ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΝΟΥ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ – ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

ΓΕΣΘΗΜΑΝΗ ΛΙΟΝΤΑ[1] και Δρ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΛΕΥΚΟΠΟΥΛΟΣ[1]
[1]ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΒΙ.ΠΕ.Θ., ΟΙΚ. ΤΕΤΡ. 45, ΣΙΝΔΟΣ, Τ.Κ. 57022 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
e-mail: lefkopoulos@eim.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για μετρήσεις πίεσης σε περιοχές χαμηλότερες της ατμοσφαιρικής πίεσης (κενό), επηρεάζει πολλές σημαντικές εφαρμογές στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή, την έρευνα και την τεχνολογική ανάπτυξη γενικότερα. Αναφέρονται ενδεικτικά εφαρμογές οι οποίες απαιτούν την ανάγκη δημιουργίας και μέτρησης κενού: μικροηλεκτρονική και βιομηχανία ημιαγωγών, βιομηχανία τροφίμων, χημική και φαρμακευτική βιομηχανία, μεταλλουργικές εφαρμογές κλπ. Μέχρι σήμερα, η διακρίβωση των αισθητήρων και διατάξεων μέτρησης κενού, λόγω έλλειψης κατάλληλης εθνικής και ιδιωτικής υποδομής, ανατίθετο σε εργαστήρια του εξωτερικού. Με την εγκατάσταση και λειτουργία ωστόσο του νέου συστήματος υλοποίησης και μέτρησης κενού, το εργαστήριο πίεσης του ΕΙΜ διηύρυνε τις μετρητικές του δυνατότητες έως 10^{-5} Pa (απόλυτη πίεση) και είναι σε θέση να υλοποιεί πλέον τα εθνικά πρότυπα και να παρέχει αντίστοιχες υπηρεσίες διακριβώσεων.
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το σύστημα κενού του εργαστηρίου πίεσης του ΕΙΜ και περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες και δυσκολίες υλοποίησης του συγκεκριμένου φυσικού μεγέθους. Επιπλέον αναλύονται οι πηγές σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις και ποσοτικοποιείται η συνεισφορά τους με τη μορφή ενός ισοζυγίου αβεβαιότητας για μία τυπική μέτρηση.

ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΕΝΟΥ

Το εύρος μέτρησης κενού, εκτείνεται σε περιοχή η οποία υπερβαίνει τις 15 τάξεις μεγέθους. Για το λόγο αυτό, είθισται, για την διευκόλυνση της συζήτησης και κατανόησης, να διαιρείται το συνολικό εύρος σε πέντε διακριτές περιοχές :

Πίνακας 1 : Κατηγοριοποίηση κενού [3]

Περιοχή	Περιοχή απόλυτης πίεσης, Pa
Χαμηλό (Low / rough)	10^{5} έως 10^{2}
Μεσαίο (Medium)	10^{2} έως 10^{-1}
Υψηλό (High)	10^{-1} έως 10^{-6}
Υπέρ υψηλό (Ultra-high)	10^{-6} έως 10^{-10}
Εξαιρετικά Υπέρ υψηλό (Extreme ultrahigh)	$<10^{-10}$

Ο ανωτέρω διαχωρισμός μπορεί να θεωρηθεί αυθαίρετος, βασίζεται όμως στις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες του αερίου, οι οποίες επηρεάζουν την αρχή λειτουργίας των μετρητών κενού που χρησιμοποιούνται στα επί μέρους εύρη.

ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις κενού παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία τις διαφοροποιούν σε σημαντικό βαθμό από τις μετρήσεις των υπολοίπων «κλασσικών» μεγεθών του συστήματος SI. Ενδεικτικά αναφέρεται :

