

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ Ε.Μ.Π. 'ΘΑΛΗΣ', ΠΑΘΗΤΙΚΟΙ ΕΛΚΥΣΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΤΩΝ

Αλέξανδρος Φ. Βακάκης, Καθηγητής
Στέλιος Τσακίρτζης και Ιωάννα Ρίζου, Διδακτορικοί Φοιτητές
Τομέας Μηχανικής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η έρευνα επικεντρώνεται στον σχεδιασμό δικτύων συζευγμένων ταλαντωτών (που συνθέτουν την 'κύρια κατασκευή') με τοπικούς παθητικούς μη γραμμικούς ελκυστές ενέργειας. Αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η παθητική καθοδήγηση ταλαντωτικής ενέργειας από την κύρια κατασκευή στους τοπικούς μη γραμμικούς ελκυστές, όπου η ενέργεια, (α) εντοπίζεται, και (β) αποσβένεται με χρήση βισκοελαστικών αποσβεστήρων. Το πρωτοποριακό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού, είναι ότι, ουσιαστικά, οι τοπικοί ελκυστές ενέργειας δρουν ως *συνοριακά παθητικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου*, και είναι ικανοί στην απορρόφηση ταλαντωτικής ενέργειας ευρέου φάσματος συχνοτήτων (*passive broadband adaptive boundary controllers*).

Οι μη γραμμικοί μηχανισμοί που ενεργοποιούν τους ελκυστές ενέργειας είναι *συλλήψεις μέσω στιγμαίων εσωτερικών συντονισμών (resonance captures)* μεταξύ του ελκυστή ενέργειας και της κυρίας κατασκευής. Το φαινόμενο της παθητικής άντλησης ενέργειας μελετάται θεωρητικά, υπολογιστικά και πειραματικά. Επίσης, διεξάγονται μελέτες παραμετρικής βελτιστοποίησης της άντλησης ενέργειας, με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έλκυση ενέργειας από την κύρια κατασκευή στους τοπικούς ελκυστές, στον όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο.

Το τελικό αποτέλεσμα της προτεινόμενης έρευνας είναι νέες τεχνικές σχεδίασης μηχανολογικών, δομοστατικών, και αεροναυπηγικών συστημάτων με αυξημένη δυνατότητα ταχείας απόσβεσης ανεπιθύμητων ταλαντώσεων, και αυξημένη προστασία από ανεπιθύμητες διαταραχές, κραδασμούς ή δυναμικές αστάθειες.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η γενική διάταξη του συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 1(α). Στη συγκεκριμένη διάταξη ο παθητικός ελκυστής ενέργειας είναι μονοβάθμιος και συνδέεται με την κύρια κατασκευή μέσω ισχυρά μη γραμμικού και βισκόδου αποσβεστήρα. Το βασικό χαρακτηριστικό του εικονιζόμενου ελκυστή ενέργειας είναι ότι το ελατήριο σύνδεσης με την κύρια κατασκευή είναι ισχυρά μη γραμμικό, και δει μη γραμμικοποίηση. Ειδικότερα, γίνεται η παραδοχή ότι η σχέση δύναμης - μετατόπισης του ελατηρίου είναι της μορφής:

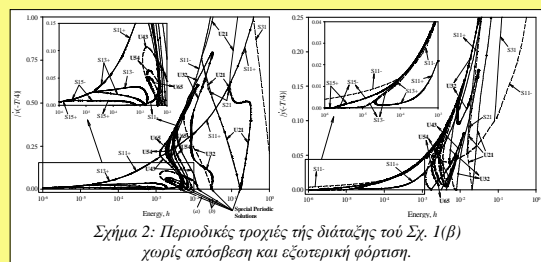
$$F = Cx^3$$

Η ισχυρή ελαστική μη γραμμικότητα είναι βασική απαίτηση του προτεινόμενου σχεδιασμού, καθ' όσον η έλλειψη γραμμικού όρου αποτρέπει την ύπαρξη χαρακτηριστικής συχνότητας εσωτερικού συντονισμού μεταξύ κύριας κατασκευής - ελκυστή. Έτσι, ο ελκυστής είναι ικανός προς εσωτερικό συντονισμό με οποιαδήποτε γραμμική ιδιοσυχνότητα της κύριας κατασκευής (η οποία κατά παραδοχή είναι γραμμική).

