ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ: ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Γ. Καϊσαρλής[1], Σ. Διπλάρης[2], Μ. Σφαντζικόπουλος[3]
[1, 2, 3] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχ/κών Κατασκευών & Αυτ. Ελέγχου,
Κτίριο «Μ», Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου, Αθήνα
[1] gkaiss@central.ntua.gr

Περίληψη:
Στον τομέα της μετρολογίας διαστάσεων, οι Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ), (Coordinate Measuring Machines, CMM) αποτελούν σήμερα το πλέον διαδεδομένο, ακριβές και αξιόπιστο βιομηχανικό/ εργαστηριακό μετρητικό μέσο. Παρά την ευρύτατη χρήση των μηχανών αυτών, ορισμένα κρίσιμα ζητήματα που αφορούν στον συνολικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας, στις διαδικασίες βαθμονόμησής τους και στην αξιολόγηση των μετρητικών αποτελεσμάτων με βάση τα ισχύοντα εθνικά και διεθνή πρότυπα παραμένουν αδιευκρίνιστα.

Στην εργασία παρουσιάζονται οι σύγχρονες αντιλήψεις και πρακτικές για την αξιολόγηση και την επαλήθευση των επιδόσεων των ΜΜΣ, καταγράφονται οι επί μέρους παράγοντες που συμβάλλουν στη συνολική αβεβαιότητα και επισημαίνεται η ιδιαίτερη σημασία τους. Τέλος, παρουσιάζεται το παρόν στάδιο εξέλιξης και σχολιάζονται οι προοπτικές της υβριδικής προσέγγισης υπολογισμού της συνολικής αβεβαιότητας με την κατάρτιση της Μήτρας Ικανότητας Μέτρησης (MIM) που προκύπτει από τη μοντελοποίηση των διάφορων τύπων μετρητικών διαδικασιών (μέτρηση μήκους, μορφής, θέσης, προσανατολισμού κ.λ.π).

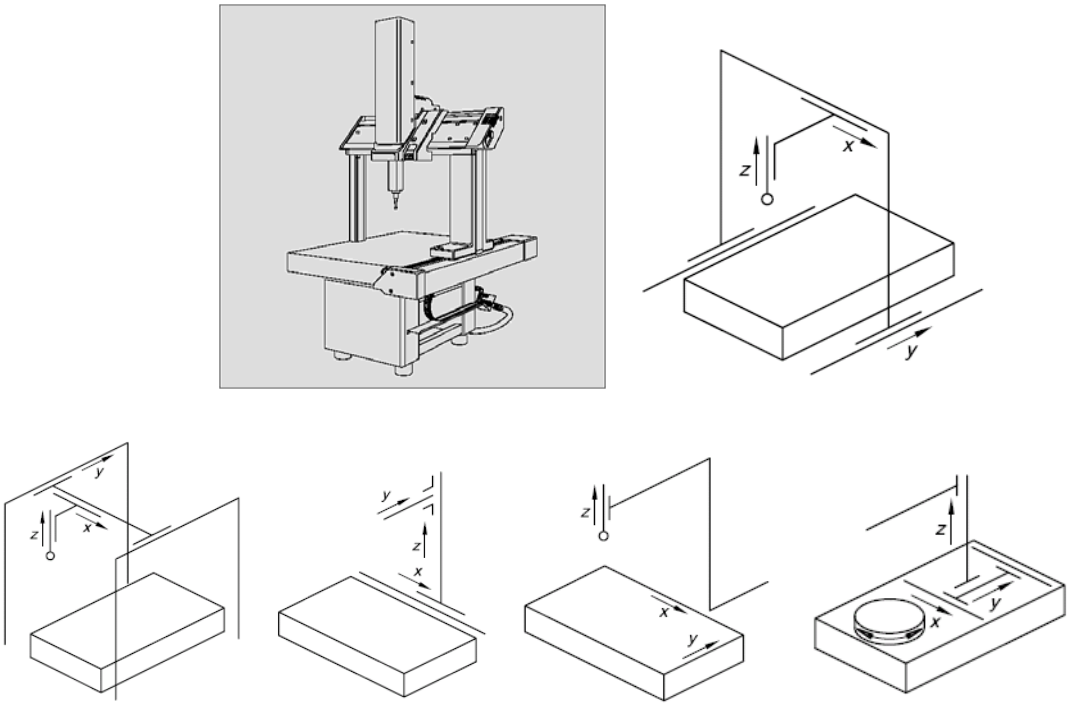
Λέξεις Κλειδιά: Μετρολογία Διαστάσεων, Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων, Αβεβαιότητα, Πρότυπα, Βαθμονόμηση

