

PROCENA MERNE NESIGURNOSTI PRIMARNOG ETALONA DIFERENCIJALNOG PRITISKA

Dragan Pantić, Nikola Petrović, Čedomir Belić, Zoran Nikolić

Ključne reči: diferencijalni pritisak, merna nesigurnost, klipni manometar sa tegovima

KRATAK SADRŽAJ

Procena merne nesigurnosti može biti veoma složena zbog brojnih ulaznih veličina uključenih u model merenja. Ovaj rad se fokusira na procenu nesigurnosti diferencijalnog pritiska koji generišu par klipnih manometara sa tegovima. Metoda procene nesigurnosti je u skladu sa opšteprihvaćenim kriterijumima definisanim u Vodiču za izražavanje nesigurnosti u merenju. Nesigurnosti merenja promene temperature sklopa klip-cilindar jedinice, ponovljivosti i rezolucije sistema, kao i efektivne površina sklopa klip-cilindar jedinice, igraju značajnu ulogu u ukupnoj mernoj nesigurnosti.

MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION OF THE PRIMARY DIFFERENTIAL PRESSURE STANDARD

Keywords: differential pressure, measurement uncertainty, pressure balance

ABSTRACT

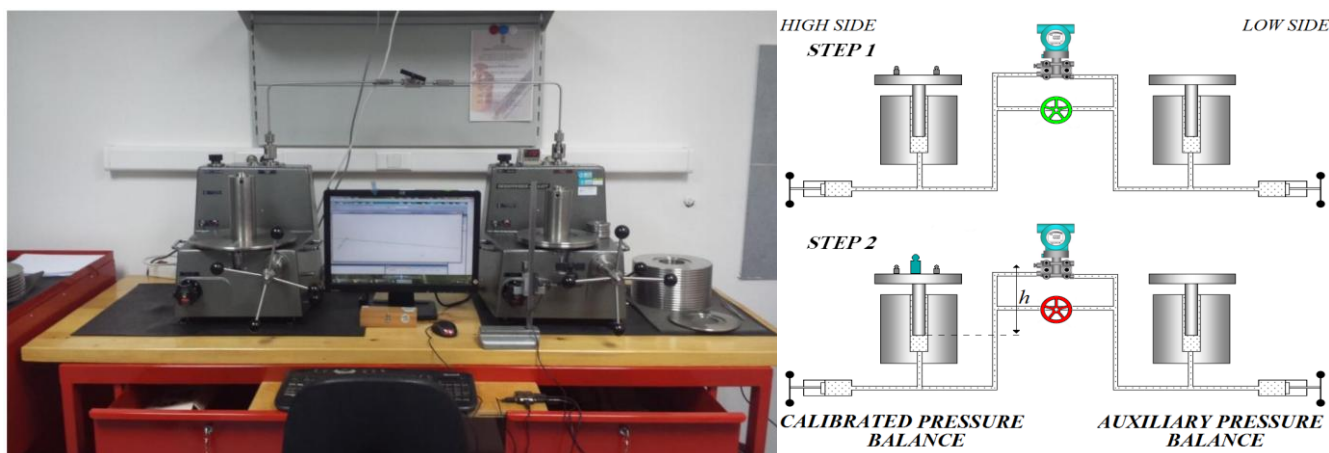
The estimation of measurement uncertainty can be very complex due to the numerous input quantities involved in the measurement model. This study focuses on evaluating the uncertainty of differential pressure generated by a pair of pressure balances. The method of evaluating uncertainties is in line with generally accepted criteria expressed in the ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). The temperature changes of the piston-cylinder assembly, repeatability and resolution of the system, as well as the effective area of the piston-cylinder assembly at null pressure, play a significant role in the overall measurement uncertainty.

