ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΠΑΧΥΜΕΤΡΩΝ, ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΥΝ ΤΟ DIN 862, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ VDI/VDE/DGQ 2618, part 9.1:2006

Γαλανόπουλος Ευθύμιος και Καραμπέτη Κυριακή
Διεύθυνση οργανισμού συγγραφέων: C^{3}T, ΒΙ.ΠΕ. ΚΙΛΚΙΣ
e-mail: c3t@the.forthnet.gr

1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να περιγράψει τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διακρίβωση παχυμέτρων και το χαρακτηρισμό τους, ως προς τις αποκλίσεις της ένδειξης, σύμφωνα με το πρότυπο **DIN 862:1988** 'Vernier Calipers. Requirements and testing'.

Η τελευταία έκδοση του DIN 862 (1988) σε σχέση με την προηγούμενη (1979) έχει κάποιες διαφοροποιήσεις και ανάμεσα σε αυτές είναι πως, η υπεύθυνη επιτροπή αποφάσισε να αφήσει εκτός του scope του προτύπου ανοχές επιπεδότητας, παραλληλότητας και ευθύτητας, αφήνοντας τη σχετική συμμόρφωση στους κατασκευαστές.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται σε αρχές της **τεχνικής οδηγίας VDI/VDE/DGO 2618 part 9.1 (March 2006): Test Instruction for Calipers.**

2. Μέθοδος

2.1 Πεδίο

Το DIN 862 [1] έχει εφαρμογή σε:

1. αναλογικά παχύμετρα με μέγιστη κλίμακα μέτρησης 0-2000 mm και κλίμακα με βερνιέρο ή κυκλική με βελόνα, με διακριτική ικανότητα 0.1, 0.05 ή 0.02 mm
2. ψηφιακά παχύμετρα με μέγιστη κλίμακα μέτρησης 0-1000 mm και διακριτική ικανότητα 0.01 mm

2.2 Επιτρεπτά όρια σφάλματος

Τα όρια σφάλματος G, σύμφωνα με το DIN 862, είναι συνάρτηση του μετρούμενου μήκους l και πρέπει να ορίζονται με βάση τις εξισώσεις που δίνονται παρακάτω, με τις τιμές να ισχύουν στην πλησιέστερη 0.01 τιμή.

Τα όρια σφάλματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερα από το βήμα της ψηφιακής ένδειξης ή της ένδειξης του βερνιέρου ή της ένδειξης της κυκλικής κλίμακας, ειδικά για μετρήσεις που πλησιάζουν τα άνω όρια του εύρους της μέτρησης.

Το όριο σφάλματος για αναλογικά παχύμετρα με κλίμακα κυκλική ή με βερνιέρο και διακριτική ικανότητα 0.1 ή 0.05 mm, προσδιορίζεται από τη σχέση

$$G = (20 + \frac{l}{10mm}) \geq 50\ \mu m \qquad (1)$$

Το όριο σφάλματος για αναλογικά παχύμετρα με διακριτική ικανότητα 0.02 mm ή για ψηφιακά παχύμετρα, προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$G = (22 + \frac{l}{50mm})\ \mu m \qquad (2)$$

Πίνακας 1: Όρια Σφάλματος σε Παχύμετρα

Μετρούμενο μήκος, l	Όρια σφάλματος G σε μm Διάστημα κλίμακας και ένδειξη βερνιέρου 0,1 και 0,05	0,02	Ψηφιακή αύξηση 0,01
50		20	20
100	50		
200			
300			
400	60	30	30
500	70		
600	80		
700	90		
800	100	40	40
900	110		
1000	120		
1200	140	50	
1400	160		
1600	180		-
1800	200	60	
2000	220		

3. Μέθοδος Διακρίβωσης

Στην τεχνική οδηγία VDI 2618:part 9.1 [2], υπάρχει ένα check list με απαραίτητες ενέργειες προς υλοποίηση, που αφορούν τρία διαφορετικά είδη ελέγχων και είναι τα εξής [9] :

1. **Pattern/ type testing (B)**: κατά τον έλεγχο αυτό εξακριβώνεται πως μια ποσότητα συμμορφώνεται με κάποιο πρότυπο ή προδιαγραφή. Στην περίπτωση αυτή μετράται ένα μοναδιαίο δείγμα, το οποίο παρέχει πληροφορίες για ολόκληρη την ποσότητα. Πρόκειται ουσιαστικά για μια διαδικασία έγκρισης τύπου. Αυτό το είδος ελέγχου δεν αντικαθιστά το original inspection για τον υπόλοιπο μετρητικό εξοπλισμό της ποσότητας.
2. **Original/ incoming inspection (E)**: κατά τον έλεγχο εξακριβώνεται νέος μετρητικός εξοπλισμός ή εξοπλισμός που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη. Μπορεί να μετρηθεί ως original inspection στους πελάτες ή ως outgoing inspection στους προμηθευτές. Ο έλεγχος παρέχει συμμόρφωση με προδιαγραφόμενα κριτήρια όπως αυτά του DIN, με πρότυπα εργασίας ή δηλώσεις του κατασκευαστή, ανάλογα με τη χρήση του μετρητικού εξοπλισμού.
3. **Control check (U)**: αυτή η επιθεώρηση εκτελείται για να ελέγξει το μετρητικό εξοπλισμό σε κανονική βάση.