1. Εισαγωγή

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 τον ποιοτικό έλεγχο μορφής και διαστάσεων όσο και για τον Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ). Αποτελούν για τον κλάδο των μηχανολογικών κατασκευών ακριβείας ένα εργαλείο εξίσου απαραίτητο με τις μηχανές παραγωγής και τις εργαλειομηχανές. Επιγραμματικά, οι ΜΜΣ παρέχουν τις δυνατότητες για:

- Αξιόπιστη *μέτρηση* σε ολόκληρο το εύρος των προδιαγραφών γεωμετρικής ακρίβειας των κατασκευών (γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών)
- Ψηφιακή σάρωση και *αποτύπωση* σε περιβάλλον CAD ή/ και έλεγχο και αντιπαραβολή επιφανειών και γεωμετρίας εξαρτημάτων.

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. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται μια τυπική ΜΣΣ τύπου κινούμενης γέφυρας και δίνονται με μορφή διαγράμματος ορισμένοι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους κατασκευαστικών διαμορφώσεων ΜΜΣ που καταγράφονται στο πρότυπο ISO 10360-1 [1].



Σχήμα 1.Τυπική ΜΜΣ και διαγραμματική απεικόνιση εναλλακτικής κατασκευαστικής διαμόρφωσης ΜΜΣ [1]

Οι εφαρμογές, τα οφέλη από τη χρήση, οι μετρητικές τεχνικές και το γενικότερο πλαίσιο των θεμάτων που αφορούν στις ΜΜΣ έχουν παρουσιαστεί σε γενικά [2], [3] και εξειδικευμένα, [4], [5], τεχνικά εγχειρίδια και αποτελούν το αντικείμενο μεγάλου πλήθους ερευνητικών εργασιών. Η παρούσα εργασία απευθύνεται σε ορισμένα κρίσιμα ζητήματα τα οποία, παρά την ευρύτατη αποδοχή και διάδοση των ΜΜΣ, εξακολουθούν να παραμένουν αδιευκρίνιστα. Ειδικότερα, τα ζητήματα αυτά αφορούν στον συνολικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας, στις διαδικασίες βαθμονόμησης και στην αξιολόγηση των μετρητικών αποτελεσμάτων τους με βάση τα ισχύοντα εθνικά και διεθνή πρότυπα. Στην εργασία η υβριδική προσέγγιση της κατάρτισης Μήτρας Ικανότητας Μέτρησης (ΜΙΜ) προτείνεται ως άμεση και εφικτή λύση στις βιομηχανικές εφαρμογές μετρολογίας διαστάσεων με χρήση ΜΜΣ.