UVOD

Za procese koji uključuju merenje i kontrolu protoka fluida, merenje diferencijalnog pritiska je od ključne važnosti. Praćenje zaprljanosti filtera u industrijskim procesa sve više se vrši pomoću merila diferencijalnih pritisaka. Rasprostranjena primena merenja diferencijalnih pritisaka je u kontroli nadpritiska u čistim sobama i merenju nivoa tečnosti u zatvorenim rezervoarima. Tačnost merenja diferencijalnog pritiska može se obezbediti samo ako su rezultati merenja sledljivi do SI korišćenjem primarnih etalona pritisaka. U ovom radu prikazan je i okarakterisan sistem za generisanje diferencijalnog pritiska koji se koristi u Direkciji za mere i dragocene metale i predstavlja etalon diferencijalnog pritiska. Procenu merne nesigurnosti diferencijalnog pritiska generisanog parom klipnih manometara je u skladu sa smernicama datim u Vodiču za iskazivanje nesigurnosti u merenju (The Guide to the expression of the uncertainty in measurement -GUM) [1].

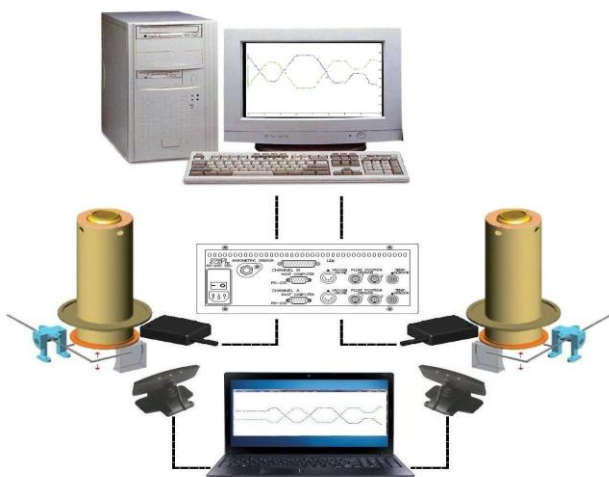
SISTEM I METODA ZA GENERISANJE DIFERENCIJALNOG PRITISKA

Sistem i metoda za generisanje diferencijalnog pritiska zahteva dva KMT spojenih na način prikazan na slici 1. Klipni manometri sa tegovima (KMT) se uglavnom koriste kao primarni etaloni. Merne nesigurnosti ostvarenih pritiska su reda veličine do nekoliko ppm-a. Pritisak se meri u uslovima ravnoteže između lokalne gravitacione sile koja deluje na tegove i rezultujuće sile koju proizvodi pritisak u sistemu koji deluje na efektivnu površinu klipa i klip-cilindar jedinice. Sistem za generisanje diferencijalnog pritiska zahteva dva kratko spojena KMT i inicijalno postavljenih u ravnotežu [2,3,4,5]. Diferencijalni pritisak se generiše povećanjem mase na jednom od klipnih manometara sa tegovima kada su isti odvojeni ventilom. Klipni manometri su proizvođača Desgranges-Huot opsega generisanja pritiska do 100 MPa.



Slika 1. Sistem za generisanje diferencijalnog pritiska (zeleni ventil predstavlja otvoren ventil, crveni ventil predstavlja zatvoren ventil, sivi tegovi su tegovi korišćeni za uspostavljanje ravnoteže dva KMT-a, dok je plavi teg teg kojim se generiše diferencijalni pritisak).

Diferencijalni pritisak moguće je generisati pri bilo kom linijskom pritisku u opsegu rada KMT-a. Generisanje diferencijalnog pritiska se sastoji iz dva koraka koja su prikazana na slici 1.. U prvom koraku, sa otvorenim ventilom, KMT se kratko spajaju i postavljaju u ravnotežu. Sa KMT koji imaju istu nominalnu efektivnu površinu klip-cilindar jedinice postiže se najveća osetljivost postavljanja ravnoteže [6]. Sistem se sastoji od KMT čiji klip-cilindar jedinice imaju nominalnu efektivnu površinu od 4,9 mm². Ravnoteža kratko spojenih KMT-ova je uspostavljena kada klipovi oba KMT-a propadaju svojim prirodnim brzinama [7].



Slika 2. Sistem za određivanje ravnoteže KMT-a.

Ravnoteža se uspostavljena korišćenjem tegova za podešavanje – *trim weights* (garniture tegova klase tačnosti F2 u opsegu merenja od 10 mg do 50 g). Stanje ravnoteže je određeno pomoću dve HP HD 3300 kamere postavljene u poziciju da snimaju poziciju indikatora klip-cilindar jedinice. Laboratorija je razvila softver koji u realnom vremenu vrši obradu vide zapisa dobijenog sa HP HD 3300 kamera i daje prikaz pozicije indikatora u vidu grafikona. Softver je razvijen u VisualStudio okruženju korišćenjem OpenCV alate. Sistem sa dve kamere je prethodno validovan poredjenjem sa sistemom 2456 Piston Gauge Monitor - Fluke Cal (slika 2.).

