Η ΠΥΡΑΜΙΔΑ ΙΧΝΗΛΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ Η ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Χρήστος Μπαντής, Ιωάννης Κουρούπας
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας
Βιομηχανική Περιοχή Θεσσαλονίκης, Οικ. Τετρ. 45
57022 Σίνδος, Θεσσαλονίκη
e-mail: bandis@eim.gr

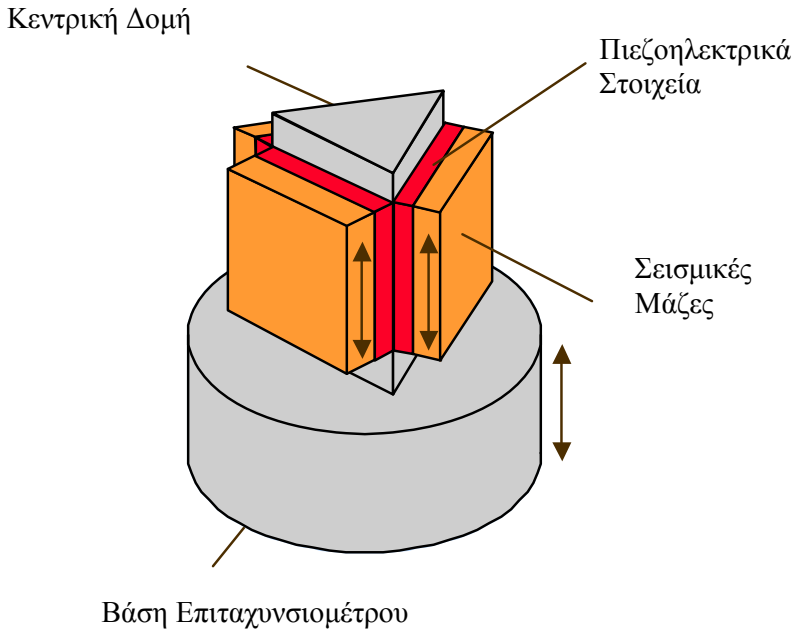
Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για ακριβείς μετρήσεις των δονήσεων σε διάφορα συστήματα και κατασκευές γίνεται όλο και πιο επιτακτική αλλά και πολύπλοκη. Φυσική συνέπεια της ζήτησης αυτής είναι η απαίτηση για διακριβώσεις μεγάλης ακρίβειας των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις των δονήσεων. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται λεπτομερώς οι μέθοδοι διακρίβωσης της ευαισθησίας πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων επιτάχυνσης και η διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας τους στα εθνικά πρότυπα του μήκους, τάσης και του χρόνου. Στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ) οι πρότυποι αισθητήρες διακριβώνονται με την χρήση πειραματικών διατάξεων συμβολομετρίας ενώ για διακριβώσεις μικρότερης ακρίβειας οι συγκριτικές μέθοδοι προτιμούνται. Τέλος παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την αβεβαιότητα των διακριβώσεων. Η συνολική σχετική διευρυμένη αβεβαιότητα των διακριβώσεων με συμβολομετρία είναι της τάξης του 0,5% (k=2) μπορεί να επιτευχθεί στα εργαστήρια του ΕΙΜ ύστερα από προσεκτική ρύθμιση της διάταξης συμβολομετρίας.

Λέξεις-Κλειδιά: Αισθητήρες επιτάχυνσης, αβεβαιότητα, συμβολομετρία, δονήσεις.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση των δονήσεων πραγματοποιείται με διάφορους αισθητήρες μέτρησης επιτάχυνσης. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται ευρέως για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας αλλά και σε συστήματα διακρίβωσης.

