

ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΖΥΓΟΥ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ

Δρ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Η. ΛΕΥΚΟΠΟΥΛΟΣ¹

¹ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΒΙ.ΠΕ.Θ., ΟΙΚ. ΤΕΤΡ. 45,

ΣΙΝΔΟΣ, Τ.Κ. 57022 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

e-mail: lefkopoulos@eim.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

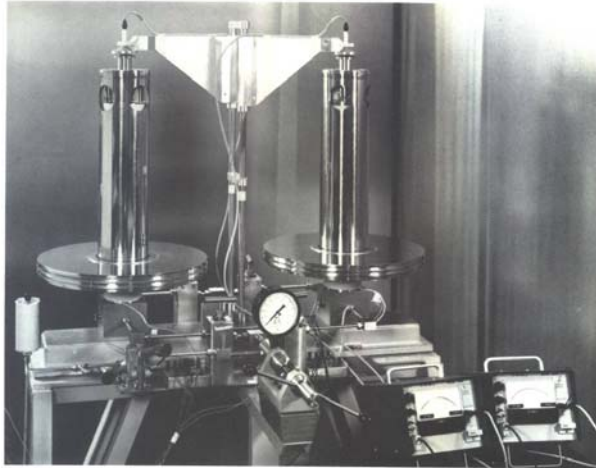
Οι ζυγοί πίεσης αποτελούν τα βασικά πρότυπα για την υλοποίηση του φυσικού μεγέθους της πίεσης. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο βασικό ορισμό του μεγέθους ως το πηλίκο της δύναμης προς την επιφάνεια στην οποία ενεργεί. Η εφαρμογή της ανωτέρω αρχής υλοποιείται σε κατάλληλες διατάξεις εμβόλου/ κυλίνδρου (piston/ cylinder assemblies), στις οποίες η προς τα κάτω δύναμη διακριβωμένων προτύπων βαρών, τα οποία ενεργούν σε πιστόνι γνωστής «ενεργού» διατομής (effective area) το οποίο κινείται ελεύθερα εντός κυλίνδρου, εξισορροπείται από την κατακόρυφη προς τα άνω δύναμη του ρευστού. Η κατάσταση ισορροπίας του συστήματος είναι γνωστή ως «αιώρηση» (floating). Η ενεργός διατομή μιάς διάταξης εμβόλου/ κυλίνδρου είναι πρακτικά σταθερή, άρα η υλοποίηση διαφορετικών τιμών πίεσης βασίζεται στην τοποθέτηση επί του εμβόλου κάθε φορά διαφορετικής ποσότητας βαρών.

Δεδομένου ότι ένας ζυγός πίεσης είναι αδύνατον να λειτουργήσει χωρίς το έμβολο, είναι φανερό ότι η ονομαστική *ελάχιστη τιμή παραγόμενης πίεσης*, αντιστοιχεί στο βάρος του εμβόλου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί περιορισμούς στο εύρος της ελάχιστης πίεσης την οποία δύναται να υλοποιήσει ο ζυγός. Είναι ωστόσο επιθυμητή η επέκταση του εύρους λειτουργίας και χρήσης ενός ζυγού πίεσης σε ακόμη μικρότερες περιοχές πίεσης από την αντίστοιχη ελάχιστη.

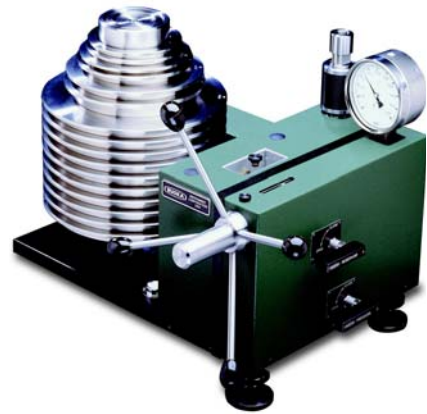
Στην παρούσα εργασία προτείνεται συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία υλοποίησης *σχετικών* πιέσεων, σε τιμές μικρότερες της ελάχιστης, μέσω της υλοποίησης *απόλυτων* πιέσεων και της χρήσης μιάς εξωτερικής αναφοράς βαρομετρικής πίεσης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εφαρμόζεται ήδη με επιτυχία στο εργαστήριο πίεσης του Ε.Ι.Μ. στα πλαίσια παροχής υπηρεσιών διακρίβωσης. Επιπλέον παρουσιάζονται οι βασικές πηγές σφαλμάτων τις οποίες εισάγει η προτεινόμενη μετρητική διαδικασία, η συνεισφορά των οποίων ποσοτικοποιείται μέσω της κατάστρωσης και παρουσίασης ενός ισοζυγίου αβεβαιοτήτων.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΖΥΓΟΥ ΠΙΕΣΗΣ

