



## ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

### Διπλωματική Εργασία

---

*«Πειραματική διερεύνηση επιρροής παραδιακλαδωμένων  
πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων για την απόσβεση ταλαντώσεων σε δοκό»*

---

Επιμέλεια: Ζαρκάδα Θεοφανία

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Πρώτο Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Αλευράς Παναγιώτης, Επίκουρος Καθηγητής Σχολής ΜΠΔ

Δεύτερο Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Μπακατσάκη Μαρία, ΕΔΙΠ Σχολής ΜΠΔ

Μάρτιος 2024, Χανιά

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Χαρακτηριστικό στοιχείο της σημερινής εποχής είναι η αναζήτηση πολλών αποτελεσματικών μεθόδων χωρίς την υπερεκμετάλλευση πόρων σε διάφορους τομείς. Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο να μελετήσει αποτελεσματικές μεθόδους για την μείωση των κραδασμών και την απόσβεση των ταλαντώσεων με την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Ειδικότερα, θα εστιάσει σε μια δομική κατασκευή, μία έξυπνη δοκός- πρόβολος, συνδεδεμένη σε ένα πιεζοηλεκτρικό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα. Αυτό επιτυγχάνει την αντιμετώπιση των ταλαντώσεων που προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι ένας θόρυβος ή μία δόνηση. Η μηχανική ενέργεια αυτή διοχετεύεται στα ηλεκτρικά κυκλώματα του παραδιακλαδωμένου συστήματος και μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων καθώς και το αντίστροφο, μελετώντας τις ιδιοσυχνότητες του.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι να εξεταστούν πειραματικές περιπτώσεις, ώστε να διερευνηθούν οι παράμετροι των στοιχείων, εξάγοντας συμπεράσματα για την επίδραση που έχουν στο σύστημα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται συνδυαστικά με άλλες δημοσιευμένες έρευνες, κατανοώντας την συμπεριφορά του συστήματος και την επιρροή που υπάρχει στην απόδοση του. Μέσω της διερεύνησης αυτής, αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα αυτής της εφαρμογής των πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων για απόσβεση ταλαντώσεων σε δοκό.

**«Experimental investigation of the influence of branched piezoelectric circuits on the damping of oscillations in a beam».**

*Zarkada Theofania*

**ABSTRACT**

A characteristic feature of the current era is the search for many effective methods without over-exploiting resources in various areas. The main concept of this paper is to delve into the search for effective methods to reduce vibration and damp oscillations by applying piezoelectric patches. In particular, it will focus on a structural structure, a smart beam-propeller, connected to a piezoelectric shunt circuit . This achieves to deal with oscillations caused by external factors such as a noise or a vibration. This mechanical energy is fed into the electrical circuits of the branched system and can be converted into electrical energy through the piezoelectric patches and vice versa by studying its natural frequencies.

The purpose of this research is to examine experimental cases in order to investigate the parameters of the elements, drawing conclusions about their effect on the system. The results are compared with other published research, understanding the behavior of the system and the influence on its performance. Through this investigation, the effectiveness of this application of piezoelectric shunt circuits for vibration damping in a beam is demonstrated.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίηση της. Ειδικότερα, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου Γεώργιο Ε. Σταυρουλάκη, για την εμπιστοσύνη του και την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω αυτή την εργασία .

Επιπλέον, εκφράζω ιδιαιτέρως τις ευχαριστίες μου προς τον διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, κ. Κωνσταντίνο Εμμ. Μαρακάκη για την πολύτιμη βοήθεια και για τη συλλογή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία, καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε για την επίλυση των αποριών.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Μαρία Στυλιανή Ι. Δαράκη για τους κοινούς προβληματισμούς, την πολύτιμη συνεισφορά της, την στήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχε, καθώς και τον Μουστεράκη Αντώνη για την συνεργασία μας.

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την ανιδιοτελή στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	2
ABSTRACT.....	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	8
2.1 Πιεζοηλεκτρισμός.....	8
2.1.1 Ορισμός Πιεζοηλεκτρισμού.....	9
2.1.2 Ιστορική Αναφορά.....	9
2.1.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά .....	10
2.1.4 Πιεζοηλεκτρισμός ως Φαινόμενο και οι Λειτουργίες του .....	13
2.2 Κυκλώματα Παραδιακλάδωσης.....	14
2.2.1 Κατηγορίες Κυκλωμάτων Παραδιακλάδωσης.....	15
2.2.2 Εξισώσεις Πιεζοηλεκτρικών Παραδιακλαδωμένων Συστημάτων .....	16
2.2.3 Εφαρμογές Πιεζοηλεκτρικών Υλικών, Επιθεμάτων και Συστημάτων.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	19
3.1 Γενικές εξισώσεις τρισδιάστατης Ελαστικότητας και Πιεζοηλεκτρισμού.....	19
3.2 Πολυστρωματική Δοκός με Πιεζοηλεκτρικά Επιθέματα.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	23
4.1 Πειραματική Διερεύνηση.....	23
4.1.1 Εισαγωγή.....	23
4.1.2 Μοντέλο Ελατηρίου Μάζας.....	23
4.1.2.1 Εξισώσεις απόσβεσης συντονισμού.....	24
4.1.2.2 Εξισώσεις Κυκλώματος Παραδιακλάδωσης «Αντίστασης-Πηνίου» (RL) για απόσβεση μιας ιδιομορφής.....	26
4.1.2.3 Εξισώσεις ρεύματος που ρέει μέσω του επαγωγέα.....	30
4.1.3 Σύστημα Δοκού με Πιεζοηλεκτρικά Επιθέματα.....	30
4.1.4 Ηλεκτρικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης για απόσβεση.....	37
4.1.5 Πολύμετρα παθητικών κυκλωμάτων.....	41
4.1.6 Συσκευές καταγραφής.....	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	47
5.1 Φυσική Συχνότητα.....	47
5.1.1 Εισαγωγή.....	47
5.1.2 Φυσική Συχνότητα Δοκός-Πρόβολος.....	47
5.2 Εντοπισμός Ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών.....	49
5.2.1 Μέθοδος Bump Test με ιδιομορφική ανάλυση και απόκριση κραδασμών.....	50
5.2.2 Μέθοδος Δόνησης από Εξωτερικό Σήμα με ιδιομορφική ανάλυση και απόκριση κραδασμών.....	50
5.3 Πειραματικές μετρήσεις με τη Μέθοδο Bump Test για την πρώτη ιδιοσυχνότητα συντονισμού σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.....	51
5.4 Αποτελέσματα μέσω της πειραματικής διάταξης για την εύρεση πρώτης και δεύτερης ιδιοσυχνότητας συντονισμού σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.....	54
5.5 Απόσβεση δεύτερης ιδιομορφής με κύκλωμα RL .....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	63
6.1 Συμπεράσματα.....	63
6.2 Μελλοντικές προτάσεις για έρευνα.....	64
Βιβλιογραφία.....	65