U drugom koraku zatvara se ventil koji kratko spaja dva KMT. Na KMT sa poznatim metrološkim karakteristikama (calibrated pressure balance na slici 1.) postavlja se dodatna teg i pritisak u sistemu se podiže dok se klip ne vrati u početni položaj. Nominalna vrednost diferencijalnog pritiska proporcionalna je masi dodatog tega. Temperature klip-cilindar jedinica merene su platinskim otpornim termometrom (Pt 100 senzori ugrađenim u KMT). Pt 100 senzori su povezanim u 4-wire konfiguraciju sa Agilent Technologies 34970A jedinicom za akviziciju. Gustina vazduha je izračunata na osnovu merenja temperatura, pritisak i relativna vlažnost okoline pomoću uprošćene verzije CIPM-formule [8]. Sva merenja uslova okoline vršena su kombinovanim transponderom pritiska, vlažnosti i temperature Vaisala PTB330. Nehomogenost temperature i vlažnosti u laboratoriji tokom merenja diferencijalnog pritiska utvrđena je sa šest senzora instaliranih u blizini KMT-a proizvođača Datalogger Lambrecht SYNMET-LOG. Merenje je obavljeno u stabilnim ambijentalnim uslovima u laboratoriji uz kontrolu temperature i vlage. Gustina radnog fluida (di-ethyl-hexylsebacate-DHS) izračunata je prema [9]. Ubrzanje zemljine teže izmereno je korišćenjem CG5 Gravimeter, SCINTREX.

IZRAČUNAVANJE DIFERENCIJALNOG PRITISKA - MATEMATIČKI MODEL

Početno stanje ravnoteže koristi se kao referenca iz koje se posledično ostvaruje diferencijalni pritisak. Proračun ostvarenog diferencijalnog pritiska korišćenjem dva KMT-a je detaljno proučavan i opisan i dat u [4]:

$$\Delta p = \frac{\Delta m g \left[1 - (\rho_a - 1.2) \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{8000} \right) \right] \left(1 - \frac{\rho_a}{8000} \right)}{A_{0h} (1 + \lambda_h (p_i + \Delta p_n)) (1 + 2\alpha_h (t_h - t_{ref}))} + p_i \left[\frac{(1 + \lambda_h p_i) (1 + 2\alpha_h (t_{ih} - t_{ref}))}{(1 + \lambda_h (p_i + \Delta p_n)) (1 + 2\alpha_h (t_{ih} + \Delta t_h - t_{ref}))} - \frac{(1 + 2\alpha_h (t_{il} - t_{ref}))}{(1 + 2\alpha_h (t_{il} + \Delta t_l - t_{ref}))} \right] + (\rho_{fh} - \rho_{fl}) g + \Delta p_{rep} + \Delta p_{c-frep} + \Delta p_{c-fsen} + \Delta p_{tilt} \quad (1)$$

gde je:

$$p_i = \frac{m_{ih} g \left[1 - (\rho_a - 1.2) \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{8000} \right) \right] \left(1 - \frac{\rho_a}{8000} \right) + \sigma_{ch}}{A_{0h} (1 + \lambda_h p_n) (1 + 2\alpha_h (t_{ih} - t_{ref}))} \quad (2)$$