Το Σχήμα 1 απεικονίζει ένα απλοποιημένο Delta Shear επιταχυνσιόμετρο, στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε τα μηχανικά του μέρη[1]. Τα ενεργά τμήματα του επιταχυνσιόμετρου είναι τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που το αποτελούν. Αυτά δρουν σαν ελατήρια τα οποία συνδέουν την βάση του επιταχυνσιόμετρου, με τις σεισμικές μάζες (seismic masses) διαμέσου του τριγωνικού κέντρου. Όταν το επιταχυνσιόμετρο δονείται μια δύναμη, η οποία οφείλεται στις τις σεισμικές μάζες και στη μάζα του ιδίου του επιταχυνσιόμετρου, δρα σε κάθε πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Τα πιεζοηλεκτρικά αυτά στοιχεία παράγουν τελικά ένα φορτίο, το οποίο είναι ανάλογο της ασκούμενης δύναμης. Οι σεισμικές μάζες είναι σταθερές και κατά συνέπεια τα στοιχεία παράγουν φορτίο το οποίο είναι ανάλογο με την επιτάχυνση των σεισμικών μαζών. Καθώς η σεισμική μάζα επιταχύνεται με το ίδιο πλάτος και φάση όπως η βάση του επιταχυνσιόμετρου, η έξοδος του επιταχυνσιόμετρου είναι ανάλογη με την επιτάχυνση της βάσης και κατά συνέπεια με την επιτάχυνση της επιφάνειας πάνω στην οποία έχει προσαρμοστεί το επιταχυνσιόμετρο.



Σχήμα 1. Διάγραμμα πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα επιτάχυνσης.

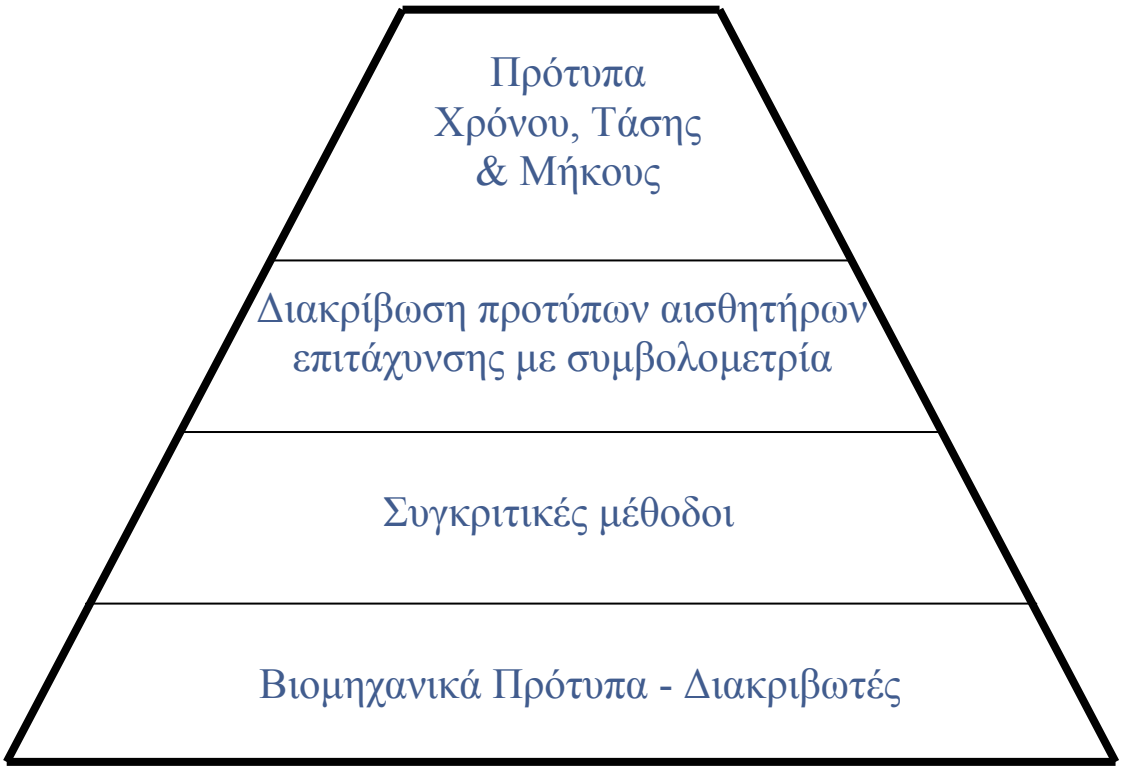
Η διακρίβωση της ευαισθησίας τέτοιων αισθητήρων πραγματοποιείται με:

Απόλυτες μεθόδους, στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας οι μέθοδοι αυτοί στηρίζονται στην συμβολομετρία φωτός από λέιζερ. Η σχετική αβεβαιότητα αυτών των μεθόδων μπορεί να φτάσει το 0,5%.