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Εισαγωγή

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι μια καινοτόμα έννοια που απασχολεί πολλούς τομείς στις μέρες μας επιφέροντας σημαντικές εξελίξεις στους επιστημονικούς κλάδους, στη μηχανολογία καθώς και στην καθημερινή μας ζωή. Η ικανότητα συγκεκριμένων υλικών να παρουσιάζουν ηλεκτρική ενέργεια όταν σε αυτά ασκηθεί μια μηχανική πίεση καθώς και το αντίστροφο, να παρουσιάζουν μηχανική ενέργεια όταν σε αυτά ασκηθεί ηλεκτρική τάση, είναι σημαντικός λόγος για να δημιουργηθούν εφαρμογές με πιεζοηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα κυκλώματα.

Η χρήση τους ως αισθητήρες, ως ενεργοποιητές καθώς και τα δύο μαζί παρέχει νέες δυνατότητες ειδικά στις μηχανικές δομές, κομμάτι που θα εστιάσει και η συγκεκριμένη εργασία. Η σύνδεση πιεζοηλεκτρικών μετατροπών με ένα παραδιακλαδωμένο κύκλωμα επιτρέπει την μετατροπή της ενέργειας καθώς και την διοχέτευση της ώστε να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς. Συγκεκριμένα, μέσω του παραδιακλαδωμένου συστήματος η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να προσανατολιστεί σε μία επιθυμητή κατεύθυνση ή να λειτουργήσει ως αντισταθμιστική ενέργεια, με σκοπό να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος και να αποσβέσει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις.

Στην συγκεκριμένη πειραματική μελέτη παρουσιάζεται, η σύνδεση μιας δομικής κατασκευής (μία δοκός στερεωμένη σε μία μέγγενη) με ένα παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συνδεδεμένα με την χρήση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Γίνεται χρήση των εξισώσεων για απόσβεση του συντονισμού καθώς και χρήση δύο μεθόδων, πρώτον δίνοντας σήμα μέσω μιας κρουστικής διέγερσης στην δοκό και δεύτερον μέσω ενός εξωτερικού σήματος για την ιδιομορφική ανάλυση και την μείωση των κραδασμών. Ερευνώνται οι συχνότητες που αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής μέσω ενός παθητικού συστήματος ελέγχου, αποσβένοντας τις ταλαντώσεις και αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του πειράματος.

Τέλος, η συνεχής ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας απασχολεί μεγάλο κομμάτι της επιστημονικής κοινότητας και η εφαρμογή της είναι σημαντική σε πολλούς τομείς στην κοινωνία. Η μελλοντική χρήση των πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων σε ποικίλες εφαρμογές, προσφέρει καινοτόμες λύσεις και βέλτιστα αποτελέσματα συνδυασμένα με χαμηλού κόστους κατασκευές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

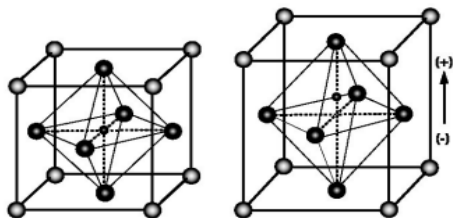
### 2.1 Πιεζοηλεκτρισμός

Ο όρος "πιεζοηλεκτρισμός", γνωστός και ως "πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο", αναφέρεται στην ικανότητα ενός υλικού να παράγει τάση εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος όταν αυτό βρίσκεται σε μηχανική καταπόνηση ή δόνηση, καθώς και στην ικανότητα να δονείται όταν σε αυτό υφίσταται τάση. Συγκεκριμένα, το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ορίζεται ως η ιδιότητα συγκεκριμένων υλικών να μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς και αντίστροφα, την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.

Η ευρεία επιλογή των στερεών υλικών βασίζεται σε κρυσταλλικά, και κεραμικά υλικά, όπως και σε ύλες βιολογικές που είναι σε οστά και το DNA, τα οποία όταν δεχθούν μηχανική τάση ή αλλιώς μηχανική πίεση αναπτύσσουν ηλεκτρικό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό καλείται ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και το φορτίο της ηλεκτρικής πόλωσης είναι ανάλογο με την παραμόρφωση. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και υπάρξει παραμόρφωση του υλικού ενώ εφαρμοστεί σε αυτό εξωτερική ηλεκτρική τάση, τότε ορίζεται ως αντίστροφο φαινόμενο πιεζοηλεκτρισμού.