p_i	linijski pritisak generisan tokom inicijalnog uravnoteženja sistema (korak 1- <i>step 1</i> na slici 1)
$\Delta p_n = \frac{\Delta m g}{A_{0h}}$	nominalni diferencijalni pritisak
$p_n = \frac{m_{ih} g}{A_{0h}}$	nominalni linijski pritisak
Δm	masa dodatnog tega korišćen za generisanje diferencijalnog pritiska
g	ubrzanje zemljine teže
ρ_a	gustina vazduha
ρ_m	gustnia tegova
σ	površinski napon radnog fluida
c_h	obim klipa
A_{0h}	efektivan površina klip-cilindar jedinice
λ_h	koeficijent distorzije klip-cilindar jedinice
α_h	linearni koeficijent termalnog širenja ($\alpha_{ph} = \alpha_{ch} = \alpha_h$)
t_{ref}	referentna temperatura klip-cilindar jedinice
t_{ih}, t_{il}	temperature klip-cilindar jedinice merene tokom inicijalnog uravnoteženja sistema
$\Delta t_h, \Delta t_l$	razlike temperatura klip-cilindar jedinice zabeležene tokom generisanja diferencijalnog pritiska i onih merenih tokom inicijalnog uravnoteženja sistema
ρ_{fh}, ρ_{fl}	gustine radnog fluida <i>high</i> i <i>low</i> strane u sistemu na slici 1
h	razlika visina nivoa gde se generiše diferencijalni pritisak i referentnog nivoa (slika 1)
m_{ih}	ukupna masa tegova postavljena na <i>high</i> strani sistema
Δp_{rep}	ponovljivost generisanja diferencijalnog pritiska
Δp_{c-frep}	ponovljivost ravnoteže
Δp_{c-fres}	rezolucija ravnoteže
Δp_{tilt}	nagib klip cilindar jedinice

Indeksi *h* i *l* u jednačinama indetifikuju *high* i *low* strane u sistemu na slici 1, dok indeks *i* se odnosi na veličine zabeležene tokom inicijalnog uravnoteženja sistema.

VODIČ ZA ISKAZIVANJE NESIGURNOSTI U MERENJU – GUM

Nesigurnost rezultata merenja se procenjuje korišćenjem modela merenja i zakona propagacije nesigurnosti [1]. Na osnovu metoda evaluacije, GUM klasifikuje procene nesigurnosti kao Tip A ili Tip B. Tip A je vrednovanje nesigurnosti statističkom analizom niza zapažanja dok je Tip B vrednovanje

nesigurnosti korišćenjem podataka datih u kalibracionim i drugim sertifikatima i izveštajima, specifikacije proizvođača itd.. U procenama tipa A standardna nesigurnost se izračunava kao standardna devijacija srednje vrednosti n merenja sa $n-1$ stepeni slobode. Za procenu tipa B, određeni delilac je izabran za procenu standardne nesigurnosti iz intervala poluširine, prema distribuciji svake veličine. Ako pretpostavimo nekorelisane ulazne veličine, kombinovana standardna nesigurnost data je sa:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2 x_i \quad (3)$$

Gde su $u(x_i)$ standardne nesigurnosti ulaznih veličina i $\frac{\partial f}{\partial x_i} = c_i$ koeficijenti osetljivosti. Koeficijenti osetljivosti tj. parcijalni izvodi mernog modela po ulaznim veličinama dati su u [14].

Proširena merna nesigurnost U izračunava se množenjem kombinovane merne nesigurnosti faktorom obuhvata k koji proizvodi interval koji odgovara određenom nivou poverenja r .

PROCENA MERNE NESIGURNOSTI ULAZNIH VELIČINA

- Masa tegova m_{ih} i Δm

Uslovne mase tegova sa pridruženom mernom nesigurnošću su preuzete iz Uverenja o etaloniranju. Tegovi su etalonirani sa relativnom mernom nesigurnošću 5×10^{-6} . Etaloniranje tegova obavljeno je u Direkciji za mere i dragocene metale u Nacionalnoj laboratoriji za masu.

- Ubrzanje zemljine teže g

Ubrzanje zemljine teže izmerio je korišćenjem CG5 Gravimeter i iznosi $g = 9.80600787 \text{ m/s}^2$ sa standardnom mernom nesigurnošću od $u(g) = 1.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$. Sledljivost merenja gravitacije obezbeđeno je preko Švedskog nacionalnog etalona gravitacije.

- Gustina vazduha ρ_a

Gustina vazduha je izračunata na osnovu merenja temperature, pritiska i relativne vlažnost okolnine.