3.1 Προετοιμασία

Πριν την έναρξη των ελέγχων που απαρτίζουν τη διακρίβωση αποτελεί καλή πρακτική να πραγματοποιούνται ορισμένοι αρχικοί έλεγχοι που συνίστανται συνοπτικά στα παρακάτω:

- Έλεγχος των προτύπων πλακιδίων που θα χρησιμοποιηθούν για τη διακρίβωση (κατάσταση διακρίβωσης)

- Σήμανση και αριθμός αναγνώρισης.
- Για εξοπλισμό χωρίς αριθμό αναγνώρισης ορίζεται αριθμός (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου Β).
- Καθαρισμός σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Απομαγνητισμός, εφόσον είναι απαραίτητος, σε παχύμετρα με ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Οπτικός έλεγχος για καταστροφή ή διάβρωση.
- Οπτικός έλεγχος αν είναι ίσες οι γραμμές των διαβαθμίσεων (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου Β).
- Οπτικός έλεγχος αν οι γραμμές των διαβαθμίσεων του δακτυλίου (thimble) και της γραμμής αναφοράς έχουν το ίδιο εύρος (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου Β).
- Οπτικός έλεγχος αν είναι ορατές οι διαβαθμίσεις της κλίμακας.
- Οπτικός έλεγχος στα ψηφιακά παχύμετρα, αν είναι εμφανώς ευανάγνωστα τα ψηφία της ένδειξης (ο έλεγχος πραγματοποιείται θέτοντας όλα τα ψηφία στο 8 ή το 0 και μετά στο 2).
- Έλεγχος των μπαταριών στα ψηφιακά παχύμετρα και αντικατάστασή τους εφόσον είναι απαραίτητο.
- Οπτικός έλεγχος στα παχύμετρα με κυκλική κλίμακα, αν ο ενδείκτης είναι ίσος, αν οι αριθμοί είναι ευανάγνωστοι και αν το τελείωμα του ενδείκτη είναι στο μέσο του ενός τρίτου των γραμμών διαβάθμισης. Επί πλέον στο είδος ελέγχου Β ελέγχονται:
  1. αν ο δείκτης του εύρους κλίμακας έχει το ίδιο εύρος με τη γραμμή διαβάθμισης
  2. αν οι γραμμές διαβάθμισης είναι ίσες και έχουν το ίδιο εύρος
  3. αν το διάστημα μεταξύ των γραμμών διαβάθμισης είναι επαρκές
  4. αν το εύρος διαβάθμισης είναι σωστό
- Επιδιόρθωση σε ελαφρές ζημιές.
- Αφαίρεση της διάβρωσης.
- Σε περίπτωση κατά την οποία η ζημιά που μειώνει τη λειτουργία της συσκευής δεν μπορεί να εξαλειφθεί, το παχύμετρο αποσύρεται.
- Έλεγχος σκληρότητας, ύπαρξη μονάδων (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου Ε).
- Πρόνοια για τεχνική τεκμηρίωση.

3.2 Προκαταρκτικοί έλεγχοι και ενέργειες

Κατά το στάδιο αυτό πραγματοποιούνται ορισμένοι έλεγχοι λειτουργίας που είναι οι εξής:

- Έλεγχος της κίνησης του παχυμέτρου σε όλη τη διαδρομή της μέτρησης. Η δυσκολία στην κίνηση πρέπει να είναι η ίδια κατά όλο το μήκος της διαδρομής και να μην απαντώνται τυχαία αντιστεκόμενα σημεία.
- Έλεγχος της παραλληλότητας (οι σιαγόνες έρχονται σε επαφή και γίνεται έλεγχος υπό το φως μιας λάμπας. Στο σημείο επαφής δεν πρέπει να εισέρχεται φως).
- Λειτουργία της συσκευής κλειδώματος (όταν η συσκευή κλειδώματος είναι ενεργή, η τιμή της ένδειξης δεν πρέπει να μεταβάλλεται περισσότερο από τη διακριτική ικανότητα. Για παχύμετρα με ψηφιακή ένδειξη η μεταβολή δεν πρέπει να είναι περισσότερη από ένα ψηφίο).
- Έλεγχος της εξόδου δεδομένων, εφόσον παρέχεται (ο έλεγχος πραγματοποιείται μετά από ειδική συμφωνία. Αν δεν ελεγχθεί πρέπει να αναφερθεί στο πιστοποιητικό διακρίβωσης).
- Χρόνος εγκλιματισμού τουλάχιστον 5 ώρες.