Συγκριτικές μεθόδους, σύγκριση μεταξύ δύο πρότυπων επιταχυνσιόμετρων τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο (back to back method). Η σχετική αβεβαιότητα αυτών των μεθόδων μπορεί να φτάσει το 1,5%.

Με διακριβωτές, περιλαμβάνει την χρήση διακριβωμένων δονητών. Η σχετική αβεβαιότητα αυτών των μεθόδων μπορεί να φτάσει το 3%.

Η πυραμίδα ιχνηλασιμότητας όπως υλοποιείται στο εργαστήριο του ΕΙΜ δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Πυραμίδα ιχνηλασιμότητας

2. ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΜΕ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΛΕΙΖΕΡ

Το βασικό σύστημα (τύπος 9636) βαθμονόμησης των αισθητηρίων δόνησης ακολουθεί τις αρχές οι οποίες δίνονται στο ISO-16063-11[2].

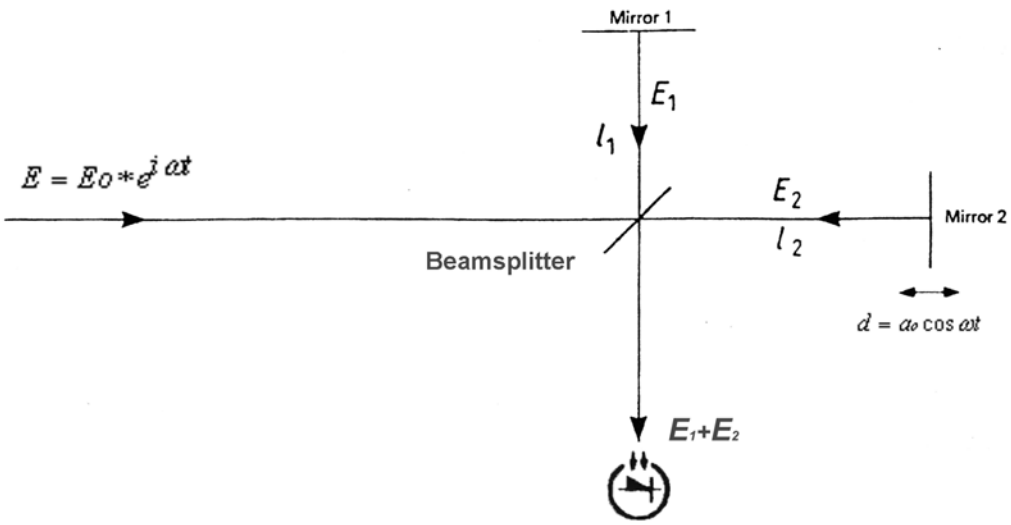
Το πλάτος της μετατόπισης υπολογίζεται από τη συμβολή ενός laser Helium-neon με μήκος κύματος 632.8nm.

Εάν το επιταχυνσιόμετρο το οποίο πρόκειται να βαθμονομηθεί προσαρμοστεί πάνω σε μια διάταξη η οποία δονείται σε μια γνωστή συχνότητα, τότε η μέτρηση του πλάτους της απομάκρυνσης της διάταξης θα επιτρέψει τον υπολογισμό της επιτάχυνσης. Η ευαισθησία του αισθητήρα προκύπτει από τον λόγο της μετρούμενης

ηλεκτρικής εξόδου του επιταχυνσιόμετρου διαιρούμενη με την επιτάχυνση. Η περίοδος μετράται σε δευτερόλεπτα και η απομάκρυνση σε μέτρα.

Στη συχνότητα των 160Hz μια επιτάχυνση 10m/s^2 rms σημαίνει απομάκρυνση 20μm peak to peak.Ο καλύτερος τρόπος τώρα για να μετρηθεί αυτό το σχετικά μικρό πλάτος με ακρίβεια καλύτερη του 1% είναι ένα οπτικό συμβολόμετρο το οποίο χρησιμοποιεί ένα Helium-neon laser με μήκος κύματος 632.8nm.