1. Temperatura okoline t_a

Kombinovana standardna merna nesigurnost temperature okolnie uključuje više komponenti i procenjena je na sledeći način:

-Nesigurnost korekcije očitavanja transmitera preuzeta je iz Uverenja o etaloniranju i iznosi $U(t_a) = 0.10 \text{ }^\circ\text{C}$. Normala raspodela je pretpostavljena i za faktor obuhvata k je uzeta vrednost 2. Standardna merna nesigurnost je $u(t_a) = U(t_a) / 2 = 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Rezolucija transmitera iznosi $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$. Pretpostavljeno je da nesigurnost ima pravougaonu raspodelu i standardna merna nesigurnost je procenjena kao $u(t_{read}) = 0.01 / (2\sqrt{3}) = 0.0029 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Drift transmitera procenjen je uzimajući razliku korekcija dva uzastopna etaloniranja i iznosi $0.10 \text{ }^\circ\text{C}$. Pravougaona raspodela je pretpostavljena i standardna merna nesigurnost je procenjena kao $u(t_{drift}) = 0.10 / \sqrt{3} = 0.057 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Temperaturna nehomogenost u laboratoriji iznosi $t_{inhom} = 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Pretpostavljena je pravougaona raspodela i standardna merna nesigurnost procenjena je kao $u(t_{inhom}) = 1.2 / (2\sqrt{3}) = 0.35 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Temperaturna nestabilnost u laboratoriji iznosi $t_{insta} = 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$. Pretpostavljena je trougaona raspodela i standardna merna nesigurnost procenjena je kao $u(t_{insta}) = 1.0 / (2\sqrt{6}) = 0.20 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Ponovljivost merenja temperature je izračunata od 15 uzatopnih očitavanja u intervalu od 8 sekundi. Ukupno vreme merenja je bilo 120 sekundi. Standardna devijacija podeljena sa kvadratnim korenom broja merenja daje mernu nesigurnost ponovljivosti $u(t_{rep}) = 0.009 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kombinovana standardna merna nesigurnost temperature okoline iznosi $u_c(t_a) = 0.41 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Relativna vlažnost okoline RH_a

Kombinovana standardna merna nesigurnost relativne vlažnosti okoline procenjena je na isti način kao i za temperaturu. Nesigurnost usled etaloniranja transmitera $U(RH_{cal}) = 0.5 \%$, rezolucija očitavanja transmitera $RH_{read} = 0.01 \%$, drift transmitera $RH_{drift} = 0.10 \%$, nehomogenost relativne vlaga u laboratoriji $RH_{incho} = 2.5 \%$, nestabilnost relativne vlage u toku etaloniranja $RH_{insta} = 12.0 \%$, i ponovljivost očitavanja $RH_{rep} = 0.034 \%$, će dati kombinovanu mernu nesigurnost $u_c(RH_a) = 2.56 \%$.

3. Atmosferski pritisak p_a

Kombinovana standardna merna nesigurnost atmosferskog pritiska procenjena je na isti način kao i za temperaturu. Nesigurnost usled etaloniranja transmitera $U(p_{cal}) = 7 \text{ Pa}$, rezolucija očitavanja transmitera $p_{read} = 1 \text{ Pa}$, drift transmitera $p_{drift} = 10 \text{ Pa}$, nehomogenost u laboratoriji $p_{incho} = 10 \text{ Pa}$, nestabilnost pritiska u toku etaloniranja $p_{insta} = 30 \text{ Pa}$, i ponovljivost očitavanja $p_{rep} = 3.4 \text{ Pa}$, će dati kombinovanu mernu nesigurnost $u_c(p_a) = 11.4 \text{ Pa}$.

Uzimajući navedeno i način izračunavanja gustine vazduha [8] standardna merna nesigurnost gustine vazduha iznosi $u(\rho_a) = 0.0018 \text{ kg/m}^3$.

- Gustina tegova ρ_m

U tehničkoj specifikaciji proizvođača navodeno je da su tegovi napravljeni od nerđajućeg čelika čija je gustina 7950 kg/m^3 sa nesigurnošću od 200 kg/m^3 . Pretpostavljena je pravougaona raspodela i standardna merna nesigurnost iznosi $u(\rho_m) = 200 / \sqrt{3} = 115 \text{ kg/m}^3$.

- Efektivna površina klip-cilindar jedinice na nultom pritisku A_{0h}

Efektivna površina klip-cilindar jedinice i njena merna nesigurnost preuzeti su iz uverenja o etaloniranju. Drift je procenjen na osnovu prethodnih uverenja o etaloniranju i iznosi $A_{0h\text{drift}} = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Normalan raspodela je pretpostavljena za rezultate date u uverenju o etaloniranju i pravougaona za drift efektivne površine. Kombinovana merna nesigurnosti iznosi efektivna površina klip-cilindar jedinice $u_c(A_{0h}) = 0.83 \times 10^{-10} \text{ m}^2$.

