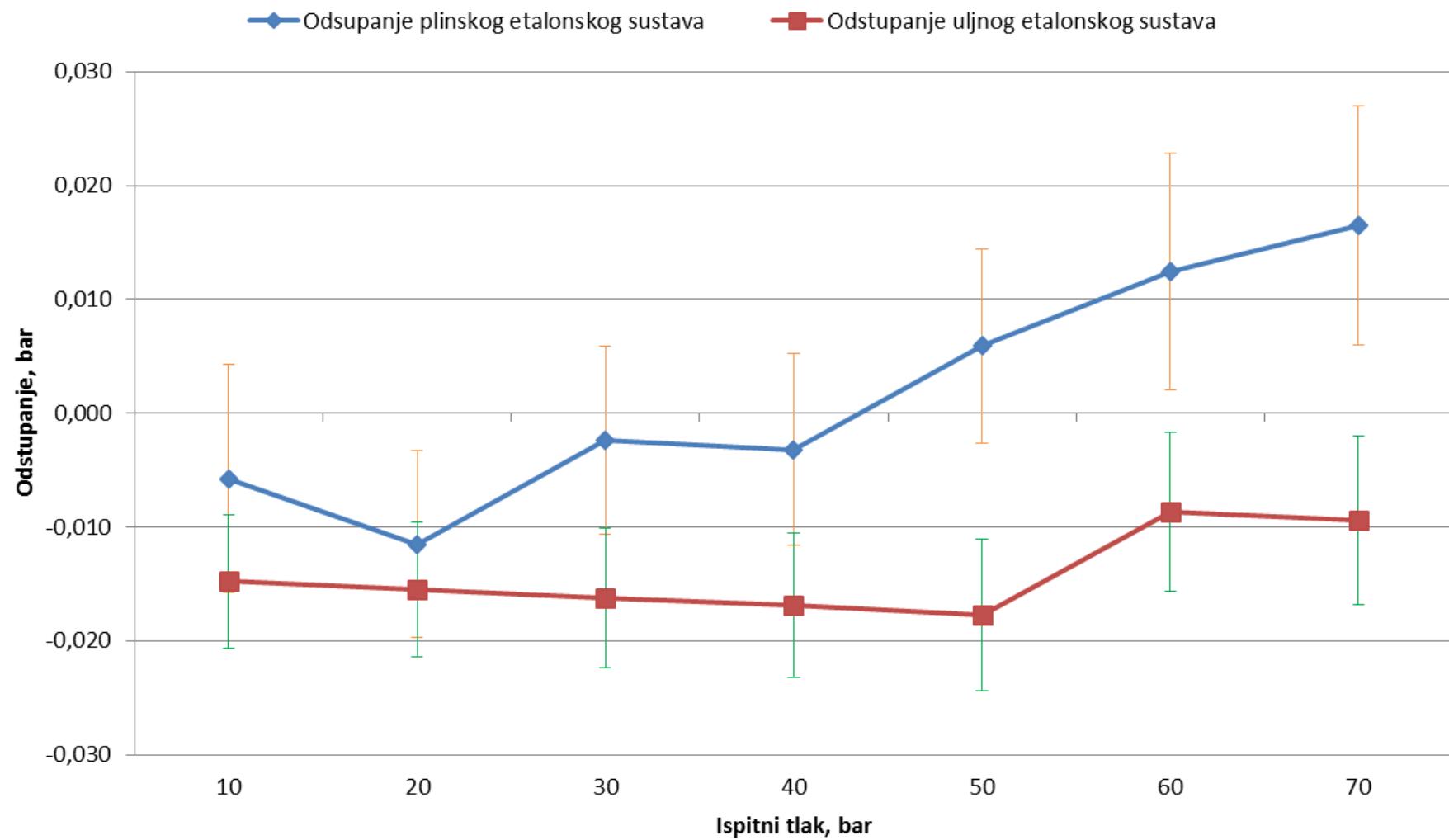
Broj ispitnih točaka	Ispitni tlak (bar)	Odstupanje na uljnom etalonskom sustavu (bar)	Odstupanje na plinskom etalonskom sustavu (bar)
1	0,00	0,00	0,00
2	10,00	-0,015	-0,006
3	20,00	-0,016	-0,012
4	30,00	-0,016	-0,002
5	40,00	-0,017	-0,003
6	50,00	-0,018	0,006
7	60,00	-0,009	0,012
8	70,00	-0,009	0,016

Prema prikazanim rezultatima vidljiva je znatna razlika odstupanja plinskog i uljnog etalonskog tlačnog sustava. Najveća razlika javlja se pri ispitnom tlaku od 70 bar i ta razlika iznosi 0,02588 bar, dok je najmanja razlika pri ispitnom tlaku od 20 bar i iznosi 0,004 bar. Prosječna razlika odstupanja iznosi 0,01588 bar.

Analizom mjernih nesigurnosti vidljivo je da su na plinskom etalonskom sustavu nešto veći iznosi mjerne nesigurnosti za sve točke. U nastavku je prikazana usporedba nesigurnosti za oba navedena sustava.