Για να δείξουμε την πολυπλοκότητα της δυναμικής της εικονιζόμενης διάταξης, εξειδικεύουμε την ανάλυση στην περίπτωση που η κύρια κατασκευή είναι μονοβάθμιος γραμμικός ταλαντωτής, οπότε η διάταξη λαμβάνει την μορφή του Σχ. 1(β). Οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος λαμβάνουν την μορφή (μόνο η κύρια κατασκευή φορτίζεται):

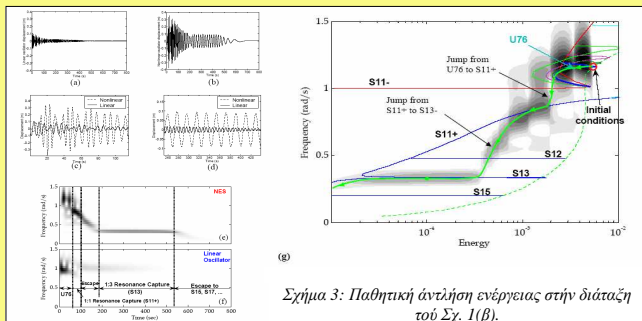
$$\ddot{y} + \alpha_0 \dot{y} + \lambda_1 \dot{y} + \lambda_2 (\dot{y} - \dot{v}) + C(y - v)^3 = F(t)$$

$$e\ddot{v} + \lambda_2 (\dot{v} - \dot{y}) + C(v - y)^3 = 0$$

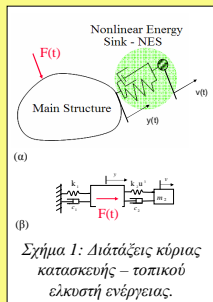


Σχήμα 2: Περιοδικές τροχιές της διάταξης του Σχ. 1(β) χωρίς απόσβεση και εξωτερική φόρτιση.

γραμμικής δυναμικής του συστήματος. Ένα παράδειγμα παθητικής άντλησης ενέργειας παρουσιάζεται με στο Σχήμα 3, οφειλόμενη σε 1:1 και 1:3 συλλήψεις μέσω συντονισμού.



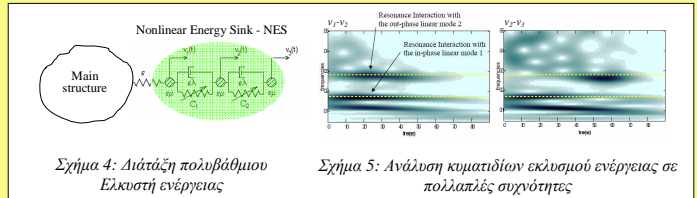
Σχήμα 3: Παθητική άντληση ενέργειας στην διάταξη του Σχ. 1(β).



Σχήμα 1: Διάταξεις κύριας κατασκευής - τοπικού ελκυστή ενέργειας.

Στο Σχήμα 2, παρουσιάζονται οι περιοδικές τροχιές του συστήματος συναρτήσει των περιόδων τους, με αρχικές ταχύτητες όπως στο Σχήμα και μηδενικές αρχικές μετατοπίσεις. Πολλές τροχιές αντιστοιχούν στην αυτή περίοδο T γεγονός που αποδεικνύει την πολυπλοκότητα της μη γραμμικής δυναμικής του συστήματος.

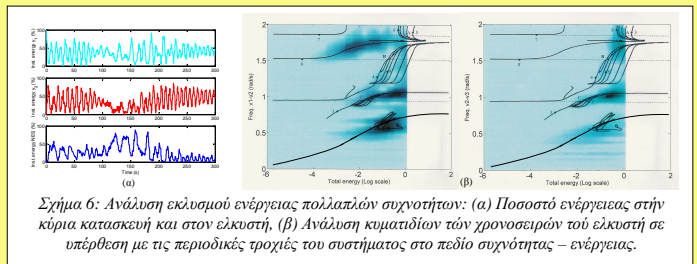
Στο Σχήμα 3g παρουσιάζεται η υπέρθεση της υπολογιστικής ανάλυσης με κυματίδια (wavelets) της χρονοσειράς $y(t)-v(t)$, με το διάγραμμα συχνότητας - ενέργειας των περιοδικών τροχιών του συστήματος χωρίς απόσβεση, ώστε να καταδειχθούν οι πολύπλοκες μη γραμμικές μεταβάσεις που διέπουν την παθητική άντληση ενέργειας.



