

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΣΙΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

Γ. Ναβροζίδης και Χ. Μήτσας

Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ), Δ/ση Μηχανικών Μεγεθών, Θεσ/νίκη 57022

Email: gnavr@eim.gr

Περίληψη: Κατά το χαρακτηρισμό μηχανών που υλοποιούν το μέγεθος δύναμη, σε εφαρμογές προσδιορισμού της αντοχής υλικών αλλά και για διακριβώσεις διατάξεων επαλήθευσης δύναμης, υπεισέρχονται παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την ακρίβεια όσο και την αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων και σχετίζονται ειδικότερα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης των μετατροπέων δύναμης. Οι επιδράσεις αυτές αναφέρονται συχνά ως ανάπτυξη παρασιτικών δυνάμεων κατά τη διαδικασία της μέτρησης και είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης μεταξύ των αισθητηρίων δύναμης και της μηχανής όπου τοποθετούνται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Οι ιδιαιτερότητες κάθε μηχανής οσον αφορά στο σύνολο των τεχνικών χαρακτηριστικών της αλλά και η χρήση διαφόρων βοηθητικών εξαρτημάτων για την προσαρμογή των αισθητηρίων στις μηχανές και την εισαγωγή της δύναμης σε αυτά, είναι οι αιτίες εμφάνισης των εν λόγω μεταβλητοτήτων.

Η χρήση μετατροπέων πολλαπλών συνιστωσών δυνάμεων-ροπών και πολυκάναλων ενισχυτών σύγχρονης ανάγνωσης δίνει τη δυνατότητα ανίχνευσης των παρασιτικών δυνάμεων κατά τη διαδικασία της μέτρησης και περαιτέρω αντιστάθμισής των. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα θεωρητικό μοντέλο για τη λειτουργία μετατροπέων δύναμης τριών συνιστωσών (F_z , M_x , M_y), που διαθέτει το Εργαστήριο Δύναμης του ΕΙΜ και χρησιμοποιεί για την επιτήρηση και χαρακτηρισμό των Πρότυπων Μηχανών Δύναμης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραμάτων μετρήσεων υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και αναπτύσσεται μεθοδολογία αντιστάθμισης των παρασιτικών δυνάμεων που οδηγεί σε βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των μετρήσεων.

διακριβώσεις δύναμης, μετατροπείς πολλαπλών συνιστωσών, παρασιτικές δυνάμεις, πλευρικές δυνάμεις

1. Εισαγωγή

Η απαίτηση για βελτίωση της ακρίβειας και αξιοπιστίας των μετρήσεων συμβαδίζει με την εξέλιξη των τεχνολογικών εφαρμογών στην επιστήμη τη βιομηχανία και τις υπηρεσίες. Όσον αφορά στον τομέα των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών και ειδικότερα στην αντοχή υλικών, η ανάγκη αυτή εκφράζεται μέσα από τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας των μηχανών υλοποίησης δυνάμεων και ροπών, των διατάξεων μέτρησης (δυναμοκυψέλες, μετατροπείς δύναμης – ροπής), μεταφοράς ακρίβειας, καθώς και των ηλεκτρονικών μέσων (hardware – software) για την ενίσχυση, διαμόρφωση, καταγραφή και επεξεργασία των πρωτογενών (συνήθως ηλεκτρικών) σημάτων των μετατροπέων.

Οι σύγχρονες Πρότυπες Μηχανές νεκρού φορτίου υλοποιούν το μέγεθος δύναμη με σχετική αβεβαιότητα της τάξης μερικών ppm (5-20 ppm). Οι αντίστοιχες διατάξεις που είναι απαραίτητες για τη μέτρηση και μεταφορά της ακρίβειας, πρότυπα μεταφοράς για το χαρακτηρισμό και την αλληλοσύγκριση των μηχανών, παρουσιάζουν στην καλύτερη περίπτωση βραχυχρόνιες μεταβολές της τάξης μερικών δεκάδων ppm (50-100 ppm). Είναι πλέον αποδεκτό πως μια από τις σημαντικότερες πηγές της μεταβλητότητας αυτής είναι η παραμόρφωση που υφίσταται το αισθητήριο της δύναμης κατά τη φόρτισή του, η ακριβέστερα, οι διαφορετικές παραμορφώσεις που παρουσιάζει το αισθητήριο λόγω μεταβολών στη γεωμετρία της θέσης εγκατάστασής του στην ίδια ή σε διαφορετικές μηχανές [1], [2].

Μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις ή αιτίες που προκαλούν μεταβολή στη γεωμετρία εγκατάστασης και κατά συνέπεια στη δυναμική κατάσταση ισορροπίας του αισθητηρίου σε συνθήκες φόρτισης, είναι οι κάτωθι:

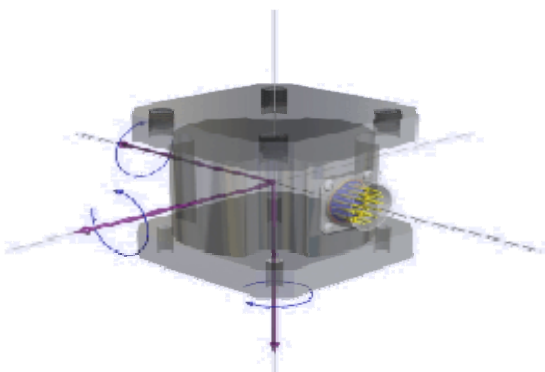
- A) Διαφορετική ακαμψία, επιπεδότητα, τραχύτητα και σκληρότητα της κάτω βάσης τοποθέτησης του αισθητηρίου, μεταξύ διαφορετικών μηχανών.
- B) Ασυμμετρία του πεδίου δυνάμεων σε στροφές στην αυτή μηχανή, λόγω έλλειψης απόλυτης ευθυγράμμισης γεωμετρικών αξόνων συμμετρίας, του πλαισίου τοποθέτησης των μαζών, του αισθητηρίου, του κέντρου μάζας κάθε επι πλέον μάζας που προστίθεται στο πλαίσιο καθώς και της κάτω βάσης τοποθέτησης του αισθητηρίου.
- Γ) Χρήση διαφόρων βοηθημάτων προσαρμογής για την εισαγωγή της κατακόρυφης δύναμης ή αλλοίωσή τους με το χρόνο.
- Δ) Δυναμικές συνιστώσες, όπως ταλαντώσεις της στίβας των μαζών.
- Ε) Άλλες παρασιτικές δυνάμεις ή και ροπές που αναπτύσσονται κυρίως σε μηχανές με διαφορετική λειτουργία από αυτήν των μηχανών νεκρού φορτίου.

Απαραίτητη ωστόσο προϋπόθεση για να αποτυπωθούν οι παραπάνω παράγοντες στα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι, αφενός μεν η ασυμμετρία του ίδιου του αισθητηρίου σε στροφές, αφετέρου δε η ύπαρξη σύζευξης, μέσω των ελαστικών ιδιοτήτων του σώματος του αισθητηρίου, μεταξύ της ευαισθησίας του αισθητηρίου στην κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης και της ευαισθησίας σε οποιαδήποτε άλλη συνιστώσα του διανύσματος δύναμης-ροπής που δρά επί του αισθητηρίου. Η προϋπόθεση αυτή ισχύει πάντοτε λόγω κατασκευαστικών ατελειών του αισθητηρίου.

Η αλληλεπίδραση μηχανής – αισθητηρίου όπως περιγράφηκε παραπάνω, είναι ο λόγος για τον οποίο καθίσταται αναγκαίο, κάθε μεθοδολογία χρήσης των μετατροπέων δύναμης να περιλαμβάνει μια πλήρη περιστροφή (360°) του αισθητηρίου στη θέση εγκατάστασής του σε τρία ή περισσότερα βήματα, ούτως ώστε κατά τον υπολογισμό των μέσων τιμών των ενδείξεων στις διάφορες γωνίες τοποθέτησης, να πραγματοποιείται η μέγιστη δυνατή αντιστάθμιση του φαινομένου στροφής (rotation effect).

Η χρήση των σχετικά νέων μετατροπέων πολλαπλών συνιστωσών σε συνδυασμό με εξελιγμένους πολυκάναλους ενισχυτές σύγχρονης ανάγνωσης [3],[4], δίνει τη δυνατότητα στα εργαστήρια, του χαρακτηρισμού των μηχανών υλοποίησης, σε σχέση με το μέγεθος των παρασιτικών δυνάμεων που δύναται να ασκούν επί των διαφόρων αισθητηρίων [5], με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά συγκριτικά με παλαιότερες μεθοδολογίες ελέγχου [6].

2. Τεχνικά χαρακτηριστικά εξοπλισμού



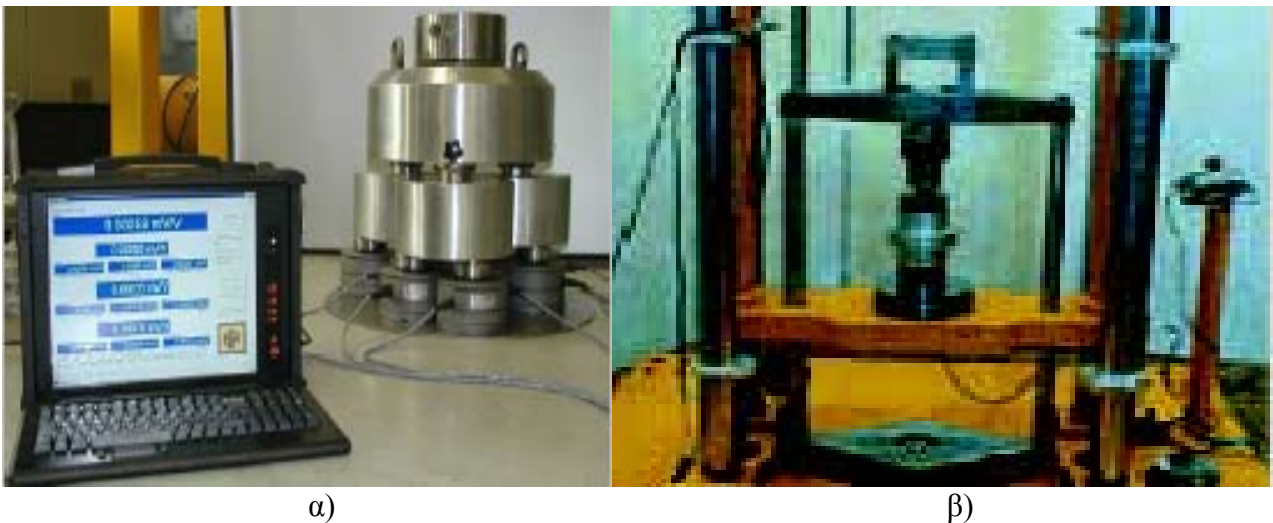
Σχήμα 1. Μετατροπείς πολλαπλών συνιστωσών. Διαθέτουν περισσότερα του ενός κυκλώματα (γέφυρες wheatstone) για τη μέτρηση έως και των 6 συνιστωσών του διανύσματος δύναμης-ροπής (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z).

