

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Borut Omerzo

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**USPOREDBA REZULTATA UMJERAVANJA
PRETVORNIKA TLAKA SA STRUJNIM
IZLAZOM 4 – 20 mA**

Mentorica:

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

Student:

Borut Omerzo

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i korištenjem navedene literature.

Zahvaljujem se profesorici Lovorki Grgec Bermanec na ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Borut Omerzo



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, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **BORUT OMERZO**

Mat. br.: 0035203465

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba rezultata umjeravanja pretvornika tlaka sa strujnim izlazom 4 - 20 mA**
Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of calibration results of pressure transmitter with current output 4 - 20 mA**
Opis zadatka:

S ciljem otkrivanja sustavnih pogrešaka te dobivanja i održavanja akreditacije, umjerni laboratoriji uvode odgovarajuće mjere osiguranja kvalitete rezultata kao što su: sudjelovanje u međulaboratorijskim usporedbama, ponavljanje mjerenja, praćenje i ocjenjivanje rezultata umjeravanja.

Svrha ovog rada je organizirati, provesti i analizirati bilateralnu međulaboratorijsku usporedbu umjernih laboratorija za tlak koji mogu umjeravati pretvornike sa strujnim izlaznim signalom od 4 do 20 mA u području 0 do 10 hPa. U radu koristiti mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja.

Potrebno je izraditi:

- Pregled osnova mjerenja tlaka pretvornicima sa strujnim izlaznim signalom.
- Pregled normi i uputa za provedbu međulaboratorijskih usporedbi i obradu rezultata.
- Protokol usporedbe za tlak od 0 do 10 hPa.
- Opis provedenih mjerenja u laboratorijima koji sudjeluju.
- Opis provedenih mjerenja u LPM-u i procjenu mjerne nesigurnosti.
- Analizu rezultata usporedbe određivanjem En vrijednosti.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.


Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Bačen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	5
POPIS SLIKA.....	6
POPIS TABLICA.....	7
POPIS OZNAKA.....	8
SAŽETAK.....	9
SUMMARY.....	10
1. UVOD.....	11
1.1. Mjeriteljstvo.....	11
1.2. EURAMET.....	12
1.3. Tlak.....	13
2. MJERENJE TLAKA.....	16
2.1. Uvod u mjerenje tlaka.....	16
2.2. Senzori tlaka.....	18
2.2.1. Raspon tlaka.....	20
2.2.2. Električni izlazni signal.....	20
3. TEORIJSKE OSNOVE.....	24
3.1. Mjerna nesigurnost.....	24
3.1.1. Određivanje mjerne nesigurnosti.....	26
3.1.1.1. GUM metoda.....	26
3.1.1.2. MCS metoda.....	31
3.1.1.3. Norma TS 21748 : 2004.....	31
3.2. Umjeravanje.....	32
3.3. Postupak umjeravanja pretvornika tlaka.....	33
3.3.1. Mjerna nesigurnost.....	33
3.3.2. Odstupanje.....	34
3.3.3. Ulazne veličine.....	35
3.3.4. Umjeravanje digitalnih manometara.....	35
3.3.5. Analiza nesigurnosti.....	35
4. LABORATORIJSKA MJERENJA I MJERNE NESIGURNOSTI.....	37
4.1. Opis zadatka.....	37
4.2. Podaci o mjerenju.....	37
4.2.1. Mjerenje u laboratoriju Tehničar Servag.....	38
4.2.2. Mjerenje u Laboratoriju za procesna mjerenja.....	41
4.3. Usporedba rezultata umjeravanja.....	46
4.4. Računanje E_n vrijednosti.....	48
5. ZAKLJUČAK	49
POPIS LITERATURE.....	50
Prilog 1.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1. Kaotično gibanje čestica.....	13
Slika 2. Odnos apsolutnog tlaka, pretlaka i podtlaka.....	14
Slika 3. U cijev.....	16
Slika 4. Tlačna vaga.....	17
Slika 5. Princip rada tlačne vage.....	18
Slika 6. Mjerni instrumenti koji koriste mehaničku deformaciju.....	18
Slika 7. Otporni senzor.....	19
Slika 8. Kapacitivni senzor.....	19
Slika 9. Tlakovi dijafragme kod senzora.....	20
Slika 10. Idealna karakteristika.....	22
Slika 11. Karakteristike s promijenjenim nagibima.....	22
Slika 12. Karakteristika sa živom nulom.....	22
Slika 13. Nelinearne karakteristike.....	23
Slika 14. Nelinearnost kod karakteristike.....	23
Slika 15. Histereza.....	23
Slika 16. Odnos između ulaznih veličina i mjerne veličine.....	26
Slika 17. Gaussova razdioba.....	27
Slika 18. Pravokutna razdioba.....	28
Slika 19. Trokutasta razdioba.....	28
Slika 20. Proširena nesigurnost ($k=1$).....	28
Slika 21. Proširena nesigurnost ($k=2$).....	28
Slika 22. Proširena nesigurnost ($k=3$).....	28
Slika 23. MCS metoda.....	31
Slika 24. Shema umjeravanja.....	32
Slika 25. Shema lanca slijedivosti.....	33
Slika 26. Pretvornik tlaka GE Druck.....	38
Slika 27. Mjerna linija u laboratoriju Tehničar Servag.....	39
Slika 28. Mjerna linija u LPM-u.....	41
Slika 29. Dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti.....	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Eksperiment utjecaja okoliša na rezultat mjerenja.....	25
Tablica 2. Rezultati mjerenja gustoće fluida.....	30
Tablica 3. Postupak određivanja mjerne nesigurnosti.....	34
Tablica 4. Postupak određivanja mjernih nesigurnosti.....	36
Tablica 5. Podaci o pretvorniku tlaka.....	38
Tablica 6. Uvjeti okoliša prvog mjerenja.....	39
Tablica 7. Rezultati mjerenja u laboratoriju Tehničar Servag.....	40
Tablica 8. Uvjeti okoliša drugog mjerenja.....	41
Tablica 9. Rezultati mjerenja u LPM-u.....	42
Tablica 10. Podaci potrebni za računanje mjerne nesigurnosti.....	42
Tablica 11. Mjerna nesigurnost točke 1.....	43
Tablica 12. Mjerna nesigurnost točke 2.....	43
Tablica 13. Mjerna nesigurnost točke 3.....	43
Tablica 14. Mjerna nesigurnost točke 4.....	44
Tablica 15. Mjerna nesigurnost točke 5.....	44
Tablica 16. Mjerna nesigurnost točke 6.....	44
Tablica 17. Mjerna nesigurnost točke 7.....	45
Tablica 18. Mjerna nesigurnost točke 8.....	45
Tablica 19. Mjerna nesigurnost točke 9.....	45
Tablica 20. Mjerna nesigurnost točke 10.....	46
Tablica 21. Mjerna nesigurnost točke 11.....	46
Tablica 22. Računanje E_n vrijednosti.....	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
U	mbar	proširena mjerna nesigurnost
k	-	faktor prekrivanja
u_c	mbar	standardna mjerna nesigurnost
$u_{hysteresis}$	mbar	mjerna nesigurnost uslijed histereze
u_{zero}	mbar	mjerna nesigurnost zbog nultog odstupanja
$u_{resolution}$	mbar	mjerna nesigurnost zbog rezolucije manometra
$u_{repeatability}$	mbar	mjerna nesigurnost zbog ponovljivosti
U_E	mbar	proširena mjerna nesigurnost etalona
En	-	En vrijednost
C_i	-	koeficijent osjetljivosti
g	m/s ²	gravitacijsko ubrzanje
m	kg	masa fluida
$\Delta p_{up/down}$	mbar	razlika tlaka uzlazno/slazno
ρ	kg/m ³	gustoća fluida
F	N	sila
A	m ²	površina
R	J/(kgK)	opća plinska konstanta
V	m ³	volumen

SAŽETAK

U ovom je radu opisana bilateralna usporedba rezultata umjeravanja pretvornika tlaka. Detaljno je opisana organizacija, mjerna oprema, metoda umjeravanja i analiza rezultata. Također, dana je teorijska podloga fizikalnih procesa koji su se mjerili i umjeravanja. U ovom radu koristio se pretvornik tlaka strujnog izlaza i to struje jakosti 4 – 20 mA u području od 0 do 10 mbar. Umjeravanje se provodi kako bi se uspostavila što točnija veza između stvarne fizikalne veličine i veličine koja je prikazana na mjernom uređaju. S ciljem otkrivanja sustavnih pogrešaka umjerni laboratoriji sudjeluju u ovakvim usporedbama te je iz tog razloga opisani proces nužno kvalitetno obraditi. Što je kvalitetniji postupak umjeravanja to su rezultati točniji. Referentni laboratorij u ovom završnom radu bio je Laboratorij za procesna mjerenja na zagrebačkom Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uspoređivao se rezultat u LPM-u s rezultatom u laboratoriju Tehničar Servag. Postupak umjeravanja proveden je kvalitetno što se može vidjeti u nastavku ovog rada.

Ključne riječi: umjeravanje, tlak, pretvornik tlaka sa strujnim izlazom

SUMMARY

In this paper a bilateral comparison of calibration of a pressure transducer is shown. Organisation, measuring equipment, calibration method and analysis of the results is described in details. Furthermore, a theoretical background of physical processes which were measured is given. In this paper a pressure transducer with current output (4 - 20 mA) in range of 0 to 10 mbar was used. Calibration is carried out in order to establish a more accurate connection between physical quantity and quantity shown on measuring device. In order to detect system errors, calibration laboratories participate in such comparisons and for that reason it is very important to describe this process as well as possible. The better the calibration process, more precise the results are. In this paper the Laboratory for process measurements on Faculty of mechanical engineering in Zagreb was a reference laboratory. The result was compared with the result from Tehničar Servag laboratory. Calibration process was carried out well which can be seen below.

Key words: calibration, pressure, current output pressure transducer

1. UVOD

Jednostavna mjerenja vršimo svaki dan, bilo to vaganje na kućnoj vagi ili mjerenje temperature zraka u prostoriji. Većina ljudi ne ulaže previše razmišljanja o tome koliko su točna ta mjerenja i na koji su način uopće dobiveni podaci o, recimo, temperaturi tijela koju mjerimo dok smo bolesni. Možemo se složiti da ti podaci nisu toliko ni bitni, budući da odstupanje temperature od 1°C na termometru u prostoriji ne pravi bitnu razliku. Međutim, to odstupanje prilikom mjerenja temperature u nekom industrijskom procesu u tvornici lijekova može biti od presudnog značaja. Upravo iz tog razloga se u industriji ulažu velika sredstva kako bi se unaprijedila mjerenja i razina točnosti podataka koji se mjere. Kako rastu troškovi proizvodnje i želja za što učinkovitijim procesima u industriji, raste i potreba da se koriste što kvalitetniji mjerni instrumenti. Problem je u tome što mi ne možemo znati da mjerni instrument radi adekvatno bez da ga umjerimo s nekim drugim mjernim instrumentom, koji nazivamo etalonom. U inženjerskoj praksi mjerenja su svakodnevica; trebaju nam zbog:

- Informacije o procesu
- Osiguranja kvalitete
- Regulacije procesa

Problematika kod mjerenja je u slijedećem: kako možemo biti sigurni da mjerni instrument daje točan podatak o stvarnoj vrijednosti? Kako se mjerni instrument može koristiti da inženjer koji se njime koristi može biti siguran u podatke koje mu on daje i da ih može lako interpretirati i pouzdati se u njih? Postoje mnoga pitanja i problemi s kojima se susrećemo.

1.1. Mjeriteljstvo

Mjeriteljstvo (metrologija) je znanstvena disciplina koja se bavi mjerenjem u svim njegovim teorijskim i praktičnim oblicima. Kao znanstvena disciplina nastala je iz jednostavnog razloga; ljudi imaju potrebu nešto izmjeriti, dati brojčanu vrijednost nekoj tvari ili pojavi. Potreba za mjerenjem javljala se od početaka ljudske civilizacije, primjerice, kod Egipćana i Perzijanaca kao osnovne mjere za dužinu koristili su se dijelovi ljudskog tijela (kraljevska stopa i lakat). Općenito se kaže da mjeriteljstvo ima tri glavna zadatka:

- Definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica
- Ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama
- utvrđivanje lanca sljedivosti pri dokumentiranju točnosti mjerenja

Mjeriteljstvo možemo podijeliti na tri osnovne skupine:

1. Znanstveno mjeriteljstvo bavi se organizacijom i razvojem mjernih etalona te njihovim održavanjem (najviša razina).
2. Industrijsko mjeriteljstvo treba osigurati prikladno funkcioniranje mjerila koja se upotrebljavaju u industriji, tj. u procesima proizvodnje i ispitivanja.
3. Zakonsko mjeriteljstvo bavi se mjerenjima koja utječu na transparentnost gospodarskih transakcija, naročito tamo gdje postoji potreba za zakonskom verifikacijom mjernog instrumenta.

Mjerenje je postupak dodjeljivanja vrijednosti nekoj fizikalnoj veličini. Ta fizikalna veličina onda postaje izmjerena varijabla. To radimo jer ljudska osjetila nisu dovoljno precizna da bi mogla točno mjeriti. *Mjerni instrument* je uređaj s kojim provodimo mjerenje.

