



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ
ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟΥ**

ΙΩΑΝΝΑ ΛΕΟΝΤΗ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:
ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΣΟΦΙΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΙΔΟΥ**

ΚΟΖΑΝΗ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και την εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων, καθώς και στη διακρίβωση διαστατικών οργάνων μηχανουργείου. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, μετά την παράθεση των βασικών εννοιών της μετρολογίας, πραγματοποιείται, σε θεωρητικό επίπεδο, η ανάλυση των αβεβαιοτήτων των μετρήσεων, που οδηγεί στον προσδιορισμό της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας του μετρούμενου μεγέθους. Στο δεύτερο μέρος, η θεωρητική ανάλυση αβεβαιότητας τίθεται σε εφαρμογή μέσω της διαδικασίας διακρίβωσης ενός παχύμετρου και δύο μικρόμετρων που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε μηχανουργείο, παράλληλα με τον προσδιορισμό των μετρητικών δυνατοτήτων ενός παχύμετρου. Εκτός από τη διεξαγωγή της διακρίβωσης των συγκεκριμένων οργάνων, σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ολοκληρωμένη παρουσίαση της διαδικασίας διακρίβωσης, η οποία χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της ακρίβειας των μετρητικών οργάνων. Με αυτό τον τρόπο, μέσω των κεφαλαίων της εργασίας προβάλλεται η σημαντικότητα της ανάλυσης της αβεβαιότητας και των μετρητικών συστημάτων, η οποία οδηγεί στον όσο το δυνατόν καλύτερο προσδιορισμό της πραγματικής τιμής ενός μετρούμενου μεγέθους.

Abstract

This thesis focuses on the analysis and evaluation of measurement uncertainty, as well as the calibration of dimensional measuring instruments. In particular, this thesis is composed of two parts. On the first part, once the basic concepts of metrology are introduced, the theoretical analysis of measurement uncertainty takes place to define the determination of the combined standard uncertainty of the measurand. On the second part, the theoretical analysis of measurement uncertainty is implemented through the calibration of a caliper and two micrometers used for measurements in a machine shop, along with the determination of measurement capability of a caliper. Besides the prosecution of the calibration of these instruments, the aim of this thesis is to present the calibration procedure, which is used to maintain the trueness of the measuring instruments. Thus, the significance of the uncertainty analysis and the measurement system analysis, that leads to the best possible determination of the true value of a measurand, is presented through all the chapters.

Ευχαριστίες

Οφείλω ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρη Καθηγήτρια, κα Σοφία Παναγιωτίδου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης, είμαι ευγνώμων, για την παροχή του χρόνου και των οργάνων για τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων, στο προσωπικό του μηχανουργείου Παρθενίου Α.Β.Ε.Ε., όπως και σε όλους όσοι συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ | 3 |
| 1.1 Εισαγωγή | 3 |
| 1.2 Βασικές Έννοιες Μετρητικών Συστημάτων | 3 |
| 1.2.1 Ορολογία Μετρήσεων..... | 3 |
| 1.2.2 Ορθότητα, Πιστότητα και Ακρίβεια | 5 |
| 1.2.3 Επαναληψιμότητα και Αναπαραγωγισιμότητα | 6 |
| 1.2.4 Βαθμονόμηση..... | 7 |
| 1.3 Μετρητικά Όργανα και Συστήματα | 8 |
| 1.4 Σφάλματα και Αβεβαιότητα Μετρήσεων | 11 |
| 1.5 Πρότυπα, Διαστάσεις και Σημαντικά Ψηφία | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 17 |
| 2.1 Εισαγωγή | 17 |
| 2.2 Βασικές Έννοιες | 18 |
| 2.2.1 Μοντελοποίηση των Μετρήσεων..... | 18 |
| 2.2.2 Πηγές Αβεβαιότητας Μετρήσεων | 19 |
| 2.3 Υπολογισμός της Αβεβαιότητας Μέτρησης των Εκτιμήσεων Εισόδου | 19 |
| 2.3.1 Αξιολόγηση Τύπου Α της Τυπικής Αβεβαιότητας..... | 20 |
| 2.3.2 Αξιολόγηση Τύπου Β της Τυπικής Αβεβαιότητας..... | 21 |
| 2.4 Υπολογισμός της Αβεβαιότητας Μέτρησης των Εκτιμήσεων Εξόδου - Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα | 22 |
| 2.5 Προσδιορισμός της Διευρυμένης Αβεβαιότητας Μέτρησης | 24 |
| 2.5.1 Διευρυμένη Αβεβαιότητα Μέτρησης | 24 |
| 2.5.2 Συντελεστής Κάλυψης | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.3 Γενίκευση της Διαδικασίας Υπολογισμού της Διευρυμένης Αβεβαιότητας..... | 28 |
| 2.6 Ανάλυση Αβεβαιότητας | 29 |
| 2.6.1 Ισοζύγιο Αβεβαιότητας (Uncertainty Budget) | 30 |
| 2.6.2 Δήλωση Αβεβαιότητας | 32 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ | 35 |
| 3.1 Βασικές Έννοιες και Ορισμοί..... | 35 |
| 3.1.1 Ορισμός και Σημασία Διακρίβωσης..... | 35 |
| 3.1.2 Ιχνηλασιμότητα Μετρήσεων | 36 |
| 3.1.3 Πρότυπα Μετρήσεων | 38 |
| 3.2 Εργαστήρια, Είδη και Συχνότητα Διακρίβωσης..... | 40 |
| 3.2.1 Εργαστήρια Διακρίβωσης..... | 40 |
| 3.2.2 Είδη και Επίπεδα Διακρίβωσης..... | 41 |
| 3.2.3 Συχνότητα Διακρίβωσης - Επαναδιακρίβωση..... | 43 |
| 3.3 Διαδικασίες Διακρίβωσης | 44 |
| 3.3.1 Βασική Διαδικασία Διακρίβωσης | 44 |
| 3.3.2 Πιστοποιητικά Διακρίβωσης | 45 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΠΑΧΥΜΕΤΡΩΝ..... | 47 |
| 4.1 Λειτουργία Παχύμετρων | 47 |
| 4.2 Προσωπικό και Εξοπλισμός Διακρίβωσης Παχύμετρων | 50 |
| 4.3 Διαδικασία Διακρίβωσης Παχύμετρου..... | 52 |
| 4.4 Υπολογισμός Μετρητικής Αβεβαιότητας Παχύμετρου..... | 53 |
| 4.5 Αποτελέσματα Διακρίβωσης Παχύμετρου | 57 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΩΝ | 59 |
| 5.1 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Μικρόμετρων | 59 |
| 5.1.1 Τύποι Μικρόμετρων..... | 59 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1.2 Μετρητική Δύναμη και Ανάγνωση Μικρόμετρου | 64 |
| 5.2 Προσωπικό και Εξοπλισμός Διακρίβωσης Μικρόμετρων..... | 66 |
| 5.3 Διαδικασία Διακρίβωσης Μικρόμετρων | 67 |
| 5.4 Υπολογισμός Μετρητικής Αβεβαιότητας Μικρόμετρων..... | 68 |
| 5.4.1 Εκτίμηση Αβεβαιότητας Μετρήσεων Μικρόμετρου Εύρους 200-300 mm | 68 |
| 5.4.2 Εκτίμηση Αβεβαιότητας Μετρήσεων Μικρόμετρου Εύρους 300-400 mm | 71 |
| 5.5 Αποτελέσματα Διακρίβωσης Μικρόμετρων | 74 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ | 75 |
| 6.1 Βασικές Έννοιες Μετρητικών Δυνατοτήτων..... | 75 |
| 6.2 Ανάλυση Δυνατοτήτων Μετρητικών Συστημάτων | 76 |
| 6.2.1 Υπολογισμός Δεικτών Δυνατοτήτων και Μεταβλητότητας Μετρήσεων..... | 76 |
| 6.2.2 Μέθοδος Ανάλυσης Μεταβλητότητας | 79 |
| 6.3 Μελέτη Δυνατοτήτων Παχύμετρου | 82 |
| 6.3.1 Ανάλυση Μεταβλητότητας των Μετρήσεων Παχύμετρου..... | 82 |
| 6.3.2 Υπολογισμός Δεικτών Δυνατοτήτων και Μεταβλητότητας Μετρήσεων Παχύμετρου | 86 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 89 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 91 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 93 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ..... | 97 |

Εισαγωγή

Οι μετρήσεις αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης δραστηριότητας. Από την αρχαιότητα έως σήμερα χρησιμοποιούνται για την πρόοδο του ανθρώπου και, συνεπώς, σε αυτές οφείλεται η επιστημονική και τεχνολογική εξέλιξη. Η σημασία των μετρήσεων στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου, και κυρίως στις τεχνικές, οικονομικές και εμπορικές του δραστηριότητες μπορεί να γίνει αντιληπτή μέσω της ποιότητας των προϊόντων, τις διεργασίες παραγωγής, καθώς και μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιούνται για την ασφάλεια της υγείας, της εργασίας και του περιβάλλοντος.

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας αναλύονται βασικές έννοιες των μετρήσεων και των μετρητικών συστημάτων, για τη κατανόηση της ύπαρξης και της λειτουργίας των μετρητικών οργάνων. Παράλληλα, ορίζεται η έννοια της πραγματικής τιμής ενός μετρούμενου μεγέθους και πώς μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά μέσω της μετρητικής αβεβαιότητας.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος εκτίμησης της αβεβαιότητας των μετρήσεων με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και βασικών στατιστικών μεθόδων. Ενώ, στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται οι διαδικασίες διακρίβωσης, οι οποίες μέσω του υπολογισμού της μετρητικής αβεβαιότητας, μπορούν να οδηγήσουν στη διατήρηση και τη βελτίωση της ποιότητας των μετρήσεων.

Στα Κεφάλαια 4 και 5 της εργασίας αυτής, αναλύεται η χρήση και η λειτουργία ενός παχύμετρου και δύο μικρόμετρων που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε μηχανουργείο, και παρουσιάζεται η διακρίβωσή τους, τα αποτελέσματα της οποίας εξάγονται μέσω του υπολογισμού της μετρητικής αβεβαιότητας των οργάνων.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται ένας τρόπος προσδιορισμού των δυνατοτήτων των μετρητικών συστημάτων, ο οποίος συμπληρώνοντας την ανάλυση της αβεβαιότητας, ολοκληρώνει τη μελέτη της ποιότητας των μετρήσεων και της απόδοσης των μετρητικών συστημάτων. Για την πλήρη κατανόηση της ανάλυσης των μετρητικών συστημάτων, πραγματοποιείται η μελέτη των μετρητικών δυνατοτήτων ενός ηλεκτρονικού παχύμετρου, κατά την οποία, αφού αναλυθεί η μεταβλητότητα των μετρήσεων, υπολογίζονται οι δείκτες δυνατοτήτων του.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 διεξάγεται η σύνοψη των προηγούμενων κεφαλαίων και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων του υπολογισμού της μετρητικής αβεβαιότητας και της μελέτης της ικανότητας των μετρητικών οργάνων, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο

της παρούσας εργασίας, ενώ τονίζεται η σημασία της στατιστικής στην εφαρμογή των διαδικασιών της διακρίβωσης μετρητικών συστημάτων.

Κεφάλαιο 1: Μετρήσεις και Μετρητικά Συστήματα

1.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις είναι εξαιρετικά σημαντικές στη ζωή του ανθρώπου, καθώς αποτελούν βασικό μέσο για την κατάκτηση της γνώσης και την κατανόηση των φυσικών νόμων. Ενώνοντας τη θεωρία με την πρακτική ζωή της κοινωνίας, αποτελούν τον λόγο ύπαρξης της επιστήμης, της τεχνολογίας και της βιομηχανίας. Πρακτικά, δεν υπάρχει πεδίο της ανθρώπινης δραστηριότητας στο οποίο να μην χρησιμοποιούνται εντατικά οι μετρήσεις, οι δοκιμές και οι έλεγχοι. Κάθε δευτερόλεπτο στον κόσμο πραγματοποιούνται δισεκατομμύρια μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για τη λήψη ποσοτικής πληροφορίας, τη διασφάλιση της ποιότητας, και την αποτελεσματική διαχείριση προϊόντων. Συνεπώς, αποτελούν αναγκαίο στοιχείο για την ποιότητα της καθημερινής ζωής του ανθρώπου.

1.2 Βασικές Έννοιες Μετρητικών Συστημάτων

Λόγω της σημαντικότητας των μετρήσεων αναπτύχθηκε ολόκληρος επιστημονικός κλάδος γύρω από αυτές, γνωστός ως μετρολογία. Ωστόσο, εξαιτίας της ποσότητας και της ποικιλομορφίας των ορισμών όρων όπως η μέτρηση και η μετρολογία, κατέστη επιτακτική η ανάγκη ίδρυσης ενός διεθνούς οργανισμού τυποποίησης για την εξασφάλιση της παγκόσμιας ομοιομορφίας των μετρήσεων και της ιχνηλασιμότητας αυτών στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI). Ο οργανισμός αυτός, διεθνώς καλούμενος ως Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (Bureau International des Poids et Mesures-BIPM), μαζί με άλλες δύο οργανώσεις, τη Γενική Διάσκεψη Μέτρων και Σταθμών (Conférence générale des poids et mesures-CGPM) και τη Διεθνή Επιτροπή των Μέτρων και Σταθμών (Comité international des poids et mesures-CIPM), αποτελούν βάσεις αναφοράς για επιστήμονες και μηχανικούς, όσον αφορά τις μετρήσεις, τη μετρολογία και τις εφαρμογές της, και τα πρότυπα μετρήσεων.

1.2.1 Ορολογία Μετρήσεων

Σύμφωνα με το Διεθνές Λεξιλόγιο Μετρολογίας του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (1), το οποίο αποσκοπεί στην εναρμόνιση της ορολογίας που χρησιμοποιείται στον τομέα της μετρολογίας, αναφέρονται κάποιοι χρήσιμοι ορισμοί.

Ως μέτρηση ορίζεται η διαδικασία με την οποία αποκτούνται μέσω πειραμάτων μία ή περισσότερες ποσοτικές τιμές που μπορούν ευλόγως να αποδοθούν σε μία ποσότητα. Σημειώνεται πως η μέτρηση προϋποθέτει σύγκριση ποσοτήτων ή απαρίθμηση οντοτήτων, καθώς και μία περιγραφή της ποσότητας ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του αποτελέσματος μέτρησης, τη μετρητική διαδικασία και το μετρητικό σύστημα που λειτουργεί σύμφωνα με την καθορισμένη μετρητική διαδικασία, συμπεριλαμβανομένων και των συνθηκών μέτρησης.

Η συγκεκριμένη ποσότητα που αποτελεί το αντικείμενο της μέτρησης καλείται μετρούμενο μέγεθος ή μετρητέος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε περιπτώσεις που η μέτρηση, συμπεριλαμβανομένου του μετρητικού συστήματος και των συνθηκών υπό τις οποίες διεξάγεται η μέτρηση, μπορεί να αλλάξει το φαινόμενο, το σώμα ή την ουσία με τέτοιο τρόπο που η ποσότητα που μετράται να διαφέρει από το ορισμένο μετρούμενο μέγεθος.

Μετρολογία είναι η επιστήμη της μέτρησης και της εφαρμογής της, και περιλαμβάνει τόσο τις πειραματικές όσο και τις θεωρητικές πτυχές της μέτρησης σε οποιοδήποτε επίπεδο αβεβαιότητας και οποιοδήποτε τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας. Από την αρχαιότητα η μετρολογία αναπτύχθηκε ως επιστήμη με αντικείμενο την εξαγωγή ποσοτικής πληροφορίας για τις ιδιότητες των αντικειμένων και διαδικασιών με προσδιορισμένη ακρίβεια και αξιοπιστία. Μέσα της μετρολογίας είναι το σύνολο των μετρητικών μέσων και μετρολογικών προτύπων, τα οποία διασφαλίζουν την ορθολογική χρήση της (2). Βασικός σκοπός της είναι η δημιουργία μίας γενικής θεωρίας μετρήσεων, η θέσπιση μονάδων φυσικών μεγεθών που να είναι διεθνώς αποδεκτές, η επεξεργασία επιστημονικών μεθόδων, βάσεων διασφάλισης της ενότητας και ομοιογένειας των μετρήσεων μέσω μίας αδιάσπαστης αλυσίδας μετρήσεων, καθώς και η δημιουργία προτύπων και μετρητικών μέσων και ο έλεγχος των σταθμών και των μετρητικών μέσων (3).

Όσον αφορά τις μετρητικές μεθόδους, αποτελούν μία γενική περιγραφή μίας λογικής οργάνωσης των λειτουργιών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Μία μετρητική μέθοδος χαρακτηρίζεται με διάφορους τρόπους, όπως σε αντικατάσταση, διαφορισμού και ουδέτερη μετρητική μέθοδο, ή σε άμεση και έμμεση μέθοδο μέτρησης.

Παράλληλα, ως μετρητική διαδικασία ορίζεται η λεπτομερής περιγραφή μιας μέτρησης, σύμφωνα με μία ή περισσότερες μετρητικές αρχές και σύμφωνα με μία δεδομένη μετρητική μέθοδο, η οποία βασίζεται σε ένα μετρητικό μοντέλο και περιλαμβάνει κάθε υπολογισμό απαραίτητο για τη διεξαγωγή ενός μετρητικού αποτελέσματος. Η διαδικασία

μέτρησης είναι συνήθως λεπτομερώς τεκμηριωμένη με σκοπό τη διευκόλυνση του χειριστή να εκτελέσει μία μέτρηση.

Το αποτέλεσμα της μέτρησης διαμορφώνεται από ένα σύνολο ποσοτικών τιμών που αποδίδονται σε έναν μετρητέο, καθώς και συνοδεύεται από κάθε άλλη διαθέσιμη σχετική πληροφορία. Γενικά, οι πληροφορίες αυτές αφορούν το σύνολο των ποσοτικών τιμών και δηλώνουν αν κάποια τιμή είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική του μετρούμενου μεγέθους σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές. Αυτό μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή μίας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας που θα συνοδεύει το αποτέλεσμα της μέτρησης.

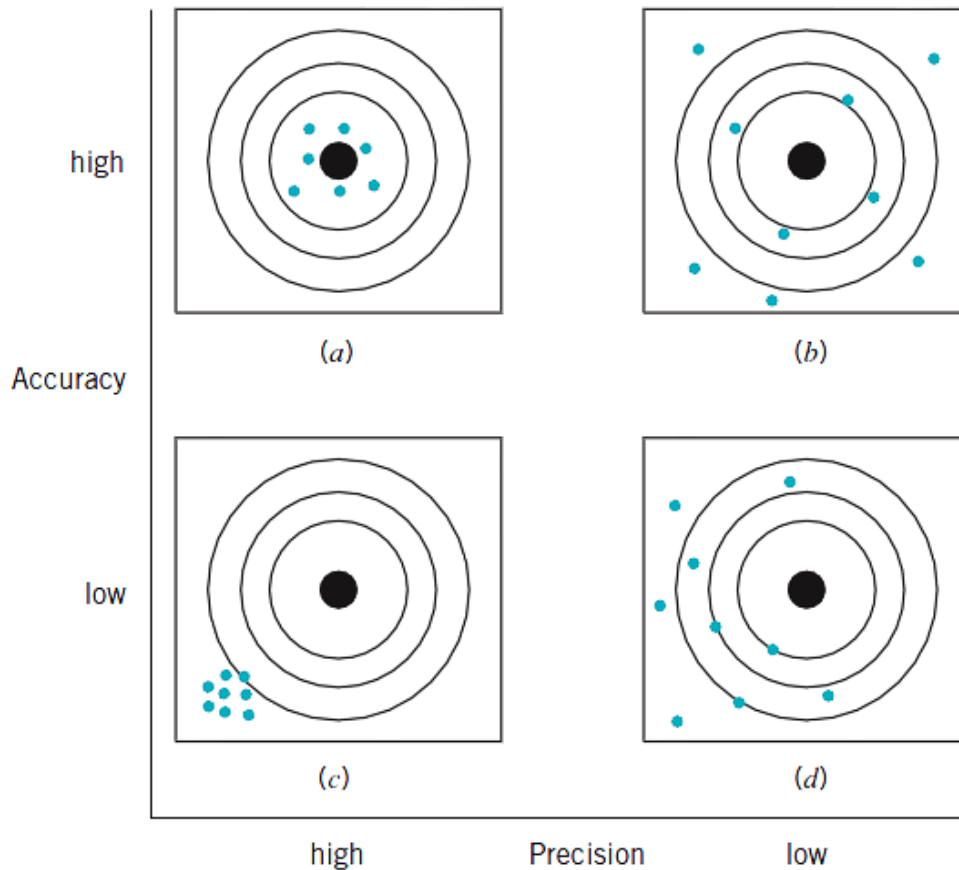
1.2.2 Ορθότητα, Πιστότητα και Ακρίβεια

Οι όροι ορθότητα και πιστότητα, ως ικανότητες των μετρητικών οργάνων, συχνά συγχέονται ή παρερμηνεύονται, ενώ ο όρος ακρίβεια είναι αμφιλεγόμενος στο πλαίσιο της μετρολογίας. Έτσι, σύμφωνα με το Διεθνές Λεξιλόγιο Μετρολογίας του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (1), αναλύονται οι παραπάνω όροι και προσδιορίζεται η μεταξύ τους σχέση.

Μέσω της ορθότητας (accuracy) καθορίζεται ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ μίας μετρούμενης ποσοτικής τιμής και μίας πραγματικής τιμής ενός μετρητέου, εκφράζει δηλαδή το πόσο κοντά είναι αυτές οι τιμές. Βέβαια, μερικές φορές η ορθότητα των μετρήσεων γίνεται κατανοητή και ως η εγγύτητα της συμφωνίας μεταξύ των μετρήσεων που αποδίδονται στο μετρούμενο μέγεθος. Η ορθότητα είναι ένα χαρακτηριστικό, ή αλλιώς ικανότητα, του μετρητικού οργάνου και είναι μία έννοια, όχι ποσότητα, στην οποία δεν μπορεί να αποδοθεί αριθμητική τιμή.

Η πιστότητα μέτρησης (precision) ορίζεται ως η ομοιότητα μεταξύ των ενδείξεων ή των μετρούμενων τιμών που λαμβάνονται μέσω επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στα ίδια ή σε παρόμοια αντικείμενα υπό καθορισμένες συνθήκες. Συνήθως, η πιστότητα εκφράζεται αριθμητικά από μέτρα «ανακρίβειας», όπως η τυπική απόκλιση, η μεταβλητότητα ή ο συντελεστής μεταβλητότητας, υπό τις καθορισμένες συνθήκες μέτρησης, ενώ χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα μετρήσεων.

Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι δύο αυτές έννοιες και η σχέση τους με την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους, που θεωρείται πως είναι το κέντρο του στόχου.



Σχήμα 1: Οι έννοιες της ορθότητας και της πιστότητας. (a) Υψηλή ορθότητα και υψηλή πιστότητα. (b) Υψηλή ορθότητα και χαμηλή πιστότητα. (c) Χαμηλή ορθότητα και υψηλή πιστότητα. (d) Χαμηλή ορθότητα και χαμηλή πιστότητα. [Πηγή: *Introduction to Statistical Quality Control, D.C. Montgomery*]

Όσον αφορά την ακρίβεια (trueness), παρουσιάζεται ως η σύγκλιση του μέσου όρου ενός άπειρου αριθμού επαναλαμβανόμενων μετρούμενων τιμών με την τιμή αναφοράς. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως η ακρίβεια μετρήσεων δεν αποτελεί ποσότητα, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να εκφραστεί αριθμητικά.

1.2.3 Επαναληψιμότητα και Αναπαραγωγισιμότητα

Σε δραστηριότητες που περιλαμβάνουν μετρήσεις, όπως και βελτίωση της ποιότητας ή των διεργασιών συστημάτων, δίνεται μεγάλη σημασία στον προσδιορισμό της ικανότητας των μετρητικών συστημάτων, καθώς ένα αποτελεσματικό σύστημα μέτρησης μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοση ενός συστήματος ποιότητας. Ο σκοπός, κατά κύριο λόγο, της μελέτης της ικανότητας των μετρητικών συστημάτων είναι να προσδιοριστεί πόση από τη συνολική μεταβλητότητα που παρατηρείται οφείλεται στο όργανο, να

απομονωθούν οι συνιστώσες της μεταβλητότητας του μετρητικού συστήματος και να αξιολογηθεί το κατά πόσο το μετρητικό όργανο είναι ικανό και κατάλληλο για την προβλεπόμενη εφαρμογή (4).

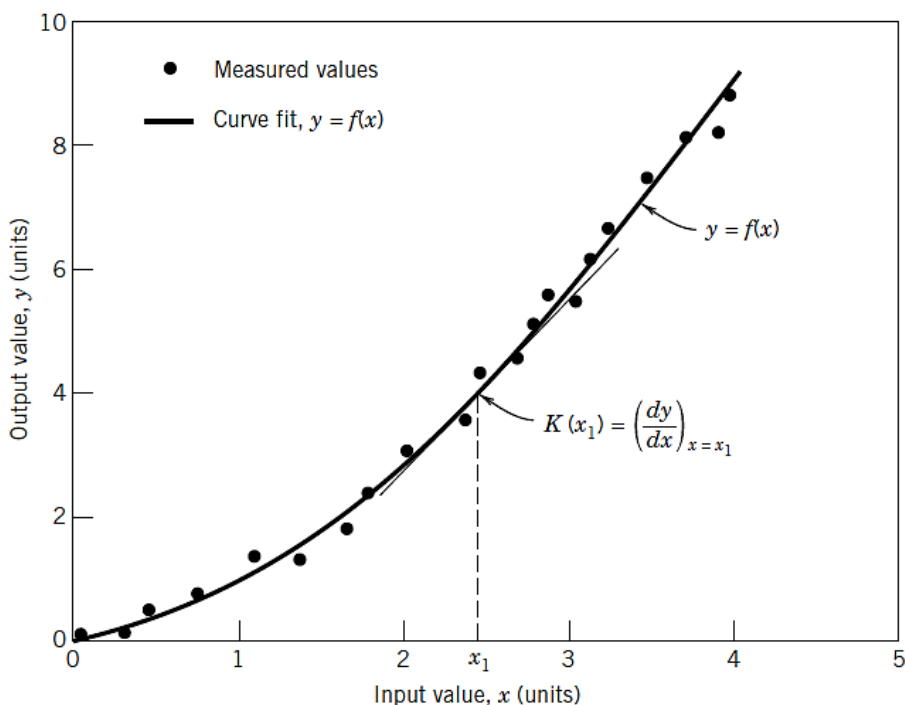
Πληροφορίες σχετικές με την απόδοση των μετρητικών συστημάτων μπορούν να εξαχθούν εξετάζοντας την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγισιμότητα των μετρήσεων, τα λεγόμενα δύο R (repeatability and reproducibility) της ικανότητας των συστημάτων μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, η επαναληψιμότητα ορίζεται ως η πιστότητα της μέτρησης όταν αυτή πραγματοποιείται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που περιλαμβάνουν την ίδια μετρητική διαδικασία, τους ίδιους χειριστές, το ίδιο μετρητικό σύστημα, τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, την ίδια τοποθεσία και την πραγματοποίηση επαναλαμβανόμενων μετρήσεων του ίδιου ή παρόμοιων αντικειμένων κατά τη διάρκεια μίας σύντομης χρονικής περιόδου. Ενώ, η αναπαραγωγισιμότητα είναι η πιστότητα της μέτρησης όταν αυτή πραγματοποιείται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που περιλαμβάνουν διαφορετικές τοποθεσίες, χειριστές και συστήματα μετρήσεων, αλλά επαναλαμβανόμενες μετρήσεις στα ίδια ή παρεμφερή αντικείμενα. Στην ουσία η επαναληψιμότητα δείχνει αν εμφανίζεται η ίδια τιμή όταν οι μετρήσεις γίνονται στο ίδιο αντικείμενο υπό τις ίδιες συνθήκες, και η αναπαραγωγισιμότητα εκφράζει τη διαφορά στις τιμές που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μετρήσεων αντικειμένων υπό διαφορετικές συνθήκες.

1.2.4 Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση είναι μία διαδικασία με την οποία εισάγεται μία γνωστή τιμή εισόδου (πρότυπο) σε ένα μετρητικό σύστημα με σκοπό την παρατήρηση και καταγραφή της τιμής εξόδου του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου του συστήματος (5).

Το πιο κοινό είδος βαθμονόμησης είναι η στατική. Ο όρος «στατική» υποδηλώνει πως οι μεταβλητές που εμπλέκονται στη διαδικασία παραμένουν σταθερές σε σχέση με τον χρόνο και το χώρο. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, μία σειρά γνωστών τιμών εισόδου και παρατηρώντας τις τιμές εξόδου του συστήματος, αναπτύσσεται μια καμπύλη βαθμονόμησης και σχηματίζεται η λογική με την οποία μπορούν να ερμηνευθούν οι τιμές εξόδου κατά τη διάρκεια των πραγματικών μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο εξάγεται και μία συναρτησιακή σχέση μεταξύ των τιμών εισόδου και εξόδου, που μπορεί μεταγενέστερα να χρησιμοποιηθεί για την εξακρίβωση της άγνωστης τιμής εισόδου με βάση την τιμή εξόδου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, η είσοδος x , η οποία αποτελεί την

ελεγχόμενη ανεξάρτητη μεταβλητή, σημειώνεται επί των τετμημένων, ενώ η έξοδος, που είναι η εξαρτημένη μεταβλητή της βαθμονόμησης, σημειώνεται επί των τεταγμένων.



Σχήμα 2: Καμπύλη Βαθμονόμησης [Πηγή: *Theory and Design for Mechanical Measurements*, R.S. Figliola, D.E. Beasley]

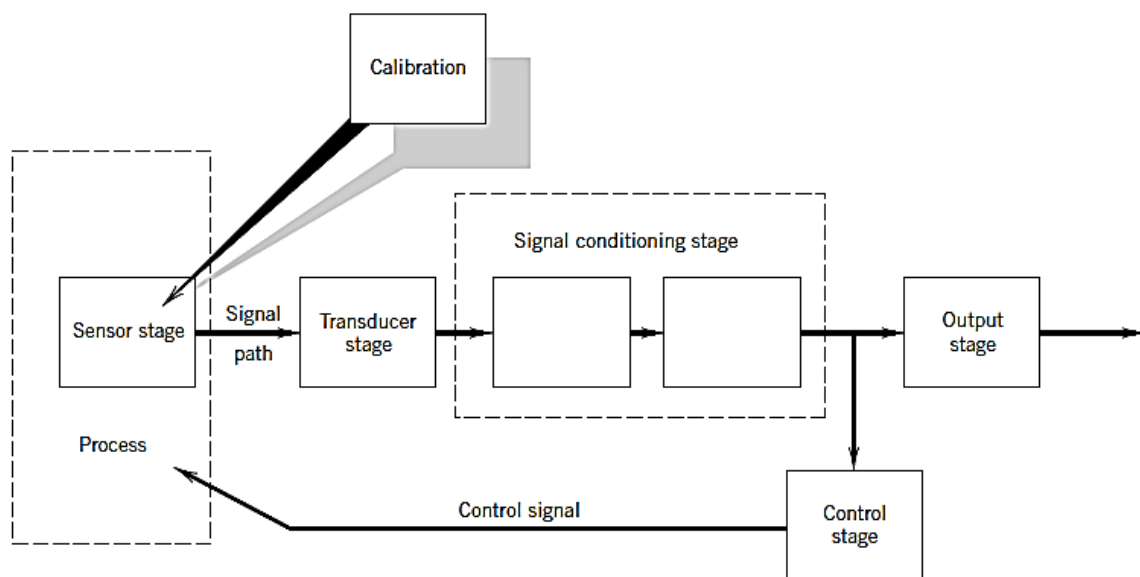
Δυναμική βαθμονόμηση πραγματοποιείται όταν οι μεταβλητές που εξετάζονται εξαρτώνται από τον χρόνο ή τον χώρο. Καθώς τέτοιες μεταβλητές εξαρτώνται από τον χρόνο ή τον χώρο όσον αφορά το μέγεθός τους αλλά και τη συχνότητά τους, μία δυναμική βαθμονόμηση καθορίζει την σχέση μεταξύ της γνωστής δυναμικής συμπεριφοράς και της εξόδου του μετρητικού συστήματος. Συνήθως, αυτές οι βαθμονομήσεις επιτυγχάνονται με την εφαρμογή είτε ενός ημιτονοειδούς σήματος, είτε μίας αλλαγής βήματος ως το γνωστό σήμα εισόδου.

1.3 Μετρητικά Όργανα και Συστήματα

Ένα μετρητικό σύστημα αποτελεί εργαλείο που απαρτίζεται από επιμέρους στοιχεία, τα οποία λειτουργούν και συνδυάζονται για την ποσοτικοποίηση της μετρούμενης μεταβλητής. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των μετρήσεων, μόνες ή σε συνδυασμό με μία ή περισσότερες συμπληρωματικές συσκευές, αποτελούν τα

μετρητικά όργανα (1). Ένα μετρητικό όργανο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνο του, αποτελεί ένα μετρητικό σύστημα. Παράλληλα, ως μετρητικό σύστημα ορίζεται το σύνολο από ένα ή περισσότερα όργανα μέτρησης, συνοδευόμενα και από άλλες συσκευές ή διατάξεις, συμπεριλαμβανομένων και των αντιδραστηρίων ή των προμηθειών, που συναρμολογούνται και προσαρμόζονται, με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ποσοτικών τιμών σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα για καθορισμένων ειδών ποσότητες.

Βασικά, ένα γενικό πρότυπο μετρητικού συστήματος, όπως αναπαριστάται και στο Σχήμα 3, αποτελείται από ένα μέρος ή το σύνολο των εξής τεσσάρων γενικών σταδίων: το πρώτο στάδιο αισθητήρα - μετατροπέα, το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας σήματος, το τρίτο στάδιο εξόδου και το τέταρτο στάδιο ελέγχου ανατροφοδότησης. Αυτά τα στάδια αποτελούν τη σύνδεση μεταξύ της εισόδου του μετρητικού συστήματος και της εξόδου, μίας ποσότητας που χρησιμοποιείται για να σχηματιστεί η τιμή της μετρούμενης φυσικής μεταβλητής.