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν ο ακόλουθος:

A) Μετατροπέας τριών συνιστωσών (F_z , M_x , M_y) τύπου KTN-D της εταιρείας GTM, δυναμικότητας 100 kN (r.o. 2 mV/V) με κυκλώματα για καμπτικές ροπές ονομαστικής τιμής $M_x=M_y=800$ Nm (r.o. 0,5 mV/V), με τα παρελκόμενα εξαρτήματα προσαρμογής που το συνοδεύουν.

B) Ενισχυτής 9 συγχρόνων καναλιών με software για την συλλογή, επεξεργασία, απεικόνιση και αποθήκευση των δεδομένων τύπου VN-digitizer-MCA της εταιρείας GTM, με τάση τροφοδοσίας γεφυρών 10 VDC, ανάλυση 200000 ψηφίων και δυνατότητα ανεξάρτητης παραμετροποίησης του κάθε καναλιού (Σχήμα 2.α)

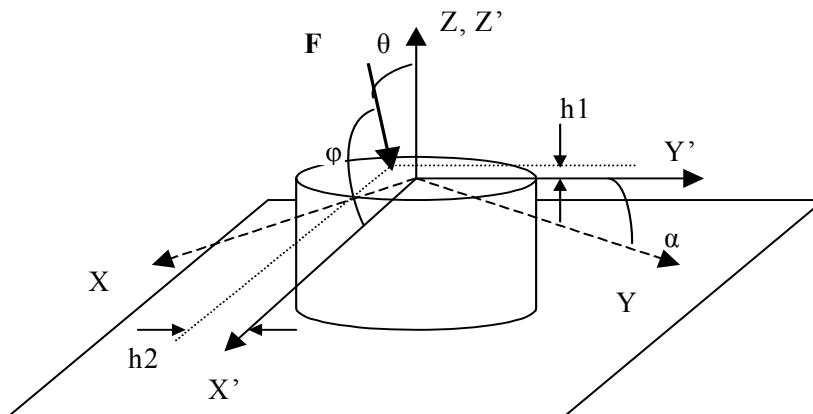
Γ) Πρότυπη Μηχανή νεκρού φορτίου δυναμικότητας 110 kN, πλήρως αυτοματοποιημένου χειρισμού. Η σχετική διευρυμένη αβεβαιότητα των παραγόμενων δυνάμεων είναι μικρότερη από 20 ppm (Σχήμα 2.β).



Σχήμα 2. α) Πολυκάναλος ενισχυτής σύγχρονης ανάγνωσης VN-digitizer-MCA. β) Χώρος τοποθέτησης αισθητηρίων δύναμης σε πρότυπη μηχανή δύναμης νεκρού φορτίου.

3. Θεωρητικό μοντέλο

Στο Σχήμα 3. φαίνονται όλες οι γεωμετρικές παράμετροι κατά την εγκατάσταση ενός αισθητηρίου στη θέση μέτρησης [7]. Το σύστημα αξόνων (X , Y , Z) που είναι συνδεδεμένο με το αισθητήριο, είναι περιστραμμένο κατά γωνία α ως προς το σύστημα αξόνων (X' , Y' , Z') της μηχανής.



Σχήμα 3. Διάγραμμα γεωμετρίας εγκατάστασης του αισθητηρίου στη μηχανή.

Έστω \mathbf{F} το διάνυσμα των συνιστωσών των εξωτερικών δυνάμεων-ροπών, $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$ που δρουν επι του αισθητηρίου, στο σύστημα αναφοράς της μηχανής και $\mathbf{P} = [f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z]^T$ το αντίστοιχο μετασχηματισμένο διάνυσμα στο σύστημα αναφοράς του αισθητηρίου. Τότε ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}\mathbf{F} \quad (1)$$

όπου \mathbf{R} ο πίνακας στροφής:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin a & \cos a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos a & -\sin a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Αν με $\mathbf{U} = [U_{fx}, U_{fy}, U_{fz}, U_{mx}, U_{my}, U_{mz}]^T$ συμβολίσουμε την απόκριση (πλάτος σήματος) του αισθητηρίου στην εφαρμοζόμενη δύναμη \mathbf{P} , τότε ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{U} = \mathbf{S}\mathbf{P} \quad (2)$$

με το \mathbf{S} να αναπαριστά τον πίνακα ευαισθησίας του αισθητηρίου στις συνιστώσες του διανύσματος \mathbf{P} . Ο πίνακας \mathbf{S} είναι διαγώνιος 6x6 πίνακας μόνο στην περίπτωση που το αισθητήριο επιτυγχάνει απόλυτη αποσύζευξη των συνιστωσών του \mathbf{P} . Στην αντίθετη περίπτωση όλες οι συνιστώσες του είναι μη μηδενικές.