Umjeravanje (baždarenje, kalibriranje) je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina koje pokazuje neko mjerilo, neka usporedbena tvar ili neki mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. je mjera, mjerilo, usporedbena tvar ili mjerni sustav koji su dogovorom, normom ili zakonom utvrđeni kao utjelovljenje neke mjerne jedinice (njezina dijela ili višekratnika) ili određene vrijednosti neke fizikalne veličine. Mjeriteljske djelatnosti, ispitivanja i mjerenja, vrlo su bitni ulazni elementi za funkcioniranje kakvoće u industrijskim djelatnostima. Za to je potrebna sljedivost, koja postaje jednako važna kao i samo mjerenje. Priznavanje mjeriteljske mjerodavnosti na svakoj razini lanca sljedivosti može se uspostaviti sporazumima i dogovorima o međusobnome priznavanju. Umjeravanje mjerila temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti, a obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki mjerila. Ono se postiže izravnom usporedbom s etalonima. Na temelju tih podataka korisnik može odlučiti je li mjerilo prikladno za dotičnu primjenu. Glavni razlozi za umjeravanje su:

- Osiguranje da očitavanja mjerila budu u skladu s drugim mjerilima
- Određivanje točnosti mjerenja
- Određivanje pouzdanosti mjerila, tj. može li mu se vjerovati

Postupke umjeravanja definirao je EURAMET.

1.2. EURAMET

EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) je glavna agencija koja udružuje mjerne laboratorije Europe, interesna je strana Europskoga povjerenstva i sudjeluje u projektima Europske unije. Osnovan je 11. siječnja 2007. godine, iako su mu prethodile neke druge organizacije koje sežu još iz 80-ih godina 20. stoljeća.

1.3. Tlak

Tlak je fizikalna veličina koja opisuje djelovanje sile na površinu, određena omjerom sile F , koja djeluje okomito na površinu A .

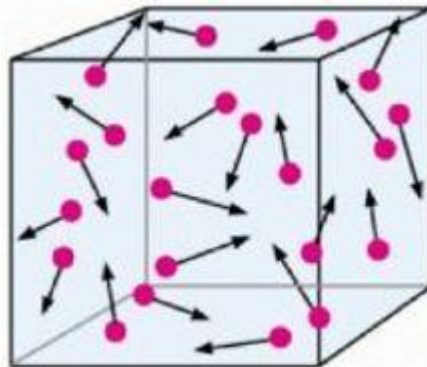
$$p = \frac{F}{A}$$

Mjerna jedinica tlaka je Paskal (znak Pa) ili njutn po metru kvadratnom (N/m^2). Osim Paskala može se upotrebljavati i mjerna jedinica tlaka bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$).

Tlak je rezultat gibanja čestica nekog fluida. čestice su najmanji djelići tvari koji sadrže kemijska svojstva makroskopske tvari a promjer čestica je zanemariv u odnosu na razmak između njih. Čestice su u stalnom, kaotičnom gibanju (kinetička energija čestica predstavlja toplinu), a međusobno djelovanje čestica i njihovo djelovanje na stjenke posude u kojoj se plin nalazi može se tretirati, na bazi klasične mehanike, kao sudari, a tlak je posljedica mnoštva sudara sa stjenkama posude. Na temelju ove teorije došlo se i do jednadžbe stanja idealnog plina. Do te, za fiziku, iznimno bitne jednadžbe došlo se Gay Lussacovim i Boyle i Mariotteovim zakonom. Ta jednadžba glasi

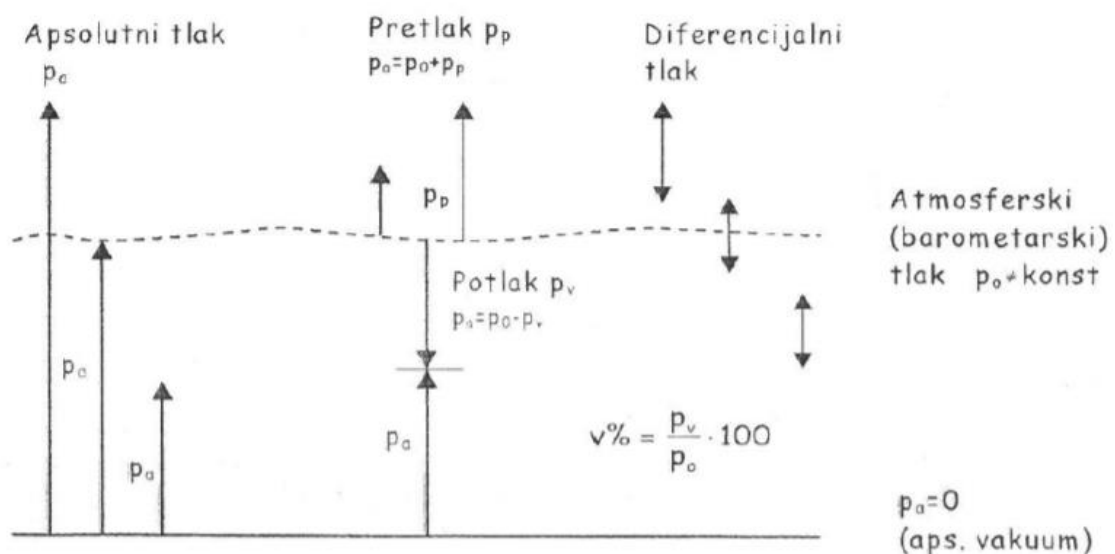
$$pV = mRT$$

Ako neko tijelo ne bi sadržavalo nikakve molekule, tlak bi bio nula. Tlakovi izmjereni na ljestvici koja koristi ovu nultu vrijednost kao referentnu točku, nazivaju se apsolutnim tlakovima. Atmosferski tlak na površini Zemlje varira, no njegova prosječna vrijednost je 10^5 Pa (1000 mbar); to je zapravo 10^5 Pa apsolutnog tlaka jer se izražava s obzirom na prethodno spomenutu referentnu točku nultog tlaka. Za probušenu automobilsku gumu se često kaže da nema više zraka te bi spojeni mjerač tlaka pokazivao nultu vrijednost, dok još očigledno guma sadrži atmosferski zrak. Ovakva mjerenja koriste tlak okoline kao referentnu vrijednost i mjere tzv. manometarski tlak odnosno pretlak.



Slika 1. Kaotično gibanje čestica

U nekim slučajevima mjeri se i tzv. podtlak odnosno negativan manometarski tlak, no s obzirom da koncept negativnog tlaka nema smisla, koristi se naziv vakuumski tlak. Osim toga, u primjenama gdje je potrebno poznavanje razlike tlaka između dva sustava, referentni tlak ne mora nužno biti nula ili atmosferski tlak, već je obično to neka druga vrijednost. Takva razlika tlaka se zove diferencijalni tlak. Primjer je definiranje vrijednosti protoka plina u nekom cjevovodnom sustavu koji ovisi o razlici vrijednosti tlaka na ulazu i izlazu u cjevovod. U svrhu izbjegavanja pogrešnih zaključaka tijekom mjerenja, od iznimne je važnosti definirati kakvo mjerenje se provodi: apsolutno, manometarsko, ili diferencijalno. Na slici 3. prikazan je odnos apsolutnih i manometarskih tlakova.



Slika 2. Odnos apsolutnog tlaka, pretlaka i podtlaka.

Naspram kinetičkoj teoriji u tehnici se često koristi hipoteza kontinuuma. Kontinuum je matematički model materije prema kojem ona zadržava svoja fizikalna svojstva pri smanjivanju volumena u točku. Čestica kontinuuma ima infinitezimalni volumen dV , a svaka čestica zauzima samo jednu točku prostora, a u jednoj točki prostora može se nalaziti samo jedna točka kontinuuma. Hipoteza kontinuuma omogućuje primjenu integralnog i diferencijalnog računa u mehanici fluida. Prema ovoj teoriji definirana je jednadžba:

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

U kojoj je diferencijal površine dA površina koja odgovara površini čestice za koju su efekti fluida isti kao i u cijelom kontinuumu, tj. na tu površinu uzastopno udara velik broj molekula (jer se čestica kontinuuma sastoji od još dovoljno

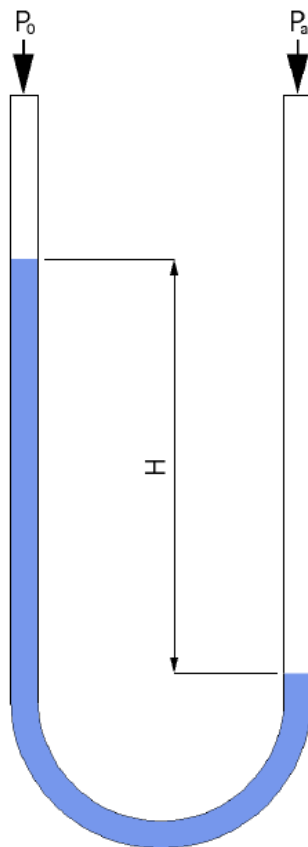
velikog broja molekula) da bi efekt tlaka bio kontinuirano vremenski isti kao i u ostatku kontinuuma, tj. konstantan.

2. MJERENJE TLAKA

2.1. Uvod u mjerenje tlaka

Mjerenja tlaka oduvijek su bila od iznimne važnosti. Ako se sjetimo industrijske revolucije koja se temeljila na strojevima koji su bili pokretani parom, tlak pare bio je važan parametar i podatak o njemu bio je bitan. Danas se potreba za točnim mjerenjem tlaka sve više i više povećava. Primjene nalazimo u svim granama industrije kao npr. nuklearnoj, plinskoj, petrokemijskoj, biološkoj, farmaceutskoj, automobilskoj, meteorološkoj, poluvodičkoj, optičkoj, zrakoplovnoj, vojnoj, klimatizacijskoj, filtracijskoj i u svim kontroliranim procesima. Ispravnost tih mjerenja ključna je u osiguranju kvalitete i sigurnosti korisnika. Mjerenje tlaka fluida je druga veličina po učestalosti mjerenja.

Sama fizika mjerenja tlaka je poprilično raznovrsna. Recimo, jedna od najjednostavnijih metoda je mjerenje tlaka pomoću U cijevi. Temelji se na Bernoullijevoj jednadžbi. Na slici 4. prikazana je U cijev.



Slika 3. U cijev

Bernoullijevom jednadžbom dolazimo do slijedeće jednadžbe:

$$p_a - p_o = \rho g H$$

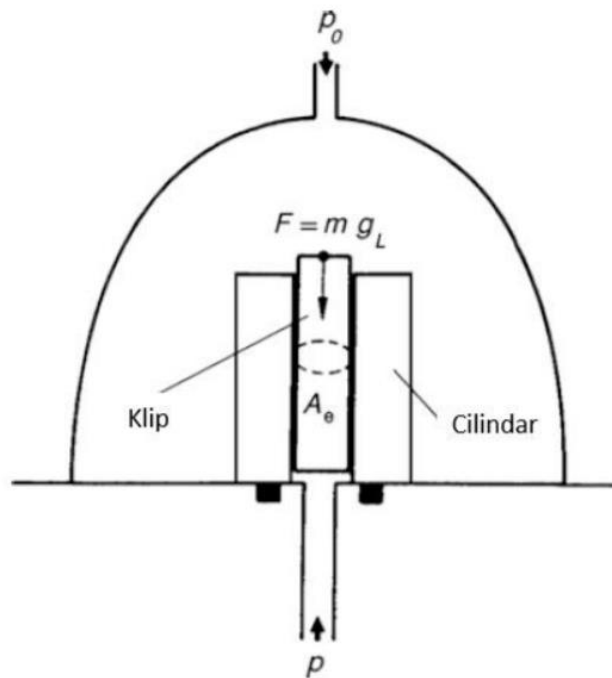
Pomoću U cijevi mjerimo razliku tlaka. U slučaju da je gornji dio cijevi evakuiran i zatvoren, taj tlak je nula, te se instrument naziva barometrom. Tekućine koje se koriste u ovakvim mjernim instrumentima su obično živa, voda ili ulje, a u slučaju barometra uvijek živa zbog činjenice da ima više od 13 puta veću gustoću od vode ili ulja te je shodno tome visina stupca iznosi oko 0,75 m za potrebe mjerenja tlaka okoline.

Ovakva ideja ravnoteže tlakova se može proširiti i za primjenu pri višim i nižim tlakovima koristeći metalne utege koji djeluju poznatom silom na poznatu površinu. Takva mjerila se zovu tlačne vage i to su ujedno najtočnija mjerila tlaka koja se koriste kao etaloni za ostala mjerila. Primjer tlačne vage je na slici 5.



Slika 4. Tlačna vaga

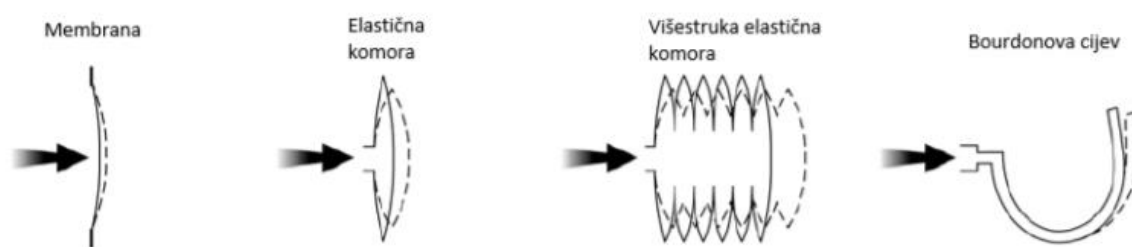
Shema funkcioniranja tlačne vage prikazana je na slici 6. Recimo da želimo izmjeriti tlak p . Uz poznati tlak p_0 , mase klipa m , gravitacijske konstante g_L i efektivne površine A_e , možemo doći do tlaka p .