4 Διακρίβωση

4.1 Σκοπός

Κατά τη διακρίβωση πρέπει να προσδιοριστούν τα σφάλματα που σχετίζονται με:

- Εξωτερικές μετρήσεις
- Εσωτερικές μετρήσεις
- Μετρήσεις βάθους
- Μετρήσεις βήματος

4.2 Παράμετροι Διακρίβωσης

- **Έλεγχος του μηδενός**: ελέγχεται και εφόσον είναι δυνατό ρυθμίζεται η ένδειξη στη χαμηλότερη τιμή του εύρους μέτρησης. Η εκτέλεση όλων των μετρήσεων πραγματοποιείται με όσο δυνατόν σταθερή δύναμη.
- **Εξωτερικές μετρήσεις**: Το σφάλμα της ένδειξης πρέπει να προσδιορίζεται κοντά στην αρχή και το τέλος του εύρους μέτρησης και επιπροσθέτως σε επί πλέον σημεία, ακανόνιστα κατανεμημένα σε όλο το εύρος μέτρησης, που εξαρτώνται από τη δυναμικότητα του παχυμέτρου:

  1. έως 400 mm σε δύο επί πλέον σημεία.
  2. από 400 mm έως 1000 mm σε τρία επί πλέον σημεία.
  3. από 1000 mm έως 2000 mm σε τέσσερα επί πλέον σημεία.

  Σε κάθε θέση οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε τρία σημεία των μετρητικών επιφανειών (εσωτερικά, μέση, εξωτερικά).

  Η επιλογή των σημείων μέτρησης είναι τέτοια ώστε να αντιστοιχεί σε αυτόνομα τεμάχια προτύπων πλακιδίων και όχι σε συνδυασμό αυτών.

  Όλες οι τιμές που προσδιορίζονται πρέπει να συμπεριληφθούν στην αποτίμηση.
- **Εσωτερικές μετρήσεις:** Προσδιορίζεται το σφάλμα της ένδειξης σε μία θέση του μετρητικού εύρους χρησιμοποιώντας ένα δακτύλιο διαμέτρου 25 mm. Για παχύμετρα με αιχμηρές επιφάνειες εσωτερικών μετρήσεων, θα πρέπει επιπροσθέτως να χρησιμοποιείται ένας δεύτερος δακτύλιος διαμέτρου περίπου 4 mm.
- **Μετρήσεις βάθους:** Προσδιορίζεται το σφάλμα της ένδειξης σε μία θέση του μετρητικού εύρους χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο πλακίδιο και ελέγχοντάς το πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία μπορεί να είναι είτε ένα optical flat είτε η πρότυπη τράπεζα επιπεδότητας ενός εργαστηρίου.
- **Μετρήσεις βήματος:** Προσδιορίζεται το σφάλμα της ένδειξης σε μία θέση του μετρητικού εύρους χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο πλακίδιο και ελέγχοντάς το πάνω

σε μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία μπορεί να είναι είτε ένα optical flat είτε η πρότυπη τράπεζα επιπεδότητας ενός εργαστηρίου.

4.3 Αποτίμηση των μετρήσεων

Ο τιμές της ένδειξης A_i στις επιλεγείσες θέσεις του παχυμέτρου συγκρίνονται με τις τιμές N_i του πρότυπου μετρητικού εξοπλισμού (ονομαστική τιμή προτύπων πλακιδίων). Τα σφάλματα της ένδειξης y_i προκύπτουν από:

$$y_i = A_i - N_i$$

Η αποτίμηση μπορεί να γίνει με ένα διάγραμμα, με πίνακα ή με κατάλληλο λογισμικό σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή.

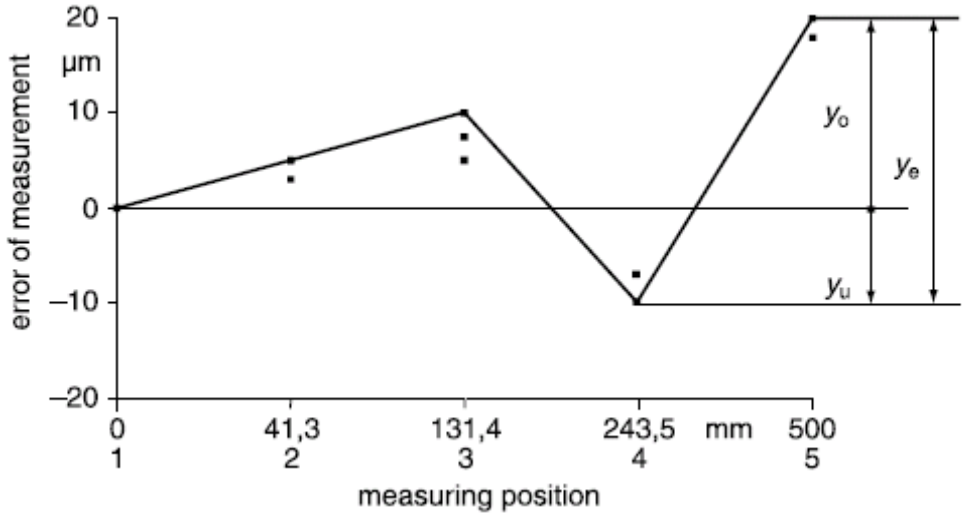
Για τον υπολογισμό της απόκλισης του μικρομέτρου f_{max} αθροίζονται οι απόλυτες τιμές της μέγιστης θετικής y_0 και της μέγιστης αρνητικής τιμής y_u των αποκλίσεων.

$$f_{max} = I\, y_0\, I + I\, y_u\, I \qquad \text{ή} \qquad f_{max} = y_0 - y_u$$

Η τιμή αυτή πρέπει να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων του Πίνακα 1.

