

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Γ. Καϊσαρλής<sup>1</sup>, Σ. Διπλάρης<sup>2</sup>, Μ. Σφαντζικόπουλος<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχ/κών Κατασκευών & Αυτ. Ελέγχου,  
Κτίριο «Μ», Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα

<sup>1</sup>gkaiss@central.ntua.gr

## Περίληψη:

Στη σύγχρονη βιομηχανική μετρολογία διαστάσεων και γεωμετρίας η αυξανόμενη χρήση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ), (*Coordinate Measuring Machines, CMM*) στα περισσότερα από τα στάδια του κύκλου ζωής των μηχανολογικών κατασκευών και προϊόντων, όπως είναι η αποτύπωση πρωτοτύπων, η διακρίβωση ιδιοσυσκευών και ο έλεγχος φθοράς εργαλείων παραγωγής, καθιστά τις αποφάσεις που βασίζονται στα μετρητικά αποτελέσματά τους ιδιαίτερα κρίσιμες. Η ιχνηλασιμότητα των μετρητικών αυτών αποτελεσμάτων και συνεπώς ο υπολογισμός της αβεβαιότητάς τους αποτελούν όχι μόνο απαίτηση των συστημάτων διασφάλισης ποιότητας αλλά και βασική προϋπόθεση για την ορθότητα της λήψης των παραπάνω αποφάσεων.

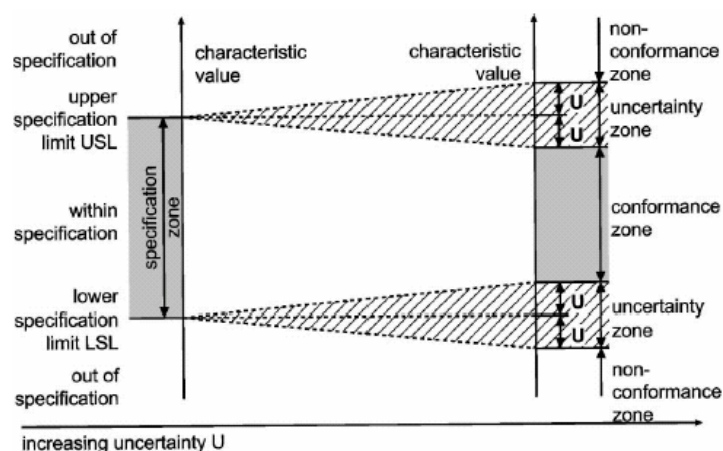
Στις ΜΜΣ το εύρος και η πολυπλοκότητα των μετρητικών έργων που μπορούν να εκτελεστούν και η αλληλεπίδραση σε συνδυασμό με το πλήθος των παραγόντων (κατασκευαστική διαμόρφωση ΜΜΣ, πλήθος, ταχύτητα και διασπορά λαμβανομένων σημείων κ.α.) που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της συνολικής αβεβαιότητας καθιστούν την εκτίμησή της με αναλυτικό τρόπο ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα. Στην εργασία παρουσιάζεται πειραματική μέθοδος εκτίμησης της αβεβαιότητας μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ για συγκεκριμένες μετρητικές διαδικασίες που βασίζεται στα διεθνή πρότυπα της σειράς ISO 15530. Γίνεται αναφορά στο παρόν στάδιο ανάπτυξης του σχετικού υπολογιστικού εργαλείου και σχολιάζεται η καταλληλότητα της εφαρμογής της μεθόδου σε βιομηχανικό περιβάλλον.

