

# Primerjava hidravličnih in pnevmatskih referenčnih etalonov za tlak

Peter SAMBOL, Andrej SVETE, Jože KUTIN, Ivan BAJSIĆ

**Izvleček:** V prispevku je predstavljena metoda neposredne primerjave hidravličnega in pnevmatskega referenčnega etalona za tlak, in sicer oljne tlačne tehtnice ter elektronskega merilnika tlaka plina. Opisana sta sestava in delovanje tlačne tehtnice ter podan merilni model za določitev nadtlaka na referenčnem nivoju tlačne tehtnice in njegove merilne negotovosti. Za primerjavo izmerkov hidravličnega in pnevmatskega talonskega merilnika je treba določiti korekcijo tlaka zaradi vpliva višinskih razlik prenosne tekočine. Na podlagi primerjave izmerjenih tlakov z obema referenčnima etalonoma in njihovih razširjenih merilnih negotovosti smo v prispevku preverili kalibracijski in merilni zmogljivosti merjenja (CMC – Calibration and Measurement Capability) nadtlaka z referenčnima etalonoma.

**Ključne besede:** meroslovje tlaka, referenčni etalon, tlačna tehtnica, korekcija tlaka zaradi višinske razlike, CMC

## 1 Uvod

Tlak je izpeljana neelektrična fizikalna veličina mednarodnega sistema merskih enot SI, določena kot sila na enoto površine. Je pomembna fizikalna veličina stanja, ki v različnih tehniških procesih določa stanje tekočin. Zagotavljanje kakovosti merjenja tlaka v skladu z različnimi mednarodnimi standardi na številnih področjih znanosti in tehnologije, kot so npr. varstvo okolja, medicina in farmacija, avtomobilska, letalska, vojaška, živilska, petrokemična industrija, zahteva sledljivo periodično umerjanje merilne opreme za tlak. Redno preverjanje merilnih zmogljivosti in zagotavljanje merilne sledljivosti merilne opreme poteka v ustrezno usposobljenih meroslovnih laboratorijih, kot so akreditirani umerjevalni ali kalibracijski laboratoriji, nacionalni meroslovni inštituti oz. nosilci nacionalnih etalonov in

akreditirani kontrolni organi (velja za zakonska merila, kot so merilniki tlaka v pnevmatikah in merilniki krvnega tlaka).

Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu (LMPS) na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je od leta 2002 akreditiran kot kalibracijski laboratorij za področje tlaka po standardu ISO/IEC 17025 [1]. V LMPS zagotavljamo merilno sledljivost na mednarodno raven v območju meritev podtlaka od  $-95$  do  $0$  kPa, nadtlaka od  $0$  do  $80$  MPa ter absolutnega tlaka od  $1$  kPa do  $80,1$  MPa. Referenčne merilne zmogljivosti za tlak zagotavljamo s tremi referenčnimi etalonskimi merilnimi sistemi, in sicer pnevmatsko tlačno tehtnico za nizke tlake (izdelovalec Pressurements, tip V1600/4D [2]), oljno tlačno tehtnico za višje tlake (izdelovalec Desgrangeset HUOT, tip 5303 S[3]) ter elektronskim merilnikom tlaka (izdelovalec DH Instruments, tip RPM4, [4]), ki jih redno umerjamo in potrjujemo po kriterijih medlaboratorijskih primerjav z drugimi kalibracijskimi laboratoriji in meroslovnimi inštituti v domačem ter mednarodnem prostoru. Te merilne zmogljivosti uporabljamo za

zagotavljanje merilne sledljivosti na nižjo meroslovno raven ter pri razvojnoraziskovalnem delu.

Namen prispevka je predstaviti metodo neposredne primerjave hidravličnega in pnevmatskega referenčnega etalona za tlak ter z njo preveriti kalibracijski in merilni zmogljivosti merjenja nadtlaka plina z referenčnima etalonoma, in sicer z oljno tlačno tehtnico ter elektronskim merilnikom tlaka. V poglavju 2 so podani opis sestave in delovanja tlačne tehtnice, merilni model tlačne tehtnice ter izračun merilne negotovosti nadtlaka, izmerjenega na referenčni ravni tlačne tehtnice. V poglavju 3 je predstavljen merilni sistem za primerjavo hidravličnega in pnevmatskega etalona z uporabo ločevalnika plin – olje. V poglavju 4 so prikazani rezultati primerjave kalibracijskih in merilnih zmogljivosti merjenja nadtlaka plina s hidravličnim ter pnevmatskim etalonom za tlak.