Δίνοντας μικρή σημασία στην επαναληψιμότητα, αυτή η μέθοδος εγγυάται ότι με τη θέση μηδέν του ενδείκτη, σε οποιαδήποτε μετρούμενη θέση το f_{max} δεν δείχνει μεγαλύτερες τιμές.

Η παραπάνω περιγραφή αποτυπώνεται διαγραμματικά στο επόμενο σχήμα 1: Υπολογισμός μέγιστης απόκλισης



Σχήμα 1: Υπολογισμός μέγιστης απόκλισης

4.4 Κρίση αποτελεσμάτων και χαρακτηρισμός

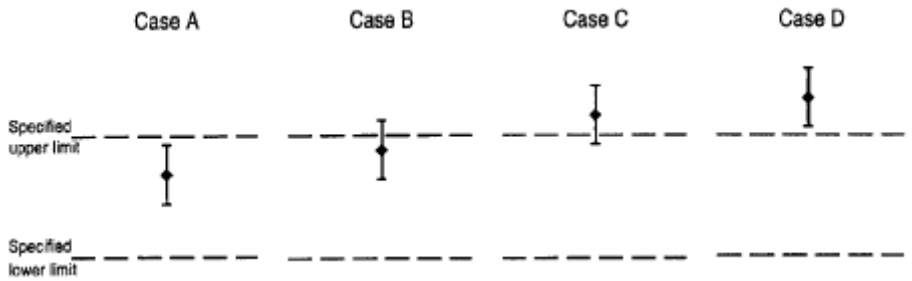
Οι χαρακτηρισμοί 'Προς χρήση', 'Ακατάλληλο' και 'Απόφαση από την εταιρεία' πραγματοποιούνται σύμφωνα με τον παρακάτω τρόπο:

- Το παχύμετρο χαρακτηρίζεται **Προς χρήση/ Usable** , όταν η προσδιοριζόμενη τιμή f_{max} συνυπολογιζομένης (±) της διευρυμένης αβεβαιότητας είναι εντός των ορίων (case A στο σχήμα 2).
- Το παχύμετρο χαρακτηρίζεται **Ακατάλληλο για χρήση/ Unsuitable**, όταν η προσδιοριζόμενη τιμή f_{max} συνυπολογιζομένης (±) της διευρυμένης αβεβαιότητας είναι εκτός των ορίων (case D στο σχήμα 2).

- Το παχύμετρο χαρακτηρίζεται **Απόφαση από την εταιρεία/ Decision based on in house regulation**, όταν δεν μπορεί να ληφθεί καμία από τις δύο προηγούμενες αποφάσεις (case B or C στο σχήμα 2).

  Στην περίπτωση που το μέγιστο σφάλμα είναι εντός των ανοχών και η αβεβαιότητα υπερβαίνει ένα όριο, παρόλο που δήλωση συμμόρφωσης δεν μπορεί να γίνει για το δηλούμενο διάστημα εμπιστοσύνης, εντούτοις η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές είναι περισσότερο πιθανή από τη μη συμμόρφωση (case B), ενώ στην περίπτωση που το μέγιστο σφάλμα είναι εκτός των ορίων και η αβεβαιότητα εντός, τότε η μη συμμόρφωση είναι περισσότερο πιθανή από τη συμμόρφωση (case C) [12].

Οι παραπάνω περιπτώσεις μπορούν να αποτυπωθούν διαγραμματικά στο επόμενο σχήμα 2: Αποτίμηση συμμόρφωσης



Σχήμα 2: Αποτίμηση συμμόρφωσης

5. Αβεβαιότητα

5.1 Επί μέρους συνιστώσες – Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα U_c

Το στατιστικό μοντέλο που περιγράφει το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι μία συνάρτηση πολλών μεταβλητών και συσχετίζει την ένδειξη (εξαγόμενη εκτίμηση της μέτρησης) με τις εκτιμήσεις των μεταβλητών εισόδου, έχοντας την γενική μορφή:

$$I = I(a, \Delta t, L, \Delta l(ix), \Delta dig, \Delta rep, \Delta lm) \qquad (3)$$

Ο υπολογισμός της τυπικής συνδυασμένης αβεβαιότητας $u_c(I)$ της ένδειξης I ακολουθεί τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" (GUM) για την έκφραση της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Έτσι η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα εξαρτάται από τις συνεισφορές των τυπικών αβεβαιοτήτων των μεταβλητών εισόδου $u(x_i)$.