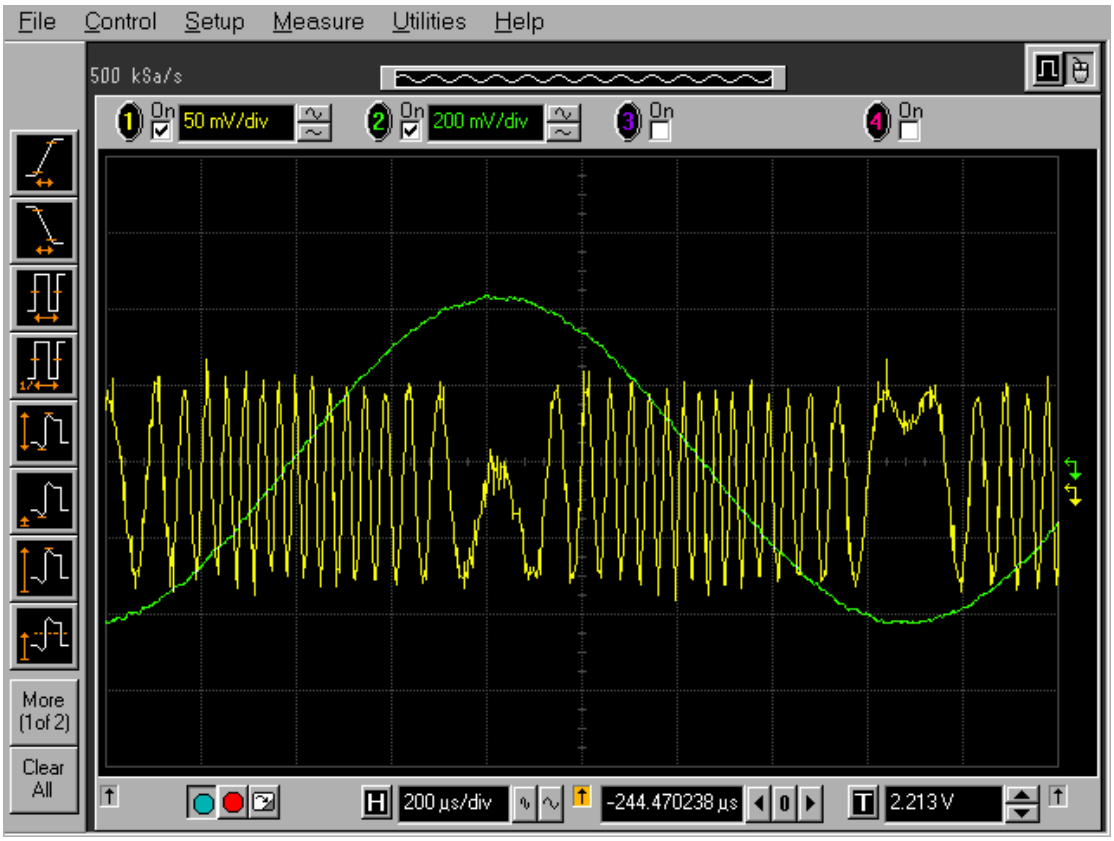
Η διάταξη παίρνει την μορφή ενός συμβολόμετρου Michelson (Σχήμα 3), με ένα διαχωριστή δέσμης και 2 καθρέφτες εκ των οποίων ο ένας είναι σταθερός και ο άλλος είναι τοποθετημένος πάνω στην επιφάνεια του επιταχυνσιόμετρου που πρόκειται να βαθμονομηθεί. Μια φωτοδίοδος με γρήγορη απόκριση τοποθετείται στο σημείο όπου συμβάλουν οι 2 δέσμες και ανιχνεύει 'μετρά' την διαδοχή των μεγίστων και ελαχίστων της έντασης του φωτός μια και η κίνηση του επιταχυνσιόμετρου αλλάζει το μήκος της μίας διαδρομής που ακολουθεί η μια δέσμη. Το σήμα εξόδου από την φωτοδίοδο ενισχύεται και συγκρίνεται η συχνότητα του με την συχνότητα του σήματος που διεγείρει την διάταξη χρησιμοποιώντας ένα μετρητή λόγου των 2 συχνοτήτων.



Σχήμα 3. Συμβολόμετρο Michelson που χρησιμοποιείται για την μέτρηση του πλάτους ταλάντωσης των δονήσεων.

