



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)

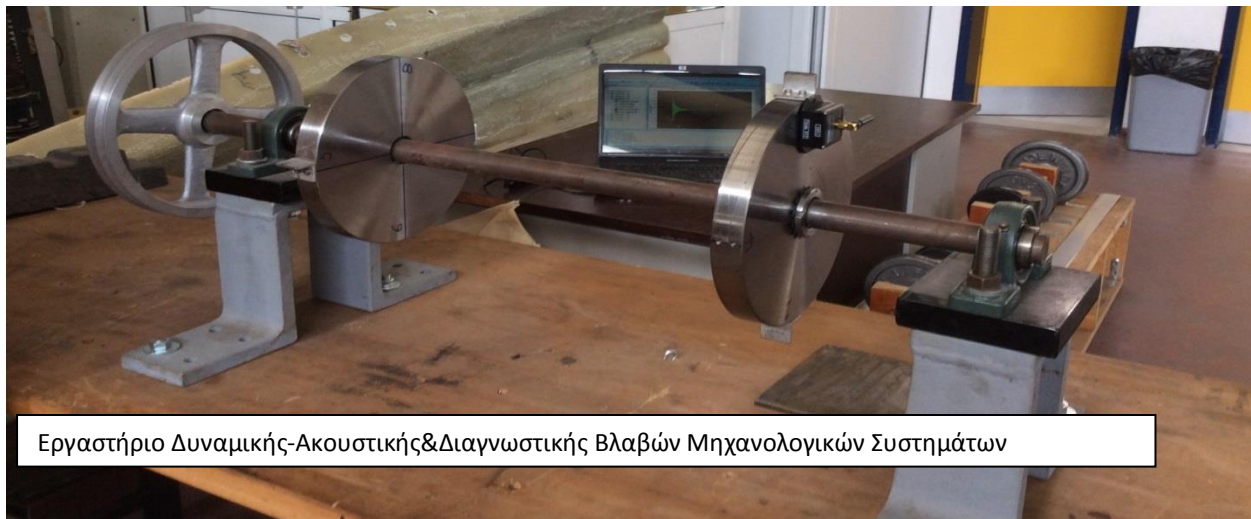
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ναυτικής Μηχανολογίας

Ιωάννης Γεωργίου-PhD, Καθηγητής

Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας/Μάθημα ΜΕ 8.3.38.6-Στρεπτικές Ταλαντώσεις

Αντικείμενο του μαθήματος είναι η μέτρηση της κίνησης του κάτωθι εργαστηριακού αξονικού συστήματος. Η μέτρηση γίνεται με ασύρματα επιταχυνσίόμετρα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην μέτρηση και ανάλυση περιστροφικών κινήσεων που χαρακτηρίζονται από στρέψη μεταξύ των μερών (δίσκων και άξονα) του αξονικού συστήματος. Οι κινήσεις αυτές καλούνται **στρεπτικές ταλαντώσεις**. Υπάρχουν και περιστροφικές κινήσεις με χωρίς στρέψη. Και αυτές μετρώνται.



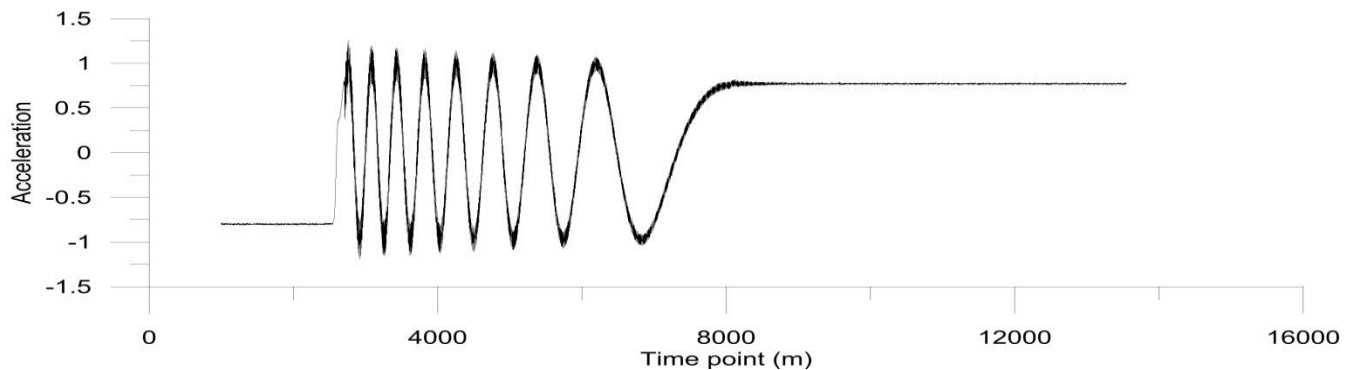
Εικόνα1. Πειραματική διάταξη αξονικού συστήματος αποτελούμενο από συμπαγή ελαστικό άξονα (χάλυβας) φέροντα δυο συμπαγείς δίσκους και μια τροχαλία. Στηρίζεται σε δύο έδρανα. Φέρει τριαξονικό επιταχυνσίομετρο για την μέτρηση κίνησης. Μετρώνται οι διαστάσεις των μερών του συστήματος προκειμένου να μοντελοποιηθεί με σύστημα στρεπτικών ταλαντωτών για την πρόβλεψη των δύο πρώτων ιδιοσυχνοτήτων [1].