*Λέξεις Κλειδιά:* Βιομηχανική Μετρολογία Διαστάσεων, Αβεβαιότητα, Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων, Πρότυπα, Διακρίβωση

## 1. Εισαγωγή

Η αυξανόμενη χρήση των Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ), (*Coordinate Measuring Machines, CMM*) 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. Οι ΜΜΣ ήδη θεωρούνται διεθνώς ως το κατ' εξοχήν οικονομοτεχνικά κατάλληλο εργαλείο για αξιόπιστη, μεγάλης ακρίβειας και γρήγορη διεξαγωγή μετρητικών εργασιών σε ολόκληρο το εύρος των γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών, αλλά και για σάρωση και ψηφιακή αποτύπωση σε περιβάλλον CAD ή/ και έλεγχο με αντιπαραβολή επιφανειών και γεωμετρίας εξαρτημάτων. 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. Η ιχνηλασιμότητα των μετρητικών αυτών αποτελεσμάτων και συνεπώς ο υπολογισμός της αβεβαιότητάς τους αποτελούν όχι μόνο απαίτηση των συστημάτων διασφάλισης ποιότητας αλλά και βασική προϋπόθεση για την ορθότητα της λήψης των παραπάνω αποφάσεων, Σχήμα 1 [1].



**Σχήμα 1.** Ο ρόλος της εκτίμησης της αβεβαιότητας στον καθορισμό των ορίων αποδοχής – απόρριψης [1]

Το εύρος και η πολυπλοκότητα των μετρητικών έργων που μπορούν να εκτελεστούν με ΜΜΣ περιλαμβάνουν τόσο διασταστατικές μετρήσεις όσο και μετρήσεις απόκλισης μορφής, γεωμετρικής θέσης και προσανατολισμού. Στις ΜΜΣ το πλήθος και η συμμεταβλητότητα των παραγόντων (κατασκευαστική διαμόρφωση ΜΜΣ, διαμόρφωση αισθητήρα λήψης σημείων, πλήθος, ταχύτητα λαμβανομένων σημείων, θερμοκρασιακή σταθερότητα, μετρητικό λογισμικό κ.α.) που συμβάλλουν στη συνολική αβεβαιότητα καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολο και χρονοβόρο τον αναλυτικό υπολογισμό της. Τα ζητήματα που αφορούν στο συνολικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας, λαμβάνοντας υπ' όψη το σύνολο των παραμέτρων που την επηρεάζουν, τις αλληλεπιδράσεις και τον συσχετισμό τους, στις διαδικασίες βαθμονόμησης και στην αξιολόγηση των μετρητικών αποτελεσμάτων των ΜΜΣ εντάσσονται σε ένα σύγχρονο, δυναμικά εξελισσόμενο ερευνητικό πεδίο και αποτελούν αντικείμενο σημαντικού αριθμού δημοσιεύσεων, π.χ. [2 - 6].

Στην εργασία παρουσιάζεται πειραματική μέθοδος εκτίμησης της αβεβαιότητας μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ για συγκεκριμένες μετρητικές διαδικασίες που βασίζεται στα διεθνή πρότυπα της σειράς ISO 15530. Κεντρικές έννοιες για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελούν η διαθεσιμότητα ενός ή περισσότερων βαθμονομημένων εξαρτημάτων ή προτύπων και η μέτρησή τους σε καθορισμένες

συνθήκες που εξασφαλίζουν ομοιότητα στη διαδικασία των μετρήσεων για την εκτίμηση της αβεβαιότητας και τη διαδικασία των μετρήσεων των ελεγχόμενων εξαρτημάτων. Παρουσιάζεται το παρόν στάδιο ανάπτυξης του σχετικού υπολογιστικού εργαλείου με την επωνυμία UN.E.TO (UNcertainty Evaluation Tool) μέσα από μια χαρακτηριστική εφαρμογή του και σχολιάζεται η καταλληλότητα της χρήσης της μεθόδου σε βιομηχανικό περιβάλλον.