2. Πρότυπα Επαλήθευσης Επιδόσεων και Βαθμονόμησης ΜΜΣ

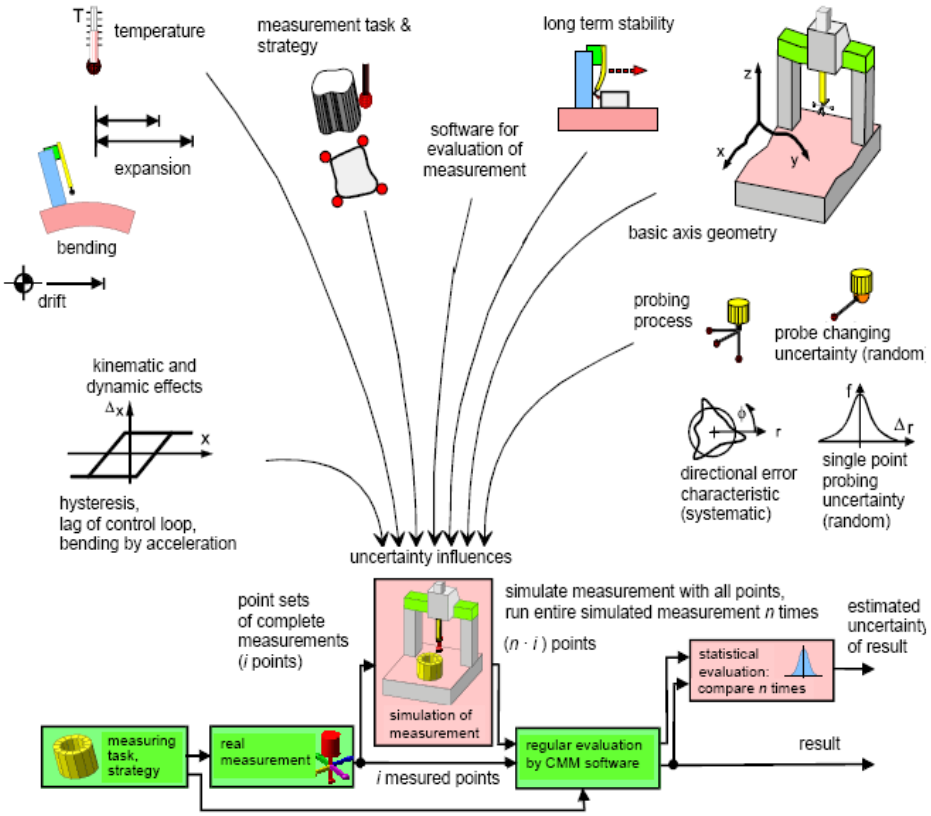
Στα γενικότερα πλαίσια της μετρολογίας διαστάσεων η ανάλυση και κατανόηση των εννοιών της ορθότητας, της ακρίβειας, του σφάλματος και της αβεβαιότητας, καθώς και ο υπολογισμός της «συνολικής αβεβαιότητας των μετρήσεων» με βάση τις σύγχρονες αντιλήψεις στην ευρύτερη επιστημονική περιοχή της μετρολογίας, «θεμελιώθηκαν» μετά τη δημοσίευση του διεθνούς προτύπου ISO Guide for the Uncertainty of Measurement (GUM) [6]. Η *αβεβαιότητα* συνιστά μια ποσοτική έκφραση της ποιότητας της μέτρησης, στο βαθμό που επιτρέπει την εκτίμηση των ορίων του σφάλματος της πειραματικής παρατήρησης [7] και ο υπολογισμός της, λαμβάνοντας υπ' όψη το σύνολο των παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα αυτή, τις αλληλεπιδράσεις και τον συσχετισμό τους, ειδικά για τις μετρητικές εργασίες που πραγματοποιούνται με χρήση ΜΜΣ, αποτελεί ένα σημαντικού ενδιαφέροντος για τη βιομηχανική κι εργαστηριακή πρακτική ερευνητικό αντικείμενο.

Σε αντίθεση με τα απλά συμβατικά μετρητικά όργανα (μικρόμετρα, μετρητικά ρολόγια κλπ), 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. 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. Η άμεση σύνδεση της αβεβαιότητας με το μετρητικό έργο οδηγεί στην κυρίαρχη στα σχετικά πρότυπα της σειράς ISO 15530 και ISO 14253 (ορισμένα βρίσκονται ακόμη στο στάδιο διαμόρφωσης) 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.

Η *βαθμονόμηση η οποία σχετίζεται με το έργο* επιτυγχάνεται είτε με την προσέγγιση συγκριτή (μέτρηση ιχνηλάσιμων αντικειμένων αναφοράς για τα ίδια έργα μέτρησης) ή με την προσέγγιση της σύνθεσης σφαλμάτων (παραμετρική ανάλυση των σφαλμάτων που εισάγονται από διάφορούς εμπλεκόμενους παράγοντες). Η τελευταία έχει οδηγήσει στη δημιουργία της έννοιας της *ιδεατής ΜΜΣ (virtual CMM)*, μιας διαδικασίας η οποία προλέγει τα σφάλματα ένδειξης της ΜΜΣ για ένα αριθμό έργων με τη δημιουργία μαθηματικού μοντέλου για την εισαγωγή και τη διάδοση των σφαλμάτων στα εξαρτήματα και στο λογισμικό της ΜΜΣ. Η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής με τη μορφή ενός σύνθετου υπολογιστικού εργαλείου, που οι βασικές αρχές του δίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 2, αποτελεί ένα εξελισσόμενο ερευνητικό αντικείμενο [8], [9], [10], με εφαρμογή προς το παρόν μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο.