- Koeficijent distorzije λ_h

Koeficijent distorzije klip-cilindar jedinice i njena merna nesigurnost preuzeti su iz uverenja o etaloniranju. Za rezultate iz uverenja uzeta je normalna raspodela i standardna merna nesigurnost iznosi $u(\lambda_h) = U(\lambda_h) / 2 = 0.45 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$.

- Linearni koeficijent termalne ekspanzije klip i cilindra α_h

Iz tehničke specifikacije proizvođača preuzeti su podaci vezani za linearni koeficijent termalne ekspanzije. Klip-cilindar jedinica je napravljena od legure volfram karbida čiji je koeficijent termalne ekspanzije $\alpha_h = 4.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ sa nesigurnošću od 10%. Pretpostavljena je pravougaona raspodela i standardna nesigurnost je $u(\alpha_h) = 0.26 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Kombinovana standardna nesigurnost za $2\alpha_h$ iznosi $u_c(2\alpha_h) = \sqrt{2}u(\alpha_h) = 0.36 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Međutim podaci navedeni od proizvođača obično nisu zasnovani na merenju ekspanzije klip cilindra jedinice pa je za kombinovanu mernu nesigurnost uzeta nešto veća vrednost $u_c(2\alpha_h) = 0.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

- Temperatura i temperaturna promena klip-cilindar jedinice $t_{ih,il,h,l}$ i $\Delta t_{h,l}$

Kombinovana standardna merna nesigurnost klip-cilindar jedinice uključuje: nesigurnost dobijena etaloniranjem $u(t_{cal}) = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ (normalna raspodela), nesigurnosti prilikom očitavanja (rezolucije) $t_{read} = 0.001 \text{ }^\circ\text{C}$ (pravougaona raspodela), drifta transmitera između dva etaloniranja $t_{drift} = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ (pravougaona raspodela), temperaturna nestabilnost tokom generisanja diferencijalnog pritiska $t_{inst} = 0.20 \text{ }^\circ\text{C}$ (trougona raspodela) i ponovljivost merenja temperature $t_{rep} = 0.013 \text{ }^\circ\text{C}$ (normalna raspodela). Kombinovana

standardna merna nesigurnost temperature klip-cilindar jedinice iznosi $u_c(t_{ih,il,h,l}) = 0.042 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Promena temperature klip-cilindar jedinice je razlika temperature merene pri inicijalnom uravnoteženju i temperature merene prilikom generisanja diferencijalnog pritiska, tako da je nesigurnost promene temperature izračunata kao $u_c(\Delta t_{h,l}) = \sqrt{2} u_c(t_{ih,il,h,l}) = 0.059 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Površinski napon radnog fluida σ

Površinski napon radnog fluida je $\sigma = 0.031 \text{ Nm}^{-1}$ sa nesigurnošću od 5% [10]. Uzeta je pravougaona raspodela i standardna merna nesigurnost je izračunata kao $u(\sigma) = 0.05\sigma/\sqrt{3} = 8.95 \times 10^{-4} \text{ Nm}^{-1}$.

- Obim klipa c_h

Obim klipa je izračunat korišćenjem efektivne površine klip-cilindar jedinice na nultom pritisku. Standardna merna nesigurnost obima klip-cilindar jedinice je procenjena je na sledeći način $u(c_h) = \sqrt{(\pi/A_{oh})}$ $u_c(A_{oh}) = 6.6 \times 10^{-8} \text{ m}$.

- Gustina radnog fluida ρ_{fl} i ρ_{fh}

Nesigurnost gustine DHS radnog fluida iznosi 1% [9]. Pravougaona raspodela je pretpostavljena i standardna nesigurnost je procenjena na sledeći način $u(\rho_{fl}, \rho_{fh}) = 0.01\rho_{fl,fh}/\sqrt{3}$.

- Visinska razlika h

Razlika između referentnog nivoa klipnog manometra i nivoa na kome se generiše diferencijalni pritisak meren je metrom i standardna merna nesigurnost visinske razlike iznosi $u(h) = 5.8 \times 10^{-4} \text{ m}$.