## 2. Αβεβαιότητα μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ

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:

1. *Αισθητήρας λήψης συντεταγμένων των μετρούμενων σημείων (probe)*. Είναι η διάταξη που είναι υπεύθυνη για την καταγραφή των συντεταγμένων των επιθυμητών σημείων του ελεγχόμενου εξαρτήματος στο χώρο.
2. *Υψηλής ακρίβειας μηχανολογική κατασκευή*. Συγκροτείται από σύνολο ανεξάρτητων υποσυστημάτων (σταθερά και κινούμενα μηχανικά μέρη, σερβοκινητήρες, στοιχεία μετάδοσης κίνησης, οπτικές κλίμακες κ.α.) που είναι υπεύθυνα για τη μετακίνηση και την τοποθέτηση του αισθητήρα λήψης σημείων με υψηλή ακρίβεια κι επαναληψιμότητα στον τρισδιάστατο χώρο μέτρησης.
3. *Ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης δεδομένων και αυτομάτου ελέγχου, (controller)*, υπεύθυνο για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς (ταχύτητα κίνησης, ταχύτητα μέτρησης, επιτάχυνση κ.α.) των κινούμενων μερών της ΜΜΣ και του αισθητήρα λήψης σημείων, για την υπολογιστική αντιστάθμιση των θερμοκρασιακών διαφορών από την θερμοκρασία αναφοράς των 20 C° και την αρχική επεξεργασία των συντεταγμένων των λαμβανόμενων σημείων.
4. *Μετρητικό λογισμικό*. Υπολογιστική πλατφόρμα μέσα από την οποία γίνεται η επικοινωνία της ΜΜΣ με τον χρήστη, δημιουργούνται τα προγράμματα μέτρησης, πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία των συντεταγμένων των λαμβανόμενων σημείων και διαμορφώνονται οριστικά τα μετρητικά αποτελέσματα.

Η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και η αξιολόγηση των τεσσάρων αυτών «δομικών στοιχείων» μιας ΜΜΣ αποτελεί βασική προϋπόθεση τόσο για την ορθή επιλογή της σε σχέση με το συγκεκριμένο φάσμα μετρολογικών εφαρμογών που προορίζεται να καλύψει όσο και για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων. Η κατηγοριοποίηση των διαθέσιμων τύπων ΜΜΣ γίνεται, σύμφωνα με τα παραπάνω, με βάση:

- 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.

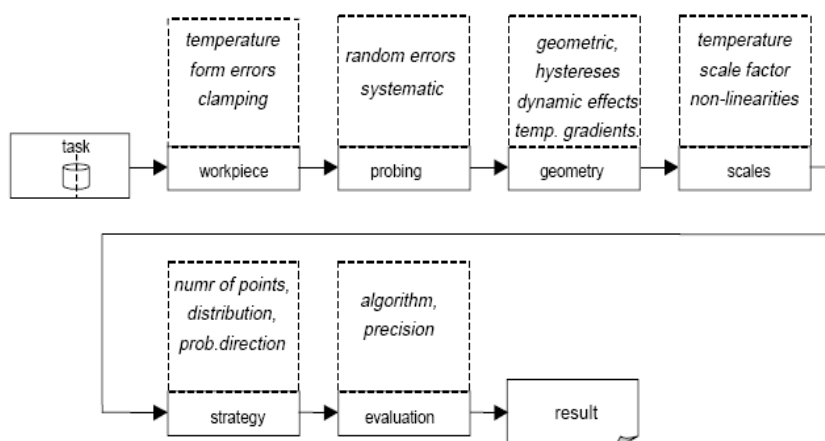
- ii. **Την κατασκευαστική διαμόρφωση και το μέγεθος του «ωφέλιμου χώρου μέτρησης» της μηχανής:** Μεταξύ των πιο διαδεδομένων είναι οι μηχανές τύπου γέφυρας (*bridge type*) η οποία κινείται προσαρμοσμένη σε σταθερή τράπεζα, οι τύπου ικριώματος – γερανογέφυρας (*gantry type*), όπου η κίνηση γίνεται σε 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 αλγόριθμων 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, [7]. Ωστόσο, το εν λόγω πρότυπο, [7], αφορά στην επαλήθευση επίδοσης των ΜΜΣ και δεν επιτρέπει να παράγονται άμεσα δηλώσεις σχετικά με την αβεβαιότητα των μετρήσεων.

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 [8]. 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*), [9].

Σημαντικό επιστημονικό πεδίο στο οποίο εμφανίζεται έντονη ερευνητική δραστηριότητα, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελεί η εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων των ΜΜΣ. 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, [10]. 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 [11]. 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 2, [12].