Σχήμα 3: Στοιχεία ενός γενικού συστήματος μέτρησης [Πηγή: *Theory and Design for Mechanical Measurements*, R.S. Figliola, D.E. Beasley]

Αναλυτικότερα, στο στάδιο αισθητήρα-μετατροπέα υπάρχει ένα φυσικό στοιχείο, καλούμενο αισθητήρας που αντιλαμβάνεται ένα φυσικό φαινόμενο, αλλά δεν έχει κάποιο μέσο για την απόδοση και καταγραφή μίας εξόδου ή ενός αποτελέσματος. Έτσι, γίνεται αναγκαία η σύνδεσή του με κάποιου είδους μετατροπέα που μετασχηματίζει τις πληροφορίες του αισθητήρα σε ανιχνεύσιμο σήμα. Το σήμα αυτό μπορεί να είναι

ηλεκτρικό, μηχανικό, οπτικό ή να έχει οποιαδήποτε άλλη μορφή εύκολη να καταγραφεί. Αξίζει να σημειωθεί πως η επιλογή των αισθητήρων, η τοποθέτηση και η εγκατάστασή τους αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικές διαδικασίες, έτσι ώστε η έξοδος του αισθητήρα να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια το αντικείμενο της μέτρησης.

Στο στάδιο επεξεργασίας σήματος λαμβάνεται το σήμα από τον μετατροπέα και τροποποιείται στο επιθυμητό μέγεθος. Αυτό το ενδιάμεσο προαιρετικό στάδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση εργασιών όπως ενίσχυση του μεγέθους του σήματος, αφαίρεση τμημάτων του σήματος μέσω τεχνικών φιλτραρίσματος, παροχή μηχανικής ή οπτικής σύνδεσης μεταξύ του μετατροπέα και του σταδίου εξόδου του συστήματος. Μία ή περισσότερες συσκευές συντελούν αυτό το στάδιο, οι οποίες συνήθως είναι συνδεδεμένες σε σειρά.

Σκοπός του μετρητικού συστήματος είναι η μετατροπή των πληροφοριών του αισθητήρα σε μία μορφή που ποσοτικοποιείται εύκολα. Επομένως, κατά το στάδιο εξόδου του μετρητικού συστήματος υποδεικνύεται ή καταγράφεται η τιμή που μετρήθηκε. Αυτό είναι δυνατόν να γίνει μέσω μίας ανάγνωσης οθόνης, μίας βαθμολογημένης κλίμακας ή ακόμα και μέσω μίας μονάδας δίσκου ενός υπολογιστή.

Ακολουθεί το τελευταίο στάδιο του ελέγχου ανατροφοδότησης, το οποίο περιλαμβάνεται σε συστήματα μέτρησης που εμπλέκονται σε έλεγχο διαδικασιών. Περιέχει έναν ελεγκτή που ερμηνεύει το μετρούμενο σήμα και λαμβάνει μία απόφαση σχετική με τον έλεγχο της διαδικασίας. Η απόφαση αυτή καταλήγει σε ένα σήμα που αλλάζει την παράμετρο της διαδικασίας που επηρεάζει το μέγεθος της ανιχνευόμενης μεταβλητής του αισθητήρα. Συνήθως, σε απλούς ελεγκτές η απόφαση ελέγχου της διαδικασίας βασίζεται στην υπέρβαση του μεγέθους του σήματος της ανιχνευόμενης μεταβλητής κάποιου υψηλού ή χαμηλού σημείου ρύθμισης, μίας τιμής που ορίζεται από τον χειριστή του συστήματος (π.χ. θερμοστάτης οικιακού θερμαντικού συστήματος). Σε πιο εξελιγμένους ελεγκτές, το σήμα ενός μετρητικού συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε έναν εξειδικευμένο ελεγκτή, ο οποίος καθορίζει τις βέλτιστες συνθήκες ρύθμισης της διαδικασίας, μέσω ενός αλγορίθμου τεχνητής νοημοσύνης (5).

Προκειμένου να γίνει σωστή επιλογή οργάνου ή συστήματος για μία μέτρηση, δίνεται έμφαση στα χαρακτηριστικά μεγέθη του και στο πώς οι τιμές των προδιαγραφών που εξασφαλίζει ο κατασκευαστής μπορούν να καλύψουν τις συνθήκες και απαιτήσεις της υπό εκτέλεση μέτρησης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη των οργάνων μέτρησης και των μετρητικών διατάξεων αποτελούν οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. θερμοκρασία), το εύρος μέτρησης, η καμπύλη βαθμονόμησης, η πιστότητα, η ταχύτητα απόκρισης, η ευαισθησία που είναι ο λόγος της μεταβολής του μεγέθους εξόδου προς την αντίστοιχη

μεταβολή του μεγέθους εισόδου και η λεπτότητα, η οποία εκφράζει την επίδραση του οργάνου μέτρησης στο μετρούμενο μέγεθος, καθώς ορίζεται ως η ικανότητα του οργάνου να μετρά το πραγματικό φυσικό μέγεθος χωρίς να το μεταβάλλει με την παρουσία του.

Εξίσου σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη των μετρητικών οργάνων είναι η διακριτικότητα του οργάνου και η υστέρηση. Διακριτικότητα ή διακριτότητα ή διακριτική ικανότητα οργάνου ονομάζεται η πιο μικρή μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους, η οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή από το όργανο. Υστέρηση παρουσιάζεται όταν η ένδειξη του μετρητικού οργάνου επηρεάζεται από την προϊστορία μετρήσεων, όπως, για παράδειγμα, όταν η ένδειξη της μέτρησης κατά την άνοδο διαφέρει από την ένδειξη της μέτρησης κατά την κάθοδο. Η εξάρτηση αυτή των τιμών οφείλεται συχνά σε ρεαλιστικούς περιορισμούς του συστήματος, όπως η τριβή ή η ιξώδης απόσβεση σε κινούμενα μέρη ή το υπολειπόμενο φορτίο σε ηλεκτρικά εξαρτήματα. Γίνεται έτσι αντιληπτό πως η εμφάνιση κάποιας υστέρησης θεωρείται φυσιολογική για οποιοδήποτε σύστημα, και πως επηρεάζει την επαναληψιμότητα του κάθε συστήματος.

Άλλοι παράγοντες που χαρακτηρίζουν επίσης ένα όργανο μέτρησης είναι και η δυνατότητα προσαρμογής καταγραφικού οργάνου, ο όγκος και το βάρος του οργάνου, η στιβαρότητα, η αντίσταση στη διάβρωση, η ευκολία χρήσης, καθώς και η τιμή αγοράς, οι δυνατότητες συντήρησης και επισκευής (6).

1.4 Σφάλματα και Αβεβαιότητα Μετρήσεων

Η ακριβής πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους είναι κατά κύριο λόγο δύσκολο να ορισθεί, καθώς διάφορες επιρροές επιδρούν και στην πραγματική τιμή και στην μετρούμενη τιμή. Με σκοπό, λοιπόν, τον προσδιορισμό της εγγύτητας της συμφωνίας των δύο αυτών τιμών (ορθότητα μετρητικού οργάνου), γίνεται μία προσέγγιση που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των σφαλμάτων των μετρήσεων και την ποσοτικοποίησή τους μέσω των σχετικών αβεβαιοτήτων τους, δηλαδή μέσω του εκτιμώμενου εύρους της τιμής των σφαλμάτων. Με αυτό τον τρόπο, ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής και εκφράζεται ως:

$$e = \text{Μετρούμενη τιμή} - \text{Πραγματική τιμή} \quad (1.1)$$

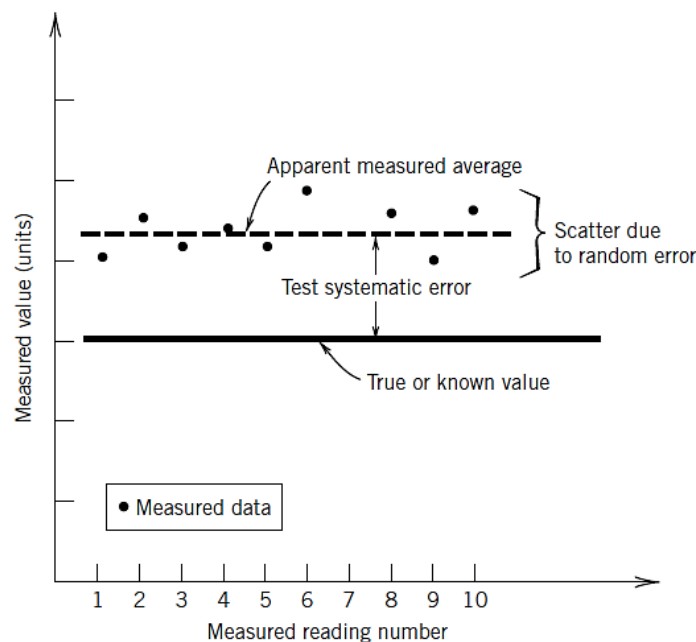
Συχνά, γίνεται μία εκτίμηση της τιμής του σφάλματος με βάση την τιμή αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την αντικατάσταση της πραγματικής τιμής κατά τη βαθμονόμηση του

οργάνου μέτρησης (5). Έτσι, το σχετικό σφάλμα που βασίζεται σε αυτή την τιμή αναφοράς υπολογίζεται από την σχέση:

$$A = \frac{|e|}{\text{Τιμή Αναφοράς}} \times 100 \quad (1.2)$$

Τα σφάλματα, ως αιτίες της διαφοράς της μετρούμενης τιμής από την πραγματική, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στα τυχαία, που προκαλούν μία τυχαία μεταβολή στις τιμές που βρέθηκαν κατά τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μίας μεταβλητής, και στα συστηματικά σφάλματα, που προκαλούν μία μετατόπιση της μέσης τιμής του συνόλου των δεδομένων από την πραγματική τιμή.

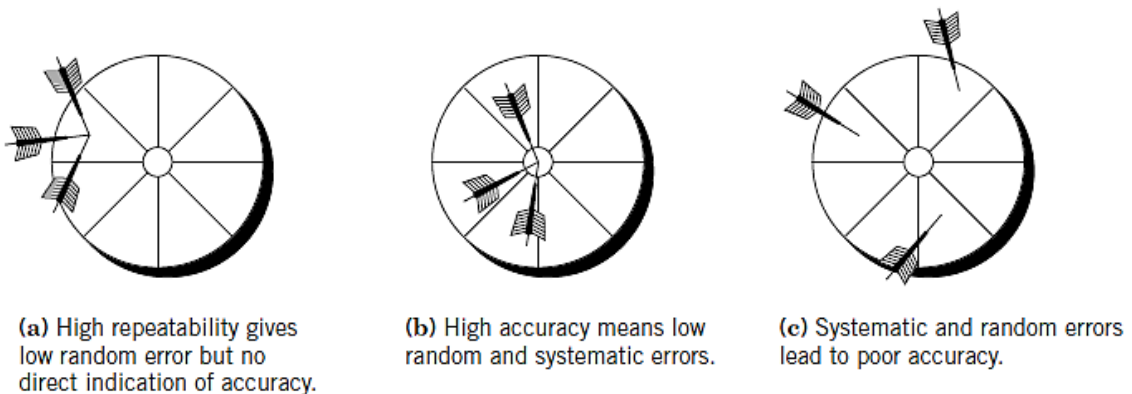
Θεωρητικά, η εξέταση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μίας μεταβλητής υπό συγκεκριμένες συνθήκες χωρίς επιρροές, αναμένεται να δείχνει την ίδια τιμή για την μεταβλητή αυτή. Γνωρίζοντας όμως, πως τέτοιες ιδανικές συνθήκες δεν μπορούν να εξασφαλισθούν κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, καθίσταται αναγκαία η μελέτη της επίδρασης των σφαλμάτων στη μετρούμενη τιμή. Υποθέτοντας πως χρησιμοποιείται ένα σύστημα για τη μέτρηση μίας μεταβλητής, της οποίας η τιμή παραμένει σταθερή και σχεδόν γνωστή όπως σε μία βαθμονόμηση, πραγματοποιούνται δέκα μετρήσεις με αποτελέσματα όπως αυτά του Σχήματος 4.



Σχήμα 4: Επίδρασεις τυχαίων και συστηματικών μετρητικά δεδομένα βαθμονόμησης [Πηγή: *Theory and Design for Mechanical Measurements*, R.S. Figliola, D.E. Beasley]

Οι μικρές μεταβολές στις μετρήσεις, που διακρίνονται μέσω της διασποράς των μετρητικών δεδομένων, σχετίζονται με το τυχαίο σφάλμα των μετρήσεων της μεταβλητής και οφείλονται κυρίως στο μετρητικό σύστημα και τη μέθοδο μέτρησης, αλλά και σε οποιεσδήποτε τυχαίες και απροσδιόριστες μεταβολές της μεταβλητής. Αντιθέτως, η διαφορά του φαινομενικού μέσου όρου από την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους, παρέχει ένα μέτρο του συστηματικού σφάλματος που αναμένεται από το μετρητικό σύστημα.

Ωστόσο, τόσο τα τυχαία όσο και τα συστηματικά σφάλματα επηρεάζουν και την ακρίβεια του μετρητικού συστήματος, η οποία μπορεί θεωρητικά να εκφραστεί ως ένας συνδυασμός της ορθότητας και της πιστότητας. Η σχέση μεταξύ των σφαλμάτων και της ακρίβειας μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή μέσω του παραδείγματος της ρίψης των βελών, που φαίνεται στο Σχήμα 5, κατά την οποία ο στόχος αντιπροσωπεύει την πραγματική τιμή, ενώ η ρίψη του βέλους την μετρούμενη τιμή.



Σχήμα 5: Ρίψεις βέλους: απεικόνιση τυχαίων και συστηματικών σφαλμάτων και ορθότητα [Πηγή: *Theory and Design for Mechanical Measurements*, R.S. Figliola, D.E. Beasley]

Στην πρώτη περίπτωση του Σχήματος 5, παρατηρείται υψηλή επαναληψιμότητα, καθώς τα βέλη προσγειώνονται επανειλημμένα στο ίδιο σημείο, φανερώνοντας πως το τυχαίο σφάλμα έχει αμελητέα επίδραση στις ρίψεις. Βέβαια, το σημείο που προσπίπτουν τα βέλη απέχει από τον κεντρικό στόχο. Έτσι, το σφάλμα σε κάθε ρίψη μπορεί να υπολογιστεί από την απόσταση του κάθε βέλους από τον στόχο και η μέση τιμή αυτών να δώσει μία εκτίμηση του συστηματικού σφάλματος στις βολές. Αν το συστηματικό σφάλμα αυτό μπορούσε να μειωθεί, δηλαδή αν το σημείο που προσπίπτουν τα βέλη πλησίαζε τον κεντρικό στόχο, τότε θα βελτιωνόταν και η ορθότητα του ρίπτη. Στη δεύτερη περίπτωση,

δηλαδή στο Σχήμα 5b, είναι εμφανές πως και τα τυχαία και τα συστηματικά σφάλματα είναι μηδαμινά, καθώς τόσο η διασπορά όσο και η μετατόπιση των βελών είναι μηδενικές. Εφόσον σε κάθε ρίψη το βέλος προσπίπτει πάνω στον στόχο, η ορθότητα και η πιστότητα του ρίπτη είναι υψηλές. Συνεπώς, εξάγεται το συμπέρασμα πως υψηλή ακρίβεια συνεπάγεται και μικρή επίδραση των σφαλμάτων, και τυχαίων και συστηματικών. Από την άλλη πλευρά, ο ρίπτης στην τρίτη περίπτωση του Σχήματος 5 έχει πολύ χαμηλή πιστότητα, αφού οι βολές του καταλήγουν διάσπαρτες γύρω από τον κεντρικό στόχο. Κάθε ρίψη περιέχει διαφορετικό ποσό σφάλματος. Ενώ ο μέσος όρος των σφαλμάτων στις βολές προσδιορίζει την εκτίμηση του συστηματικού σφάλματος, η εκτίμηση του τυχαίου σφάλματος σχετίζεται με την μεταβαλλόμενη ποσότητα σφάλματος στις ρίψεις, ποσότητα που υπολογίζεται με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων.

Σε καμία μέτρηση το σφάλμα δεν είναι γνωστό ακριβώς από τη στιγμή που και η ακριβής πραγματική τιμή είναι σπανίως γνωστή. Αλλά ύστερα από κάποιες δοκιμές και με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες μπορεί κανείς να ισχυρισθεί, με κάποια δεδομένη βεβαιότητα, πως το σφάλμα των μετρήσεων θα βρίσκεται εντός ορισμένων ορίων, δηλαδή εντός ενός θετικού ή αρνητικού εύρους γύρω από την ενδεικνυόμενη τιμή. Με αυτό τον τρόπο, προσδιορίζεται η αβεβαιότητα των μετρήσεων, η οποία είναι μία αριθμητική εκτίμηση της πιθανής περιοχής του σφάλματος σε μία μέτρηση. Η αβεβαιότητα προκαλείται από όλα τα σφάλματα που υπάρχουν στο μετρητικό σύστημα, όπως η βαθμονόμηση του, τα στατιστικά σύνολα δεδομένων ή η τεχνική μέτρησης, και είναι ιδιότητα του αποτελέσματος της δοκιμής. Ενώ, τα μεμονωμένα σφάλματα είναι ιδιότητες των μετρήσεων και προκύπτουν από διάφορα στοιχεία όπως η δοκιμαστική μέθοδος, η ανάλυση και το μετρητικό σύστημα. Οι τιμές αβεβαιότητας που αποδίδονται σε ένα όργανο ή ένα σύστημα μέτρησης είναι, συνήθως, αποτέλεσμα πολλών τυχαίων και συστηματικών σφαλμάτων που επιδρούν στο σύστημα μέτρησης, στη διαδικασία βαθμονόμησης και στο πρότυπο που χρησιμοποιείται για την παροχή της γνωστής τιμής.

Ο διαχωρισμός των όρων «σφάλματα» και «αβεβαιότητα» και της σημασίας τους επιβάλλεται να τονισθεί και να γίνει πλήρως σαφής, καθώς δεν είναι λίγες οι φορές που συγχέονται και χρησιμοποιούνται λανθασμένα οι δύο αυτοί όροι. Τα σφάλματα είναι επιδράσεις και οι αβεβαιότητες είναι αριθμοί που ποσοτικοποιούν την ποιότητα του αποτελέσματος μίας μέτρησης. Ακόμα και αν οι αβεβαιότητες που εκτιμήθηκαν είναι μικρές, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι το σφάλμα στο αποτέλεσμα της μέτρησης είναι μικρό. Στον προσδιορισμό μίας διόρθωσης ή στην αξιολόγηση ελλιπών γνώσεων, υπάρχει πιθανότητα να παραβλεφθεί κάποια συστηματική επίδραση επειδή δεν έχει αναγνωρισθεί. Γι' αυτό το λόγο, η αβεβαιότητα ενός αποτελέσματος δεν είναι κατ' ανάγκη ένδειξη της πιθανότητας το αποτέλεσμα της μέτρησης να είναι κοντά στην τιμή του

μετρούμενου μεγέθους. Είναι απλά μία εκτίμηση της πιθανότητας εγγύτητας στην καλύτερη τιμή που συνάδει με τις διαθέσιμες γνώσεις την συγκεκριμένη χρονική στιγμή (7). Η ανάλυση αβεβαιότητας και η εκτίμηση της παρουσιάζονται εκτενέστερα στο δεύτερο κεφάλαιο.

1.5 Πρότυπα, Διαστάσεις και Σημαντικά Ψηφία

Όταν βαθμονομείται ένα μετρητικό σύστημα, η ενδεικνυόμενη τιμή του συγκρίνεται άμεσα με μία τιμή αναφοράς, η οποία αποτελεί τη βάση της σύγκρισης των δύο μεγεθών και είναι γνωστή ως πρότυπο. Τα πρότυπα αναφοράς αποτελούν το θεμέλιο όλων των μετρήσεων και η ανάγκη της ύπαρξής τους ήταν απαραίτητη από την αρχαιότητα, καθώς μπορεί να γίνει αντιληπτό πως η αξία που αντιστοιχεί σε μια μονάδα είναι στην πραγματικότητα αυθαίρετη.

Τα πρότυπα, λοιπόν, είναι μέρη εξοπλισμού ή αντικείμενα που έχουν καλά καθορισμένες φυσικές ιδιότητες ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέτρο σύγκρισης, ή βασίζονται σε κοινώς αποδεκτή τεχνική, η οποία οδηγεί στην παραγωγή μίας αξιόπιστης τιμής. Ένα πρωταρχικό πρότυπο καθορίζει την τιμή μίας μονάδας και παρέχει τα μέσα για να περιγράψει την τιμή της με έναν μοναδικό αριθμό που μπορεί να γίνει κατανοητός σε όλο τον κόσμο. Μία μονάδα καθορίζει ένα ποσοτικό μέτρο μίας διάστασης, η οποία ορίζει μία φυσική μεταβλητή που χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάποια πτυχή ενός φυσικού συστήματος. Επομένως, το πρωταρχικό πρότυπο εκχωρεί εξ ορισμού μία μοναδική τιμή σε μία μονάδα.

Προς την αποφυγή σύγχυσης, οι μονάδες ορίζονται από διεθνείς συμφωνίες μέσω της χρήσης πρωταρχικών προτύπων. Αφού συμφωνηθεί, ένα πρότυπο αποτελεί τον ακριβή ορισμό της μονάδας μέχρι να αλλάξει από κάποια μεταγενέστερη συμφωνία. Το 1960, η Γενική Διάσκεψη Μέτρων και Σταθμών (CGPM), ο διεθνής οργανισμός που είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της ακριβούς ομοιομορφίας στα πρότυπα μετρήσεων, ενέκρινε επίσημα το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) ως το διεθνές πρότυπο μονάδων (5).

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην καταγραφή των αποτελεσμάτων και κυρίως στην συνοχή στον αριθμό των σημαντικών ψηφίων, ο οποίος αντικατοπτρίζει ένα μέτρο αβεβαιότητας που αποδίδει ο μηχανικός. Μία στρογγυλοποίηση μπορεί να προκαλέσει μία ακούσια αύξηση ή μείωση τιμής ή εύρους τιμών. Παρόλο που ο αριθμός των σημαντικών ψηφίων, που θα αναφερθούν δεξιά και αριστερά της υποδιαστολής, εξαρτάται από το πρόβλημα και την διακριτική ευχέρεια του μηχανικού, υπάρχουν γενικοί κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται από όλους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και της εκτίμησης

και καταγραφής των αβεβαιοτήτων, ώστε να υπάρχει ομοιομορφία στα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2: Αβεβαιότητα Μετρήσεων

2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση αβεβαιοτήτων παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο σχεδιασμού για την αξιολόγηση διαφορετικών συστημάτων μέτρησης, σχεδιασμών δοκιμών και αναφοράς της αβεβαιότητας. Η ποιότητα μίας ανάλυσης αβεβαιότητας εξαρτάται από τις γνώσεις του μηχανικού πάνω στις δοκιμές, τα μετρούμενα μεγέθη, τον εξοπλισμό και τη μετρητική διαδικασία. Μέσω της διαδικασίας εντοπισμού, ποσοτικοποίησης και συνδυασμού των εκτιμήσεων των σφαλμάτων των μετρήσεων συντίθεται μία προσέγγιση της ανάλυσης αβεβαιότητας ως εξέλιξης των πληροφοριών από τον αρχικό σχεδιασμό των δοκιμών μέχρι της τελικής ανάλυσης δεδομένων.

Ενώ η δομή της ανάλυσης παραμένει η ίδια σε κάθε βήμα, ο αριθμός των σφαλμάτων που εντοπίζονται και οι τιμές των αβεβαιοτήτων τους μπορεί να αλλάζουν όσο διατίθενται περισσότερες πληροφορίες. Λόγω αυτού γίνεται αντιληπτό πως δεν υπάρχει ακριβής απάντηση σε μία ανάλυση. Εξάγεται μόνο ένα προσεγγιστικό αποτέλεσμα μίας λογικής ροής σχέσεων και αριθμών.

Λόγω της αναγκαιότητας για μία κοινώς αποδεκτή προσέγγιση της ποιότητας των μετρήσεων, έχουν διαμορφωθεί πρότυπες οδηγίες για την εκτίμηση της αβεβαιότητας, από διάφορους διεθνείς, ευρωπαϊκούς και εθνικούς οργανισμούς. Η πιο διαδεδομένη, όμως, οδηγία, στην οποία βασίζονται τα περισσότερα έγγραφα και πρότυπα, καθώς και αυτό το κεφάλαιο, είναι ο Οδηγός για την Έκφραση της Αβεβαιότητας στη Μέτρηση (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM) (7), ο οποίος δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 1993. Παρόλο που αυτός ο οδηγός θεσπίζει γενικούς κανόνες για την αξιολόγηση της αβεβαιότητας μετρήσεων που μπορούν να ακολουθηθούν στους περισσότερους τομείς των φυσικών μετρήσεων, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη μέθοδο που είναι κατάλληλη κυρίως για μετρήσεις σε εργαστήρια διακρίβωσης, και περιγράφεται ένας σαφής και εναρμονισμένος τρόπος της αξιολόγησης και αναφοράς της αβεβαιότητας μετρήσεων.

2.2 Βασικές Έννοιες

Για την κατανόηση και τη σωστή διεκπεραίωση της ανάλυσης της αβεβαιότητας των μετρήσεων, είναι απαραίτητη η εξέταση όλων των πηγών και των γεγονότων διεξοδικά και σε βάθος, με σκοπό την απόκτηση όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών γύρω από τα προς μελέτη αντικείμενα. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, είναι απαραίτητη η χρήση κοινής ορολογίας και μοντέλων, για την αποφυγή παρεξηγήσεων που μπορεί να δημιουργηθούν από την λανθασμένη χρήση ή τη σύγχυση όρων και μεταβλητών.

2.2.1 Μοντελοποίηση των Μετρήσεων

Γενικά, η αβεβαιότητα μέτρησης ορίζεται ως μία μη-αρνητική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διασπορά των ποσοτικών τιμών που αποδίδονται στο μετρούμενο μέγεθος βάσει των πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκαν (1). Σε πολλές περιπτώσεις, το μετρούμενο μέγεθος ή αλλιώς ποσοτική έξοδος Y δεν μετράται απευθείας, αλλά προσδιορίζεται μέσω μιας συναρτησιακής σχέσης από N ποσότητες εισόδου.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

Το σύνολο των ποσοτήτων εισόδου X_1, X_2, \dots, X_N μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις εξής δύο ομάδες. Στις εισόδους των οποίων οι τιμές και οι σχετιζόμενες αβεβαιότητες προσδιορίζονται άμεσα από την τρέχουσα μέτρηση και στις εισόδους των οποίων οι τιμές και οι αβεβαιότητες είναι γνωστές από εξωτερικές πηγές. Στις εισόδους της δεύτερης κατηγορίας, συνήθως, ανήκουν ποσότητες που συνδέονται με διακριβωμένα πρότυπα μέτρησης, πιστοποιημένα υλικά αναφοράς και δεδομένα αναφοράς εγχειριδίων.

Επιπλέον, οι ποσότητες εισόδου είναι πιθανό να αποτελούν και οι ίδιες μετρούμενα ποσά ή να εξαρτώνται από άλλες παραμέτρους, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολα προσδιορίσιμη η παραπάνω συναρτησιακή σχέση. Η συνάρτηση f μπορεί να είναι ένας αλγόριθμος, ή να προσδιορίζεται πειραματικά και να περιλαμβάνει διορθώσεις και συντελεστές διόρθωσης. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να λαμβάνονται όσες μετρήσεις είναι απαραίτητες για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου ορθότητας του μετρητικού αποτελέσματος. Όταν ως ποσότητες εισόδου χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις x_i των εισόδων X_1, X_2, \dots, X_N , τότε προκύπτει ως έξοδος της συνάρτησης η εκτίμηση του μετρούμενου μεγέθους Y , που συμβολίζεται με y .

Το στατιστικό μέγεθος που προσδιορίζει τη διακύμανση της κατανομής μίας μεταβλητής είναι η μεταβλητότητα ή τυπική απόκλιση, δηλαδή η τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας. Επομένως, η τυπική αβεβαιότητα μέτρησης $u(y)$, που σχετίζεται με το μετρητικό αποτέλεσμα y , είναι η τυπική απόκλιση του μετρητέου Y και έχει τις ίδιες μονάδες και διάσταση με αυτόν. Η τυπική αβεβαιότητα μέτρησης $u(y)$ καθορίζεται από τις εκτιμήσεις x_i και τις αβεβαιότητές τους.

2.2.2 Πηγές Αβεβαιότητας Μετρήσεων

Η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα των μετρήσεων αντανακλά την έλλειψη της ολοκληρωμένης γνώσης όσον αφορά την τιμή του μετρητέου, καθώς η ολοκληρωμένη γνώση προϋποθέτει μία σειρά άπειρων πληροφοριών. Τα φαινόμενα που συντελούν στην ύπαρξη αβεβαιότητας, και συνεπώς στο γεγονός πως το αποτέλεσμα μίας μέτρησης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από μία μοναδική τιμή, ονομάζονται πηγές αβεβαιότητας. Στην πράξη, υπάρχουν πολλές πιθανές πηγές αβεβαιότητας. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο ατελής ορισμός ή η ατελής υλοποίηση του ορισμού του μετρητέου, η μη αντιπροσωπευτική δειγματοληψία, η ανεπάρκεια στη γνώση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών συνθηκών ή οι ατελείς μετρήσεις αυτών, η μεροληψία κατά την ανάγνωση αναλογικών οργάνων και η περιορισμένη ανάλυση του οργάνου ή το κατώτατο όριο στη διακριτότητά του. Προστίθενται ακόμα, οι ανακρίβειες στις τιμές των προτύπων και των υλικών αναφοράς, οι ανακρίβειες τιμές σταθερών και παραμέτρων που λαμβάνονται από εξωτερικές πηγές και χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο μείωσης δεδομένων, οι προσεγγίσεις και οι παραδοχές που ενσωματώνονται στη μέθοδο και τη διαδικασία μέτρησης, όπως και οι μεταβολές στις επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις του μετρούμενου μεγέθους κάτω από φαινομενικά πανομοιότυπες συνθήκες.

2.3 Υπολογισμός της Αβεβαιότητας Μέτρησης των Εκτιμήσεων Εισόδου

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων που σχετίζεται με τις εκτιμήσεις εισόδου υπολογίζεται ακολουθώντας είτε τη μέθοδο αξιολόγησης τύπου A, είτε την μέθοδο τύπου B. Η τύπου A εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας πραγματοποιείται μέσω της στατιστικής ανάλυσης μίας σειράς παρατηρήσεων. Σε αυτή την περίπτωση, η τυπική αβεβαιότητα είναι η πειραματική τυπική απόκλιση του μέσου όρου των παρατηρήσεων. Η τύπου B εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας είναι μέθοδος αξιολόγησης της τυπικής αβεβαιότητας σύμφωνα με διάφορα άλλα μέσα και επιστημονικές γνώσεις, εκτός της στατιστικής ανάλυσης.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στη χρήση των όρων «τύπου Α» και «τύπου Β», και είναι απαραίτητο να τονισθεί πως σε καμία περίπτωση δεν είναι επιτρεπτό να αποτελέσουν αντικαταστάτες των όρων «τυχαία» και «συστηματικά», όροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των σφαλμάτων.

2.3.1 Αξιολόγηση Τύπου Α της Τυπικής Αβεβαιότητας

Με τη λήψη πολλών ανεξάρτητων παρατηρήσεων για μία από τις ποσότητες εισόδου, υπό τις ίδιες συνθήκες μέτρησης, μπορεί να τεθεί σε εφαρμογή η εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας σύμφωνα με την αξιολόγηση τύπου Α. Αν υπάρχει επαρκής ανάλυση στη μετρητική διαδικασία, τότε θα παρατηρηθεί μία διασπορά στις τιμές που λήφθηκαν.

Υποθέτοντας πως η επανειλημμένα μετρούμενη ποσότητα εισόδου X_i είναι η ποσότητα Q και πως λαμβάνονται n στατιστικά ανεξάρτητες παρατηρήσεις ($n > 1$), τότε η εκτιμήτρια της ποσότητας Q είναι \bar{q} , δηλαδή ο αριθμητικός μέσος ή ο μέσος όρος των μεμονωμένων παρατηρήσεων q_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (2.2)$$

Τότε, η αβεβαιότητα μέτρησης, που σχετίζεται με την εκτίμηση \bar{q} , υπολογίζεται σύμφωνα με την εκτίμηση της διακύμανσης της βασικής κατανομής πιθανότητας, η οποία είναι η πειραματική μεταβλητότητα $s^2(q)$ των τιμών q_j και εξάγεται από την σχέση

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (2.3)$$

Η καλύτερη εκτίμηση της διακύμανσης του αριθμητικού μέσου \bar{q} είναι η πειραματική μεταβλητότητα του μέσου όρου που δίνεται από την σχέση

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (2.4)$$

Η τυπική αβεβαιότητα $u(\bar{q})$, που σχετίζεται με την εκτίμηση εισόδου \bar{q} , είναι η πειραματική τυπική απόκλιση του μέσου όρου, δηλαδή η (θετική) τετραγωνική ρίζα της πειραματικής μεταβλητότητας.

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (2.5)$$

Σημειώνεται πως στην περίπτωση που ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων είναι χαμηλός ($n < 10$) και δεν μπορεί να αυξηθεί, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί και με άλλους τρόπους η τυπική απόκλιση, καθώς τίθεται θέμα αξιοπιστίας της συγκεκριμένης αξιολόγησης. Αυτό συμβαίνει επειδή για μικρό αριθμό μετρήσεων η μεταβλητότητα $s^2(\bar{q})$ δεν αποτελεί ικανοποιητική εκτιμήτρια της μεταβλητότητας $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ του πληθυσμού από τον οποίο προέρχονται οι μετρήσεις. Παράλληλα, οι βαθμοί ελευθερίας, ν_i , πρέπει πάντα να συνοδεύουν τα αποτελέσματα για την ολοκληρωμένη τεκμηρίωσή τους.