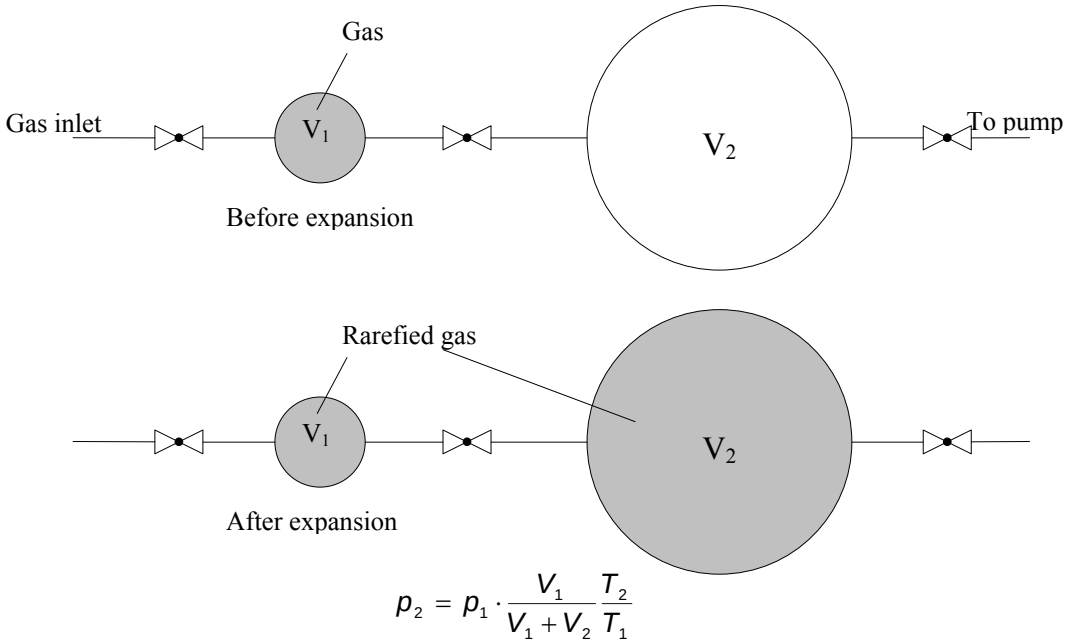
- Οι αισθητήρες κενού παρουσιάζουν αυξημένη χρονική ολίσθηση και θεωρούνται γενικά ευαίσθητοι σε εξωτερικές επιδράσεις (κακοποίηση, μεταφορά κλπ)
- Η σχετική αβεβαιότητα μέτρησης του ακριβέστερου εμπορικά διαθέσιμου μετρητή (Spinning Rotor Gauge), διακριβωμένου ως προς πρωτεύον πρότυπο, είναι τάξης μεγέθους 1%. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι στην κλίμακα του χρόνου η αντίστοιχη σχετική αβεβαιότητα αγγίζει την τιμή 10^{-13}
- Οι διακριβώσεις αισθητήρων κενού είναι γενικά χρονοβόρες. Η διακρίβωση ενός αισθητήρα διαρκεί περίπου μία μέρα, ωστόσο η προετοιμασία της διακρίβωσης μπορεί να διαρκέσει μια ολόκληρη εβδομάδα

Πρωτεύοντα πρότυπα

Στην περιοχή χαμηλού κενού ($<10^2$ Pa) η υλοποίηση της πίεσης βασίζεται στο βασικό ορισμό του μεγέθους της πίεσης, ενώ ως πρωτεύοντα πρότυπα χρησιμοποιούνται στήλες υγρού ή ζυγοί πίεσης.

Στις περιοχές χαμηλότερου κενού η υλοποίηση του μεγέθους βασίζεται στις μεθόδους στατικής εκτόνωσης (“static expansion”) και διαρκούς εκτόνωσης (“continuous expansion”), οι οποίες προϋποθέτουν τη χρήση μεγάλων και πολύπλοκων διατάξεων. Η πλήρης περιγραφή της κλασσικής μεθόδου στατικής εκτόνωσης εκφεύγει του σκοπού της παρούσας εργασίας, ωστόσο η αρχή υλοποίησής της ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