## 2 Tlačna tehtnica

Tlačna tehtnica omogoča generiranje stabilnih tlakov in visoko točnost njihovega merjenja, zato se uporablja v številnih kalibracijskih labora-

Peter Sambol, dipl. inž., dr. Andrej Svete, univ. dipl. inž., doc. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Ivan Bajsić, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

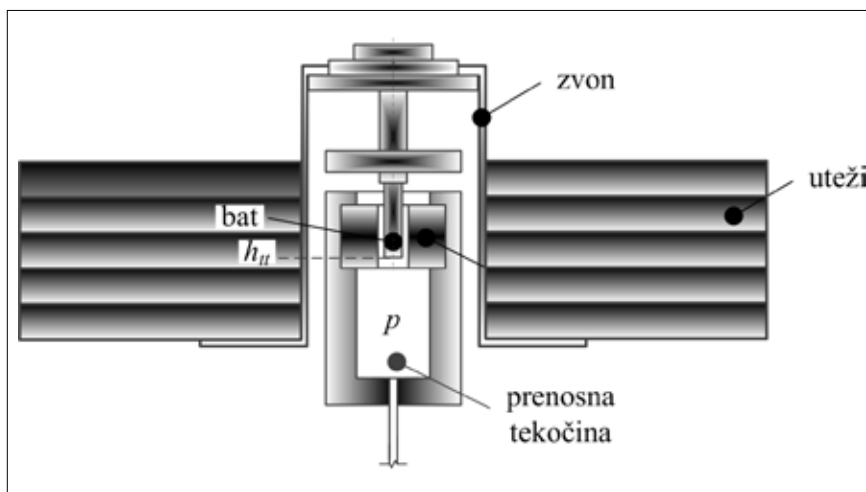
torijih kot referenčni etalon za tlak [5–7]. Sestavni deli tlačne tehtnice so shematsko prikazani na *sliki 1*. Tlačno tehtnico sestavljata bat, na katerega so preko zvona naložene uteži, in cilindar (pri merjenju nadtlaka plina se lahko uporablja tudi plavajoča kroglica), pri čemer prostor med njima zapolnjuje prenosna tekočina. Navpično postavljen bat se prosto vrti znotraj cilindra, pri čemer vrtenje bata zmanjšuje možnost, da bi med njima prišlo do stika. Tlak, ki ga generiramo s tlačno tehtnico, se prenaša na tekočino, ki je lahko plin (navadno čisti dušik) ali kapljevina (navadno olje) ter preko povezovalnih cevk na merilnik, ki ga umerjamo. Načelo delovanja tlačne tehtnice temelji na ravnovesju navpične sile, povzročene z generiranim tlakom na znano efektivno površino, ki jo določata bat in cilindar, ter sile teže bata, zvona in uteži ter strižne sile tekočine, ki deluje na bat. Ko so uteži izpostavljene vakuumu, tlačna tehtnica meri absolutni tlak, ko so uteži izpostavljene tlaku zraka okolice na merilnem mestu, pa meri nadtlak.

## 2.1 Merilni model

Nadtlak na referenčni ravni oljne tlačne tehtnice, ki je obravnavana v tem prispevku, je določen iz ravnovesja sil, ki delujejo na bat, kot [8]:

$$p_{tt} = \frac{\sum_i m_i g (1 - \rho_{zrak} / \rho_{m,i}) + \sigma c}{A_{ef} [1 + (\alpha_b + \alpha_c)(t - t_r)]}, \quad (1)$$

kjer je  $m_i$  masa posamezne uteži, zvona oz. bata, ki jih s pripadajočimi merilnimi negotovostmi razberemo iz poročil o umerjanju mas,  $g$  lokalni težnostni pospešek, določen v LMPS,  $\rho_{zrak}$  gostota okoliskega zraka, kjer pri izračunu gostote izhajamo iz enačbe stanja idealnega plina, pri čemer upoštevamo vpliv absolutnega tlaka zraka okolice in temperature zraka na merilnem mestu, pri oceni njene merilne negotovosti pa upoštevamo tudi vpliv vlažnosti zraka,  $\rho_{m,i}$  gostota posamezne uteži, zvona oz. bata, ki jih podaja izdelovalec tlačne tehtnice,