Σε περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για τις ληφθείσες μετρήσεις, όπως για παράδειγμα πως βρίσκονται υπό στατιστικό έλεγχο, μπορεί να δίνεται μία συνδυασμένη ή συγκεντρωτική εκτίμηση της διακύμανσης, s_p^2 , η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά καλύτερα από την εκτιμώμενη τυπική απόκλιση που προκύπτει από περιορισμένο αριθμό παρατηρήσεων. Συνεπώς, αν η τιμή εισόδου Q προσδιοριστεί ως αριθμητικός μέσος \bar{q} των ανεξάρτητων παρατηρήσεων, τότε η μεταβλητότητα του μέσου και η τυπική αβεβαιότητα υπολογίζονται ως

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \quad (2.6)$$

και
$$u(\bar{q}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (2.7)$$

2.3.2 Αξιολόγηση Τύπου Β της Τυπικής Αβεβαιότητας

Με την τύπου Β αξιολόγηση εκτιμάται η τυπική αβεβαιότητα, $u(x_i)$, που συνδέεται με μία εκτίμηση x_i μίας ποσότητας εισόδου X_i , με τη χρήση πολλών πηγών πληροφοριών που αφορούν την πιθανή μεταβλητότητα της X_i . Σε αυτές τις πληροφορίες, όμως, δε συμπεριλαμβάνεται η στατιστική ανάλυση των παρατηρήσεων. Τέτοιες πληροφορίες συνήθως αντλούνται από προηγούμενα μετρητικά δεδομένα, εμπειρία ή γενικές γνώσεις

της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των οργάνων και των υλικών, τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, στοιχεία που παρέχονται στα πιστοποιητικά βαθμονόμησης και διακρίβωσης των οργάνων, ή αβεβαιότητες που αναφέρονται σε δεδομένα αναφοράς εγχειριδίων.

Καθώς η ποιότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στην τύπου Β αξιολόγηση εξαρτάται από τις διαθέσιμες πληροφορίες και την εμπειρία, συνιστάται η κάθε πληροφορία να εξετάζεται σε πλήρη έκταση από κάθε σκοπιά. Έτσι, μία εκτίμηση τύπου Β μπορεί να είναι εξίσου αξιόπιστη με μία εκτίμηση τύπου Α, ή μπορεί να υπάρξουν και συνθήκες, όπως τα περιορισμένα δεδομένα, που εκτιμήσεις τύπου Α υπολείπονται εκτιμήσεων τύπου Β σε αξιοπιστία.

Ορισμένες φορές που οι πληροφορίες για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας είναι περιορισμένες, επέρχεται η ανάγκη για εφαρμογή κάποιων υποθέσεων, οι οποίες γίνονται βάσει των στοιχείων που δίνονται ανάλογα με την προσωπική εμπειρία και γνώσεις. Για παράδειγμα, αν μπορεί να υποτεθεί μία κατανομή, στην οποία κυμαίνονται οι ποσότητες X_i , τότε επιλέγεται η εκτίμηση x_i και η συσχετιζόμενη τυπική αβεβαιότητα, με βάση την αναμενόμενη τιμή και τη μεταβλητότητα της συγκεκριμένης κατανομής. Αν είναι γνωστό πως οι τιμές είναι πιθανότερο να εμφανιστούν στο κέντρο μίας κατανομής απ' ότι κοντά στα όρια, τότε, συνήθως, επιλέγεται μία κανονική ή τριγωνική κατανομή. Ενώ, αν είναι πιο πιθανή η εμφάνιση τιμών κοντά στα άνω και κάτω όρια, τότε ευλόγως επιλέγεται η κατανομή τύπου U. Βέβαια, στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες ούτε οι πληροφορίες για τη συχνότητα των τιμών, αλλά είναι γνωστά μόνο τα όρια της κατανομής, επιλέγεται η χρήση των ιδιοτήτων μίας ομοιόμορφης κατανομής που αποδίδει σταθερή πυκνότητα πιθανότητας μεταξύ των ορίων για την πιθανή μεταβλητότητα των ποσοτήτων εισόδου.

2.4 Υπολογισμός της Αβεβαιότητας Μέτρησης των Εκτιμήσεων Εξόδου - Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα

Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα, η οποία συμβολίζεται με $u_c(y)$ από τον όρο “combined standard uncertainty”, αφορά την αβεβαιότητα της εκτίμησης y του μετρούμενου μεγέθους Y , και συνεπώς το αποτέλεσμα της μέτρησης και υπολογίζεται μέσω του συνδυασμού των μεμονωμένων τυπικών αβεβαιοτήτων των εκτιμήσεων εισόδου x_1, x_2, \dots, x_N . Προϋπόθεση για την διεξαγωγή της διαδικασίας υπολογισμού της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας με τον τρόπο που περιγράφεται παρακάτω αποτελούν οι ανεξάρτητες και ασυσχέτιστες τιμές εισόδου. Στην αντίθετη περίπτωση,

ακολουθείται διαφορετική διαδικασία υπολογισμού που αναλύεται διεξοδικά στον Οδηγό για την Έκφραση της Αβεβαιότητας στη Μέτρηση (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM) (7).

Εφόσον η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c(y)$ είναι εκτίμηση της τυπικής απόκλισης και χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που αποδίδονται στον μετρητέο Y , ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της συνδυασμένης μεταβλητότητας $u_c^2(y)$, που δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.8)$$

Όπου f είναι η συνάρτηση της σχέσης (2.1) και κάθε τυπική αβεβαιότητα $u(x_i)$ υπολογίζεται με μία αξιολόγηση τύπου A ή τύπου B, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Είναι χρήσιμο να τονισθεί πως η σχέση (2.8) και η αντίστοιχη σχέση υπολογισμού της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας των συσχετιζόμενων τιμών εισόδου, βασίζονται στην προσέγγιση του $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ με μία πρώτης τάξης σειρά Taylor και εκφράζουν το νόμο διάδοσης της αβεβαιότητας. Οι μερικές παράγωγοι, $\partial f / \partial x_i$, στην παραπάνω σχέση ονομάζονται συντελεστές ευαισθησίας και εκφράζουν τον τρόπο με την οποίο κυμαίνεται η εκτίμηση εξόδου y ανάλογα με τις αλλαγές τιμών των εκτιμήσεων εισόδου x_i . Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή στο y , που προκύπτει από μία μικρή αλλαγή Δx_i στο x_i , ορίζεται ως $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i)(\Delta x_i)$. Αν η αλλαγή αυτή δημιουργείται από την τυπική αβεβαιότητα της εκτίμησης εισόδου x_i , τότε η αντίστοιχη μεταβολή στο y είναι $(\partial f / \partial x_i)u(x_i)$. Συνεπάγεται, λοιπόν, πως η συνδυασμένη μεταβλητότητα $u_c^2(y)$ μπορεί να εκφραστεί ως ένα άθροισμα όρων, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την κάθε διακύμανση της εκτίμησης εξόδου y που παράγεται από τη διακύμανση κάθε εκτίμησης εισόδου x_i . Επομένως, η εξίσωση (2.8) μπορεί να γραφτεί και με τον ακόλουθο τρόπο.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (2.9)$$

όπου
$$c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2.9\alpha)$$

και

$$u_i(y) \equiv |c_i|u(x_i) \quad (2.9\beta)$$

Γενικά, αμέλεια συσχετίσεων μεταξύ των εκτιμήσεων εισόδου και αυθαίρετη θεώρηση ισχύος της προϋπόθεσης ανεξαρτησίας και μη συσχέτισης, μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένο υπολογισμό της τυπικής αβεβαιότητας του μετρούμενου μεγέθους. Η ικανότητα να γίνονται αντιληπτές και να λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις της συσχέτισης εξαρτάται από τη γνώση της μετρητικής διαδικασίας και από την κρίση της αμοιβαίας εξάρτησης των ποσοτήτων εισόδου. Έτσι, σε περίπτωση που δύο ποσότητες εισόδου συσχετίζονται σε κάποιο βαθμό, η συνδιακύμανσή τους συμβάλλει στην αβεβαιότητα των μετρήσεων και πρέπει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς.

Σημειώνεται πως η συνδιακύμανση που σχετίζεται με τις εκτιμήσεις δύο ποσοτήτων εισόδου μπορεί να θεωρηθεί μηδενική ή ασήμαντη αν οι ποσότητες εισόδου είναι ανεξάρτητες, αν οποιαδήποτε από τις ποσότητες μπορεί να θεωρηθεί σταθερή ή αν η έρευνα δεν παρέχει πληροφορίες που υποδεικνύουν την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των ποσοτήτων εισόδου (8).

2.5 Προσδιορισμός της Διευρυμένης Αβεβαιότητας Μέτρησης

Αν και η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα χρησιμοποιείται παγκοσμίως για την έκφραση της αβεβαιότητας του αποτελέσματος μέτρησης, σε κάποιες εμπορικές, βιομηχανικές και ρυθμιστικές εφαρμογές, και κυρίως σε όσες περιλαμβάνονται ζητήματα υγείας και ασφάλειας, είναι συχνά αναγκαίο να δοθεί ένα μέτρο αβεβαιότητας που ορίζει ένα διάστημα γύρω από το μετρητικό αποτέλεσμα και περιλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος της κατανομής των τιμών που αποδίδονται στο μετρούμενο μέγεθος.

2.5.1 Διευρυμένη Αβεβαιότητα Μέτρησης

Για την κάλυψη των προαναφερόμενων απαιτήσεων, χρησιμοποιείται ένα μέτρο αβεβαιότητας που ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα και ορίζεται ως U . Η διευρυμένη αβεβαιότητα U είναι πρακτικά το διάστημα εμπιστοσύνης του μετρούμενου μεγέθους, θεωρώντας πως δεν υπάρχουν συστηματικά σφάλματα, και προκύπτει από το γινόμενο της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας $u_c(y)$ και ενός συντελεστή κάλυψης k .

$$U = ku_c(y) \quad (2.10)$$

Και με αυτό τον τρόπο, ορίζεται το διάστημα μέσα στο οποίο θα κυμαίνονται οι τιμές του αποτελέσματος των μετρήσεων.

$$y - U \leq Y \leq y + U \quad (2.11)$$

Έτσι, το αποτέλεσμα μίας μέτρησης μπορεί πολύ εύκολα να εκφραστεί ως $Y = y \pm U$. Αυτό σημαίνει πως η καλύτερη τιμή που μπορεί να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος Y , είναι y , ενώ τα όρια $y - U$ και $y + U$ δημιουργούν ένα διάστημα μέσα στο οποίο περιλαμβάνεται ένα μεγάλο κλάσμα p της κατανομής πιθανοτήτων που χαρακτηρίζεται από το μετρητικό αποτέλεσμα και την συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητά του. Ως p ορίζεται η πιθανότητα κάλυψης ή αλλιώς το επίπεδο εμπιστοσύνης του διαστήματος και όποτε είναι εφικτό πρέπει να υπολογίζεται και να δηλώνεται. Βέβαια, θα πρέπει να γίνει αντιληπτό πως ο πολλαπλασιασμός της τυπικής αβεβαιότητας με τον συντελεστή κάλυψης δεν παρέχει νέες πληροφορίες σχετικά με την αβεβαιότητα του αποτελέσματος. Απλώς με αυτό τον τρόπο παρουσιάζονται οι προηγούμενες πληροφορίες σε διαφορετική μορφή.

2.5.2 Συντελεστής Κάλυψης

Ο συντελεστής κάλυψης που δημιουργεί ένα διάστημα με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης p μπορεί να βρεθεί μόνο αν υπάρχει εκτεταμένη γνώση για την κατανομή πιθανότητας της κάθε ποσότητας εισόδου και αν αυτές οι κατανομές συνδυάζονται για τον προσδιορισμό της κατανομής της ποσότητας εξόδου. Τότε, η τιμή του συντελεστή κάλυψης επιλέγεται με βάση το απαιτούμενο επίπεδο εμπιστοσύνης για το διάστημα μεταξύ των ορίων $y - U$ και $y + U$.

Πιο αναλυτικά, αν οι κατανομές πιθανότητας των εισόδων X_1, X_2, \dots, X_N , από τις οποίες εξαρτάται η έξοδος Y , είναι γνωστές, και αν το Y αποτελεί γραμμική συνάρτηση των εισόδων, $Y = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_N X_N$, τότε η κατανομή πιθανότητας της εξόδου Y προκύπτει από τη συνέλιξη των επιμέρους κατανομών πιθανοτήτων. Οπότε, οι τιμές του συντελεστή κάλυψης που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης αντλούνται από την τελική κατανομή του Y . Από την άλλη πλευρά, αν η συναρτησιακή σχέση μεταξύ του Y και των X_i είναι μη γραμμική και προσέγγισή της από μία πρώτης τάξης σειρά Taylor δεν είναι αποδεκτή, τότε η κατανομή πιθανότητας του μετρητέου Y δεν μπορεί να προκύψει από τη συνέλιξη των κατανομών των ποσοτήτων εισόδου και απαιτείται αντιμετώπιση βάσει άλλων μεθόδων.

Στην πράξη, όταν είναι αναγκαίος ο υπολογισμός διαστημάτων με συγκεκριμένα επίπεδα εμπιστοσύνης, γίνονται προσεγγίσεις βασιζόμενες στο Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, κυρίως λόγω δυσκολίας εφαρμογής συνελίξεων με παραμέτρους κατανομών που δεν είναι γνωστές με πλήρη ακρίβεια. Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, αν $Y = c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_NX_N$, ακόμα και αν δεν ακολουθούν όλα τα X_i κανονική κατανομή, τότε η κατανομή του Y θα είναι κατά προσέγγιση κανονική κατανομή με εκτιμώμενη μέση τιμή $E(Y) = \sum_{i=1}^N c_i E(X_i)$ και εκτιμώμενη μεταβλητότητα $\sigma^2(Y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \sigma^2(X_i)$, όπου $E(X_i)$ και $\sigma^2(X_i)$ είναι οι εκτιμήσεις της μέσης τιμής και της μεταβλητότητας των X_i , αντίστοιχα.

Προϋποθέσεις της σωστής εφαρμογής του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος είναι οι ανεξάρτητες είσοδοι X_i και η εκτιμώμενη μεταβλητότητα $\sigma^2(Y)$ να είναι πολύ μεγαλύτερη από κάθε $c_i^2 \sigma^2(X_i)$ κάποιου X_i που δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή. Παράλληλα, κατά την εφαρμογή του πρέπει να αποφεύγεται η χρήση τυπικών αβεβαιοτήτων που έχουν προκύψει από αξιολόγηση τύπου A που βασίζεται σε πολύ λίγες παρατηρήσεις ή από μία αξιολόγηση τύπου B που βασίζεται σε μία υποτιθέμενη ομοιόμορφη κατανομή. Έτσι, πληρουμένων των απαιτήσεων του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος, είναι εφικτή η χρήση μίας τιμής από την κανονική κατανομή που ακολουθεί η έξοδος Y , ως συντελεστή κάλυψης k_p για τον υπολογισμό της διευρυμένης αβεβαιότητας $U_p = k_p u_c(y)$, που παρέχει ένα επίπεδο εμπιστοσύνης p . Το κλάσμα p ονομάζεται επίπεδο εμπιστοσύνης ή πιθανότητα κάλυψης του διαστήματος. Στο Σχήμα 6 φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές των p και k_p , που χρησιμοποιούνται συχνά.

| Level of confidence p (percent) | Coverage factor k_p |
|--------------------------------------|-----------------------|
| 68,27 | 1 |
| 90 | 1,645 |
| 95 | 1,960 |
| 95,45 | 2 |
| 99 | 2,576 |
| 99,73 | 3 |

Σχήμα 6: Τιμή του συντελεστή κάλυψης k_p που παράγει ένα διάστημα με επίπεδο εμπιστοσύνης p βάσει μίας κανονικής κατανομής [Πηγή: *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM*]

Σύμφωνα με τον Οδηγό για την Έκφραση της Αβεβαιότητας στη Μέτρηση (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM) (7), για την επίτευξη μίας καλύτερης προσέγγισης του προσδιορισμού της διευρυμένης αβεβαιότητας, πρέπει να αναγνωρισθεί

ότι, συνήθως, τα μόνα διαθέσιμα στοιχεία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είναι η εκτίμηση του μετρητέου Y , y , που υπολογίζεται από τη σχέση $y = \sum_{i=1}^N c_i x_i$, και η συνδυασμένη μεταβλητότητα της εκτίμησης y , $u_c^2(y)$. Επομένως, για τον υπολογισμό ενός διαστήματος με συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης σε μία αντίστοιχη περίπτωση, αντί της κατανομής της μεταβλητής $[Y - E(Y)]/\sigma(Y)$, ουσιαστικά πραγματοποιείται μελέτη της κατανομής της μεταβλητής $(y - Y)/u_c(y)$.

Ως γνωστόν, αν μία τυχαία μεταβλητή z ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_z και τυπική απόκλιση σ , και συμβολιστεί ως \bar{z} ο αριθμητικός μέσος n ανεξάρτητων παρατηρήσεων και ως $s(\bar{z})$ η πειραματική τυπική απόκλιση του \bar{z} , τότε η μεταβλητή $t = (\bar{z} - \mu_z)/s(\bar{z})$ θα ακολουθεί κατανομή Student με $\nu = n - 1$ βαθμούς ελευθερίας, τέτοια ώστε το κλάσμα p της κατανομής να βρίσκεται ανάμεσα στο διάστημα $-t_p(\nu)$ ως $t_p(\nu)$. Δηλαδή,

$$P[-t_p(\nu) \leq t \leq t_p(\nu)] = p \quad (2.12\alpha)$$

$$\text{ή} \quad P[-t_p(\nu) \leq (y - Y)/u_c(y) \leq t_p(\nu)] = p \quad (2.12\beta)$$

$$\text{ή} \quad P[y - t_p(\nu)u_c(y) \leq Y \leq y + t_p(\nu)u_c(y)] = p \quad (2.12\gamma)$$

Κατά συνέπεια, η διευρυμένη αβεβαιότητα μπορεί να γραφτεί και ως

$$U_p = k_p u_c(y) = t_p(\nu) u_c(y) \quad (2.13)$$

και ορίζει ένα διάστημα από $y - U_p$ ως $y + U_p$, καθώς $Y = y \pm U_p$, το οποίο περιλαμβάνει ένα κλάσμα p της κατανομής των τιμών του Y .

Όσον αφορά τους βαθμούς ελευθερίας ν των τυπικών αβεβαιοτήτων, είναι $\nu = n - 1$ για μία ποσότητα που υπολογίζεται μέσω του μέσου όρου n ανεξάρτητων παρατηρήσεων, και $\nu = n - 2$ όταν ο υπολογισμός περιλαμβάνει τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με n ανεξάρτητες παρατηρήσεις. Για την προσαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων m παραμέτρων σε n δεδομένα σημεία, οι βαθμοί ελευθερίας που αντιστοιχούν στην τυπική αβεβαιότητα της κάθε παραμέτρου είναι $\nu = n - m$.

Βέβαια, σε οποιαδήποτε περίπτωση κατά την οποία η συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι άθροισμα δύο ή περισσότερων συνιστωσών μεταβλητότητας, $u_i^2(y) = c_i^2 u^2(x_i)$, η

κατανομή της μεταβλητής $(y - Y)/u_c(y)$ δεν περιγράφεται με τον ίδιο τρόπο από την κατανομή Student. Προσεγγιστικά, η κατανομή της μεταβλητής αυτής μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μία κατανομή Student, αλλά με βαθμούς ελευθερίας ν_{eff} που εξάγονται σύμφωνα με τη σχέση Welch-Satterthwaite.

$$\frac{u_c^4(y)}{\nu_{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i} \quad (2.14\alpha)$$

ή

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (2.14\beta)$$

με

$$\nu_{eff} \leq \sum_{i=1}^N \nu_i \quad (2.14\gamma)$$

και

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (2.14\delta)$$

Με αυτό τον τρόπο και εδώ, η διευρυμένη αβεβαιότητα υπολογίζεται ως $U_p = k_p u_c(y) = t_p(\nu_{eff}) u_c(y)$ και παρέχει ένα διάστημα $Y = y \pm U_p$ με ένα κατά προσέγγιση επίπεδο εμπιστοσύνης p .

Σημειώνεται πως οι όροι $t_p(\nu)$ και $t_p(\nu_{eff})$ είναι δυνατόν να βρεθούν πολύ εύκολα μέσω πινάκων που αντιστοιχούν στην κατανομή Student ή με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

2.5.3 Γενίκευση της Διαδικασίας Υπολογισμού της Διευρυμένης Αβεβαιότητας

Υπάρχουν και ορισμένες, αλλά σπάνιες στην πράξη, καταστάσεις κατά τις οποίες δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος με συνέπεια την εξαγωγή ενός λανθασμένου και μη αποδεκτού αποτελέσματος. Είναι προφανές, λοιπόν, πως αυτές οι καταστάσεις χρήζουν μεμονωμένης αντιμετώπισης και απαιτούν διαδικασίες έρευνας πιθανών προσεγγιστικών αναλύσεων, που περιλαμβάνουν για παράδειγμα, τη συνέλιξη μίας κανονικής και μίας ομοιόμορφης κατανομής.

Όμως, για ένα ευρύ φάσμα πεδίων, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπερισχύουν συγκεκριμένες συνθήκες. Η εκτίμηση y του μετρούμενου μεγέθους Y προκύπτει από τις εκτιμήσεις x_i ενός σημαντικού αριθμού εισόδων X_i , που περιγράφονται από κατανομές πιθανοτήτων όπως η κανονική και η ομοιόμορφη, και οι τυπικές αβεβαιότητες των x_i , $u(x_i)$, που υπολογίζονται είτε από αξιολογήσεις τύπου Α, είτε τύπου Β, συμβάλουν ισάξια στη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα του μετρητικού αποτελέσματος y , $u_c(y)$. Παράλληλα, η γραμμική προσέγγιση που προκύπτει από το νόμο της διάδοσης της αβεβαιότητας θεωρείται επαρκής.

Υπό αυτές τις συνθήκες, η κατανομή που χαρακτηρίζεται από το μετρητικό αποτέλεσμα και τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητά του, σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, θεωρείται πως είναι κανονική και πως η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα αποτελεί αξιόπιστη εκτίμηση της τυπικής απόκλισης αυτής της κανονικής κατανομής, λόγω των βαθμών ελευθερίας. Και τέλος, ανάλογα και με τις απαιτήσεις για την διευρυμένη αβεβαιότητα, επιλέγεται ένας συντελεστής κάλυψης που ορίζει το διάστημα που κυμαίνεται το μετρητικό αποτέλεσμα. Πολλές φορές, για λόγους ευκολίας, αυτός ο συντελεστής επιλέγεται ίσος με 2 ($k = 2$), και έτσι το διάστημα που ορίζεται από την $U = 2u_c(y)$ έχει ένα επίπεδο εμπιστοσύνης περίπου 95 τοις εκατό, ενώ σε πιο κρίσιμες περιπτώσεις γίνεται επιλογή του $k = 3$, οπότε η $U = 3u_c(y)$ εκφράζει ένα διάστημα με επίπεδο εμπιστοσύνης περίπου 99 τοις εκατό.

2.6 Ανάλυση Αβεβαιότητας

Κατά τη διάρκεια, αλλά και στο τέλος, των παραπάνω υπολογισμών, συμπληρώνονται έγγραφα και φόρμες δεδομένων, για τη σαφή και λεπτομερή παράθεση των επιμέρους αποτελεσμάτων των υπολογισμών και του τελικού αποτελέσματος της ανάλυσης αβεβαιότητας.

Η ποσότητα των πληροφοριών που δηλώνεται σε αυτά τα έγγραφα, στην πράξη, εξαρτάται από την χρήση για την οποία προορίζεται το μετρούμενο μέγεθος και οι γύρω από αυτό πληροφορίες. Ωστόσο, υπάρχει μία γενική αρχή, η οποία παραμένει αμετάβλητη, και βάσει αυτής, κατά τη δήλωση του μετρητικού αποτελέσματος και της αβεβαιότητάς του, είναι προτιμότερο να παρέχονται περισσότερες πληροφορίες από το να παρέχονται πολύ λίγες. Με λίγα λόγια, είναι απαραίτητη η σαφής περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μετρητικού αποτελέσματος και της αβεβαιότητάς του από τις πειραματικές μετρήσεις και τα δεδομένα εισόδου. Έτσι, πρέπει να απαριθμούνται όλα τα στοιχεία αβεβαιότητας και ο τρόπος με τον οποίο αξιολογήθηκαν

και η ανάλυση δεδομένων να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε σημαντικό βήμα να μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεσα σε περίπτωση που χρειαστεί να επαναληφθεί ο υπολογισμός του αναφερόμενου αποτελέσματος. Γι' αυτό το λόγο, είναι αναγκαία η παροχή πληροφοριών για τις διορθώσεις που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση της αβεβαιότητας, καθώς και για τις πηγές τους. Στο τέλος της διαδικασίας, οι πληροφορίες πρέπει να είναι τόσες και τόσο σαφείς, ώστε το αποτέλεσμα της μετρητικής διαδικασίας να μπορεί να επαναπροσδιοριστεί εάν στο μέλλον διατίθενται νέες πληροφορίες ή δεδομένα.

2.6.1 Ισοζύγιο Αβεβαιότητας (Uncertainty Budget)

Ως βοήθεια στη διαδικασία υπολογισμού των αβεβαιοτήτων, είναι χρήσιμη η σύνοψη της ανάλυσης αβεβαιότητας σε ένα υπολογιστικό φύλλο, το οποίο ονομάζεται ισοζύγιο αβεβαιότητας. Μαζί με τις πηγές αβεβαιότητας, δίνονται οι εκτιμήτριες εισόδου x_i και οι τυπικές αβεβαιότητες $u(x_i)$, καθώς και ο τρόπος υπολογισμού τους. Πιθανόν να αναφερθεί αν οι αβεβαιότητες προέρχονται από αξιολόγηση τύπου A ή τύπου B, ενώ καμιά φορά μπορεί να δηλώνονται στο υπολογιστικό φύλλο και οι συντελεστές ευαισθησίας. Κάποια παραδείγματα πρότυπων υπολογιστικών φύλλων παρατίθενται στα ακόλουθα σχήματα.

| quantity X_i | estimate x_i | standard uncertainty $u(x_i)$ | probability distribution | sensitivity coefficient c_i | uncertainty contribution $u_i(y)$ |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| l_{iX} | 150,10 mm | - | - | - | - |
| l_S | 150,00 m | 0,46 μm | rectangular | -1,0 | -0,46 μm |
| Δt | 0 | 1,15 K | rectangular | 1,7 μMk^{-1} | 2,0 μm |
| δl_{iX} | 0 | 15 μm | rectangular | 1,0 | 15 μm |
| δl_M | 0 | 29 μm | rectangular | 1,0 | 29 μm |
| E_X | 0,10 mm | | | | 33 μm |

Σχήμα 7: Παράδειγμα Κατάρτισης Ισοζυγίου Αβεβαιότητας [Πηγή: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European co-operation for Accreditation]

| Source of uncertainty | Value ± | Probability distribution | Divisor | Standard uncertainty |
|--|------------|-----------------------------|------------|-------------------------|
| Calibration uncertainty | 5.0 mm | Normal | 2 | 2.5 mm |
| Resolution (size of divisions) | 0.5 mm* | Rectangular | $\sqrt{3}$ | 0.3 mm |
| String not lying perfectly straight | 10.0 mm* | Rectangular | $\sqrt{3}$ | 5.8 mm |
| Standard uncertainty of mean of 10 repeated readings | 0.7 mm | Normal | 1 | 0.7 mm |
| Combined standard uncertainty | | Assumed normal | | 6.4 mm |
| Expanded uncertainty | | Assumed normal ($k = 2$) | | 12.8 mm |

*Here the (\pm) half-width divided by $\sqrt{3}$ is used.

Σχήμα 8: Παράδειγμα Κατάρτισης Ισοζυγίου Αβεβαιότητας [Πηγή: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement, Stephanie Bell, Measurement Good Practice Guide No.11, Issue 2]

| Source of uncertainty | Standard uncertainty (nm) |
|--|---------------------------|
| Calibration of standard end gauge | 25 (B) |
| Measured difference between end gauges: | |
| repeated observations | 5.8 (A) |
| random effects of comparator | 3.9 (A) |
| systematic effects of comparator | 6.7 (B) |
| Thermal expansion of standard end gauge | 1.7 (B) |
| Temperature of test bed: | |
| mean temperature of bed | 5.8 (A) |
| cyclic variation of temperature of room | 10.2 (B) |
| Difference in expansion coefficients of end gauges | 2.9 (B) |
| Difference in temperatures of end gauges | 16.6 (B) |
| Combined standard uncertainty: $u_c(l) = 34$ nm | |

Σχήμα 9: Παράδειγμα Κατάρτισης Ισοζυγίου Αβεβαιότητας [Πηγή: Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt, NIST Technical Note 1297]

| Source of uncertainty | Standard uncertainties from random effects in the current measurement process (nm) | | Standard uncertainties from systematic effects in the current measurement process (nm) | |
|--|--|-------------------|--|-------------------|
| | Type A evaluation | Type B evaluation | Type A evaluation | Type B evaluation |
| Calibration of standard end gauge | | | | 25 |
| Measured difference between end gauges: repeated observations random effects of comparator systematic effects of comparator | 5.8 | | 3.9 | 6.7 |
| Thermal expansion of standard end gauge | | | | 1.7 |
| Temperature of test bed: mean temperature of bed cyclic variation of temperature of room | 5.8 | | | 10.2 |
| Difference in expansion coefficients of end gauges | | | | 2.9 |
| Difference in temperatures of end gauges | | 16.6 | | |
| Combined standard uncertainty: $u_c(l) = 34 \text{ nm}$ | | | | |

Σχήμα 10: Παράδειγμα Κατάρτισης Ισοζυγίου Αβεβαιότητας [Πηγή: *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt, NIST Technical Note 1297]

2.6.2 Δήλωση Αβεβαιότητας

Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης της αβεβαιότητας, το μετρητικό αποτέλεσμα μαζί με την αντίστοιχη τυπική αβεβαιότητα, είτε συνδυασμένη είτε διευρυμένη, δηλώνονται με ένα συγκεκριμένο τρόπο.

Όταν η αναφορά του αποτελέσματος συνοδεύεται από τη συνδυασμένη αβεβαιότητα $u_c(y)$, αφού γίνει μία πλήρης περιγραφή του τρόπου με τον οποίο ορίζεται το μετρούμενο μέγεθος Y , δηλώνεται η εκτίμησή του, y , και η αντίστοιχη τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα $u_c(y)$. Σε κάποιες περιπτώσεις, αν θεωρηθεί χρήσιμο, μία αναφορά της σχετικής συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας, $u_c(y)/|y|$, $|y| \neq 0$, ακολουθεί τα προαναφερόμενα μεγέθη. Παράλληλα, για επιπλέον βοήθεια στην κατανόηση του μετρητικού αποτελέσματος, πιθανό να υποδεικνύονται οι εκτιμώμενοι πραγματικοί βαθμοί ελευθερίας ν_{eff} . Επομένως, το μετρητικό αποτέλεσμα μπορεί να εκφραστεί με έναν από

τους ακόλουθους τρόπους, για τους οποίους χρησιμοποιείται ως παράδειγμα ένα σχοινί ονομαστικού μήκους $l = 15 \text{ cm}$.

- « $l = 15,017 \text{ cm}$ με συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c = 0,35 \text{ mm}$ »
- « $l = 15,017 (35) \text{ cm}$, όπου το νούμερο στην παρένθεση είναι η αριθμητική τιμή της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας u_c , η οποία αναφέρεται στα αντίστοιχα τελευταία ψηφία του αναφερόμενου αποτελέσματος»
- « $l = 15,017 (0,035) \text{ cm}$, όπου το νούμερο στην παρένθεση είναι η αριθμητική τιμή της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας u_c , η οποία είναι εκφρασμένη στις μονάδες του αναφερόμενου αποτελέσματος»
- « $l = 15,017 \pm 0,035 \text{ cm}$, όπου το νούμερο που ακολουθεί το σύμβολο \pm είναι η αριθμητική τιμή της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας u_c και όχι ένα διάστημα εμπιστοσύνης»

Τονίζεται πως ο τελευταίος τρόπος αναφοράς του αποτελέσματος με το σύμβολο \pm είναι προτιμότερο να αποφεύγεται, διότι συνήθως χρησιμοποιείται για την ένδειξη ενός διαστήματος που αντιστοιχεί σε υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης, και συνεπώς να είναι πιθανή η σύγχυση με τη διευρυμένη αβεβαιότητα U .

Όταν, για μέγιστη σαφήνεια, επιλέγεται η διευρυμένη αβεβαιότητα $U = k u_c(y)$ για τη δήλωση της αριθμητικής τιμής του μετρητικού αποτελέσματος, τότε η δήλωση αυτή είναι απαραίτητο να εμπεριέχει μία πλήρη περιγραφή του μετρούμενου μεγέθους Y και την αναφορά του σύμφωνα με την σχέση $Y = y \pm U$, μαζί με τις μονάδες του y και του U . Συγχρόνως, πρέπει να δίνεται η τιμή του συντελεστή κάλυψης k ή/και της τιμής της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του U , μαζί με τον προσδιορισμό του κατά προσέγγιση επιπέδου εμπιστοσύνης που σχετίζεται με το διάστημα $y \pm U$. Με αυτό τον τρόπο, η αναφορά του μετρητικού αποτελέσματος έχει τη μορφή που φαίνεται στο επόμενο παράδειγμα, στο οποίο χρησιμοποιείται ξανά το σχοινί ονομαστικού μήκους $l = 15 \text{ cm}$.

« $l = 15,017 \pm 0,078 \text{ cm}$, όπου το νούμερο που ακολουθεί το σύμβολο \pm είναι η αριθμητική τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας $U = k u_c$, με U προσδιοριζόμενη από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c = 0,035 \text{ cm}$ και ένα συντελεστή κάλυψης $k = 2,23$, ο οποίος, με βάση την κατανομή Student για $\nu = 10$ βαθμούς ελευθερίας, ορίζει ένα διάστημα με εκτιμώμενο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%»

Τέλος, σημειώνεται πως όλες οι συμμετέχουσες μεταβλητές, η εκτίμηση y με την τυπική αβεβαιότητά της u_c , όπως και η διευρυμένη αβεβαιότητα U , δεν πρέπει να ορίζονται με

υπερβολικό αριθμό ψηφίων. Τις περισσότερες φορές, αρκεί η αναφορά των αβεβαιοτήτων u_c και U με το πολύ δύο σημαντικά ψηφία, παρόλο που κάποιες φορές είναι απαραίτητη η διατήρηση περισσότερων ψηφίων για την αποφυγή λαθών στρογγυλοποίησης σε μεταγενέστερους υπολογισμούς.