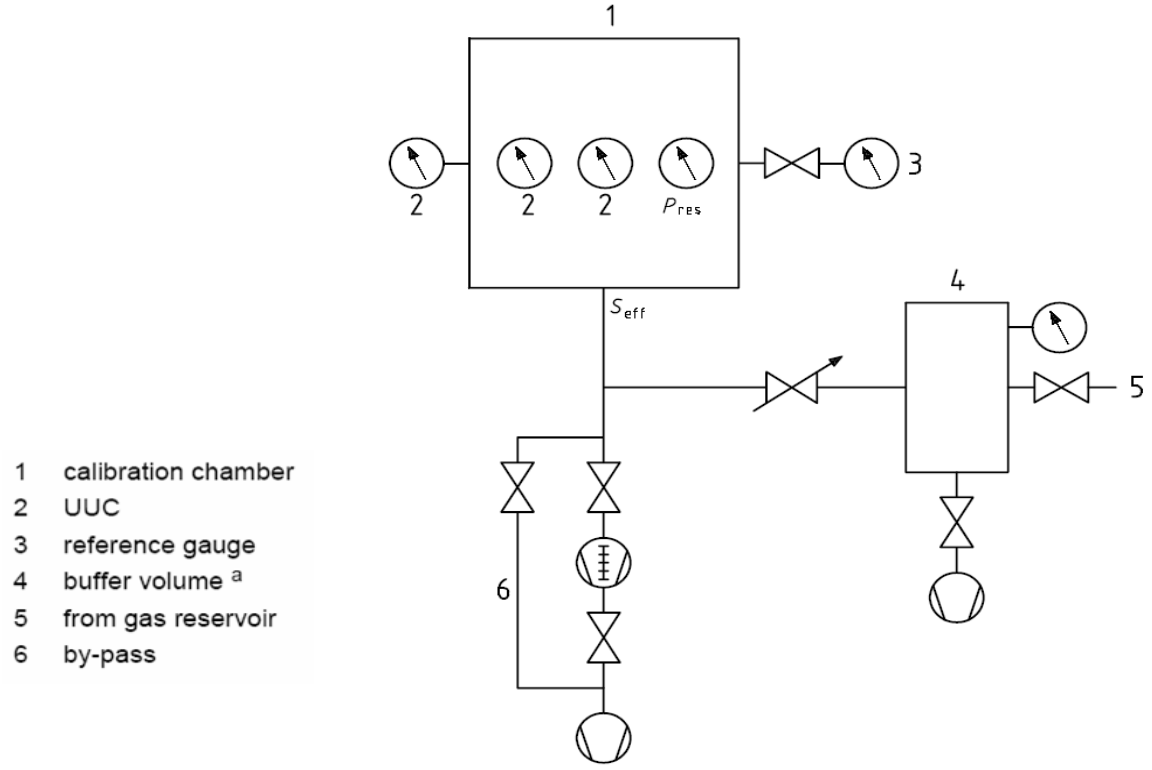
Αέριο παγιδεύεται σε θάλαμο μικρού και γνωστού όγκου σε αρχική πίεση όσο υψηλή απαιτείται (πρακτικά μεταξύ 1 kPa και 100 kPa), προκειμένου να είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια (πχ ζυγό πίεσης). Στην πίεση αυτή το αέριο μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί τους νόμους των τελείων αερίων. Στη συνέχεια αυτό εκτονώνεται σε θάλαμο μεγαλύτερου όγκου. Η πίεση στους δύο θαλάμους μετά την εκτόνωση υπολογίζεται από την αρχική πίεση και το λόγο των όγκων των δύο θαλάμων, με την προϋπόθεση της ισοθερμικής εκτόνωσης. Το αέριο στον απομονωμένο δεύτερο θάλαμο εκτονώνεται διαδοχικά σε τρίτο και τέταρτο θάλαμο, με αντίστοιχη πτώση της πίεσης. Με την τεχνική αυτή είναι δυνατόν να μειωθεί η πίεση στην περιοχή $5*10^{-7}$ Pa [3].



Σχήμα 1: Τυπική διάταξη πρωτεύοντος προτύπου που βασίζεται στην αρχή της μεθόδου στατικής εκτόνωσης [3]

Δευτερεύοντα πρότυπα

Ένας μετρητής κενού ικανοποιητικής σταθερότητας, διακριβωμένος ως προς πρωτεύον πρότυπο αποτελεί δευτερεύον πρότυπο. Τα δευτερεύοντα πρότυπα χρησιμοποιούνται ως πρότυπα αναφοράς κατά τη συγκριτική μέθοδο διακρίβωσης. Κατά τη μέθοδο αυτή, οι ενδείξεις του υπό διακρίβωση αισθητήρα συγκρίνονται με τις ενδείξεις ενός δευτερεύοντος πρότυπου, όταν και τα δύο είναι συνδεδεμένα σε κατάλληλο θάλαμο διακρίβωσης, υπό συνθήκες οι οποίες διασφαλίζουν την ίδια πυκνότητα και κατανομή ταχύτητας μορίων του αερίου διακρίβωσης. Ίση πυκνότητα και κατανομή ταχύτητας μορίων σε δύο σημεία σύνδεσης του θαλάμου συνεπάγεται ίση πίεση. Η παραπάνω απαίτηση δημιουργείται από την ύπαρξη διαφόρων τύπων αισθητήρων κενού οι οποίοι μετρούν την πίεση μέσω της πυκνότητας του αερίου ή του ρυθμού πρόσκρουσης των μορίων σε στοιχείο του αισθητήρα. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένας τυπικός θάλαμος διακρίβωσης.