Slika 5. Princip rada tlačne vage

2.2. Senzori tlaka

Gotovo svi senzori tlaka rade po istom principu. Tlak koji djeluje na neku površinu uzrokuje silu koja uzrokuje deformaciju senzora (dijafragme, membrane). Ta deformacija se mjeri i šalje u obliku električnog signala dalje u mjernom instrumentu. Senzori se razlikuju po materijalu od kojeg su napravljeni. Primjeri mjernih instrumenata koji koriste mehaničku deformaciju prikazani su na slici 7.



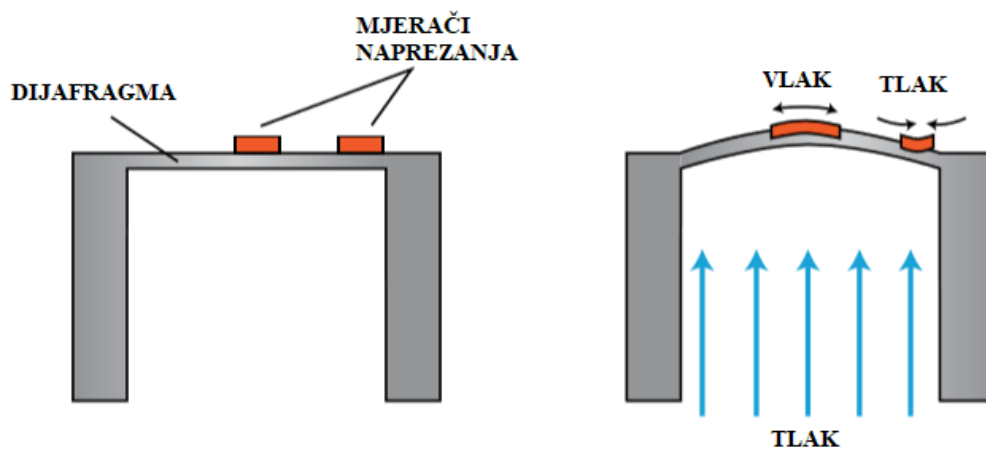
Slika 6. Mjerni instrumenti koji koriste mehaničku deformaciju.

Danas svi industrijski senzori koji koriste električni signal dijele se na dvije vrste:

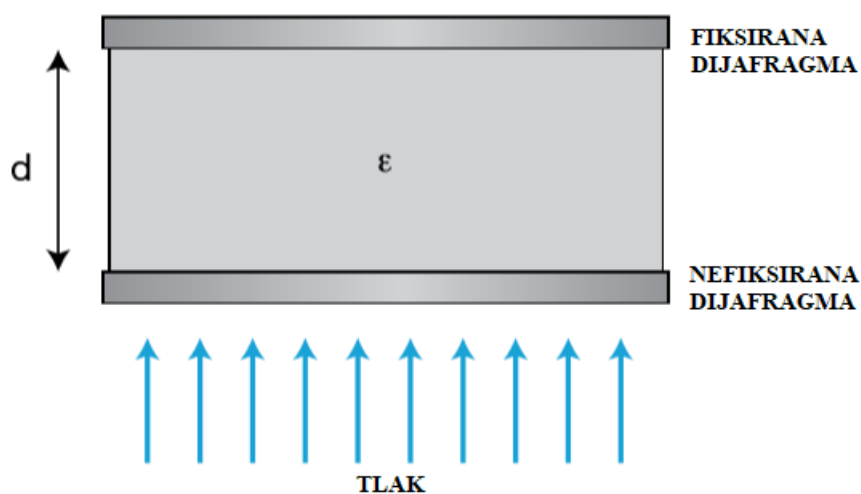
- Otporni senzori. Kod ovakvih senzora fluid je u direktnom kontaktu s dijafragmom koja ga dijeli od elektronike senzora. Materijal, veličina i debljina dijafragme određuju raspon tlakova koji se mogu mjeriti i s kojim fluidom mogu biti u doticaju. Savijanje dijafragme uzrokuje vlak ili tlak

mjerača napreznja. Kada spojimo četiri mjerača oni formiraju Wheatstoneov most, koji mjeri promjenu u električnom otporu, čime se deformacija dijafragme prenosi u električni signal. Shema rada prikazana je na slici 7.

- Kapacitivni senzori. Kod kapacitivnih senzora dvije dijafragme su postavljene paralelno, od kojih je jedna u doticaju s fluidom. Kada na fluid djeluje tlak, dvije dijafragme se komprimiraju jedna uz drugu i to uzrokuje promjenu kapaciteta. Ta promjena kapaciteta uzrokuje signal u električnom krugu koji je proporcionalan tlaku koji djeluje na dijafragmu. Shema je prikazana na slici 8.



Slika 7. Otporni senzor



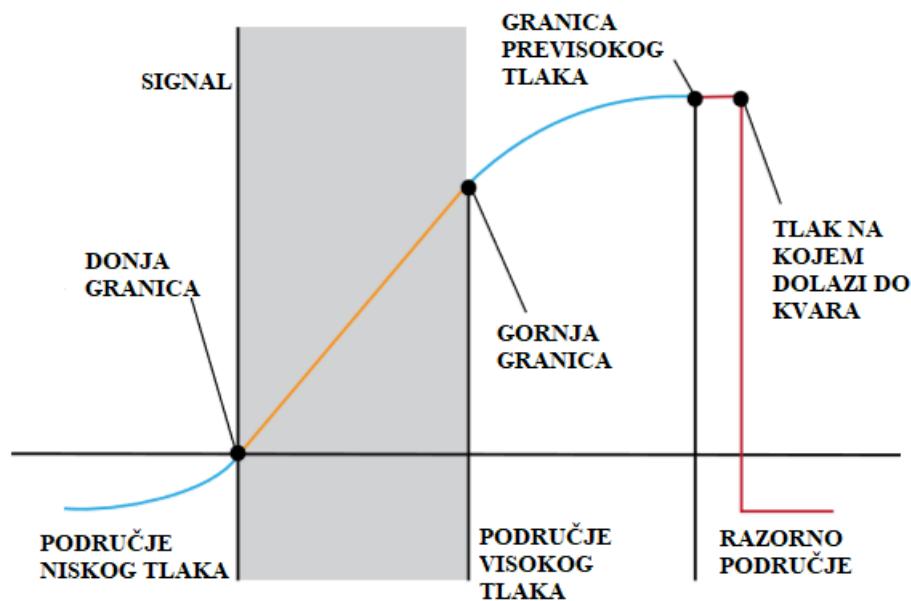
Slika 8. Kapacitivni senzor

Materijal dijafragme najčešće je metal, no može se koristiti i keramički materijal koji se mora dobro brtviti ako će biti u izravnom doticaju s fluidom. Kada koristimo brtvljenje, možemo dodatno zaštititi dijafragmu s npr. titanijem.

Bitno je napomenuti da na ovakve senzore utječe temperatura i proizvođač mora jasno naznačiti raspon temperatura na kojima se može koristiti senzor.

2.2.1. Raspon tlaka

Raspon tlaka definira tlakove između kojih mjerni instrument, u ovo slučaju specifično senzor, može ispravno raditi. Najčešće je definiran od proizvođača. Postoje i granični tlakovi. Tlakovi između raspona tlaka i graničnih tlakova neće trajno oštetiti senzore, ali će očitavanja možda biti netočna. Za razliku od tih tlakova, ako se ode iznad ili ispod graničnih tlakova, doći će do trajnog oštećenja. Važno je napomenuti da će do kvara doći čak i kod malih vremenskih perioda i zato se mora paziti jer će i najkraći skokovi tlaka uzrokovati nepovratnu štetu. Te skokove tlaka može uzrokovati uključivanje i isključivanje pumpe, hidrauličkog sustava ili brzo otvaranje ventila kada su protoci fluida vrlo visoki. Uobičajeni slučaj skoka tlaka je recimo tlačni udar u cjevovodima. Manometri na cjevovodu se lako mogu oštetiti.



Slika 9. Tlakovi dijafragme kod senzora

2.2.2. Električni izlazni signal

Većina električnih mjernih instrumenata odašilju analogni napon ili strujni signal u kontrolnu jedinicu. Postoje četiri glavne vrste signala:

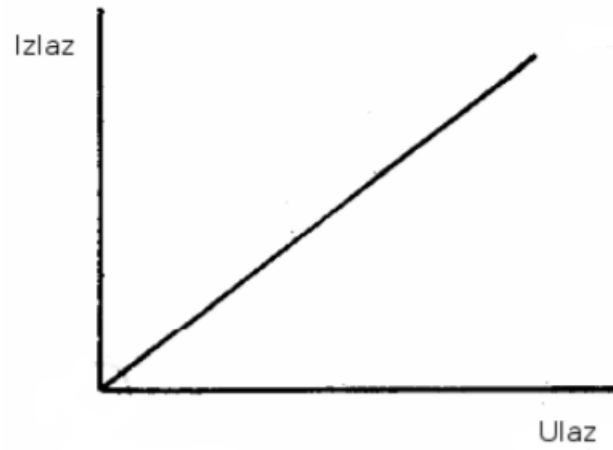
- Standardni analogni. Ovo je standardna vrsta signala. Izlaz može biti strujni ili naponski. Strujni su izlazi manje osjetljivi na elektromagnetska polja i automatski kompenziraju gubitke kroz električni kabel. Strujni 4 – 20 mA i naponski 1 – 5 V osiguravaju da se greške mjerenja automatski uoče.

- Radiometrički. Proporcionalan je naponu, pri čemu minimalna i maksimalna vrijednost zadržava konstantnu vrijednost napona napajanja.
- Digitalni izlazni.
- HART signali.

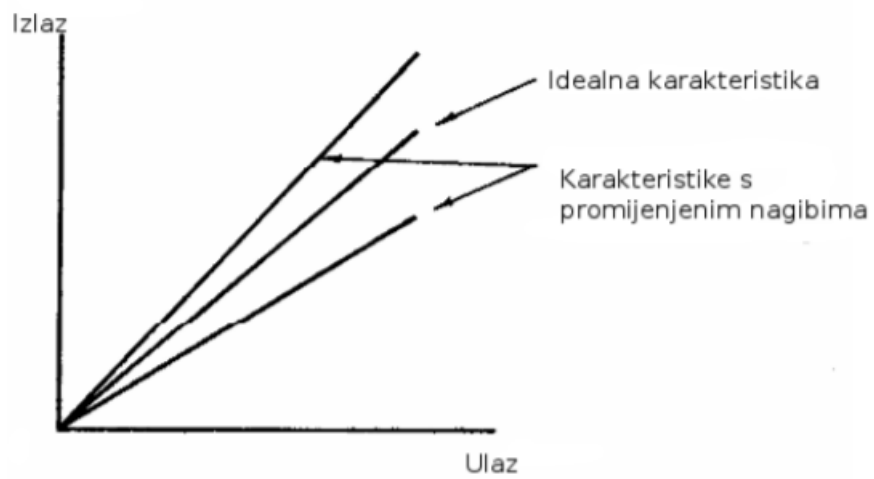
Općenito možemo reći da su strujni signali manje podložni smetnjama, pogodniji su za daljnji prijenos signala i nemaju problema s padom napona. S obzirom na promatranje odnosa ulaza i izlaza pretvornika razlikujemo statičke i dinamičke karakteristike.

Statičke karakteristike ne mijenjaju se s vremenom a dobiju se pobuđivanjem određene promjene na pretvorniku te se nakon ustaljivanja sustava u stacionarnom stanju određuje nastala promjena izlazne veličine.

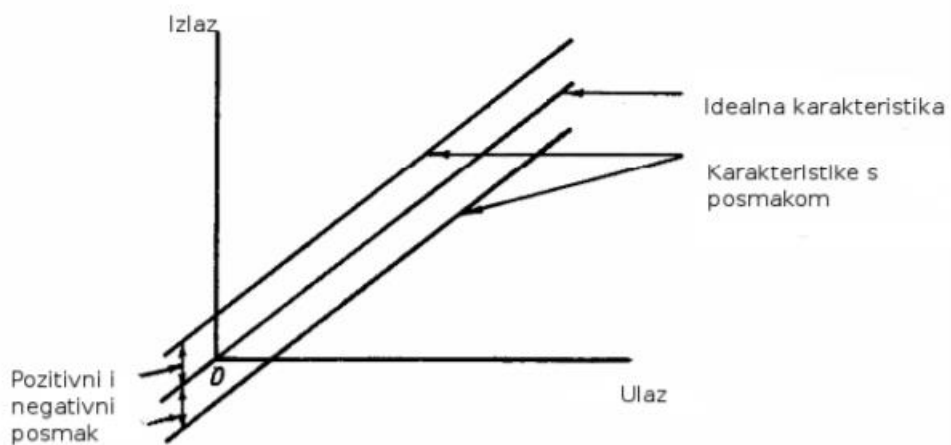
- Prikazuje linearni rast izlazne veličine iz pretvornika pri linearnom rastu ulazne veličine u mjerni pretvornik (slika 11.)
- Ako se pretvorniku mijenja osjetljivost na ulaznu veličinu, mijenja mu se i nagib idealne ulazno – izlazne karakteristike (slika 12.)
- U ulazno – izlaznim karakteristikama pretvornika može doći i do efekta posmaka nule - karakteristika sa živom nulom (slika 13.)
- Vrlo često karakteristika pretvornika nije linearna nego nelinearna krivulja - ne dobiva se linearna ovisnost izlazne veličine o ulaznoj nego nelinearna (slika 14.)
- Nelinearnost ne mora postojati samo kod karakteristika koje su u teoretskom slučaju linearne. Neke su karakteristike u teoretskom slučaju već nelinearne, no i tada postoji odstupanje od te teoretske karakteristike. Odmak od linearnosti je problem pri radu s pretvornicima te se karakteristika uvijek pokušava svesti na što linearniju, tj. vrši se linearizacija karakteristike - zamjena nelinearne krivulje linearnom, tj. pravcem (slika 15.)
- Mjerni pretvornici mogu imati ulazno – izlaznu karakteristiku s histerezom kod koje izlaz osim o ulaznoj veličini ovisi i o internom stanju sustava (Slika 16.)