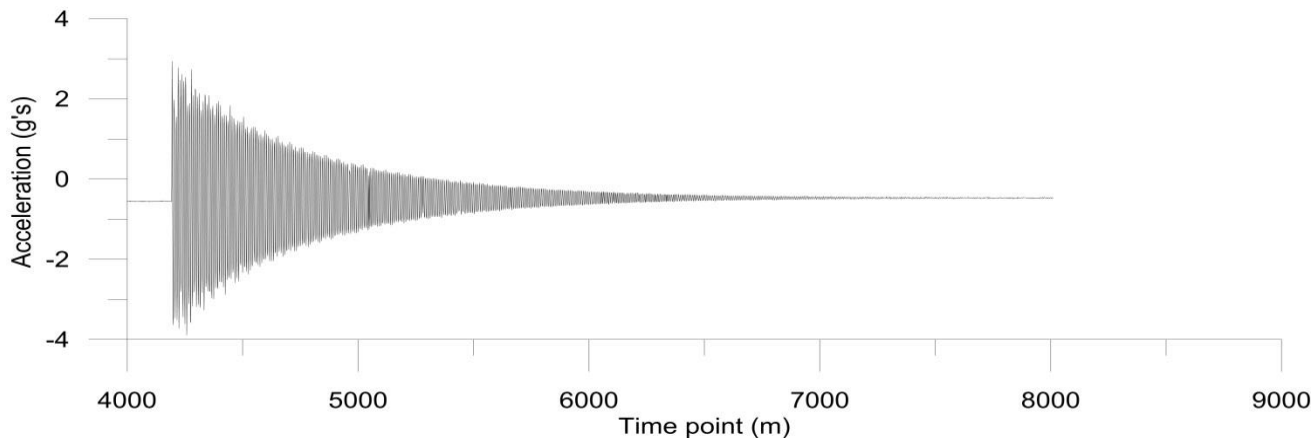
Μετρήσεις

Το μετρητικό σύστημα αποτελείται από ασύρματο επιταχυνσιόμετρο, δέκτη λείψης μετρήσεων, και λογισμικό καταγραφής των. Η τεχνολογία είναι MEMES sensors. Η ανάλυση στην ψηφιοποίηση, μέτρηση, του αναλογικού σήματος γίνεται στο επίπεδο των 12 bits.

Μετράμε την περιστροφική κίνηση του αξονικού στήματος στο επίπεδο της επιτάχυνσης. Η διαδικασία της μέτρησης χαρακτηρίζεται από τον αριθμό δειγματοληψιών S ανά μονάδα χρόνου. Οπότε η δειγματοληψία μεταφράζεται σε ποσότητα συχνότητας σε μονάδες Hz ($1 \text{ Hz} = \text{μία μετρήση/δευτερόλεπτο}$). Το αντίστροφο της δειγματοληψίας S (Hz) δίνει την περίοδο ή διάστημα του χρόνου μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων, ήτοι $\Delta t = 1/S$. Η ακρίβεια της μέτρησης καθορίζεται από την ανάλυση κατά την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Η μέτρηση είναι μια ταξινομημένη ακολουθία A_m από M τιμές σε σχέση με την ακολουθία t_m των διαδοχικών χρονικών σημείων M μέτρησης. Η μέτρηση είναι μια διακριτή συνάρτηση του χρόνου και για το λόγο αυτό καλείται **χρονοσειρά**. Τα γραφήματα 1&2 δείχνουν το ίχνος (γράφημα) μετρήσεων στο επίπεδο **χρόνος-μετρούμενο φυσικό μεγέθους**. Είναι ομαλές συναρτήσεις του χρόνου.