Σχήμα 2: Τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στις διακριβώσεις με δευτερεύοντα πρότυπα [2]

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΝΟΥ ΤΟΥ Ε.Ι.Μ.

Γενικά

Το σύστημα διακρίβωσης αισθητήρων κενού που διαθέτει το εργαστήριο πίεσης του Ε.Ι.Μ. αποτελεί δευτερεύον πρότυπο, το οποίο απαρίζεται από τα εξής βασικά στοιχεία και τμήματα :

- Θάλαμο κενού με 10 θύρες σύνδεσης αισθητήρων (προτύπων αναφοράς και υπό διακρίβωση), κατανεμημένων συμμετρικά ως προς την είσοδο και έξοδο του αερίου από το θάλαμο
- Σύστημα αντλιών για την εκκένωση του θαλάμου και τη δημιουργία κενού αποτελούμενο από :
  - 1 αντλία διαφράγματος και
  - 2 αντλίες turbo-molecular, συνδεδεμένες σε σειρά

  Η ελάχιστη απόλυτη πίεση η οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί εντός του θαλάμου είναι της τάξης 10^{-8} Pa, ενώ το πραγματικό εύρος δυνατότητας διακρίβωσης του εργαστηρίου καλύπτει την περιοχή 10^{-6} - 10^{5} Pa
- 4 πρότυποι αισθητήρες κενού :
  - Ionization (ION), με εύρος μέτρησης : 10^{-10} – 1 Pa
  - Spinning Rotor (SRG), με εύρος μέτρησης : 10^{-5} – 100 Pa
  - Capacitance (CDG-1), με εύρος μέτρησης : 0,01 – 133 Pa (1 Torr)
  - Capacitance (CDG-1000), με εύρος μέτρησης : 10 Pa – 1,333 X 10^{5} Pa (1000 Torr)

  Οι ανωτέρω αισθητήρες αποτελούν τα πρότυπα αναφοράς του εργαστηρίου, τα οποία αντλούν ιχνηλασιμότητα από ξένα Εθνικά πρότυπα.

Προδιαγραφές

Ο σχεδιασμός και κατασκευή του θαλάμου διασφαλίζει την κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή του αερίου, ως προς το χώρο και χρόνο, σε όλον τον όγκο του θαλάμου. Ειδικότερα ο θάλαμος διαθέτει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά :

- Ο όγκος του είναι τουλάχιστον είκοσι φορές μεγαλύτερος από τον συνολικό όγκο των εξωτερικών συνδέσεων
- Το σχήμα του αποτελείται από δύο συμμετρικούς σφαιροειδείς θόλους. Η συγκεκριμένη κατασκευή εξασφαλίζει μικρό λόγο εσωτερικής επιφάνειας ως προς όγκο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση φαινομένων εκρόφησης και προσρόφησης μορίων, τα οποία εμποδίζουν την επίτευξη υψηλού κενού
- Το σημείο εισαγωγής του αερίου διακρίβωσης είναι μεταξύ της εξόδου του θαλάμου και των αντλιών, ώστε τα εισερχόμενα στο θάλαμο μόρια αερίου να μην προσκρούουν άμεσα στους αισθητήρες
- Τα σημεία σύνδεσης των αισθητήρων, προτύπων και υπό διακρίβωση, είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, το οποίο διέρχεται από το κέντρο του θαλάμου και είναι κάθετο στον άξονα συμμετρίας του
- Η απόσταση μεταξύ γειτονικών θυρών σύνδεσης είναι μεγαλύτερη των 5cm ώστε να ελαχιστοποιείται η μεταφορά θερμότητας από θερμαινόμενο αισθητήρα, σε γειτονικά συνδεδεμένους. Η χωρική και χρονική διακύμανση της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου και των θυρών σύνδεσης είναι μικρότερη από ± 0,5K

Περιβαλλοντικές συνθήκες

Το σύστημα κενού είναι εγκατεστημένο στο εργαστήριο πίεσης του ΕΙΜ, με ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας 23 ± 1^0C. Το υπάρχον σύστημα κλιματισμού διασφαλίζει χωρική κατανομή θερμοκρασίας θαλάμου κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης ±0,5 K, στο εύρος 20 – 26 ^{0}C [1], [2].