Ο πιεζοηλεκτρισμός (ηλεκτρισμός που παράγεται από πίεση) παρουσιάζεται σε πολλά μονοκρυσταλλικά υλικά, όπως ο χαλαζίας, ο τουρμαλίνης, το τοπάζι και το αλάτι Rochelle, όμως δεν είναι κατάλληλα ως ενεργοποιητές για εφαρμογές ελέγχου κραδασμών. Αντιθέτως, τα τεχνητά πολυκρυσταλλικά κεραμικά υλικά, όπως ο τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος (PZT), παρουσιάζουν σημαντικές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Τα κεραμικά PZT είναι εύκολο να παραχθούν και χρησιμοποιούνται σε δομές πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται όταν υπάρχει ηλεκτρικό δίπολο στην κρυσταλλική δομή των υλικών. Συγκεκριμένα, παρατηρείται από τα μόρια στους κρυστάλλους οι οποίοι δεν έχουν κέντρο συμμετρίας. Κάθε μόριο έχει μια πολικότητα, το ένα άκρο είναι αρνητικά φορτισμένο, εν ολίγοις έχει περισσότερα ηλεκτρόνια, ενώ το άλλο είναι θετικά φορτισμένο. Με αυτόν το τρόπο ορίζουμε ότι έχουμε ύπαρξη ηλεκτρικού δίπολου. Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού εξαρτάται σημαντικά από την συμμετρία του κρυστάλλου και δεν μπορεί να υπάρξει σε κρυστάλλους οι οποίοι εμφανίζουν κεντρική συμμετρία. [1]



Εικόνα 1 Κρυσταλλική δομή ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού.  
Αριστερά πριν την πόλωση και δεξιά μετά την πόλωση [1]



## 2.1.1 Ορισμός του πιεζοηλεκτρισμού

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι το ηλεκτρικό φορτίο που συσσωρεύεται σε ορισμένα στερεά υλικά όταν εφαρμόζεται σε αυτά μηχανική δύναμη ή τάση (ευθύ φαινόμενο). Αντίστροφα, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν επίσης μηχανική παραμόρφωση όταν εφαρμόζεται σε αυτά μία ηλεκτρική τάση (αντίστροφο φαινόμενο). [1]

## 2.1.2 Ιστορική αναφορά

### Ανακάλυψη και εφαρμογές του Πιεζοηλεκτρισμού (1880 – σήμερα)

Η πρώτη πειραματική διερεύνηση μεταξύ μακροσκοπικών πιεζοηλεκτρικών φαινομένων και της κρυσταλλογραφικής δομής αναφέρθηκε το 1880 από τους Pierre και Paul-Jacques Curie. Τα αδέρφια υποστήριζαν ότι υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ του δυναμικού που παράγεται από τις αλλαγές θερμοκρασίας και της μηχανικής καταπόνησης και θα προκαλέσει τον πιεζοηλεκτρισμό.

Για τον λόγο αυτόν, με επιμονή άρχισαν τη μέτρηση των επιφανειακών φορτίων που εμφανίζονταν σε κρυστάλλους (τουρμαλίνη, χαλαζία, τοπάζι και αλάτι Rochelle ), οι οποίοι υποβλήθηκαν σε μηχανική καταπόνηση. Οι αδελφοί Curies οδηγήθηκαν στο ότι μια κατηγορία υλικών που πιέζονται παράγουν ηλεκτρικό δυναμικό και αυτό επιβεβαίωσε την θεωρία τους. Στους επιστημονικούς κύκλους της εποχής, αυτό ήταν μια σημαντική εφεύρεση και ο Hankel έδωσε τον όρο "πιεζοηλεκτρισμός". Τα αδέρφια προέβλεψαν με αυτή την διαδικασία ότι οι κρύσταλλοι παρουσιάζουν το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (ηλεκτρισμός που παράγεται από εφαρμοζόμενη τάση) . Έπειτα, με τις μαθηματικές θεμελιώδεις αρχές της θερμοδυναμικής τους Lippmann το 1881 απέδειξαν και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (τάση που παράγεται από εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο).

Σημαντικές εφαρμογές σε πιεζοηλεκτρικές συσκευές εκπληρώθηκαν για πρώτη φορά στη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου το 1917, όταν ο Paul Langevin και οι Γάλλοι συνεργάτες δημιούργησαν έναν υποβρύχιο ανιχνευτή υπερήχων με στόχο τη μέτρηση βάθους, εκπέμποντας υψηλή συχνότητα και χρονομετρώντας την επιστρεφόμενη ηχώ. Στην διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου το, το επίκεντρο των ερευνών έγινε από τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία και την πρώην Σοβιετική Ένωση, που αποσκοπούσε στην ανάπτυξη κεραμικών υλικών με πολύ υψηλές διηλεκτρικές σταθερές στην κατασκευή πυκνωτών. Μετέπειτα, σε αυτές τις εξελίξεις έδωσε το στίγμα της η Ιαπωνία το 1965-1980, εφευρίσκοντας τους βομβητές ήχου όπως συναγερμοί καπνού, καθώς και οι μετατροπείς υπερήχων αέρα όπως τηλεχειριστήρια τηλεόρασης. Αυτές οι ανακαλύψεις, οδήγησαν σε γνωστές καθημερινές συσκευές όπως ρολόγια χαλαζία, μικρόφωνα, κεραμικές κασέτες, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, επιταχυνσιόμετρα, καθώς και ισχυρά σόναρ, υδρόφωνα , μετατροπείς υπερήχων και πιεζοηλεκτρικά συστήματα ανάφλεξης. Από το 1980 και ύστερα, όλες οι εφευρέσεις προσέλκυαν την προσοχή ολόκληρης της βιομηχανίας με ακόμα περισσότερες δημοσιεύσεις άρθρων στο τομέα των πιεζοκεραμικών υλικών και εφαρμογών από την Ρωσία, την Κίνα και την Ινδία με σκοπό την απόκτηση ενεργοποιητών που είναι οικονομικοί, χρήσιμοι , με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, ανθεκτικοί στο περιβάλλον και με υψηλή αξιοπιστία. Τέλος, η μελέτη για ιδανικές ευκαιρίες πιεζοπροϊόντων, βρίσκεται σε παγκόσμια εξέλιξη μέχρι και σήμερα. [2]