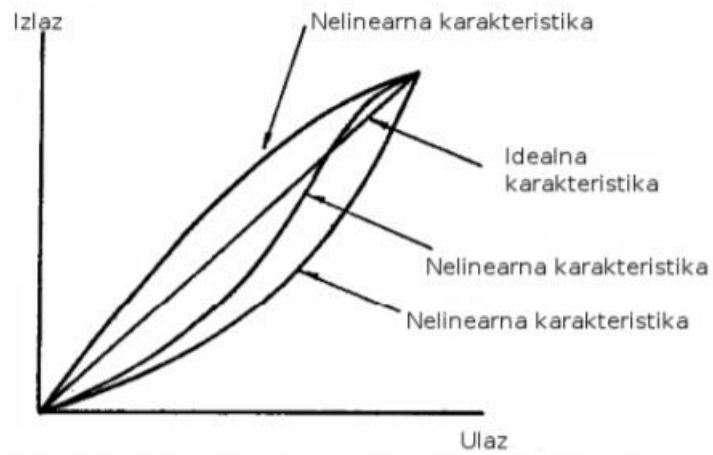
Slika 10. Idealna karakteristika



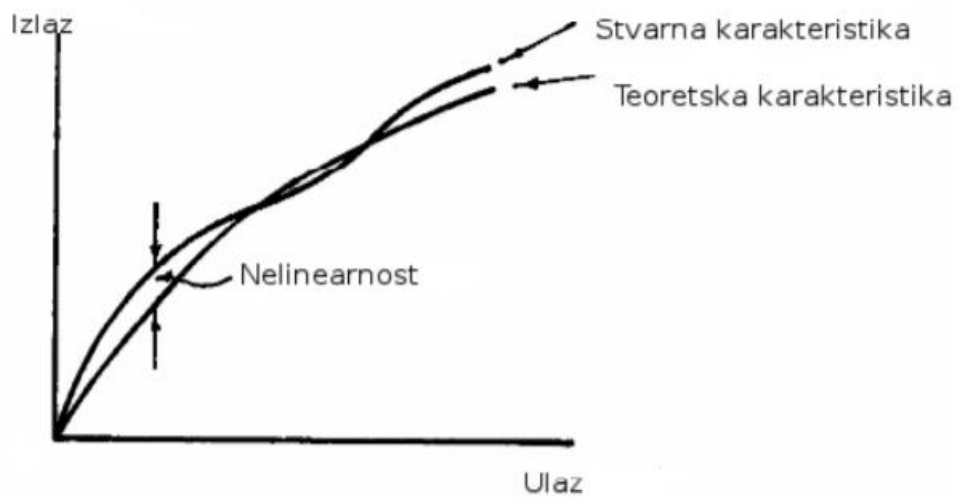
Slika 11. Karakteristike s promijenjenim nagibima.



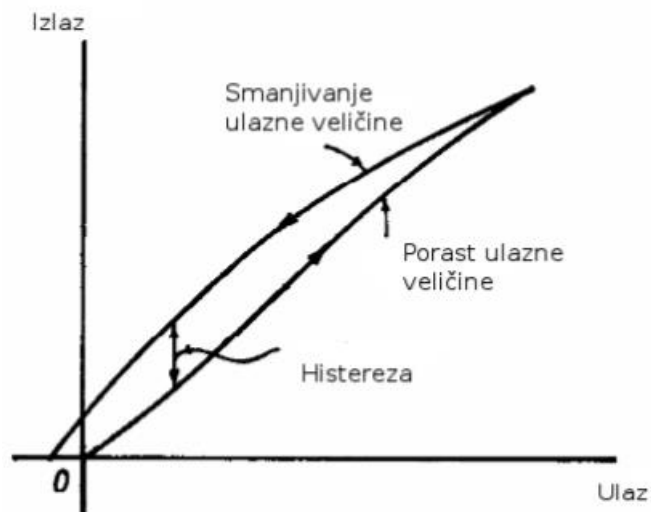
Slika 12. Karakteristika sa živom nulom.



Slika 13. Nelinearne karakteristike.



Slika 14. Nelinearnost kod karakteristike.



Slika 15. Histereza.

3. TEORIJSKE OSNOVE

3.1. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja, koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se mogu opravdano pripisati mjerenoj veličini. [8] Pojam mjerne nesigurnosti se koristi u mjeriteljstvu i njegova procjena se zasniva na principima vjerojatnosti. Sva mjerenja imaju određenu mjernu nesigurnost i vrijednost mjerene veličine je kompletna kada sadrži izjavu o mjernoj nesigurnosti. Nijedno mjerenje nije u cijelosti točno. Iz tog razloga potrebno je definirati mjernu nesigurnost, što je od iznimne važnosti kako bi se mjerenja mogla smatrati sljedivim kroz neporemećeni lanac usporedbi s referencama (etalonima).

Mjerenja nikad nisu skroz točna. Razlozi su mnogobrojni. To može biti recimo promjena temperature ili tlaka u prostoriji u kojoj se izvodi mjerenje. Može biti i do osobe koja mjeri, tj. njeno neiskustvo. Ljudska pogreška također može biti razlog pogreškama. Naravno, mjerni instrument isto tako može dovesti do neispravnosti. Mjerna nesigurnost je upravo posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja, ona govori ponešto o kvaliteti mjerenja. Dakle, svako mjerenje mora imati dva podatka. To su vrijednost mjerenja i mjerna nesigurnost. Mjerna nesigurnost mora sadržavati dva podatka. Jedan je interval unutar kojeg tvrdimo da je stvarna vrijednost mjerene veličine. Druga vrijednost je naša sigurnost da je stvarna veličina uistinu u tom intervalu. Važno je napraviti distinkciju između mjerne nesigurnosti i pogreške. Mjerni rezultat može biti vrlo blizu stvarnoj vrijednosti, a da pritom sadrži veliku mjernu nesigurnost. Takav rezultat nama je nepovoljan i nastojimo da je mjerna nesigurnost u što manjem intervalu.

Napomenimo neke konkretne razloge mjerne nesigurnosti:

- Nekonkretna definicija mjerne veličine
- Izmjereni uzorak nije reprezentativan za mjerenu veličinu
- Loše mjerenje uvjeta okoliša i kriva procjena o utjecaju okoliša na mjerni rezultat.
- Netočne vrijednosti mjernih etalona
- Netočne mjerne nesigurnosti mjernih etalona
- Netočne vrijednosti konstanta ili nekih drugih podataka uzetih iz vanjskih izvora
- Aproksimacije i pretpostavke kod mjerenja gdje one nisu dozvoljene
- Varijacije postupka korištenog u mjerenju

Kako bi se pobliže opisao utjecaj nekog razloga mjerne nesigurnosti, opišimo pobliže utjecaj temperature na mjerenje tlaka. Svima nam je jasno da tlak plina ovisi o temperaturi. To nam je jasno i iz same definicijske jednadžbe idealnog plina:

$$pV = mRT$$

U laboratoriju za mehaniku fluida izveo se eksperiment gdje je njegova svrha bila kalibracija tlakomjera. Eksperiment se izveo pomoću cilindra sa stapom i tlakomjerom. U tablici 1. prikazano je slijedeće: u mjerenju br. 1 narinut je tlak od 10,5 mbara (očitano na stupcu alkohola), a u mjerenju br. 2 ostavljen je toliki tlak, no ovaj put se cilindar obuhvatio rukom i pričekalo se da se ustali novi tlak. Naime, toplina s ruke se prenosila na cilindar pri čemu je temperatura plina porasla. To je doprinijelo porastu tlaka plina.

Br.	p_T [mbar]
1	10,5
2	13,6

Tablica 1. Eksperiment utjecaja okoliša na rezultat mjerenja.

Iz prikazanog može se zaključiti da je važno točno utvrditi uvjete okoliša, pogotovo kod mjerenja niskih tlakova (0-10 mbar).

Standardna nesigurnost mjerenja koje se dobiva kombinacijom drugih mjernih nesigurnosti naziva se kombinirana standardna nesigurnost i označava se s u_c . To je procijenjeno standardno odstupanje pridruženo rezultatu, računa se kao pozitivni drugi korijen kombinirane varijance dobivene iz svih varijantnih i kovarijantnih komponenti mjerne nesigurnosti. Što se industrije i njenih potreba tiče stvar je malo drugačija. Nakon definiranja kombinirane standardne nesigurnosti, uvodi se koeficijent k , faktor pokrivanja. Množenjem koeficijenta pokrivanja k i kombinirane standardne nesigurnosti dobiva se proširena standardna nesigurnost U .

$$U = ku_c$$

Razlog proširene mjerne nesigurnosti je jednostavan. Zbog sigurnosti želi se obuhvatiti što veći interval unutar kojeg je stvarna vrijednost mjerene veličine. Izbor faktora pokrivanja k (koji obično iznosi 2 ili 3) temelji se na vjerojatnosti pokrivanja ili razini povjerenja koja se zahtjeva od intervala. Iako je mjernu nesigurnost moguće odrediti statističkim metodama, zbog manjka vremena i resursa to se ne radi na taj način. Zato su uvedene približne metode određivanja mjerne nesigurnosti. Te metode su određene na način da ih je moguće alko

odrediti to iz vidljivih podataka i za vrijeme mjerenja. Ono što je važno napomenuti, dobro planiranje i izvedba mjerenja uvelike olakšava određivanje mjerne nesigurnosti.

3.1.1. Metode određivanja mjerne nesigurnosti

Postoje tri osnovna načina određivanja mjerne nesigurnosti. To su:

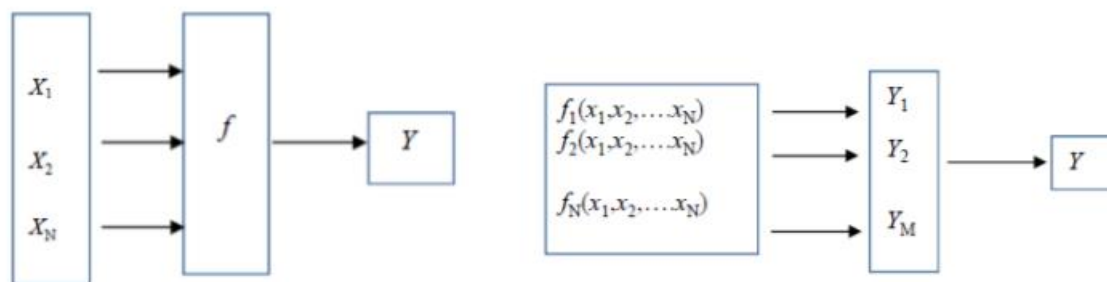
- GUM metoda (ISO – GUM)
- MCS metoda
- Procjena ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja prema normi *TS 21748 : 2004*

3.1.1.1. GUM metoda

Koraci:

A. Mjerni model

Mjerna veličina Y ne određuje se izravno, već iz funkcijske veze veličina x_1, x_2, \dots, x_N .



Slika 16. Odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine (lijevo), vektorski odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine (desno)

Prije računanja kombinirane mjerne nesigurnosti potrebno je svesti podatke iz izvora na istu razinu pouzdanosti, tj. standardnu nesigurnost $u(x_i)$.

B. Određivanje standardnih nesigurnosti $u(x_i)$ ($k = 1$)

Bez obzira na tip nesigurnosti, postoje dva načina određivanja standardnih nesigurnosti: tipa A i tip B. Potrebno je odrediti oba tipa ukoliko želimo korektno odrediti nesigurnost.

a) Tip A

Zasniva se na bilo kojoj statističkoj metodi, iz niza ponovljenih mjerenje, primjenom normalne ili Studentove razdiobe. Za podatke dobivene statistički, koristi se standardna devijacija kao način određivanja nesigurnosti. To odgovara Gaussovoj ili normalnoj razdiobi, gdje su podaci

određeni oko srednje vrijednosti, a učestalost odstupanja od srednje vrijednosti opada kako se udaljujemo od srednje vrijednosti.

Srednja vrijednost:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \Sigma(x_i)$$

Eksperimentalno standardno odstupanje (eksp. standardna devijacija, eksp. normni odmak):

$$s_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \Sigma(x_k - \bar{x})^2}$$

Eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti

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

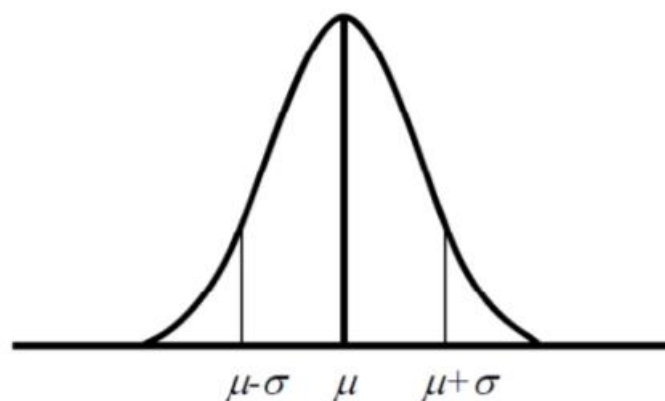
Mjerna nesigurnost glasi:

$$u(x_i) = s(x_i)$$

pri čemu u jednadžbama n predstavlja broj mjerenja.

b) Tip B

Procjena se temelji na drugim informacijama, kao što su znanstvena prosudba svih raspoloživih podataka o x_i , prethodno iskustvo ili poznavanje ponašanja i svojstava instrumenta, prethodni mjerni podaci, podaci iz vanjskih umjernica i ovjernica, podaci iz proizvođačkih specifikacija i tehnički podaci, podaci iz proračuna, podaci iz objavljenih izvora (članak, knjiga, priručnici), vlastito nahodjenje (zdrav razum), itd. Procjena se zasniva na apriornim razdiobama vjerojatnosti (normalna ili Gaussova, pravokutna ili jednolika, trokutasta i dr.).