Σχήμα 4: Διάταξη πολυβάθμιου ελκυστή ενέργειας

Σχήμα 5: Ανάλυση κυματιδίων εκλύσμου ενέργειας σε πολλαπλές συχνότητες

Πολυβάθμιος μη γραμμικός ελκυστής ενέργειας, όπως ο εικονιζόμενος στο Σχήμα 4, αντλούν ταλαντωτική ενέργεια από την κύρια κατασκευή ταυτοχρόνως σε πολλαπλές συχνότητες. Τουτό συνάγεται από τα αποτελέσματα των Σχημάτων 5 και 6, για κύρια κατασκευή δύο βαθμών ελευθερίας. Παρουσιάζονται ανάλυσεις κυματιδίων των χρονοσειρών ταλάντωσης των μαζών του ελκυστή. Συνάγεται η ταυτόχρονη παθητική άντληση ενέργειας στις δύο ιδιοσυχνότητες της κύριας κατασκευής. Επίσης, οι κατανομές ενέργειας του Σχ. 6(α) αποδεικνύουν το σημαντικό ποσοστό ταλαντωτικής ενέργειας της κύριας κατασκευής που αντλείται από τον ελκυστή.

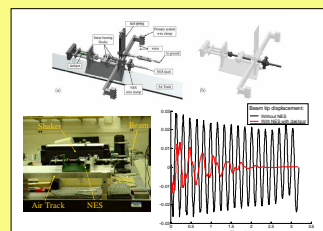


Σχήμα 6: Ανάλυση εκλύσμου ενέργειας πολλαπλών συχνοτήτων: (α) Ποσοστό ενέργειας στην κύρια κατασκευή και στον ελκυστή, (β) Ανάλυση κυματιδίων των χρονοσειρών του ελκυστή σε υπέρθεση με τις περιοδικές τροχιές του συστήματος στο πεδίο συχνότητας - ενέργειας.

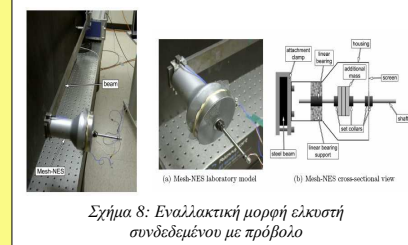
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Διάφορες πειραματικές διατάξεις έχουν μελετηθεί για την εφαρμογή του παθητικού ελκυστή ενέργειας σε πρακτικές εφαρμογές. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται παθητικός ελκυστής σχεδιασμένος να λειτουργεί σε αεραγωγό, και αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητά του στην απόσβεση ταλαντώσεων προβόλου που υποβάλλεται σε κρουστικό φορτίο. Στις σχηματικές παραστάσεις του Σχήματος περιγράφεται ο ελκυστής του οποίου η μάζα είναι 5% της μάζας της κύριας κατασκευής. Η ικανότητα απορρόφησης και απόσβεσης ταλαντωτικής ενέργειας από τον ελκυστή συνάγεται από την σύγκριση των χρονικών αποκρίσεων του άκρου της προβόλου με και δίχως συνδεδεμένο ελκυστή. Παρατηρείται δραστηκή μείωση του εύρους ταλάντωσης της προβόλου σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.

Εναλλακτική πλέον συμπαγή μορφή μη γραμμικού ελκυστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 8, όπου η μη γραμμικότητα οφείλεται σε εκκάρσιες παραμορφώσεις μη τεταμένης ελαστικής μεμβράνης.



Σχήμα 7: Ελκυστής σε αεραγωγό ως αποσβεστήρας κρουστικών αποκρίσεων



Σχήμα 8: Εναλλακτική μορφή ελκυστή συνδεδεμένου με πρόβλο

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Kerschen G, Y. S. Lee, A.F. Vakakis, D.M. McFarland, L.A. Bergman, 2005. *Irreversible Passive Energy Transfer in Coupled Oscillators with Essential Nonlinearity*. *SIAM Journal on Applied Mathematics* (submitted).

Lee Y.S., G. Kerschen, A.F. Vakakis, P.N. Panagopoulos, L.A. Bergman, D.M. McFarland, 2005. *Complicated Dynamics of a Linear Oscillator with a Light, Essentially Nonlinear Attachment*, *Physica D* (submitted).

(*) Panagopoulos P.N., A.F. Vakakis, S. Tsakirtzis, 2004. *Transient Resonant Interactions of Linear Chains with Essentially Nonlinear End Attachments Leading to Passive Energy Pumping*. *International Journal of Solids and Structures* Vol. 41, No. 22-23, pp. 6505-6528.

(*) Tsakirtzis S., G. Kerschen, P.N. Panagopoulos, A.F. Vakakis, 2005. *Multi-Frequency Nonlinear Energy Transfer From Linear Oscillators to MDOF Essentially Nonlinear Attachments*. *Journal of Sound and Vibration* (in press).

(*) Μερικούς χρηματοδοτήσαν από το πρόγραμμα 'ΘΑΛΗΣ'