**Slika 1.** Shematski prikaz sestavnih delov tlačne tehtnice

$A_{ef}$  efektivna površina pri referenčni temperaturi  $t_r$  (v našem primeru 20 °C), ki jo s pripadajočo merilno negotovostjo razberemo iz poročil o umerjanju tlačne tehtnice,  $\alpha_b$  in  $\alpha_c$  linearna temperaturna razteznostna koeficienta bata in cilindra, izdelanega iz volframovega karbida, ki ju poda izdelovalec tlačne tehtnice,  $t$  temperatura sklopa bat – cilindar, merjena z umerjenim temperaturnim zaznavalom, ki je vgrajeno v tlačno tehtnico v bližini sklopa bat – cilindar, kjer pri oceni njene merilne negotovosti upoštevamo tudi oceno stabilnosti in homogenosti temperaturnega polja v merilu,  $\sigma$  površinska napetost olja sebacate in  $c$  obseg bata.

## 2.2 Merilna negotovost nadtlaka na referenčni ravni tlačne tehtnice

Skupna standardna merilna negotovost nadtlaka na referenčni ravni tlačne tehtnice  $h_{tt}$  je določena z upoštevanjem standardnih merilnih negotovosti posameznih (merjenih in ocenjenih) veličin, ki vplivajo na določitev nadtlaka na referenčni ravni oljne tlačne tehtnice kot [9,10]:

$$u(p_{tt}) = p_{tt} \sqrt{\sum_i (c_i u(x_i))^2}, \quad (2)$$

kjer je  $c_i$  koeficient občutljivosti posamezne vplivne veličine  $x_i$  ter  $u(x_i)$  njena standardna merilna negotovost. Vplivne veličine in njihovi

koeficienti občutljivosti so podani v *razpredelnici 1*. Pravokotnost tlačne tehtnice  $\phi$ , indikator lege bata tlačne tehtnice  $i$ , ločljivost tlačne tehtnice  $r_{tt}$  ter njena ponovljivost  $b'$  sicer ne nastopajo v merilnem modelu tlačne tehtnice (1), a so lastnosti uporabe tlačne tehtnice ter vplivajo na določitev nadtlaka na referenčni ravni.

**Razpredelnica 1.** Veličine, ki vplivajo na določitev nadtlaka na referenčni ravni tlačne tehtnice, in koeficienti občutljivosti

$x_i$	$c_i$
$m = \sum_i m_i$	$1/m$
$g$	$1/g$
$\rho_{zrak}$	$-1/\rho_m$
$\rho_m$	$\rho_{zrak}/\rho_m^2$
$\sigma$	$c/mg$
$c$	$\sigma/mg$
$A_{ef}$	$-1/A_{ef}$
$\alpha_b + \alpha_c$	$-(t - t_r)$
$t$	$-(\alpha_b + \alpha_c)$
$\phi$	$-\text{tg}(\phi)$
$i$	$(\rho_{olje} - \rho_{zrak})g/p_{tt}$
$r_{tt}$	$1/p_{tt}$
$b'$	$1/p_{tt}$

### ■ 3 Merilni sistem in postopek

Merilni sistem, ki je bil uporabljen za primerjavo dveh referenčnih etalonov za tlak, in sicer oljne tlačne tehtnice ter referenčnega elektronskega merilnika tlaka, je prikazan na *sliki 2*. V hidravličnem merilnem sistemu smo kot prenosni tlačni medij uporabili olje sebacate, v pnevmatskem merilnem sistemu pa čisti dušik. V merilnem sistemu hidravlični in pnevmatski merilni sistem ločuje ločevalnik plin – olje (izdelovalec Tradinco, tip 8335), ki ima vgrajeno steklo, kar omogoča spremljanje višine gladine olja med meritvijo.