Οι τυπικές αβεβαιότητες των εκτιμήσεων των μεταβλητών εισόδου $u(x_i)$, προσδιορίζονται ως τύπου A ή τύπου B, όπως αυτοί ορίζονται στο ISO GUM, και εκτιμούνται ως εξής:

A. Επαναληψιμότητα

Η συνεισφορά στην αβεβαιότητα λόγω αποκλίσεων σε μια σειρά μετρήσεων $u(\Delta_{rep})^2 = s^2$, όπου s η τυπική απόκλιση μιας σειράς μετρήσεων, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_{rep}(\Delta l) = \frac{s[\Delta l(n)]}{\sqrt{n}} \qquad (4) \qquad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Α}}$$

όπου n ο αριθμός μετρήσεων και s[Δl(ix)] η τυπική απόκλιση των διαφορών μήκους Δl(i), που υπολογίζεται από τη σχέση

$$s[\Delta lix(n)] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{v} (l(ix) - l(is)^2} \qquad (5)$$

Στις αβεβαιότητες τύπου Α οι βαθμοί ελευθερίας είναι (n-1), όπου n ο αριθμός των μετρήσεων σε κάθε σημείο.

Β. Πρότυπα Αναφοράς (Gauge Blocks)

Η συνεισφορά στην αβεβαιότητα λόγω του προτύπου πλακιδίου $U(l_r)$, θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u(l_r) = \frac{U(l_r)}{k} \qquad (6) \qquad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

όπου $U(l_r)$ η διευρυμένη αβεβαιότητα του προτύπου πλακιδίου μήκους, και k ο συντελεστής κάλυψης, όπως αναγράφονται στο πιστοποιητικό διακρίβωσής του (συνήθως k=2 για διάστημα εμπιστοσύνης 95%).
Οι βαθμοί ελευθερίας στις αβεβαιότητες τύπου Β είναι άπειροι ∞.

Γ. Διακριτική ικανότητα παχυμέτρου d

Η συνεισφορά στην αβεβαιότητα λόγω διακριτικής ικανότητας u_d του παχυμέτρου θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \qquad (7) \qquad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

με d τη μικρότερη υποδιαίρεση της κλίμακάς του.

Δ. Θερμοκρασία (Δt, α)

Τα αντικείμενα γενικά διαστέλλονται η συστέλλονται με τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα μήκη των αντικειμένων εκφράζονται στη διεθνώς υιοθετημένη τιμή των 20 °C (reference temperature, t_0). Τα μήκη των προτύπων πλακιδίων, που λαμβάνονται από το πιστοποιητικό διακρίβωσής τους αναφέρονται σε αυτή τη θερμοκρασία.

Ο τεχνικός μετρήσεων για να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα που οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πλακιδίου και παχυμέτρου, πρέπει να βεβαιωθεί ότι και τα δύο παρέμειναν επαρκές χρονικό διάστημα στην ίδια θερμοκρασία, το οποίο ορίζεται σε 5 ώρες τουλάχιστον.
Η συνεισφορά της θερμοκρασιακής αυτής ελάχιστης διαφοράς Δt, ανάμεσα στο παχύμετρο και το πρότυπο πλακίδιο μήκους (εφόσον είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό και μετά την παραμονή τους στον ίδιο χώρο για επαρκές χρονικό διάστημα), θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή, η οποία εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_{\Delta t} = \left(\frac{a \cdot L \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \right) \qquad (8) \qquad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

,όπου α είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής και ισούται με $11{,}5 \cdot 10^{-6}$/°C στο εύρος θερμοκρασίας από 10 έως 30°C.
Αποτελεί κοινή πρακτική για τη λαμβανόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής να υποτίθεται και μία αβεβαιότητα $1 \cdot 10^{-6}$/°C [6], η οποία θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_{\alpha} = \left(\frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot L}{\sqrt{3}} \right) \qquad (9) \qquad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

Επειδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής του προτύπου πλακιδίου και του παχυμέτρου είναι ο ίδιος, σχετικό σφάλμα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας περιβαλλοντικών συνθηκών (**ambient temperature, t_m**) από τη θερμοκρασία αναφοράς (**reference temperature, t_0**) δεν θα προκύψει ακόμη και αν η μέτρηση λάβει χώρα σε θερμοκρασία διαφορετική των 20°C, που είναι η διεθνώς υιοθετημένη τιμή. Στην εξαιρετικά σπάνια περίπτωση που το παχύμετρο και τα πρότυπα πλακίδια είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά τότε η συνεισφορά των διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής και της διαφοράς της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος από τη θερμοκρασία αναφοράς, θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση :

$$u_{\Delta t} = \left(\frac{(\frac{a_x + a_s}{2}) \cdot L \cdot \Delta t + L \cdot (a_x - a_s) \cdot (t_m - t_0)}{\sqrt{3}} \right) \qquad (10) \qquad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

όπου α_x είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του παχυμέτρου και α_s αυτός του πλακιδίου [10].
Το εύρος της θερμοκρασίας τόσο κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης όσο και στη διάρκεια του εγκλιματισμού πρέπει να κυμαίνεται από 18 έως 22^0C [11].