Πρότυπα/ οδηγίες διακρίβωσης

Η μέθοδος διακρίβωσης που χρησιμοποιείται από το εργαστήριο είναι η συγκριτική, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της τεχνικής προδιαγραφής ISO/ TS 3567:2005 και της οδηγίας DKD-R 6-2 part 1 - 5.

Το αέριο διακρίβωσης που χρησιμοποιείται είναι άζωτο καθαρότητας 99,9% κ.ο.

Πηγές σφαλμάτων

Αναφέρονται στη συνέχεια οι σημαντικότερες πηγές σφαλμάτων :

- Ανομοιόμορφη κατανομή πίεσης εντός του θαλάμου, λόγω α) ανεπαίσθητων και δύσκολα ανιχνεύσιμων διαρροών στις θύρες εγκατάστασης των αισθητήρων β) εκροφήσεων / προσροφήσεων μορίων στα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου γ) διαμόρφωσης διαφορετικών τοπικών συνθηκών, είτε λόγω χρήσης μεγάλου μήκους σωλήνων σύνδεσης αισθητήρων, είτε λόγω σύνδεσης υπό γωνία των αισθητήρων στο θάλαμο.
- Ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας εντός του θαλάμου, λόγω ύπαρξης τοπικών πηγών θερμότητας (θερμαινόμενοι αισθητήρες) ή λόγω μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας έχουν ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ανομοιόμορφης κατανομής πεδίου πίεσης, και ως εκ τούτου την έκθεση των αισθητήρων τοπικά σε διαφορετική πίεση.
- Ύπαρξη δονήσεων, λόγω συνδεδεμένων αντλιών. Συγκεκριμένοι τύποι αισθητήρων (SRG), είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε δονήσεις, λόγω της αρχής λειτουργίας τους. Οι

δονήσεις είναι δυνατόν να μειωθούν, με τοποθέτηση ειδικών υλικών απόσβεσης δονήσεων

- Επιμόλυνση του συστήματος από αισθητήρες, σωληνώσεις σύνδεσης, υγρασία αερίου διακρίβωσης κλπ. Οι προσροφώμενες στα τοιχώματα του θαλάμου ουσίες (πχ μόρια H_2O, O_2 και C), εκροφώνται με αργό και μη σταθερό ρυθμό, με αποτέλεσμα την αδυναμία επίτευξης συνθηκών ισορροπίας. Σε ακραίες περιπτώσεις είναι δυνατόν λόγω επιμολύνσεων να υπάρξει καταστροφή ευαίσθητων αισθητήρων. Ενας αποτελεσματικός συχνά τρόπος απομάκρυνσης των επιμολύνσεων είναι η θέρμανση του θαλάμου για παρατεταμένο χρονικό διάστημα στην περιοχή των 150 ^{0}C
- Σύσταση αερίου διακρίβωσης η οποία ιδιαίτερα στην περιοχή υψηλού κενού ενισχύεται σε παρουσία H_2, λόγω χημικών αντιδράσεων, και επηρεάζει την απόκριση των αισθητήρων
- Αλληλεπιδράσεις αισθητήρων, με αποτέλεσμα εσφαλμένες μετρήσεις. Αναφέρεται ενδεικτικά η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούν δύο αισθητήρες ιονισμού (τύπου cold-cathode)
- Χρήση αισθητήρα σε θερμοκρασία διαφορετική από τη θερμοκρασία διακρίβωσής του, λόγω εξάρτησης, της συμπεριφοράς του από τη θερμοκρασία

ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Παρουσιάζεται το ισοζύγιο αβεβαιότητας, που αφορά τη διακρίβωση ενός αισθητήρα τύπου χωρητικότητας διαφράγματος, ως προς τον πρότυπο αισθητήρα του εργαστηρίου CDG-1.

Τα μετρολογικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι:

- Πρότυπος αισθητήρας:
  - Διακριτικότητα $2,5*10^{-5}$ mbar
  - Θερμοκρασιακή εξάρτηση στο μηδέν 0,0025% FS/^{0}C
  - Θερμοκρασιακή εξάρτηση στο max 0,01% rdg/^{0}C
- Υπό διακρίβωση αισθητήρας:
  - Τύπου χωρητικότητας διαφράγματος
  - Εύρος μέτρησης $5*10^{-3}$ έως 10 Torr
  - Διακριτικότητα 10^{-3} Torr ($1,33*10^{-3}$ mbar)
  - Θερμοκρασιακή εξάρτηση στο μηδέν 0,002% FS/^{0}C
  - Θερμοκρασιακή εξάρτηση στο max 0,02% rdg/^{0}C