Ουσιαστικές διαφορές σε σχέση με τα παραπάνω εντοπίζονται στα δημοσιευμένα εθνικά και διεθνή πρότυπα που περιγράφουν τις απαιτήσεις για *την επαλήθευση επίδοσης των ΜΜΣ* και τις διαδικασίες της δοκιμής αποδοχής τους. Τα πρότυπα της σειράς ISO 10360-1έως 6, VDI/VDE 2617, ANSI/ASME B89.1.12 κ.α. χρησιμοποιούνται για να αποφασιστεί εάν η επίδοση των ΜΜΣ συμμορφώνεται ή όχι με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή και βασίζονται σε ένα πολύ περιορισμένο δείγμα (η σχετική εκτενής αντιπαραβολή τους δίνεται στο [11]) που δεν επιτρέπει να παράγονται άμεσα δηλώσεις

σχετικά με την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Έτσι, η επαλήθευση επίδοσης δεν εγγυάται ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων οι οποίες επιτελούνται με μια ΜΜΣ για όλα τα έργα μέτρησης, οπουδήποτε στο χώρο εργασίας και με οποιαδήποτε στρατηγική μέτρησης αν και σ' ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι σε πολλές περιπτώσεις το ανώτατο επίπεδο τεχνικής για την προσέγγιση της [12].

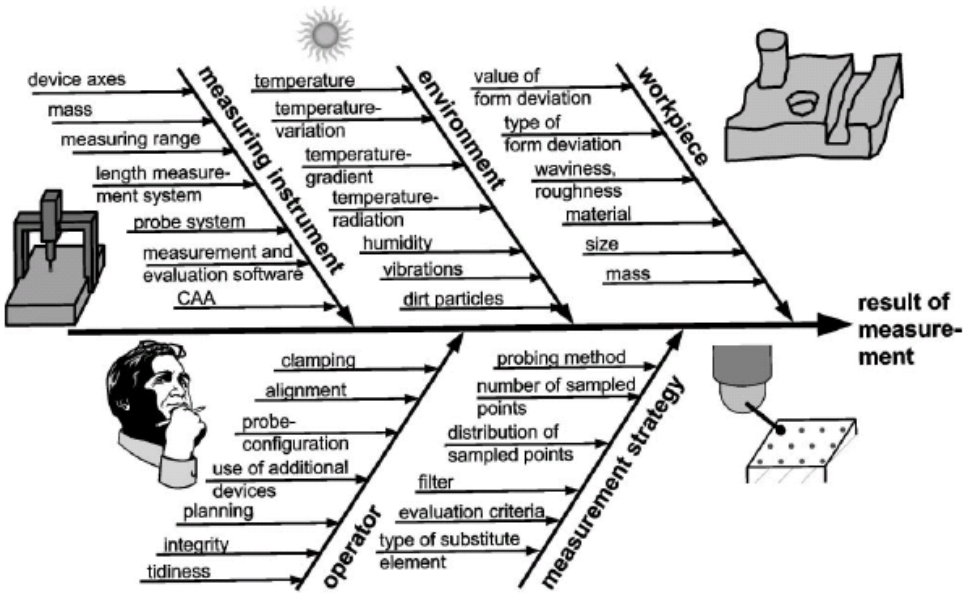


Σχήμα 2. Εκτίμηση αβεβαιότητας με χρήση ιδεατής ΜΜΣ [10]