Ε. Abbe error και μηχανικές επιδράσεις

Τα παχύμετρα δεν υπακούουν στην αρχή του Abbe (Ernst Abbe, 1890) η οποία δηλώνει ότι: «η μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις εξασφαλίζεται μόνο όταν το πρότυπο είναι στην ίδια ευθεία με τον άξονα του οργάνου που μετράται». Γι αυτό το λόγο, οι περισσότερες τεχνικές οδηγίες συνιστούν η μέτρηση να πραγματοποιείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σώμα (beam) του παχυμέτρου. Επειδή όμως στη συγκεκριμένη οδηγία, οι τρεις μόνο μετρήσεις για κάθε σημείο

πραγματοποιούνται στις δύο άκρες και τη μέση του πλακιδίου, σχετικό σφάλμα δεν θα ληφθεί υπ' όψιν.

ΣΤ. Συνδυασμένη αβεβαιότητα

Θεωρώντας ότι οι τυπικές αβεβαιότητες των παραγόντων που επιδρούν είναι ανεξάρτητες [5] (μη συσχετιζόμενες), η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_{comb}(l_{ix}) = \sqrt{\left(u_{rep}{}^2(\Delta l) + u^2(l_r) + u_d^2 + u^2(\Delta t) + u^2(\alpha)\right)} \quad (11)$$

5.2 Δραστικοί βαθμοί ελευθερίας Veff – Διευρυμένη αβεβαιότητα Uexp

Η αβεβαιότητα διακρίβωσης ενός παχυμέτρου εκφράζεται ως η διευρυμένη αβεβαιότητα ± U_{exp} με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% περίπου. Αυτή προκύπτει από το γινόμενο της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας u_{comb} με έναν συντελεστή κάλυψης (coverage factor) k, δηλαδή:

$$\mathbf{U_{exp} = k \cdot U_{comb}} \quad \mathbf{(12)}$$

Γενικότερα, ο συντελεστής κάλυψης k μπορεί να υπολογιστεί από την κατανομή t-student για συγκεκριμένο αριθμό δραστικών βαθμών ελευθερίας (effective degrees of freedom) ν_{eff} και επίπεδο εμπιστοσύνης. Στην περίπτωση που ισχύει $\nu_{eff} \geq 30$, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συντελεστής κάλυψης k = 2, συνέπεια του Θεωρήματος της Κεντρικής Τιμής.
Υπολογίζοντας τους δραστικούς βαθμούς ελευθερίας V_{eff} της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας $U_c(y)$ από τον τύπο Welch-Satterthwaite

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (13)$$

όπου $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$ επιλέγεται ο κατάλληλος συντελεστής κάλυψης k, από τον Πίνακα 2 [8].

Πίνακας 2. Δραστικοί Βαθμοί Ελευθερίας και Συντελεστής Κάλυψης k, για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης

Βαθμοί Ελευθερίας	Συντελεστής Κάλυψης					
ν	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09

10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

Σε κάθε περίπτωση οι βαθμοί ελευθερίας, με βάση την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζονται για τον προσδιορισμό του k, επειδή οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται είναι μόνο τρεις (ενδεικτικά αναφέρεται πως το NPL λαμβάνει k=2 μόνο όταν οι μετρήσεις είναι πάνω από δέκα).

6. Εξοπλισμός

6.1 Γενικά

Τα πρότυπα πλακίδια μήκους, που χρησιμοποιούνται κατά τη διακρίβωση παχυμέτρων πρέπει να εξασφαλίζουν ιχνηλασιμότητα σε κάποιο εθνικό πρότυπο. Για λόγους ευκολίας τα πρότυπα πλακίδια μήκους κατατάσσονται σε τάξεις ακρίβειας σύμφωνα με τη σύσταση του **I**nternational **O**rganization of **L**egal **M**etrology **OIML R-30** και του **I**nternational **O**rganization for **S**tandarization **ISO 3650**: **Gauge Blocks** [4], όπου η κάθε τάξη προσδιορίζει ένα μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα για διάφορες ονομαστικές τιμές. Επιπλέον, για ένταξη σε μία από τις 4 τάξεις ακρίβειας (00,0,1,2) τα πρότυπα πλακίδια πρέπει να πληρούν κάποιες απαιτήσεις, ανάλογα με την τάξη, που αφορούν το υλικό κατασκευής, την επιπεδότητα (flatness), την παραλληλότητα (parallelism), την καθετότητα (squareness), το σχήμα και την ποιότητα της επιφάνειας.

Πρότυπα πλακίδια πρέπει να διακριβώνονται σε τακτικά χρονικά διαστήματα. Ο απαιτούμενος χρόνος επαναδιακρίβωσης συνήθως είναι συνάρτηση των τρόπων χρήσης και αποθήκευσης των πλακιδίων καθώς επίσης και του περιβάλλοντος που χρησιμοποιούνται. Καλή πρακτική για τον

καθορισμό του διαστήματος επαναδιακρίβωσής τους είναι η παρακολούθηση της ολίσθησης της τιμής του μήκους μεταξύ διαδοχικών διακριβώσεων σε σχέση με ιστορικά στοιχεία για ανάλογο τρόπο χρήσης και αποθήκευσης [3]. Γενικά οι τιμές της ολίσθησης θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σε σαφώς καθορισμένα όρια που προσδιορίζονται από την αβεβαιότητα του μήκους των προτύπων πλακιδίων.