Επιπλέον:

- Θερμοκρασία διακρίβωσης : 23 ± 0,5^{0}C
- Υψομετρική διαφορά : 0 ± 0,02 m

Το ισοζύγιο αναπτύσσεται για την τιμή πίεσης 0,01 mbar

Μαθηματικό μοντέλο

Για κάθε σημείο διακρίβωσης η απόκλιση του οργάνου, δίνεται από τη σχέση (1) [1].

$$\Delta p = p_{DUT} - p_N + \delta p_V \qquad (1)$$

όπου:

Δp απόκλιση υπό διακρίβωση οργάνου

p_{DUT} ένδειξη του υπό διακρίβωση οργάνου μετά την εφαρμογή των αναγκαίων διορθώσεων

p_N τιμή πίεσης αναφοράς, μετά την εφαρμογή των αναγκαίων διορθώσεων

δp_V αποκλίσεις λόγω της μεθόδου διακρίβωσης

$$p_N = p_{ind,N} - p_{offs,N} + \delta p_{D,N} + \delta p_{cal,N} + \delta p_{L,N} + \delta p_{T,N} + \delta p_{S,N} \quad (2)$$

όπου:

$p_{ind,N}$ ένδειξη προτύπου

$p_{offs,N}$ ένδειξη προτύπου (offset) στην ελάχιστη επιτυγχανόμενη πίεση (base pressure) -

$\delta p_{D,N}$ απόκλιση του offset λόγω ολίσθησης κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης

$\delta p_{cal,N}$ απόκλιση της ένδειξης του προτύπου σύμφωνα με το πιστοποιητικό διακρίβωσης

$\delta p_{L,N}$ απόκλιση της ένδειξης του προτύπου λόγω ολίσθησης μεταξύ δύο διαδοχικών διακριβώσεων

$\delta p_{T,N}$ απόκλιση της ένδειξης του προτύπου λόγω θερμοκρασιακών επιδράσεων

$\delta p_{S,N}$ απόκλιση της ένδειξης του προτύπου λόγω λοιπών επιδράσεων

$$p_{DUT} = p_{ind,DUT} - p_{offs,DUT} + \delta p_{D,DUT} + \delta p_{n,DUT} \quad (3)$$

όπου:

$p_{ind,DUT}$ ένδειξη υπό διακρίβωση οργάνου

$p_{offs,DUT}$ ένδειξη οργάνου (offset) στην ελάχιστη επιτυγχανόμενη πίεση (base pressure)

$\delta p_{D,DUT}$ απόκλιση του offset λόγω ολίσθησης κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης

$\delta p_{h,DUT}$ απόκλιση του οργάνου λόγω υψομετρικής διαφοράς από το πρότυπο

$\delta p_{T,DUT}$ απόκλιση του οργάνου λόγω λοιπών εξαρτήσεων (πχ θερμοκρασιακές επιδράσεις από δεδομένα κατασκευαστή κλπ)

$$\delta p_V = \delta p_{T,V} + \delta p_{K,V} + \delta p_{M,V} \quad (4)$$

όπου:

$\delta p_{T,V}$ απόκλιση της πίεσης στα σημεία σύνδεσης λόγω θερμοκρασικών διαφορών

$\delta p_{K,V}$ απόκλιση της πίεσης στα σημεία σύνδεσης λόγω εκροφήσεων, διαρροών, συνθηκών ροής, ταχύτητας άντλησης (πχ αισθητήρες cold cathode)

$\delta p_{M,V}$ απόκλιση λόγω μεθόδου μέτρησης (πχ μετρήσεις τύπου R-T-T-R)

Ισοζύγιο Αβεβαιοτήτων [1]

Το ισοζύγιο αβεβαιοτήτων καταρτίζεται με βάση το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφεται από τις εξισώσεις (1), (2), (3), (4).

Η διευρυμένη αβεβαιότητα δίνεται από τον τύπο:

$$U = k \cdot \sqrt{u_N^2 + u_{DUT}^2 + u_V^2} \quad (5)$$

όπου:

k παράγοντας επικάλυψης

u_N συνεισφορά αβεβαιότητας πίεσης αναφοράς

u_{DUT} συνεισφορά αβεβαιότητας υπό διακρίβωση οργάνου

u_V συνεισφορά αβεβαιότητας λόγω διαδικασίας διακρίβωσης

Η τυπική αβεβαιότητα της πίεσης αναφοράς δίνεται από τη σχέση :

$$u_N = \sqrt{u_{ind,N}^2 + u_{offs,N}^2 + u_{D,N}^2 + u_{cal,N}^2 + u_{L,N}^2 + u_{T,N}^2 + u_{S,N}^2} \quad (6)$$