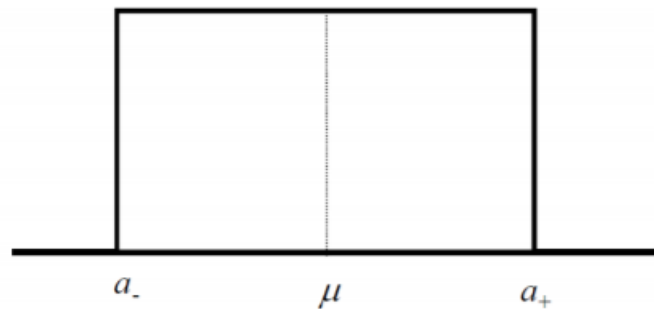


Slika 17. Gaussova razdioba.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

pri čemu je σ standardna devijacija, a μ očekivanje uz najveću vjerojatnost.

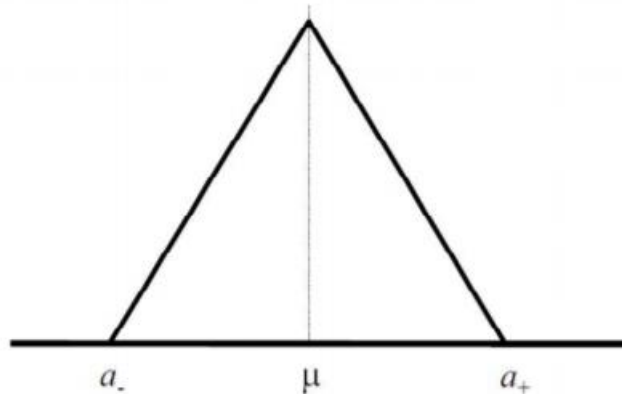
Vrste razdioba:



Slika 18. Pravokutna razdioba

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

pri čemu je a poluinterval nesigurnosti.



Slika 19. Trokutasta razdioba

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Naravno, prilikom iznošenja mjerenja, može se koristiti proširena mjerna nesigurnost, koja se dobije množenjem nesigurnost $u(x_i)$ s faktorom proširenja k .

C. Određivanje sastavljene (kombinirane) standardne nesigurnosti $u_c(y)$, ($k=1$)

Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(y)$ određuje se odgovarajućim sastavljanjem standardnih nesigurnosti procjena ulaznih veličina ako je procjena mjerne veličine y dana preko funkcijske zavisnosti o procjenama ulaznih veličina x_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sastavljena mjerna nesigurnost računa kao što je prethodno opisano.

D. Određivanje proširene mjerne nesigurnosti

Proširena mjerna nesigurnost je veličina koja određuje interval unutar kojeg se nalazi stvarna veličina, uz određenu sigurnost pri čemu to tvrdimo. Označava se s U .

$$U = ku_c(y)$$

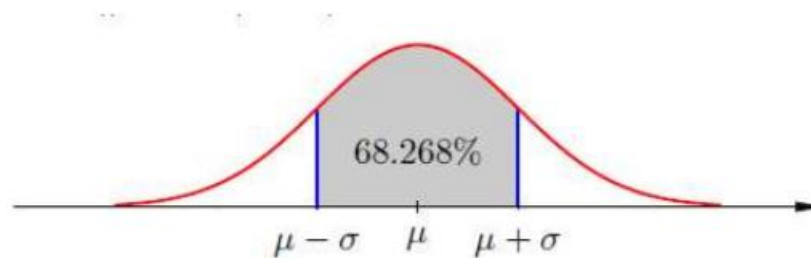
Koliko smo sigurni u ono što tvrdimo opisano je sljedećim izrazima:

$$k = 1 \rightarrow P = 68,268 \%$$

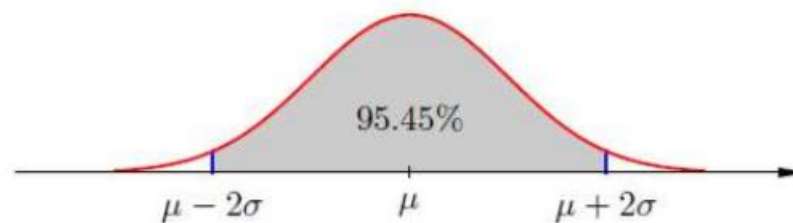
$$k = 2 \rightarrow P = 95,45 \%$$

$$k = 3 \rightarrow P = 99,73 \%$$

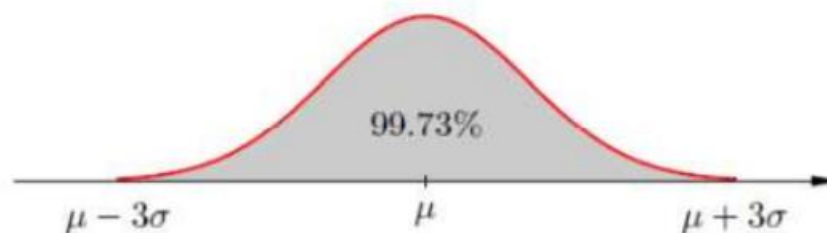
Prethodno opisano jednadžbama prikazano je pobliže na sljedećim slikama:



Slika 20. $k=1$



Slika 21. $k=2$



Slika 22. $k=3$

Primjer određivanja mjerne nesigurnost pomoću tipa A i B:

Eksperiment je obavljen u Laboratoriju za mehaniku fluida na zagrebačkom Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Cilj eksperimenta bio je utvrditi gustoću fluida (vode). Mjerenje je bilo izvedeno na sljedeći način. Prvo se izmjerila masa

menzure na električnoj vagi m_1 , potom se u menzuru nalila određena količina vode, pri čemu se izmjerila masa vode i menzure i očitao se volumen vode u menzuri. Rezultati su prikazani u tablici 2.

Br.	m_1 [g]	m_2 [g]	m [g]	m [kg]	V [mL]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]
1	222,7	295,2	72,5	0,0725	73,5	0,000074	986,4
2	222,7	324,1	101,4	0,1014	102,5	0,000103	989,3
3	222,7	345,8	123,1	0,1231	125,0	0,000125	984,8
4	222,7	370,7	148	0,148	150,0	0,000150	986,7
5	222,7	395,5	172,8	0,1728	175,0	0,000175	987,4
6	222,7	420,3	197,6	0,1976	200,0	0,000200	988,0
7	222,7	446,9	224,2	0,2242	225,0	0,000225	996,4
8	222,7	472,2	249,5	0,2495	250,0	0,000250	998,0

Tablica 2. Rezultati mjerenja za računanje gustoće fluida.

Masa m predstavlja izračunatu masu vode prema jednadžbi:

$$m = m_2 - m_1$$

Potom se računala gustoća prema izrazu:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Srednja gustoća iznosi:

$$\begin{aligned} \rho_{sr} &= \frac{\Sigma(\rho_i)}{n} \\ &= \frac{986,4 + 989,3 + 984,8 + 986,7 + 987,4 + 988,0 + 996,4 + 998,0}{8} \\ &= 989,6 \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

Eksperimentalna standardna devijacija iznosi:

$$\begin{aligned} s(x_i) &= \sqrt{\frac{\Sigma(\rho_i - \rho_{sr})^2}{n - 1}} \\ &= \sqrt{\frac{(986,4 - 989,6)^2 + (989,3 - 989,6)^2 + (984,8 - 989,6)^2 + (986,7 - 989,6)^2 + (987,4 - 989,6)^2 + (988,0 - 989,6)^2 + (996,4 - 989,6)^2 + (998,0 - 989,6)^2}{8 - 1}} \\ &= 4,9 \end{aligned}$$

Eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti iznosi:

$$\bar{s}(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{4,9}{\sqrt{8}} = 3,45$$

Rezultat glasi:

$$\rho = \rho_{sr} \pm \bar{s}(x_i)$$

$$\rho = 989,6 \pm 3,45 \frac{kg}{m^3}$$

Ukoliko želimo rezultat izraziti s proširenom mjernom nesigurnošću, mjernu nesigurnost množimo s faktorom k. Za iznos $k=2$ dobivamo sigurnost od 95,45 %.

$$U = k\bar{s}(x_i)$$

$$u(x_i) = \bar{s}(x_i) = 3,45$$

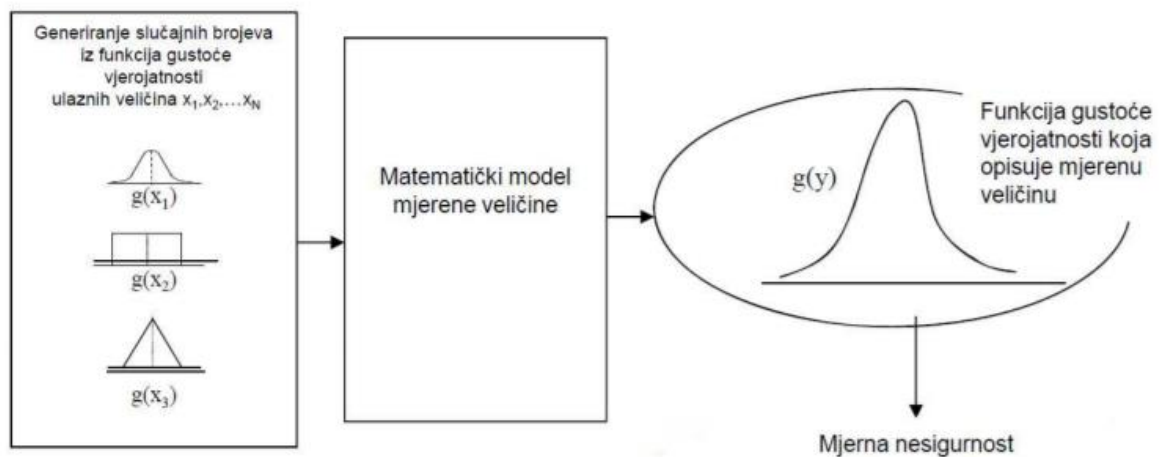
$$U = 2 * 3,45 = 6,9$$

$$\rho = 989,6 \pm 6,9 \frac{kg}{m^3}$$

U ovom je primjeru prikazan način izražavanja rezultata mjerenja.

3.1.1.2. MCS metoda

Postupak određivanja mjerne nesigurnosti prema MCS metodi temelji se na generiranju slučajnih brojeva iz funkcija gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu x_i i stvaranju odgovarajuće vrijednosti izlazne veličine y , kombinirajući različite razdiobe kojima su definirane ulazne veličine. Shema ove metode prikazan je na slici 24.



Slika 23. MCS metoda

Ova metoda može koristiti usporedbi rezultata mjerenja prema GUM metodi. MCS metoda zahtjeva izrazito veliko znanje o prirodi mjerene veličine i statističkim metodama.

3.1.1.3. Procjena ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja prema normi TS 21748 : 2004

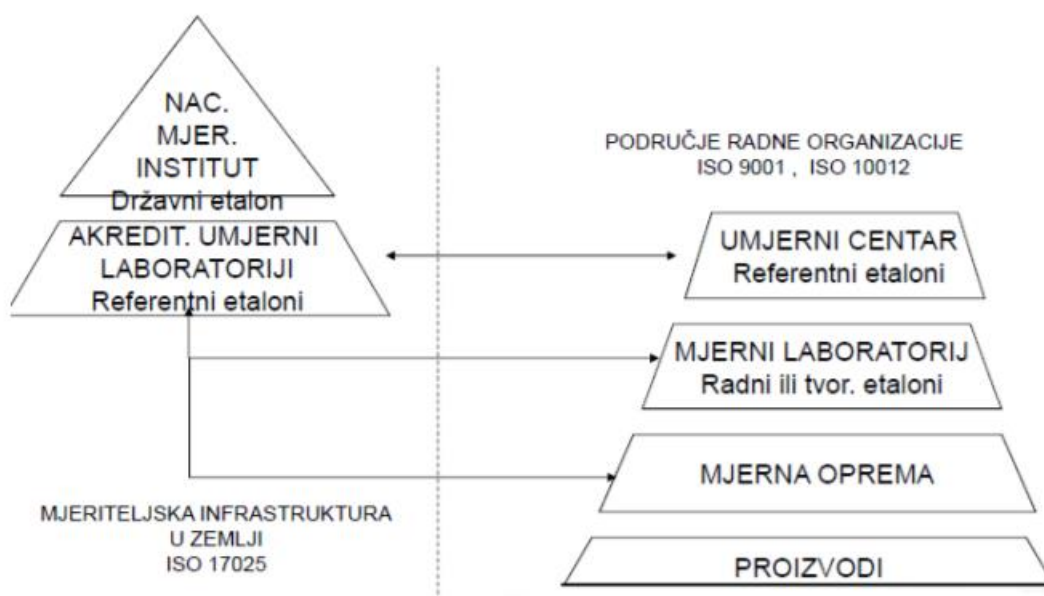
Kod ove metode koriste se ponovljivost i obnovljivost rezultata mjerenja. Te su mjere procjene odstupanja dobivena iz analize eksperimentalnih podataka.