Το σχήμα 1 παρέχει μια σχηματική απεικόνιση ενός ζυγού πίεσης.



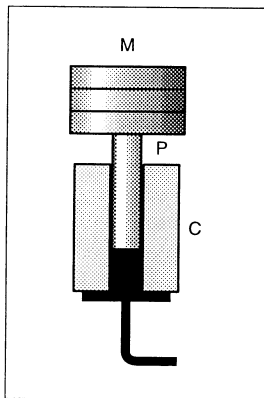
(α)



(β)

Σχήμα 1. (α) : Διάταξη διακρίβωσης ζυγών πίεσης του NPL (Μ. Βρετανία) (β) : Εμπορικά διαθέσιμος ζυγός πίεσης

Η εξίσωση λειτουργίας ενός ζυγού πίεσης παρέχεται από τη σχέση (1):

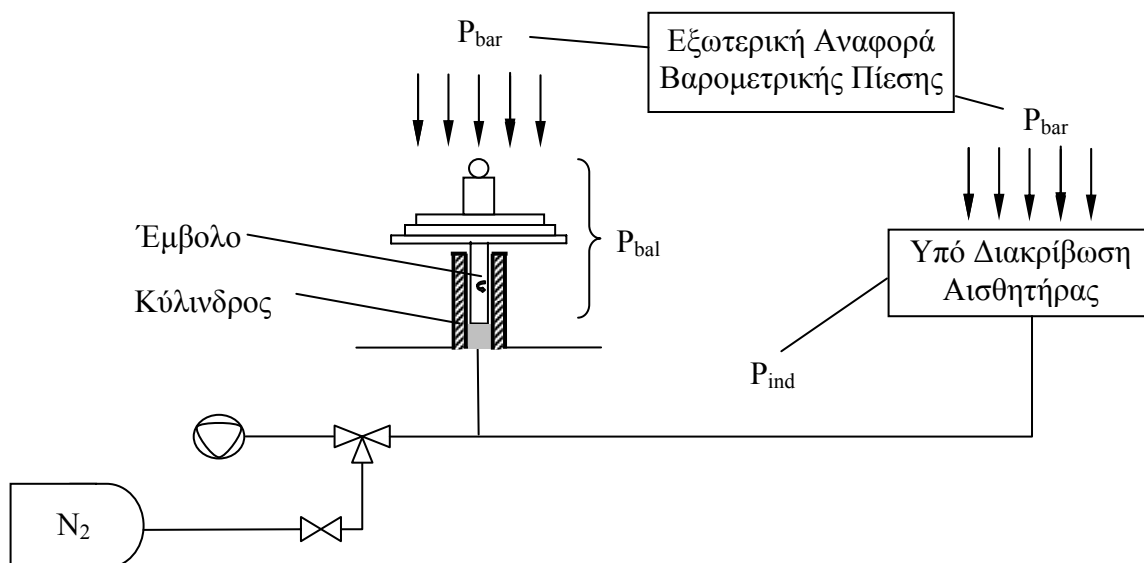


$$P = \frac{\sum_i^n \left[M_i \left(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_{M_i}} \right) \right] \cdot g \cdot \cos \phi}{A_0 (1 + \lambda \cdot P) \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(T - T_r)]} \quad (1)$$