3. Παράγοντες Αβεβαιότητας στις ΜΜΣ

Οι παράγοντες αβεβαιότητας που διαμορφώνουν τη συνολική αβεβαιότητα στις ΜΜΣ, με βάση τα παραπάνω, προέρχονται από διαφορετικές αιτίες και ασκούν διαφορετική επίδραση εξαρτώμενοι άμεσα από το εκάστοτε έργο μέτρησης. Η συνολική καταγραφή τους όπως εντοπίζεται σε τεχνικά εγχειρίδια [13], ερευνητικές εργασίες [14] και σε γενικότερα πρότυπα [15], τους αποδίδει στις εξής βασικές κατηγορίες (βλ. αναλυτική παρουσίαση στο Σχήμα 3):

- Μετρητικό λογισμικό και κατασκευαστική διαμόρφωση ΜΜΣ και αισθητήρα καταγραφής σημείων
- Στρατηγική Μέτρησης
- Μετρούμενο αντικείμενο
- Συνθήκες περιβάλλοντος μέτρησης
- Χειριστής



Σχήμα 3. Παράγοντες αβεβαιότητας ΜΜΣ [14]

Οι ιδιαιτερότητες των ΜΜΣ εντοπίζονται στις δύο πρώτες κατηγορίες ενώ οι υπόλοιπες αντιμετωπίζονται στα γενικότερα πλαίσια της μετρολογίας. Κατά τη μέτρηση διαστάσεων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών με ΜΜΣ η στρατηγική μέτρησης που ακολουθείται καθορίζει πρωτίστως *τη μέθοδο δειγματοληψίας* (probing method), *το πλήθος και τη διασπορά* των σημείων επαφής στο μετρούμενο Μορφολογικό Στοιχείο Σχεδιασμού (ΜΣΣ) [16]. Το επαγόμενο ΜΣΣ προκύπτει από τη μαθηματική προσαρμογή του συνόλου των σημείων επαφής σε ένα ονομαστικό ΜΣΣ από τους αλγόριθμούς του μετρητικού λογισμικού. Η επιλογή της στρατηγικής μέτρησης με τρόπο που να επιτρέπει την αξιόπιστη ποσοτική εκτίμηση της αβεβαιότητας που εισαγάγει στο αποτέλεσμα της μέτρησης είναι ένα ανοιχτό ερευνητικό πρόβλημα. Επισημαίνεται ότι το σφάλμα στο αποτέλεσμα της μέτρησης του μεγέθους (π.χ. της διαμέτρου) και της μορφής (π.χ. κυκλικότητα) που οφείλεται σε κακή επιλογή της μεθόδου δειγματοληψίας και της στρατηγικής μέτρησης γενικότερα, είναι ένας από τούς σημαντικότερους παράγοντες στη συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης [3], [4] και [5].

Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας που ενσωματώνονται στο μετρητικό λογισμικό των ΜΜΣ είναι υπεύθυνοι για τη μαθηματική προσαρμογή των μετρούμενων σημείων έτσι, ώστε να προκύψει το επαγόμενο γεωμετρικό ΜΣΣ και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα και την αβεβαιότητα της μέτρησης. Τα κριτήρια για την *αξιοπιστία* και την *καταλληλότητα* του λογισμικού αυτού και των αλγόριθμων επεξεργασίας έχουν περάσει από αρκετά στάδια εξέλιξης, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση του διεθνούς προτύπου ISO 10360-6, στο οποίο τυποποιούνται οι διαδικασίες δοκιμής με βάση τις οποίες πιστοποιούνται οι αλγόριθμοι προσαρμογής του μετρητικού λογισμικού των ΜΜΣ. Οι ευρύτερα διαδεδομένοι και διαθέσιμοι στην πλειοψηφία των σύγχρονων μετρητικών λογισμικών αλγόριθμοι στηρίζονται σε ένα από τα εξής κριτήρια προσαρμογής :

α) *Προσαρμογή με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων* (Total least squares fitting). Είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κριτήριο προσαρμογής γιατί προσφέρει ταχύτητα κι ευκολία υπολογισμών κι είναι περισσότερο ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα κριτήρια από τη στρατηγική μέτρησης των σημείων επαφής
β) *Προσαρμογή του μέγιστου εγγεγραμμένου ΜΣΣ* (Maximum Inscribed fitting),