**Σχήμα 2.** Συνιστώσες της αβεβαιότητας που καθορίζονται για συγκεκριμένο έργο μέτρησης ΜΜΣ, [12].

Για την υλοποίηση των παραπάνω σε βιομηχανικό περιβάλλον, οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο κοστολογικά επιβαρυντικές, άμεσα εφαρμόσιμες και εύκολα κατανοητές. Στον τομέα της βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων και ειδικότερα στην περίπτωση των ΜΜΣ ο στόχος αυτός δεν έχει μέχρι σήμερα επιτευχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

### 3. Εκτίμηση της Αβεβαιότητας ΜΜΣ με βάση το πρότυπο ISO 15530-3

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της εκτίμησης της αβεβαιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση των ΜΜΣ, έχουν

διεθνώς προταθεί διάφορες τεχνικές βασισμένες στην υπολογιστική προσομοίωση και τη μαθηματική μοντελοποίηση των παραγόντων αβεβαιότητας, σε πειραματικές διαδικασίες, ή στο συνδυασμό και των δύο αυτών προσεγγίσεων. Η αυξανόμενη χρήση των ΜΜΣ στη βιομηχανία έχει καταστήσει επιτακτικό τον καθορισμό ενός εργαλείου εύχρηστου και εύκολα εφαρμόσιμου σε βιομηχανικό περιβάλλον που θα μπορεί παράλληλα να παρέχει με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Στη σειρά των προτύπων ISO 15530 καθορίζεται πειραματική τεχνική για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων των ΜΜΣ. Μέσα στο πλαίσιο των κατευθύνσεων και των ορισμών του GUM [9], η πειραματική αυτή προσέγγιση έχει στόχο την απλούστευση των διαδικασιών που απαιτούνται για τον αναλυτικό υπολογισμό της αβεβαιότητας των ΜΜΣ παρέχοντας μια κατανοητή και άμεσα εφαρμόσιμη τεχνική.

Σύμφωνα με την προσέγγιση που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 15530-3, [13], η εκτίμηση της αβεβαιότητας για καθορισμένα μετρητικά έργα (*measurement task specific*) βασίζεται σε μια σειρά από μετρήσεις που διεξάγονται σε διακριβωμένα αντικείμενα ή μετρητικά πρότυπα τα οποία ικανοποιούν καθορισμένες συνθήκες ομοιότητας, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, με τα ίδια τα ελεγχόμενα εξαρτήματα. Κατά τη διεξαγωγή των εν λόγω μετρήσεων καθορίζεται επίσης συγκεκριμένο πλαίσιο παραμέτρων (δίδεται στον Πίνακα 1), που επηρεάζουν την αβεβαιότητα (πλήθος και διασπορά λαμβανομένων σημείων, κατασκευαστική διαμόρφωση, ταχύτητα και προσανατολισμός αισθητήρα κ.α.).

Subject	Requirements	
Dimensional characteristics	Dimensions	Identical within: — 10 % beyond 250 mm — 25 mm below 250 mm
	Angles	Identical within $\pm 5^\circ$
Form deviations and surface texture	Similar due to functional properties	
Material (e.g. thermal expansion, elasticity, hardness)	Similar due to functional properties	
Measuring strategy	Identical	
Probe configuration	Identical	

**Πίνακας 1.** Συνθήκες ομοιότητας κατά το πρότυπο ISO 15530-3 [13]

Για την εφαρμογή της μεθόδου τουλάχιστον ένα βαθμονομημένο αντικείμενο ή πρότυπο, που ικανοποιεί τις συνθήκες ομοιότητας του Πίνακα 1, μετρίεται στη θέση των μετρούμενων εξαρτημάτων με τουλάχιστον είκοσι επαναλήψεις του μετρητικού έργου οι οποίες είναι προτιμότερο να απέχουν χρονικά μεταξύ τους. Για την εκτίμηση της αβεβαιότητας λαμβάνονται υπόψη τρεις βασικές συνιστώσες αβεβαιότητας :