- Nominalni linijski i diferencijalni pritisak p_n i Δp_n

Komponente nesigurnosti koji potiču od masa postavljenih tegova m_{ih} i Δm , lokalnog ubrzanja sile Zemljine teže g , i efektivne površine klip-cilindar jedinice na nultom pritisku A_{0ih} su obuhvaćeni kombinovanom mernom nesigurnošću nominalnog linijskog i diferencijalnog pritiska. Kombinovana merna nesigurnost nominalnog i diferencijalnog pritiska iznosi $u_c(p_n) = 1.7 \times 10^{-5} p_n$ i $u_c(\Delta p_n) = 1.7 \times 10^{-5} \Delta p_n$.

- Ponovljivost generisanja diferencijalnog pritiska

Ponovljivost generisanja diferencijalnog pritiska određena je korišćenjem diferencijalne ćelije pritiska (Fluke 2413). Napon sa diferencijalne ćelije pritiska očitavan je sa Agilent Technologies 34970A jedinicom za akviziciju koji je povezan na računar pomoću GPIB magistrale. Posebna procedura je korišćena prilikom određivanja ponovljivosti [11,12]. Procedura se zasniva na ABA mernim ciklusima gde se A odnosi na očitavanje signala kada je sistem u step 1, dok se B odnosi na očitavanju signala kada je sistem u step 2. Šest ABA ciklusa je odrađeno. Uzastopna očitavanja sa frekvencijom od 10 Hz, je zabeleženo za svaki step u mernom ciklusu. Ukupno vreme očitavanja za svaki step je 30 sekundi. Pre nego što su očitavanja zabeležena ostavljeno je dovoljno vremena da sistem priguši oscilovanje klipa. Grafički prikaz u realnom vremenu je korišćen za određivanje trenutka kada merenje treba započeti. Ponovljivost je određivana za diferencijalni pritisak od 0.7 MPa što odgovara maksimalnom diferencijalnom pritisku korišćene ćelije Fluke 2413. Standardna merna nesigurnost ponovljivosti je određena kao standardna devijacija diferencijalnog pritiska izračunata za svaki ciklus podeljena sa korenom broja ciklusa. Normalna raspodela je pretpostavljena i standardna nesigurnosti je iznosila $u(\Delta p_{rep}) = 9.6 \text{ Pa}$.

- Ponovljivost ravnoteže sistema

Nakon generisanja diferencijalnog pritiska potrebno je proveriti da li je ravnoteža sistema i dalje prisutna. Razlika masa tegova za podešavanje ravnoteže je iskorišćena za procenu ponovljivosti uravnoteženja sistema. Razlika masa može se konvertovati u pritisak aproksimacijom $\Delta p_{c-rep} = \Delta m_{trim} g / A_{0ih}$. Razlika u masama tegova za podešavanje iznosila je 5 mg koja ostvaruje razliku u pritiscima od 10 Pa, tako da usvajanjem pravougaone raspodele standardna merna nesigurnost ponovljivosti ravnoteže iznosi $u(\Delta p_{c-rep}) = 10 / \sqrt{3} = 5.77 \text{ Pa}$.

- Rezolucija ravnoteže sistema

Rezolucija ravnoteže sistema može se proceniti na pomoću tega najmanje mase za podešavanje koji je korišćen za inicijalno uravnoteženje sistema. Mase tega može se konvertovati u pritisak aproksimacijom $\Delta p_{c-rez} = m_{trim} g / A_{0ih}$. Najmanja masa tega korišćena za uspostavljanje ravnoteže sistema je 5 mg. Ta masa konvertovana u pritisak iznosi 10 Pa. Pretpostavljajući pravougaonu raspodelu standardna merna nesigurnost rezolucije ravnoteže iznosi $u(\Delta p_{c-rez}) = 10 / \sqrt{3} = 5.77$ Pa.

- Odstupanje od vertikalnosti

Odstupanje od vertikalnosti klipa je proverena korišćenjem libele postavljene na vrh klip-cilindar jedinice. Klip je podešen u vertikalni položaj u 4 minuta ugla. Ova vrednost odgovara grešci u generisanom diferencijalnom pritisku od 0.7 ppm vrednosti diferencijalnog pritiska. Uzimajući pravougaonu raspodelu standardna merna nesigurnost je procenjena kao $u(\Delta p_{tilt}) = 0.7 \times 10^{-6} \Delta p / \sqrt{3}$.