Αν με f συμβολίσουμε το μέτρο της δύναμης \mathbf{F} , με θ και ϕ τις γωνίες μεταξύ εφαρμοζόμενης δύναμης \mathbf{F} και του άξονα Z και άξονα X' αντίστοιχα, και με h_1, h_2 τις εκκεντρότητες της εφαρμοζόμενης δύναμης ως προς τους άξονες X' και Y' αντίστοιχα, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{U} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{F} = f \cdot \mathbf{S} \cdot \begin{bmatrix} \cos a \cos \phi \sin \theta - \sin a \sin \phi \sin \theta \\ \sin a \cos \phi \sin \theta + \cos a \sin \phi \sin \theta \\ -\cos \theta \\ (h_2 \cos a - h_1 \sin a) \cos \theta \\ (h_2 \sin a + h_1 \cos a) \cos \theta \\ -h_2 \cos \phi \sin \theta + h_1 \sin \phi \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Τέλος αν θέσουμε:

$$\beta = \arctg \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

η (3) γίνεται:

$$U = f \cdot S \cdot \begin{bmatrix} \cos(a + \varphi) \sin \theta \\ \sin(a + \varphi) \sin \theta \\ -\cos \theta \\ \cos(a + \beta) \cos \theta \\ \sin(a + \beta) \cos \theta \\ -\cos(\varphi + \beta) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

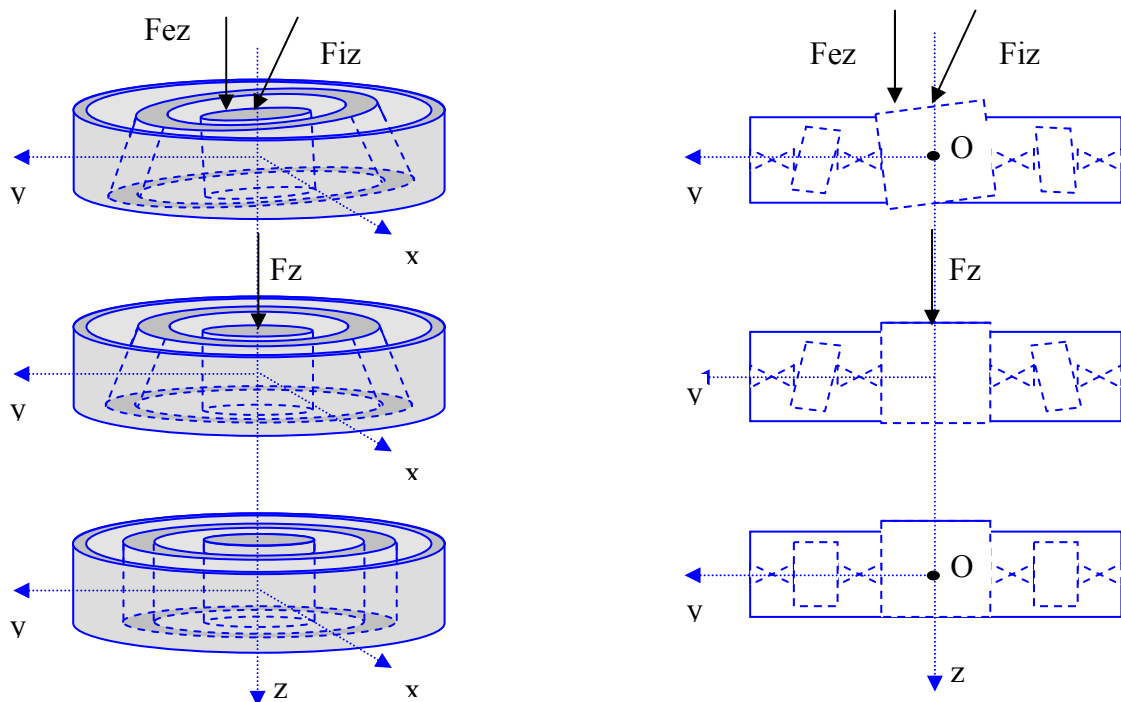
Η σχέση (5) υποδηλώνει πως με την προϋπόθεση ότι η εξωτερική δύναμη \mathbf{F} παραμένει σταθερή κατά την περιστροφή του αισθητηρίου στη θέση εγκατάστασής του, οι συνιστώσες των ενδείξεων U_i της μετρητικής διάταξης αποτελούν ημιτονοειδή (συνημιτονοειδή) συνάρτηση της γωνίας περιστροφής α .

Στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε μηχανές αναφοράς, η γωνία θ είναι κατά τεκμήριο πολύ μικρή ($< 0,05^\circ$), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε απλοποίηση της σχέσης (5):