Η επεξήγηση των επί μέρους μεταβλητών εκφεύγει του σκοπού της παρούσας εργασίας

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Σε μία τυπική διαδικασία υλοποίησης σχετικών πιέσεων από ένα ζυγό, πχ στα πλαίσια της διακρίβωσης ενός μετρητή σχετικής πίεσης, το σύστημα εμβόλου/ βαρών, είναι εκτεθειμένα στην ατμοσφαιρική πίεση, όπως και ο υπό διακρίβωση μετρητής (Σχήμα 2). Επειδή οι πιέσεις και των δύο οργάνων αναφέρονται στην (κοινή) ατμοσφαιρική πίεση, η διακρίβωση του οργάνου βασίζεται ουσιαστικά στη σύγκριση των ενδείξεών του με την αντίστοιχη παραγόμενη από το ζυγό πίεση αναφοράς (εξ. (2))



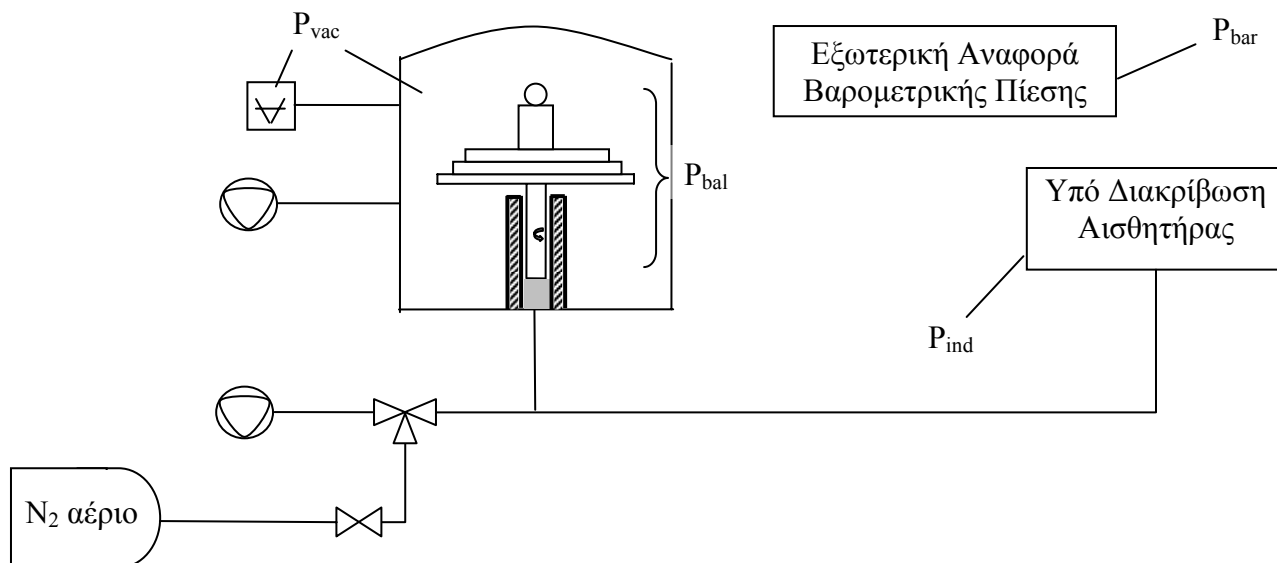
Σχήμα 2. Σχηματική διάταξη διακρίβωσης μετρητών σχετικής πίεσης (τυπική διαδικασία)

$$\frac{\sum_i^n \left[M_i \left(1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_{M_i}} \right) \right] \cdot g}{A_0 (1 + \lambda \cdot P) \cdot [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(T - T_r)]} + \cancel{P_{bar}} + g \cdot h \cdot (\rho_f - \rho_{air}) + \Delta P_{dev} = P_{ind} + \cancel{P_{bar}} \quad (2)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, η ελάχιστη τιμή παραγόμενης πίεσης, αποτελεί χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης διάταξης εμβόλου/ κυλίνδρου, δεδομένου ότι βασικά καθορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, από το βάρος του εμβόλου και την ενεργό διατομή της διάταξης. Ένα τυπικό εύρος ελάχιστης παραγόμενης πίεσης σε εμπορικά διαθέσιμους πνευματικούς ζυγούς πίεσης είναι 1 – 20 kPa. Το αντίστοιχο μέγεθος για τη διάταξη εμβόλου κυλίνδρου υλοποίησης χαμηλών πιέσεων του εργαστηρίου πίεσης του Ε.Ι.Μ., της (πρώην) RUSKA, με κωδικό TL-1344, είναι περίπου 15 mbar, η οποία αντιστοιχεί προσεγγιστικά σε βάρος εμβόλου 47 g και ενεργό διατομή 3,4 cm².