1.  $u_{cal}$  : τυπική αβεβαιότητα που προκύπτει από τη διακρίβωση των προτύπων και καθορίζεται στο αντίστοιχο πιστοποιητικό
2.  $u_p$  : τυπική αβεβαιότητα που προκύπτει από τη διαδικασία μετρήσεων
3.  $u_w$  : τυπική αβεβαιότητα που προκύπτει από τα υλικά των προτύπων και από κατασκευαστικές αποκλίσεις των μετρούμενων εξαρτημάτων (του συντελεστή θερμικής διαστολής, των κατασκευαστικών γεωμετρικών αποκλίσεων, της σκληρότητας κ.α.)

$u_{cal}$	$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k}$	$k$ : συντελεστής κάλυψης $U_{cal}$ : διευρυμένη αβεβαιότητα διακρίβωσης
$u_p$	$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ όπου $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$n$ : το πλήθος των μετρήσεων $y_i$ : μετρούμενη τιμή από ΜΜΣ
$u_w$	$u_w = (T - 20^\circ\text{C}) \times u_\alpha \times l$	$u_a$ : πρότυπη αβεβαιότητα του συντελεστή διαστολής του υλικού του προτύπου $T$ : μέση θερμοκρασία του προτύπου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων $l$ : η μετρούμενη διάσταση
$b$	$b = \bar{y} - x_{cal}$	$x_{cal}$ : η τιμή αναφοράς του πιστοποιητικού διακρίβωσης του διακριβωμένου αντικειμένου

**Πίνακας 2.** Συνιστώσες αβεβαιότητας και σχέσεις υπολογισμού τους, [13]

Οι σχέσεις υπολογισμού των παραπάνω συνιστωσών δίδονται στον Πίνακα 2. Η διευρυμένη αβεβαιότητα,  $U$ , υπολογίζεται τελικά από τις συνιστώσες αβεβαιότητας και το συστηματικό σφάλμα,  $b$ , ως εξής:

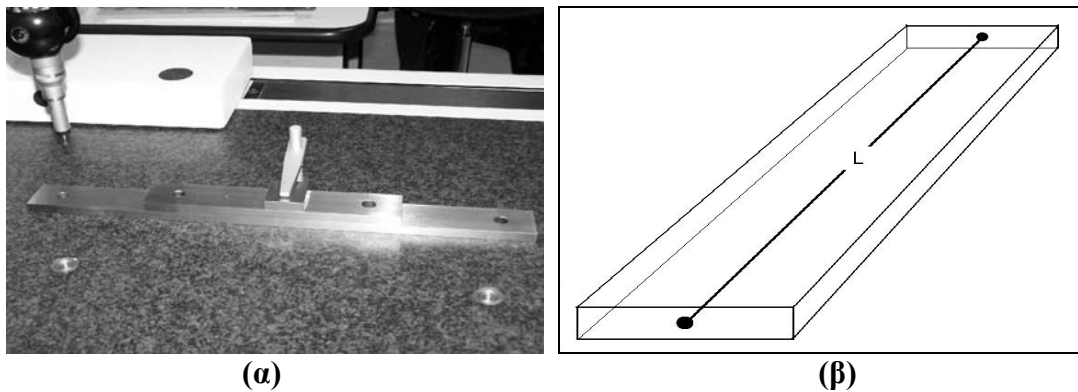
$$U = k \times \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b| \quad (1)$$

Ο συντελεστής κάλυψης,  $k$ , συνίσταται να επιλέγεται  $k=2$  με πιθανότητα κάλυψης του 95%.