3.2. Umjeravanje

Umjeravanje (baždarenje, kalibriranje), kao što je već rečeno, je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina koje pokazuje neko mjerilo, neka usporedbena tvar ili neki mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima.

Etalon (pramjera) predstavlja mjerni sustav koji je dogovorom, normom ili zakonom utvrđen kao utjelovljenje neke mjerne jedinice (njezina dijela ili višekratnika) ili određene vrijednosti neke fizikalne veličine. Postoje međunarodni i državni etaloni te primarni, sekundarni, usporedbeni, radni i posrednički etaloni.

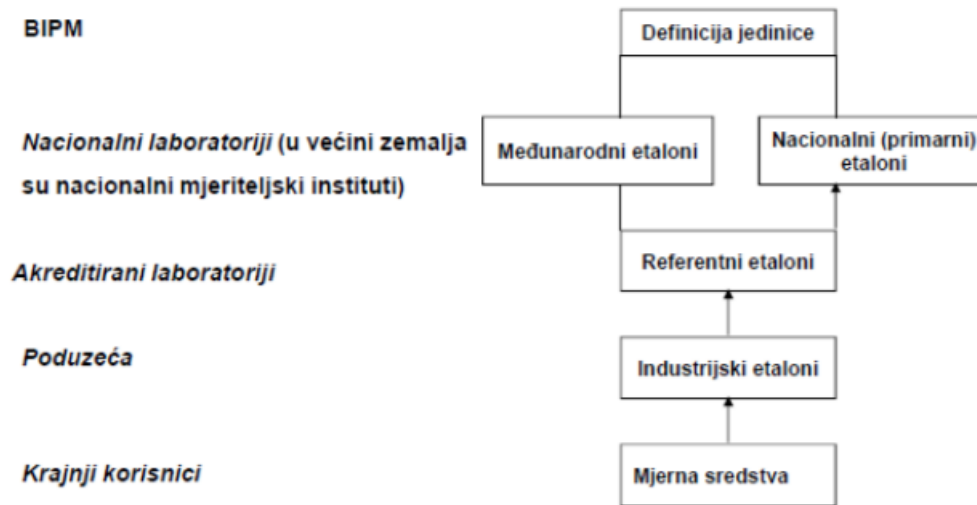
- Međunarodni etalon je međunarodno priznati etalon koji služi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima.
- Državni etalon je državno priznati etalon i služi kao osnova dodjeljivanja vrijednosti drugim mjernim instrumentima u državi.
- Primarni etalon je etalon koji je priznat kao najtočnije mjerilo.
- Sekundarni etalon je etalon kojemu je vrijednost dodijeljena usporedbom s drugim etalom.



Slika 24. Shema umjeravanja.

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata nekog etalona s kojim se on može dovesti u vezu s referentnim etalom.

Lanac sljedivosti predstavlja neprekinuti lanac umjerenih mjernih instrumenata pri čemu je svakom sljedećem instrumentu prethodni etalon.



Slika 25. Shema lanca sljedivosti.

3.3. Postupak umjeravanja pretvornika tlaka

Pretvornik tlaka koji u ovom radu ispituje, umjeriti ćemo prema *EURAMET Calibration Guide No. 17* metodi.

Ova metoda opisuje razne postupke umjeravanja, ovisno o mjernom instrumentu koji se koristi. U ovom radu opisuje se pretvornik tlaka s izlazom 4 – 20 mA.

Postupak se sastoji od nekoliko koraka, od kojih će se svaki pobliže opisati.

3.3.1. Mjerna nesigurnost

Postupak je opisan u tablici 3.

Matematički model			$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$
Standardna nesigurnost	$u(x_i)$	Standardna nesigurnost pripisana ulaznoj veličini	
	c_i	Koeficijent osjetljivosti	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$
	$u_i(y)$	Doprinos standardne nesigurnosti ulazne veličini x_i [$u(x_i)$] standardnoj nesigurnosti izlazne, mjerne veličine y	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
	$u(y)$	Ukupna standardna nesigurnost izlazne veličine y	$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$ $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$
Proširena nesigurnost	$U(y)$	Proširena mjerna nesigurnost	$U(y) = k \cdot u(y)$
	k	Faktor pokrivanja	$k = 2$ U većini slučajeva iznosi 2, pri čemu je pouzdanost 95,45 %

Tablica 3. Postupak određivanja mjerne nesigurnosti.

Kod kompleksnih proračuna koeficijent osjetljivosti c postaje suviše kompliciran za odrediti na analitički način, te se onda koriste računalni programi.

3.3.2. Odstupanje

Rezultat mjerenja glasi:

$$Y = X + \Sigma \delta X_i$$

Ovaj način iskazivanja primjeren je mjerilima tlaka s vlastitom mjernom skalom tlaka koju pokazuju na zaslonu uređaja (kovni manometri, pretvornici tlaka).

Drugi način je:

$$Y = X \Pi K_i$$

pri čemu vrijedi:

$$K_i = [1 + \delta X_i]$$

Ovaj način primjereniji je kod mjerila tlaka bez vlastite skale u mjernim jedinicama tlaka kao npr. kod transmitera s električnim izlaznim signalom, mjerna nesigurnost ovdje se izražava u bezdimenzijskom obliku.

3.3.3. Ulazne veličine

Mjerne veličine koje su dodijeljene ulaznim veličinama dijelimo u dvije kategorije: tip A i tip B. To je objašnjeno u poglavlju 3.1.1.I.B.

U mnogim slučajevima poznata je samo gornja i donja vrijednost granice, odnosno podinterval (a_+ i a_-). To je najbolje opisano pravokutnom razdiobom.

$$2a = a_+ + a_-$$

Pridružena standardna nesigurnost glasi:

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

Ukoliko znamo da su vrijednosti bliže srednjoj vrijednosti bolje je koristiti trokutastu raspodjelu.

3.3.4. Umjeravanje digitalnih manometara

Model prikazivanja izlazne veličine prikazan je slijedećim jednadžbama:

$$\Delta p_{up/down} = p_{ind,up/down} - p_{stand} + \Sigma \delta p_i$$

$$\Delta p_{up/down} = p_{ind,up/down} - p_{stand} + \delta p_{zero\ deviation} + \delta p_{repeatability}$$

Za srednju vrijednost vrijede izrazi:

$$\Delta p_{mean} = p_{ind,up/down} - p_{stand} + \delta p_{zero\ deviation} + \delta p_{repeatability} + \delta p_{histeresys}$$

$$\Delta p_{mean} = \frac{p_{ind,up} + p_{ind,down}}{2}$$

Vrijednost referentnog standarda je tlak koji očitava etalon. Taj tlak također unosi određenu nesigurnost (nesigurnost etalona u_E) koja će kasnije ući u doprinos ukupnoj nesigurnosti.

Kada su uzlazni i silazni redovi mjerenja zasebno mjereni i tako uzeti u obzir, proširena mjerna nesigurnost U s faktorom pokrivanja $k=2$ iznosi:

$$U_{up/down} = k u_{up/down}$$

$$U_{up/down} = \sqrt{u_{standard}^2 + u_{zero\ deviation}^2 + u_{repeatability}^2 + u_{resolution}^2}$$

3.3.5. Analiza nesigurnosti

U tablici su prikazani načini određivanja mjerne nesigurnosti:

Br.	Veličina X_i	Procjena x_i	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnost $P(x_i)$	Djelitelj	Standardna nesigurnost $u(x_i)$	Osjetljivost c_i	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Je d in ica
1	$p_{ind, \dots}$	$p_{i, ind, \dots}$	$2r$	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(r) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2r}{2}\right)^2}$	1	u_r	bar
2	$p_{standard}$	$p_{i, standard}$		normalna	2	$u(\text{standard})$	-1	$u_{standard}$	bar
3	$\delta p_{zero\ deviation}$	0	f_0	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	u_{f_0}	bar
4	$\delta p_{repeatability}$	0	b'	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(b') = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$u_{b'}$	bar
5	$\delta p_{hysteresis}$	0	h	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(h) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	u_h	bar
	Y	$\Delta p \dots$						$u(y)$	bar

Tablica 4. Postupak određivanja mjernih nesigurnosti

4. LABORATORIJSKA MJERENJA I UMJERAVANJE

4.1. Opis zadatka

Zadatak je bio usporediti rezultate umjeravanja pretvornika tlaka GE Druck, pretvornika tlaka visokog razreda točnosti, sa strujnim izlazom od 4 – 20 mA. Proračun je bio izveden prema preporuci EURAMET Calibration Guide No. 17 - Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers. Uspoređivali su se rezultati dvaju laboratorija. Prvo mjerenje bilo je provedeno u laboratoriju Tehničar Servag, u odjelu međulaboratorijskih usporedbi. Umjerni laboratorij osnovan je 2008. godine i akreditiran od strane Hrvatske akreditacijske agencije prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025 za umjeravanje neautomatskih vaga i utega, mjerila temperature i relativne vlažnosti, mjerila tlaka, vremenskog intervala i frekvencije. Drugo mjerenje bilo je provedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja na zagrebačkom Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Laboratorij za procesna mjerenja nasljednik je Laboratorija za toplinska mjerenja, osnovanog još 1960. godine u sklopu Visoke tehničke škole. Laboratorij djeluje na području teorije i primjene mjerenja toplinskih i procesnih veličina kao što su:

- Temperatura
- Tlak
- Vlažnost
- Protok
- Brzina strujanja fluida
- Masa
- Toplinska energija
- Toplinska svojstva tvari.

Laboratorij je nositelj državnih etalona za temperaturu tlak i vlažnost Hrvatskog mjeriteljskog instituta (HMI-a) i akreditirani umjerni laboratorij prema normi ISO/IEC 17025 od 2002. godine. Na više od 400 m² LPM posjeduje najmoderniju mjernu i računalnu opremu, a djelatnici laboratorija boravili su na brojnim znanstvenim i stručnim usavršavanjima na inozemnim institucijama i objavili više od 150 znanstvenih i stručnih radova.

4.2. Podaci o mjerenju

Podaci o prijenosnom etalonu tlaka:

Mjerilo	Pretvornik tlaka
Proizvođač	GE Druck
Tip	LPX9381
Serijski broj	2637406
Mjerno područje	0-10
Jedinica tlaka	mbar
Podjela skale	0,001 mbar
Razred točnosti	0,5% FS
Vlasnik mjerila	FSB - LPM

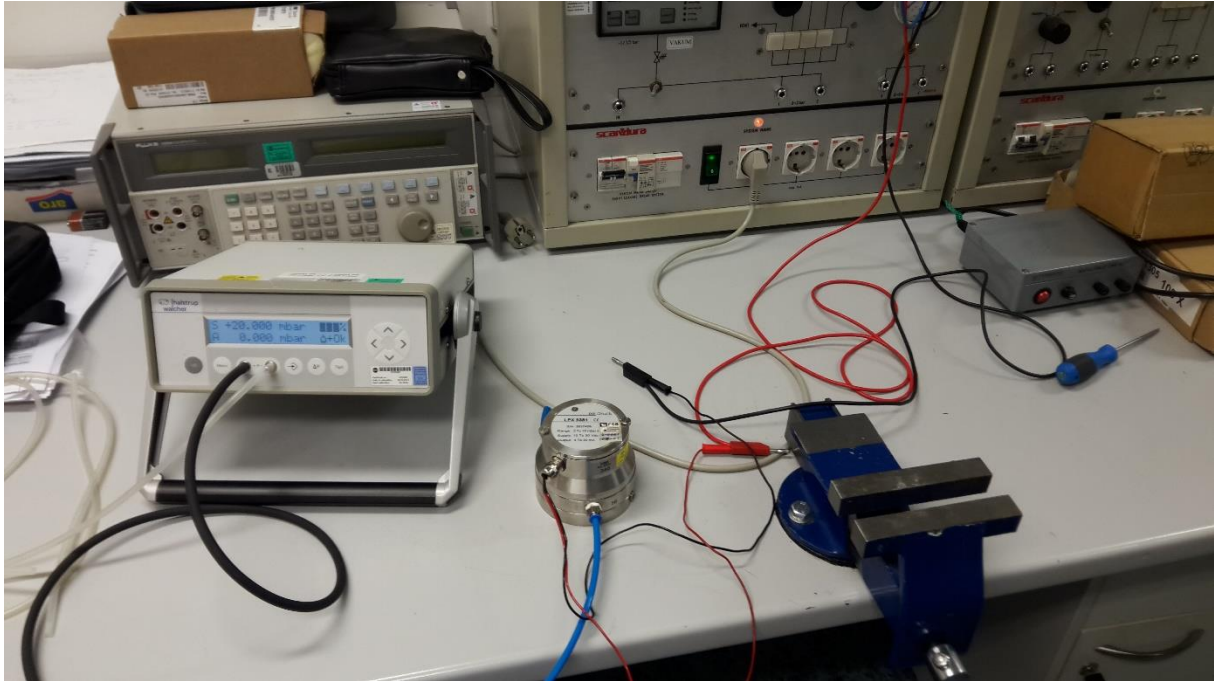
Tablica 5. Podaci o pretvorniku tlaka



Slika 26. Pretvornik tlaka GE Druck.

4.2.1. Mjerenje u laboratoriju Tehničar Servag

Mjerenje u Tehničar Servag-u bilo je izvršeno 6.11.2018. Laboratorij se nalazi u Prilazu baruna Filipovića 25.



Slika 27. Mjerna linija u laboratoriju Tehničar Servag.

Podaci okoline važni za analizu rezultata mjerenja prikazani su u tablici 2.