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στα εξής κύρια σημεία :

- Χρήση επιπλέον βαρών - πέραν αυτών που αντιστοιχούν στην επιθυμητή προς υλοποίηση τιμή σχετικής πίεσης - που αντιστοιχούν προσεγγιστικά στην τρέχουσα βαρομετρική πίεση
- Λειτουργία ζυγού πίεσης υπό κενό, μέσω της χρήσης κώδωνα (bell jar) και αντλίας κενού, όπως παρουσιάζεται διαγραμματικά στο σχήμα (3)
- Καταγραφή της βαρομετρικής πίεσης, όπως αυτή καταγράφεται από ανεξάρτητο μετρητή, τη στιγμή της μέτρησης (δηλ της αιώρησης του συστήματος εμβόλου/ βαρών)
- Υπολογιστική αντιστάθμιση της υλοποιούμενης τιμής πίεσης από το ζυγό με την τρέχουσα βαρομετρική πίεση, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3)



Σχήμα 3. Σχηματική διάταξη διακρίβωσης μετρητών σε χαμηλές σχετικές πιέσεις μέσω υλοποίησης απόλυτης πίεσης (προτεινόμενη μέθοδος)

Η υλοποιούμενη πρότυπη τιμή σχετικής πίεσης δίνεται από τη σχέση :

$$P_{ref} = P_{bal} + P_{vac} - P_{bar} \quad (3)$$

όπου :

P_{bal} = η πίεση που αντιστοιχεί στα χρησιμοποιούμενα βάρη του ζυγού πίεσης. Ισχύει :
 $P_{bal} = P'_{bar} + \Delta p$ (4)

όπου :

P'_{bar} = η κατά προσέγγιση επικρατούσα βαρομετρική πίεση

Δp = η σκοπούμενη ή επιθυμητή τιμή της προς υλοποίηση σχετικής πίεσης

P_{vac} = η τιμή πίεσης (κενό) στον κώδωνα τη στιγμή μέτρησης

P_{bar} = η τιμή βαρομετρικής πίεσης τη στιγμή της μέτρησης, από εξωτερικό μετρητή

Έστω δηλ ότι απαιτείται η επίτευξη σχετικής τιμής πίεσης Δp (πχ 10 mbar), μικρότερη της ονομαστικής ελάχιστης τιμής πίεσης την οποία είναι σε θέση να υλοποιήσει η συγκεκριμένη διάταξη εμβόλου/ κυλίνδρου. Η προσεγγιστική τιμή βαρομετρικής πίεσης είναι P'_{bar} (πχ 1015 mbar). Ο χειριστής χρησιμοποιεί βάρη τα οποία αντιστοιχούν σε τιμή σχετικής πίεσης $P'_{bar} + \Delta p$ (δηλ 1025 mbar), η οποία εμπίπτει στις δυνατότητες του ζυγού, αλλά εκθέτει το σύστημα εμβόλου/ βαρών σε «κενό», μέσω της χρήσης κώδωνα (bell jar) και αντλίας κενού (σχήμα (3)). Εάν τη στιγμή της μέτρησης προκύψουν οι εξής τιμές :

- βαρομετρικής πίεσης $P_{bar} = 1015,62$ mbar
- πίεσης βαρών ζυγού πίεσης $P_{bal} = 1024,86$ mbar και
- (απόλυτη) πίεση στον κώδωνα $P_{vac} = 0,09$ mbar

η τιμή της υλοποιούμενης σχετικής τιμής πίεσης P_{ref} προκύπτει από τη σχέση (3) ως 9,33 mbar.