### 2.1.3 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χωρίζονται σε κατηγορίες, συγκεκριμένα στους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους και στα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε μονοκρυσταλλικά υλικά που υπάρχουν στην φύση (όπως χαλαζίας, αλάτι Rochelle, τουρμαλίνης), ενώ η δεύτερη σε πιεζοηλεκτρικούς πολυκρυστάλλους. Στα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά (ή αλλιώς σιδηροηλεκτρικά κεραμικά) οι λεπτόκοκκοι κρύσταλλοι λαμβάνονται με την αντίδραση στερεής φάσης και διεργασίες πυροσυσσωμάτωσης μεταξύ σκόνης και σωματιδίων αναμειγνύονται τυχαία μαζί με ανάμιξη, χύτευση και σύντηξη υψηλής θερμοκρασίας με πρώτες ύλες των απαραίτητων συστατικών και μπορούν να επεξεργαστούν και να παρουσιάζουν σημαντικές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν σημαντικό ρόλο σε ηλεκτρονικές διατάξεις όπως οι ενεργοποιητές, αισθητήρες, επιταχυντές, κινητήρες υπερήχων, μετατροπείς, φίλτρα και αντηχεία και μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ο τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος (PZT) λόγω των εξαιρετικών πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων. Ωστόσο, πρόσφατα έχει καταστεί επιθυμητή η χρήση υλικών χωρίς μόλυβδο για την προστασία του περιβάλλοντος κατά τη διάθεση των αποβλήτων των προϊόντων. Ως εκ τούτου, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χωρίς μόλυβδο έχουν προσελκύσει την προσοχή παγκοσμίως στην αναζήτηση νέων υλικών για την αντικατάσταση των πιεζοηλεκτρικών με βάση το PZT κεραμικά.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χωρίς μόλυβδο, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί μονοκρύσταλλοι, για παράδειγμα σιδηροηλεκτρικά κεραμικά με δομή περοβσκίτη, με δομή χαλκού βολφραμίου και φερροηλεκτρικά με δομή στρώματος βισμούθιου (BLSF), έχουν αναφερθεί εκτενώς κυρίως τα τελευταία 10 χρόνια. Πρόσφατα, διάφορα σιδηροηλεκτρικά με δομή περοβσκίτη, όπως  $\text{BaTiO}_3$  και τα στερεά διαλύματά τους έχουν μελετηθεί ενεργά ως υποψήφια πιεζοηλεκτρικά κεραμικά χωρίς μόλυβδο. Τα κεραμικά αυτά έχουν μελετηθεί ευρέως και η χρήση τους είναι αναμένεται σε εφαρμογές ενεργοποιητών και υψηλής ισχύος λόγω των σχετικά μεγάλων πιεζοηλεκτρικών σταθερών, μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών χωρίς μόλυβδο. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα, όπως οι χαμηλές θερμοκρασίες Curie, ή οι χαμηλές θερμοκρασίες αποπόλωσης, δυσκολίες στις κατεργασίες πόλωσης οι και χαμηλές σχετικές πυκνότητες. Ωστόσο, με εξαίρεση τον τιτανικό μόλυβδο (PT), κανένας από αυτούς δεν παρουσιάζει ανώτερο σιδηροηλεκτρισμό από αυτόν του PZT. Δεν υπάρχουν υλικά χωρίς μόλυβδο που να εμφανίζουν πιο εξαιρετικές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες από εκείνες των υλικών με βάση το PZT. Για να αντικατασταθούν τα συστήματα με βάση το PZT, είναι απαραίτητο οι απαιτούμενες πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες για διάφορες εφαρμογές ταξινομούνται και αναπτύσσονται για κάθε εφαρμογή. Για παράδειγμα, τα κεραμικά τύπου περοβσκίτη φαίνεται να είναι κατάλληλα για ενεργοποιητές και υψηλής ισχύος εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, τα κεραμικά BLSF φαίνεται να είναι υποψήφια υλικά για εφαρμογές κεραμικών αντηχείων.

Εν ολίγοις, πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται τα υλικά τα οποία είναι βασισμένα στο τροποποιημένο τιτανικό μόλυβδο ζirkονίου (PZT) που είναι ένα λευκό έως υπόλευκο στερεό. Εμφανίζουν έντονη πιεζοηλεκτρική επίδραση (η ένωση αλλάζει σχήμα όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο) και χωρίζονται στις κατηγορίες “μαλακών” ή “σκληρών” πιεζοκεραμικών υλικών. Καθορίζονται ανάλογα με την κινητικότητα των δίπολων και κατά συνέπεια με την συμπεριφορά πόλωσης και αντιπόλωσης. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά παράγονται σχετικά εύκολα και παρουσιάζουν ισχυρή σύζευξη μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών τομέων και παράγονται σχετικά εύκολα. Αυτό τους επιτρέπει μέσω σχετικά μικρών εφαρμοζόμενων τάσεων να παράγουν συγκριτικά μεγάλες δυνάμεις ή μετατοπίσεις καθώς και το αντίστροφο.[3]

*Πίνακας 1 Περιπτώσεις πιεζοηλεκτρικών υλικών [3]*

<b>ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ</b>	<b>Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ</b>
Σιδηροηλεκτρικά “μαλακά”	Ενεργοποιητές με αντοχές πεδίου και εύκολη πολικότητα.
Σιδηροηλεκτρικά “σκληρά”	Ακουστικές εφαρμογές υψηλής ισχύος.
Χωρίς μόλυβδο	Μετατροπείς υπερήχων και ως κρυσταλλικό υλικό ενεργοποίησης.