Postopek primerjave hidravličnega in pnevmatskega merilnega sistema za tlak poteka tako, da najprej z ročno tlačilko oljne tehtnice napolnimo ločevalnik do zelene višine gladine olja. Na tlačno tehtnico naložimo uteži, ki ustrezajo želenemu generiranemu tlaku v hidravličnem merilnem sistemu, ter zaženemo motor tlačne tehtnice, ki omogoča vrtenje bata tehtnice. S tlačnim regulatorjem (izdelovalec MENSOR, tip CPC 6000) nato s počasnim večanjem tlaka v pnevmatskem merilnem sistemu vzpostavimo tlak, pri katerem začne bat oljne tehtnice lebdeti na referenčni ravni tlačne tehtnice. S tem sta tlaka, ki sta vzpostavljena v pnevmatskem in hidravličnem delu merilnega sistema, izenačena. Med postopkom primerjave merimo temperaturo sklopa bat – cilinder, temperaturo in tlak okoliškega zraka ter višino gladine olja v ločevalniku.

Merilni pogrešek med vrednostma, ki ju izmeri posamezni referenčni etalon, določimo kot:

$$E = p_{em} - p_{tt}^* \quad (3)$$

kjer je  $p_{em}$  vrednost tlaka, ki jo izmeri elektronski merilnik tlaka, ter  $p_{tt}^*$  vrednost tlaka, ki jo z oljno tlačno tehtnico določimo na ravni elektronskega merilnika tlaka z upoštevanjem korekcije tlaka zaradi vpliva višinske razlike med višino gladine olja v ločevalniku ter referenčno



**Slika 2.** Merilni sistem za primerjavo hidravličnega in pnevmatskega merilnega sistema za tlak v LMPS

ravnijo tlačne tehtnice  $\Delta H_{olje}$  oz. elektronskega merilnika tlaka  $\Delta H_{N_2}$  [11]:

$$p_{tt}^* = p_{tt} - (\rho_{olje} - \rho_{zrak}) g \Delta H_{olje} + (\rho_{N_2} - \rho_{zrak}) g \Delta H_{N_2}, \quad (4)$$

kjer je  $\rho_{olje}$  gostota olja v hidravličnem merilnem sistemu,  $\rho_{zrak}$  gostota okoliškega zraka in  $\rho_{N_2}$  gostota dušika v pnevmatskem merilnem sistemu. Pri določanju gostote olja di-ethyl-hexyl-sebacate upoštevamo odvisnosti gostote olja od tlaka v hidravličnem merilnem sistemu [12]. Pri določanju gostot plinov pa izhajamo iz plinske enačbe stanja, pri čemer upoštevamo dejanske tlačne razmere in temperaturo zraka okolice merilnega mesta.

Razširjena merilna negotovost nadtlaka, izmerjenega z elektronskim merilnikom tlaka za interval zaupanja približno 95 % (faktor pokritja  $k = 2$ ), je enaka njegovi kalibracijski in merilni zmogljivosti (CMC), in sicer:

$$U(p_{em}) = \begin{cases} 0,005 \% \cdot p_{em} + 4 \text{ Pa} \\ 0,007 \% \cdot p_{em} + 25 \text{ Pa} \end{cases}$$

za  $p_{em} = 0$  do 600 kPa

za  $p_{em} = 600$  do 7000 kPa.

(5)

Skupna standardna merilna negotovost korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice je določena z upoštevanjem standardne merilne negotovosti tlaka na referenčni ravni tlačne tehtnice in standardnih merilnih negotovosti korekcij tlaka zaradi vpliva višinske razlike kot:

$$u(p_{tt}^*) = \sqrt{\sum_i (d_i u(y_i))^2}, \quad (6)$$

kjer je  $d_i$  koeficient občutljivosti posamezne vplivne veličine  $y_i$  ter  $u(y_i)$  njena standardna merilna negotovost. Vplivne veličine in njihovi koeficienti občutljivosti so podani v *razpredelnici 2*. Ločljivost generiranja tlaka v merilnem sistemu  $r_k$  ne nastopa v enačbi (4), a je lastnost merilne metode ter vpliva na določitev nadtlaka, ki ga z oljno tlačno tehtnico določimo na ravni elektronskega merilnika tlaka. Razširjena merilna negotovost korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice je tako:

$$U(p_{tt}^*) = k u(p_{tt}^*), \quad (7)$$

kjer predpostavimo interval zaupanja približno 95 % (faktor pokritja  $k = 2$ ).