Γράφημα 2. Μέτρηση σε μορφή χρονοσειράς της επιτάχυνσης του δεξιού δίσκου. Το σύστημα διεγείρεται από αρχική ταχύτητα σε ένα δίσκο. Η κίνηση του αξονικού είναι Ελεύθερη Περιστροφή με μεταβαλλόμενη συχνότητα και με χωρίς ελαστική παραμόρφωση στα μέρη του αξονικού. Το επιταχυνσιόμετρο διεγείρεται περιοδικά από το πεδίο βαρύτητας.



Γράφημα 3. Μέτρηση σε μορφή χρονοσειράς της επιτάχυνσης του δεξιού δίσκου. Το σύστημα διεγείρεται από κρουστικό φορτίο στο μεσαίο δίσκο. Η κίνηση είναι Ελεύθερη Στρεπτική Ταλάντωση με ελαστική παραμόρφωση στον κύριο άξονα του συστήματος. Η περιστροφή είναι σχεδόν μηδενική. Η δυναμική στρέψης καθορίζεται από την ελαστικότητα του άξονα και τις ροπές αδράνειας των τριών δίσκων.



Ανάλυση-Αξιολόγηση Μετρήσεων

Στην χρονική στιγμή t_m , η ακριβής $A(t_m)$ και η μέτρηση A_m της επιτάχυνσης συνδέονται με την σχέση, $A(t_m) = A_m + \varepsilon_m$. Το σφάλμα ε_m καλείται **θόρυβος** εάν είναι σχετικά μικρό. Το μετρητικό σύστημα είναι αξιοπιστο εάν παράγει μικρό θόρυβο σε σχέση με το μέγεθος του σήματος που καταγράφει.

Η μέση τιμή της χρονοσειράς A_m $m=1$ M δίδεται από την σχέση,

$$\langle A \rangle \equiv \sum_{m=1}^M A_m / M$$

Εάν η μέση τιμή παραμένει σταθερή για διαφορετικά διαστήματα του χρόνου, η μέτρηση έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθότι υποδεικνύει την σταθερότητα των παραμέτρων (κατανομή μάζας με σταθερή μικροδομή) του συστήματος. Για παράδειγμα εάν υπήρχε ρωγμή με εσωτερική επαφή στον άξονα η μέση τιμή θα μπορούσε να καταστεί μη σταθερή.

Μία χρονοσειρά \tilde{A}_m $m=1$ M με σταθερή μέση τιμή αποσυντίθεται σε όλη την έκταση της ως εξής:

$$A_m = \langle A \rangle + \tilde{A}_m$$

Η νέα χρονοσειρά \tilde{A}_m $m=1$ M καλείται **διακύμανση**. Περιέχει τα χαρακτηριστικά της δυναμικής.

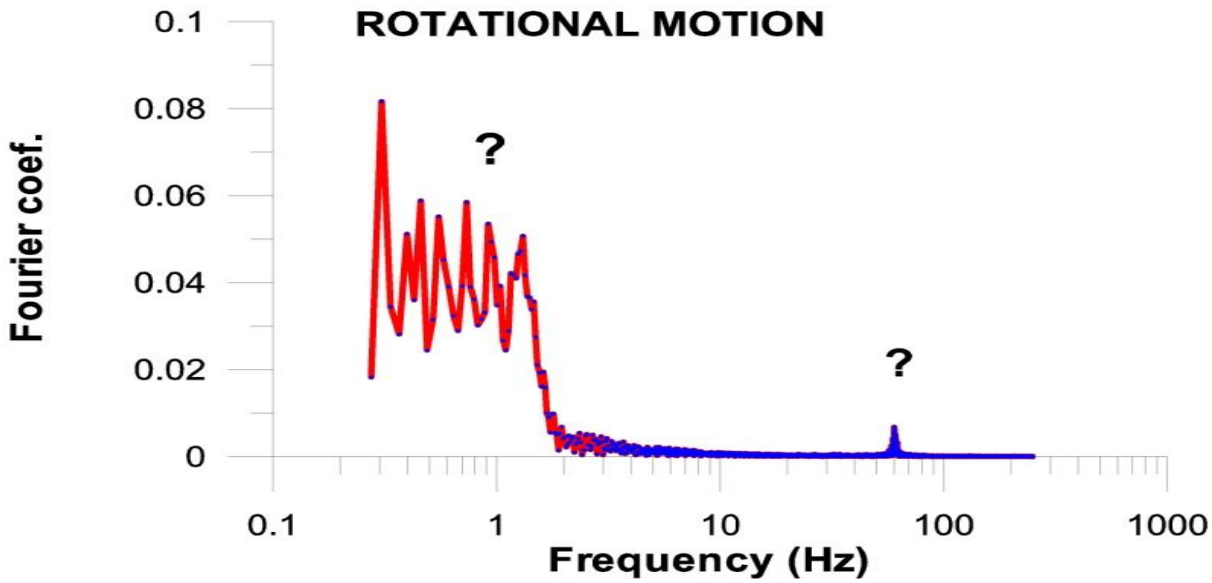
Η ενεργή τιμή μιας χρονοσειράς A_m $m=1$ M ορίζεται από την σχέση:

$$A_{RMS} \equiv \|A\| \equiv \sqrt{\sum_{m=1}^M A_m^2 / M - 1}$$

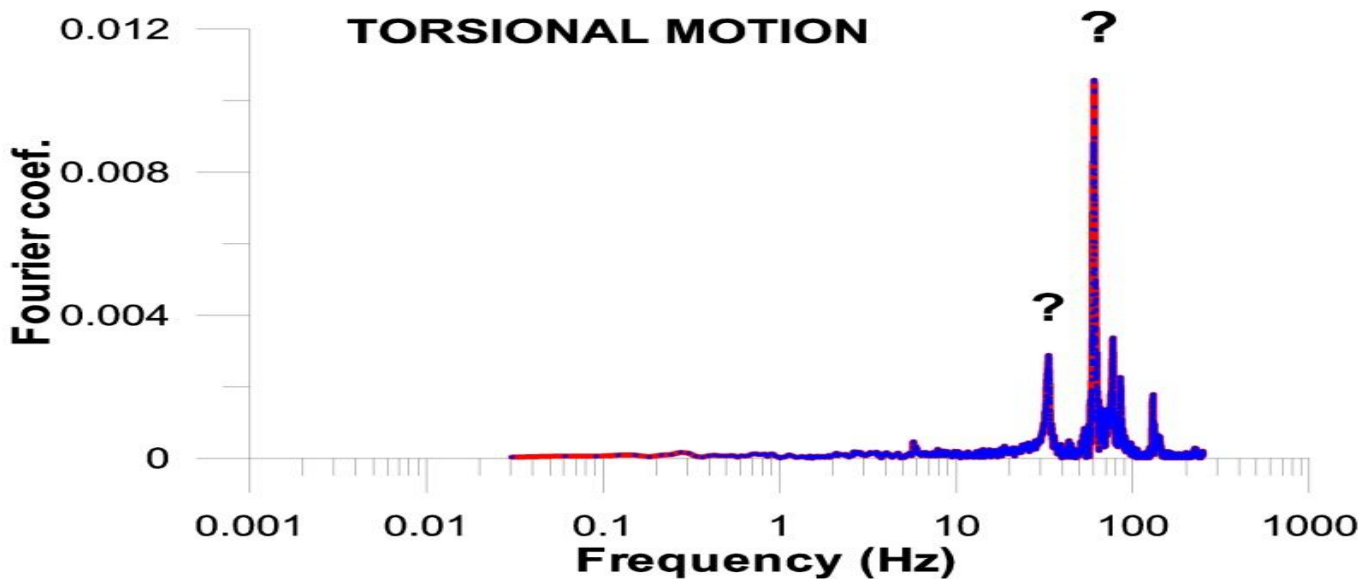
Η ενέργεια της **διακύμανσης** \tilde{A}_m $m=1$ M δίδεται από την σχέση:

$$\|\tilde{A}\|^2 \equiv \sum_{m=1}^M \tilde{A}_m^2 / M - 1$$

Τα Γραφήματα 1&2 φανερώνουν ότι η τυπική μέτρηση διακυμαίνεται, ως συνάρτηση του χρόνου, γύρω από μια σταθερή μέση τιμή. Η σταθερότητα της σημαίνει ότι η κίνηση αποτελείται από σταθερές αρμονικές συνιστώσες. Η μέτρηση μετασχηματίζεται σε μία νέα ακολουθία τιμών κατανεμημένες στον άξονα των συχνοτήτων. Γίνεται με τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (fast Fourier transform). Η ανάλυση αυτή εντοπίζει τις αρμονικές από τις οποίες αποτελείται η μέτρηση. Η αρμονικές μπορεί να έχουν φυσική σημασία, όπως συχνότητες φυσικής ταλαντώσης στρέψης, για παράδειγμα. Τα γραφήματα 4&5 δίνουν τους μετασχηματισμούς των μετρήσεων 1&2. Η ενέργεια της **διακύμανσης** \tilde{A}_m $m=1$ M κατανέμεται σε ένα χαρακτηριστικό φάσμα συχνοτήτων.