6.2 Επιλογή προτύπων πλακιδίων για διακριβώσεις

Θα πρέπει να διατίθενται κατάλληλα διακριβωμένα πρότυπα πλακίδια για τη διενέργεια των διακριβώσεων. Με τον όρο «κατάλληλα» εννοείται ότι τα πρότυπα πλακίδια πρέπει:

- να έχουν πιστοποιημένη ιχνηλασιμότητα κάνοντας χρήση του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων
- να καλύπτουν όλη τη χρησιμοποιούμενη περιοχή μέτρησης του οργάνου
- να κατανέμονται στην περιοχή μέτρησης σε ικανό αριθμό σημείων που επαρκεί για τον μετρολογικό χαρακτηρισμό του οργάνου
- να χρησιμεύουν, όπου απαιτείται, για τον καθορισμό της μέγιστης δυναμικότητας μέτρησης
- να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 3650 ως προς τις ανοχές της απόκλισης από το ονομαστικό μήκος της κλάσης grade 2.

6.3 Μέθοδος προσδιορισμού διαστημάτων επαναδιακρίβωσης για τα πρότυπα αναφοράς

Από τις μεθόδους που περιγράφονται στο **ISO 10012** 'Measurement management systems-requirements for measurement processes and measuring equipment' επιλέγεται ως προσφορότερη, ουσιαστικότερη, μετρήσιμη και παρακολουθήσιμη αυτή των Ελεγκτικών Διαγραμμάτων η οποία εφαρμόζεται για όλα τα πρότυπα πλακίδια μήκους, που διακριβώνονται σε εξωτερικό εργαστήριο. Αφού γίνουν τα κατάλληλα διαγράμματα, για κάθε πλακίδιο μήκους προσδιορίζεται το διάστημα επαναδιακρίβωσης με βάση τα εξής:

- Η περίοδος, που καινούργια πρότυπα πλακίδια θα διακριβωθούν για πρώτη φορά ορίζεται σε 12 μήνες.
- Η περίοδος αυτή μπορεί να επιμηκύνεται σε μέγιστο διάστημα τριών ετών, εφόσον υπάρχει συμφωνία με προηγούμενα αποτελέσματα.
- Αν σε δύο συνεχόμενα διαστήματα της αυτής περιόδου υπάρχει συμφωνία, ως προς την ακρίβεια της συγκεκριμένης κλάσης (όπως ορίζεται από το ISO 3650), το διάστημα επαναδιακρίβωσης αυξάνεται κατά έξι μήνες.
- Κάθε φορά που παρατηρείται υποβάθμιση ως προς την κλάση, το αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα μειώνεται κατά έξι μήνες.
- Πρότυπα πλακίδια, που μετά από διαδοχικές επιτυχείς διακριβώσεις εντάσσονται στη μέγιστη περίοδο επαναδιακρίβωσης των τριών ετών, υφίστανται στατιστικό δειγματοληπτικό έλεγχο στο μέσον της χρονικής περιόδου των τριών ετών.

7. Διασφάλιση Ποιότητας Αποτελεσμάτων Διακριβώσεων

Το εργαστήριο κατά τους ελέγχους ποιότητας που πραγματοποιεί, θα πρέπει να θέτει καθορισμένα όρια – εύρος αποδοχής των αποτελεσμάτων. Αποκλίσεις των αποτελεσμάτων εκτός των ορίων θα πρέπει να εξετάζονται.

Ο καθορισμός των ορίων του εύρους αποδοχής, σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα της συγκεκριμένης μέτρησης, όπως αυτή έχει προσδιοριστεί ως αποτέλεσμα της συμβολής των παραγόντων, που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αβεβαιότητας, όπως ενδεικτικά:

1. Περιβάλλον συνθηκών μέτρησης (θερμοκρασία, πίεση, σχετική υγρασία)
2. Επαναληψιμότητα
3. Αναπαραγωγισιμότητα

Σε περίπτωση απόκλισης, οι ενέργειες εν γένει που θα μπορούσαν να δρομολογηθούν είναι:

1. Αρχικά διερεύνηση της αιτίας, προκειμένου να εντοπιστεί η πηγή του προβλήματος. Είναι προφανές ότι θα πρέπει να εξεταστούν μία προς μία όλες οι παράμετροι, που συμβάλλουν στο αποτέλεσμα της μέτρησης.
2. Επανάληψη της μέτρησης μετά τον εντοπισμό της πηγής του προβλήματος, ανάλογα αν ως προβληματική εντοπιστεί η κύρια – βασική πρώτη μέτρηση ή επαναληπτική ποιοτικού ελέγχου
3. Περαιτέρω διορθωτικές και προληπτικές ενέργειες, οι οποίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο δράσεων, όπως:
   - Εκπαίδευση
   - Ρύθμιση οργάνων
   - Βελτίωση εργαστηριακών πρακτικών και διαδικασιών
   - Περαιτέρω εκτεταμένη διερεύνηση με ενδεχόμενη ανάκληση πιστοποιητικών