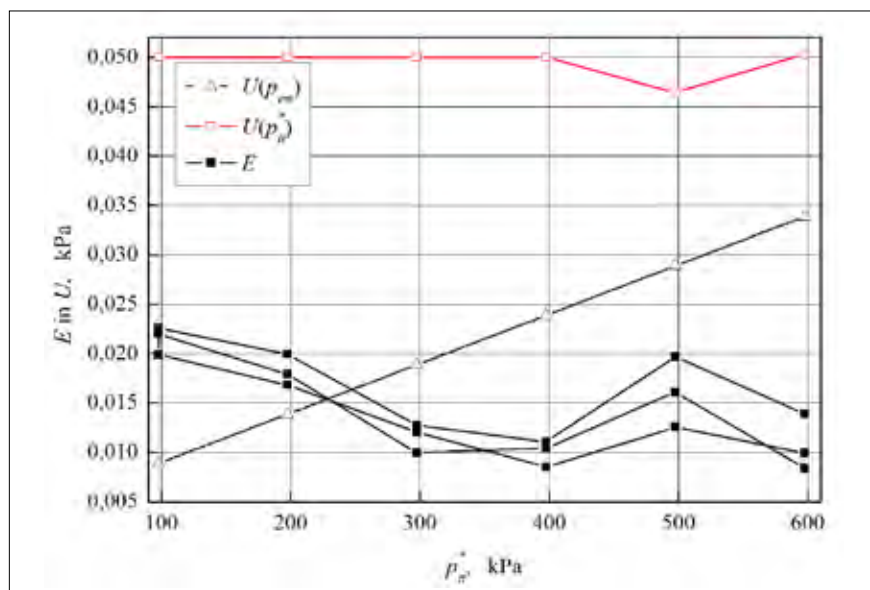
Analiza merilne negotovosti opravljenih meritev je pokazala, da so v celotnem merilnem območju dejanske razširjene merilne negotovosti korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice manjše od potrjene vrednosti CMC-ja merjenja tlaka plina z oljno tlačno tehtnico, in sicer za

približno 1 % do 20 %. Tako smo za razširjeno merilno negotovost privzeli potrjeno vrednost CMC-ja merjenja tlaka plina z oljno tlačno tehniko:

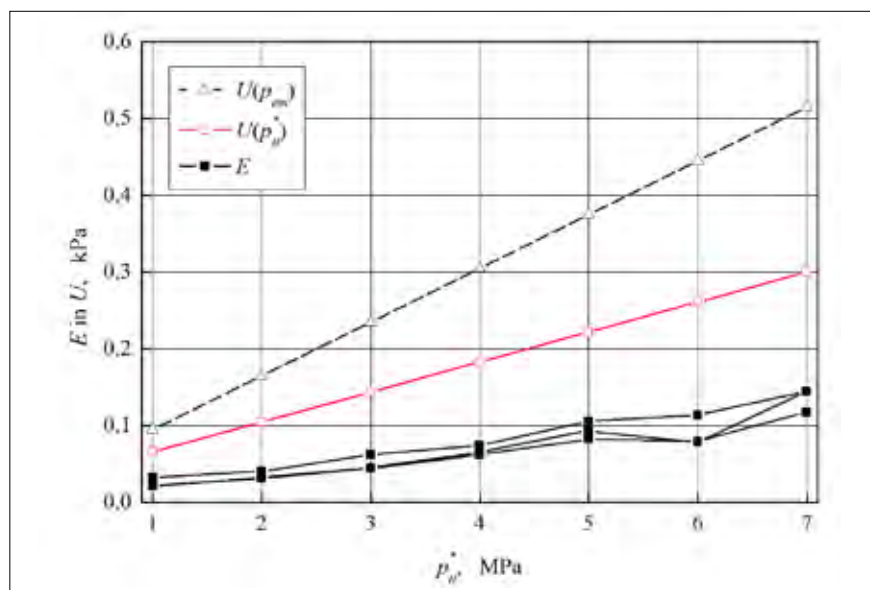
$$U(p_{tt}^*) = \begin{cases} 50 \text{ Pa} & \text{za } p_{tt} < 500 \text{ kPa} \\ 27 \text{ Pa} + 3,9 \cdot 10^{-5} \cdot p_{tt} + 5,3 \cdot 10^{-15} \cdot p_{tt}^2 & \text{za } p_{tt} \geq 500 \text{ kPa}. \end{cases} \quad (8)$$