Τα σιδηροηλεκτρικά “μαλακά” πιεζοηλεκτρικά υλικά, πολώνονται αρκετά εύκολα μέχρι και σε σχετικά χαμηλές αντοχές πεδίου, διότι παρουσιάζουν συγκριτικά υψηλή κινητικότητα τομέα, η οποία είναι τυπική για αυτούς.

Τα πλεονεκτήματά τους είναι :

- Ο μεγάλος συντελεστής πιεζοηλεκτρικής φόρτισης.
- Οι μέτριες διαπερατότητες.
- Οι υψηλοί παράγοντες σύζευξης.

Κάποιες εφαρμογές τους:

- Ηλεκτροακουστικές εφαρμογές, όπως μετατροπείς ήχου και μικρόφωνα καθώς και παραλαβές ήχου σε μουσικά όργανα.
- Ενεργοποιητές για νανοποθέσεις αισθητήρων όπως ανιχνευτές κραδασμών. [3]

**Γνωστό μαλακό Πιεζοηλεκτρικό υλικό στην βιομηχανία είναι το PIC151:**

*Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά και σκοπός του PIC151 [3]*

<b>PIC151</b>	
<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</b>	<b>ΣΚΟΠΟΣ</b>
Υψηλή διαπερατότητα	Ενεργοποιητές
Μεγάλος παράγοντας ζεύξης	Μετατροπείς υπερήχων χαμηλής ισχύος
Υψηλός συντελεστής πιεζοηλεκτρικού φορτίου	Μετατροπείς ήχου χαμηλής συχνότητας
Σχετικά υψηλή θερμοκρασία Curie	

**Γνωστό μαλακό Πιεζοηλεκτρικό υλικό στην βιομηχανία, όπου θα εστιάσει η συγκεκριμένη εργασία είναι το PIC255 :**

*Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά και σκοπός το PIC255 [3]*

PIC255	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΣΚΟΠΟΣ
Πολύ υψηλή θερμοκρασία Curie Μέτρια διαπερατότητα Υψηλός συντελεστής ζεύξης Συντελεστής υψηλού φορτίου Συντελεστής χαμηλής μηχανικής ποιότητας Συντελεστής χαμηλής θερμοκρασίας Σχετικά υψηλή αντοχή πεδίου αντιστροφής πολικότητας (> 1 kV / mm)	Εφαρμογές ενεργοποιητή για δυναμικές συνθήκες λειτουργίας και υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος Μετατροπείς υπερήχων χαμηλής ισχύος Μη συντονισμένα ευρυζωνικά συστήματα Αισθητήρες δύναμης και ακουστικής παραλαβής

Οι θερμικές ιδιότητες με χρήση PIC255 παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά

1. στην κατεύθυνση πόλωσης
2. κάθετα προς αυτήν.

Τα “σκληρά” πιεζοηλεκτρικά υλικά, είναι ιδανικά να αντέξουν υψηλές ηλεκτρικές και μηχανικές καταπονήσεις, παρουσιάζουν υλικό υψηλής απόδοσης για μετατροπείς υπερήχων. Το γεγονός ότι υπάρχουν χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες, διευκολύνει στη συνεχή χρήση τους σε λειτουργία συντονισμού με μόνο χαμηλή ενδογενή θέρμανση του εξαρτήματος.

Εφαρμογές των σκληρών πιεζοηλεκτρικών υλικών (όπου οι ιδιότητες τους ευνοούν κυρίως τις ακουστικές εφαρμογές υψηλής ισχύος):

- Κατεργασίες υλικών ( διάτρηση, συγκόλληση, συγκόλληση με υπερήχους )
- Καθαρισμό με υπερήχους, συνήθως σε μέτρηση kHz.
- Ιατρικές εφαρμογές ( χειρουργικά εργαλεία, υπερήχων αφαίρεσης πέτρας )

Τα πρώτα Piezo χωρίς μόλυβδο στην βιομηχανία είναι τα :

- ☐ PIC700
- ☐ PIC701.

Τα συγκεκριμένα είναι κατασκευασμένα με τιτανικό νάτριο βισμούθιου και έχουν όμοια χαρακτηριστικά με τα υλικά τιτανικού βαρίου.

Εφαρμογές Piezo χωρίς μόλυβδο:

- Ιδανικά για εφαρμογές τεχνολογίας σόναρ και υδροφώνου
- Μετατροπείς υπερήχων σε κλίμακα MHz. [3]

### 2.1.4 Ο πιεζοηλεκτρισμός ως φαινόμενο και οι λειτουργίες του

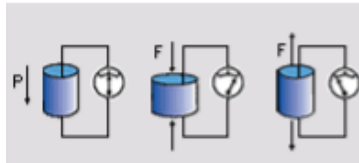
Για να δημιουργηθεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα πολυκρυσταλλικό υλικό θερμαίνεται με την επίδραση ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Μέσω της θερμότητας αυξάνεται η κινητική ενέργεια των γειτονικών μορίων που είναι αποπροσανατολισμένα και σταδιακά δημιουργεί ενιαία διεύθυνση για όλα τα δίπολα. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει μια ενιαία περιοχή πολικότητας, μέσω ενός πολύ μεγάλου ηλεκτρικού πεδίου συνεχούς ρεύματος και οι περιοχές με διαφορετική πολικότητα παύει να υπάρχει. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο αφαιρεθεί, παραμένει η υπολειπόμενη πόλωση και αρκετά δίπολα δεν επιστρέφουν στον αρχικό τους προσανατολισμό. Επίσης, εάν το υλικό εκτεθεί σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία Curie του υλικού εάν υποβληθεί σε πολύ υψηλό ηλεκτρικό πεδίο προσανατολισμένο αντίθετα προς τη διεύθυνση πόλωσης, τότε είναι πιθανόν να αποπολωθεί.