Karakteristike merila diferencijalnog pritiska koji se etalonira (rezolucija, ponovljivost, reporducibilnost, orijentacija) nisu uključene u budžet merne nesigurnosti.

PRORAČUN DIFERENCIJALNOG PRITISKA I MERNE NESIGURNOSTI

Izračunavanje diferencijalnog pritiska i merne nesigurnosti vrši se u *Differential pressure calculation.xls* (slika 3.) koji obuhvata jednačine 1 i 2 i koeficijente osetljivosti koji su izlistani u [14].

[illegible]

Primer je dat za diferencijalni pritisak od 100 kPa i linijski pritisak od 42 MPa. Procenjena merna nesigurnost je $U(\Delta p) = 0.068$ kPa za faktor obuhvata $k = 2$.

Merne nesigurnosti generisanog diferencijalnog pritiska su od 0.012 kPa do 0.08 kPa za linijske pritiske od 2 MPa do 100 MPa i diferencijalne pritiske od 2 kPa do 0.7 MPa.

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je i okarakterisan sistem za generisanje diferencijalnog pritiska koji se koristi u Direkciji za mere i dragocene metale. Procenu merne nesigurnosti diferencijalnog pritiska generisanog sa dva klipna manometara je izvršena u skladu sa Vodičem za iskazivanje nesigurnosti u merenju. Sistem je u stanju da generiše diferencijalni pritisak od 2 kPa do 0.7 MPa u opsegu linijskog pritiska od 2 MPa do 100 MPa sa mernim nesigurnostima od 0.012 kPa do 0.08 kPa. U zavisnosti od vrednosti linijskog i diferencijalnog pritiska najveći doprinosi mernoj nesigurnosti proizilaze od fiksnih doprinosa mernoj nesigurnosti, merne nesigurnosti temperaturne razlike klip-cilindar jedinice i efektivna površina klip-cilindar jedinice. Budući rad na ovom polju jeste učestvovanje na međulaboratorijskom poređenju i proširenje obima akreditacije laboratorije za pritisak u oblasti etaloniranja merila diferencijalnih pritisaka.

LITERATURA

- [1] BIMP, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008, 2008.
- [2] R. S. Dadson, J. E. Daborn, Differential pressure measurement, *Physics Bulletin* 24 (1973) 603–604.
- [3] J. E. Daborn, The Accurate Measurement of Differential Pressure at High Line Pressure, *Measurement and Control* 10 (1977) 377–387.
- [4] C. M. Sutton, The Accurate Generation of Small Gauge Pressures Using Twin Pressure Balances, *Metrologia* 23 (1987) 187–195.
- [5] M. Hay, D. Simpson, Development of high-line differential pressure standards, NPL Report CMAM 41, National Physical Laboratory, 1999.
- [6] F. Pavese, G. Molinar, *Modern Gas-Based Temperature and Pressure Measurements*, 2 ed., Springer US, 2013.
- [7] R. S. Dadson, S. L. Lewis, G. N. Peggs, *The pressure balance: Theory and Practice*, 1 ed., HMSO, 1982.
- [8] R. Schwartz, M. Borys, F. Scholz, *Guide to Mass Determination with High Accuracy*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 2007.
- [9] G. Buonanno, G. Ficco, G. Giovenco, G. Molinar, Ten years of experience in modelling pressure balances in liquid media up to few GPa, *Universita degli Studi di Cassino*, 2007.
- [10] P. Vergne, New high pressure viscosity measurements on the di(2-ethylhexyl) sebacate and comparisons with previous data, *High Temperatures-High Pressures* 22 (1990) p. 613–621.
- [11] M. Kojima, T. Kobata, K. Saitou, M. Hirata, Development of small differential pressure standard using double pressure balances, *Metrologia* 42 (2005) S227–S230.
- [12] S.-Y. Woo, I.-M. Choi, H.-W. Song, A low differential pressure standard in the range of 1 Pa to 31 kPa at KRISS, *Metrologia* 46 (2009) 125–128.