Στη συνέχεια αναλύεται το ισοζύγιο αβεβαιότητας της μέτρησης, το οποίο αναλύεται με τη βοήθεια αριθμητικού παραδείγματος. Η ανάπτυξη του ισοζυγίου και η εκτίμηση των επί μέρους συνιστωσών αβεβαιότητας, βασίζεται στην κατευθυντήρια οδηγία DKD-R 6-1 [1].

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Μαθηματικό μοντέλο μέτρησης

Για κάθε σημείο διακρίβωσης, το μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την απόκλιση του υπό διακρίβωση μετρητή, παρέχεται από τη σχέση (5).

$$\Delta P_{\text{mean}} = P_{\text{ind,mean}} - P_{\text{ref,mean}} + \delta P_{\text{zero dev}} + \delta P_{\text{rep}} + \delta P_{\text{hys}} + \delta P_{\text{repro}} \quad (5)$$

όπου:

- ΔP_{mean} = μέσος όρος απόκλισης μετρητή
- $P_{\text{ind,mean}}$ = μέσος όρος ενδείξεων μετρητή
- $P_{\text{ref,mean}}$ = μέσος όρος πρότυπης πίεσης ($P_{\text{ref,mean}} = P_{\text{bal,mean}} + P_{\text{vac,mean}} - P_{\text{bar,mean}}$)
- $\delta P_{\text{zero dev}}$ = διόρθωση λόγω απόκλισης σε μηδενική σχετική πίεση
- δP_{rep} = διόρθωση λόγω επαναληψιμότητας
- δP_{hys} = διόρθωση λόγω υστέρησης
- δP_{repro} = διόρθωση λόγω αναπαραγωγισιμότητας

Ανάλυση ισοζυγίου αβεβαιότητας

A) Πίνακας

Πίνακας 1. Ανάλυση ισοζυγίου αβεβαιότητας μετρητών σχετικής πίεσης

Μέγεθος	Εκτίμηση	Εύρος κατανομής	Κατανομή	Διαιρέτης	Τυπική Αβεβαιότητα	Συντ. Ευαισθησίας	Συνεισφορά
X_i	x_i	2α	$P(x_i)$		$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$
$P_{\text{bal,mean}}$	$p_{\text{bal,mean}}$	U (ζυγού πίεσης)	Κανονική	2	u (ζυγού πίεσης)	1	u_{bal}
$P_{\text{vac,mean}}$	$p_{\text{vac,mean}}$	U (αισθ/ρα κενού)	Κανονική	2	u (αισθ/ρα κενού)	1	u_{vac}
$P_{\text{bar,mean}}$	$p_{\text{bar,mean}}$	U (βαρ/τρου)	Κανονική	2	u (βαρ/τρου)	-1	u_{bar}
$P_{\text{ref,mean}}$	$p_{\text{ref,mean}}$						u_{ref}
$P_{\text{ref,mean}}$	$p_{\text{ref,mean}}$	U_{ref}	Κανονική	2	u_{ref}	-1	u_{ref}
$P_{\text{ind,mean}}$	$p_{\text{ind,mean}}$	r	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	$u(r) = \sqrt{[1/3(r/2)^2]}$	1	u_{res}
$\delta P_{\text{zero dev}}$	0	f_0	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	$u(f_0) = \sqrt{[1/3(f_0/2)^2]}$	1	u_{f_0}
δP_{rep}	0	b'	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	$u(b') = \sqrt{[1/3(b'/2)^2]}$	1	$u_{b'}$
δP_{hys}	0	h	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	$u(h) = \sqrt{[1/3(h/2)^2]}$	1	u_h
δP_{repro}	0	b	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	$u(b) = \sqrt{[1/3(b/2)^2]}$	1	u_b
ΔP_{mean}	Δp_{mean}						u_{mean}

Η συνδυασμένη διευρυμένη αβεβαιότητα ($k=2$), προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση (6) :

$$U_{mean} = k \sqrt{u_{ref}^2 + u_{res}^2 + u_{f0}^2 + u_{b'}^2 + u_h^2 + u_b^2} \quad (6)$$

ενώ :

$$u_{ref} = \sqrt{u_{bal}^2 + u_{vac}^2 + u_{bar}^2} \quad (7)$$

B) Εκτίμηση συνιστωσών αβεβαιότητας

Εκτιμώνται σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο εδάφιο 8.6 της αναφοράς [1].