### 4 Rezultati meritev

Primerjavo hidravličnega (sklop bat – cilinder oljne tlačne tehtnice z merilnim območjem od 0,1 MPa do 20 MPa) in pnevmatskega referenčnega etalona za tlak smo izvedli v obeh merilnih območjih elektronskega merilnika tlaka, in sicer v merilnem območju od 100 kPa do 600 kPa nadtlaka po koraku približno 100 kPa, ter v merilnem območju od 1 MPa do 7 MPa nadtlaka



**Slika 3.** Merilni pogreški ter razširjeni merilni negotovosti nadtlaka, ki ga izmerimo z elektronskim merilnikom tlaka, in korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice v merilnem območju od 100 kPa do 600 kPa



**Slika 4.** Merilni pogreški ter razširjeni merilni negotovosti nadtlaka, ki ga izmerimo z elektronskim merilnikom tlaka, in korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice v merilnem območju od 1 MPa do 7

**Razpredelnica 2.** Veličine, ki vplivajo na določitev nadtlaka na referenčni ravni elektronskega merilnika tlaka z oljno tlačno tehniko, in koeficienti občutljivosti

$y_i$	$d_i$
$p_{tt}$	1
$\rho_{olje}$	$-g\Delta H_{olje}$
$\rho_{zrak}$	$g(\Delta H_{olje} - \Delta H_{N_2})$
$g$	$-(\rho_{olje} - \rho_{zrak})\Delta H_{olje} + (\rho_{N_2} - \rho_{zrak})\Delta H_{N_2}$
$\Delta H_{olje}$	$-(\rho_{olje} - \rho_{zrak})g$
$\rho_{N_2}$	$g\Delta H_{N_2}$
$\Delta H_{N_2}$	$(\rho_{N_2} - \rho_{zrak})g$
$r_k$	1

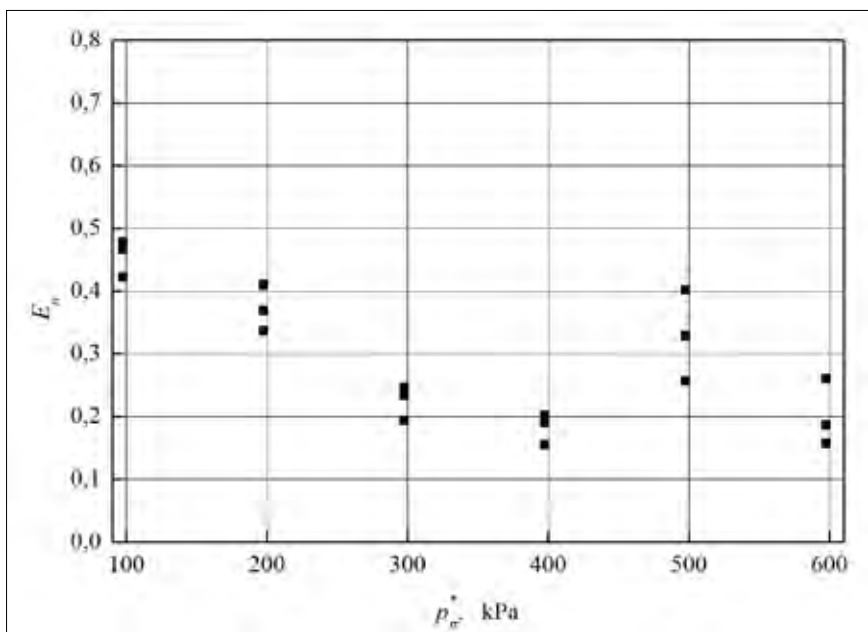
po koraku približno 1 MPa, kjer smo naredili tri serije (1. serijo pri večanju tlaka, 2. serijo pri manjšanju tlaka in 3. serijo ponovno pri večanju tlaka). Pri meritvah smo referenčno raven elektronskega merilnika tlaka izenačili z referenčno ravni oljne tlačne tehtnice, tako da je  $\Delta H_{N_2} = \Delta H_{olje}$ .