TEHNIČAR SERVAG - uvjeti okoliša			
	od	do	dozvoljeno odstupanje tijekom mjerenja
Temperatura zraka [°C]	23,5	23,6	±1
Tlak zraka [hPa]	1006	1006	±2

Tablica 6. Uvjeti okoliša prvog mjerenja

Kao etalon u ovom mjerenju poslužila je pumpa proizvođača Halstrup. Mjerenje je bilo izvršeno po metodi B po preporuci EURAMET cg-17.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3. Potvrda o umjeravanju može se naći u Prilogu 1. Što se tiče detalja o etalonu, oni su:

- Proivodač: Halstrup Walcher
- Tip: KAL200
- Serijski broj: 9609.0049 AF091158
- Razred točnosti: 0.1% FS
- Mjerno područje: -2000 – 2000 Pa

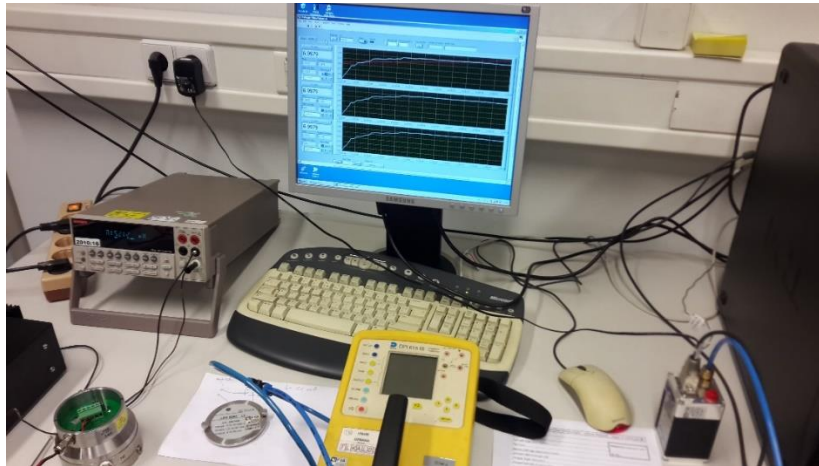
TEHNIČAR SERVAG								
Broj ispitnih točaka	Tlak etalona	Prikaz mjerila		Izračunati tlak		Srednja vrijednost	Odstupanje	Pr. mj. nesigurnost
-	mbar	mA	mA	mbar	mbar	mbar	mbar	
		uzlazno	silazno	uzlazno	silazno			
1	-0,002	3,997	4,006	-0,002	0,004	0,001	0,003	0,013
2	0,998	5,592	5,607	0,995	1,004	1,000	0,002	0,013
3	1,999	7,193	7,219	1,996	2,012	2,004	0,005	0,013
4	2,999	8,792	8,816	2,995	3,010	3,003	0,004	0,013
5	4,000	10,391	10,417	3,994	4,011	4,003	0,002	0,013
6	5,000	12,006	12,022	5,004	5,014	5,009	0,009	0,013
7	6,001	13,604	13,636	6,003	6,023	6,013	0,011	0,013
8	7,001	15,204	15,239	7,003	7,024	7,013	0,012	0,013
9	8,002	16,818	16,835	8,011	8,022	8,017	0,015	0,013
10	9,002	18,426	18,434	9,016	9,021	9,019	0,017	0,013
11	10,003	20,031	20,033	10,019	10,021	10,020	0,017	0,013

Tablica 7. Rezultati mjerenja u laboratoriju Tehničar Servag.

Navedena proširena mjerna nesigurnost je iskazana kao standardna nesigurnost mjerenja, pomnožena faktorom dva, tj. $k=2$, što znači da za normalnu raspodjelu granice pouzdanosti pokriva 95% vrijednosti. Standardna nesigurnost je određena u skladu s EA preporukom EA-4/02 M:2013.

4.2.2. Mjerenje u Laboratoriju za procesna mjerenja

Mjerenje je bilo izvršeno 14.11.2018. Laboratorij se nalazi u istočnoj zgradi zagrebačkog Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 28. Mjerna linija u LPM-u.

Podaci okoline važni za analizu rezultata prikazani su u tablici 4.

LPM	
Temperatura [°C]	24 ± 1
Tlak [hPa]	1016 ± 1
Rel. vlaga	38 ± 2

Tablica 8. Uvjeti okoliša drugog mjerenja

Mjerenje je bilo izvršeno po metodi B po preporuci EURAMET cg-17.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 9., a detaljniji opis proračuna mjerne nesigurnosti svih točaka u tablicama 11. – 21. **Etalon je umjeren sa zvonastim manometrom koji je primarni etalon u LPM-u. Podaci o etalonu u LPM:**

- Proizvođač – Mensor
- Tip/serijski broj: 82246-1/WI02058
- Mjerno područje/razred točnosti: 0 – 70 mbar/0.01% F.S.

LABORATORIJ ZA PROCESNA MJERENJA - FSB														
Broj ispitne točke	Tlak etalona	Prikaz mjerila		Izračunati tlak		Srednja vrijednost	Odstupanje	Histereza	$u_{\text{hysteresis}}$	u_{zero}	$u_{\text{resolution}}$	$u_{\text{repeatability}}$ (srednje)	Mj. nesig. u	Proš. mj. nesig. U
-	mbar	mA	mA	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar
		uzlazno	silazno	uzlazno	silazno									
1	0,000	4,000	4,006	0,000	0,004	0,002	0,002	0,004	0,001	0,000	0,0006	0,001	0,0014	0,0046
2	1,000	5,605	5,614	1,003	1,009	1,006	0,006	0,006	0,002	0,000	0,0006	0,001	0,0019	0,0055
3	2,000	7,200	7,218	2,000	2,011	2,006	0,006	0,011	0,003	0,000	0,0006	0,001	0,0034	0,0086
4	3,000	8,801	8,817	3,001	3,011	3,006	0,006	0,010	0,003	0,000	0,0006	0,001	0,0030	0,0079
5	4,000	10,395	10,410	3,997	4,006	4,002	0,002	0,009	0,003	0,000	0,0006	0,001	0,0029	0,0075
6	5,000	12,001	12,011	5,001	5,007	5,004	0,004	0,006	0,002	0,000	0,0006	0,001	0,0020	0,0059
7	6,000	13,604	13,615	6,003	6,009	6,006	0,006	0,007	0,002	0,000	0,0006	0,001	0,0022	0,0062
8	7,000	15,192	15,211	6,995	7,007	7,001	0,001	0,012	0,003	0,000	0,0006	0,001	0,0036	0,0089
9	8,000	16,811	16,809	8,007	8,006	8,006	0,006	0,001	0,000	0,000	0,0006	0,001	0,0010	0,0038
10	9,000	18,429	18,422	9,018	9,014	9,016	0,016	0,004	0,001	0,000	0,0006	0,001	0,0016	0,0049
11	10,000	20,022	20,022	10,014	10,014	10,014	0,014	0,000	0,000	0,000	0,0006	0,001	0,0009	0,0036

Tablica 9. Rezultati mjerenja u LPM-u.

Podaci potrebni za računanje mjerne nesigurnosti kod mjerenja u LPM-u								
Rezolucija	0,001							
Nulto odstupanje	0							
Podaci za ponovljivost								
Broj ispitne točke	Tlak etalona	Prikaz mjerila		Izračunati tlak		Srednja vrijednost	Ponovljivost	$u_{\text{repeatability}}$
-	mbar	mA	mA	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar
		uzlazno	silazno	uzlazno	silazno			
1	0,000	3,998	4,009	-0,001	0,006	0,002	0,002	0,0005
2	5,000	12,002	12,009	5,001	5,006	5,003	0,001	0,0002
3	10,000	20,030	20,030	10,019	10,019	10,019	0,005	0,0014
Proš. nesig. etalona U_E	0,0018							
k (koef. za proš. nesig.)	2							

Tablica 10. Podaci potrebni za računanje mjerne nesigurnosti

Točka 1		p_1 [mbar] =								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00230
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,00375	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00108	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00460
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 11. Mjerna nesigurnost točke 1.

Točka 2		p_2 [mbar] =								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00277
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,00562	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00162	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00554
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 12. Mjerna nesigurnost točke 2.

Točka 3		p_3 [mbar] =								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00428
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,01125	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00325	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00855
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 13. Mjerna nesigurnost točke 3.

Točka 4		p_4 [mbar] =	3,000								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00393	
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,01000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00289	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00786	
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar			
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar			
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar			
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar			

Tablica 14. Mjerna nesigurnost točke 4.

Točka 5		p_5 [mbar] =	4,000								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00376	
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,00938	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00271	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00752	
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar			
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar			
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar			
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar			

Tablica 15. Mjerna nesigurnost točke 5.

Točka 6		p_6 [mbar] =	5,000								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00293	
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,00625	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00180	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00585	
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar			
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar			
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar			
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar			

Tablica 16. Mjerna nesigurnost točke 6.

Točka 7		p_7 [mbar] =								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	
		6,000								0,00309
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,00688	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00199	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00618
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 17. Mjerna nesigurnost točke 7.

Točka 8		p_8 [mbar] =								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	
		7,000								0,00445
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,01187	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00343	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00890
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 18. Mjerna nesigurnost točke 8.

Točka 9		p_9 [mbar] =								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	
		8,000								0,00189
1	Histereza $u_{\text{hysteresis}}$	0,00125	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00036	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00378
2	Nulto odstupanje u_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $u_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $u_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * (\frac{2a}{2})^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 19. Mjerna nesigurnost točke 9.

Točka 10	p_{10} [mbar] =	9,000								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00247
1	Histereza $U_{\text{hysteresis}}$	0,00437	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0,00126	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00493
2	Nulto odstupanje U_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $U_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $U_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

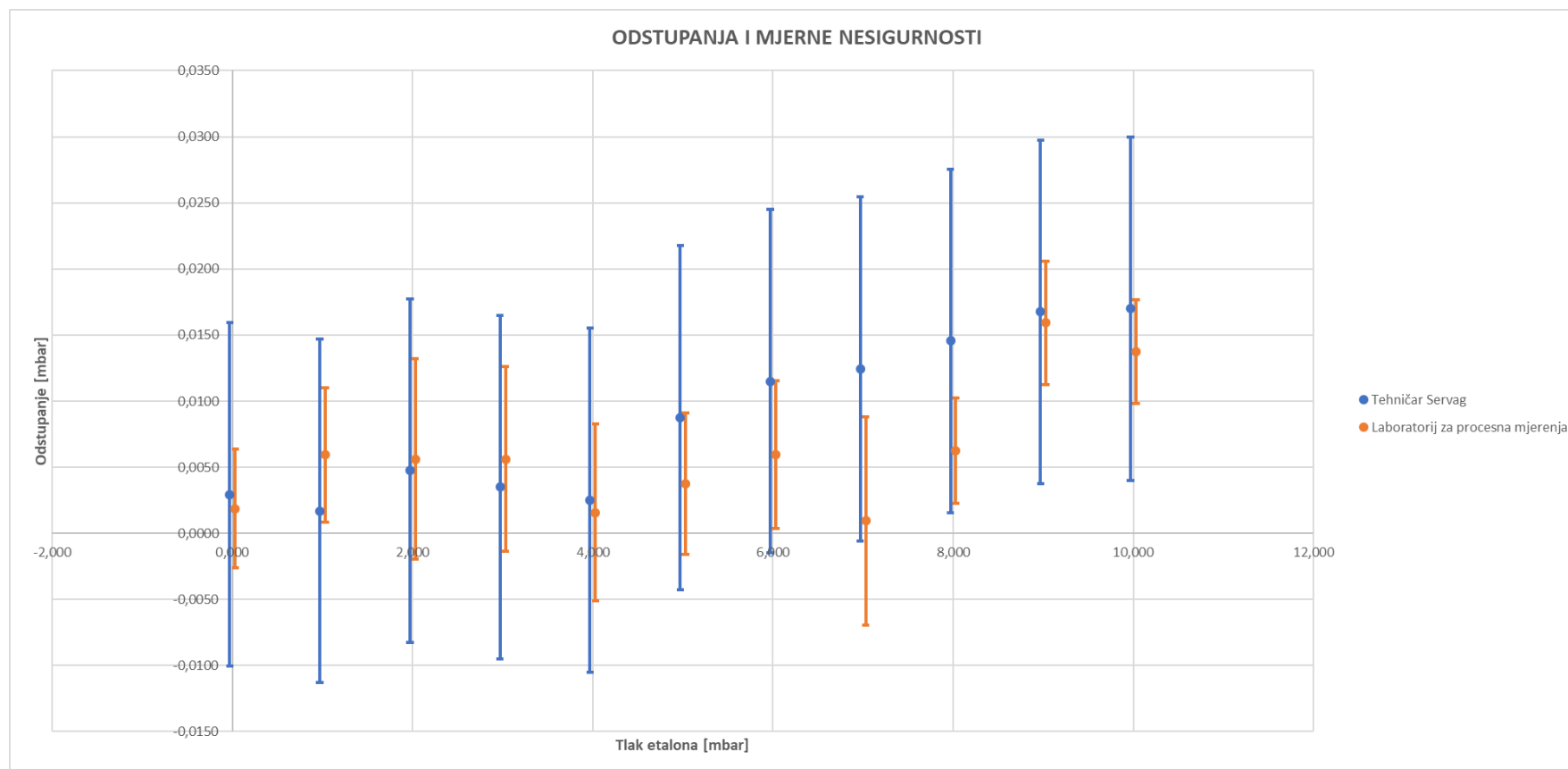
Tablica 20. Mjerna nesigurnost točke 10.