$$U = f \cdot S \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ \cos(a + \beta) \\ \sin(a + \beta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Είναι φανερό από τη σχέση (6) πως μετατροπείς με ευαισθησία σε τρεις συνιστώσες (F_z , M_x , M_y) είναι κατάλληλοι για να περιγράψουν τη συμπεριφορά του αισθητηρίου μέσα στο πεδίο δυνάμεων και ροπών που ασκεί η μηχανή.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο πίνακας ευαισθησίας S του αισθητηρίου, περιέχει και μη μηδενικά διαγώνια στοιχεία που αφορούν σε αλληλοσυσχετίσεις των σημάτων U_i μεταξύ τους. Με άλλα λόγια μια πλευρική δύναμη F_x ή μια καμπτική ροπή M_x , μπορούν να επηρεάσουν το σήμα U_{fz} . Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σχέση (6) θεωρείται βάσιμη η υπόθεση πως η μέγιστη επίδραση στο σήμα U_{fz} αναμένεται να προέρχεται από τις συνιστώσες της ροπής M_x και M_y . Αν με \mathbf{Mb} συμβολίσουμε τη συνισταμένη των M_x , M_y , καμπτική ροπή τότε, αναμένεται η απόκλιση u_{fz} του σήματος U_{fz} να είναι συνάρτηση του μέτρου της \mathbf{Mb} καθώς και της γωνίας γ μεταξύ του διανύσματος \mathbf{Mb} και ενός χαρακτηριστικού άξονα στο επίπεδο X, Y , του αισθητηρίου [8]. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4., το σώμα του αισθητηρίου παραμορφώνεται ακόμα και στην περίπτωση μιας κεντρικής και κατακόρυφης δύναμης F_z . Μια τέτοια περίπτωση φόρτισης θεωρείται ιδανική και κατά συνέπεια θα πρέπει τα σήματα U_{mx} και U_{my} που αντιστοιχούν σ' αυτές τις συνθήκες να ληφθούν ως σήματα αναφοράς. Κάθε μεταβολή αυτών των σημάτων θα οφείλεται σε παρασιτικές δυνάμεις και ροπές εξαιτίας έκκεντρης ή επικλινούς φόρτισης (δυνάμεις F_{ez} , F_{iz}). Κατά συνέπεια ως χαρακτηριστικός άξονας του μετατροπέα μπορεί να ληφθεί ο άξονας της ροπής αναφοράς \mathbf{Mb}_{ref} όπως προσδιορίζεται από τα σήματα U_{mx} και U_{my} στην περίπτωση κεντρικής και κατακόρυφης φόρτισης.



Σχήμα 4. Ο μετατροπέας σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας υπό την επίδραση κατακόρυφης και κεντρικής δύναμης F_z , και έκκεντρης F_{ez} ή επικλινούς F_{iz} δύναμης, σε σχέση με την κατάστασή του απουσία φορτίου.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στη σχέση:

$$ufz (Mb, \gamma) = A_0 + A_1 \cdot Mb \cdot \cos(\gamma + A_2) \quad (7)$$

όπου A_0 , A_1 , σταθερές που προσδιορίζονται πειραματικά, Mb η παραμένουσα καμπτική ροπή αφού αφαιρεθεί απ' το σήμα η ροπή αναφοράς Mb_{ref} , και A_2 η γωνία του χαρακτηριστικού άξονα στο σύστημα αναφοράς του αισθητηρίου.

4. Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πειράματα σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν με ιδιαίτερη προσοχή, προκειμένου η μεταβλητότητα των πειραματικών δεδομένων να είναι απαλλαγμένη στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό από μεταβλητότητες που οφείλονται σε άλλους παράγοντες πέραν της σκοπούμενης, δηλ αυτής που οφείλεται στη διαφορετική γεωμετρία που προκύπτει από τις διάφορες θέσεις εγκατάστασης του αισθητηρίου στη μηχανή. Ανάμεσα στις σημαντικότερες παραμέτρους που ήταν υπό συνεχή έλεγχο και ρύθμιση ήταν:

α) Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου $22,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$,

β) Ο εγκλιματισμός και η προθέρμανση του αισθητηρίου καθώς και συγκεκριμένος αριθμός προφορτίσεων του (3) για τη δημιουργία θερμοδυναμικής κατάστασης αναφοράς,

γ) Η κεντρική τοποθέτηση του αισθητηρίου για τις διάφορες θέσεις περιστροφής, με κεντράρισμα ως προς την επάνω πλάκα (πλαίσιο-1^η μάζα της μηχανής νεκρού φορτίου) και με ανοχή $\pm 0,05 \text{ mm}$,

δ) Η τήρηση συγκεκριμένων, σταθερών και κατά το δυνατό μεγάλων χρόνων αναμονής κατά τη δειγματοληψία, για την επίτευξη σταθερής ένδειξης και την ελαχιστοποίηση του παράγοντα ερπυσμού (creep effect).

Ο μετατροπέας πολλαπλών συνιστωσών τοποθετήθηκε αρχικά με το σύστημα αξόνων του σε ταύτιση με το σύστημα αξόνων της μηχανής. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων με αυξητική φορά, που περιλάμβαναν 10 ισαπέχοντα βήματα από το 10% έως το 100% της δυναμικότητας του αισθητηρίου. Καταγράφηκαν τα σύγχρονα σήματα Ufz, Umx, Umy. Στη συνέχεια επαναλήφθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία για τρεις επιπλέον διαφορετικές θέσεις του αισθητηρίου που προέκυψαν από περιστροφή του κατά 90° κάθε φορά. Για κάθε μια από τις τέσσερις συνολικά θέσεις και πριν τη δειγματοληψία σημάτων πραγματοποιήθηκε προφόρτιση του αισθητηρίου στη μέγιστη δυναμικότητά του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1.

Δεδομένα εισόδου από τα τρία σύγχρονα κανάλια για τις διάφορες γωνίες στροφής.