Κεφάλαιο 3: Διακρίβωση

3.1 Βασικές Έννοιες και Ορισμοί

Η συστηματική μέτρηση με γνωστή αβεβαιότητα είναι μία από τις βάσεις για τον έλεγχο ποιότητας. Επομένως, οι μετρολογικές δραστηριότητες, δοκιμές και μετρήσεις, είναι γενικά πολύτιμα στοιχεία για την ποιότητα σε οποιοδήποτε είδους δραστηριότητα, κυρίως όμως σε εργαστηριακές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου, επήλθε η ανάγκη δημιουργίας μίας κοινής βάσης προτύπων, στα οποία θα στηρίζονται οι μετρητικές δραστηριότητες και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους, και με το πέρασ των αναλόγων διαδικασιών θα διασφαλίζεται η ποιότητα των αντικειμένων, οργάνων, συστημάτων, προϊόντων και υπηρεσιών, αλλά και όσων παράγονται μέσω αυτών.

3.1.1 Ορισμός και Σημασία Διακρίβωσης

Η αξιοπιστία των μετρήσεων και των μετρητικών οργάνων είναι μία από τις σημαντικότερες προϋποθέσεις για τη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων και υπηρεσιών, ενώ η ακρίβεια του μετρητικού εξοπλισμού θα πρέπει να ικανοποιεί το σκοπό για τον οποίο αυτός χρησιμοποιείται. Στη βιομηχανική μετρολογία, η πιο σημαντική ενέργεια για τη διασφάλιση της ορθότητας των ενδείξεων των μετρητικών οργάνων είναι η περιοδική διακρίβωση των μετρητικών οργάνων σύμφωνα με το σύστημα ποιότητας που εφαρμόζεται.

Ως διακρίβωση (calibration) ορίζεται η σειρά των απαιτούμενων ενεργειών οι οποίες, υπό αυστηρά καθορισμένες συνθήκες, προσδιορίζουν τη σχέση ανάμεσα στις ενδείξεις τιμών ενός μετρητικού οργάνου ή μίας μετρητικής διάταξης ή μίας μετρολογικής ιδιότητας τεχνητού αντικειμένου και σε αυτές ενός προτύπου αναφοράς (9). Συνεπώς, το αποτέλεσμα μίας διακρίβωσης μπορεί να επιτρέψει την υιοθέτηση των ενδείξεων του οργάνου είτε τη διόρθωση των ενδείξεων, ενώ μπορεί, παράλληλα, να προσδιορίσει άλλες ιδιότητες, όπως την επίδραση άλλων παραγόντων.

Η διακρίβωση του μετρητικού εξοπλισμού αποτελεί μία ωφέλιμη υπηρεσία, τόσο για τον άμεσο χρήστη του εξοπλισμού όσο και για τον τελικό αποδέκτη των προϊόντων και υπηρεσιών. Αυτό συμβαίνει εφόσον η διακρίβωση τεκμηριώνει και εδραιώνει το βαθμό αξιοπιστίας των ενδείξεων των μετρητικών διατάξεων ή προτύπων και διασφαλίζει τη συμβατότητα και τη συγκρισιμότητα των μετρήσεων που πραγματοποιούνται από άλλα

παρόμοια ή διαφορετικά μετρητικά όργανα. Ακόμα, με τη διακρίβωση διευκολύνεται η εξιχνίαση προβλημάτων κατά την παραγωγική διαδικασία, ενώ με τη στοχευόμενη επίτευξη των ποιοτικών χαρακτηριστικών των προϊόντων επιτυγχάνεται η διατήρηση ή και η αύξηση της ποιότητάς τους. Ως αποτέλεσμα της μείωσης του ποσοστού των αστοχιών ή με την εξοικονόμηση και τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων, μέσω της διακρίβωσης, μειώνεται το κόστος παραγωγής, και λόγω της συμμόρφωσης των προϊόντων με Διεθνείς Κανονιστικές Διατάξεις, η διακρίβωση παίζει βασικό ρόλο στην προστασία και την ασφάλεια του καταναλωτή (10).

Αξίζει να σημειωθεί πως ο όρος «calibration» δε χρησιμοποιείται μόνο για τη μετάφραση του όρου «διακρίβωση», αλλά χρησιμοποιείται και για τον όρο «βαθμονόμηση». Επομένως, η σημασία του όρου «calibration» εξάγεται σύμφωνα με τα συμφραζόμενα της κάθε περίπτωσης, τα οποία πρέπει να ερμηνεύονται με μεγάλη προσοχή ώστε να αποφεύγεται η οποιαδήποτε σύγχυση των όρων και η εξαγωγή λανθασμένων συμπερασμάτων.

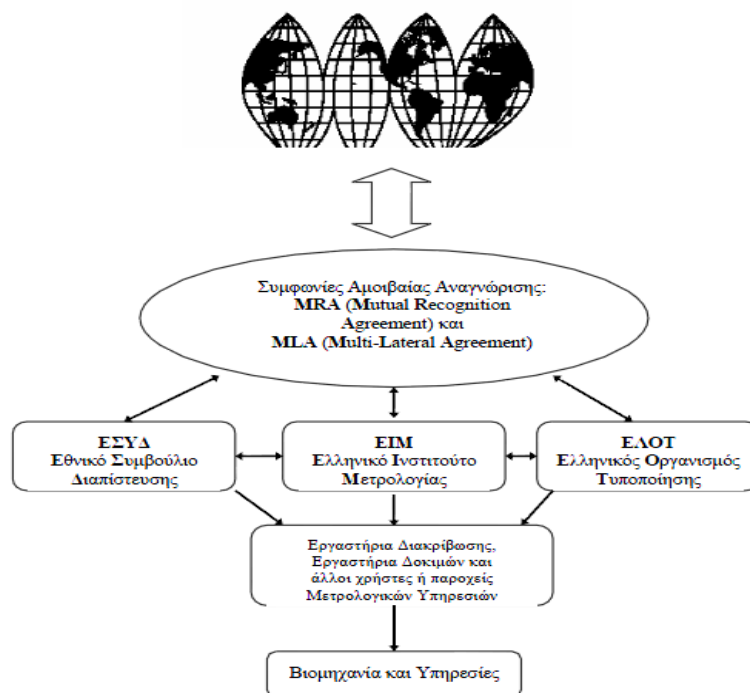
3.1.2 Ιχνηλασιμότητα Μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια των διακριβώσεων ακολουθούνται οδηγίες για τη συμμόρφωση σε βασικές απαιτήσεις που ορίζουν κάποια πρότυπα αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο, τα αποτελέσματα της κάθε διακρίβωσης είναι εύκολο να συγκριθούν με άλλα αποτελέσματα ή πρότυπα για την απόδειξη της τεχνικής επάρκειας του εργαστηρίου ή της βιομηχανίας. Η ανάγκη της επικοινωνίας, της κατανόησης και αποδοχής, μέσω συμβατικών παραδοχών, των μετρητικών αποτελεσμάτων που πραγματοποιούνται από διαφορετικούς χρήστες σε διάφορους χρόνους σε όλο τον κόσμο, οδήγησε στον ορισμό της έννοιας της ιχνηλασιμότητας των μετρήσεων.

Ως ιχνηλασιμότητα (traceability) ορίζεται η ιδιότητα του αποτελέσματος μίας μέτρησης μέσω της οποίας, το αποτέλεσμα μπορεί να συσχετισθεί / συγκριθεί με τη μονάδα της μέτρησης στο σύστημα SI, διαμέσου μίας αδιάσπαστης αλυσίδας συγκρίσεων, με δηλωμένη την αβεβαιότητα της κάθε σύγκρισης (9). Η ιχνηλασιμότητα μίας μέτρησης αποτελεί τον πυρήνα της αξίας χρήσης της πληροφορίας που αντλείται από τη μέτρηση, και αποτελεί μία αδιάσπαστη αλυσίδα, η οποία εξασφαλίζει ότι κάθε αποτέλεσμα μέτρησης ή η τιμή ενός προτύπου συνδέεται με αναφορά σε ένα υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας και καταλήγει στο τελικό, ύψιστο επίπεδο μέτρησης του πρωτεύοντος προτύπου.

Στην κορυφή της ιεραρχικής πυραμίδας των αλληλοσυγκρίσεων βρίσκονται τα Πρωτεύοντα Πρότυπα που υλοποιούν τις μονάδες μετρήσεων. Στην πορεία προς τη βάση της πυραμίδας εντοπίζονται τα Πρότυπα Αναφοράς, τα Πρότυπα Εργασίας μέχρι τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία και τις υπηρεσίες. Βέβαια, ακόμα και στο υψηλότερο επίπεδο του Πρωτεύοντος Προτύπου, είναι αδύνατη η υλοποίηση μίας μετρήσιμης ποσότητας με μηδενική απροσδιοριστία, παρά την τεχνολογική υπεροχή και το εξειδικευμένο τεχνικό και επιστημονικό έργο. Έτσι, από στάδιο σε στάδιο προς τη βάση της πυραμίδας, η απροσδιοριστία της κάθε φορά μετρούμενης ποσότητας αυξάνεται, καθώς υπεισέρχονται ολοένα και περισσότερες πηγές σφαλμάτων.

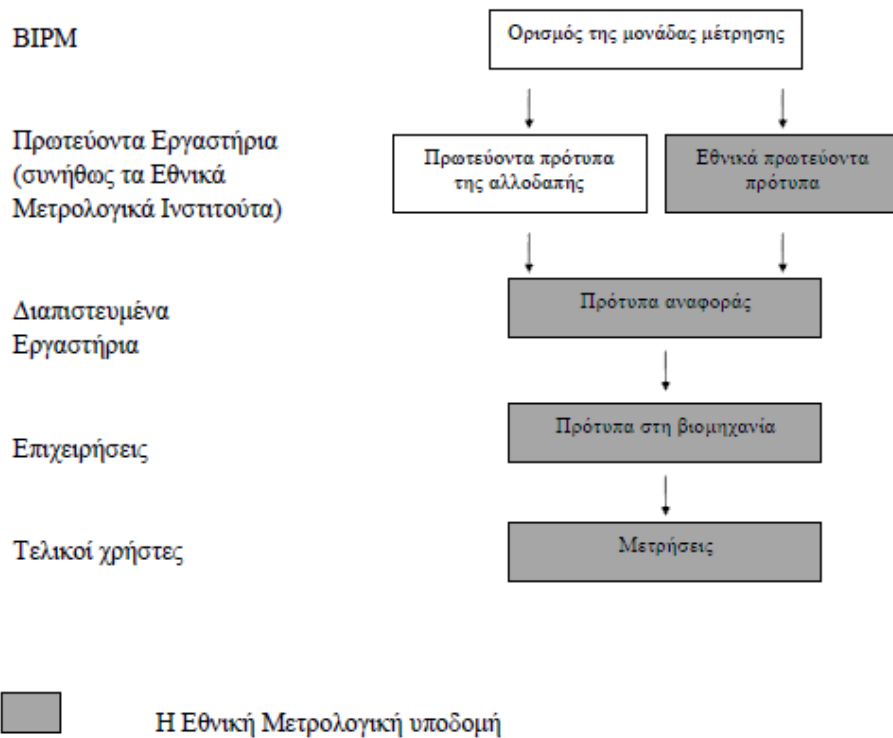
Όλες οι διακριβώσεις που πραγματοποιούνται στα διάφορα στάδια, υποστηρίζονται από ένα πλέγμα υποδομών, που αποτελούν το Εθνικό Μετρολογικό Σύστημα της κάθε χώρας. Σε αυτό το σύστημα συμμετέχουν Οργανισμοί Τυποποίησης, Φορείς Διαπίστευσης, Εθνικά Μετρολογικά Ινστιτούτα με εργαστηριακές υποδομές, ιδιωτικά εργαστήρια διακρίβωσης και υπηρεσίες Νομικής Μετρολογίας. Παράλληλα, υπάρχουν Διεθνείς Οργανισμοί, μη κρατικές οργανώσεις, ενώσεις και συνεργασίες που προωθούν τη συνεργασία και την αμοιβαία αναγνώριση. Στο διάγραμμα του Σχήματος 11 φαίνεται το Ελληνικό Μετρολογικό Σύστημα και η σύνδεσή του με το Διεθνές Μετρολογικό Σύστημα, καθώς και τα εργαστήρια διακρίβωσης που αποτελούν κρίκο αυτής της αλυσίδας (10).



Σχήμα 11: Το Εθνικό Μετρολογικό Σύστημα της Ελλάδας και η σύνδεσή του με το Διεθνές Μετρολογικό Σύστημα [Πηγή: ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ: Σημασία-Απαιτήσεις-Χρήση, Γ.Ε. Ναβροζίδης, Χ. Μήτσας, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας]

3.1.3 Πρότυπα Μετρήσεων

Πρότυπο μέτρησης είναι ένα υλικό μέτρησης, μετρητικό όργανο, υλικό αναφοράς ή ακόμη και σύστημα μετρήσεων το οποίο ορίζει, υλοποιεί, τηρεί και αναπαράγει μία μονάδα μέτρησης, μία ή περισσότερες τιμές ενός μεγέθους μέτρησης και χρησιμοποιείται ως αναφορά. Τα διαφορετικά επίπεδα των προτύπων αποτυπώνονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Αλυσίδα Ιχνηλασιμότητας [Πηγή: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, Γ. Ναβροζίδης, Δ. Κυριακίδης, Γ. Λουκάς, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας]

Τα πρότυπα μετρήσεων διακρίνονται κυρίως σε πέντε κατηγορίες. Πρώτα στην ιεραρχία βρίσκονται τα Πρωτεύοντα Πρότυπα, που είναι σαφώς καθορισμένα ή ευρέως αναγνωρισμένα ως αυτά που έχουν την υψηλότερη μετρολογική ποιότητα και η τιμή τους είναι αποδεκτή χωρίς καμία άλλη αναφορά σε άλλα πρότυπα του ίδιου μεγέθους. Συχνά, τα Πρωτεύοντα Πρότυπα συμπίπτουν με τα Εθνικά Πρότυπα. Επιπλέον, υπάρχουν και τα Πρότυπα Αναφοράς, τα οποία έχουν την υψηλότερη μετρολογική ποιότητα σε μία δεδομένη τοποθεσία ή σε έναν δεδομένο οργανισμό. Από τα πρότυπα αυτά εξάγονται οι πραγματοποιούμενες μετρήσεις και γι' αυτό πρέπει να διακριβώνονται περιοδικά. Έπειτα ακολουθούν τα Δευτερεύοντα Πρότυπα, στα οποία επισυνάπτεται μία τιμή μετά από σύγκριση με τα πρωτεύοντα πρότυπα του ίδιου μεγέθους, τα Πρότυπα Μεταφοράς, που

χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσα κατά την σύγκριση προτύπων, και τέλος, τα Πρότυπα Εργασίας, τα οποία χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση για τη διακρίβωση ή τον έλεγχο των μεγεθών των υλικών, των μετρητικών συσκευών ή των υλικών αναφοράς.



Σχήμα 13: Ιεράρχηση Προτύπων Μέτρησης σε Εθνικό Σύστημα Μετρολογίας [Πηγή: ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ: Εκτίμηση - Υπολογισμός - Έκφραση, Γ. Ναβροζίδης, Χ.Μήτσας, Ε. Φλουδά, Μ. Αναγνώστου, Φ. Στέλε, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας]

Σε ένα εθνικό σύστημα μετρολογίας, όπου τα όλα τα μεγέθη εντάσσονται σε πυραμίδες ιχνηλασιμότητας, εξασφαλίζονται οι εσωτερικές αλληλοσυγκρίσεις με κορυφή της κάθε πυραμίδας τα Εθνικά Πρότυπα. Το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, ως ανώτατος φορέας της κάθε χώρας, είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη, τη διατήρηση και την συγκριτικότητα των Εθνικών Προτύπων μέτρησης, καθώς και για την υλοποίηση και τη διανομή των φυσικών μονάδων μέτρησης στη χώρα. Τέλος, το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας είναι αυτό που εγγυάται για την ιχνηλασιμότητα και το συσχετισμό ακρίβειας των μετρήσεων στα Εθνικά Πρότυπα, με σκοπό την υποστήριξη της βιομηχανικής παραγωγής σε θέματα ποιότητας και άλλων τομέων που έχουν ανάγκη από μετρήσεις, όπως η υγεία, το εμπόριο, το περιβάλλον (11).

3.2 Εργαστήρια, Είδη και Συχνότητα Διακρίβωσης

Λόγω της σημασίας της μέτρησης στην ποιότητα των εργαστηριακών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων, η ανάγκη ιχνηλασιμότητας καθίσταται το ίδιο σημαντική όσο η ίδια η μέτρηση. Η μετρολογική επάρκεια σε οποιοδήποτε επίπεδο ακρίβειας στην αλυσίδα ιχνηλασιμότητας βασίζεται στη διαδικασία διακρίβωσης. Για την ορθή εφαρμογή των διαδικασιών διακρίβωσης, οι οποίες διασφαλίζουν τη μετρητική ιχνηλασιμότητα στα αντίστοιχα πρότυπα, κατηγοριοποιούνται τα εργαστήρια και ορίζονται τα είδη και τα επίπεδα διακρίβωσης.

3.2.1 Εργαστήρια Διακρίβωσης

Κάθε χώρα έχει ένα Ινστιτούτο που έχει ορισθεί με απόφαση της Πολιτείας να τηρεί τα Εθνικά Πρότυπα των μονάδων μέτρησης για ένα ή περισσότερα μεγέθη. Σε ορισμένες χώρες και οικονομίες λειτουργούν κεντρικά συστήματα μετρολογίας με ένα Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας. Από την άλλη πλευρά, σε άλλες χώρες λειτουργούν αποκεντρωμένα συστήματα μετρολογίας με περισσότερα από ένα Εθνικά Ινστιτούτα Μετρολογίας. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, το σύστημα μετρολογίας είναι κεντρικό με το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας να αποτελεί το μοναδικό Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας στη χώρα. Επομένως, είναι αυτό που αντιπροσωπεύει τη χώρα διεθνώς στις σχέσεις με Εθνικά Ινστιτούτα Μετρολογίας άλλων χωρών, με Περιφερειακούς Οργανισμούς Μετρολογίας, καθώς και με το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (Bureau International des Poids et Mesures-BIPM).

Το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας της κάθε χώρας, σύμφωνα με τη μετρολογική της πολιτική, ορίζει πρωτεύοντα εργαστήρια. Αυτά τα εργαστήρια είναι διεθνώς αναγνωρισμένα για την υλοποίηση των βασικών μονάδων μέτρησης σε πρωτεύον επίπεδο ή παράγωγων μονάδων στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο διεθνώς, συμμετέχουν σε συγκρίσεις στο ανώτερο διεθνές επίπεδο και διεξάγουν διεθνώς αναγνωρισμένη έρευνα σε πεδία της μετρολογίας. Επιπλέον, τηρούν και αναπτύσσουν περαιτέρω τις μονάδες μέτρησης με την τήρηση και την ανάπτυξη πρωτευόντων προτύπων.

Παράλληλα με τα πρωτεύοντα εργαστήρια, τα εργαστήρια κατηγοριοποιούνται σε εργαστήρια αναφοράς και διαπιστευμένα εργαστήρια. Ένα εργαστήριο αναφοράς έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί διακριβώσεις σε συγκεκριμένα μεγέθη μέτρησης στο υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας στη χώρα με ιχνηλασιμότητα σε πρωτεύον εργαστήριο. Ένα διαπιστευμένο εργαστήριο έχει αναγνώριση, από ένα τρίτο μέρος, της τεχνικής επάρκειας, της διασφάλισης ποιότητας, και της ανεξαρτησίας του. Παρόλο που η διαπίστευση δεν

είναι υποχρεωτική, πολλές Ευρωπαϊκές Αρχές διασφαλίζουν την ποιότητα των υπηρεσιών, δοκιμών και διακριβώσεων με την απαίτηση διαπίστευσης των εργαστηρίων από φορέα διαπίστευσης (12).

3.2.2 Είδη και Επίπεδα Διακρίβωσης

Η διακρίβωση των διάφορων στοιχείων εξοπλισμού ποικίλει ανάλογα με παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα της μέτρησης, η ακρίβεια της μέτρησης και ο εξοπλισμός του εργαστηρίου ή της βιομηχανίας. Ακόμα, ανάλογα με την εξειδίκευση και την εμπειρία του προσωπικού, με την περιπλοκότητα των συσκευών και με το κόστος της διακρίβωσης, εφαρμόζεται το καταλληλότερο είδος διακρίβωσης για την κάθε περίπτωση. Υπάρχουν, λοιπόν, δύο είδη διακρίβωσης και τέσσερα γενικά επίπεδα ταξινόμησης.

Αρχικά, η διακρίβωση εξοπλισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί από εξωτερικούς παρόχους, δηλαδή από αναγνωρισμένα και διαπιστευμένα εργαστήρια. Αυτού του είδους διακρίβωση ονομάζεται εξωτερική διακρίβωση (επιπέδου 1). Οι απαιτήσεις μίας οποιασδήποτε εταιρείας μπορεί να καθορίσουν απαραίτητη την εξωτερική διακρίβωση, λόγω της καλύτερης απόδοσης ή καλύτερης ικανότητας μετρήσεων που είναι πιθανό να έχει ένα διαπιστευμένο εργαστήριο με ιδανικό εξοπλισμό και συνθήκες μέτρησης.

Στην περίπτωση που η διακρίβωση γίνεται στο εσωτερικό μίας επιχείρησης ή ενός οργανισμού, χρησιμοποιούνται πρότυπα που διαθέτουν οι ίδιες ή οι ίδιοι, αντίστοιχα, και εκτελείται με αυτά μέρος ή ολόκληρη η διακρίβωση του εξοπλισμού. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται εσωτερική διακρίβωση (επιπέδου 2 ή επιπέδου 3), και πραγματοποιείται, συνήθως, από μηχανουργεία, εργαστήρια ή οργανισμούς παραγωγής, όπου χρησιμοποιούνται κατάλληλα πρότυπα για τη διακρίβωση παχύμετρων, μικρόμετρων ή άλλων οργάνων διαστατικής μέτρησης. Όταν το ειδικευμένο προσωπικό του εκάστοτε οργανισμού χρησιμοποιεί πρότυπα αναφοράς ή διακριβωμένο εξοπλισμό και τεκμηριωμένη μέθοδο κατά την εσωτερική διακρίβωση, τότε αυτή κατατάσσεται στο επίπεδο 2. Σε αυτή την περίπτωση, τα πρότυπα ή ο εξοπλισμός, με τον οποίο εκτελείται η διακρίβωση, επιβάλλεται να είναι διακριβωμένα από εργαστήριο που μπορεί να αποδείξει δυνατότητα μέτρησης και ιχνηλασιμότητα. Η εσωτερική διακρίβωση επιπέδου 3 ξεκινά με εντολή του επικεφαλής ποιοτικού ελέγχου και περιλαμβάνει έναν ποιοτικό έλεγχο με κατάλληλα βαθμονομημένο εξοπλισμό και τεκμηριωμένη διαδικασία.

Βέβαια, δεν είναι λίγες οι φορές που προτιμάται ένας συνδυασμός της εσωτερικής και της εξωτερικής διακρίβωσης, με άλλα λόγια μία συνδυασμένη διακρίβωση. Με αυτό τον τρόπο, επιλέγονται τα όργανα που θα διακριβωθούν εσωτερικά και εκείνα που θα

διακριβωθούν εξωτερικά. Εκτός, από τις δυνατότητες του κάθε οργανισμού, που αποτελούν το κριτήριο επιλογής της εσωτερικής ή της εξωτερικής διακρίβωσης, σημαντικός παράγοντας είναι και η αναλογία κόστους της εσωτερικής έναντι της εξωτερικής διακρίβωσης.

Επιπλέον, σημειώνεται και μία διακρίβωση επιπέδου 4, που είναι μία οπτική επιθεώρηση και εφαρμόζεται όταν δεν απαιτούνται μετρήσεις. Εκτελείται για τη διαβεβαίωση ότι ο εξοπλισμός πληροί τις απαιτήσεις του κατάλληλου προτύπου, τον έλεγχο καλής κατάστασης του εξοπλισμού, καθώς επίσης και τον έλεγχο της ορθής θέσης των επιμέρους στοιχείων συσκευών που περιλαμβάνουν κινούμενα τμήματα (13).

Παράλληλα, η διακρίβωση χωρίζεται σε ατομική διακρίβωση ή διακρίβωση βρόχου και είτε σε διακρίβωση πάγκου, είτε σε διακρίβωση πεδίου. Κατά την ατομική διακρίβωση, η οποία εκτελείται μόνο σε ένα όργανο, αφού χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι γνωστές τιμές, μετριέται η έξοδος του οργάνου για τις διάφορες τιμές εισόδου, και το όργανο εν τέλει ρυθμίζεται, εάν τα αποτελέσματα της διακρίβωσης το κρίνουν απαραίτητο. Αυτό το είδος διακρίβωσης συνίσταται για όργανα ή συσκευές που λειτουργούν μεμονωμένα και σπανίως αποτελούν μέρος μίας σύνδεσης μεμονωμένων μετρητικών οργάνων.

Η διακρίβωση βρόχου αφορά μία μονάδα που αποτελείται από ένα σύνολο οργάνων και συσκευών, και πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων για κάθε ένδειξη έχοντας συνδεδεμένες όλες τις συσκευές της μονάδας. Όλες οι ενδείξεις καταγράφονται και αν είναι όλες εντός ανοχών, τότε θεωρείται ότι όλος ο βρόχος είναι εντός ανοχών. Αν κάποιο μέρος ή εξάρτημα του βρόχου είναι εκτός ανοχών, τότε εφαρμόζεται διακρίβωση σε αυτό το όργανο ξεχωριστά.

Από την άλλη πλευρά, η διακρίβωση πάγκου είναι μία εξωτερική διακρίβωση, κατά την οποία το μετρητικό όργανο βγαίνει εκτός λειτουργίας, αποσυνδέεται και μεταφέρεται στο εργαστηριακό πάγκο, όπου γίνεται προσομοίωση της μετρητικής διαδικασίας με χρήση των κατάλληλων συσκευών διακρίβωσης. Η διακρίβωση πάγκου εφαρμόζεται, κυρίως, σε δύο περιπτώσεις. Είτε σε καινούριο εξοπλισμό, πριν την εγκατάστασή του, για την εξασφάλιση της ορθής λειτουργίας του, είτε κατά τους περιοδικούς ελέγχους όταν ο εξοπλισμός σταματά να λειτουργεί και αποσυνδέεται για να περάσει τη διαδικασία ελέγχου.

Αντίθετα, στη διακρίβωση πεδίου, τα μετρητικά όργανα ή συσκευές δεν αφαιρούνται από τη διαδικασία και τη σύνδεση, ώστε η διακρίβωσή τους να πραγματοποιηθεί στο χώρο λειτουργίας τους. Σε αυτή την περίπτωση ο εξοπλισμός ελέγχεται κάτω από πραγματικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Η διαδικασία αυτή είναι αντίθετη της διαδικασίας διακρίβωσης πάγκου, παρόλο που μπορεί να αφορά τον ίδιο εξοπλισμό.

Μάλιστα, δεν είναι λίγες οι φορές που για τον ίδιο εξοπλισμό προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα με την εκτέλεση των διακριβώσεων πάγκου και πεδίου. Γι' αυτό το λόγο, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο αυτών τρόπων διακρίβωσης είναι αλληλένδετα μεταξύ τους και αντιστρόφως ανάλογα (14).

Τέλος, υπάρχει και η διαδικασία διακρίβωσης κατά την οποία ανάμεσα στα σημεία διακρίβωσης ενός οργάνου πρέπει να συμπεριλαμβάνονται και μετρήσεις που λαμβάνονται στο 0, 25, 50, 75 και 100 τοις εκατό του εύρους διακρίβωσης. Αυτού του είδους διακριβώσεις ονομάζονται διακριβώσεις πέντε σημείων. Βέβαια, για να θεωρηθούν πλήρεις οι διακριβώσεις πέντε σημείων, είναι απαραίτητη η λήψη μετρήσεων τόσο κατά την αύξηση όσο και κατά τη μείωση της κλίμακας.

3.2.3 Συχνότητα Διακρίβωσης - Επαναδιακρίβωση

Προϋπόθεση για τη διατήρηση της απόδοσης ή της ικανότητας ενός οργανισμού να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα μετρήσεων θεωρείται η τακτική διακρίβωση και ο προσδιορισμός του μέγιστου χρονικού διαστήματος που θα πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ των διαδοχικών διακριβώσεων (επαναδιακριβώσεων). Κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους θεωρούνται χρήσιμες και πραγματοποιούνται επαναδιακριβώσεις είναι η βελτίωση της εκτίμησης της απόκλισης της τιμής αναφοράς και της τιμής που λαμβάνεται μέσω ενός οργάνου και της αβεβαιότητας σε αυτή την απόκλιση, κατά τη στιγμή που το όργανο χρησιμοποιείται, καθώς και η επιβεβαίωση της ύπαρξης μίας πιθανής μεταβολής του οργάνου μέτρησης, που θα μπορούσε να προκαλέσει αμφιβολία για τα μετρητικά αποτελέσματα του χρονικού διαστήματος που προηγήθηκε.

Η συχνότητα των διαδοχικών διακριβώσεων ουσιαστικά καθορίζεται από τους υπεύθυνους του κάθε οργανισμού, εξαρτάται από το επίπεδο χρήσης του εξοπλισμού και ορίζεται βάσει κάποιων μεθόδων που λαμβάνουν υπόψη ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων. Στους πιο σημαντικούς από αυτούς περιλαμβάνεται ο τύπος και η ακρίβεια του οργάνου, η επιθυμητή ακρίβεια των μετρήσεων, οι συστάσεις του κατασκευαστή, τα στοιχεία προηγούμενων διακριβώσεων, το ιστορικό των επισκευών και της συντήρησης, η συχνότητα της χρήσης των οργάνων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες χρήσεις και αποθήκευσης, η συχνότητα και η ποιότητα των ενδιάμεσων ελέγχων.

Η ακριβής εκτίμηση της συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στην επιλογή της συχνότητας διακρίβωσης είναι δύσκολη, ιδιαίτερα στην περίπτωση οργάνου που διακριβώνεται πρώτη φορά. Για το λόγο αυτό, το ιστορικό διακρίβωσης έχει ιδιαίτερη αξία, καθώς από αυτό μπορεί να εξαχθεί η τάση φθοράς και απόκλισης του οργάνου κάτω από τις δεδομένες

συνθήκες χρήσης. Σε όργανα που διακριβώνονται για πρώτη φορά ορίζεται ένα αρχικό διάστημα επαναδιακρίβωσης, το οποίο βασίζεται σε στατιστικά στοιχεία συμπεριφοράς ομοειδών οργάνων, ενώ στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα της επόμενης διακρίβωσης γίνεται εκτίμηση της σταθερότητας του οργάνου και η συχνότητα διακρίβωσης μπορεί να επανακαθορισθεί με μεγαλύτερη βεβαιότητα (11).

3.3 Διαδικασίες Διακρίβωσης

Πέρα από τον κατάλληλο εξοπλισμό και τις δεξιότητες του προσωπικού των οργανισμών ή των εργαστηρίων, στα οποία λαμβάνει χώρα μία διακρίβωση, πρέπει να ακολουθούνται κάποιοι κανόνες και διαδικασίες, με σκοπό την ομοιομορφία και τη μελλοντική δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων, καθώς και την εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων. Πιο συγκεκριμένα, για την Ελλάδα, σύμφωνα με το Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης (Ε.ΣΥ.Δ) ορίζονται οι προδιαγραφές των διαδικασιών διακρίβωσης.

3.3.1 Βασική Διαδικασία Διακρίβωσης

Κατά τη διακρίβωση, οποιουδήποτε είδους, οι μέθοδοι και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται, όπως και ο εξοπλισμός και τα πρότυπα αναφοράς, πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025. Έτσι, σε μία τυπική διαδικασία διακρίβωσης είναι απαραίτητο να περιλαμβάνονται τα ακόλουθα στάδια.

- ▶ Εξακρίβωση του οργάνου, του μετρητή ή του εξοπλισμού δοκιμής ή ολόκληρου του συνόλου, στο οποίο εφαρμόζεται η διαδικασία
- ▶ Προσδιορισμός όλων των προτύπων μέτρησης, υλικών αναφοράς ή του σχετικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της διακρίβωσης
- ▶ Εφαρμογή των διαδικασιών για τον χειρισμό, τη μεταφορά, την αποθήκευση και τη χρήση του εξοπλισμού μέτρησης και των υλικών αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τη διακρίβωση, δίνοντας προσοχή στις λεπτομέρειες της διάρκειας ζωής και των μέτρων πρόληψης μόλυνσης ή απώλειας κάποιου καθοριστικού παράγοντα
- ▶ Εφαρμογή των διαδικασιών για τον χειρισμό, τη μεταφορά, την αποθήκευση και την προετοιμασία των αντικειμένων προς διακρίβωση
- ▶ Τήρηση των απαιτούμενων περιβαλλοντικών συνθηκών και των αντίστοιχων ορίων, παρατήρηση της διαδικασίας για πιθανές διορθώσεις που πρέπει να εφαρμοστούν ως αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών συνθηκών, και κατά περίπτωση, ορισμός της περιόδου σταθεροποίησης πριν τη διακρίβωση

- Αναφορά της μεθόδου ή της διαδικασίας διακρίβωσης με τη μορφή γραπτών οδηγιών και διαγραμμάτων όπου χρειάζεται
- Καταγραφή και ανάλυση των λεπτομερειών που αφορούν τα δεδομένα μέτρησης και βαθμονόμησης
- Ορισμός και έλεγχος των ορίων αποδοχής των δεδομένων βαθμονόμησης για το υπό διακρίβωση αντικείμενο ή ιδιότητα
- Εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων κατά τη διαδικασία της διακρίβωσης
- Εφαρμογή των διαδικασιών για την επιλογή διαστημάτων επαναδιακρίβωσης
- Προσδιορισμός των διαδικασιών ελέγχου του εξοπλισμού και των υλικών αναφοράς μεταξύ των διαδοχικών διακριβώσεων
- Καταγραφή του αριθμού αναγνώρισης, του αριθμού των σελίδων και της ημερομηνίας, καθώς και του αρμόδιου προσώπου για τη διαδικασία (15).

3.3.2 Πιστοποιητικά Διακρίβωσης

Η διακρίβωση ενός μετρητικού οργάνου είναι η μόνη διαδικασία που παρέχει πληροφορίες επίδοσης αυτού, και οι πληροφορίες αυτές είναι έγκυρες μόνο κατά τη χρονική στιγμή του ελέγχου και μόνο υπό καθορισμένες συνθήκες. Τα αποτελέσματα κάθε διακρίβωσης πρέπει να παρουσιάζονται με σαφήνεια, με αντικειμενικότητα και σύμφωνα με οποιεσδήποτε ειδικές οδηγίες των μεθόδων διακρίβωσης. Επιπλέον, τα πιστοποιητικά που περιέχουν αποτελέσματα διακρίβωσης είναι απαραίτητο να περιλαμβάνουν όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όπως και όλες τις πληροφορίες σχετικές με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται.

Τα βασικά στοιχεία που πρέπει να περιέχει κάθε πιστοποιητικό διακρίβωσης παρουσιάζονται παρακάτω.

- Ο τίτλος «Πιστοποιητικό Διακρίβωσης»
- Το όνομα και τη διεύθυνση του εργαστηρίου ή του οργανισμού, όπου εκτελέστηκαν οι διακριβώσεις
- Μία μοναδική απόδοση ταυτότητας, όπως ο αριθμός σειράς της έκδοσης του πιστοποιητικού, ένα στοιχείο αναγνώρισης σε κάθε σελίδα, προκειμένου να διασφαλίζεται ότι η σελίδα αναγνωρίζεται ως μέρος του πιστοποιητικού διακρίβωσης, καθώς και έναν σαφή προσδιορισμό του τέλους του πιστοποιητικού
- Το όνομα και τη διεύθυνση του πελάτη, σε περίπτωση εξωτερικής διακρίβωσης
- Ο προσδιορισμός της ταυτότητας της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε
- Η περιγραφή, η κατάσταση και ο σαφής προσδιορισμός της ταυτότητας του αντικειμένου που διακριβώθηκε

- Η ημερομηνία παραλαβής του αντικειμένου της διακρίβωσης, όπου αυτό είναι κρίσιμο για την εγκυρότητα και την εφαρμογή των αποτελεσμάτων, καθώς και την ημερομηνία εκτέλεσης της διακρίβωσης
- Αναφορά στο σχέδιο και στις διαδικασίες δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκαν από το εργαστήριο ή από άλλους φορείς, όπου αυτά είναι σχετικά με την εγκυρότητα ή την εφαρμογή των αποτελεσμάτων
- Τα αποτελέσματα των διακριβώσεων και όπου ενδείκνυται τις μονάδες μέτρησης
- Τα ονόματα, τις ιδιότητες και τις υπογραφές των προσώπων που εξουσιοδοτούν τη χορήγηση του πιστοποιητικού διακρίβωσης
- Μία δήλωση ότι τα αποτελέσματα σχετίζονται μόνο με τα αντικείμενα που διακριβώθηκαν, όπου είναι σχετικό
- Οι συνθήκες, για παράδειγμα οι περιβαλλοντικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες έγιναν οι διακριβώσεις, οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων
- Η αβεβαιότητα της μέτρησης ή/και η δήλωση συμμόρφωσης με καθορισμένη μετρολογική προδιαγραφή ή με προτάσεις αυτής
- Απόδειξη ιχνηλασιμότητας των μετρήσεων
- Μία πρόταση ότι το πιστοποιητικό απαγορεύεται να αναπαράγεται παρά μόνο ολοκληρωμένο και μετά από έγγραφη εξουσιοδότηση του εργαστηρίου που το εκδίδει
- Η σφραγίδα του εργαστηρίου ή του οργανισμού

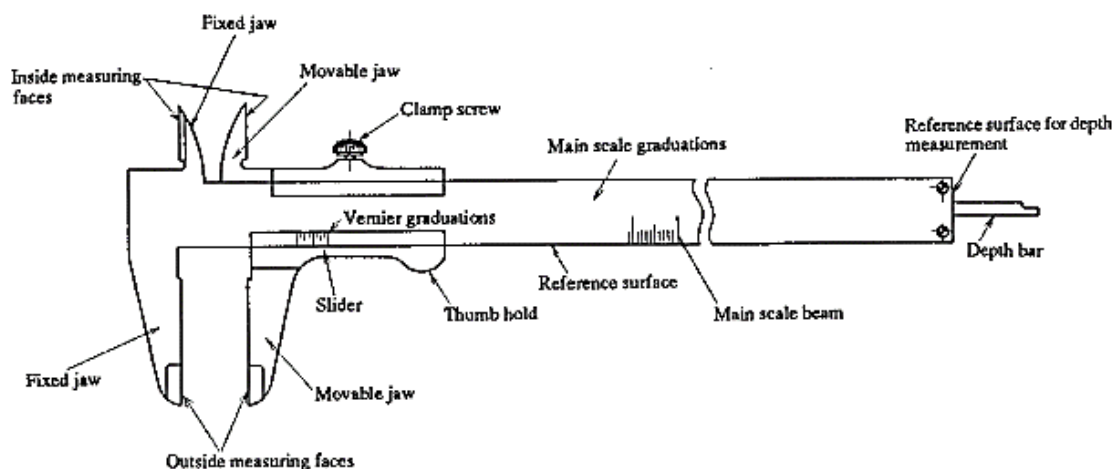
Σημειώνεται πως η μορφή των πιστοποιητικών πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει κάθε τύπο διακρίβωσης που εκτελείται και να ελαχιστοποιεί την πιθανότητα παρανόησης ή κακής χρήσης (15).

Κεφάλαιο 4: Διακρίβωση Παχύμετρων

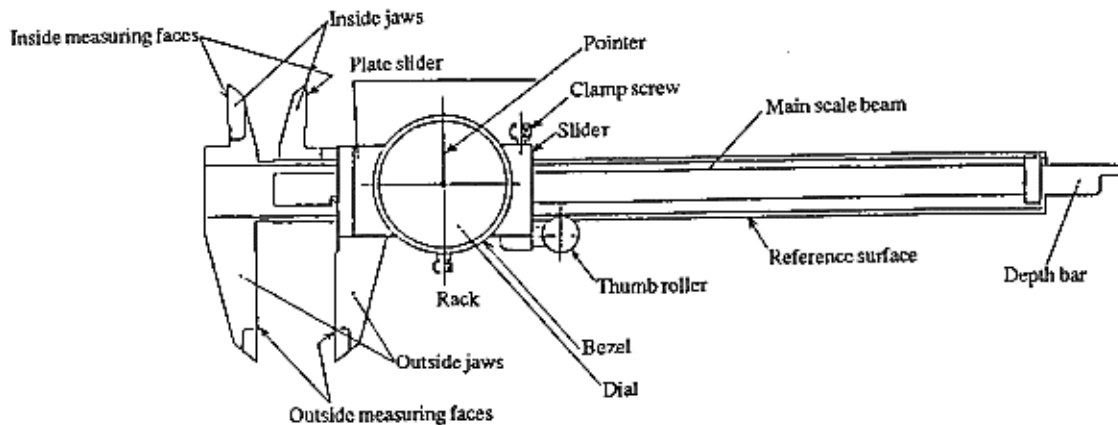
4.1 Λειτουργία Παχύμετρων

Με την πάροδο του χρόνου και λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης, παρατηρείται σημαντική ανάπτυξη στα μετρητικά όργανα, τα οποία αναβαθμίζονται συνεχώς με σκοπό τη διευκόλυνση του ανθρώπου, ιδιαίτερα προς την κατεύθυνση της ακρίβειας των μετρήσεων που συνεισφέρει σημαντικά στην ποιότητα της ζωής. Βέβαια, για την πραγματοποίηση μετρήσεων που αποδίδουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική τιμή ενός μετρούμενου μεγέθους, είναι απαραίτητη η ορθή χρήση των μετρητικών οργάνων, μέσω της οποίας ελαχιστοποιούνται κάποιοι παράγοντες που προκαλούν ανακριβείς μετρήσεις.

Όσον αφορά το παχύμετρο, η ορθή χρήση και η μέγιστη απόδοσή του βασίζεται στις αρχές λειτουργίας του και στις πηγές αβεβαιότητας των μετρήσεών του. Το παχύμετρο, λοιπόν, ή αλλιώς βερνιέρος, είναι ένα μετρητικό όργανο μήκους, το οποίο αποτελείται από μία κύρια κλίμακα, μία κλίμακα βερνιέρου, μία σταθερή και μία συρόμενη σιαγόνα. Διακρίνεται σε διάφορους τύπους ανάλογα με τον τρόπο ανάγνωσής του, που πραγματοποιείται είτε μέσω καντράν, είτε μέσω ψηφιακού δείκτη. Με τη χρήση ενός παχύμετρου μπορούν να γίνουν μετρήσεις τριών ειδών, εξωτερικών ή εσωτερικών διαστάσεων, ή μετρήσεις βάθους αντικειμένων. Στα Σχήματα 14 και 15 παρουσιάζονται τα μέρη ενός τυπικού αναλογικού παχύμετρου και ενός παχύμετρου με καντράν, αντίστοιχα.



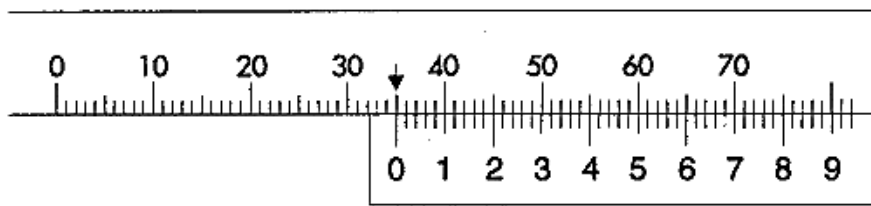
Σχήμα 14: Παχύμετρο για εξωτερικές, εσωτερικές και μετρήσεις βάθους με κινούμενο μέρος που κλειδώνει μέσω βίδας ή συσκευής σύσφιξης [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]



Σχήμα 15: Παχύμετρο με καντράν - αναλογική συσκευή ένδειξης με κυκλική κλίμακα [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

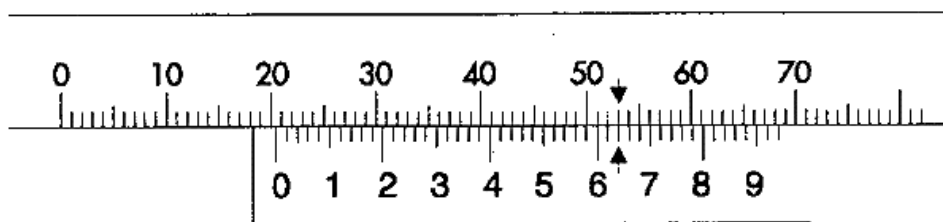
Παράλληλα, κατασκευάζονται παχύμετρα διάφορων μεγεθών με εύρη από 100 mm έως 3000 mm. Σε γενικές γραμμές, τα παχύμετρα με εύρη έως και 300 mm κατηγοριοποιούνται στα μικρά παχύμετρα, ενώ τα υπόλοιπα με μεγαλύτερα εύρη εντάσσονται στα μεγάλα παχύμετρα. Επιπλέον, οι συνήθεις διακριτότητες των παχύμετρων είναι 0.05 mm για ένα τυπικό παχύμετρο, 0.02 mm για ένα παχύμετρο με καντράν και 0.01 mm για ένα ηλεκτρονικό παχύμετρο.

Οι μετρήσεις με ένα τυπικό παχύμετρο προκύπτουν από την ανάγνωση δύο κλιμάκων, της κύριας κλίμακας και της κλίμακας βερνιέρου. Η κλίμακα βερνιέρου επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων που είναι μικρότερες από τα διαστήματα μεταξύ των διαβαθμίσεων της κύριας κλίμακας. Γι' αυτό το λόγο, το αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με την εύρεση της διαβάθμισης της κλίμακας βερνιέρου που ευθυγραμμίζεται καλύτερα με μία διαβάθμιση στην κύρια κλίμακα. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 16 απεικονίζεται η περίπτωση όπου η διαβάθμιση του μηδενός στην κλίμακα βερνιέρου ευθυγραμμίζεται απόλυτα με μία διαβάθμιση της κύριας κλίμακας.



Σχήμα 16: Ανάγνωση ακέραιου (35,00 mm) [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

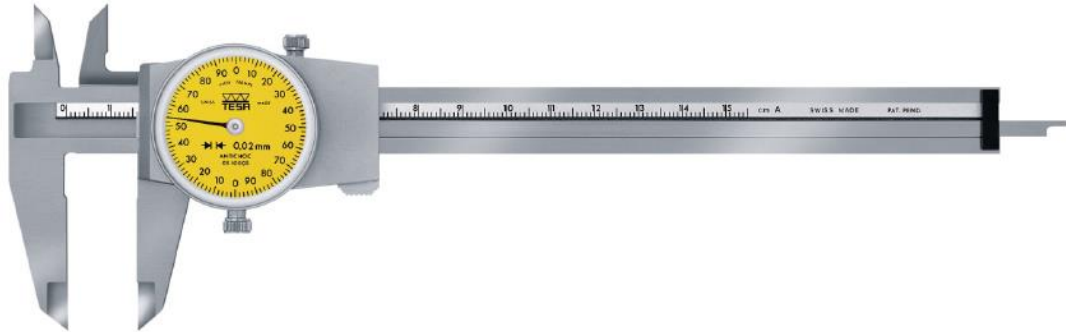
Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται μία περίπτωση κατά την οποία το μηδέν της κλίμακας βερνιέρου, διακριτότητας 0.01 mm, δεν ευθυγραμμίζεται απόλυτα με κάποια διαβάθμιση της κύριας κλίμακας. Σε τέτοιες περιπτώσεις ακολουθείται μία διαδικασία με εκκίνηση την εύρεση της διαβάθμισης της κύριας κλίμακας, η οποία είναι πιο κοντά στην ευθυγράμμιση με το μηδέν της κλίμακας βερνιέρου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 17, το μηδέν της κλίμακας βερνιέρου βρίσκεται ανάμεσα στο 20 και το 21. Η ορθή τιμή που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, λοιπόν, είναι το 20. Έπειτα, ακολουθεί η εύρεση των διαβαθμίσεων των δύο κλιμάκων που ευθυγραμμίζονται απόλυτα. Στο παράδειγμα του Σχήματος 17, αυτό συμβαίνει για την τιμή 64 της κλίμακας βερνιέρου. Συνεπώς, η ανάγνωση της μέτρησης που προκύπτει είναι $20 \text{ mm} + 0,64 \text{ mm} = 20,64 \text{ mm}$.



Σχήμα 17: Ανάγνωση μέτρησης [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

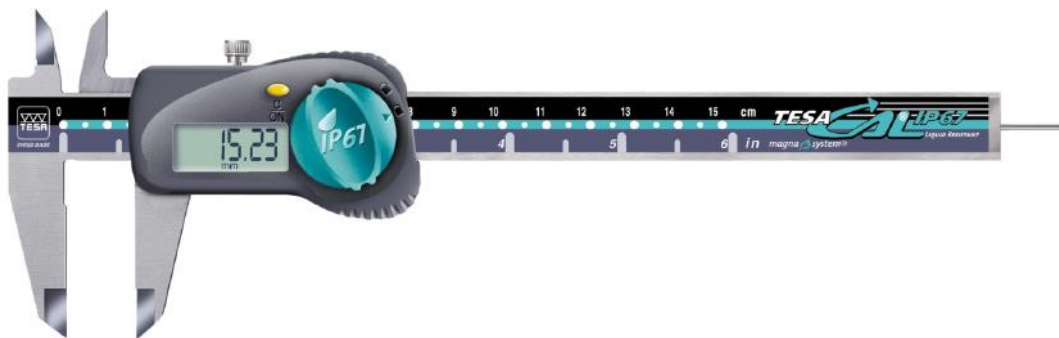
Ευρεία είναι και η χρήση των παχύμετρων με καντράν, εφόσον παρέχουν μία ευκολότερη μέθοδο ανάγνωσης εξασφαλίζοντας μία γρηγορότερη μέτρηση. Η ανάγνωση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους γίνεται με την πρόσθεση της διαβάθμιση του δείκτη του καντράν και της ένδειξης της κύριας κλίμακας. Για την ορθή χρήση τέτοιου είδους παχύμετρου είναι απαραίτητη η διατήρηση της καθαρότητας της οδοντωτής βάσης, η οποία είναι πιθανό να

προκαλέσει άλμα στον οδοντωτό τροχό και συνεπώς να οδηγήσει σε μηδενική ένδειξη του δείκτη του καντράν.



Σχήμα 18: Παχύμετρο με καντράν [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

Τέλος, τα ηλεκτρονικά παχύμετρα είναι πλέον τα πιο διαδεδομένα, καθώς παρέχουν την πιο εύκολη και γρήγορη ανάγνωση. Με τη χρήση ενός γραμμικού κωδικοποιητή ως σύστημα ανίχνευσης της μετατόπισης, εμφανίζει την τιμή του μετρούμενου μεγέθους στην ψηφιακή οθόνη του παχύμετρου. Αυτός ο γραμμικός κωδικοποιητής μπορεί να είναι χωρητικός, επαγωγικός ή μαγνητικός, και σε αυτόν οφείλεται η βελτιωμένη λειτουργικότητα αυτού του είδους παχύμετρου (16).



Σχήμα 19: Ηλεκτρονικό Παχύμετρο με Ψηφιακό Δείκτη [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

4.2 Προσωπικό και Εξοπλισμός Διακρίβωσης Παχύμετρων

Η απλότητα στη χρήση και η μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων που εξασφαλίζει ένα παχύμετρο, το καθιστούν ως ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία σε εργαστήρια και βιομηχανίες. Έτσι,

για τη διατήρηση της ποιότητάς του είναι απαραίτητη η διακρίβωσή του ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το προσωπικό που μπορεί να υλοποιήσει τη διακρίβωση τέτοιων μετρητικών οργάνων, πρέπει να είναι εκπαιδευμένο έτσι ώστε να μπορεί να ακολουθήσει πιστά όλες τις διαδικασίες που απαιτούνται για την διεξαγωγή μίας διακρίβωσης. Η ικανότητα λήψης μετρήσεων ακριβείας, η χρήση των προτύπων διακρίβωσης και όλου του εξοπλισμού διακρίβωσης, καθώς και η διαδικασία υπολογισμού της τυπικής αβεβαιότητας του μετρούμενου μεγέθους αποτελούν προϋποθέσεις για την επιλογή του προσωπικού που θα επιτελέσει τη διακρίβωση. Παράλληλα, το προσωπικό πρέπει να είναι εκπαιδευμένο στη διατήρηση των συνθηκών και των προφυλάξεων που πρέπει να τηρούνται κατά τη διάρκεια μίας διακρίβωσης.

Εκτός από τις προϋποθέσεις που αφορούν το προσωπικό εκτέλεσης μίας διακρίβωσης, υπάρχουν και οι συνθήκες που πρέπει να τηρούνται ως προς τον εξοπλισμό της διακρίβωσης, δηλαδή το μετρητικό όργανο που διακριβώνεται και τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται. Ο χώρος στον οποίο λαμβάνει χώρα η διακρίβωση ελέγχεται ως προς τις περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή τη θερμοκρασία και την υγρασία του. Το σύνολο του εξοπλισμού είναι αναγκαίο να φυλάσσεται και να διακριβώνεται σε θερμοκρασία χώρου 20 ± 2 °C και υγρασία χώρου 50 ± 10 % R.H. Πριν την έναρξη της διαδικασίας της διακρίβωσης ο εξοπλισμός πρέπει να παραμένει στις προαναφερόμενες συνθήκες για κάποιο χρονικό διάστημα για την εξισορρόπησή του με το χώρο, έτσι ώστε η αβεβαιότητα που οφείλεται στη διακύμανση της θερμοκρασίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Ενώ, μετά το πέρας της διακρίβωσης το παχύμετρο πρέπει να καθαρίζεται και φυλάσσεται καταλλήλως, ώστε να αποφεύγονται οι γρατζουνιές και οι λεκέδες που καθιστούν δύσκολη την ανάγνωσή του και ανομοιογενή την κίνηση ολίσθησής του.

Για τη διακρίβωση ενός παχύμετρου χρησιμοποιούνται πρότυπα ή διακριβωμένα όργανα ανάλογα με τον επιθυμητό έλεγχο. Η κλίμακα του παχύμετρου ελέγχεται με πρότυπα πλακίδια ή ράβδους, τα οποία προσδιορίζουν τη μετρητική αβεβαιότητα που προκύπτει μέσω της διαφοράς της ένδειξης του παχύμετρου και της ονομαστικής τιμής των προτύπων. Ενώ, για τη μέτρηση της παραλληλότητας και της επιπεδότητας του παχύμετρου χρησιμοποιούνται οπτικά πλακίδια (optical parallels και optical flats, αντίστοιχα). Οποιοδήποτε πρότυπο, όργανο ή συσκευή που χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση, είναι απαραίτητο να είναι διακριβωμένο ώστε να εξασφαλίζεται η ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων σε εθνικά ή διεθνή πρότυπα.

4.3 Διαδικασία Διακρίβωσης Παχύμετρου

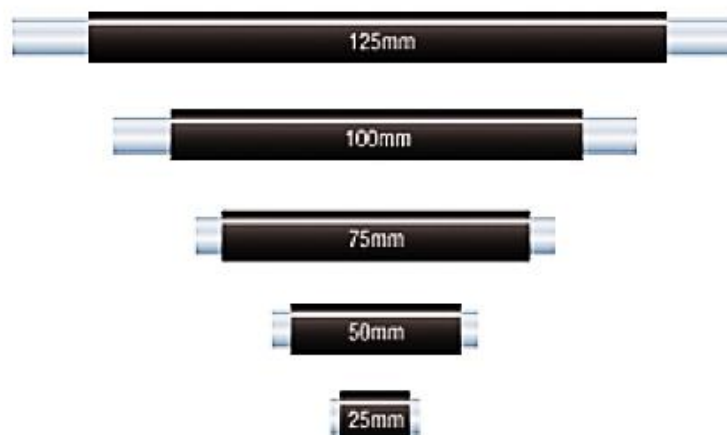
Οι παράγοντες που επιδρούν στη λειτουργία ενός παχύμετρου και προκαλούν αποκλίσεις ανάμεσα στην μετρούμενη τιμή και την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, χωρίζονται στα σφάλματα λόγω κατασκευής του παχύμετρου, τα σφάλματα παράλλαξης, και τα σφάλματα λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών και της δύναμης μέτρησης. Αυτοί οι παράγοντες έχουν ως συνέπεια την αβεβαιότητα των μετρήσεων, η οποία είναι μία αριθμητική εκτίμηση της πιθανής περιοχής του σφάλματος των μετρήσεων. Για την εκτίμηση αυτής της μετρητικής αβεβαιότητας πραγματοποιείται η διακρίβωση των παχύμετρων, καθώς κανένα μετρητικό όργανο δεν μπορεί να κατασκευαστεί έτσι ώστε να είναι ανεπηρέαστο από την επίδραση σφαλμάτων.

Πριν την έναρξη της διαδικασίας της διακρίβωσης με τη λήψη των μετρήσεων, γίνεται έλεγχος και προετοιμασία του παχύμετρου. Επιθεωρούνται οι πλευρές των σιαγόνων του παχύμετρου για επιφανειακές βλάβες που μπορεί να διαφοροποιήσουν την τιμή που λαμβάνεται για το μετρούμενο μέγεθος. Ελέγχονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες του χώρου διακρίβωσης και αφαιρείται η σκόνη ή καθαρίζεται οτιδήποτε μπορεί να επηρεάσει την επιφάνεια ολίσθησης, της πλευρές των σιαγόνων μέτρησης και τις κλίμακες του οργάνου. Επιπλέον, αν προκύψουν προβλήματα κατά την ολίσθηση με μία δοκιμαστική μέτρηση, επιβάλλεται να διορθωθούν ρυθμίζοντας τη βίδα πίεσης και τη βίδα ρύθμισης στον ολισθητήρα. Τέλος, το όργανο ελέγχεται ως προς την ένδειξη του στο μηδέν, με τοποθέτηση προτύπων ανάμεσα στις επιφάνειες μέτρησης. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί οποιαδήποτε απόκλιση, είναι αναγκαίο να καταγραφεί και αν είναι δυνατό να γίνει η επαναφορά του οργάνου.

Για τη λήψη των απαραίτητων μετρήσεων για την εκτίμηση της μετρητικής αβεβαιότητας του παχύμετρου ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά, κλείνουν οι σιαγόνες και ρυθμίζεται η θέση του μηδενός, ενώ έπειτα ανοίγουν σε μήκος μεγαλύτερο από το μέγεθος του αντικείμενου που θα μετρηθεί. Το υπό μέτρηση αντικείμενο τοποθετείται σε επαφή με τη σταθερή σιαγόνα και όσο το δυνατό πλησιέστερα στην κύρια κλίμακα του παχύμετρου. Στη συνέχεια, το σταθερό μέγεθος του παχύμετρου ευθυγραμμίζεται με την προς μέτρηση διάσταση και η ολισθαίνουσα σιαγόνα έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο. Σε αυτό το σημείο τονίζεται πως οι σιαγόνες πρέπει να έρθουν ομαλά σε επαφή με το μετρούμενο μέγεθος, με αποφυγή άσκησης μεγάλης δύναμης στην κινούμενη σιαγόνα, η οποία μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση είτε του τεμαχίου είτε του πλαισίου του οργάνου. Τέλος, αφού καταγραφεί η αναγραφόμενη τιμή, επαναλαμβάνεται η ανάγνωση του μηδενός. Σε περίπτωση που είναι λανθασμένη, ελέγχεται η πιθανή μεταφορά κάποιου

ρύπου από το μετρούμενο αντικείμενο στις σιαγόνες και αφαιρείται. Κατ' αυτόν τον τρόπο επαναλαμβάνεται η διαδικασία της λήψης των μετρήσεων από το πρώτο βήμα (16).

Για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων ακολουθούνται κάποιες προφυλάξεις, όπως η ομαλή κίνηση του ολισθητήρα, η αποφυγή εφαρμογής μεγάλης δύναμης μέτρησης και η μέτρηση των αντικειμένων με τη χρήση των σιαγόνων που είναι πιο κοντά στην κύρια κλίμακα του παχύμετρου. Στη συγκεκριμένη διαδικασία διακρίβωσης που πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό παχύμετρο μηχανουργείου εύρους 300 mm, με τήρηση των προαναφερθέντων προϋποθέσεων και των βημάτων που ακολουθούνται πριν και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν πρότυπες ράβδοι για τη διεξαγωγή του υπολογισμού της μετρητικής αβεβαιότητας. Οι πρότυπες αυτές ράβδοι συνοδεύονται από έκθεση επιθεώρησης, ενώ οι μετρητικές επιφάνειές τους είναι επίπεδες και οι λαβές τους θερμομονωτικές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 20. Τα ονομαστικά μήκη των πρότυπων ράβδων, που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων του υπό διακρίβωση παχύμετρου, είναι 25, 50, 75, 150, 200, 300 mm.



Σχήμα 20: Πρότυπες Ράβδοι [Πηγή: Standard Gage]

4.4 Υπολογισμός Μετρητικής Αβεβαιότητας Παχύμετρου

Η αβεβαιότητα που μπορεί να προκύψει κατά τη χρήση ενός παχύμετρου είναι πιθανό να πηγάζει από τη μη εφαρμογή των διορθώσεων για διακριβωμένα σφάλματα, τα σφάλματα λόγω επιπεδότητας ή παραλληλότητας των επιφανειών, τα σφάλματα λόγω διακριτότητας και τα σφάλματα τυχαίας φύσεως που επιβεβαιώνονται από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις.

Το υπό διακρίβωση παχύμετρο είναι ηλεκτρονικό και έχει εύρος μέτρησης 0-300 mm και διακριτότητα 0,01 mm. Οι πρότυπες ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων επιλέχθηκαν με σκοπό τα ονομαστικά τους μήκη να παρέχουν μετρήσεις όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα κατανεμημένες στο εύρος του οργάνου. Για κάθε ονομαστικό μήκος πρότυπης ράβδου έγιναν πέντε μετρήσεις, και έπειτα υπολογίστηκε η απόκλιση της ένδειξης από την ονομαστική τιμή. Οι μετρήσεις και η αντίστοιχη απόκλιση φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Απόκλιση Ένδειξης Παχύμετρου από την Ονομαστική Τιμή της Πρότυπης Ράβδου

| Μήκος Πρότυπης Ράβδου (mm) | Μετρούμενες Τιμές (mm) | | | | | Τυπική Απόκλιση (mm) |
|----------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| 25 | 25,01 | 25,00 | 25,00 | 25,01 | 25,01 | 0,00548 |
| 50 | 50,00 | 50,01 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 0,00447 |
| 75 | 74,99 | 74,99 | 74,99 | 74,99 | 74,99 | 0,00000 |
| 150 | 150,01 | 150,00 | 150,00 | 150,00 | 150,01 | 0,00548 |
| 200 | 200,00 | 200,01 | 200,01 | 200,00 | 200,00 | 0,00548 |
| 300 | 299,99 | 299,97 | 299,96 | 299,97 | 299,98 | 0,01140 |

Η αβεβαιότητα τύπου A εξάγεται από τον Πίνακα 1 με βάση τη μέγιστη τυπική απόκλιση και για πέντε μετρήσεις, και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$U_n = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{11,4}{\sqrt{5}} = 5,098 \mu m \quad (4.1)$$

Οι αβεβαιότητες τύπου B υπολογίζονται ως προς το μήκος των πρότυπων ράβδων, ως προς την έλλειψη επιπεδότητας και παραλληλότητας, ως προς τη διακριτότητα του ηλεκτρονικού παχύμετρου, καθώς και ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πρότυπων ράβδων και του παχύμετρου. Οι υπολογισμοί των αβεβαιοτήτων τύπου B βασίζονται στις κατανομές που κατατάσσονται οι αντίστοιχες αβεβαιότητες και υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις της ανάλογης κατανομής, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

Η αβεβαιότητα του μήκους των πρότυπων ράβδων, σύμφωνα με τα χαρτιά που τις συνοδεύουν, είναι 0,0023 mm και θεωρείται πως ανήκει στην κανονική κατανομή. Επομένως, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_{GB} = \frac{2,3}{2} = 1,15 \mu m \quad (4.2)$$

Ο έλεγχος για την επιπεδότητα και την παραλληλότητα των μετρητικών επιφανειών του υπό διακρίβωση ηλεκτρονικού παχύμετρου, πραγματοποιείται με οπτικό έλεγχο, με τον οποίο εξάγεται το συμπέρασμα πως η αβεβαιότητα τύπου B λόγω επιπεδότητας ή παραλληλότητας είναι αμελητέα. Βέβαια, τα πιστοποιητικά διακρίβωσης των οπτικών πλακιδίων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της επιπεδότητας και παραλληλότητας των επιφανειών αναφέρουν πως τα ίδια συνοδεύονται από μία αβεβαιότητα ίση με 2,5 μm . Συνεπώς, η τυπική αβεβαιότητα τύπου B λόγω επιπεδότητας και παραλληλότητας των μετρητικών επιφανειών, θεωρείται πως κατατάσσεται σε κανονική κατανομή με $k = 2$ και υπολογίζεται ως εξής.

$$U_{OF} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \mu m \quad (4.3)$$

Ο επόμενος τύπος αβεβαιότητας τύπου B σχετίζεται με τη διακριτότητα του οργάνου, η οποία είναι 0,01 mm, και θεωρείται πως ανήκει σε ομοιόμορφη κατανομή, επομένως υπολογίζεται ως:

$$U_{RES} = \frac{10}{2\sqrt{3}} = 2,89 \mu m \quad (4.4)$$

Τέλος, η αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας των πρότυπων ράβδων και του παχύμετρου, καθώς και στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συνόλου του εξοπλισμού με τον περιβάλλοντα χώρο. Εφόσον ο εξοπλισμός, και οι πρότυπες ράβδοι και το παχύμετρο, είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, η μεταξύ τους θερμοκρασιακή διαφορά θα είναι μηδενική. Όσον αφορά τη διαφορά θερμοκρασίας του εξοπλισμού με το χώρο, θα είναι και αυτή μηδενική με μία απόκλιση $\pm 0,5$ °C, και με μεταβλητότητα ίση με 0,289 °C, εφόσον θεωρείται πως ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Συνεργασία για τη Διαπίστευση (8), ο συντελεστής ευαισθησίας λόγω θερμικής συστολής ή διαστολής είναι $11,5 \times 10^{-6} \mu m/^{\circ}C$. Οπότε, η αβεβαιότητα τύπου B λόγω της θερμοκρασιακής διακύμανσης, υπολογίζεται για το μέγιστο εύρος μέτρησης του παχύμετρου, δηλαδή 300 mm, και προκύπτει ίση με 1 μm .

Το ισοζύγιο του συνόλου των μετρητικών αβεβαιοτήτων φαίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ισοζύγιο Μετρητικών Αβεβαιοτήτων

| Πηγή Αβεβαιότητας | Τύπος | U _i | Τιμή Αβεβαιότητας (μm) | Κατανομή | Βαθμοί Ελευθερίας |
|--|-------|------------------|------------------------|------------|-------------------|
| Επαναληψιμότητα | A | U _n | 5,10 | Student | 4 |
| Πρότυπες Ράβδοι | B | U _{GB} | 1,15 | Κανονική | ∞ |
| Παραλληλότητα/ Επιπεδότητα Πρότυπων Οπτικών Πλακιδίων | B | U _{OF} | 1,25 | Κανονική | ∞ |
| Θερμοκρασιακή Διακύμανση | B | U _{TH} | 1,00 | Ομοιόμορφη | ∞ |
| Διακριτικότητα | B | U _{RES} | 2,89 | Ομοιόμορφη | ∞ |

Από τη στιγμή που ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις για την ισχύ του νόμου διάδοσης της αβεβαιότητας, η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα της εξόδου του υπό μελέτη συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση (2.8), η οποία αποκτά την ακόλουθη μορφή.

$$U_C = \sqrt{U_n^2 + U_{GB}^2 + U_{OF}^2 + U_{RES}^2 + U_{TH}^2} = 6,18 \mu m \quad (4.5)$$

Όσον αφορά τους βαθμούς ελευθερίας, υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση Welch-Satterthwaite ως ακολούθως.

$$\nu_{eff} = \frac{U_C^4}{\frac{U_n^4}{n-1} + \frac{U_{GB}^4}{\infty} + \frac{U_{OF}^4}{\infty} + \frac{U_{RES}^4}{\infty} + \frac{U_{TH}^4}{\infty}} = \frac{6,18^4}{5,10^4} = 8,62 \approx 9 \quad (4.6)$$

Στη συνέχεια, από πίνακα τιμών της κατανομής Student, για $\nu = 9$ βαθμούς ελευθερίας και διάστημα εμπιστοσύνης 95%, προκύπτει ο συντελεστής κάλυψης $k = 2,2622$. Οπότε, η διευρυμένη αβεβαιότητα υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση.

$$U = k U_C = 13,98 \mu m \quad (4.7)$$

4.5 Αποτελέσματα Διακρίβωσης Παχύμετρου

Για την έκφραση του μετρητικού αποτελέσματος επιλέγεται η διευρυμένη αβεβαιότητα για μέγιστη σαφήνεια. Επομένως, τα μετρητικά αποτελέσματα του συγκεκριμένου ηλεκτρονικού παχύμετρου θα εκφράζονται με μία αβεβαιότητα $\pm 0,014 \text{ mm}$, όπου το νούμερο που ακολουθεί το σύμβολο \pm είναι η αριθμητική τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας $U = k u_c$, προσδιοριζόμενη από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c = 0,006 \text{ mm}$ και ένα συντελεστή κάλυψης $k = 2,2622$, ο οποίος, με βάση την κατανομή Student για $\nu = 9$ βαθμούς ελευθερίας, ορίζει ένα διάστημα με εκτιμώμενο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

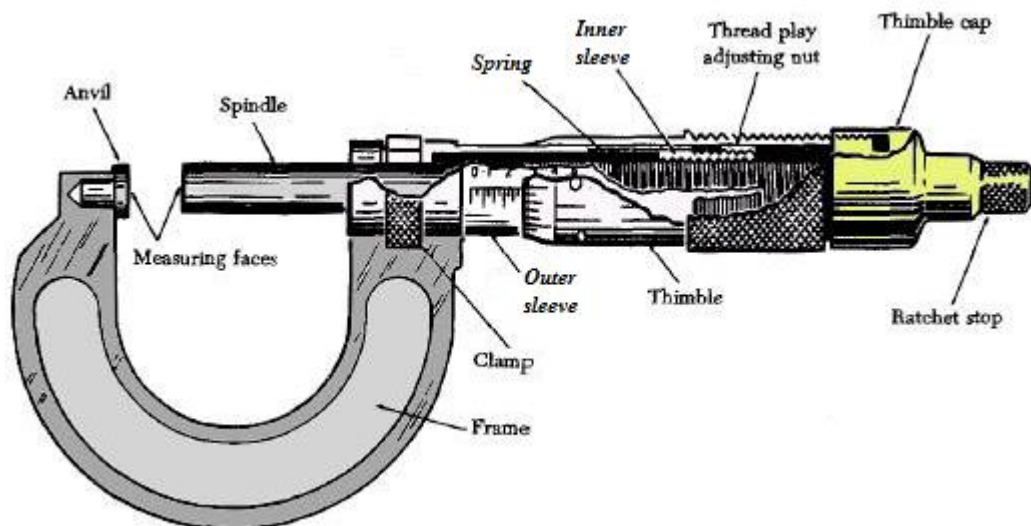
Κεφάλαιο 5: Διακρίβωση Μικρόμετρων

5.1 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Μικρόμετρων

Εξίσου χρηστικά με τα παχύμετρα για τη διεξαγωγή μετρήσεων αποστάσεων σε εργαστήρια και βιομηχανίες είναι και τα μικρόμετρα, τα οποία, όπως και τα παχύμετρα, αναβαθμίζονται λόγω της τεχνολογικής εξέλιξης και των νέων απαιτήσεων ως προς την ποιότητα των μετρήσεων. Γι' αυτόν το λόγο, είναι σημαντική η έμφαση στη λειτουργία τους, οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους, και συνεπώς η ανάλυση της αβεβαιότητας των μετρήσεων που εκτελούνται μέσω αυτών.

5.1.1 Τύποι Μικρόμετρων

Το μικρόμετρο χαρακτηρίζεται ως μία συσκευή, η οποία μέσω ενός μηχανισμού μίας διαβαθμισμένης βίδας προκαλεί μία γραμμική μετατόπιση ακριβείας του άξονα μίας ατράκτου. Η μέτρηση της απόστασης πραγματοποιείται με την αναφορά της γραμμικής μετατόπισης της ατράκτου σε μία σταθερή μετρητική επιφάνεια στον άξονα της ατράκτου.



Σχήμα 21: Τμήματα Μικρόμετρου [Πηγή: http://www.rcptv.com/spacetec-am/micrometer_parts.htm]

Τα κύρια μέρη του μικρόμετρου, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 21 είναι τα εξής:

- Το εσωτερικό περίβλημα (inner sleeve), το οποίο έχει τα σπειρώματα οδήγησης του μηχανισμού τροφοδοσίας και στηρίζεται στο ένα άκρο του πλαισίου (frame).
- Το αμόνι (anvil), που χρησιμεύει ως σταθερή επιφάνεια μέτρησης και συνδέεται στο αντιδιαμετρικό άκρο του πλαισίου.
- Η άτρακτος (spindle), η οποία αποτελείται από μία επιφάνεια μέτρησης στο ένα άκρο και ένα εξωτερικό σπείρωμα στο άλλο. Η γραμμικότητα της κίνησης της ατράκτου εξασφαλίζεται από το εσωτερικό περίβλημα, καθώς το εξωτερικό σπείρωμα της ατράκτου εμπλέκεται με το εσωτερικό σπείρωμα του εσωτερικού περιβλήματος. Η επιφάνεια μέτρησης της ατράκτου χρησιμεύει ως σημείο επαφής για τη μέτρηση του κατεργαζόμενου τεμαχίου, η οποία πραγματοποιείται με την τροφοδοσία της ατράκτου έτσι ώστε η επιφάνειά του και η επιφάνεια του αμονιού να εφάπτονται του μετρούμενου αντικειμένου.
- Το εξωτερικό περίβλημα (outer sleeve), το οποίο έχει διαβαθμίσεις που αντιστοιχούν στο βήμα του σπειρώματος της ατράκτου και μία γραμμή ένδειξης για την ανάγνωση των διαβαθμίσεων στο δακτύλιο.
- Ο δακτύλιος (thimble), ο οποίος είναι στερεωμένος στην άτρακτο έτσι ώστε και τα δύο αυτά εξαρτήματα να κινούνται μαζί.
- Η κασάνια (ratchet stop), η οποία μέσω του μηχανισμού της ασκεί σταθερή πίεση στο υπό μέτρηση αντικείμενο.
- Ο σφιγκτήρας (clamp), ο οποίος είναι στερεωμένος στο πλαίσιο από τη μεριά της ατράκτου, την οποία ασφαλίζει με το εσωτερικό περίβλημα.

Σημειώνεται πως ένα τυπικό μικρόμετρο έχει βιδωτό σπείρωμα διαμέτρου 0,5 mm με δακτύλιο στην περιφέρεια, ο οποίος είναι βαθμονομημένος σε πενήντα ίσες διαιρέσεις. Υπάρχουν, βέβαια, πολλά εύρη κατασκευής των μικρόμετρων που αφήνουν περιθώρια επιλογής του εύρους του οργάνου βάσει του μήκους του υπό μέτρηση μεγέθους. Παράλληλα, υπάρχει πληθώρα τύπων μικρόμετρων ανάλογα με την επιθυμητή χρήση, ενώ όλα έχουν τις ίδιες αρχές λειτουργίας. Εκτός από τα μικρόμετρα ειδικών χρήσεων, οι πιο κοινοί τύποι μικρόμετρων παρουσιάζονται ακολούθως.

Ο πιο κοινός τύπος μικρόμετρου, είναι το τυπικό μικρόμετρο μέτρησης εξωτερικών διαστάσεων, που φαίνεται στο Σχήμα 22, έχει επίπεδες επιφάνειες μέτρησης και αποτελείται από τα κύρια μέρη που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 22: Μικρόμετρο Εξωτερικών Διαστάσεων [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

Άλλες κατηγορίες μικρόμετρων εξωτερικών διαστάσεων προκύπτουν από τη μορφή των μετρητικών επιφανειών τους. Μία κατηγορία από αυτές είναι τα μικρόμετρα με σφαιρικό αμόνι και άτρακτο (spherical anvil and spindle type), που συνήθως είναι χρήσιμα για τη μέτρηση του πάχους σωλήνων και κυρίως ειδικών σωλήνων που δεν έχουν κυκλική εξωτερική διάμετρο. Σε τέτοιου τύπου μικρόμετρα, οι μετρητικές επιφάνειες του αμονιού και της ατράκτου είναι είτε και οι δύο σφαιρικές είτε μία σφαιρική και μία επίπεδη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 23α.

Στο Σχήμα 23β απεικονίζεται ένα μικρόμετρο, το οποίο έχει και μυτερή άτρακτο και μυτερό αμόνι. Αυτού του είδους μικρόμετρα ονομάζονται μυτερά μικρόμετρα (point micrometers) και χρησιμοποιούνται για μετρήσεις διαμέτρων εξωτερικών σπειρωμάτων και αυλακώσεων όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη.

Ένας ακόμα τύπος μικρόμετρων είναι τα μικρόμετρα αυλακώσεων (spline micrometers), όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 23γ, τα οποία έχουν μικρότερης διαμέτρου αμόνι και άτρακτο σε σχέση με τα τυπικά μικρόμετρα εξωτερικών διαστάσεων. Ο λόγος αυτής της ιδιαίτερης κατασκευής τους είναι η πραγματοποίηση μετρήσεων αξόνων με αυλακώσεις, εγκοπών και σχισμών, που δεν είναι εύκολο να μετρηθούν από τα κοινά μικρόμετρα.

Επιπλέον, σχεδιάζονται μικρόμετρα για μετρήσεις που απαιτούν μεγαλύτερες επιφάνειες αμονιού, όπως οι μετρήσεις διάφορων μηκών οδοντωτών τροχών και μεγεθών οποιουδήποτε μαλακού υλικού. Αυτά τα μικρόμετρα κατηγοριοποιούνται στα μικρόμετρα τύπου δίσκου (disk type paper thickness micrometer) και απαρτίζονται από μη περιστρεφόμενη άτρακτο, με σκοπό την εξάλειψη της στρέψης στα υπό μέτρηση αντικείμενα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 23δ. Παράλληλα, η χρήση δίσκων παρέχει μεγάλες επιφάνειες μέτρησης για να αποφευχθεί η συγκέντρωση της δύναμης μέτρησης.



Σχήμα 23: (α) Μικρόμετρο με Σφαιρικό Αμόνι και Άτρακτο, (β) Μυτερό Μικρόμετρο, (γ) Μικρόμετρο Αυλακώσεων, (δ) Μικρόμετρο Τύπου Δίσκου, (ε) Μικρόμετρο Λεπίδας [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

Ο τελευταίος τύπος μικρόμετρων μέτρησης εξωτερικών διαστάσεων βάσει των μετρητικών επιφανειών είναι τα μικρόμετρα λεπίδας (blade micrometers). Ονομάζονται κατ' αυτόν τον τρόπο καθώς το αμόνι και η μη περιστρεφόμενη άτρακτος αυτών των μικρόμετρων έχουν λεπίδες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 23ε. Τα μικρόμετρα λεπίδας επιτρέπουν τη μέτρηση των στενών αυλακώσεων, των εγκοπών και άλλων περιορισμένων περιοχών, αλλά υπόκεινται σε αυστηρούς ελέγχους, αφού η μικρή περιοχή επαφής καθώς και η μη περιστρεφόμενη άτρακτος ως προς τον περιστρεφόμενο κοχλία φθείρονται σχετικά εύκολα.

Επιπρόσθετα, τα μικρόμετρα κατηγοριοποιούνται και βάσει του τρόπου παροχής των ενδείξεών τους. Πέρα από τα κοινά μικρόμετρα, στα οποία η ανάγνωση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους γίνεται από τις διαβαθμίσεις του εξωτερικού περιβλήματος, υπάρχουν τα μικρόμετρα με καντράν και τα ηλεκτρονικά μικρόμετρα. Στα μικρόμετρα με καντράν, μετατοπίζεται ελαφρά και το αμόνι, και η μετατόπισή του εμφανίζεται στον

ενσωματωμένο καντράν μέσω ενός δείκτη. Αυτός ο μηχανισμός κίνησης επιτρέπει την εφαρμογή ομοιόμορφης δύναμης μέτρησης στα μετρούμενα τεμάχια, ελαχιστοποιώντας τις διακυμάνσεις των μετρήσεων που προκαλούνται από τις πιθανές διακυμάνσεις της δύναμης μέτρησης. Ένα παράδειγμα μικρόμετρου με καντράν απεικονίζεται στο Σχήμα 24.



Σχήμα 24: Μικρόμετρο με καντράν [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

Ευρέως διαδεδομένα για τη χρήση τους είναι τα ηλεκτρονικά μικρόμετρα, τα οποία έχουν εξαλείψει πολλά ανθρώπινα λάθη στην ανάγνωση και έχουν ενσωματωθεί σε αυτόματα συστήματα μέτρησης και επεξεργασίας δεδομένων. Όλοι οι τύποι μικρόμετρων, που αναλύθηκαν προηγουμένως βάσει των μετρητικών τους επιφανειών, μπορεί να περιέχουν σύστημα ψηφιακής ανάγνωσης, όπως και αυτό του Σχήματος 25. Τα μικρόμετρα αυτά, με ψηφιακές ενδείξεις, εμπεριέχουν έναν φωτοηλεκτρικό κωδικοποιητή ή έναν κωδικοποιητή χωρητικότητας, που ανιχνεύει την περιστροφή της ατράκτου και μετατρέπει ηλεκτρονικά την μετατόπισή της σε ψηφιακή ένδειξη (16).



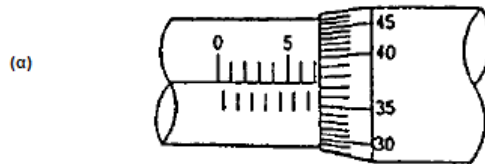
Σχήμα 25: Ηλεκτρονικό Παχύμετρο με Εναλλάξιμο Αμόνι [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

5.1.2 Μετρητική Δύναμη και Ανάγνωση Μικρόμετρου

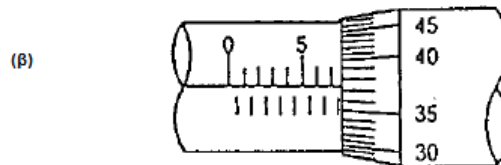
Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μεταβολή των μετρήσεων λόγω παραμόρφωσης του μετρούμενου αντικειμένου, οι μετρήσεις πρέπει να πραγματοποιούνται με την ίδια δύναμη που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θέσης του μηδενός. Σε πολλά μικρόμετρα, η απλοποίηση αυτής της ρύθμισης γίνεται μέσω ενός ανασταλτικού μηχανισμού του μικρόμετρου. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει δύο κασάνιες, που αντιτίθενται μεταξύ τους και περιλαμβάνουν οδοντωτές όψεις που πιέζονται μεταξύ τους με τη δύναμη ενός ελατηρίου. Όταν το κυλινδρικό περίβλημα της κασάνιας περιστρέφεται δεξιόστροφα, οι δύο κασάνιες στρέφονται μέχρις ότου η μετρητική δύναμη φτάσει σε ένα συγκεκριμένο όριο. Μόλις η δύναμη αυτή υπερβεί αυτό το όριο, η περιστροφή της κασάνιας δεν επηρεάζει την κίνηση της ατράκτου και «κλειδώνει». Όταν το περίβλημα της κασάνιας περιστρέφεται αριστερόστροφα δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των κασάνιων, καθώς οι οδοντώσεις τους παραμένουν σε εμπλοκή.

Όσον αφορά την ανάγνωση της ένδειξης του μικρόμετρου, εξαρτάται από τη διακριτότητα. Για μικρόμετρα με διακριτότητα 0,01 mm, το κενό μεταξύ των μετρητικών επιφανειών αλλάζει κατά 0,5 mm για μία πλήρη περιστροφή του δακτύλιου. Συνεπώς, για μία μετατόπιση 1 mm, ο δακτύλιος θα έχει κάνει δύο πλήρεις περιστροφές. Ο δακτύλιος έχει πενήντα υποδιαιρέσεις. Έτσι, μία περιστροφή του δακτύλιου συνεπάγεται μία αλλαγή στο κενό μεταξύ των μετρητικών επιφανειών του ενός πεντηκοστού του 0,5 mm, δηλαδή μία μετατόπιση των 0,01 mm. Άρα, κάθε διαβάθμιση του δακτύλιου ισούται με ένα εκατοστό του χιλιοστού, δηλαδή 0,01 mm.

Για την εκτέλεση, λοιπόν, μίας μέτρησης με ένα μικρόμετρο, προδιορίζεται η πλησιέστερη διαβάθμιση του εξωτερικού περιβλήματος στο δακτύλιο, και στη συνέχεια, προστίθεται στην τιμή της διαβάθμισης του δακτύλιου που ευθυγραμμίζεται με τη γραμμή αναφοράς του εξωτερικού περιβλήματος. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 26α η ένδειξη στο περίβλημα είναι 7 mm και στο δακτύλιο λίγο παραπάνω από 37 υποδιαιρέσεις. Η εκτίμηση της απόστασης που απέχει η ένδειξη του δακτύλιου από τις 37 υποδιαιρέσεις του είναι 0,3 τις μίας υποδιαίρεσης. Εν τέλει, η ένδειξη του μικρόμετρου για το συγκεκριμένο μετρούμενο μέγεθος είναι 7,373 mm. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 26β η ένδειξη του μικρόμετρου είναι 7,873 mm.



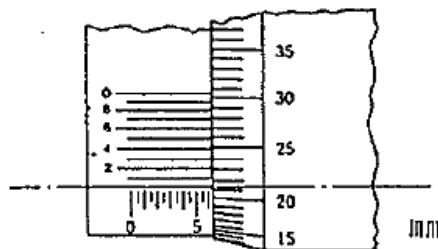
| | |
|----------------------|-----------------|
| Sleeve reading | 7. |
| Thimble reading | .373 (+) |
| Total reading | 7.373 mm |



| | |
|----------------------|-----------------|
| Sleeve reading | 7.5 |
| Thimble reading | .373 (+) |
| Total reading | 7.873 mm |

Σχήμα 26: Ανάγνωση Μικρόμετρου [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

Σε ορισμένες περιπτώσεις, βέβαια, τα μικρόμετρα συμπεριλαμβάνουν μία ειδική συσκευή, δηλαδή μία βοηθητική κλίμακα ή μία κλίμακα βερνιέρου στο εξωτερικό περίβλημα, η οποία παρέχει διακρίσιμότητα των 0,001 mm. Η κατασκευή αυτών των μικρόμετρων είναι η ίδια με αυτή των τυπικών μικρόμετρων, με μόνη διαφορά την ανάγνωση των ενδείξεων στην κλίμακα βερνιέρου, που πραγματοποιείται με τον προδιορισμό της διαβάθμισης της κλίμακας βερνιέρου που ευθυγραμμίζεται με τη διαβάθμιση στο εξωτερικό περίβλημα, με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται για τα παχύμετρα (16).



| | |
|----------------------|----------------|
| Sleeve reading | 6. |
| Thimble reading | .21 |
| Vernier reading | .003 (+) |
| Total reading | 6.213mm |

Σχήμα 27: Ανάγνωση Μικρόμετρου με Κλίμακα Βερνιέρου [Πηγή: Good Practice Guide No.40, Callipers and micrometers, David Flack]

5.2 Προσωπικό και Εξοπλισμός Διακρίβωσης Μικρόμετρων

Η διακρίβωση των μετρητικών οργάνων, όπως έχει αναφερθεί πολλάκις, αποτελεί απαραίτητη διαδικασία για τη διατήρηση της ποιότητας των μετρήσεων. Έτσι, και για τα μικρόμετρα, τα οποία αποτελούν βασικό όργανο για τη μέτρηση κυρίως εξωτερικών διαστάσεων αντικειμένων, η ορθή διεκπεραίωση των διαδικασιών διακρίβωσης αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Όπως και για τα παχύμετρα, κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης των μικρόμετρων, το προσωπικό που την υλοποιεί πρέπει να είναι ικανό για τη διεξαγωγή όλων των διαδικασιών της διακρίβωσης. Η λήψη μετρήσεων ακριβείας, η σωστή χρήση όλου του εξοπλισμού διακρίβωσης, καθώς και η διατήρηση των συνθηκών και των προφυλάξεων που πρέπει να τηρούνται κατά τη διάρκεια μίας διακρίβωσης, αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται από το επιλεγμένο για διακρίβωση προσωπικό.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που πρέπει να τηρούνται είναι οι εξής. Ο χώρος στον οποίο πραγματοποιείται η διακρίβωση ελέγχεται ως προς τη θερμοκρασία και την υγρασία του, καθώς το σύνολο του εξοπλισμού είναι αναγκαίο να φυλάσσεται και να διακριβώνεται σε θερμοκρασία χώρου 20 ± 2 °C και υγρασία χώρου 50 ± 10 % R.H. Πριν την έναρξη της διαδικασίας της διακρίβωσης ο εξοπλισμός πρέπει να παραμένει στις προαναφερόμενες συνθήκες για κάποιο χρονικό διάστημα για την εξισορρόπησή του με τον χώρο, έτσι ώστε η αβεβαιότητα που οφείλεται στην διακύμανση της θερμοκρασίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Ενώ, μετά το πέρας της διακρίβωσης το παχύμετρο πρέπει να καθαρίζεται και φυλάσσεται καταλλήλως, ώστε να αποφεύγονται οι γρατζουνιές και οι λεκέδες που καθιστούν δύσκολη την ανάγνωση του και ανομοιογενή την κίνησή του.

Για τη διακρίβωση ενός μικρόμετρου χρησιμοποιούνται πρότυπα ή διακριβωμένα όργανα ανάλογα με τον επιθυμητό έλεγχο. Οι ενδείξεις του μικρόμετρου ελέγχονται με πρότυπα πλακίδια ή ράβδους, τα οποία προσδιορίζουν τη μετρητική αβεβαιότητα που προκύπτει από τη διαφορά της ένδειξης και της ονομαστικής τιμής των προτύπων. Παράλληλα, για τον έλεγχο της παραλληλότητας και της επιπεδότητας του μικρόμετρου χρησιμοποιούνται οπτικά πλακίδια (optical parallels και optical flats, αντίστοιχα). Οποιοδήποτε πρότυπο, όργανο ή συσκευή που χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση, είναι απαραίτητο να είναι διακριβωμένο ώστε να εξασφαλίζεται η ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων σε εθνικά ή διεθνή πρότυπα.

5.3 Διαδικασία Διακρίβωσης Μικρόμετρων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των μικρόμετρων συνήθως εμφανίζονται λόγω φθορών στην κατασκευή τους. Συχνά, οι αποκλίσεις από τους παράγοντες αυτούς, παρατηρούνται λόγω δυσκολιών στην περιστροφή της κασάνιας και της ατράκτου ή χαλάρωσης του σφικτήρα, λόγω παραλληλότητας και επιπεδότητας των επιφανειών μέτρησης, λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών ή προηγούμενων κατεργασιών του υπό μέτρηση τεμαχίου, αλλά και δυσκολίες ανάγνωσης. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες, αφού γίνουν αντιληπτοί, μπορεί να αντιμετωπισθούν με ανάλογες ενέργειες, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μετρητική αβεβαιότητα.

Για την αποφυγή επιδράσεων στη μετρητική αβεβαιότητα είναι σημαντικό πριν την πραγματοποίηση των μετρήσεων να ακολουθούνται κάποιοι έλεγχοι ρουτίνας. Με λίγα λόγια, αρχικά, ελέγχεται η κατάσταση της επιμετάλλωσης και της βαφής, έτσι ώστε να μην υπάρχει αποχρωματισμός, ξεφλούδισμα ή σκουριά. Επιπλέον, ελέγχεται η κατάσταση των μετρητικών επιφανειών, όπως και η λειτουργία των σπειρωμάτων της ατράκτου και του εξωτερικού περιβλήματος με σκοπό την ομαλή κίνηση της ατράκτου. Οποιαδήποτε κακή ευθυγράμμιση μεταξύ της ατράκτου και του αμονιού πρέπει να είναι τόσο μικρή ώστε να μην επηρεάζει σημαντικά τη μέτρηση. Η άτρακτος πρέπει να σφίγγεται εύκολα από τον σφικτήρα, αλλά η μέτρηση του μικρόμετρου δεν πρέπει να αλλάζει περισσότερο από 2 μm όταν η άτρακτος είναι σφιγμένη. Ακόμα, έλεγχεται αν η κασάνια περιστρέφεται ομαλά και αν το ελεύθερο ύψος μεταξύ του δακτύλιου και του εξωτερικού περιβλήματος ισαπέχει γύρω από τις περιμέτρους τους. Τέλος, ελέγχεται αν η μηδενική γραμμή στο δακτύλιο ευθυγραμμίζεται με την ένδειξη στο εξωτερικό περίβλημα, ώστε το άκρο του δακτύλιου να μην επικαλύπτει τη διαβάθμιση στο εξωτερικό περίβλημα και την κρύβει. Σημειώνεται πως μετά τη χρήση ενός μικρόμετρου επιβάλλεται να καθαρίζεται κατάλληλα και να φυλάσσεται σε θήκη υπό καθορισμένες συνθήκες (16).

Η συγκεκριμένη διαδικασία διακρίβωσης πραγματοποιήθηκε σε δύο αναλογικά μικρόμετρα εξωτερικών διαστάσεων, που χρησιμοποιούνται σε μηχανουργείο, εύρους 200-300 και 300-400 mm, με τήρηση των οδηγιών για τη λήψη των μετρήσεων και των βημάτων που ακολουθούνται πριν και μετά τις μετρήσεις. Για τη διεξαγωγή του υπολογισμού της μετρητικής αβεβαιότητας οι πρότυπες ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιου τύπου με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας του ηλεκτρονικού παχύμετρου. Οι πρότυπες αυτές ράβδοι συνοδεύονται από έκθεση επιθεώρησης, ενώ οι μετρητικές επιφάνειές τους είναι επίπεδες και οι λαβές τους θερμομονωτικές. Τα ονομαστικά μήκη των πρότυπων ράβδων, που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων από τα δύο μικρόμετρα, είναι 200, 225,

250, 275 και 300 mm για το μικρόμετρο εύρους 200-300 mm και 300, 325, 350 , 375 και 400 mm για το μικρόμετρο εύρους 300-400 mm.

5.4 Υπολογισμός Μετρητικής Αβεβαιότητας Μικρόμετρων

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις δεν είναι ποτέ ιδανικές. Γι' αυτό είναι σημαντική γνώση και η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα μίας μέτρησης. Η αβεβαιότητα των μετρήσεων με μικρόμετρα μπορεί να οφείλεται στο μετρητικό όργανο, το οποίο λόγω φθοράς με την πάροδο του χρόνου, κακής αναγνωσιμότητας ή βλαβών, παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις στις ενδείξεις του από τις πραγματικές τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Παράλληλα, πιθανώς να οφείλεται στο μετρούμενο αντικείμενο, το οποίο μπορεί να έχει μεταβαλλόμενες διαστάσεις, να έχει υποστεί συστολή ή διαστολή λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών ή κατεργασιών, ή ακόμα να έχει επιφανειακές ατέλειες. Στις πηγές αβεβαιότητας των μετρήσεων με μικρόμετρα προστίθενται η μετρητική διαδικασία, η παράβλεψη αποκλίσεων που δίνονται στα πιστοποιητικά διακρίβωσης και οι επιδράσεις της θερμοκρασίας.

5.4.1 Εκτίμηση Αβεβαιότητας Μετρήσεων Μικρόμετρου Εύρους 200-300 mm

Το πρώτο υπό διακρίβωση μικρόμετρο έχει εύρος μέτρησης 200-300 mm και διακριτότητα 0,01 mm. Οι πρότυπες ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων επιλέχθηκαν με σκοπό να πραγματοποιηθεί διακρίβωση πέντε σημείων, δηλαδή τα ονομαστικά μήκη των ράβδων να παρέχουν μετρήσεις στο 0, 25, 50, 75 και 100 τοις εκατό του εύρους του οργάνου. Για κάθε ονομαστικό μήκος πρότυπης ράβδου έγιναν πέντε μετρήσεις, και έπειτα υπολογίστηκε η απόκλιση της ένδειξης από την ονομαστική τιμή. Οι μετρήσεις και η αντίστοιχη απόκλιση φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Απόκλιση Ένδειξης Μικρόμετρου από την Ονομαστική Τιμή της Πρότυπης Ράβδου

| Μήκος Πρότυπης Ράβδου (mm) | Μετρούμενες Τιμές (mm) | | | | | Τυπική Απόκλιση (mm) |
|----------------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| 200 | 200,000 | 199,998 | 199,998 | 199,998 | 199,998 | 0,00089 |
| 225 | 225,010 | 225,010 | 225,010 | 225,010 | 225,005 | 0,00224 |
| 250 | 250,015 | 250,017 | 250,020 | 250,020 | 250,018 | 0,00212 |
| 275 | 275,015 | 275,015 | 275,015 | 275,015 | 275,016 | 0,00045 |
| 300 | 300,000 | 299,997 | 299,995 | 300,010 | 300,010 | 0,00716 |

Η αβεβαιότητα τύπου A εξάγεται από τον Πίνακα 3 με βάση τη μέγιστη τυπική απόκλιση και για πέντε μετρήσεις, και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$U_n = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{7,16}{\sqrt{5}} = 3,202 \mu m \quad (5.1)$$

Οι αβεβαιότητες τύπου B υπολογίζονται ως προς το μήκος των πρότυπων ράβδων, ως προς την έλλειψη επιπεδότητας και παραλληλότητας, ως προς τη διακριτότητα του μικρόμετρου, καθώς και ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πρότυπων ράβδων και του μικρόμετρου. Οι υπολογισμοί των αβεβαιοτήτων τύπου B βασίζονται στις κατανομές που κατατάσσονται οι αντίστοιχες αβεβαιότητες και υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις της ανάλογης κατανομής, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

Η αβεβαιότητα του μήκους των πρότυπων ράβδων, σύμφωνα με τα χαρτιά που τις συνοδεύουν, είναι 0,0037 mm και θεωρείται πως ανήκει στην κανονική κατανομή. Επομένως, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_{GB} = \frac{3,7}{2} = 1,85 \mu m \quad (5.2)$$

Ο έλεγχος για την επιπεδότητα και την παραλληλότητα των μετρητικών επιφανειών του υπό διακρίβωση μικρόμετρου πραγματοποιείται με οπτικό έλεγχο, με τον οποίο εξάγεται το συμπέρασμα πως η αβεβαιότητα τύπου B λόγω επιπεδότητας ή παραλληλότητας είναι αμελητέα. Βέβαια, τα πιστοποιητικά διακρίβωσης των οπτικών πλακιδίων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της επιπεδότητας και παραλληλότητας των επιφανειών αναφέρουν πως τα ίδια συνοδεύονται από μία αβεβαιότητα ίση με 2,5 μm . Συνεπώς, η τυπική αβεβαιότητα τύπου B λόγω επιπεδότητας και παραλληλότητας των μετρητικών επιφανειών, θεωρείται πως κατατάσσεται σε κανονική κατανομή με $k = 2$ και υπολογίζεται ως εξής.

$$U_{OF} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \mu m \quad (5.3)$$

Ο επόμενος τύπος αβεβαιότητας τύπου B σχετίζεται με τη διακριτότητα του οργάνου, η οποία είναι 0,01 mm, και θεωρείται πως ανήκει σε ομοιόμορφη κατανομή, επομένως υπολογίζεται ως:

$$U_{RES} = \frac{10}{2\sqrt{3}} = 2,89 \mu m \quad (5.4)$$

Τέλος, η αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας των πρότυπων ράβδων και του μικρόμετρου, καθώς και στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συνόλου του εξοπλισμού με τον περιβάλλοντα χώρο. Εφόσον ο εξοπλισμός, και οι πρότυπες ράβδοι και η άτρακτος και το αμόνι του μικρόμετρου, είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, η μεταξύ τους θερμοκρασιακή διαφορά θα είναι μηδενική. Όσον αφορά τη διαφορά θερμοκρασίας του εξοπλισμού με τον χώρο, θα είναι και αυτή μηδενική με μία απόκλιση $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, και, θεωρώντας πως ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, θα χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα ίση με $0,289 \text{ }^\circ\text{C}$. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Συνεργασία για τη Διαπίστευση (8), ο συντελεστής ευαισθησίας λόγω θερμικής συστολής ή διαστολής είναι $11,5 \times 10^{-6} \mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Οπότε, η αβεβαιότητα τύπου B λόγω της θερμοκρασιακής διακύμανσης, υπολογίζεται για το μέγιστο εύρος μέτρησης του μικρόμετρου, δηλαδή 300 mm, και προκύπτει ίση με 1 μm .

Το ισοζύγιο του συνόλου των μετρητικών αβεβαιοτήτων φαίνεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Ισοζύγιο Μετρητικών Αβεβαιοτήτων

| Πηγή Αβεβαιότητας | Τύπος | U_i | Τιμή Αβεβαιότητας (μm) | Κατανομή | Βαθμοί Ελευθερίας |
|--|-------|-----------|-------------------------------------|------------|-------------------|
| Επαναληψιμότητα | A | U_n | 3,202 | Student | 4 |
| Πρότυπες Ράβδοι | B | U_{GB} | 1,85 | Κανονική | ∞ |
| Παραλληλότητα/ Επιπεδότητα Πρότυπων Οπτικών Πλακιδίων | B | U_{OF} | 1,25 | Κανονική | ∞ |
| Θερμοκρασιακή Διακύμανση | B | U_{TH} | 1,00 | Ομοιόμορφη | ∞ |
| Διακριτικότητα | B | U_{RES} | 2,89 | Ομοιόμορφη | ∞ |

Από τη στιγμή που ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις για την ισχύ του νόμου διάδοσης της αβεβαιότητας, η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα της εξόδου του υπό μελέτη συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση (2.8), η οποία αποκτά την ακόλουθη μορφή.

$$U_C = \sqrt{U_n^2 + U_{GB}^2 + U_{OF}^2 + U_{RES}^2 + U_{TH}^2} = 4,96 \mu m \quad (5.5)$$

Όσον αφορά τους βαθμούς ελευθερίας, υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση Welch-Satterthwaite ως ακολούθως.

$$v_{eff} = \frac{U_C^4}{\frac{U_n^4}{n-1} + \frac{U_{GB}^4}{\infty} + \frac{U_{OF}^4}{\infty} + \frac{U_{RES}^4}{\infty} + \frac{U_{TH}^4}{\infty}} = \frac{4,96^4}{\frac{3,202^4}{4}} = 23,03 \approx 23 \quad (5.6)$$

Στη συνέχεια, από πίνακα τιμών της κατανομής Student, για $\nu = 23$ βαθμούς ελευθερίας και διάστημα εμπιστοσύνης 95%, προκύπτει ο συντελεστής κάλυψης $k = 2,0687$. Οπότε, η διευρυμένη αβεβαιότητα υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση.

$$U = k U_C = 10,26 \mu\text{m} \quad (5.7)$$

5.4.2 Εκτίμηση Αβεβαιότητας Μετρήσεων Μικρόμετρου Εύρους 300-400 mm

Το δεύτερο υπό διακρίβωση μικρόμετρο έχει εύρος μέτρησης 300-400 mm και διακριτότητα 0,01 mm. Οι πρότυπες ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων επιλέχθηκαν, και σε αυτή την περίπτωση, με σκοπό να πραγματοποιηθεί διακρίβωση πέντε σημείων, δηλαδή τα ονομαστικά μήκη των ράβδων να παρέχουν μετρήσεις στο 0, 25, 50, 75 και 100 τοις εκατό του εύρους του οργάνου. Για κάθε ονομαστικό μήκος πρότυπης ράβδου έγιναν πέντε μετρήσεις, και έπειτα υπολογίστηκε η απόκλιση της ένδειξης από την ονομαστική τιμή. Οι μετρήσεις και η αντίστοιχη απόκλιση φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Απόκλιση Ένδειξης Μικρόμετρου από την Ονομαστική Τιμή της Πρότυπης Ράβδου

| Μήκος Πρότυπης Ράβδου (mm) | Μετρούμενες Τιμές (mm) | | | | | Τυπική Απόκλιση (mm) |
|----------------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| 300 | 299,990 | 299,990 | 299,990 | 299,993 | 299,993 | 0,00164 |
| 325 | 324,998 | 324,998 | 324,985 | 324,975 | 324,988 | 0,00968 |
| 350 | 349,998 | 349,995 | 349,997 | 349,999 | 349,996 | 0,00158 |
| 375 | 374,988 | 374,999 | 374,991 | 374,990 | 374,990 | 0,00428 |
| 400 | 399,990 | 399,990 | 399,996 | 399,995 | 399,997 | 0,00336 |

Η αβεβαιότητα τύπου A εξάγεται από τον Πίνακα 5 με βάση τη μέγιστη τυπική απόκλιση και για πέντε μετρήσεις, και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$U_n = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{9,68}{\sqrt{5}} = 4,329 \mu m \quad (5.8)$$

Οι αβεβαιότητες τύπου B υπολογίζονται ως προς το μήκος των πρότυπων ράβδων, ως προς την έλλειψη επιπεδότητας και παραλληλότητας, ως προς τη διακριτότητα του μικρόμετρου, καθώς και ως προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πρότυπων ράβδων και του μικρόμετρου. Οι υπολογισμοί των αβεβαιοτήτων τύπου B βασίζονται στις κατανομές που κατατάσσονται οι αντίστοιχες αβεβαιότητες και υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις της ανάλογης κατανομής, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

Η αβεβαιότητα του μήκους των πρότυπων ράβδων, σύμφωνα με τα χαρτιά που τις συνοδεύουν, είναι 0,0044 mm και θεωρείται πως ανήκει στην κανονική κατανομή. Επομένως, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_{GB} = \frac{4,4}{2} = 2,2 \mu m \quad (4.9)$$

Ο έλεγχος για την επιπεδότητα και την παραλληλότητα των μετρητικών επιφανειών του υπό διακρίβωση μικρόμετρου πραγματοποιείται με οπτικό έλεγχο, με τον οποίο εξάγεται το συμπέρασμα πως η αβεβαιότητα τύπου B λόγω επιπεδότητας ή παραλληλότητας είναι αμελητέα. Βέβαια, τα πιστοποιητικά διακρίβωσης των οπτικών πλακιδίων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της επιπεδότητας και παραλληλότητας των επιφανειών αναφέρουν πως τα ίδια συνοδεύονται από μία αβεβαιότητα ίση με 2,5 μm . Συνεπώς, η τυπική αβεβαιότητα τύπου B λόγω επιπεδότητας και παραλληλότητας των μετρητικών επιφανειών, θεωρείται πως κατατάσσεται σε κανονική κατανομή με $k = 2$ και υπολογίζεται ως εξής.

$$U_{OF} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \mu m \quad (4.10)$$

Ο επόμενος τύπος αβεβαιότητας τύπου B σχετίζεται με τη διακριτότητα του οργάνου, η οποία είναι 0,01 mm, και θεωρείται πως ανήκει σε ομοιόμορφη κατανομή, επομένως υπολογίζεται ως:

$$U_{RES} = \frac{10}{2\sqrt{3}} = 2,89 \mu m \quad (4.11)$$

Τέλος, η αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας των πρότυπων ράβδων και του μικρόμετρου, καθώς και στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του συνόλου του εξοπλισμού με τον περιβάλλοντα χώρο. Εφόσον ο εξοπλισμός, και οι πρότυπες ράβδοι και η άτρακτος και το αμόνι του μικρόμετρου, είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, η μεταξύ τους θερμοκρασιακή διαφορά θα είναι μηδενική. Όσον αφορά τη διαφορά θερμοκρασίας του εξοπλισμού με τον χώρο, θα είναι και αυτή μηδενική με μία απόκλιση $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, και, θεωρώντας πως ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή, θα χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα ίση με $0,289 \text{ }^\circ\text{C}$. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Συνεργασία για τη Διαπίστευση (8), ο συντελεστής ευαισθησίας λόγω θερμικής συστολής ή διαστολής είναι $11,5 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Οπότε, η αβεβαιότητα τύπου B λόγω της θερμοκρασιακής διακύμανσης, υπολογίζεται για το μέγιστο εύρος μέτρησης του μικρόμετρου, δηλαδή 400 mm, και προκύπτει ίση με 1,33 μm .

Το ισοζύγιο του συνόλου των μετρητικών αβεβαιοτήτων φαίνεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Ισοζύγιο Μετρητικών Αβεβαιοτήτων

| Πηγή Αβεβαιότητας | Τύπος | U_i | Τιμή Αβεβαιότητας (μm) | Κατανομή | Βαθμοί Ελευθερίας |
|--|-------|-----------|-------------------------------------|------------|-------------------|
| Επαναληψιμότητα | A | U_n | 4,329 | Student | 4 |
| Πρότυπες Ράβδοι | B | U_{GB} | 2,2 | Κανονική | ∞ |
| Παραλληλότητα/ Επιτεδότητα Πρότυπων Οπτικών Πλακιδίων | B | U_{OF} | 1,25 | Κανονική | ∞ |
| Θερμοκρασιακή Διακύμανση | B | U_{TH} | 1,33 | Ομοιόμορφη | ∞ |
| Διακριτότητα | B | U_{RES} | 2,89 | Ομοιόμορφη | ∞ |

Από τη στιγμή που ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις για την ισχύ του νόμου διάδοσης της αβεβαιότητας, η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα της εξόδου του υπό μελέτη συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση (2.8), η οποία αποκτά την ακόλουθη μορφή.

$$U_C = \sqrt{U_n^2 + U_{GB}^2 + U_{OF}^2 + U_{RES}^2 + U_{TH}^2} = 5,94 \text{ } \mu\text{m} \quad (5.12)$$

Όσον αφορά τους βαθμούς ελευθερίας, υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση Welch-Satterthwaite ως ακολούθως.

$$v_{eff} = \frac{U_C^4}{\frac{U_n^4}{n-1} + \frac{U_{GB}^4}{\infty} + \frac{U_{OF}^4}{\infty} + \frac{U_{RES}^4}{\infty} + \frac{U_{TH}^4}{\infty}} = \frac{5,94^4}{\frac{4,329^4}{4}} = 14,18 \approx 14 \quad (5.13)$$

Στη συνέχεια, από πίνακα τιμών της κατανομής Student, για $\nu = 14$ βαθμούς ελευθερίας και διάστημα εμπιστοσύνης 95%, προκύπτει ο συντελεστής κάλυψης $k = 2,1448$. Οπότε, η διευρυμένη αβεβαιότητα υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση.

$$U = k U_C = 12,74 \mu m \quad (5.14)$$

5.5 Αποτελέσματα Διακρίβωσης Μικρόμετρων

Για την έκφραση των μετρητικών αποτελεσμάτων της διακρίβωσης των μικρόμετρων επιλέγεται η διευρυμένη αβεβαιότητα για μέγιστη σαφήνεια. Επομένως, τα μετρητικά αποτελέσματα του πρώτου μικρόμετρου θα εκφράζονται με μία αβεβαιότητα $\pm 0,01 \text{ mm}$, όπου το νόμμερο που ακολουθεί το σύμβολο \pm είναι η αριθμητική τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας $U = k u_c$, προσδιοριζόμενη από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c = 0,005 \text{ mm}$ και ένα συντελεστή κάλυψης $k = 2,0687$, ο οποίος, με βάση την κατανομή Student για $\nu = 23$ βαθμούς ελευθερίας, ορίζει ένα διάστημα με εκτιμώμενο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου μικρόμετρου θα συνοδεύονται από μία αβεβαιότητα $\pm 0,013 \text{ mm}$, όπου το νόμμερο που ακολουθεί το σύμβολο \pm είναι η αριθμητική τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας $U = k u_c$, προσδιοριζόμενη από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c = 0,006 \text{ mm}$ και ένα συντελεστή κάλυψης $k = 2,1448$, ο οποίος, με βάση την κατανομή Student για $\nu = 14$ βαθμούς ελευθερίας, ορίζει ένα διάστημα με εκτιμώμενο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Κεφάλαιο 6: Ανάλυση Μετρητικών Συστημάτων

6.1 Βασικές Έννοιες Μετρητικών Δυνατοτήτων

Για την ολοκλήρωση της μελέτης της ποιότητας των μετρήσεων των οργάνων, αφού ολοκληρωθεί η εκτίμηση της αβεβαιότητάς τους, συμπληρώνεται ο προσδιορισμός των πηγών μεταβλητότητας, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε στα υπό μέτρηση τεμάχια, είτε στο μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιείται. Αυτός ο προσδιορισμός της ικανότητας των μετρητικών συστημάτων, αποτελεί σημαντική πτυχή πολλών ποιοτικών χαρακτηριστικών και δραστηριοτήτων βελτίωσής τους. Εκτός από την μεταβλητότητα που οφείλεται στα μετρούμενα μεγέθη και την μεταβλητότητα που προκύπτει από το μετρητικό όργανο ή σύστημα, πιθανή είναι και η εμφάνιση μεταβλητοτήτων που οφείλονται σε παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση, όπως οι ρυθμίσεις εγκατάστασης ή βαθμονόμησης.

Ο σκοπός της μελέτης των μετρητικών δυνατοτήτων είναι ο προσδιορισμός του ποσοστού της συνολικής μεταβλητότητας που οφείλεται στο μετρητικό όργανο, ο διαχωρισμός των στοιχείων μεταβλητότητας στο μετρητικό σύστημα και, συνεπώς, η αξιολόγηση της καταλληλότητας του οργάνου ως προς την ικανότητά του για την επιθυμητή εφαρμογή. Κατά την ανάλυση των συστημάτων ποιότητας δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη μελέτη των μετρητικών δυνατοτήτων, καθώς οι μετρήσεις αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας επίλυσης προβλημάτων, αλλά κυρίως καθορίζουν τη λήψη αποφάσεων σε επιχειρηματικές δραστηριότητες. Με λίγα λόγια, ένα ακατάλληλο μετρητικό σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκείς, και συνήθως λανθασμένες, λήψεις αποφάσεων, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά της επιχειρηματικές επιδόσεις.

Η αποτελεσματική παρακολούθηση διαδικασιών με βάση ένα ακατάλληλο ή ανεπαρκές μετρητικό σύστημα, αποτελεί πολύ δύσκολη ενέργεια, πόσο μάλλον αν, της παρακολούθησης αυτής, έπεται ο έλεγχος, η βελτίωση ή η διαχείριση της διαδικασίας. Καθώς η μεταβλητότητα της μέτρησης είναι μέρος της συνολικής μεταβλητότητας ενός μετρούμενου μεγέθους, η μεγάλη μετρητική μεταβλητότητα μπορεί να έχει αρνητική επίπτωση σε δραστηριότητες βελτίωσης των διεργασιών και να οδηγήσει, για παράδειγμα, σε μεγαλύτερα μεγέθη δειγμάτων σε μελέτες, σε πολλαπλή επανάληψη πειραμάτων με στόχο τη βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής ή ακόμα και σε εκτενέστερες δοκιμές προϊόντων. Επιπλέον, με τη χρήση ενός ακατάλληλου μετρητικού συστήματος, αυξάνονται οι πιθανότητες αποδοχής μίας κακής παρτίδας προϊόντων και απόρριψης μίας καλής παρτίδας.

Για την αποφυγή, λοιπόν, των επιπτώσεων της επιλογής ενός ανεπαρκούς μετρητικού συστήματος, πραγματοποιείται η ανάλυση δυνατοτήτων τους. Το βασικό μοντέλο της ανάλυσης των συστημάτων μέτρησης για τη μελέτη των δυνατοτήτων τους εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$y = x + \varepsilon \quad (6.1)$$

Όπου y είναι η συνολική παρατηρούμενη μέτρηση, x η πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους και το ε ορίζεται ως το μετρητικό σφάλμα. Υποθέτοντας πως οι μεταβλητές x και ε είναι τυχαίες και ανεξάρτητες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και 0, και μεταβλητότητα σ_p^2 και σ_{Gauge}^2 , αντίστοιχα, η συνολική μετρητική μεταβλητότητα θα είναι:

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{Gauge}^2 \quad (6.2)$$

6.2 Ανάλυση Δυνατοτήτων Μετρητικών Συστημάτων

Για το διαχωρισμό των παραπάνω συστατικών της συνολικής μεταβλητότητας της μέτρησης, όπως και για την εκτίμηση της μετρητικής ικανότητας του συστήματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαγράμματα ελέγχου και διάφορες στατιστικές μέθοδοι. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί η μελέτη των δυνατοτήτων μετρητικών συστημάτων με δύο τρόπους. Αρχικά, η ανάλυση γίνεται με τον προσδιορισμό των μεταβλητοτήτων και κάποιων δεικτών δυνατοτήτων, και έπειτα, με τη μέθοδο ανάλυσης της αβεβαιότητας (ANOVA).

6.2.1 Υπολογισμός Δεικτών Δυνατοτήτων και Μεταβλητότητας Μετρήσεων

Σύμφωνα με τη σχέση (6.2), η συνολική μεταβλητότητα συνίσταται από τη μεταβλητότητα της τιμής του μετρούμενου μεγέθους και τη μεταβλητότητα του μετρητικού σφάλματος, δηλαδή τη μεταβλητότητα που οφείλεται στο μετρητικό όργανο. Μία εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του μετρητικού σφάλματος, $\hat{\sigma}_{Gauge}$, προσδιορίζεται από υπολογιστικό πρόγραμμα μέσω της εκτέλεσης της ανάλυσης μεταβλητότητας, είτε εξάγεται από τη διαίρεση του μέσου εύρους των μετρήσεων, \bar{R} , με μία συνάρτηση του μεγέθους δείγματος n , d_2 , οι τιμές της οποίας δίνονται σε πίνακες τιμών παραμέτρων κατασκευής διαγραμμάτων ελέγχου.

$$\hat{\sigma}_{Gauge} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (6.3)$$

Η κατανομή του μετρητικού σφάλματος είναι, συνήθως, ικανοποιητική προσέγγιση της κανονικής κατανομής. Επομένως, η μεταβλητότητα του μετρητικού σφάλματος είναι μία καλή εκτίμηση της ικανότητας του μετρητικού οργάνου. Σημειώνεται πως, σε πολλές περιπτώσεις, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων από τα διαγράμματα ελέγχου των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τότε, το διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής δείχνει τη διακριτική ισχύ του οργάνου, ενώ το διάγραμμα ελέγχου εύρους, δηλαδή το διάγραμμα που σχηματίζεται με βάση τη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων του ίδιου τεμαχίου με τη χρήση του ίδιου οργάνου, εμφανίζει το μέγεθος του σφάλματος μέτρησης, ή αλλιώς την ικανότητα του οργάνου.

Είναι αρκετά συνηθισμένη, αλλά όχι και απαραίτητως καλή, η σύγκριση της εκτίμησης της ικανότητας μέτρησης με το πλάτος των προδιαγραφών του προϊόντος. Μέσω της σύγκρισης αυτής, σχηματίζεται ένας δείκτης, που ισούται με το λόγο της ποσότητας $k\hat{\sigma}_{Gauge}$ προς τη συνολική ζώνη ανοχής, και ονομάζεται λόγος πιστότητας προς ανοχή (precision-to-tolerance).

$$P/T = \frac{k\hat{\sigma}_{Gauge}}{USL - LSL} \quad (6.4)$$

Στην παραπάνω σχέση, τα USL και LSL είναι το άνω και κάτω όριο των προδιαγραφών των μετρητικών συστημάτων, ενώ δύο συνηθισμένες επιλογές για τη σταθερά k είναι η $k = 5,515$ και η $k = 6$. Η τιμή $k = 5,515$ αντιστοιχεί στην οριακή τιμή του αριθμού των τυπικών αποκλίσεων μεταξύ των ορίων ενός διαστήματος ανοχής 95% που περιέχει τουλάχιστον το 99% του πληθυσμού των τιμών, ενώ η τιμή $k = 6$ αντιστοιχεί στον αριθμό των τυπικών αποκλίσεων μεταξύ των καθιερωμένων φυσικών ορίων ανοχής που περιέχουν τον πληθυσμό.

Οι τιμές της εκτιμώμενης αναλογίας P/T που είναι μικρότερες ή ίσες με 0,1, θεωρείται πως υποδηλώνουν επαρκή ικανότητα μέτρησης. Αυτό βασίζεται στον κανόνα που συνήθως χρησιμοποιείται κατά την βαθμονόμηση, με βάση τον οποίο το μετρητικό όργανο πρέπει να βαθμονομείται σε μονάδες ίσες με το ένα δέκατο της επιθυμητής ακρίβειας της τελικής μέτρησης. Ωστόσο, απαιτείται η ανάλογη προσοχή για την αποδοχή αυτού του γενικού κανόνα και η βάση για την επιλογή του κατάλληλου μετρητικού συστήματος είναι

προτιμότερο να είναι η ορθότητα και η πιστότητά του. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο η τιμή του δείκτη P/T να είναι μικρότερη ή ίση του 0,1.

Όσον αφορά τη συνολική παρατηρούμενη μετρητική μεταβλητότητα, η οποία περιλαμβάνει τη μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους και τη μεταβλητότητα λόγω μετρητικού σφάλματος, μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα των μετρήσεων. Ουσιαστικά, είναι η μεταβλητότητα των μετρήσεων του δείγματος.

$$\sigma_{Total}^2 = s^2 \quad (6.5)$$

Έτσι, σύμφωνα με τη σχέση (6.2), η μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους υπολογίζεται ως εξής.

$$\sigma_p^2 = \sigma_{Total}^2 - \sigma_{Gauge}^2 \quad (6.6)$$

Δύο ακόμη δείκτες που χρησιμοποιούνται ως μέτρα της μετρητικής ικανότητας ενός συστήματος ή οργάνου είναι ο λόγος της μεταβλητότητας του μετρούμενου μεγέθους προς την ολική μεταβλητότητα και ο λόγος της μεταβλητότητας του μετρητικού συστήματος προς τη συνολική μεταβλητότητα. Δηλαδή, αυτοί οι δύο δείκτες υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\rho_P = \frac{\sigma_p^2}{\sigma_{Total}^2} \quad (6.7)$$

και

$$\rho_M = \frac{\sigma_{Gauge}^2}{\sigma_{Total}^2} \quad (6.8)$$

αντίστοιχα, και προφανώς $\rho_P = 1 - \rho_M$.

Ένα άλλο μέτρο της επάρκειας του μετρητικού συστήματος είναι ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο (signal-to-noise ratio), ο οποίος ορίζει τον αριθμό των διαφορετικών επιπέδων ή κατηγοριών που μπορούν να ληφθούν αξιόπιστα από τις μετρήσεις.

$$SNR = \sqrt{\frac{2\rho_P}{1 - \rho_P}} \quad (6.9)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, μία τιμή μεγαλύτερη ή ίση του πέντε υποδεικνύει επαρκή μετρητική ικανότητα, ενώ μία τιμή μικρότερη του δύο δηλώνει ανεπαρκή μετρητική ικανότητα. Ωστόσο, αυτή η απαίτηση για τον συγκεκριμένο δείκτη είναι κάπως αυθαίρετη.

Τέλος, η ικανότητα των μετρητικών συστημάτων μπορεί να εκτιμηθεί και μέσω του λόγου διακριτοποίησης (discrimination ratio), που ορίζεται όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση.

$$DR = \frac{1 + \rho_P}{1 - \rho_P} \quad (6.10)$$

Μία και πάλι αυθαίρετη προϋπόθεση για την επάρκεια του μετρητικού συστήματος και των δυνατοτήτων του είναι ο δείκτης DR να υπερβαίνει την τιμή τέσσερα (4).

6.2.2 Μέθοδος Ανάλυσης Μεταβλητότητας

Παράλληλα με τους δείκτες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, είναι δυνατό να σχεδιαστούν μελέτες δυνατοτήτων μετρητικών συστημάτων για τη διερεύνηση δύο συστατικών του μετρητικού σφάλματος, την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγισιμότητα. Όπως έχει ήδη αναλυθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, η αναπαραγωγισιμότητα ορίζεται ως η μεταβλητότητα που οφείλεται σε διαφορετικούς χειριστές του οργάνου ή, γενικά, στις διαφορετικές συνθήκες μέτρησης, ενώ η επαναληψιμότητα εκφράζει την ικανότητα του οργάνου να αποδίδει πιστά τη μέτρηση όταν αυτή πραγματοποιείται κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο, η μεταβλητότητα του μετρητικού σφάλματος μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της μεταβλητότητας λόγω επαναληψιμότητας και της μεταβλητότητας λόγω αναπαραγωγισιμότητας.

$$\sigma_{Measurement\ Error}^2 = \sigma_{Gauge}^2 = \sigma_{Repeatability}^2 + \sigma_{Reproducibility}^2 \quad (6.11)$$

Το πείραμα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των δύο αυτών συνιστωσών της μεταβλητότητας του μετρητικού σφάλματος καλείται, συνήθως, μελέτη R & R (Repeatability and Reproducibility), και πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης της μεταβλητότητας λόγω τυχαίων επιδράσεων. Παρόλο που πλέον χρησιμοποιούνται υπολογιστικά λογισμικά για την ανάλυση της μεταβλητότητας, ο τρόπος υπολογισμού της περιγράφεται παρακάτω.

Εάν υπάρχουν a τυχαία επιλεγμένα επίπεδα και b χειριστές, και κάθε χειριστής πραγματοποιεί n μετρήσεις σε κάθε επίπεδο, τότε οι μετρήσεις περιγράφονται από το ακόλουθο μοντέλο, όπου με i συμβολίζεται το επίπεδο, με j ο χειριστής και με k η μέτρηση.

$$y_{ijk} = \mu + P_i + O_j + (PO)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6.12)$$

Οι παράμετροι P_i , O_j , $(PO)_{ij}$ και ε_{ijk} είναι όλες ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές και εκφράζουν τις επιδράσεις των επιπέδων, των χειριστών, την αλληλεπίδραση ή τα κοινά αποτελέσματα των επιπέδων και των χειριστών, και τα τυχαία σφάλματα. Υποθέτοντας πως οι τυχαίες μεταβλητές P_i , O_j , $(PO)_{ij}$ και ε_{ijk} ακολουθούν κανονικές κατανομές με μηδενική μέση τιμή και μεταβλητότητες $V(P_i) = \sigma_p^2$, $V(O_j) = \sigma_o^2$, $V((PO)_{ij}) = \sigma_{po}^2$ και $V(\varepsilon_{ijk}) = \sigma^2$, η μεταβλητότητα της κάθε μέτρησης είναι:

$$V(y_{ijk}) = \sigma_p^2 + \sigma_o^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma^2 \quad (6.13)$$

Με τη μέθοδο ανάλυσης της μεταβλητότητας γίνεται η εκτίμηση των συνιστωσών της συνολικής μετρητικής αβεβαιότητας. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη διαίρεση της συνολικής μεταβλητότητας των μετρήσεων στα ακόλουθα αθροίσματα τετραγώνων:

$$SS_{Total} = SS_{parts} + SS_{operators} + SS_{p \times o} + SS_{Error} \quad (6.14)$$

Κάθε άθροισμα τετραγώνων στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης (6.14) διαιρούμενο με τους βαθμούς ελευθερίας οδηγεί στο αντίστοιχο μέσο τετράγωνο. Συμβολίζοντας με p τους βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν στα επίπεδα των μετρήσεων και με o τους βαθμούς ελευθερίας για τους χειριστές προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$MS_p = \frac{SS_{parts}}{p - 1} \quad (6.15)$$

$$MS_o = \frac{SS_{operators}}{o - 1} \quad (6.16)$$

$$MS_{PO} = \frac{SS_{P \times O}}{(p-1)(o-1)} \quad (6.17)$$

$$MS_E = \frac{SS_{Error}}{po(n-1)} \quad (6.18)$$

Έτσι, οι εκτιμήσεις των μέσων τετραγώνων θα είναι οι εξής:

$$E(MS_P) = \sigma^2 + n\sigma_{PO}^2 + bn\sigma_p^2 \quad (6.19)$$

$$E(MS_O) = \sigma^2 + n\sigma_{PO}^2 + an\sigma_o^2 \quad (6.20)$$

$$E(MS_{PO}) = \sigma^2 + n\sigma_{PO}^2 \quad (6.21)$$

και
$$E(MS_E) = \sigma^2 \quad (6.22)$$

Με τη χρήση ενός υπολογιστικού προγράμματος ανάλυσης μεταβλητότητας, οι συνιστώσες της μεταβλητότητας μπορούν να εκτιμηθούν με την εξίσωση των αριθμητικών τιμών των μέσων τετραγώνων με τις εκτιμήσεις τους και την επίλυσή τους ως προς τις συνιστώσες της μεταβλητότητας. Επομένως, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$\hat{\sigma}^2 = MS_E \quad (6.23)$$

$$\hat{\sigma}_{PO}^2 = \frac{MS_{PO} - MS_E}{n} \quad (6.24)$$

$$\hat{\sigma}_O^2 = \frac{MS_O - MS_{PO}}{pn} \quad (6.25)$$

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MS_P - MS_{PO}}{on} \quad (6.26)$$

Ορισμένες φορές μία από τις συνιστώσες της μεταβλητότητας τυχαίνει να έχει αρνητική τιμή. Σε τέτοιες περιπτώσεις είτε γίνεται η υπόθεση πως η αρνητική συνιστώσα είναι στην πραγματικότητα μηδενική είτε εφαρμόζεται μία διαφορετική μέθοδος εκτίμησης των

συνιστωσών της μεταβλητότητας που εξασφαλίζει μη αρνητικές εκτιμήσεις. Βέβαια, οι αρνητικές εκτιμήσεις των συνιστωσών αντιστοιχούν, συνήθως, σε πηγές μεταβλητότητας που δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική μετρητική μεταβλητότητα. Επομένως, ο ορισμός των αρνητικών συνιστωσών ως μηδενικών αποτελεί μία εύκολη προσέγγιση που συχνά λειτουργεί τόσο αποδοτικά όσο και πιο εξελιγμένες μέθοδοι.

Γενικά, η μεταβλητότητα του μετρητικού σφάλματος αντιστοιχίζεται με τη μεταβλητότητα λόγω επαναληψιμότητας, ενώ η αναπαραγωγιμότητα του μετρητικού οργάνου ορίζεται ως το άθροισμα των μεταβλητοτήτων του χειριστή και της αλληλεπίδρασης των επιπέδων με τους χειριστές (4).

$$\sigma_{Repeatability}^2 = \sigma^2 \quad (6.27)$$

και
$$\sigma_{Reproducibility}^2 = \sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 \quad (6.28)$$

Άρα, η μεταβλητότητα του οργάνου μπορεί να προσδιοριστεί και ως εξής.

$$\sigma_{Gauge}^2 = \sigma_{Reproducibility}^2 + \sigma_{Repeatability}^2 \quad (6.29)$$

6.3 Μελέτη Δυνατοτήτων Παχύμετρου

Πέρα από την ανάλυση της αβεβαιότητας του ηλεκτρονικού παχύμετρου και των δύο μικρόμετρων, που περιγράφεται στα δύο προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε και η μελέτη δυνατοτήτων ενός ηλεκτρονικού παχύμετρου εύρους 0-200 mm. Για τον υπολογισμό των δεικτών δυνατοτήτων του παχύμετρου και την ανάλυση της αβεβαιότητάς του, πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις της διαμέτρου δεκαέξι τεμαχίων του ίδιου είδους, από τρεις χειριστές.

6.3.1 Ανάλυση Μεταβλητότητας των Μετρήσεων Παχύμετρου

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα προϊόντα από τους τρεις χειριστές φαίνονται στον Πίνακα 7. Για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων, οι μετρήσεις έγιναν κοντά στην κύρια κλίμακα, με άσκηση της ανάλογης δύναμης για την επίτευξη μίας όσο το δυνατόν πιο ομαλής κίνησης της κινούμενης σιαγόνας.

Πίνακας 7: Μετρήσεις Προϊόντων σε mm

| Τεμάχιο | Χειριστής 1 | | Χειριστής 2 | | Χειριστής 3 | |
|---------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | 1η Μέτρηση | 2η Μέτρηση | 1η Μέτρηση | 2η Μέτρηση | 1η Μέτρηση | 2η Μέτρηση |
| 1 | 19,72 | 19,73 | 19,70 | 19,72 | 19,68 | 19,67 |
| 2 | 19,71 | 19,75 | 19,75 | 19,74 | 19,71 | 19,75 |
| 3 | 19,73 | 19,74 | 19,66 | 19,68 | 19,66 | 19,70 |
| 4 | 19,67 | 19,69 | 19,67 | 19,66 | 19,68 | 19,70 |
| 5 | 19,70 | 19,72 | 19,70 | 19,70 | 19,69 | 19,72 |
| 6 | 19,73 | 19,68 | 19,66 | 19,69 | 19,72 | 19,72 |
| 7 | 19,67 | 19,70 | 19,68 | 19,70 | 19,70 | 19,71 |
| 8 | 19,71 | 19,67 | 19,66 | 19,67 | 19,67 | 19,71 |
| 9 | 19,77 | 19,75 | 19,72 | 19,71 | 19,75 | 19,74 |
| 10 | 19,76 | 19,75 | 19,74 | 19,76 | 19,75 | 19,76 |
| 11 | 19,71 | 19,73 | 19,73 | 19,73 | 19,71 | 19,69 |
| 12 | 19,71 | 19,71 | 19,70 | 19,68 | 19,69 | 19,68 |
| 13 | 19,72 | 19,74 | 19,72 | 19,73 | 19,72 | 19,71 |
| 14 | 19,74 | 19,75 | 19,74 | 19,74 | 19,68 | 19,72 |
| 15 | 19,71 | 19,71 | 19,68 | 19,70 | 19,67 | 19,69 |
| 16 | 19,69 | 19,72 | 19,71 | 19,69 | 19,70 | 19,67 |

Όσον αφορά την ανάλυση μεταβλητότητας των μετρήσεων του ηλεκτρονικού παχύμετρου, που προσδιορίζει τα μέσα τετράγωνα των επιπέδων των τεμαχίων, των χειριστών, και της αλληλεπίδρασής τους, καθώς και τις συνιστώσες της μεταβλητότητας του οργάνου ως προς την αναπαραγωγισιμότητα και την επαναληψιμότητα, πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή των μετρήσεων του Πίνακα 7 στο Minitab. Με τη χρήση των εντολών του Minitab για τη διεξαγωγή μελέτης R&R, τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις παρουσιάζονται στα Σχήματα 28 και 29.

Βάσει των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το Minitab, πραγματοποιείται, στη συνέχεια, ο υπολογισμός όλων των συνιστωσών της μεταβλητότητας του ηλεκτρονικού παχύμετρου, καθώς και ο προσδιορισμός των δεικτών δυνατοτήτων του.