**Tablica 16. Usporedba mjernih nesigurnosti kod plinskog i uljnog etalonskog sustava**

Broj ispitnih točaka	Ispitni tlak (bar)	Nesigurnost na ulnjem etalonskom sustavu (bar)	Nesigurnost na plinskom etalonskom sustavu (bar)
1	0,00	0,006	0,008
2	10,00	0,006	0,010
3	20,00	0,006	0,008
4	30,00	0,006	0,008
5	40,00	0,006	0,008
6	50,00	0,007	0,009
7	60,00	0,007	0,010
8	70,00	0,007	0,011



Slika 13. Prikaz odstupanja uljnog i plinskog etalonskog sustava

Nakon prikaza odstupanja i mjerne nesigurnosti za oba etalonska sustava ocjena rezultata umjeravanja provedena je pomoću izračuna statističke vrijednosti  $E_n$  prema jednadžbi:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_x^2 + U_X^2}} \quad (16)$$

gdje su:

$x$  iznos odstupanja na plinskom etalonskom sustavu

$X$  iznos odstupanja na uljnom etalonskom sustavu

$U_x$  proširena mjerna nesigurnost pripadajućeg tlaka na plinskom etalonskom sustavu

$U_X$  proširena mjerna nesigurnost pripadajućeg tlaka na uljnom etalonskom sustavu

Prema jednadžbi (16) u nastavku je dan proračun  $E_n$  vrijednosti za sve ispitne točke.

**Tablica 17. Ocjena rezultata umjeravanja**

Broj ispitnih točaka	Ispitni tlak (bar)	$E_n$ (bar)
1	0,00	0,00
2	10,00	0,779
3	20,00	0,392
4	30,00	1,346
5	40,00	1,301
6	50,00	2,188
7	60,00	1,684
8	70,00	2,012

Prema prikazanim rezultatima u gornjoj tablici [Tablica 17] može se zaključiti da rezultati umjeravanja navedenih etalonskih sustava nisu zadovoljavajući jer za većinu točaka vrijednost statističke veličine  $E_n$  iznosi više od jedan, odnosno samo za drugu i treću točku iznosi manje od jedan.

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je dan pregled teorijskih osnova tlačnih vaga kao primarnog etalona tlaka i matematički model za proračun efektivnog tlaka kod plinskih i uljnih tlačnih vaga.

Opisane su mjerne linije i komponente korištene za umjeravanje tlačnih vaga pomoću prijenosnog etalona, kao i sam postupak mjerena koji je proveden u Laboratoriju za procesna mjerena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Svi proračuni efektivnih tlakova i mjernih nesigurnosti provedeni su prema matematičkim modelima opisanim u početnim poglavljima rada, a sami rezultati su prikazani tablično zbog bolje preglednosti i lakšeg snalaženja.

Nakon provedenih mjerena na etalonskim tlačnim linijama u Laboratoriju za procesna mjerena dobiveni su rezultati koji ukazuju da postoje razlike kod plinske i uljne etalonske tlačne linije.

U opisu mjernih linija naglašeno je da je kao prijenosni etalon za obje linije korišten isti pretvornik tlaka s pripadajućim pokazivačem i time se može zaključiti da su rezultati koji su dobiveni opisanim mjeranjima relevantni za usporedbu ova dva sustava.

Prvi korak nakon provedenih mjerena opisanih u ovom radu je pronalazak problema koji uzrokuje znatne razlike u odstupanju uljne i plinske tlačne vase. Potrebno je napraviti ponovno umjeravanje tlačnih vaga prema procedurama opisanim u početnim poglavljima ovog rada.

Pripadajući pokazivač pretvornika tlaka ima rezoluciju od 0,01 bar što nije dovoljno za preciznije umjeravanje tlačnih vaga pomoću prijenosnog etalona. Nakon otklanjanja problema koji uzrokuje nezadovoljavajuće rezultate umjeravanja, iduće umjeravanje potrebno je provesti s prijenosnim etalonom koji ima bolju rezoluciju.

Ovim mjeranjem je provedena unutarnja kontrola kvalitete etalona tlaka u Laboratoriju za procesna mjerena koja je pokazala da je potrebno konstantno unaprjeđivati i kontrolirati etalone da bi se u konačnici zadovoljili zahtjevi kod međulaboratorijskih usporedbi i ispitivanja sposobnosti.

## LITERATURA

- [1] Grgec Bermanec, L., Zvizdić D., Podloge za vježbe iz kolegija Mjerenja u energetici, Zagreb, 2012.
- [2] Grgec Bermanec, L., Mjerne nesigurnosti rezultata umjeravanja etalona tlaka, Zagreb, 2002.
- [3] Dadson, R.S., Lewis, S.L., Peggs, G.N., The Pressure Balance: Theory and Practice, Ed.1., HMSO, London, 1982.
- [4] OIML, Pressure Balances, International Recommendation, Bureau International des Poids et Mesures, 1993.
- [5] International vocabulary of basic and general terms in metrology, second edition, International Organization for Standardization, 1993.
- [6] Hrvatska akreditacijska agencija, Pravila za međulaboratorijske usporedbe, 4. izdanje, Zagreb, 2012.

## **PRILOZI**

### I. CD-R disc