0°			90°			180°			270°		
Ufz	Umy	Umx	Ufz	Umy	Umx	Ufz	Umy	Umx	Ufz	Umy	Umx
mV/V											
0,19998	-0,00829	-0,00562	0,19998	-0,01063	-0,00034	0,19998	-0,00597	0,00198	0,19997	-0,00345	-0,00489
0,40007	-0,01503	-0,01127	0,40009	-0,01915	-0,00041	0,40006	-0,00900	0,00425	0,40005	-0,00373	-0,00938
0,60018	-0,02125	-0,01627	0,60020	-0,02711	0,00011	0,60016	-0,01134	0,00733	0,60014	-0,00321	-0,01341
0,80032	-0,02707	-0,01974	0,80034	-0,03332	0,00131	0,80031	-0,01324	0,00951	0,80028	-0,00422	-0,01649
1,00039	-0,03285	-0,02156	1,00042	-0,03863	0,00274	1,00036	-0,01505	0,01067	1,00033	-0,00627	-0,02004
1,20058	-0,03823	-0,02294	1,20060	-0,04291	0,00349	1,20054	-0,01778	0,01141	1,20052	-0,00830	-0,02215
1,40074	-0,04354	-0,02464	1,40077	-0,04801	0,00399	1,40069	-0,02060	0,01255	1,40068	-0,01028	-0,02471
1,60087	-0,04873	-0,02687	1,60090	-0,05325	0,00439	1,60079	-0,02288	0,01409	1,60079	-0,01154	-0,02800
1,80107	-0,05367	-0,02869	1,80111	-0,05822	0,00530	1,80100	-0,02606	0,01579	1,80099	-0,01320	-0,02994
2,00126	-0,05862	-0,02949	2,00131	-0,06169	0,00603	2,00118	-0,02907	0,01605	2,00119	-0,01621	-0,03211

Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι μέσες τιμές των σημάτων όπως φαίνονται στον Πίνακα 2. καθώς και της γωνίας A2 του χαρακτηριστικού άξονα στο σύστημα αναφοράς του αισθητηρίου.

Πίνακας 2.

Μέσες τιμές σημάτων

Ufz	Umy	Umx	Mb _{ref}	A2
	mV/V			
0,19998	-0,00665	-0,00223	0,00702	251°
0,40007	-0,01109	-0,00357	0,01165	252°
0,60017	-0,01492	-0,00455	0,01560	253°
0,80031	-0,01878	-0,00535	0,01953	254°
1,00038	-0,02261	-0,00613	0,02342	255°
1,20056	-0,02618	-0,00683	0,02705	255°
1,40072	-0,02990	-0,00743	0,03081	256°
1,60084	-0,03369	-0,00808	0,03464	257°
1,80104	-0,03746	-0,00884	0,03849	257°
2,00123	-0,04118	-0,00959	0,04228	257°

Η γωνία A2 προκύπτει όπως αναμενόταν σταθερή και χαρακτηριστική του αισθητηρίου. Οι παραπάνω μέσες τιμές αναφοράς αφαιρέθηκαν από τις αντίστοιχες τιμές των αρχικών δεδομένων εισόδου, για τον προσδιορισμό των υπολοιπόμενων παρασιτικών σημάτων. Ο Πίνακας 3. περιέχει τα αποτελέσματα της παραπάνω επεξεργασίας και αποδίδει τη συσχέτιση

των παρασιτικών ροπών (Mb, γ) ως προς τις παρατηρηθείσες αποκλίσεις ufz για τις διάφορες γωνίες στροφής.

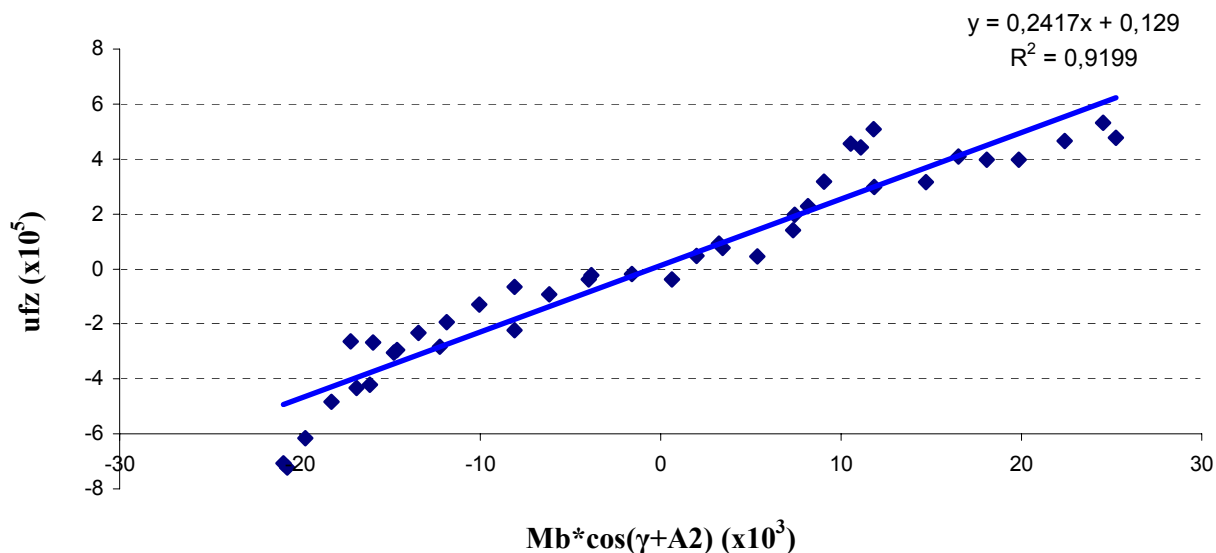
Πίνακας 3.