όπου:

$u_{ind,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω επαναληψιμότητας προτύπου αναφοράς κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης

Για τους αισθητήρες τύπου CDG εκτιμάται σχετική τυπική αβεβαιότητα λόγω επαναληψιμότητας $3*10^{-4}$ για P > 0.1 mbar και $8*10^{-4}$ για P < 0.1 mbar (PTB)

$u_{offs,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω της αβεβαιότητας της μέτρησης της τιμής του offset του προτύπου κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης. Υπολογίζεται από τη διακριτικότητα, θεωρώντας ορθογωνική κατανομή

$u_{D,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας του offset του προτύπου κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης λόγω θερμοκρασιακής εξάρτησης του offset. Για θερμοκρασιακή διακύμανση κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης ίση με ΔT (^{0}C) και αισθητήρα με εύρος μέτρησης FS σε mbar :

$$u_{D,N} = 2.5*10^{-5}*FS*\frac{\Delta T}{2\sqrt{3}} \qquad (7)$$

$u_{cal,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας του προτύπου από το πιστοποιητικό διακρίβωσης

$u_{L,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας του προτύπου λόγω χρονικής ολίσθησης. Εκτιμήθηκε ίση με 0.0035*P/έτος

$u_{T,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας του προτύπου λόγω θερμοκρασιακών επιδράσεων κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης. Για θερμοκρασιακή διακύμανση κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης ίση με ΔT (^{0}C) και πίεση P :

$$u_{T,N} = 0.1*10^{-3}*P*\frac{\Delta T}{2\sqrt{3}} \qquad (8)$$

$u_{S,N}$ συνιστώσα αβεβαιότητας του προτύπου λόγω ειδικών συνθηκών εργαστηρίου. Εκτιμήθηκε από την ελάχιστη επιτυγχανόμενη πίεση ως $3*10^{-8}$ mbar

u_V συνιστώσα αβεβαιότητας που οφείλεται στη μέθοδο διακρίβωσης και λαμβάνεται ίση με (ISO/TS 3567):

$$u_V = 0.003*P \quad \gamma\iota\alpha \quad P < 1 \quad mbar \qquad (9)$$

$$u_V = 0.001*P \quad \gamma\iota\alpha \quad P \geq 1 \quad mbar \qquad (10)$$

Η τυπική αβεβαιότητα του υπό διακρίβωση οργάνου δίνεται από τη σχέση :

$$u_{DUT} = \sqrt{u_{ind,DUT}^2 + u_{offs,DUT}^2 + u_{D,DUT}^2 + \sum u_{n,j,DUT}^2} \qquad (11)$$

όπου:

$u_{ind,DUT}$ συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω επαναληψιμότητας. Υπολογίζεται από δεδομένα του κατασκευαστή και εκτιμήθηκε ίση με 0,12% rdg

$u_{offs,DUT}$ αβεβαιότητα μέτρησης του offset. Υπολογίζεται από τη διακριτικότητα, θεωρώντας ορθογωνική κατανομή

$u_{D,DUT}$ συνιστώσα αβεβαιότητας του offset λόγω θερμοκρασιακής εξάρτησής του. Για θερμοκρασιακή διακύμανση κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης ίση με ΔT (^{0}C) και αισθητήρα με εύρος μέτρησης FS σε mbar :

$$u_{D,DUT} = 2*10^{-5}*FS*\frac{\Delta T}{2\sqrt{3}} \qquad (12)$$

$u_{n,j,DUT}$ λοιπές συνιστώσες αβεβαιότητας, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η αβεβαιότητα λόγω υψομετρικής διαφοράς από το πρότυπο ($u_{h,DUT}$) και λοιπών εξαρτήσεων γνωστών από δεδομένα κατασκευαστή (πχ θερμοκρασιακή εξάρτηση)

$$u_{h,DUT} = 1.12 * 10^{-4} * P * \frac{0.02}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

$$u_{T,DUT} = 2 * 10^{-4} * rdg * \frac{\Delta T}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται το ισοζύγιο αβεβαιότητας όπως προέκυψε από την παραπάνω ανάλυση

Πίνακας 2. Ισοζύγιο αβεβαιοτήτων διακρίβωσης αισθητήρα κενού τύπου χωρητικότητας διαφράγματος ως προς πρότυπο αναφοράς CDG 1 Torr