Στην περίπτωση που εφαρμοστεί μηχανική τάση στο υλικό και αυτό πολωθεί, έχουμε το ευθύ φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού. Η εξωτερική δύναμη αναπτύσσει ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνεια του κρυστάλλου ο οποίος στην συνέχεια παραμορφώνεται μηχανικά. Ταυτόχρονα, η μηχανική τάση είναι αυτή που εμφανίζει την διπολική ροπή, διότι προκαλεί διαχωρισμό του κέντρου βάρους των θετικών και αρνητικών φορτίων στους ασύμμετρους ή με χαμηλή συμμετρία κρυστάλλους. Όταν έχουμε κρύσταλλο με κέντρο συμμετρίας το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού δεν μπορεί να εμφανιστεί, διότι δεν μπορούν να διαχωριστούν τα κέντρα βάρους των φορτίων. [4]

Στο ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχουμε τις εξής καταστάσεις :

- Το υλικό βρίσκεται στην αρχική του μορφή
- Αν ασκηθεί ρεύμα ή δύναμη και το υλικό συμπιεστεί τότε μεταξύ των ηλεκτροδίων θα εμφανιστεί τάση ίδιας πολικότητας με την τάση της πόλωσης.
- Αν το υλικό επιμηκυνθεί, εμφανίζεται ανάστροφη τάση ως προς την πολικότητα.

Συμπερασματικά, το φορτίο της ηλεκτρικής πόλωσης είναι ανάλογο με την παραμόρφωση του υλικού.

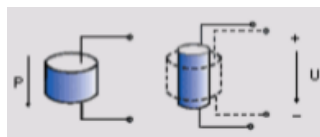


Εικόνα 2 Αναπαράσταση Ευθύ Πιεζοηλεκτρικού Φαινομένου [4]

Στην περίπτωση που εφαρμοστεί ηλεκτρική ενέργεια στο υλικό και αυτό εμφανίσει μηχανική τάση τότε έχουμε το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Στο αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο οι καταστάσεις που υπάρχουν είναι οι εξής:

- Το υλικό συμπιέζεται όταν υπάρξει μια ηλεκτρική τάση ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης του υλικού.
- Το υλικό διαστέλλεται όταν υπάρξει μια τάση ανάστροφης πολικότητας ως προς την πόλωση του υλικού.



Εικόνα 3 Αναπαράσταση Αντίστροφου Πιεζοηλεκτρικού Φαινομένου [4]

Συμπερασματικά, στις μέρες μας τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά είναι το πιο ευρέως γνωστό χρησιμοποιούμενο υλικό στην κατασκευή πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, είναι δημοφιλείς σε έξυπνες κατασκευές σε εφαρμογές ελέγχου κραδασμών. Χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες και ως ενεργοποιητές σε δομικά συστήματα ελέγχου κραδασμών και παρέχουν εξαιρετικές δυνατότητες ενεργοποίησης και ανίχνευσης. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε σύνθετες κατασκευές μπορούν να έχουν τον ρόλο των αισθητήρων σύμφωνα με το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο καθώς επίσης και τον ρόλο των ενεργοποιητών ή διεγερτών με βάση το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ταυτόχρονα ως αισθητήρες και ως διεγέρτες, λόγω της φύσης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση δομικών ελαττωμάτων και τη παρακολούθηση ταλαντώσεων καταστολή δονήσεων. Τέλος, η χρήση του πιεζοηλεκτρισμού είναι εφικτή για την μέτρηση και τον έλεγχο της συχνότητας καθώς και την παραγωγή ρεύματος εφαρμογές. [5]

## 2.2 Κυκλώματα Παραδιακλάδωσης

Τα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης αποτελούνται από μία ηλεκτρική εμπέδηση, η οποία με τη σειρά της αποτελείται από στοιχεία όπως αντίσταση, επαγωγή ή χωρητικότητα σε κάθε συνδυασμό. Τα στοιχεία αυτά λειτουργούν παθητικά και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας ή την μετατροπή της από ηλεκτρική σε μηχανική ή θερμική αλλά όχι για να παράξουν ενέργεια και χωρίς να ενισχύουν την ισχύς στην έξοδο τους. Τα συστήματα ελέγχου κραδασμών με συνδυασμό την χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων ως αποσβεστήρες, μειώνουν τους κραδασμούς. Η παράλληλη σύνδεση με το σύστημα που δονείται μπορεί να μειώσει τους τους κραδασμούς.

Συγκεκριμένα ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας συνδέεται στο σύστημα και ενσωματώνεται με το κύκλωμα παραδιακλάδωσης. Ο μετατροπέας είναι αυτός που μετράει την δυναμική και με βάση αυτού παράγει την μηχανική δύναμη που είναι ανάλογη της τάσης. Έτσι προκύπτει η μείωση της δόνησης της δομής καθώς η μηχανική αυτή δύναμη εφαρμόζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση κίνησης από την δόνηση.