Συσχέτιση αποκλίσεων ufz με το μέτρο τη γωνία της παρασιτικής καμπτικής ροπής Mb

0°			90°			180°			270°		
ufz	Mb	γ	ufz	Mb	γ	ufz	Mb	γ	ufz	Mb	γ
0,00000	0,00376	206°	0,00000	0,00441	295°	0,00000	0,00427	9°	0,00001	0,00416	130°
0,00000	0,00865	207°	-0,00002	0,00866	291°	0,00000	0,00809	15°	0,00002	0,00938	128°
-0,00001	0,01332	208°	-0,00003	0,01305	291°	0,00001	0,01241	17°	0,00003	0,01469	127°
-0,00001	0,01661	210°	-0,00003	0,01599	295°	0,00000	0,01586	20°	0,00003	0,01833	127°
-0,00001	0,01852	214°	-0,00004	0,01831	299°	0,00001	0,01841	24°	0,00004	0,02146	130°
-0,00002	0,02012	217°	-0,00004	0,01965	302°	0,00002	0,02008	25°	0,00004	0,02355	131°
-0,00002	0,02196	218°	-0,00005	0,02140	302°	0,00003	0,02203	25°	0,00004	0,02615	131°
-0,00003	0,02407	219°	-0,00006	0,02319	303°	0,00005	0,02466	26°	0,00005	0,02979	132°
-0,00003	0,02563	219°	-0,00007	0,02511	304°	0,00004	0,02713	25°	0,00005	0,03216	131°
-0,00003	0,02646	221°	-0,00007	0,02578	307°	0,00005	0,02835	25°	0,00005	0,03362	132°

Με έναν απλό μετασχηματισμό των γωνιών γ των παρασιτικών καμπτικών ροπών από το σύστημα αναφοράς του αισθητηρίου στο σύστημα αναφοράς της μηχανής προέκυψε μια σταθερή διεύθυνση στο χώρο, γεγονός που υποδήλωνε κάποιο χαρακτηριστικό της μηχανής. Μετά από πρόσθετες βοηθητικές μετρήσεις με κλινόμετρο ακριβείας αποκαλύφθηκε μια μικρή αλλά σημαντική απόκλιση ευθυγράμμισης του άξονα συμμετρίας της κάτω βάσης στήριξης της μηχανής ως προς τον άξονα συμμετρίας του συστήματος πλαισίου-μαζών κατά τη διεύθυνση που υποδείκνυαν οι μετρήσεις των παρασιτικών καμπτικών ροπών.

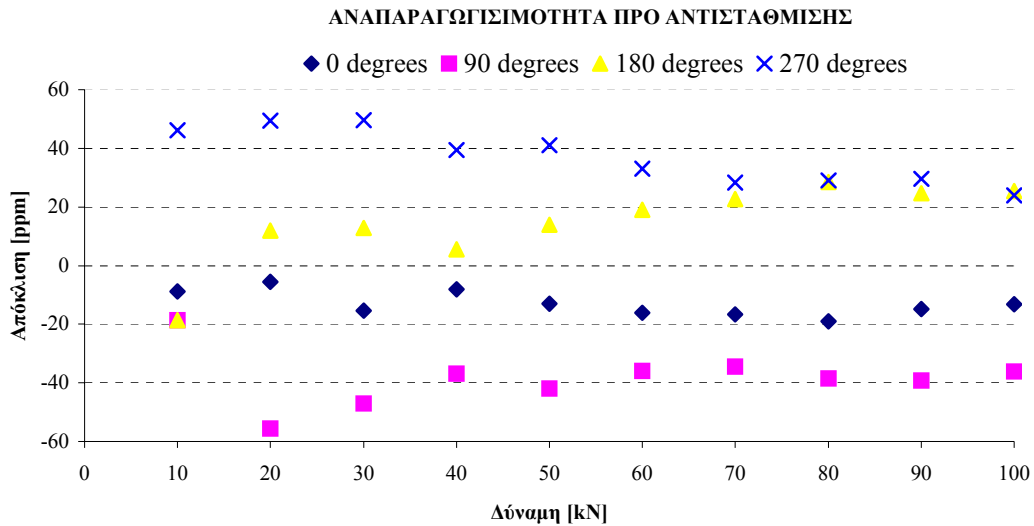
Γραμμική παρεμβολή



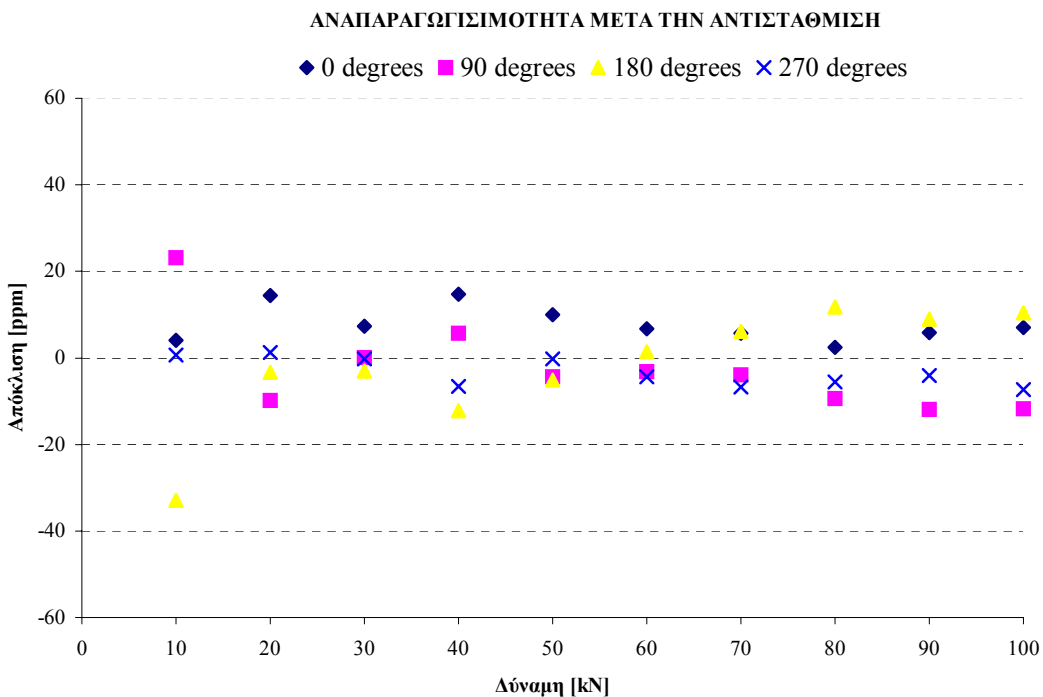
Σχήμα 5. Γραμμική παρεμβολή για τον προσδιορισμό των σταθερών A0, A1