Točka 11	p_{11} [mbar] =	10,000								
Broj	Veličina	Širina distribucije $2a$	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost c	Doprinos nesigurnosti $u_i(y)$	Jedinica	Mjerna nesigurnost [mbar]	0,00183
1	Histereza $U_{\text{hysteresis}}$	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0,00000	mbar	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [mbar]	0,00365
2	Nulto odstupanje U_{zero}	0,00000	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0	mbar		
3	Rezolucija $U_{\text{resolution}}$	0,00100	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0,00058	mbar		
4	Ponovljivost $U_{\text{repeatability}}$	0,00250	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{2a}{2}\right)^2}$	1	0,00072	mbar		
5	Etalon u_E		Normalna	2	u(standard)	-1	0,0009	mbar		

Tablica 21. Mjerna nesigurnost točke 11.

4.3. Usporedba rezultata umjeravanja

Za usporedbu je prikazan dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti.



Slika 29. Dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti.

4.4. Računanje E_n vrijednosti

Kao kriterij prihvatljivosti za pojedinačne rezultate koji za obradu uspješnosti sudjelovanja koriste statističko određivanje rezultata može se koristiti E_n broj. Može se reći da za E_n broj vrijedi sljedeće:

$$|E_n| \leq 1 - \text{zadovoljava}$$

$$|E_n| \geq 1 - \text{ne zadovoljava}$$

E_n broj računa se prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_x^2 - U_X^2}}$$

pri čemu je: U_X – proširena mjerna nesigurnost dodijeljene vrijednosti X (utvrđena u referentnom laboratoriju), a U_x – proširena mjerna nesigurnost sudionikovog rezultata x . Računanje E_n vrijednosti prikazano je u tablici 7.

RAČUNANJE E_n VRIJEDNOSTI						
Br. ispitne točke	Nazivni tlak	LABORATORIJ ZA PROCESNA MJERENJA		TEHNIČAR SERVAG		E_n vrijednost
		Odstupanje	Proširena mj. nesig.	Odstupanje	Proširena mj. nesig.	
-	mbar	mbar	mbar	mbar	mbar	-
1	0,000	0,002	0,0046	0,003	0,013	0,077
2	1,000	0,006	0,0055	0,002	0,013	0,301
3	2,000	0,006	0,0086	0,005	0,013	0,056
4	3,000	0,006	0,0079	0,004	0,013	0,140
5	4,000	0,002	0,0075	0,002	0,013	0,062
6	5,000	0,004	0,0059	0,009	0,013	0,351
7	6,000	0,006	0,0062	0,011	0,013	0,386
8	7,000	0,001	0,0089	0,012	0,013	0,730
9	8,000	0,006	0,0038	0,015	0,013	0,614
10	9,000	0,016	0,0049	0,017	0,013	0,058
11	10,000	0,014	0,0036	0,017	0,013	0,241

Tablica 22. Računanje E_n vrijednosti.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je pobliže opisati način umjeravanja pretvornika tlaka razreda visoke točnosti.

U prvom dijelu rada prikazana je i opisana teoretska osnova umjeravanja općenito i umjeravanja pretvornika tlaka s posebnim naglaskom na pretvornike tlaka sa strujnim izlazom.

U drugom dijelu rada opisano je mjerenje koje je bilo izvedeno u svrhu ovog rada i njihova usporedba. Mjerenja su bila izvedena u laboratoriju Tehničar Servag i Laboratoriju za procesna mjerenja. Može se zaključiti da su mjerenja bila kvalitetno izvršena. Što se samih rezultata tiče, primjećuje se da su točke u području 7 mbar nešto lošije izmjerene i upućuju na to da se trebalo obratiti više pažnje. En vrijednost je kod svih točaka manja od 1 i stoga se zaključuje da je umjeravanje prihvatljivo.

Ovaj rad je prikazao način umjeravanja prema savjetu EURAMET-a.

POPIS LITERATURE

1. D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: *Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici)*, FSB – LPM
2. D. Zvizdic, L. Grgec Bermanec, A. Schultz, T. Veliki: *Characterization of LPM diving bell manometer*, IMEKO. IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference
3. D. Zvizdić, L. G. Bermanec, D. Šestan: *Distributed structure of Croatian metrology institute*, *Journal of Physics*: Conference Series 1065 (11), 112002
4. *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers*, EURAMET Calibration Guide No. 17 Version 3.0 (04/2017)
5. *Guideline DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges*, Physikalisch Technische Bundesanstalt Edition 03/2014
6. *Pravila za međulaboratorijske usporedbe HAA-PR-2/6*, HAA – Hrvatska akreditacijska agencija
7. R. S. Figliola, D. E. Beasley: *Theory and design for mechanical measurements*, John Wiley and Sons, Inc., 1991.

Prilog 1. Potvrda o umjeravanju „Tehničar Servag“ i „LPM“



broj certifikata
certificate number
270-C42-18-1

POTVRDA O UMJERAVANJU CALIBRATION CERTIFICATE

naručitelj applicant	FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE I.Lučića 1, 10000 Zagreb
vlasnik owner	FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE I.Lučića 1, 10000 Zagreb
lokacija location	TEHNIČAR SERVAG
odjel section	MEDULABORATORIJSKE USPOREDBE

mjerilo measure	Pretvornik tlaka <i>Pressure transducer</i>	
proizvođač manufacturer	GE Druck	
tip type	LPX 9381	
mjerno područje measuring range	od from 0 mbar	do to 10 mbar
serijski broj serial number 2637406	inventarni br. inventory no. HMI 340	

podešavanje adjustment
nije bilo izvedeno
was not performed

Detalji su dati u poglavlju stanje mjerila prije umjeravanja.
Details are given in chapter measure status before calibration.

datum umjeravanja
date of calibration
06.11.2018

izveo performed by
Mario Cerle
internally digitally signed

datum odobrenja
date of approval
06.11.2018

odobrio approved by
Marin Stanić
voditelj područja

digitally signed
date: 06.11.2018



Ovaj dokument može biti objavljen ili prosljeđen samo u cijelosti. Valjanost potpisa može se provjeriti u elektronskoj verziji.
This document may be published or forwarded only in full. Signature validity can be verified in electronic version.

Tehničar Servag d.o.o., Crnojezerska 18, 10000 Zagreb
T +385 1 48 46 425, F +385 1 48 46 429, E info@tehnicar-servag.hr, W www.tehnicar-servag.hr

strana page
v2.2 1 / 5

TEHNIČAR

SERVAG

broj certifikata
certificate number
270-C42-18-1

postupak umjeravanja
calibration method

Umjeravanje je provedeno metodom prema uputama CTL10U31 izdanje 2018-02-05 i EURAMET / cg-17 / v3.0 / 2017.
Calibration was performed following procedure CTL10U31 issue 2018-02-05 and EURAMET / cg-17 / v3.0 / 2017.

mjesto umjeravanja
place of calibration

TEHNIČAR SERVAG d.o.o.
Laboratorij C3.03 - Tlak, Prilaz baruna Filipovića 25, 10000 Zagreb

uvjeti okoliša
environmental conditions

		od from	do to	dozvoljeno odstupanje tijekom mjerenja tolerance during measurements
temperatura zraka <i>air temperature</i>	(°C)	23,5	23,6	± 1
tlak zraka <i>air pressure</i>	(hPa)	1006	1006	± 2

broj umjernice korištenog referentnog etalona
certificate no. of reference standards used

18A43, A2018/098

sljedivost
traceability

Iskazani mjerni rezultati sljedivi su do nacionalnog etalona, a time i na međunarodno potvrđenu realizaciju SI-jedinica.
The reported measurement values are traceable to national standards and thus to internationally supported realizations of the SI-units.

podaci mjerila
measure information

najmanja podjela (d)
minimum interval (d)
0,001 mbar

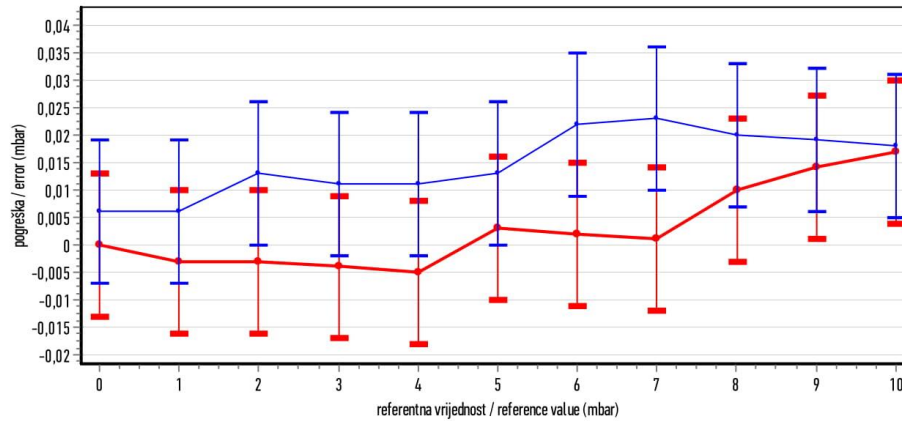
razred točnosti
accuracy class
0,1 % FS

stanje mjerila prije umjeravanja (zatečeno stanje)
state of measure before calibration (as found)

Podešavanje mjerila nije bilo potrebno.
Adjustment of measure was not required.

rezultati mjerenja (završno stanje)
 measurement results (as left)

referentna vrijednost reference value (mbar)	prikaz mjera measure indication (mA)	izračunata vrijednost calculated value (mbar)	pogreška error (mbar)	mjerna nesigurnost uncertainty (mbar)
<i>uzlazni tlak increasing pressure</i>			—●—	⊥T
-0,002	3,997	-0,002	0,000	0,013
0,998	5,592	0,995	-0,003	0,013
1,999	7,193	1,996	-0,003	0,013
2,999	8,792	2,995	-0,004	0,013
4,000	10,391	3,994	-0,005	0,013
5,000	12,006	5,004	0,003	0,013
6,001	13,604	6,003	0,002	0,013
7,001	15,204	7,003	0,001	0,013
8,002	16,818	8,011	0,010	0,013
9,002	18,426	9,016	0,014	0,013
10,003	20,031	10,019	0,017	0,013
<i>silazni tlak decreasing pressure</i>			—●—	⊥T
10,003	20,033	10,021	0,018	0,013
9,002	18,434	9,021	0,019	0,013
8,002	16,835	8,022	0,020	0,013
7,001	15,239	7,024	0,023	0,013
6,001	13,636	6,023	0,022	0,013
5,000	12,022	5,014	0,013	0,013
4,000	10,417	4,011	0,011	0,013
2,999	8,816	3,010	0,011	0,013
1,999	7,219	2,012	0,013	0,013
0,998	5,607	1,004	0,006	0,013
-0,002	4,006	0,004	0,006	0,013

grafi pogreška
 errors chart


Za bolji pregled, točke greške na pojedinim mjernim vrijednostima povezane su linijom.
 For better clarity, the discrete points of the errors at each measuring position were connected by line.

TEHNIČAR

SERVAG

broj certifikata
certificate number
270-C42-18-1

izjava
statement

Iskazani mjerni rezultati i pripadajuća mjerna nesigurnost odnose se na izmjerene vrijednosti u trenutku mjerenja i ne impliciraju dugoročnu stabilnost.
The measurement results and uncertainties quoted refer only to the measured value at the time of measurement and carry no implication regarding the long term stability.

Korišteni medij kod umjeravanja: zrak.
Medium used for calibration: air.

mjerna nesigurnost
uncertainty

Navedena proširena mjerna nesigurnost je iskazana kao standardna nesigurnost mjerenja, pomnožena faktorom dva, tj. $k=2$, što znači da za normalnu raspodjelu granice pouzdanosti pokriva 95% vrijednosti. Standardna nesigurnost je određena u skladu s EA preporukom EA-4/02 M: 2013.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by coverage factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with EA Publication EA-4/02 M: 2013.

LPM-FSB	RADNA PODLOGA (Work Report)	Mark: F-CPTL02-A					
Mjerilo (Instrument)	PRETVORNIK TLAKA						
Proizvođač (Manufacturer)	GE DRUCK						
Tvornički broj (Serial number)	2637406						
Tip (Type)	LPX9381						
Mjerno područje (Measurement range)	0-10 mbar						
Jedinica tlaka (Pressure unit)	mbar						
Podjela skale (Resolution)	0.001						
Razred točnosti (Accuracy class)	0.5 % F.S.						
Vlasnik mjerila (Owner)	FSB-LPM						
Radni etaloni (Standards):	TLPRE07						
Uvjeti ispitivanja (Calibration conditions):							
Temperatura (Temperature): Etalon:	Tlak (Pressure): Etalon:	Rel. vlaga (Rel humidity): Etalon:					
24 ± 1 °C	1016 ± 1	38 ± 2					
		∅					
PODACI DOBIVENI UMJERAVANJEM (CALIBRATION RESULTS):							
TIP UMJERAVANJA : A B <input checked="" type="radio"/> (zaokruži) (Calibration type)							
Tlak etalona (Indicated pressure)	Utezi br.: (Weights No.)	Očitavanje (Reading)					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
p		mA	mA				
1.	0	4.000	4.006				
2.	1	5.605	5.614				
3.	2	7.200	7.218				
4.	3	8.801	8.817				
5.	4	10.395	10.410				
6.	5	12.001	12.011				
7.	6	13.604	13.615				
8.	7	15.192	15.211				
9.	8	16.811	16.809				
10.	9	18.429	18.422				
11.	10	20.022	20.022				
Umjeravao (Calibrated by):		Datum (Date): 14.11.2018.					