Na slikah 3 in 4 so prikazani merilni pogreški ter razširjeni merilni negotovosti merjenja nadtlaka plina z elektronskim merilnikom tlaka in korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice. Iz rezultatov primerjave hidravličnega in pnevmatskega etalona je razvidno, da so v merilnem območju od 100 kPa do 600 kPa merilne negotovosti tlaka, izmerjenega z elektronskim merilnikom tlaka, ki ga v LMPS uporabljamo kot referenčni etalon za tlak plina v območju od 20 kPa do 600 kPa, manjše ter v merilnem območju od 1 MPa do 7 MPa večje od merilne negotovosti korigiranega odčitka oljne tlačne tehtnice, ki jo v LMPS uporabljamo kot referenčni etalon za tlak plina v območju od 600 kPa do 10000 kPa.

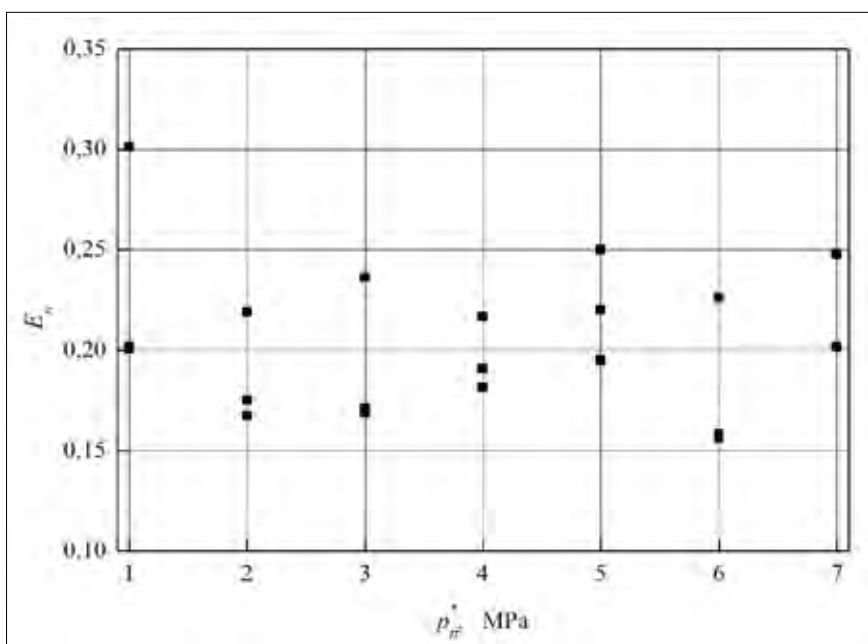
Za ovrednotenje primerjave obeh etalonov uporabimo normirani merilni pogrešek:

$$E_n = \frac{p_{em} - p_{tt}^*}{\sqrt{U^2(p_{em}) + U^2(p_{tt}^*)}} \quad (9)$$





Slika 5. Normirani merilni pogreški v merilnem območju 100 kPa do 600 kPa



Slika 6. Normirani merilni pogreški v merilnem območju 1 MPa do 7 MPa

Če je  $|E_n| \leq 1$ , je ujemanje rezultatov meritev ustrezno, če pa je  $|E_n| > 1$ , je ujemanje rezultatov meritev neustrezno. Normirani pogreški merjenja nadtlaka plina v obeh merilnih območjih so prikazani na slikah 5 in 6. Rezultati kažejo, da je ujemanje rezultatov meritev z obema etalonoma ustrezno, saj se  $E_n$  vrednosti v merilnem območju od 100 kPa do 600 kPa nahajajo med 0,15 in 0,5 ter v merilnem območju 1 MPa do 7 MPa med 0,15 in 0,31.