Στο Σχήμα 5. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γραμμικής παρεμβολής με χρήση της σχέσης (7). Αντίστροφα, μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην εν λόγω σχέση, είναι δυνατή η διόρθωση του σήματος Ufz του μετατροπέα πολλαπλών συνιστωσών για μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης. Συγκρίνοντας το Σχήμα 6., το οποίο απεικονίζει την αναπαραγωγισιμότητα του αισθητηρίου, προ της εφαρμογής της σχέσης

αντιστάθμισης, με το Σχήμα 7., το οποίο περιέχει τα δεδομένα αναπαραγωγισιμότητας μετά τη χρήση της σχέσης αντιστάθμισης, γίνεται φανερό πως η επίδοση του αισθητηρίου βελτιώθηκε κατά έναν παράγοντα 5, κατά μέσο όρο.



Σχήμα 6. Αποκλίσεις της κατακόρυφης δύναμης Fz για διάφορες θέσεις περιστροφής ως προς τη μέση τιμή, προ της εφαρμογής της μεθοδολογίας αντιστάθμισης των παρασιτικών δυνάμεων.



Σχήμα 7. Αποκλίσεις της κατακόρυφης δύναμης Fz για διάφορες θέσεις περιστροφής ως προς τη μέση τιμή, μετά την εφαρμογή της μεθοδολογίας αντιστάθμισης των παρασιτικών δυνάμεων.

5. Συμπεράσματα

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία και αφορά στη χρήση μετατροπέων δύναμης πολλαπλών συνιστωσών σε συνδυασμό με πολυκάναλους ενισχυτές σύγχρονης ανάγνωσης, δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης και διαχωρισμού των παρασιτικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την αλληλεπίδραση αισθητηρίου δύναμης και μηχανής, σε συνιστώσες που οφείλονται στο αισθητήριο και σε συνιστώσες που οφείλονται στη μηχανή. Ο διαχωρισμός αυτός είναι σημαντικός καθόσον επιτρέπει, αφενός τη διενέργεια ελέγχων για τον χαρακτηρισμό και ρύθμιση της μηχανής υλοποίησης δύναμης και αφετέρου τη βελτιστοποίηση της αναπαραγωγισιμότητας των αισθητηρίων δύναμης πολλαπλών συνιστωσών τόσο σε στροφές όσο και σε εν γένει μεταβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης. Με προσεκτικό σχεδιασμό των πειραμάτων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που υπεισέρχονται στη σχέση αντιστάθμισης – διόρθωσης της κατακόρυφης δύναμης F_z (σχέση 7), είναι δυνατή η βελτίωση της αναπαραγωγισιμότητας κατά μια τάξη μεγέθους, γεγονός που καθιστά τέτοιου είδους διατάξεις τις πλέον κατάλληλες για πρότυπα μεταφοράς δύναμης, σε διεργαστηριακές μετρήσεις ή σε μετρήσεις μεταφοράς ακρίβειας από Πρότυπες Μηχανές Νεκρού Φορτίου σε Μηχανές Αναφοράς.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Peters, “Problems of high precision force measurements”, Proc., 8th IMEKO-Conf, 1980, S. 12-14.
- [2] M. Peters, “Reasons for and consequences of the rotation and overlapping effect”, Proc., Roundtable-Conf, Kobe (Japan) 1984, S. 1-6.
- [3] J. Andrae, A. Sawla, “Time synchronized measurement of multi-bridge force transducers”, Measurement Vol 29, Issue 2, March 2001, pp 105-111.
- [4] C. Hons, J. Andrae, A. Sawla, “New methods for online compensation of parasitic effects in force measurement”, Proc., XVI IMEKO World Congress, 2000, Vol III, TC-3, pp 91-96.
- [5] C. Ferrero, “The measurement of parasitic components in national force standard machines”, Measurement 8 (1990), pp 66-76.
- [6] R. Mitchell, P. Pontius, “Force sensor-machine interaction”, National Bureau of Standards ISA 1981, ISBN: 0-87664-515-5.
- [7] C. Xu, “A practical model for uncertainty evaluation in force measurements”, Meas. Sci. Technol. 9 (1998), pp 1831-1836.
- [8] C. Ferrero, C. Marinari, R. Jenkins, A. Knott, G. Robinson, “Multi-component characterization of the NPL 1,2 MN deadweight force standard machine”, Proc., XIV IMEKO World Congress, Tampere 1997, Vol III, pp 176-181.