Μέγεθος X_i	Εκτίμηση x_i	Εύρος κατανομής 2α	Κατανομή $P(x_i)$	Διαιρέτης	Τυπική Αβεβαιότητα $u(x_i)$	Συντ. Ευαισθησίας c_i	Συνεισφορά $u_i(y)$	
	mbar						mbar	%
$P_{ind,N}$	0,01010	$2*(8*10^{-4}*P)$mbar	κανονική	2	$8,6*10^{-6}$mbar	1	$8,6*10^{-6}$	0,0
$P_{offs,N}$	$-9,9*10^{-4}$	$2,5*10^{-5}$mbar	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$7,2*10^{-6}$mbar	1	$7,2*10^{-6}$	0,0
$\delta p_{D,N}$	0	1^0C	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$0,29^0$C	$3,33*10^{-5}$mbar/^{0}C	$9,6*10^{-6}$	0,1
$\delta p_{cal,N}$	$-3,23*10^{-4}$	$0,9*10^{-2}$*P mbar	Κανονική	2	$4,8*10^{-5}$mbar	1	$4,8*10^{-5}$	1,5
$\delta p_{L,N}$	0	$7*10^{-3}$*P mbar	Κανονική	2	$3,8*10^{-5}$mbar	1	$3,8*10^{-5}$	0,9
$\delta p_{T,N}$	0	1^0C	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$0,29^0$C	$1,07*10^{-6}$mbar/^{0}C	$3,1*10^{-7}$	0,0
$\delta p_{S,N}$	0	$6*10^{-8}$mbar	Κανονική	2	$3*10^{-8}$mbar	1	$3*10^{-8}$	0,0
P_N	0,010766						**$6,3*10^{-5}$**	**2,5**
$p_{ind,DUT}$	0,012	$2,9*10^{-5}$mbar	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$8,3*10^{-6}$mbar	1	$8,3*10^{-6}$	0,0
$p_{offs,DUT}$	0	$1,3*10^{-3}$mbar	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$3,8*10^{-4}$mbar	1	$3,8*10^{-4}$	93,1
$\delta p_{D,DUT}$	0	1^0C	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$0,29^0$C	$2,66*10^{-4}$mbar/^{0}C	$7,7*10^{-5}$	3,7
$\delta p_{h,DUT}$	0	0,04m	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$1,15*10^{-2}$m	$1,12*10^{-6}$mbar/m	$1,4*10^{-8}$	0,0
$\delta p_{T,DUT}$	0	1^0C	ορθογωνική	2*sqrt(3)	$0,29^0$C	$2,4*10^{-6}$mbar/^{0}C	$6,9*10^{-7}$	0,0
P_{DUT}	0,012						**$3,9*10^{-4}$**	**96,8**
δp_V	0	$6,5*10^{-5}$	Κανονική	2	$3,2*10^{-5}$	1	**$3,2*10^{-5}$**	**0,7**
ΔP	$1,23*10^{-3}$	Expanded Uncertainty U=k*u (k=2)= $8,0*10^{-4}$mbar/ 8% rdg					**$4,0*10^{-4}$**	**100**

ΣΥΝΟΨΗ

Το εργαστήριο πίεσης / κενού του ΕΙΜ αποτελεί σημαντική εθνική υποδομή, η οποία καλύπτει πάγιες ανάγκες της βιομηχανίας, έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης της χώρας μας. Η υλοποίηση του κενού πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου συστήματος δευτερεύουσας ακρίβειας, το οποίο καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες της βιομηχανίας και των εργαστηρίων διακρίβωσης. Η βέλτιστη ικανότητα μέτρησης του εργαστηρίου, τη στιγμή αυτή, κυμαίνεται στο εύρος 1 έως 10% rdg (k=2), ανάλογα με την περιοχή μέτρησης και το είδος του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα αναφοράς. Ωστόσο οι επιδόσεις αυτές αναμένεται να βελτιωθούν σύντομα, μέσω της άμεσης αναφοράς στα εθνικά πρότυπα κενού της Γερμανίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] DKD-R 6-2, Calibration of Measuring Devices for Vacuum, parts 1-5, 2002
[2] ISO/TS 3567, Vacuum Gauges – Calibration by Direct Comparison with a Reference Gauge, 2005
[3] Foundations of Vacuum Science and Technology, Edited by James M. Lafferty, John Wiley & Sons, Inc., 1998