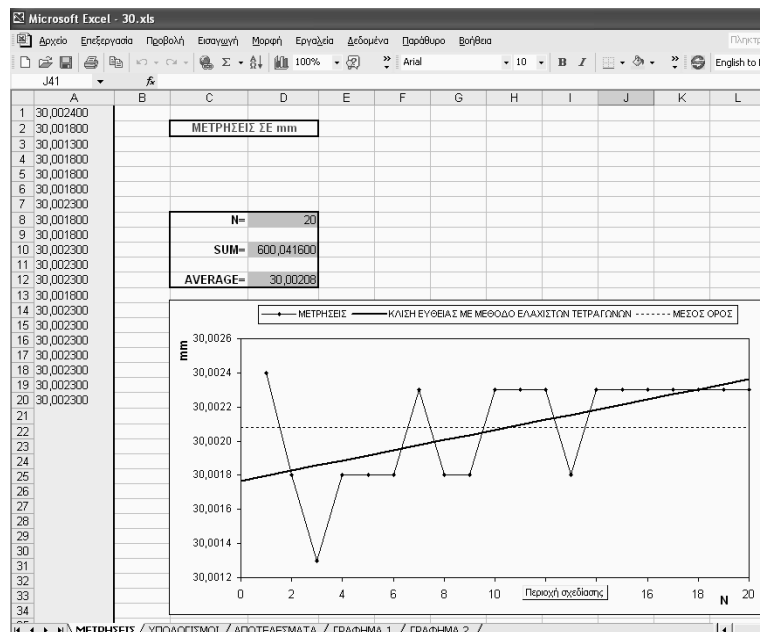
#### 4. Ανάπτυξη και εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου UU.E.TO

Στόχος της ανάπτυξης του υπολογιστικού εργαλείου UN.E.TO (**U**ncertainty **E**valuation **T**ool) είναι η εκτίμηση της αβεβαιότητας για συγκεκριμένα μετρητικά έργα σε μηχανές ΜΜΣ, σύμφωνα με τις διαδικασίες του πρότυπου ISO 15530-3 [13]. Η υπολογιστική υλοποίηση του εργαλείου UN.E.TO πραγματοποιείται σε περιβάλλον MS EXCEL του MS Office, το οποίο συνδέεται με τα περισσότερα μετρητικά λογισμικά ΜΜΣ. Η πειραματική εφαρμογή και η αξιολόγησή του πραγματοποιείται στη ΜΜΣ *Mistral 070705* (s/n 00808) τύπου γέφυρας του οίκου DEA-Brown & Sharpe, που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

Έγιναν μετρήσεις σε τρία πρότυπα μήκη από χάλυβα, Σχήμα 3(α), με στόχο την εκτίμηση της αβεβαιότητας για μετρήσεις σε αντικείμενα με μήκη παρόμοια με αυτά των προτύπων. Παρακάτω παρουσιάζεται η χρήση του εργαλείου UN.E.TO για την περίπτωση του προτύπου μήκους με ονομαστική τιμή 30mm. Για την καταγραφή των σημείων χρησιμοποιήθηκε κεφαλή τύπου *PH10M* του οίκου Renishaw σε συνδυασμό με εργαλείο αποτελούμενο από στέλεχος τύπου *TP200* του ίδιου οίκου με απόληξη τύπου “ruby-ball tip” μήκους 20mm και διαμέτρου 4mm, ενώ για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το μετρητικό λογισμικό *PC-DMIS* v.3.6 της Wilcox Assoc. Ο αριθμός και η κατανομή των σημείων επαφής καθορίστηκε με βάση τη στρατηγική μέτρησης που δίδεται στο σχήμα 3 (β).



Σχήμα 3. Μετρήσεις ΜΜΣ σε πρότυπα μήκη και στρατηγική λήψης σημείων



Σχήμα 4. UN.E.TO: υπολογιστικό φύλλο εισαγωγής μετρήσεων

Στο πρώτο υπολογιστικό φύλλο με την ονομασία “ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ”, Σχήμα 4, εισάγονται στη στήλη A τα αποτελέσματα του κύκλου μετρήσεων για το συγκεκριμένο μετρητικό έργο, όπως δίδονται από το λογισμικό της ΜΜΣ (σε mm). Στο υπολογιστικό φύλλο παρουσιάζεται διάγραμμα με τη διασπορά των τιμών, το μέσο όρο και την κλίση της ευθείας με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Στο δεύτερο υπολογιστικό