γ) *Προσαρμογή του ελάχιστου περιγεγραμμένου ΜΣΣ* (Minimum Circumscribed fitting).
δ) *Προσαρμογή της ελάχιστης ζώνης* (Minimum zone / two sided minmax fitting) Χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό του σφάλματος μορφής (κυκλικότητα, κυλινδρικότητα κλπ)

4. Η προσέγγιση της Μήτρας Ικανότητας Μέτρησης (ΜΙΜ) - Συμπεράσματα

Στη βιομηχανική πρακτική ο καθορισμός της αβεβαιότητας στις μετρήσεις που προέρχονται από ΜΜΣ βασίζεται στην παράμετρο MPE_E, (Maximum Permissible Size Error) που μαζί με την παράμετρο MPE_P (Maximum Permissible Probing Error) χρησιμοποιούνται για τον ποσοτική έκφραση της επαλήθευσης επίδοσης τους στο διεθνές πρότυπο ISO 10360-2. Για τις ανάγκες της βιομηχανικής μετρολογίας διαστάσεων, η αριθμητική τιμή της συνολικής αβεβαιότητας πολύ συχνά υπολογίζεται ως πολλαπλάσιο του MPE_E με ένα συντελεστή k, ο οποίος μπορεί να παίρνει τιμές στο διάστημα από 2 έως και 20 ενσωματώνοντας κατά περίπτωση την επίδρασή όλων των επιμέρους παραγόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω [17]. Το μέγεθος αυτό, σε αντιστοιχία με την ονοματολογία του οδηγού GUM καλείται *διευρυμένη αβεβαιότητα,* U (expanded uncertainty) ενώ ο συντελεστής k αποτελεί συσχετισμό με τον αντίστοιχο συντελεστή επικάλυψης (coverage factor):

$$U = k * MPE_E \quad , k \in [2, 20] \qquad (2)$$

Ο παραπάνω τρόπος υπολογισμού του U έχει τη βάση του στην προσέγγιση για τον υπολογισμό της συνολικής αβεβαιότητας που καθορίζεται στο πρότυπο ISO/R 1938:1971 (E) και στον αντίστοιχο εμπειρικό κανόνα που βρίσκει ευρεία πρακτική εφαρμογή στη βιομηχανική μετρολογία και προτείνεται από τους κατασκευαστές ΜΜΣ κατά την εξέταση της καταλληλότητάς τους στη διαδικασία επιλογής τους [17]. Το μεγάλο εύρος τιμών του συντελεστή k, ο αόριστος, καθαρά εμπειρικός και πρακτικός τρόπος συσχετισμού του με τους παράγοντες αβεβαιότητας καθιστούν τον παραπάνω τρόπο ακατάλληλο για τον υπολογισμό ενός τόσο κρίσιμου μεγέθους στη σύγχρονη βιομηχανική πραγματικότητα.

Ως άμεση και εφικτή λύση για το πρόβλημα του υπολογισμού της αβεβαιότητας στις μετρήσεις που προέρχονται ΜΜΣ στις βιομηχανικές εφαρμογές μετρολογίας διαστάσεων προτείνεται η υβριδική προσέγγιση της κατάρτισης Μήτρας Ικανότητας Μέτρησης (ΜΙΜ). Η εν λόγω προσέγγιση πλεονεκτεί τόσο σε σχέση με την προσέγγιση συγκριτή σε ευελιξία, όγκο απαιτούμενων μετρήσεων και κόστος (μετρήσεις σε λιγότερα ιχνηλάσιμα αντικείμενα αναφοράς) όσο σε σχέση με την προσέγγιση της σύνθεσης σφαλμάτων (υπολογιστικά απλούστερη). Η Μήτρα Ικανότητας Μέτρησης (ΜΙΜ) προκύπτει από τη μοντελοποίηση των διάφορων τύπων μετρητικών έργων (μέτρηση μήκους, μορφής, θέσης, προσανατολισμού κ.λ.π) [13] που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και είναι επαναλαμβανόμενα για μια ΜΜΣ *σε συγκεκριμένο κατασκευαστικό περιβάλλον.*