Λόγω του ότι το φως κάνει την διαδρομή του κάθε καθρέφτη 2 φορές, η μετατόπιση του κινούμενου καθρέφτη (δηλαδή αυτού που βρίσκεται στο επιταχυνσιόμετρο) κατά λ/2 κατά την διεύθυνση της κίνησης θα έχει σαν αποτέλεσμα μία πλήρη μεταβολή της έντασης του φωτός που ανιχνεύεται από τη φωτοδίοδο. Συνεπώς εάν η μεγίστη απομάκρυνση του επιταχυνσιόμετρου είναι A_o και ο αριθμός των κροσσών που μετρούνται σε μία διαδρομή είναι $4A_o/\lambda$. Ο αριθμός των κροσσών, που μετρούνται σ' ένα κύκλο δόνησης θα είναι $8A_o/\lambda$.
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέση συχνότητα των κροσσών είναι 28.5kHz. Παρόλα αυτά η στιγμιαία συχνότητα των κροσσών θα μεταβάλλεται από μηδέν στο μέγιστο της μετατόπισης του επιταχυνσιόμετρου (όπου η ταχύτητα θα είναι μηδέν) σ' ένα μέγιστο των 44,7 kHz στη θέση ισορροπίας (όπου η ταχύτητα είναι μέγιστη).

Οι κυματομορφές των οποίων το λόγο $R_f = 8A_o/\lambda$ μετράμε με μετρητή λόγου συχνοτήτων (ratio counter) φαίνονται στο σχήμα 4



Σχήμα 4. Κυματομορφές των οποίων η συχνότητα μετριέται με το μετρητή λόγου συχνοτήτων (ratio counter).

Γνωρίζοντας τον λόγο των συχνοτήτων υπολογίζουμε την επιτάχυνση:

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{x_o \omega^2}{\sqrt{2}} \\ x_o &= R_f \bullet \frac{\lambda}{8} \end{aligned}\right\} \Rightarrow R_f = \frac{8\alpha \times \sqrt{2}}{(2\pi F)^2 \times \lambda} \Rightarrow \alpha = R_f \Big/ \frac{8 \times \sqrt{2}}{(2\pi F)^2 \times \lambda}$$

και από αυτή μετρώντας και την έξοδο του επιταχυνσιόμετρου υπολογίζουμε την ευαισθησία του:

$$S(pC/ms^{-2}) = \frac{\text{Μετρούμενη} - RMS - \text{τάση}[mV]}{\text{Ευαισθησία_προενίσχυσης}\left[\frac{mV}{pC}\right] \times \alpha\left[ms^{-2}\right]}$$

Οι παράμετροι οι οποίοι επηρεάζουν την αβεβαιότητα των διακριβώσεων είναι οι εξής[1, 3]:

η αβεβαιότητα της μέτρησης του πλάτους δόνησης (~0,02%), η αβεβαιότητα της μέτρησης της τάσης στην έξοδο του επιταχυνσιόμετρου (~0,1%), η παραμόρφωση της ημιτονοειδούς δόνησης από τον δονητή (0,1%), η επιρροή των συνιστωσών δόνησης κάθετα στην διεύθυνση μέτρησης (~0,1%), πιθανή κλίση του επιταχυνσιόμετρου σε σχέση με τη κατεύθυνση δόνησης και τον άξονα του συμβολόμετρου (~0,2%).

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό παρουσιάσαμε τις μεθόδους διακρίβωσης της ευαισθησίας πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων επιτάχυνσης και την πυραμίδα ιχνηλασιμότητας τους στα εθνικά πρότυπα του μήκους, τάσης και του χρόνου. Στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ) οι πρότυποι αισθητήρες διακριβώνονται με την χρήση πειραματικών διατάξεων συμβολομετρίας ενώ για διακριβώσεις μικρότερης ακρίβειας οι συγκριτικές μέθοδοι προτιμούνται. Η συνολική σχετική διευρυμένη αβεβαιότητα των διακριβώσεων με συμβολομετρία είναι της τάξης του 0,5% (k=2).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] M. Serridge and T. R. Licht, *Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook* (Bruel & Kjaer, 1987).

[2] p. ISO 16063, *Primary vibration calibration by laser interferometry* (International Organization for Standardization, 1999).

[3] M. Dobosz, T. Usuda, and T. Kurosawa, *Methods of calibration of vibration pick-ups by laser interferometry: II. Experimental verification*, Meas. Sci. Technol. **9**, 240 (1998).