Αριθμητικό παράδειγμα

Δεδομένα :

- Τύπος μετρητή : σχετικής πίεσης
- Εύρος : 0-20 mbar
- Διακριτική ικανότητα : 0,05 mbar
- Ονομαστική «ακρίβεια» : 0,5% fs
- Ακολουθία διακρίβωσης : B (κατά DKD-R 6-1)
- Σημείο διακρίβωσης στην περιοχή : 10,1 mbar
- Λοιπά δεδομένα : Όπως στον πίνακα 2. Δεν εκτελούνται επιπλέον μετρήσεις αναπαραγωγισιμότητας

Πίνακας 2. Αποτελέσματα διακρίβωσης

P _{bal,mean} hPa	P _{vac,mean} hPa	P _{bar,mean} hPa	P _{ref,mean} hPa	P _{ind}		
				M1 hPa	M2 hPa	M3 hPa
			0.000	0.00	0.05	0.05
.
.
1027.566	0.106	1017.59	10.082	10.05	10.15	10.15
.
.
.

Πίνακας 3. Ισοζύγιο αβεβαιότητας

Μέγεθος X _i	Εκτίμηση x _i hpa	Εύρος κατανομής 2 ^a hpa	Κατανομή P(x _i)	Διαιρέτης	Τυπική Αβεβαιότητα u(x _i) hpa	Συντ. Ευαισθησίας c _i	Συνεισφορά	
							u _i (y) hPa	%
P _{bal,mean}	1027,66	0,024	Κανονική	2	0,012	1	0,012	5,7
P _{vac,mean}	0,11	0,016	Κανονική	2	0,008	1	0,008	2,5
P _{bar,mean}	1017,59	0,03	Κανονική	2	0,015	-1	0,015	8,9
P _{ref,mean}	10,18						0,021	17,2

$P_{ref, mean}$	10,18	0,042	Κανονική	2	0,021	-1	0,021	17,2
$P_{ind, mean}$	10,13	0,10	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	0,029	1	0,029	33,1
$\delta P_{zero, dev}$	0	0,05	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	0,014	1	0,014	8,2
δP_{rep}	0	0,05	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	0,014	1	0,014	8,2
δP_{hys}	0	0,10	Ορθογωνική	$2\sqrt{3}$	0,029	1	0,029	33,2
ΔP_{mean}	-0,05						0,050	100,0

ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μετρητική διαδικασία και παρουσιάζεται το ισοζύγιο αβεβαιότητας για την υλοποίηση μέσω ζυγού πίεσης, σχετικών πιέσεων μικρότερων της ονομαστικής ελάχιστης τιμής η οποία αντιστοιχεί στο βάρος του εμβόλου. Προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου αποτελεί η δυνατότητα υλοποίησης στο ζυγό απόλυτων πιέσεων και η ύπαρξη εξωτερικής αναφοράς βαρομετρικής πίεσης. Η προτεινόμενη διάταξη χρησιμοποιείται ήδη σε διακριβώσεις ρουτίνας στα πλαίσια παροχής υπηρεσιών σε πελάτες του εργαστηρίου πίεσης του Ε.Ι.Μ. Όπως αναμένεται, και επιβεβαιώνεται από την εξέταση του ισοζυγίου, η εισαγωγή δύο επιπλέον μετρήσεων, του «κενού» στον κώδωνα και της βαρομετρικής πίεσης, επιβαρύνει αντίστοιχα την αβεβαιότητα της παραγόμενης σχετικής πίεσης αναφοράς. Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση της δυνατότητας ανάληψης σχετικών διακριβώσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] DKD-R 6-1, Calibration of Pressure Gauges (2003)
- [2] Dadson, R. S., D. L. Lewis and G. N. Peggs, The Pressure Balance, Theory and Practice, National Physical Laboratory (1982)