Οι μετρήσεις μικρού πλήθους ιχνηλάσιμων αντικειμένων αναφοράς (διακριβωμένων δακτυλίων, προτύπων μηκών, διακριβωμένων εξαρτημάτων κ.α.) για τα παραπάνω μετρητικά έργα με συγκεκριμένη στρατηγική μέτρησης συνδυάζονται με απλά

μαθηματικά μοντέλα των κυριότερων παραγόντων που επηρεάζουν την αβεβαιότητα της εξεταζόμενης ΜΜΣ με στόχο να δοθούν τιμές στον παραπάνω συντελεστή k *οι οποίες σχετίζονται με το εκάστοτε μετρητικό έργο.* Έτσι, η αβεβαιότητα του μετρητικού αποτελέσματος για τη διάμετρο ενός κυλίνδρου διαφέρει σημαντικά από αυτή του αποτελέσματος για την αληθή θέση του σε σχέση με ένα πλαίσιο στοιχείων αναφοράς, ή από αυτή της ομοαξονικότητάς του σε σχέση με κάποιον άλλο κύλινδρο, παρόλο που η ΜΜΣ, το περιβάλλον μέτρησης, το μετρούμενο εξάρτημα, η στρατηγική μέτρησης και ο χειριστής είναι κοινά. Η πειραματική διερεύνηση κι εφαρμογή των παραπάνω πραγματοποιείται στον συναφή εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και στο παρόν στάδιο η κατάρτιση της Μήτρας Ικανότητας Μέτρησης (MIM) εστιάζεται σε μετρητικά έργα που αφορούν σε μέτρηση διαστάσεων και γεωμετρικών ανοχών θέσης.

5. Αναφορές

[1] ISO 10360-1, *Acceptance and reverification tests for CMM – Vocabulary*, ISO, Geneva, 2000.

[2] J. A. Bosch, *Coordinate Measuring Machines and Systems,* Marcel Dekker, New York, 1995.

[3] T. Pfeifer, *Koordinaten – Messtechnik fur die Qualitatssicherung*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.

[4] Flack, D., *CMM Measurement Strategies,* NPL Measurement Good Practice Guide No. 41, NPL- Crown, Teddington, 2001.

[5] Flack, D. *CMM Probing,* NPL Measurement Good Practice Guide No. 43, NPL-Crown, Teddington, 2001.

[6] ISO: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, Geneva,1995

[7] Μ. Ε. Μαθιουλάκης, *Μέτρηση, Ποιότητα Μέτρησης και Αβεβαιότητα*, Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.

[8] H. J Pahk, M. Burdekin, G. N. Peggs, *Development of virtual coordinate measuring machines incorporating probe errors,* Proc Instn Mech Engrs Part B Vol 212, pp. 533 – 548, 1998.

[9] G. N. Peggs, *Virtual technologies for advanced manufacturing and metrology*, Int J of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 16(7-8), pp. 485-490, 2003.

[10] K. Takamasu, *Final Research Report – International Standard Development of Virtual CMM*, NEDO Int. Research Project, Tokyo, 2002.

[11] P. Cauchic – Miguel , T. King, J. Davis, *CMM verification: a survey*, Measurement, Vol. 17 (1), pp.1 -16, 1996.

[12] EAL-G17, *Coordinate measuring machine calibration*, European Corporation for Accreditation of Laboratories (EAL), 1995.

[13] P. J. Drake, *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, McGraw-Hill,New York, 1999.

[14] A. Weckenmann, M. Knauer, T. Killmaier, *Uncertainty of coordinate measurements on sheet metal parts in the automotive industry,* J. of Materials Processing Technology,Vol. 115, pp. 9-13, 2001.

[15] ISO 14253-2, *Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification*, ISO, Geneva, 2001.

[16] Μ.Μ. Σφαντζικόπουλος, *Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών ΙΙ*, Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.

[17] Brown & Sharpe, *Understanding the ISO 103 60-2 performance standard- Bridge Machines,* Brown & Sharpe Inc., North Kingston, RI, 2001.