### 6 Sklepi

Prispevek predstavlja metodo neposredne primerjave hidravličnega in pnevmatskega referenčnega etalona za tlak, ki jo z namenom preverjanja merilnih zmogljivosti merjenja nadtlaka plina z referenčnim etalonoma za tlak, in sicer z oljno tlačno tehtnico ter referenčnim elektronskim merilnikom tlaka, izvajamo v LMPS. Za potrditev ustreznosti kalibracijske in merilne zmogljivosti merjenja nadtlaka plina s posameznim etalonom

smo uporabili normirani merilni pogrešek. Normirani merilni pogrešek predstavlja razmerje merilnih pogreškov izmerjenih tlakov z obema merilnima sistemoma ter vsote njunih razširjenih merilnih negotovosti. Na podlagi dobljenih vrednosti normiranih merilnih pogreškov smo potrdili ustreznost kalibracijske in merilne zmogljivosti merjenja nadtlaka plina z elektronskim merilnikom v merilnem območju od 100 kPa do 600 kPa, kjer vrednosti normiranih merilnih pogreškov ne presegajo 0,5, ter merjenja nadtlaka plina z oljno tehtnico v merilnem območju 1 MPa do 7 MPa, kjer vrednosti normiranih pogreškov ne presegajo 0,31. Majhne vrednosti normiranih merilnih pogreškov kažejo, da bi lahko v prihodnje kalibracijski in merilni zmogljivosti merjenja nadtlaka plina z referenčnim etalonoma še dodatno izboljšali.

### Literatura

- [1] SIST EN ISO/IEC 17025:2005, Splošne zahteve za usposobljenost preskuševalnih in kalibracijskih laboratorijev (ISO/IEC 17025:2005).
- [2] Pressurements, User Handbook Deadweight Tester Model V1600/4D, Pressurements.
- [3] DH-Budenberg, 5300 Series Model 5301/5302/5303/5304 User's Manual, DH-Budenberg.
- [4] Fluke Corporation, RPM4 Reference pressure Monitor Operation and Maintenance Manual, Fluke corporation.
- [5] EAL-G26, Calibration of pressure balances, EA, 1997.
- [6] EURAMET cg-23, Calibration of Pressure Balances, EURAMET, 2011.
- [7] OIML R 110, Pressure balances, OIML, 1994.
- [8] Douglas, A. O.: NIST Calibration Services for Pressure Using Piston Gauge Standards, NIST Special Publication 250-39, 2009.
- [9] Blagojević, B., Bajsić, I.: Analiza merilne negotovosti tlačne tehtnice v merilnem razponu od 0,1 MPa do 20 MPa, Zbor-

nik četrte Elektrotehniške in računalniške konference ERK '95, 25.–27. september 1995, Slovenska sekcija IEEE, 1995, str. 505–508.

[10] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to

the expression of uncertainty in measurement.

[11] Kobata, T.: Improved methods for comparing gas and hydraulic pressure balances, *Metrologia*, Vol. 46, 2009, str. 591–598.

[12] Vergne, G. F.: New high-pressure viscosity measurements on di(2-ethylhexyl) sebacate and comparison with previous data, *Hightemperatures-Highpressures*, Vol. 22, 1990, str. 613–622.

## Comparison of hydraulic and pneumatic reference pressure standards

**Abstract:** This paper presents a method for direct comparison of hydraulic and pneumatic reference pressure standards, i.e. oil pressure balance and pressure transducer. Structure and operation of the pressure balance and the measurement model for the determination of the gauge pressure at the reference level of the pressure balance and its measurement uncertainty are described. For the comparison of the measured values of the hydraulic and pneumatic pressure meters it is required to determine the pressure head correction. With the comparison of the pressures measured with the reference standards and their expended measurement uncertainties, we verified the calibration and measurement capabilities (CMC) of the gas gauge pressure measurements with the reference standards.

**Keywords:** pressure metrology, reference measurement standard, pressure balance, pressure head correction, CMC



Ponujamo rešitve za industrijsko avtomatizacijo:

- › PLC krmiljenje, HMI naprave
- › Mehatronika, večosni servo sistemi
- › Industrijska Ethernet omrežja
- › Komponente za avtomatizacijo

Zastopamo podjetja:

- › Rockwell Automation • Allen-Bradley
- › Pentair • Hoffman
- › Molex
- › Panduit
- › Prosoft Technology
- › Kepware