Γράφημα1. Fourier μετασχηματισμός της μέτρησης 1. Σκοπός του μαθήματος είναι να προσδοθεί φυσική (?) σημασία στο φάσμα συχνοτήτων της μέτρησης κίνησης με αρχική γωνιακή ταχύτητα σε ένα δίσκο.



Γράφημα2. Fourier μετασχηματισμός της μέτρησης 2. Σκοπός του μαθήματος είναι να προσδοθεί φυσική (?) σημασία (?) στο φάσμα συχνοτήτων της μέτρησης κίνησης με αρχικές συνθήκες που δημιουργούνται με παλμική διέγερση στο δίσκο κατά μήκος της περιφέρειας του. .



Τεχνική Έκθεση

Η κάθε ομάδα να συντάξει συνεργατικά μια τεχνική έκθεση.

1.Εισαγωγή

Τι είναι στρεπτικές ταλαντώσεις (ορισμός). Αναφορά παραδειγματος ενός αξονικού συστήματος δυο βαθμών ελευθερίας (ή τριών). Τι σημαίνει περιστροφή. Τι σημαίνει στρεπτική ταλάντωση-αναφορά παραδειγμάτων στρεπτικών ταλαντώσεων αξονικών συστημάτων σε πλοίο.

2.Πείραμα

Μηχανολογικό σχέδιο εργαστηριακού αξονικού συστήματος με τίς μετρηθήσες διαστάσεις. Διαδικασία πειράματος (αναφέρατε με ποιον τρόπο διεγέρθηκαν οι στρεπτικές ταλαντώσεις). Να γίνει διάγραμμα από τα δεδομένα της απλής περιστροφής και των στρεπτικών ταλαντώσεων. Επιταχυνσιόμετρο: να γίνει μια τεχνική αναφορά για το ασύρματο επιταχυνσιόμετρο (αρχή λειτουργίας, επικοινωνία κλπ). Να υπολογιστούν οι πολικές ροπές των δίσκων και οι συντελεστές δισκαμψίας των μερών τού άξονα που ενώνει τους δίσκους.

3.Επεξεργασία των καταγραφέντων σημάτων του επιταχυνσιόμετρου

Σας αποστέλλονται τρία αρχεία καταγραφής επιταχύνσεων. Η μέτρηση-καταγραφή γίνεται στον πρώτο δίσκο. Καταγράφονται με ακρίβεια 10 ψηφίων 500 ισαπέχοντες-στο χρόνο-μετρήσεις ανά δεπτερόλεπτο (500Hz). Το αρχείο MOTION είναι καταγραφή απλής περιστροφής. Το αρχείο TORSION είναι καταγραφή ταλάντωσης από κρούση στο δευτερο δίσκο, ενώ το TORSION είναι καταγραφή ταλάντωσης από κρούση στη τροχαλία. Οι τιμές της επιτάχυνσης είναι σε μονάδες g ($g=9.81 \text{ m/sec}^2$). Η στήλη του χρόνου είναι σε time points. Να υπολογίσετε την μέση τιμή και την ενεργή τιμή των μετρήσεων. Να μετασχηματίσετε τα σήματα, αφού αφαιρέσετε την μέση τιμή, στον άξονα συχνοτήτων (επεξεργασία σήματος με Fast Fourier Transform (FFT)). Να εξάγετε τις χαρακτηριστικές συχνότητες.

3.Μοντελοποίηση αξονικού συστήματος

Να υπολογιστούν οι πρώτες δύο ιδιοσυχνότητες του αξονικού αναλύοντας ένα μοντέλο χαμηλής τάξεως. Να εξαχθεί αυτό το μοντέλο με την μέθοδο της αναφοράς [1].

5.Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συγκρίνατε τις ιδιοσυχνότητες των στρεπτικών ταλαντώσεων που προκύπτουν από το μοντέλο κι αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση FFT των μετρήσεων. Το υλικό θεωρείται ότι είναι χάλυβας. Μεταβάλλοντας τις τιμές ελαστικότητας του χάλυβα προσπαθήστε να συγκλίνουν τα αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο ταυτοποιείται το υλικό του οποίου η ακριβής σύσταση δεν είναι γνωστή.

Βιβλιογραφία

[1] Γεωργίου, Ι., 2008, *Δυναμική & Ταλαντώσεις Κινητήρων και Αξονικών Συστημάτων Πρόωσης Πλοίου*

[2] Georgiou, I.T., 2013, «Experimental Investigation with Wireless Sensors of the Nonlinear Interaction between Rotational Motions and Torsional Vibrations in a Coupled Rigid Rotor-Flexible Rotor System. »ASME. International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, *Volume 7B: 9th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control* ():V07BT10A006. doi:10.1115/DETC2013-12813.