Τα παραδιακλαδωμένα κυκλώματα σε συνδυασμό με την πιεζοηλεκτρική τεχνολογία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές για τον έλεγχο μιας ιδιομορφής καθώς και για έλεγχο πολλών ιδιομορφών. Η διαφορά τους με τις κλασικές παθητικές τεχνικές απόσβεσης είναι ότι λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και ο έλεγχος γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Επιπροσθέτως, έχουν μεταξύ τους αρκετά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην διάρκεια των εφαρμογών τους, τα οποία φαίνονται αναλυτικά στο παρακάτω πίνακα. [6],[7]

*Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά Συστημάτων Παραδιακλάδωσης μίας ιδιομορφής*

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
ΜΙΑΣ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ	Εύκολη ρύθμιση και εύκολη εφαρμογή	Μέτριας απόδοσης, περιορισμένης δυνατότητας και εφαρμοσιμότητας

### 2.2.1 Κατηγορίες κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης

Τα συνεχή δυναμικά συστήματα που περιλαμβάνουν διαφορικές εξισώσεις περιέχουν ως επί το πλείστον παραμέτρους. Μπορεί να συμβεί μια μικρή μεταβολή σε μια παράμετρο και ως αποτέλεσμα να έχει σημαντικό αντίκτυπο στη λύση. Όπως προαναφέρθηκε, τα κυκλώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε παθητικά κυκλώματα και σε ενεργά κυκλώματα. Ενεργά χαρακτηρίζονται τα κυκλώματα στα οποία τα στοιχεία του τροφοδοτούν ενέργεια σε αυτό, για παράδειγμα αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με κάποια πηγή ρεύματος, τάσης ακόμα και με μια γεννήτρια. Ταυτόχρονα, παθητικά χαρακτηρίζονται τα κυκλώματα στους οποίους τα στοιχεία που δέχονται ενέργεια, την απορροφούν ή την μετατρέπουν και δεν την παράγουν, για παράδειγμα μπορούν να περιλαμβάνονται από επαγωγή, αντίσταση ή πυκνωτή. Η κατηγοριοποίηση των κυκλωμάτων μπορεί να οριστεί χωρίζοντας τα ως γραμμικά και μη γραμμικά. Η διαφορά τους είναι ότι στα πρώτα οι παράμετροι του κυκλώματος είναι σταθεροί και δεν αλλάζουν συγκριτικά με το ρεύμα και την τάση ενώ στα δεύτερα οι παράμετροι δεν είναι σταθεροί και διαφέρουν σε σχέση με το ρεύμα και την τάση. Αυτή η εργασία θα ασχοληθεί με την χρήση παθητικών γραμμικών κυκλωμάτων συντονισμού μιας ιδιομορφής με χρήση κυκλώματος “Αντίστασης-Πηνίου” για απόσβεση και πολλών ιδιομορφών με χρήση κυκλώματος “ροής ρεύματος” [10],[11],[12].

Τα κυκλώματα που θα μελετήσουμε είναι, το Βραχυκύκλωμα (short circuit) και το Ανοιχτό κύκλωμα (open circuit). Συγκεκριμένα :

Βραχυκυκλωμένο (short circuit) αποτελείται από τα εξής:

- Έναν αντιστάτη με μηδενική αντίσταση ( $R = 0$ )
- Άπειρη αγωγιμότητα ( $G \rightarrow \infty$ ) , συγκεκριμένα περιέχει μηδενική διαφορά δυναμικού στα άκρα του.
- Το ρεύμα βραχυκυκλώματος έχει αυθαίρετη τιμή ( καθορίζεται από τα υπόλοιπα στοιχεία και τη δομή του κυκλώματος). Ο τρόπος εφαρμογής του βραχυκυκλώματος είναι η σύνδεση των καλωδίων του κυκλώματος.

Ανοιχτό κύκλωμα (open circuit) αποτελείται από τα εξής :

- Έναν αντιστάτη με άπειρη αντίσταση ( $R \rightarrow \infty$ )
- Μηδενική αγωγιμότητα ( $G = 0$ ), στον οποίο διέρχεται ρεύμα που εξαρτάται από το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του.
- Η τάση στα άκρα του αντιστάτη έχει αυθαίρετη τιμή( καθορίζεται από τα υπόλοιπα στοιχεία και τη δομή του κυκλώματος). Ο τρόπος εφαρμογής ανοιχτού κυκλώματος είναι η αποσύνδεση των καλωδίων του κυκλώματος.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί και ότι ένα παραδιακλαδόμενο κύκλωμα συντονισμού ονομάζεται το σύστημα ελέγχου που προσαρμόζεται, ώστε να ανταποκριθεί στις ταλαντώσεις της δομής με σκοπό να γίνει απόσβεση των ταλαντώσεων και μείωση των κραδασμών σε αυτή [17].

### 2.2.2 Εξισώσεις Πιεζοηλεκτρικών Παραδιακλαδωμένων Συστημάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τις εξισώσεις που περιγράφουν ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών σύμφωνα με δημοσίευση του Jeon (2009) [13]. Η παρουσίαση βασίζεται στην IEEE πρότυπο για τον πιεζοηλεκτρισμό (IEEE Standard On Piezoelectricity, 1987) το οποίο είναι ευρέως αποδεκτό ως μια καλή αναπαράσταση των ιδιοτήτων των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Το πρότυπο IEEE προϋποθέτει ότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι γραμμικά. Έχει αποδειχτεί όμως, ότι σε χαμηλά ηλεκτρικά πεδία και σε χαμηλά επίπεδα μηχανικών τάσεων τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν γραμμικό προφίλ. Ωστόσο, μπορεί να παρουσιάσουν σημαντική μη γραμμικότητα εάν λειτουργούν σε υψηλό ηλεκτρικό πεδίο ή υψηλό επίπεδο μηχανικής καταπόνησης. Οι περιγραφικές ηλεκτρομηχανικές εξισώσεις για ένα γραμμικό πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορούν να γραφούν ως εξής [14] :

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e \\ e^t & \varepsilon^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ E \end{Bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 1}$$

$T$  : Διάνυσμα Τάσης [N/m<sup>2</sup>]

$D$  : Διάνυσμα Ηλεκτρικής Μετατόπισης [C/m<sup>2</sup>]