Οι ποιοτικοί έλεγχοι που θα υλοποιεί το εργαστήριο στη συγκεκριμένη διακρίβωση είναι:

- συμμετοχή σε πρόγραμμα διεργαστηριακών συγκρίσεων.
- μετρήσεις από τον ίδιο χρήστη στην ίδια συσκευή (παχύμετρο που διατηρείται στο εργαστήριο) και στις προδιαγραφόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο, σε χρονικά διαστήματα, που δεν θα υπερβαίνουν το ένα έτος.
- διαδοχικές μετρήσεις από δύο διαφορετικούς χρήστες στην ίδια συσκευή, με την ίδια μέθοδο και στις προδιαγραφόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, που θα διεξάγεται μία φορά το χρόνο.

Ένας δείκτης αξιολόγησης αποτελεσμάτων ποιοτικών ελέγχων, που χρησιμοποιείται ευρέως, είναι η στατιστική παράμετρος '**Βαθμός Αξιοπιστίας Α'** [7], που ορίζεται ως εξής:

$$A = \frac{E_{fin} - E_{in}}{\sqrt{U_{fin}^2 + U_{in}^2}} \quad (14), \text{ όπου:}$$

E_{fin} η τελική τιμή μέτρησης
U_{fin} η διευρυμένη αβεβαιότητα κατά την τελική μέτρηση
E_{in} η αρχική τιμή μέτρησης
U_{in} η διευρυμένη αβεβαιότητα κατά την αρχική μέτρηση.

Η παράμετρος Α είναι η απόκλιση των μετρήσεων του εργαστηρίου κανονικοποιημένη ως προς την αναφερόμενη αβεβαιότητα και εκφράζει το βαθμό αξιοπιστίας σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Για μία μέτρηση με αποδεκτό βαθμό αξιοπιστίας, ισχύει $-1 < A < 1$. Ο βαθμός αξιοπιστίας θεωρείται ότι αγγίζει το βέλτιστο όσο πλησιάζει την τιμή μηδέν.

8. Συμπεράσματα

Η διακρίβωση παχυμέτρων είναι προφανής ανάγκη για τις εταιρείες που εκτελούν μετρήσεις μήκους σε οποιοδήποτε στάδιο ελέγχου των διεργασιών τους, τόσο για λόγους αξιοπιστίας των μετρήσεων, όσο και για λόγους συμμόρφωσης με εθνικά ή διεθνή πρότυπα τα οποία ακολουθούν (πιστοποίηση κατά ISO 9001, 14001, 22000).

Όταν η διακρίβωση πραγματοποιείται σε εξωτερικό εργαστήριο, που είναι διαπιστευμένο κατά ISO 17025, η αξιοπιστία των μετρήσεων δεν τίθεται σε αμφισβήτηση. Η πρακτική όμως δείχνει πως στο μεγαλύτερο τμήμα της ελληνικής βιομηχανίας συναντάμε πλήθος και ποικιλία εσωτερικών ελέγχων, χωρίς τη χρήση τεκμηριωμένων μεθόδων και διαδικασιών με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η εγκυρότητα των μετρήσεων.

Η παροχή τεχνικών οδηγιών από διαπιστευμένα εργαστήρια ή από εθνικά ινστιτούτα μετρολογίας, η υιοθέτησή τους από τις εταιρείες και ο έλεγχος εφαρμογής τους από τους φορείς πιστοποίησης, θα οδηγήσει σε περισσότερο ποιοτικά και συμμορφούμενα προϊόντα καθώς και σε άμβλυνση των φαινομένων υποβάθμισης που παρατηρούνται στο χώρο της ποιότητας.

9. Βιβλιογραφία

[1] DIN 862:1988, ‘Vernier Calipers. Requirements and testing’.

[2] VDI/VDE/DGO 2618 part 9.1 (March 2006): Test Instruction for Calipers.

[3] ISO 10012:2003, ‘Measurement management systems-requirements for measurement processes and measuring equipment’.

[4] ISO 3650: Gauge Blocks.

[5] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration

[6] NPL, Fundamental Good Practice in Dimensional Metrology, MGPG No 80

[7] EA-2/03 Interlaboratory Comparisons

[8] NIST, ‘Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty’, 1994

[9] VDI/VDE/DGO 2618 part 1.1 (December 2001): Instructions to inspect measuring and test equipment for geometrical quantities.Basic principals.

[10] VDI/VDE/DGO 2618 part 1.2 (December 2003): Instructions to inspect measuring and test equipment for geometrical quantities. Uncertainty of measurement.

[11] UKAS:LAB 36 (March 2001): Laboratory Accommodation and Environment of Length, Angle and Form.

[12] UKAS:M3003 (December 1997): The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement.