

# ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΔΙΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΠΛΑΚΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Γ. Χατζηστέλιος<sup>1</sup>, Γ. Λούντζης<sup>1</sup>, Γ. Καϊσαρλής<sup>2</sup>, Β. Λεώπουλος<sup>1</sup>, Χ. Προβατίδης<sup>2</sup>

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχ/κών, <sup>1</sup>Μετροτεχνικό Εργαστήριο, Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας, <sup>2</sup>Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Προτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού, Τομέας Μηχ/κών Κατασκευών & Αυτ. Ελέγχου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα  
e-mail: gchatzis@mail.ntua.gr

---

## Περίληψη

Στο πεδίο της βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων και γεωμετρίας η αυξανόμενη χρήση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ), που έχουν καθιερωθεί διεθνώς ως το καταλληλότερο μετρητικό μέσο για τον ολοκληρωμένο ποιοτικό έλεγχο στη βιομηχανική παραγωγή, συνδέεται άμεσα με τις σύγχρονες απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής των μηχανολογικών κατασκευών. Στην εργασία παρουσιάζεται η αρχική φάση της διαδικασίας σχεδίασης, υλοποίησης και αξιολόγησης διεργαστηριακής σύγκρισης που αφορά σε έργα μέτρησης διαστάσεων τα οποία εκτελούνται με τη χρήση ΜΜΣ. Η διεργαστηριακή σύγκριση έγινε μεταξύ: (i) του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου (ΜΕ) Δοκιμών του Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και (ii) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Προτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΤΚΠ-Ε&ΑΣ) του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της ίδιας Σχολής. Η εν λόγω διεργαστηριακή σύγκριση αποτελεί την πρώτη τέτοιου είδους που διεξάγεται στην Ελλάδα και είχε στόχο τόσο τη διερεύνηση των επιδόσεων των δύο εργαστηρίων, όσο και τη συγκριτική αντιπαραβολή εφαρμοζόμενων τεχνικών, μεθόδων και πρακτικών. Οι μετρητικές εργασίες βασίστηκαν στα πρότυπα της σειράς ISO 10360 και υλοποιήθηκαν στην Αίθουσα Ελεγχόμενων Συνθηκών του ΜΕ με τη χρήση ΜΜΣ τύπου γέφυρας και στον εργαστηριακό χώρο του Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ με αντίστοιχο εξοπλισμό. Από τα καταρχήν αποτελέσματα της δοκιμής προκύπτει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων των δύο εργαστηρίων.

**Λέξεις Κλειδιά:** *Βιομηχανική Μετρολογία Διαστάσεων, Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων, Διεργαστηριακές Δοκιμές, Πρότυπα*

## Abstract

In the field of industrial dimensional metrology, the recognition of the Coordinate Measuring Machines (CMM) as the most appropriate universal tool for robust, highly accurate and rapid measurement operations in today's industrial environment, is directly linked to modern production requirements of high accuracy coupled with the reduction of inspection cost and time. The paper presents the current stage of development and evaluation of an inter-laboratorial comparison study Γ. Χατζηστέλιος, Γ. Λούντζης, Γ. Καϊσαρλής, Β. Λεώπουλος, Χ. Προβατίδης  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.  
Διεξαγωγή διεργαστηριακής σύγκρισης σε μετρήσεις μήκους προτύπων πλακιδίων με τη χρήση μηχανών μέτρησης συντεταγμένων

that concerns dimensional measurement tasks which are carried out by the use of CMM. The laboratories involved in the comparison study are (i) the Metrotechnics Laboratory of the Mechanical Engineering School in NTUA and (ii) the Rapid Prototyping & Tooling – Reverse Engineering Laboratory of the same NTUA School. The inter-laboratorial comparison is the first of this kind that is organized in Greece and aims to analyze the capabilities and, as well as, the CMM techniques, methods and practices of the involved laboratories. The measurement tasks were based on the ISO 10360 series and were performed by bridge type CMMs. The analysis of acquired measurement results illustrates a satisfactory level of conformance between the two laboratories.

**Keywords:** *Industrial dimensional Metrology, Coordinate Measuring Machines, Interlaboratorial Comparisons, Standards*

## 1. Εισαγωγή

Κατά την κατασκευή οποιουδήποτε εξαρτήματος / προϊόντος / συναρμολογημένου συνόλου είναι τεχνολογικά αδύνατο να επιτευχθούν οι προβλεπόμενες ονομαστικές διαστάσεις και γεωμετρικές μορφές, όπως αυτές προδιαγράφονται στα μηχανολογικά κατασκευαστικά σχέδια, με *απόλυτη μαθηματική ακρίβεια*. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε σύνολο παραγόντων, όπως τα αναπόφευκτα σφάλματα των μεθόδων παραγωγής (*σφάλματα εργαλειομηχανών που είναι υπεύθυνες για την κατεργασία αποβολής υλικού και την απόδοση τελικών διαστάσεων, φθορά μητρών, καλουπιών, εργαλείων παραγωγής κ.α.*), ή την ανισοτροπία που χαρακτηρίζει τις ιδιότητες των υλικών (*σκληρότητα, μέτρο ελαστικότητας κ.α.*). Έτσι, *προϋπόθεση* για την κατασκευή αποτελεί πάντοτε η παραδοχή ότι τόσο οι διαστάσεις όσο και οι γεωμετρικές μορφές είναι ανεκτό να βρεθούν τελικά εντός καθορισμένων αριθμητικών ορίων. Αυτά ακριβώς τα όρια χαρακτηρίζονται ως «*διαστασιολογικές και γεωμετρικές ανοχές*», ενώ εξαρτήματα που κατασκευάζονται εκτός των συγκεκριμένων αυτών ορίων θεωρούνται απαράδεκτα και απορρίπτονται κατά τον ποιοτικό έλεγχο ως ακατάλληλα.

Τα εξαρτήματα / προϊόντα / μηχανολογικές κατασκευές στη συνήθη βιομηχανική παραγωγή περιγράφονται από απλές γεωμετρικές μορφές οι οποίες προκύπτουν από τη σύνθεση βασικών στερεών, όπως είναι ο κύλινδρος, η σφαίρα, το παραλληλεπίπεδο. Οι προδιαγραφές ακρίβειας που αφορούν στις διαστάσεις, στη μορφή, στη θέση και στον προσανατολισμό των επιμέρους γεωμετρικών αυτών στοιχείων που συνθέτουν ένα εξάρτημα έχουν άμεσο αντίκτυπο στη δυνατότητα κατασκευής και συναρμολόγησης, στις επιδόσεις, στο κόστος και στην ποιότητα τόσο του ίδιου του εξαρτήματος όσο και του συναρμολογημένου συνόλου στο οποίο αυτό εντάσσεται. Ο μετροτεχνικός έλεγχος των αναπόφευκτων κατασκευαστικών αποκλίσεων των εν λόγω προδιαγραφών ακρίβειας με σύγχρονες μεθόδους και εργαλεία αποτελεί το αντικείμενο της *βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων και γεωμετρίας*.

Οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (*Coordinate Measuring Machines, CMM*) μέσα από μια πορεία βελτίωσης και συνεχούς εξέλιξης, από την πρώτη τους εμφάνιση εδώ και πάνω από 40 χρόνια, έχουν ήδη διεθνώς καθιερωθεί ως το κατ' εξοχήν οικονομοτεχνικά κατάλληλο εργαλείο τόσο για την αξιόπιστη, μεγάλης ακρίβειας και γρήγορη διεξαγωγή μετρητικών εργασιών σε ολόκληρο το εύρος των γεωμετρικών και διαστασιολογικών

ανοχών (*Ποιοτικός Έλεγχος*), όσο και για την ψηφιακή σάρωση και την αποτύπωση σε περιβάλλον 3D-CAD (*Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός*). Η αυξανόμενη χρήση των ΜΜΣ στη βιομηχανική μετρολογία διαστάσεων και γεωμετρίας συνδέεται άμεσα με τις σύγχρονες απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους και του χρόνου παραγωγής των μηχανολογικών κατασκευών. Αποτελούν για τον κλάδο των μηχανολογικών κατασκευών ακριβείας ένα εργαλείο εξίσου απαραίτητο με τις μηχανές παραγωγής και τις εργαλειομηχανές.

Οι ΜΜΣ πέρα από την καθιέρωση τους ως το καταλληλότερο μέσο για τον ολοκληρωμένο γεωμετρικό και διαστασιολογικό ποιοτικό έλεγχο στη βιομηχανική παραγωγή, βρίσκουν πλέον εφαρμογή στα περισσότερα από τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, όπως η αποτύπωση πρωτοτύπων, η διακρίβωση ιδιοσυσκευών και ο έλεγχος φθοράς εργαλείων παραγωγής (εργαλείων διαμόρφωσης, χύτευσης, κ.α.). Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές οι αποφάσεις που βασίζονται στα μετρητικά αποτελέσματα που προέρχονται από τις ΜΜΣ είναι ιδιαίτερα κρίσιμες (αποδοχή ή απόρριψη εξαρτήματος κατά τον τελικό ποιοτικό έλεγχο, επισκευή – αποκατάσταση ή αντικατάσταση του εργαλείου παραγωγής κ.α.) κι επηρεάζουν καθοριστικά την ποιότητα και το τελικό κόστος της κατασκευής.

Καλύπτοντας ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών οι διάφοροι τύποι ΜΜΣ έχουν ορισμένα βασικά κοινά χαρακτηριστικά αλλά διαφέρουν ουσιαστικά σε πολλά σημεία π.χ. στο μέγεθος και την «ακρίβειά» τους, στην κατασκευαστική τους διαμόρφωση (*σταθερή ή κινούμενη τράπεζα ή/και γέφυρα, μονός, διπλός ή φορητός αρθρωτός βραχίονας κ.α.*), στην αρχή λειτουργίας του συστήματος με το οποίο λαμβάνονται οι συντεταγμένες των σημείων (*μηχανικοί αισθητήρες επαφής, οπτικοί ή λέιζερ αισθητήρες μη-επαφής*), στο βαθμό αυτοματοποίησής τους (*χειροκίνητες ή ελεγχόμενες απ' ευθείας από ηλεκτρονικό υπολογιστή*), στις ειδικές απαιτήσεις που έχουν στο χώρο εγκατάστασής τους κ.λ.π

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η αρχική φάση της διαδικασίας σχεδίασης, υλοποίησης και αξιολόγησης διεργαστηριακής σύγκρισης που αφορά σε έργα μέτρησης διαστάσεων τα οποία εκτελούνται με τη χρήση ΜΜΣ. Η διεργαστηριακή σύγκριση έγινε μεταξύ: (i) του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου (ΜΕ) Δοκιμών του Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και (ii) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΤΚΠ-Ε&ΑΣ) του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της ίδιας Σχολής. Η εν λόγω διεργαστηριακή σύγκριση αποτελεί την πρώτη τέτοιου είδους που διεξάγεται στην Ελλάδα και είχε στόχο τόσο τη διερεύνηση των επιδόσεων των δύο εργαστηρίων, όσο και τη συγκριτική αντιπαραβολή εφαρμοζόμενων τεχνικών, μεθόδων και πρακτικών. Οι μετρητικές εργασίες βασίστηκαν στα πρότυπα της σειράς ISO 10360 και υλοποιήθηκαν στην Αίθουσα Ελεγχόμενων Συνθηκών του ΜΕ με τη χρήση ΜΜΣ τύπου γέφυρας και στον εργαστηριακό χώρο του Εργαστηρίου ΤΚΠ-Ε&ΑΣ με αντίστοιχο εξοπλισμό.

## 2. Αβεβαιότητα μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ

Στο πλαίσιο της σύγχρονης μετρολογίας, τους όρους «ακρίβεια» και «σφάλμα» μέτρησης έχει αντικαταστήσει η έννοια της «αβεβαιότητας» των μετρητικών αποτελεσμάτων. Η *αβεβαιότητα* συνιστά μια ποσοτική έκφραση της ποιότητας της μέτρησης, στο βαθμό που επιτρέπει την εκτίμηση των ορίων του σφάλματος της πειραματικής παρατήρησης (Μαθιουλάκης 2004). Ο βασικός διαχωρισμός μεταξύ των εννοιών του σφάλματος και της αβεβαιότητας εντοπίζεται στο ότι ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ μετρούμενης και «αληθούς» αλλά άγνωστης τιμής ενός μετρούμενου μεγέθους ενώ ως αβεβαιότητα η ποσοτική έκφραση της αμφιβολίας που υπάρχει σχετικά με το αποτέλεσμα της μέτρησης. Επιπλέον, η αβεβαιότητα μέτρησης αποτελεί πλέον βασικό στοιχείο στο σύγχρονο καθορισμό της ιχνηλασιμότητας. Ένα αποτέλεσμα μέτρησης θεωρείται ιχνηλάσιμο, μόνο εάν αναφέρεται μαζί με αυτό το διάστημα αβεβαιότητας που καλύπτει την «πραγματική τιμή» του μετρούμενου μεγέθους με μια δεδομένη πιθανότητα (π.χ. 95%). Σε όλους τους τομείς της σύγχρονης μετρολογίας η επιστημονική προσέγγιση για την εκτίμηση της αβεβαιότητας βασίζεται πλέον στον οδηγό ISO, GUM - Guide for the Uncertainty of Measurement (*Οδηγός Υπολογισμού της Αβεβαιότητας των Μετρήσεων*).

Καλύπτοντας ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών όσον αφορά τα μεγέθη των ελεγχόμενων εξαρτημάτων, τις απαιτήσεις σε ακρίβεια, ταχύτητα, στιβαρότητα κλπ, οι σύγχρονες ΜΜΣ έχουν κάποια βασικά κοινά χαρακτηριστικά αλλά διαφέρουν ουσιαστικά σε πάρα πολλά σημεία. Ως βασικά κοινά «δομικά στοιχεία» όλων των τύπων ΜΜΣ εντοπίζονται τα παρακάτω:

- α. Αισθητήρας λήψης συντεταγμένων των μετρούμενων σημείων (probe).*
- β. Υψηλής ακρίβειας μηχανολογική κατασκευή*
- γ. Ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης δεδομένων και αυτομάτου ελέγχου, (controller),*
- δ. Μετρητικό λογισμικό.*

Η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και η αξιολόγηση των τεσσάρων αυτών «δομικών στοιχείων» μιας ΜΜΣ αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρητικών της αποτελεσμάτων. Η κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων τύπων ΜΜΣ γίνεται, σύμφωνα με τα παραπάνω, με βάση (Καΐσαρλής et al. 2007):

- i. ***Την αρχή λειτουργίας του αισθητήρα λήψης σημείων:*** Μηχανικοί αισθητήρες συνεχούς ή σημειακής επαφής (*contact probes*) που καταγράφουν τις συντεταγμένες των σημείων ερχόμενοι σε επαφή με το μετρούμενο εξάρτημα, οπτικοί ή λέιζερ αισθητήρες μη-επαφής (*non-contact probes*) κ.α.
- ii. ***Την κατασκευαστική διαμόρφωση και το μέγεθος του «ωφέλιμου χώρου μέτρησης» της μηχανής:*** Μεταξύ των πιο διαδεδομένων είναι οι μηχανές τύπου γέφυρας (*bridge type*) η οποία κινείται προσαρμοσμένη σε σταθερή τράπεζα, οι τύπου κριώματος – γερανογέφυρας (*gantry type*), όπου η κίνηση γίνεται σε σταθερές οριζόντιες δοκούς στηριγμένες σε κάθετες στήλες, οι μονού ή διπλού οριζόντιου βραχίονα (*single, dual horizontal*

*arm*) και οι φορητές χειροκίνητες μηχανές αρθρωτού βραχίονα (*articulating arm*). Ο ωφέλιμος χώρος μέτρησης μπορεί να είναι ένα παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις που ξεκινούν από 500 x 500 x 400 mm και φτάνουν, σε ειδικές περιπτώσεις μέτρησης εξαρτημάτων μεγάλου μεγέθους, σε δεκάδες μέτρα.

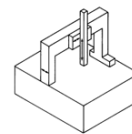
- iii. **Τα χαρακτηριστικά του controller:** Χειροκίνητες, ημιαυτόματες και ελεγχόμενες πλήρως από ηλεκτρονικό υπολογιστή (*Direct Computer Control – DCC*) μηχανές, σύστημα αντιστάθμισης θερμοκρασιακών μεταβολών σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητα διαχείρισης δεδομένων από ψηφιακή σάρωση (*scanning – ready*) κ.α.
- iv. **Τα χαρακτηριστικά του μετρητικού λογισμικού:** δυνατότητα εισαγωγής τρισδιάστατου ηλεκτρονικού μοντέλου (*3D CAD model*) του ελεγχόμενου εξαρτήματος και αυτοματοποίηση της παραγωγής των μετρητικών προγραμμάτων, ενσωμάτωση αλγόριθμών ψηφιακής σάρωσης, αυτοτελείς λογισμικές μονάδες (*modules*) για εξειδικευμένες μετρολογικές εφαρμογές π.χ. για έλεγχο οδοντωτών τροχών κ.α.

Από τη σύνθεση των παραπάνω συντελεστών προκύπτουν τελικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ΜΜΣ όπως η μέγιστη ταχύτητα μέτρησης, το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος μετρούμενου εξαρτήματος κ.α.. Η ακρίβεια μέτρησης (*measuring accuracy*) εκφράζεται από τους κατασκευαστές ΜΜΣ με τις παραμέτρους  $MPE_E$  (*Maximum Permissible Size Error*) και  $MPE_P$  (*Maximum Permissible Probing Error*) όπως αυτές καθορίζονται στο διεθνές πρότυπο ISO 10360 – 2. Ωστόσο, το εν λόγω πρότυπο, αφορά στην επαλήθευση επίδοσης των ΜΜΣ και δεν επιτρέπει να παράγονται άμεσα δηλώσεις σχετικά με την αβεβαιότητα των μετρήσεων.

Η εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων των ΜΜΣ αποτελεί σημαντικό επιστημονικό πεδίο στο οποίο εμφανίζεται έντονη ερευνητική δραστηριότητα. Σε αντίθεση με τα απλά, συμβατικά μετρητικά όργανα (μικρόμετρα, μετρητικά ρολόγια κ.α.), οι ΜΜΣ είναι ικανές να εκτελέσουν ένα μεγάλο πλήθος μετρητικών έργων που αφορά σε ολόκληρο το εύρος των γεωμετρικών προδιαγραφών ακρίβειας μιας κατασκευής. Για κάθε μια απ' αυτές τις προδιαγραφές υπάρχουν πολλές πιθανές στρατηγικές μέτρησης (π.χ. αριθμός και θέση των μετρούμενων σημείων, χρησιμοποιούμενη κεφαλή ή/και απόληξη κ.α.) που δεν τυποποιούνται (Καϊσαρλής et al. 2005). Το εκάστοτε έργο μέτρησης και η χρησιμοποιούμενη στρατηγική μέτρησης καθορίζουν τον τρόπο που εισάγονται και διαδίδονται σφάλματα στο μετρητικό σύστημα μιας ΜΜΣ. Έτσι, είναι δύσκολο να προδιαγραφεί και να επαληθευτεί η αβεβαιότητα όλων των έργων μέτρησης που μπορούν να εκτελεστούν από μια ΜΜΣ, σε κάθε θέση μέσα στον χώρο εργασίας, χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε στρατηγική μέτρησης (EAL-G17 1995). Η άμεση σύνδεση της αβεβαιότητας με το μετρητικό έργο οδηγεί στην κυρίαρχη στα σχετικά πρότυπα της σειράς ISO 15530 και ISO 14253 έννοια της *βαθμονόμησης η οποία σχετίζεται με το έργο*, κατά την οποία η ΜΜΣ βαθμονομείται για μεμονωμένα έργα μέτρησης, όπου η στρατηγική και οι συνθήκες μέτρησης προδιαγράφονται πλήρως, Σχήμα 1.

### Παράγοντες Αβεβαιότητας στις ΜΜΣ

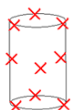
- Κατασκευαστική διαμόρφωση και κλάση ΜΜΣ
- Αισθητήρας καταγραφής σημείων



- Μετρητικό λογισμικό  $P = a^1 \left( w_{\cdot f} \frac{\partial F}{\partial r} \left( \frac{\partial F}{\partial r} \right)^1 + w_{\cdot f} \nabla^2 F \nabla^2 F^1 \right) a$



- Στρατηγική Μέτρησης



- Κατασκευαστική διαμόρφωση αντικειμένου



- Συνθήκες περιβάλλοντος μέτρησης



- Χειριστής



**Σχήμα 1.** Συνιστώσες της αβεβαιότητας που καθορίζονται για συγκεκριμένο έργο μέτρησης ΜΜΣ.

### 3. Σχεδίαση διεργαστηριακής σύγκρισης

Ο όρος *διεργαστηριακή σύγκριση* αναφέρεται στη διεργασία εκείνη με την οποία εξετάζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων των συμμετεχόντων σε αυτή εργαστηρίων ως προς τον βαθμό της ισοδυναμίας και της συμβατότητάς τους. Ο πλέον κατάλληλος και ευρέως αποδεκτός τρόπος εκτίμησης του βαθμού ισοδυναμίας και συμβατότητας είναι ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου σφάλματος (*normalized error*)  $E_n$ -value, ο οποίος υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$E_n = \frac{V_{lab} - V_{Ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{Ref}^2}} \quad (1)$$

όπου:

$V_{lab}$ : το αποτέλεσμα της μέτρησης του εργαστηρίου

$V_{Ref}$ : η μέτρηση αναφοράς

$U_{lab}$ : η διευρυμένη αβεβαιότητα για τη μέτρηση του εργαστηρίου (με χρήση  $k=2$  ή περίπου 95% διάστημα εμπιστοσύνης)

$U_{Ref}$ : η διευρυμένη αβεβαιότητα για τη μέτρηση αναφοράς (με χρήση  $k=2$  ή περίπου 95% διάστημα εμπιστοσύνης)

Εφόσον η τιμή του  $E_n$  κινείται στο διάστημα από -1 έως και +1 τότε υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του αποτελέσματος μέτρησης του εργαστηρίου και της μέτρησης αναφοράς εντός

του διαστήματος εμπιστοσύνης τους. Σε διαφορετική περίπτωση που η τιμή του  $E_n$  βρεθεί εκτός του διαστήματος αυτού, τότε δεν υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του αποτελέσματος μέτρησης του εργαστηρίου και της τιμής αναφοράς λαμβανομένης υπόψη της εκφρασμένης αβεβαιότητας των μετρήσεων (Beissner 2002, Nielsen 2002).

Η μέτρηση αναφοράς και η αβεβαιότητα αυτής μπορούν να υπολογίζονται με διάφορους τρόπους. Συνήθως ταυτίζονται με τις τιμές ενός εκ των συμμετεχόντων εργαστηρίων, εφόσον αυτό θεωρηθεί ως υψηλής εμπιστοσύνης, ή λαμβάνονται ως ο αριθμητικός ή σταθμισμένος μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών που τα συμμετέχοντα εργαστήρια αναφέρουν (Ratel 2005).

Τυπικά η συμμετοχή σε μια διεργαστηριακή σύγκριση δίνει σε ένα εργαστήριο τεκμηριωμένη απάντηση για το κατά πόσο μπορεί να μετρά αυτό ικανοποιητικά. Βιβλιογραφικά αναφέρεται ότι μια καλά σχεδιασμένη διεργαστηριακή σύγκριση μπορεί όχι μόνο να δώσει απάντηση για την ικανότητα των συμμετεχόντων εργαστηρίων, αλλά να αναδείξει και τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα εργαστήρια που θα λάβουν αρνητική απάντηση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί κατά το σχεδιασμό της διεργαστηριακής σύγκρισης εφόσον ληφθούν υπόψη οι ιδιαίτερες ανάγκες των μετρήσεων που τα εργαστήρια πραγματοποιούν, με έμφαση στα σημεία όπου αναμένεται να εντοπίζονται προβλήματα. Για την περίπτωση των ΜΜΣ ενδεικτικά κατά τον σχεδιασμό διεργαστηριακών συγκρίσεων συστήνεται να λαμβάνεται υπόψη (i) η ακρίβεια της ΜΜΣ, (ii) η επίδραση του περιβάλλοντος, (iii) η επίδραση του συγκροτήματος κεφαλής – ακίδας, (iv) η αλλαγή προσανατολισμού της κεφαλής καθώς και η χρήση μηχανισμών αλλαγής ακίδας, και τέλος (v) η επίδραση της στρατηγικής μέτρησης και των ληφθέντων σημείων (Nielsen 2002).

Έτσι για παράδειγμα η συμμετοχή σε διεργαστηριακή σύγκριση όπου έχουν πλήρως καθοριστεί οι θέσεις λήψης σημείων χωρίς να απαιτείται η αλλαγή προσανατολισμού της κεφαλής, είναι δυνατόν να δώσει απάντηση για το κατά πόσο το εργαστήριο που συμμετέχει έχει ικανοποιητικά ενσωματώσει τις αβεβαιότητες που προέρχονται από την ίδια τη μηχανή και το περιβάλλον. Εφόσον για την λήψη των καθορισμένων σημείων απαιτείται η αλλαγή προσανατολισμού της κεφαλής ή / και η χρήση μηχανισμών αλλαγής ακίδας, και το εργαστήριο συμμετέχει επιτυχώς, τότε έχει ενσωματώσει με επιτυχία και την αβεβαιότητα που προέρχεται από αλλαγές στην κεφαλή και την ακίδα. Τέλος, στην περίπτωση που καθορίζονται μόνο τα προς μέτρηση χαρακτηριστικά και δεν καθορίζονται επακριβώς τα σημεία που πρέπει να ληφθούν ενώ απαιτείται και η αλλαγή προσανατολισμού κεφαλής ή / και η χρήση μηχανισμών αλλαγής ακίδας, και το εργαστήριο συμμετέχει επιτυχώς, τότε έχει ενσωματώσει με επιτυχία και την αβεβαιότητα που προέρχεται από την στρατηγική μέτρησης (*επιλογή θέσεων και αριθμού σημείων*). Σημειώνεται ότι η τελευταία περίπτωση προσομοιάζει περισσότερο την καθημερινότητα, καθώς συνήθως ζητείται από τα εργαστήρια να μετρήσουν κάποια χαρακτηριστικά χωρίς να τους υποδεικνύεται παράλληλα η στρατηγική μέτρησης.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να υλοποιηθεί εργαστηριακή σύγκριση του πρώτου τύπου με καθορισμένα σημεία μέτρησης επί των δοκιμίων, καθορισμένο προσανατολισμό τους επί της τράπεζας εργασίας, ενώ τέλος δεν απαιτούνταν αλλαγή προσανατολισμού της κεφαλής ή αλλαγή της ακίδας για να ληφθούν τα καθορισμένα σημεία. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να μετρηθούν πρότυπα πλακίδια με ονομαστικές διαστάσεις 125, 150, 175,

300 και 400 mm τα οποία τοποθετήθηκαν κάθε φορά με τις προς μέτρηση επιφάνειες προσανατολισμένες κατά το δυνατόν παράλληλα με το σύστημα συντεταγμένων εκάστης μηχανής. Τα συμμετέχοντα στην διεργαστηριακή σύγκριση εργαστήρια ήταν:

(i) το Μετροτεχνικό Εργαστήριο (ΜΕ) Δοκιμών του Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Το ΜΕ δραστηριοποιείται στον χώρο των μετρήσεων ακριβείας από το 1962 και είναι πρόσφατα (Φεβρουάριος 2009) διαπιστευμένο από το ΕΣΥΔ κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO / IEC 17025:2005 για σειρά διαστασιολογικών δοκιμών. Στο Επίσημο Πεδίο Εφαρμογής της Διαπίστευσης (ΕΠΕΔ) του ΜΕ εντάσσονται μετρήσεις μηχανουργικών δοκιμών σε τρεις διαστάσεις με χρήση ΜΜΣ.

(ii) το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού (ΤΚΠ-Ε&ΑΣ) του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., που δραστηριοποιείται κυρίως στην επιστημονική περιοχή του σχεδιασμού μηχανολογικών κατασκευών. Το Εργαστήριο ΤΚΠ-Ε&ΑΣ διαθέτει πιστοποίηση ISO 9001:2000 για την παροχή υπηρεσιών ποιοτικού ελέγχου διαστάσεων και γεωμετρίας μηχανολογικών κατασκευών με χρήση ΜΜΣ. Τόσο το ΜΕ όσο και το Εργαστήριο ΤΚΠ-Ε&ΑΣ αποτελούν επίσημα θεσμοθετημένα εργαστήρια παροχής υπηρεσιών του Ε.Μ.Π.

Κάθε συμμετέχον εργαστήριο πραγματοποίησε σειρά μετρήσεων στα παραπάνω πρότυπα πλακίδια σύμφωνα με κοινή στρατηγική μέτρησης και προχώρησε σε υπολογισμό της αβεβαιότητάς χρησιμοποιώντας κοινό ισοζύγιο. Οι λαμβανόμενες από τα εργαστήρια υπόψη πηγές αβεβαιότητας αφορούσαν (i) την αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων, (ii) το maximum permissible error (MPE) κατά ISO 10360 – 2 της ΜΜΣ, (iii) τη μέτρηση θερμοκρασίας στην οπτική κλίμακα και στα δοκίμια, (iv) τους συντελεστές θερμικής διαστολής οπτικής κλίμακας και δοκιμίων, (v) την αβεβαιότητα στον υπολογισμό της διαμέτρου της πρότυπης σφαίρας και της χρησιμοποιούμενης ακίδας, (vi) τη γεωμετρία του δοκιμίου, (vii) τον υπολογισμό της ελαστικής παραμόρφωσης κατά τη λήψη σημείου και (viii) τη στρατηγική μέτρησης.

Συγκεκριμένα τα εργαστήρια μέτρησαν τα πιο πάνω πρότυπα πλακίδια προσανατολισμένα κάθε φορά παράλληλα σε ένα από τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων της μηχανής. Η ζητούμενη διάσταση, το κεντρικό μήκος του πλακιδίου, προέκυπε κάθε φορά μέσα από κατάλληλη επιλογή επιπέδου και σημείου, ώστε η μεταξύ τους απόσταση στο χώρο να ταυτίζεται με την ζητούμενη προς μέτρηση διάσταση. Πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις για κάθε πλακίδιο και θέση τοποθέτησής του. Η ζητούμενη διάσταση  $X$  για κάθε πλακίδιο προέκυψε σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$X = (\bar{X} + \sum \Delta x_i) \pm U \quad (2)$$

Στον πιο πάνω τύπο με  $\bar{X}$  συμβολίζεται η εκτίμηση της ζητούμενης διάστασης που προκύπτει ως η μέση τιμή των μετρήσεων με την ΜΜΣ, με  $\sum \Delta x_i$  οι απαραίτητες διορθώσεις που πρέπει να γίνουν συνυπολογίζοντας τις πηγές αβεβαιότητας και τέλος, με  $U$  η διευρυμένη αβεβαιότητα της μέτρησης.



Η διευρυμένη αβεβαιότητα προκύπτει με πολλαπλασιασμό με κατάλληλο συντελεστή κάλυψης  $k_p$  από την συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα που προκύπτει από τις επιμέρους αβεβαιότητες των πηγών που νωρίτερα αναφέρθηκαν. Έτσι, για τις μετρήσεις που έγιναν καταρτίστηκε το ακόλουθο ισοζύγιο αβεβαιοτήτων.

Πίνακας 1: Χρησιμοποιούμενο ισοζύγιο αβεβαιότητας

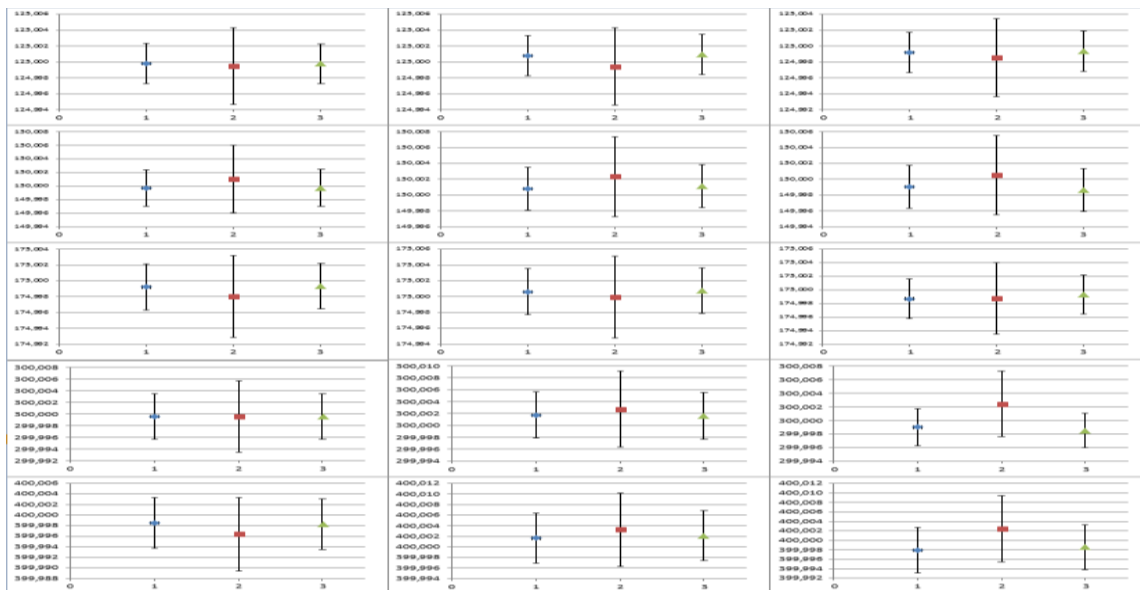
Παράμετρος - Πηγή αβεβαιότητας	Εκτίμηση	Τυπική Αβεβαιότητα	Συντελεστής ευαισθησίας	Συνεισφορά τυπικής αβεβαιότητας	Βαθμοί ελευθερίας
1. Αναπαραγωγιμότητα	$\delta_R$	$u(\delta_R)$	$C_{\delta R}$	$ C_{\delta R}  \cdot u(\delta_R)$	n-1
2. Πιστοποιητικό διακρίβωσης μηχανής	$\delta_m$	$u(\delta_m)$	$C_{\delta m}$	$ C_{\delta T}  \cdot u(\delta_m)$	$\infty$
3. Επιδράσεις θερμοκρασίας	$\delta_T$	$u(\delta_T)$	$C_{\delta T}$	$ C_{\delta T}  \cdot u(\delta_T)$	$\infty$
4. Αβεβαιότητα διαμέτρου του ball tip της ακίδας	$\delta_b$	$u(\delta_b)$	$C_{\delta b}$	$ C_{\delta b}  \cdot u(\delta_b)$	$\infty$
5. Αβεβαιότητα διαμέτρου της πρότυπης σφαίρας	$\delta_s$	$u(\delta_s)$	$C_{\delta s}$	$ C_{\delta s}  \cdot u(\delta_s)$	$\infty$
6. Γεωμετρία δοκιμίου και στρατηγική μέτρησης	$\delta_g$	$u(\delta_g)$	$C_{\delta 1g}$	$ C_{\delta 1g}  \cdot u(\delta_g)$	$\infty$
7. Ελαστική παραμόρφωση κατά τη μέτρηση	$\delta_e$	$u(\delta_e)$	$C_{\delta e}$	$ C_{\delta e}  \cdot u(\delta_e)$	$\infty$
<b>Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα - <math>u_C</math></b>				$u_C = \sqrt{\sum u(\delta_x)^2}$	$\infty$
<b>Διευρυμένη Αβεβαιότητα - U</b>				$U = k_p \cdot u_C$	
				$I_x = (\delta_R + \sum \delta_x) \pm U$	

Κατά την πορεία υλοποίησης της διεργαστηριακής σύγκρισης επιλέχθηκε η πραγματοποίηση των μετρήσεων των πλακιδίων να γίνει πρώτα από το ΜΕ και κατόπιν από το ΤΚΠ-Ε&ΑΣ. Στο τέλος των μετρήσεων το ΜΕ μέτρησε εκ νέου τα πλακίδια και τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεριλήφθηκαν στην διεργαστηριακή σύγκριση.

Μετά την ολοκλήρωση της σειράς μετρήσεων και από τα δύο εργαστήρια πραγματοποιήθηκε ανάλυση των αναφερόμενων αποτελεσμάτων και αξιολόγηση της συμμετοχής τους στη διεργαστηριακή σύγκριση.

#### 4. Ανάλυση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας την τιμή  $E_n$  για κάθε μια από τις πραγματοποιημένες μετρήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετρήσεις έγιναν για πέντε διαφορετικά πλακίδια σε τρεις θέσεις, προέκυψαν συνολικά δεκαπέντε υπολογισμοί της τιμής  $E_n$ . Ελέγχθηκαν και αναλύθηκαν οι μετρήσεις και για τα πέντε πρότυπα πλακίδια για κάθε μέτρηση που πραγματοποιήθηκε με διαφορετικό προσανατολισμό στις μηχανές ΜΜΣ.



Σχήμα 1. Αποτελέσματα μέτρησης των πλακιδίων 125, 150, 175, 300 και 400 mm

Όπως προέκυψε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων η τιμή του  $E_n$  κινήθηκε στο διάστημα  $[-1, 1]$ . Μάλιστα για τις περισσότερες από τις μετρήσεις βρέθηκε να κινείται πολύ κοντά στο μηδέν και επομένως τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν κρίθηκαν ως συμβατά μεταξύ τους.

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων των δύο εργαστηρίων. Καθώς όμως για την διενέργεια των μετρήσεων δεν χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί αλλαγή ακίδας ή θέσης της κεφαλής των μηχανών και είχε καθοριστεί πλήρως η στρατηγική μέτρησης, κάποιες από τις πηγές αβεβαιότητας είχαν περιοριστεί στο μέγιστο δυνατόν. Σημειώνεται τέλος ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν με την παραδοχή ότι όλες οι πηγές αβεβαιότητας συνεισφέρουν εξίσου στην τελική αβεβαιότητα. Άμεσο μελλοντικό στόχο αποτελεί η επανάληψη της διεργαστηριακής σύγκρισης με τα εργαστήρια να επιλέγουν μόνο τους όλες τις παραμέτρους της μέτρησης που θα ζητείται. Επίσης, μελλοντικό στόχο αποτελεί η διεύρυνση του αριθμού των συμμετεχόντων εργαστηρίων με την ένταξη στην διεργαστηριακή σύγκριση εγχώριων ή/ και αλλοδαπών εργαστηριακών μονάδων που

προέρχονται τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και από τον χώρο της βιομηχανίας μηχανολογικών κατασκευών.

## 5. Βιβλιογραφικές Αναφορές

Καϊσαρλής Γ., Διπλάρης Σ. και Σφαντζικόπουλος Μ., “Πειραματική μέθοδος εκτίμησης της αβεβαιότητας μηχανών μέτρησης συντεταγμένων σε βιομηχανικό περιβάλλον”, 2<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Θεσσαλονίκη, 19 – 20 Οκτωβρίου 2007.

Καϊσαρλής Γ., Διπλάρης Σ. και Σφαντζικόπουλος Μ., “Συμβολή των μετρητικών μηχανών συντεταγμένων στη μετρολογία διαστάσεων: σημερινή πραγματικότητα και προοπτικές”, Πρακτικά του 1<sup>ου</sup> Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 11 – 12 Νοεμβ., σελ.55 – 61, 2005.

Μαθιουλάκης Μ. Ε., “Μέτρηση, Ποιότητα Μέτρησης και Αβεβαιότητα”, Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.

Beissner K., “On a measure of consistency in comparison measurements”, Metrologia 39, 59, 2002.

EAL-G17, “Coordinate measuring machine calibration”, European Corporation for Accreditation of Laboratories (EAL), 1995.

ISO 10360-2, “Geometrical product specifications (GPS) – acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMMs) – Part 2: CMMs used for measuring size”, ISO, Geneva, 2001.

ISO: “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, ISO, Geneva, 1995.

Nielsen, H.S. (2002), “CMMs and proficiency testing”, IDW-2002, May 8, 2002, Montréal.

Ratel G., “Evaluation of the uncertainty of the degree of equivalence”, Metrologia 42, 140, 2005.