φύλλο με την ονομασία “ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ”, Σχήμα 5, εισάγονται οι τιμές που δίνονται στο πιστοποιητικό διακρίβωσης του εκάστοτε μετρούμενου προτύπου, καθώς και η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και εκτελείται ο υπολογισμός της αβεβαιότητας. Ειδικότερα, στο πεδίο F4 εισάγεται η τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας διακρίβωσης  $U_{cal}$ , στο πεδίο F6 εισάγεται η τιμή του συντελεστή κάλυψης  $k$ , στο πεδίο F11 η τιμή του μετρούμενου μεγέθους που δίνει το εργαστήριο διακρίβωσης  $x_{cal}$ , στο πεδίο F15 η τιμή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων  $T(^{\circ}C)$ , και στο πεδίο F16 η τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής του υλικού  $u_a(1/k)$ . Στο τρίτο υπολογιστικό φύλλο με την ονομασία “ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ”, Σχήμα 6, δίδονται τα αποτελέσματα του φύλλου “ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ” σε μορφή πινάκων. Ειδικότερα, στον πρώτο πίνακα στο πεδίο C6 δίνεται η μέση τιμή των μετρήσεων  $\bar{y}$ , στο πεδίο C7 η τιμή της αβεβαιότητας διακρίβωσης  $u_{cal}$ , στο πεδίο C8 η τιμή της τυπικής αβεβαιότητας  $u_p$ , στο πεδίο C9 η τιμή της τυπικής αβεβαιότητας  $u_w$ , στο πεδίο C10 η τιμή του συστηματικού σφάλματος  $|b|$ , στο πεδίο C12 η εκτιμώμενη διευρυμένη αβεβαιότητα των μετρήσεων  $U$ , και στο πεδίο C13 η τιμή της σχετικής αβεβαιότητας,

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2	<b>1) Standard uncertainty <math>u_{cal}</math> of the calibrated workpiece</b>										
3						$U_{cal} =$	0,000075				
4			$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k}$			$k =$	2	>>>>>>>	$u_{cal} =$	3,8E-05	
5											
6	<b>2) Calibrated value of the calibrated workpiece, <math>x_{cal}</math></b>										
7						$x_{cal} =$	30,00004				
8	<b>3) Standard uncertainty <math>u_w</math> from the manufacturing process</b>										
9						$T =$	20,6				
10						$u_a(1/k) =$	1,15E-05	>>>>>>>	$u_w =$	9,4E-05	
11						$l =$	30,00004				
12											
13	<b>4) Systematic error, <math>b</math></b>										
14						$\bar{y} =$	30,00208	>>>>>>>	$ b  =$	0,0020	
15											
16											
17											
18											
19	<b>5) Standard uncertainty <math>u_p</math></b>										
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33	<b>6) Expanded measuring uncertainty, <math>U</math></b>										
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											
	ΟΛΑ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΕ mm										
	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ \ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ \ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ \ ΓΡΑΦΗΜΑ 1 \ ΓΡΑΦΗΜΑ 2										

Σχήμα 5. UN.E.TO: υπολογιστικό φύλλο εκτέλεσης υπολογισμών

## 5. Συμπεράσματα

Η ανάγκη για την απλοποίηση και κωδικοποίηση των διαδικασιών εκτίμησης της αβεβαιότητας μετρητικών αποτελεσμάτων ΜΜΣ, ειδικότερα σε βιομηχανικές εφαρμογές, έχει οδηγήσει στην κατάρτιση της σειράς προτύπων ISO 15530. Η πειραματική τεχνική που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 15530-3 βρίσκεται σε συμφωνία με τις οδηγίες του GUM και αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας των μετρήσεων ΜΜΣ στην καθημερινή βιομηχανική πρακτική. Η πειραματική εφαρμογή και η θετική αξιολόγηση των παραπάνω πραγματοποιείται στον συναφή εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής

Πρωτοτύπων & Εργαλείων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Άμεσο μελλοντικό στόχο αποτελεί η διασύνδεση της διαδικασίας εκτίμησης αβεβαιότητας με την κατάρτιση της Μήτρας Ικανότητας Μέτρησης (MIM) ΜΜΣ [10] που στο παρόν στάδιο εστιάζεται σε μετρητικά έργα που αφορούν σε μέτρηση διαστάσεων και γεωμετρικών ανοχών θέσης.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		<b>Contributor</b>	<b>Value</b>				
3		$X_{cal} =$	30,00004	mm			
4		$T(^{\circ}C) =$	20,60				
5		$U_a =$	0,0000115	mm			
6		$\bar{y}$	30,002080	mm			
7		$U_{cal} =$	0,000038	mm			
8		$U_p =$	0,000307	mm			
9		$U_w =$	0,000094	mm			
10		$ b  =$	0,002040	mm			
11		$k =$	2,000000				
12		$U =$	0,002687	mm			
13		RELATIVE					
14		UNCERTAINTY	0,009%				
15							
16		<b>Contributor</b>	<b>Value</b>				
17		$X_{cal} =$	30000,04	$\mu\text{m}$			
18		$T(^{\circ}C) =$	20,60				
19		$U_a =$	0,0115	$\mu\text{m}$			
20		$\bar{y}$	30002,08	$\mu\text{m}$			
21		$U_{cal} =$	0,03750001	$\mu\text{m}$			
22		$U_p =$	0,30710876	$\mu\text{m}$			
23		$U_w =$	0,09444388	$\mu\text{m}$			
24		$ b  =$	2,04	$\mu\text{m}$			
25		$k =$	2				
26		$U =$	2,68696734	$\mu\text{m}$			
27		RELATIVE					
28		UNCERTAINTY	0,009%				
29							

Σχήμα 6. Υπολογιστικό φύλλο αποτελεσμάτων του εργαλείου UN.E.TO

## 6. Αναφορές

- [1] ISO 14253-1, *Geometrical Product Specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications*, ISO, Geneva, 1998.
- [2] S.W. Lin, *Dynamic measurement accuracy evaluation of coordinate measuring machines*, Proc Instn Mech Engrs Part B, Vol. **215**, pp. 1090 – 1097, 2001.
- [3] C-X Feng and X Wang, *Digitizing uncertainty modeling for reverse engineering applications: regression versus neural networks* J. of Intelligent Manuf., **13**, pp. 189-199, 2002.
- [4] A. Piratelli-Filho and B. Di Giacomo, *CMM uncertainty analysis with factorial design*, Precision Engineering, **27**, pp. 283-288, 2003.
- [5] C-X Feng, A.L. Saal, J.G. Salsbury, A. R. Ness, G.C. Lin, *Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study*, Precision Engineering, **31**, pp. 94 - 101, 2007.
- [6] A. Weckenmann, S. Beetz, J. Lorz, *Monitoring Coordinate Measuring Machines by User-Defined Calibrated Parts*, J.K. Davidson (ed.), Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing, pp. 125 – 134, Springer-Verlag, Netherlands, 2007.
- [7] 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.
- [8] Μ. Ε. Μαθιουλάκης, *Μέτρηση, Ποιότητα Μέτρησης και Αβεβαιότητα*, Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.

- [9] ISO: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, Geneva, 1995.
- [10] Γ. Καΐσαρλής, Σ. Διπλάρης, Μ. Σφαντζικόπουλος, *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.
- [11] EAL-G17, *Coordinate measuring machine calibration*, European Corporation for Accreditation of Laboratories (EAL), 1995.
- [12] ISO 15530-4, *Geometrical product specifications – coordinate measuring machines: technique for determining the uncertainty of measurement – Part 4: Uncertainty assessment using statistical estimation*, ISO, Geneva, 2004.
- [13] ISO 15530-3, *Geometrical product specifications – coordinate measuring machines: technique for determining the uncertainty of measurement – Part 3: Use of calibrated workpieces or standards*, ISO, Geneva, 2004.