Gage R&R Study - ANOVA Method

Two-Way ANOVA Table With Interaction

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|-------------------|----|-----------|-----------|---------|-------|
| parts | 15 | 0.0425406 | 0.0028360 | 5.62288 | 0.000 |
| operators | 2 | 0.0046021 | 0.0023010 | 4.56216 | 0.019 |
| parts * operators | 30 | 0.0151312 | 0.0005044 | 2.00913 | 0.015 |
| Repeatability | 48 | 0.0120500 | 0.0002510 | | |
| Total | 95 | 0.0743240 | | | |

α to remove interaction term = 0.05

Gage R&R

| Source | VarComp | %Contribution (of VarComp) |
|-----------------|-----------|-------------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0004339 | 52.75 |
| Repeatability | 0.0002510 | 30.52 |
| Reproducibility | 0.0001828 | 22.23 |
| operators | 0.0000561 | 6.83 |
| operators*parts | 0.0001267 | 15.40 |
| Part-To-Part | 0.0003886 | 47.25 |
| Total Variation | 0.0008225 | 100.00 |

| Source | StdDev (SD) | Study Var (6 * SD) | %Study Var (%SV) |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| Total Gage R&R | 0.0208292 | 0.124975 | 72.63 |
| Repeatability | 0.0158443 | 0.095066 | 55.25 |
| Reproducibility | 0.0135208 | 0.081125 | 47.15 |
| operators | 0.0074931 | 0.044958 | 26.13 |
| operators*parts | 0.0112546 | 0.067528 | 39.24 |
| Part-To-Part | 0.0197132 | 0.118279 | 68.74 |
| Total Variation | 0.0286787 | 0.172072 | 100.00 |

Number of Distinct Categories = 1

Σχήμα 28: Αποτελέσματα Ανάλυσης Μεταβλητότητας και Μελέτης R&R [Πηγή: Minitab]

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης της μεταβλητότητας εκτός από τους λόγους F, περιέχονται και οι τιμές των p-values. Με αυτό τον τρόπο, εξάγονται τα συμπεράσματα για τους παράγοντες που επιδρούν στην μεταβλητότητα που σχετίζεται με το υπό μελέτη παχύμετρο. Συνεπώς, παρατηρείται πως η επίδραση των προϊόντων συμβάλλει με σιγουριά στη συνολική μεταβλητότητα, σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0,05$. Παράλληλα, φαίνεται πως και οι χειριστές, αλλά και η αλληλεπίδραση των χειριστών και των επιπέδων των τεμαχίων, επηρεάζουν στατιστικώς σημαντικά σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha=0,05$. Βέβαια, οι χειριστές επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό από τα προϊόντα, ενώ η

αλληλεπίδρασή τους επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό και από την επίδραση των χειριστών. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.23) έως (6.26), εκτιμώνται οι επιμέρους μεταβλητότητες.

$$\hat{\sigma}^2 = MS_E = 0,0002510 \text{ mm} \quad (6.30)$$

$$\hat{\sigma}_{P_O}^2 = \frac{MS_{P_O} - MS_E}{n} = \frac{0,0005044 - 0,0002510}{2} = 1,267 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (6.31)$$

$$\hat{\sigma}_O^2 = \frac{MS_O - MS_{P_O}}{pn} = \frac{0,0023010 - 0,0005044}{16 \times 2} = 5,614 \times 10^{-5} \text{ mm} \quad (6.32)$$

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MS_P - MS_{P_O}}{on} = \frac{0,0028360 - 0,0005044}{3 \times 2} = 3,886 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (6.33)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (6.26) έως (6.28), η μεταβλητότητα των μετρήσεων με το υπό μελέτη παχύμετρο μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\hat{\sigma}_{Gauge}^2 = \hat{\sigma}^2 + \hat{\sigma}_O^2 + \hat{\sigma}_{P_O}^2 = 4,338 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (6.34)$$

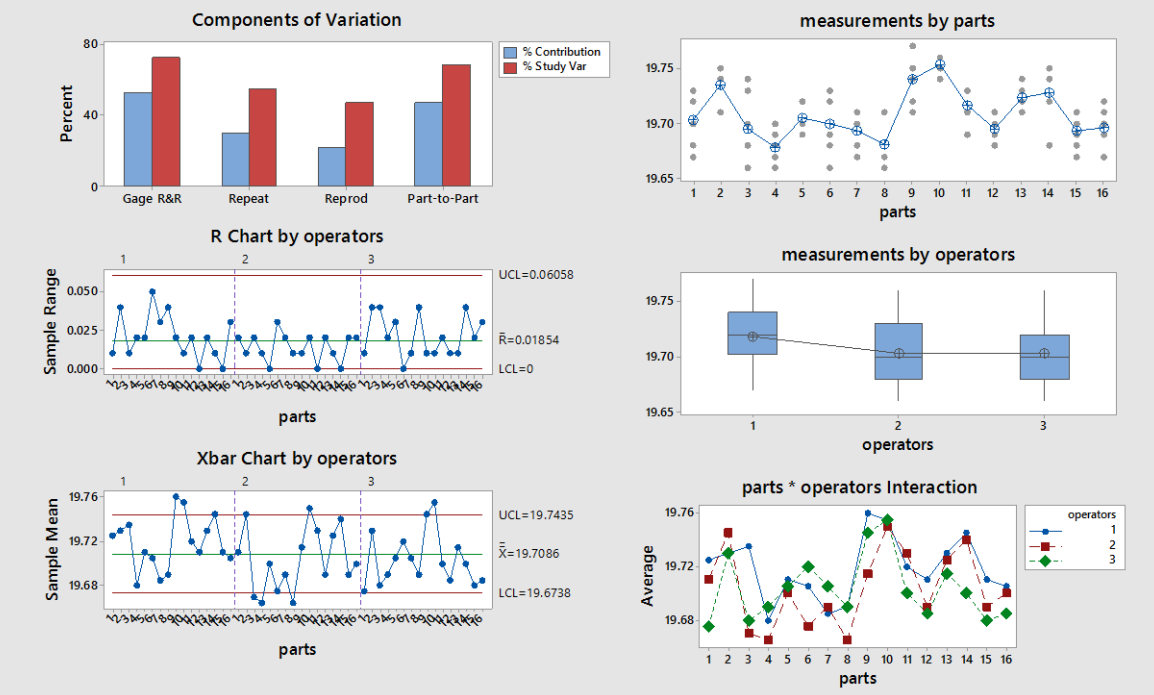
Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της μελέτης R&R στο Σχήμα 28, η τιμή της μεταβλητότητας των μετρήσεων με το συγκεκριμένο παχύμετρο, που υπολογίστηκε στη σχέση (6.43), μπορεί να επαληθευτεί και με το άθροισμα των μεταβλητοτήτων λόγω αναπαραγωγισιμότητας και επαναληψιμότητας.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από το Minitab για τη συνολική απόδοση του παχύμετρου, συνοδεύονται και από μία σειρά διαγραμμάτων, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 29. Από τα διαγράμματα ελέγχου μέσου εύρους γίνεται εύκολα αντιληπτό πως το μετρητικό σύστημα βρίσκεται υπό στατιστικό έλεγχο, ενώ τα σημεία που βρίσκονται εκτός ορίων ελέγχου στο διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής δεν προκαλούν ανησυχία, καθώς το συγκεκριμένο διάγραμμα δεν αποτυπώνει την κατάσταση της διαδικασίας, αλλά περισσότερο την ικανότητα του μετρητικού συστήματος να διακρίνει τις διαφορετικές διαστάσεις των προϊόντων μεταξύ τους.

Gage R&R (ANOVA) Report for measurements

Gage name:
Date of study:

Reported by:
Tolerance:
Misc:



Σχήμα 29: Διαγράμματα Ανάλυσης Μεταβλητότητας [Πηγή: Minitab]

6.3.2 Υπολογισμός Δεικτών Δυνατοτήτων και Μεταβλητότητας Μετρήσεων Παχύμετρου

Γνωρίζοντας πως η ονομαστική διάμετρος των υπό μέτρηση προϊόντων είναι $19,75 \text{ mm}$, τα φυσικά όρια προδιαγραφών του ορίζονται αυθαίρετα ως $USL = 19,85 \text{ mm}$ και $LSL = 19,55 \text{ mm}$. Συγχρόνως, επιλέγοντας την τιμή 6 για τη σταθερά k , ο λόγος πιστότητας προς ανοχή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$P/T = \frac{k\hat{\sigma}_{\text{Gauge}}}{USL - LSL} = \frac{6 \times 4,338 \times 10^{-4}}{19,85 - 19,55} = 0,0087 \quad (6.35)$$

Εφόσον η τιμή της εκτιμώμενης αναλογίας P/T είναι μικρότερη από 0,1, θεωρείται πως το συγκεκριμένο ηλεκτρονικό παχύμετρο επαρκεί σε ικανότητα μέτρησης.

Η συνολική παρατηρούμενη μετρητική μεταβλητότητα, η οποία περιλαμβάνει τη μεταβλητότητα των προϊόντων και τη μεταβλητότητα λόγω του μετρητικού σφάλματος του παχύμετρου, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (6.13).

$$\hat{\sigma}_{Total}^2 = \hat{\sigma}^2 + \hat{\sigma}_O^2 + \hat{\sigma}_{PO}^2 + \hat{\sigma}_P^2 = 8,224 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (6.36)$$

Γνωρίζοντας, λοιπόν, τις επιμέρους μεταβλητότητες, μπορούν να υπολογισθούν και οι δείκτες δυνατοτήτων, που προσδιορίζουν το ποσοστό της συνολικής μεταβλητότητας που οφείλεται στη μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους και το αντίστοιχο ποσοστό που οφείλεται στην απόδοση του παχύμετρου.

$$\hat{\rho}_P = \frac{\hat{\sigma}_P^2}{\hat{\sigma}_{Total}^2} = \frac{3,886 \times 10^{-4}}{8,224 \times 10^{-4}} = 0,4725 \text{ ή } 47,25\% \quad (6.37)$$

και

$$\hat{\rho}_M = \frac{\hat{\sigma}_{Gauge}^2}{\hat{\sigma}_{Total}^2} = \frac{4,338 \times 10^{-4}}{8,224 \times 10^{-4}} = 0,5275 \text{ ή } 52,75\% \quad (6.38)$$

και προφανώς $\rho_P = 1 - \rho_M$.

Παρόλο που και τα δύο ποσοστά των επιμέρους μεταβλητοτήτων υπολογίζονται κοντά στο 50% της συνολικής μεταβλητότητας των μετρήσεων, συμπεραίνεται πως μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής μετρητικής μεταβλητότητας οφείλεται στην μεταβλητότητα που παρουσιάζουν οι ενδείξεις του παχύμετρου. Το γεγονός αυτό καθιστά το συγκεκριμένο παχύμετρο ανεπαρκές ως προς τις μετρητικές του δυνατότητες, καθώς σε αυτό αποδίδεται, κατά το ήμισυ, η μεταβλητότητα των μετρήσεων.

Τέλος, υπολογίζεται ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο, καθώς και ο λόγος διακριτοποίησης.

$$SNR = \sqrt{\frac{2\hat{\rho}_P}{1 - \hat{\rho}_P}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,4725}{1 - 0,4725}} = 1,34 \quad (6.39)$$

$$DR = \frac{1 + \hat{\rho}_P}{1 - \hat{\rho}_P} = \frac{1 + 0,4725}{1 - 0,4725} = 2,79 \quad (6.40)$$

Παρόλο που οι προϋποθέσεις που κρίνουν τις δυνατότητες των οργάνων με βάση τους παραπάνω δύο δείκτες είναι κάπως αυθαίρετες, στην συγκεκριμένη περίπτωση και οι δύο δείκτες οδηγούν στο συμπέρασμα πως το ηλεκτρονικό παχύμετρο που μελετάται δεν έχει

επαρκείς δυνατότητες. Αυτό δικαιολογείται με την τιμή του λόγου του σήματος προς το θόρυβο, η οποία είναι μικρότερη του δύο, και με την τιμή του δείκτη DR που δεν υπερβαίνει το τέσσερα.

Κεφάλαιο 7: Σύνοψη και Συμπεράσματα

Με την ανάλυση των βασικών εννοιών της μετρολογίας, την παρουσίαση της διαδικασίας εκτίμησης της αβεβαιότητας μετρήσεων και της διακρίβωσης των μετρητικών οργάνων, γίνεται αντιληπτός ο λόγος για τον οποίο οι μετρήσεις αποτελούν μία από τις βάσεις για τη διατήρηση και την αναβάθμιση της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου, καθώς και για τη συνεχή εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας.

Υπολογίζοντας τη μετρητική αβεβαιότητα δύο ειδών οργάνων μέσω της διακρίβωσής τους, μπορούν εύκολα να γίνουν κατανοητοί οι λόγοι και οι βάσεις για τη διακρίβωση και άλλων, παρόμοιων ή περιπλοκότερων, οργάνων και συσκευών. Γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για επιστημονικά εργαστήρια, αλλά και επιχειρήσεις, που δίνουν μεγάλο βάρος στην ποιότητα των μετρήσεων. Με αυτό τον τρόπο, διακρίνεται και η χρησιμότητα της στατιστικής για την εκπόνηση όλων των διαδικασιών μελέτης της ποιότητας των μετρήσεων, οι οποίες, στην ουσία, βασίζονται στον υπολογισμό τυπικών αποκλίσεων από την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, στη διακρίβωση του παχύμετρου και των μικρόμετρων του μηχανουργείου, τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν πως και τα τρία όργανα προσεγγίζουν την πραγματική τιμή με μία απόκλιση της τάξης του ενός εκατοστού του mm. Πιο συγκεκριμένα, η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ηλεκτρονικού παχύμετρου εύρους 0-300 mm είναι $\pm 0,014$ mm, ο τρόπος υπολογισμού της οποίας αναλύεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 4. Όσον αφορά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προκύπτουν από τα μικρόμετρα εύρους 200-300 και 300-400 mm, σχετίζονται με μία αβεβαιότητα $\pm 0,01$ και $\pm 0,013$ mm, αντίστοιχα, που αναλύονται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 5.

Βέβαια, είναι απαραίτητο να δίνεται τόσο μεγάλη έμφαση στην ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων, όση δίνεται και στην ποσοτικοποίησή τους. Με αυτό τον τρόπο, διακρίνεται και η σημασία της διακρίβωσης των μετρητικών οργάνων, η οποία εξασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα των οργάνων στα εθνικά ή τα διεθνή πρότυπα. Σε γενικές γραμμές, εκτός από τη διακρίβωση, η ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων μπορεί να επιτευχθεί και με την κατάλληλη επιλογή και χρήση του οργάνου, καθώς και με την επανάληψη των μετρήσεων.

Η κατάλληλη επιλογή του μετρητικού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της ανάλυσής του, κατά την οποία προδιορίζονται οι συνιστώσες της συνολικής μεταβλητότητας των μετρήσεων που πραγματοποιούνται με αυτό, καθώς και οι δείκτες δυνατοτήτων του. Με την ανάλυση, όμως, των δυνατοτήτων ενός ηλεκτρονικού παχύμετρου, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6, είναι προφανές πως χωρίς την κρίση του χειριστή ανάλογα με τις απαιτήσεις της μετρητικής διαδικασίας, η επιλογή του

κατάλληλου οργάνου καθίσταται δύσκολη. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικότητας των συμπερασμάτων που εξάγονται από τα αποτελέσματα των δεικτών δυνατοτήτων, που βασίζονται σε αυθαίρετους κανόνες.

Κλείνοντας τονίζεται πως, όπως υποστηρίζουν κατά το πλείστον όλοι όσοι ασχολούνται με τη μετρολογία, και όπως τονίζεται και στον Οδηγό για την Έκφραση της Αβεβαιότητας στη Μέτρηση (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM), οι οδηγίες για την εκτίμηση της αβεβαιότητας δεν μπορούν να υποκαταστήσουν την κριτική σκέψη, την πνευματική ειλικρίνεια και την επαγγελματική ικανότητα. Η εκτίμηση της μετρητικής αβεβαιότητας εξαρτάται από τη γνώση της φύσης του μετρούμενου μεγέθους και της μέτρησης, καθώς δεν αποτελεί μία καθαρά μαθηματική τυπική διαδικασία. Η ποιότητα και η χρησιμότητα της αβεβαιότητας που σχετίζεται με το αποτέλεσμα μίας μέτρησης εξαρτάται από την κατανόηση, την κριτική ανάλυση και την ακεραιότητα όσων συμβάλλουν στον προσδιορισμό της αξίας της.

Βιβλιογραφία

1. **Joint Committee for Guides in Metrology.** International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd s.l. : JCGM 200:2012, 2008.
2. *Μέτρηση, Μετρολογία και Αξιώματα της Μετρολογίας.* **Κ. Ν. Αθανασιάδης.** 2006, Τεχνικά Χρονικά, Διμηνιαία Επιστημονική Έκδοση του ΤΕΕ, σσ. 1-16.
3. **Sergeev A.G., και Krohin V.V.** "Metrologia". Moscow : Logos, 2001.
4. **Montgomery, Douglas C.** *Introduction to Statistical Quality Control.* 6th. Arizona : John Wiley & Sons, Inc., 2009.
5. **Figliola, Richard S. και Beasley, Donald E.** *Theory and Design for Mechanical Measurements.* 5th. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2011.
6. **Γ. Μπεργελές, Δ. Παπάντωνης και Σ. Τσαγγάρης.** *Τεχνικές Μετρήσεις Ρευστομηχανικών Μεγεθών.* Αθήνα : Εκδόσεις Συμεών, 1998.
7. **Joint Committee for Guides in Metrology.** Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. s.l. : BIPM, IEC, IFCC,ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, 2008.
8. **European co-operation for Accreditation.** Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. s.l. : EA 4/02, 1999.
9. **ISO.** International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology. Geneva, Switzerland : s.n., 1993.
10. **Γ.Ε. Ναβροζίδης και Χ. Μήτσας.** ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ: Σημασία - Απαιτήσεις - Χρήση. Θεσσαλονίκη : Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, 2006. ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΟ ΦΥΛΛΑΔΙΟ ΕΙΜ-06.
11. **Γ. Ναβροζίδης, και συν.** ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ: Εκτίμηση - Υπολογισμός - Έκφραση. Θεσσαλονίκη : Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, 1999. ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΟ ΦΥΛΛΑΔΙΟ ΕΙΜ-01.
12. **Γ. Ναβροζίδης, Δ. Κυριακίδης και Γ. Λουκάς.** ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ. Θεσσαλονίκη : Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, 2003. ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΟ ΦΥΛΛΑΔΙΟ ΕΙΜ-02.
13. **Ομάδα Εργασίας με πρόταση της ΜΕ-ΤΠΔΠ.** Τυποποίηση και ποιότητα στη σύγχρονη κοινωνία. Αθήνα : ΜΕ-ΤΠΔΠ ΤΕΕ, 2008.
14. **Mike Cable.** Calibration: A Technician's Guide. United States of America : ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005.

15. **Hellenic Accreditation System S.A.** GUIDANCE ON THE APPLICATION OF THE LABORATORY ACCREDITATION CRITERIA. *MEASUREMENT AND CALIBRATION SYSTEMS*. 2007. 01.
16. **David Flack.** Good Practice Guide No.40, Callipers and Micrometers . Teddington, Middlesex : National Physical Laboratory, 2014. 2nd.
17. **Χ. Μήτσας, και συν.** Η ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ. Θεσσαλονίκη : Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, 2004. ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΕΙΜ-MM-01.

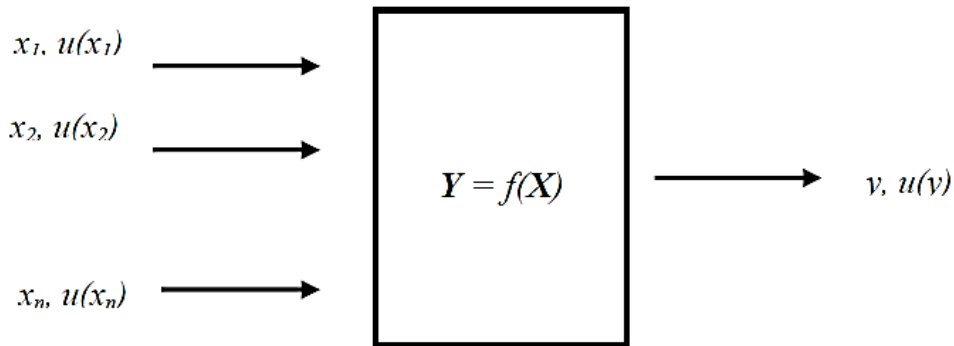
Παράρτημα Α: Υπολογισμός Αβεβαιοτήτων με Χρήση Μεθόδων Προσομοίωσης

Η διαδικασία εκτίμησης της τυπικής αβεβαιότητας της εκτίμησης y του μετρητέου Y και του αντίστοιχου διαστήματος εμπιστοσύνης, που παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο, εφαρμόζεται όταν οι ποσότητες εισόδου είναι ανεξάρτητες και ασυσχέτιστες τιμές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο υπολογισμός της τυπικής αβεβαιότητας της εξόδου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός γραμμικοποιημένου μοντέλου του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων, όπου οι εκτιμήσεις των μεταβλητών εισόδου του μοντέλου και των αβεβαιοτήτων τους προέρχονται από τις πιθανότερες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των μεταβλητών. Παράλληλα, ο προσδιορισμός ενός διαστήματος εμπιστοσύνης πραγματοποιείται βάσει της κατανομής Student για συγκεκριμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας.

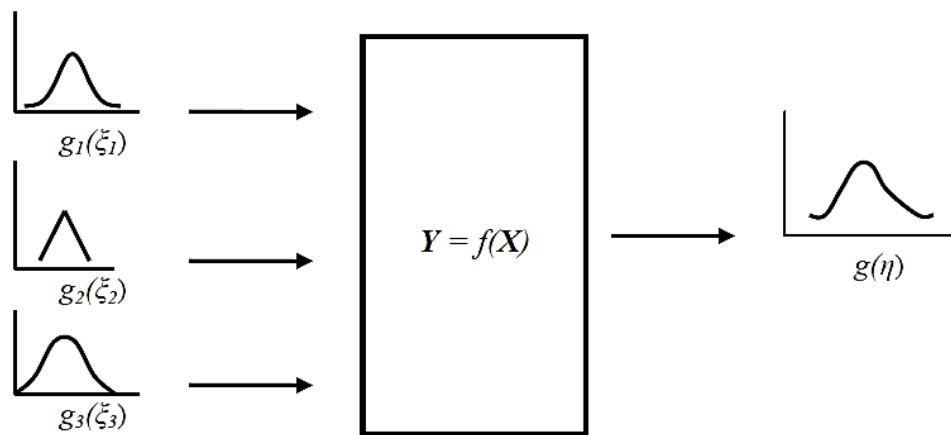
Στις περιπτώσεις, όμως, που δεν ικανοποιείται η προϋπόθεση των ανεξάρτητων και ασυσχέτιστων τιμών εισόδου, η εκτίμηση της τυπικής αβεβαιότητας της εκτίμησης εξόδου y σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η ύπαρξη σημαντικής μη-γραμμικότητας στο μετρητικό μοντέλο ώστε το ανάπτυγμα Taylor πρώτης τάξης του να μην αποτελεί καλή προσέγγιση, η μη ισχύς του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος με αποτέλεσμα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής εξόδου να μην είναι κανονική κατανομή, η μη ικανοποιητική ισχύς της σχέσης Welch-Satterthwaite για τον υπολογισμό των βαθμών ελευθερίας, και η ύπαρξη αμφιβολίας ισχύος των προϋποθέσεων για την εφαρμογή του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων, δημιουργεί την ανάγκη εφαρμογής άλλων υπολογιστικών μεθόδων.

Ευρέως διαδεδομένη για την εφαρμογή της είναι η υπολογιστική μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo, μέσω της οποίας εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά της μεταβλητής εξόδου, σε οποιαδήποτε από τις προαναφερόμενες περιπτώσεις. Σε αντίθεση με τον νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων, η μέθοδος αυτή προβλέπει τη διάδοση των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των μεταβλητών εισόδου μέσω του μετρητικού μοντέλου και τον προσδιορισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής εξόδου, ενώ βασίζεται στο ότι οποιαδήποτε τιμή που προκύπτει από μία κατανομή τυχαίων πιθανών εκτιμήσεων της μεταβλητής εισόδου, είναι το ίδιο επιτρεπτή όσο οποιαδήποτε άλλη εκτίμηση της μεταβλητής. Συνεπώς, αν για κάθε μεταβλητή εισόδου λαμβάνεται μία τυχαία τιμή από την αντίστοιχη προκαθορισμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, παράγεται μία συγκεκριμένη, τυχαία, αλλά επιτρεπτή κατάσταση εισόδου για το μετρητικό μοντέλο,

μέσω του οποίου υπολογίζεται μία πιθανή εκτίμηση της μεταβλητής εξόδου. Με την εκτέλεση της διαδικασίας αυτής για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων προκύπτει μία προσέγγιση της κατανομής των πιθανών εκτιμήσεων της μεταβλητής εξόδου.



Σχήμα Α 1: Γραφική αναπαράσταση του υπολογισμού αβεβαιότητας με τη διάδοση των κατανομών των μεταβλητών εισόδου με χρήση της υπολογιστικής μεθόδου Monte Carlo. [Πηγή: Η ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, Χ. Μήτσας, Ζ. Μεταξιώτου, Α. Λευκόπουλος και Γ. Ναβροζίδης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας]



Σχήμα Α 2: Γραφική αναπαράσταση του υπολογισμού αβεβαιότητας με τη διάδοση των κατανομών των μεταβλητών εισόδου με χρήση της υπολογιστικής μεθόδου Monte Carlo. [Πηγή: Η ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, Χ. Μήτσας, Ζ. Μεταξιώτου, Α. Λευκόπουλος και Γ. Ναβροζίδης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας]

Συνοπτικά, η μέθοδος μπορεί να αναλυθεί με τέσσερα βήματα. Πρώτον, παράγεται ένα δείγμα μεγέθους N με δειγματοληψία από τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των N μεταβλητών εισόδου X_i . Ο βαθμός τυχαιότητας και η ανεξαρτησία των στοιχείων του δείγματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεννήτρια τυχαιών αριθμών που χρησιμοποιείται. Δεύτερον, υπολογίζεται η εκτίμηση της μεταβλητής εξόδου Y , βάσει του

μετρητικού μοντέλου για το δείγμα των N μεταβλητών. Στη συνέχεια, ορίζεται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων M και πραγματοποιείται η επανάληψη της διαδικασίας, με αποτέλεσμα την παραγωγή M ανεξάρτητων εκτιμήσεων της μεταβλητής εξόδου από τα M δείγματα μεγέθους N των εκτιμήσεων των μεταβλητών εισόδου. Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι απαραίτητο να επιλεγεί κατάλληλα για την πιο αξιόπιστη προσέγγιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής εξόδου και είναι πιθανό να προσαρμοστεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς ο αριθμός των δοκιμών εξαρτάται από τη μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του εξαγόμενου μεγέθους. Εν τέλει, μετά από αυτή τη διαδικασία, διαμορφώνεται η συνάρτηση κατανομής του μετρητέου και βάσει αυτής εξάγεται η πιθανότερη τιμή και η τυπική απόκλισή της, και το διάστημα εμπιστοσύνης (17).

Παράρτημα Β: Παράδειγμα Πιστοποιητικού Διακρίβωσης

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται οι πρώτες σελίδες ενός παραδείγματος πιστοποιητικού διακρίβωσης πολύμετρου, όπως παρατίθεται στο ενημερωτικό φυλλάδιο του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας με τίτλο ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ: Σημασία – Απαιτήσεις – Χρήση των Γ. Ε. Ναβροζίδη και Χ. Μήτσα. Σημειώνεται πως τις υποφαινόμενες σελίδες ακολουθούν πίνακες που περιέχουν τις απαραίτητες μετρήσεις και στη σχετιζόμενη με αυτές μετρητική αβεβαιότητα.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ CERTIFICATE OF CALIBRATION

Αριθμός πιστοποιητικού / Certificate number : Δ1-05-xxxx



Εκδόθηκε από / Issued by :
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας
Hellenic Institute of Metrology
Εργαστήριο Χαμηλών Συχνοτήτων
Laboratory of Low Frequency

ΒΙ.ΠΕ. Θεσσαλονίκης, Ο.Τ.45
Τ.Κ. 57022 – Θεσσαλονίκη
Industr. Area Thessaloniki, Block 45
GR 57022 Thessaloniki
Τηλ./Tel. +030 31 569999, Fax +030 31 569996
e-mail: mail@eim.org.gr

| | | | |
|---|---|--|---|
| Πελάτης: Customer: | xxxxxxxxx | | |
| Κωδικός αντικειμένου: Item Code: | 08/02-02/4 | | |
| Περιγραφή: Description: | Ψηφιακό Πολύμετρο Digital Multimeter | | |
| Κατασκευαστής: Manufacturer: | Agilent | | |
| Τύπος: Type: | 3458A | | |
| Αριθμός Σειράς: Serial Number: | xxxxxxxxx | | |
| Ημερομηνία Παραλαβής: Date of receipt: | 31-10-2005 | | |
| Ημερομηνία Διακρίβωσης: Date of Calibration: | 28-12-2005 | | |
| Σφραγίδα / Seal : | Ημερομηνία έκδοσης Date of issue: | Υπεύθυνος Διακρίβωσης / Person Responsible: | Υπεύθυνος Εργαστηρίου / Laboratory Head: |

11/1/2006

Δεν επιτρέπεται η αναπαραγωγή του πιστοποιητικού αυτού παρά μόνο καθ' ολοκληρία, εκτός αν δοθεί γραπτή έγκριση από το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας και το εργαστήριο που το εκδίδει. Πιστοποιητικά Διακρίβωσης μη φέροντα σφραγίδα και υπογραφή δεν έχουν ισχύ. Αντίγραφο του παρόντος πιστοποιητικού θα διατηρηθεί στο εργαστήριο που το εκδίδει για μία περίοδο τουλάχιστο δέκα ετών. Τα αποτελέσματα αφορούν μόνο τα αντικείμενα που έχουν διακριβωθεί.
This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of both the Hellenic Institute of Metrology and the issuing laboratory. Calibration Certificates without seal and signature are not valid. A copy of this certificate will be kept at the issuing laboratory for a period of at least ten years. The results concern only the calibrated items

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ
CERTIFICATE OF CALIBRATION

| Αριθμός πιστοποιητικού /Certificate number :A1-05-xxxx | | | |
|--|--------------------|------------------|-----------------------------------|
| Συνθήκες Διακρίβωσης : <i>Ambient Conditions :</i> | Από <i>From</i> | Έως <i>To</i> | Αβεβαιότητα <i>Uncertainty</i> |
| Θερμοκρασία – <i>Temperature</i> [°C] : | 22 | 24 | ± 0,5 |
| Σχετική Υγρασία – <i>Relative Humidity</i> [%]: | 40 | 60 | ± 5 |
| Πίεση Αέρα - <i>Air Pressure</i> [hPa] : | | | |

Κατάσταση αντικειμένου προς διακρίβωση /Condition of object to be calibrated :

Η συσκευή παραλήφθηκε συσκευασμένη και σε καλή κατάσταση.
The device was received packed and in good condition.

Διαδικασία Διακρίβωσης / Calibration Procedure:

Η συσκευή αποθηκεύτηκε στον χώρο του εργαστηρίου για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα πριν την έναρξη της διαδικασίας διακρίβωσης. Το χρονικό αυτό διάστημα καθορίζεται σύμφωνα με τον κατασκευαστή και δεν ήταν μικρότερο από 24 ώρες. Η συσκευή προθερμάνθηκε για 24 ώρες. Η διακρίβωση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο που περιγράφεται στο εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρίας Hewlett-Packard. Για την διακρίβωση χρησιμοποιήθηκε ο διακριβωτής πολλών λειτουργιών Wavetek 4808 καθώς και η γεννήτρια συχνοτήτων 3325B της Hewlett-Packard.

The DUT was kept in the laboratory environment for the appropriate time prior to the calibration procedure. This time interval is determined by the manufacturer and it is not less than 24 hours. The instrument under test warmed up for 24 hours. The calibration was performed according to the manufacturer manual using the Multifunction Calibrator Wavetek 4808 and the 3325B Synthesizer/Function Generator.

Ιχνηλασιμότητα / Traceability:

Ο διακριβωτής πολλών λειτουργιών έχει Ιχνηλασιμότητα στα Διεθνή Πρότυπα του NPL (πιστοποιητικό Fluke 020101, F11211, 020102, F11212), ενώ η γεννήτρια συχνοτήτων στα Διεθνή Πρότυπα του NIST (πιστοποιητικό Agilent 82990212001)

The Multifunction Calibrator has traceability to the International Standards of NPL (certificate Fluke 020101, F11211, 020102, F11212), while the Function Generator to the International Standards of NIST (certificate Agilent 82990212001).

Αβεβαιότητα / Uncertainty:

Η αβεβαιότητα που αναφέρεται είναι το γινόμενο της τυπικής αβεβαιότητας (u) με τον συντελεστή κάλυψης $k = 2$ (διευρυμένη αβεβαιότητα) και προσδιορίστηκε σύμφωνα με το έντυπο «*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*» (ISO 1995). Γενικώς, η τιμή της μετρούμενης ποσότητας περιέχεται στο προσδιοριζόμενο εύρος με πιθανότητα 95% περίπου. Η εκτίμηση της αναφερόμενης αβεβαιότητας δεν εμπεριέχει ενδεχόμενες μακροπρόθεσμες μεταβολές.

Reported is the expanded uncertainty which results from the standard uncertainty (u) by multiplication with the coverage factor $k = 2$. It has been evaluated according to the «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements» (ISO 1995). Generally, the value of the measuring quantity is found within the attributed interval with a probability of approximately 95%. The reported uncertainty does not include an estimate of long-term variations.

Δεν επιτρέπεται η αναπαραγωγή του πιστοποιητικού αυτού παρά μόνο καθ' ολοκληρία, εκτός αν δοθεί γραπτή έγκριση από το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας και το εργαστήριο που το εκδίδει. Πιστοποιητικά Διακρίβωσης μη φέροντα σφραγίδα και υπογραφή δεν έχουν ισχύ. Αντίγραφο του παρόντος πιστοποιητικού θα διατηρηθεί στο εργαστήριο που το εκδίδει για μία περίοδο τουλάχιστο δέκα ετών. Τα αποτελέσματα αφορούν μόνο τα αντικείμενα που έχουν διακριβωθεί.
This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of both the Hellenic Institute of Metrology and the issuing laboratory. Calibration Certificates without seal and signature are not valid. A copy of this certificate will be kept at the issuing laboratory for a period of at least ten years. The results concern only the calibrated items