$S$  : Διάνυσμα Παραμόρφωσης

$E$  : Διάνυσμα Ηλεκτρικού Πεδίου [V/m]

$c^E$  : Πίνακας Ελαστικής Ακαμψίας, όπου υπολογίζεται σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο

$e$  : Πίνακας Πιεζοηλεκτρικής Τάσης

$\varepsilon^s$  : Διηλεκτρικός Πίνακας, όπου υπολογίζεται σε σταθερή μηχανική παραμόρφωση

Σύμφωνα με την εφαρμογή της αρχής του Hamilton και τη διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για ηλεκτρομηχανολογικά συζευγμένα συστήματα, έχουμε το εξής :

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{w} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{w} \\ \dot{v} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & \Theta \\ \Theta^t & -C_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ q \end{Bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 2}$$

όπου

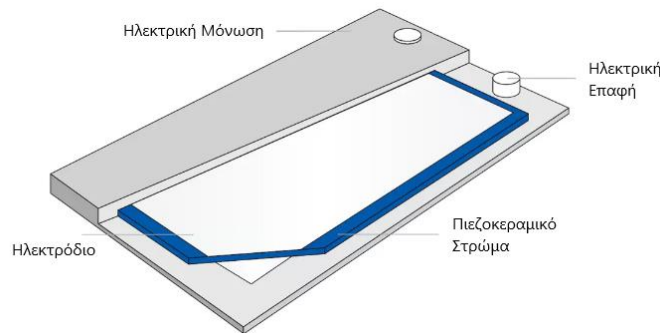
- $[M]$  ,  $[C]$  ,  $[K]$  και  $[\Theta]$  : αποτελούν τους καθολικούς πίνακες μάζας, απόσβεσης, ακαμψίας και της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης ολόκληρης της κατασκευής και των πιεζοηλεκτρικών υλικών, ξεχωριστά.
- $[C_p]$  : είναι ο πίνακας της πιεζοηλεκτρικής χωρητικότητας
- $[F]$  : είναι το διάνυσμα της εφαρμοζόμενης μηχανικής δύναμης
- $[q]$  : το διάνυσμα του ηλεκτρικού φορτίου
- $[w]$  : η γενικευμένη μηχανική συντεταγμένη
- $[v]$  : είναι η γενικευμένη ηλεκτρική συντεταγμένη που είναι η φυσική τάση στο πιεζοηλεκτρικό



### 2.2.3 Εφαρμογές Πιεζοηλεκτρικών Υλικών, Επιθεμάτων και Συστημάτων

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά είναι το πιο ευρέως γνωστό χρησιμοποιούμενο υλικό στην κατασκευή πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, είναι δημοφιλείς και χαρακτηρίζονται ως “έξυπνα υλικά” λόγω της ενσωμάτωσής τους σε δομικές κατασκευές και του ελέγχου μέσω αυτών σε ολόκληρη την συμπεριφορά ενός συστήματος. Με αφορμή αυτό, μπορεί να οριστεί το όλο σύστημα ως “έξυπνη κατασκευή” ή “ευφυής δομή” [5].

Με σκοπό την προστασία του πιεζοκεραμικού υλικού από άλλες δυνάμεις έχουν αναπτυχθεί διάφορες μηχανικές λύσεις. Συγκεκριμένα, πρόκειται για σύνθετα υλικά από μία ή και περισσότερες λεπτές πιεζοκεραμικές πλάκες εξοπλισμένες με ηλεκτρόδια και ηλεκτρικές μονώσεις από ένα εξωτερικό περίβλημα. Ανάλογα με την περίπτωση, τα επιθέματα αυτά μπορούν να κολληθούν, να συγκολληθούν ή να στερεωθούν σε δύο σημεία επαφής. Τα επιθέματα μετατροπέων μπορούν να έχουν την λειτουργία ενός αισθητήρα και ενεργοποιητή με την επαφή πολλών στρωμάτων. Με την χρήση αισθητήρα είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ως τροφοδοσία τάσης για το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο ενώ με την λειτουργία ως ενεργοποιητή μπορούν να αποσβέσουν ανεπιθύμητες δονήσεις [15].



Εικόνα 4 Σχεδιασμός Πιεζοηλεκτρικού Μετατροπέα [15]

Τα τελευταία χρόνια σύμφωνα με τις ραγδαίες εξελίξεις της τεχνολογίας, τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές λόγω της αποδοτικότητας και της ικανότητάς τους να ελέγχουν τους κραδασμούς και να μειώνουν το θόρυβο σε πραγματικό χρόνο. Κάποιες από τις εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση παραμορφώσεων σε διάφορες κατασκευές ή την απόσβεση ταλαντώσεων σε αυτές. Συγκεκριμένες εφαρμογές παρουσιάζονται στις εξής κατηγορίες της:

- ο Αεροδιαστημικής
- ο Πολιτικής μηχανικής
- ο Μηχανολογίας
- ο Αυτοκινητοβιομηχανίας
- ο Ακουστικής
- ο Ρομποτικής
- ο Έξυπνης δομής ακόμα και σε αθλητικό ή ιατρικό εξοπλισμό

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών συστημάτων

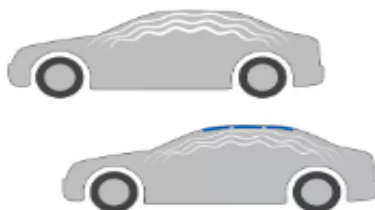
Σε γέφυρες και άλλες πολιτικές κατασκευές για τη μείωση των δονήσεων που προκαλούνται από τον άνεμο, την κυκλοφορία και άλλες διεγέρσεις . Ολόκληρες περιοχές μπορούν να παρακολουθηθούν χρησιμοποιώντας τους μετατροπείς ως ενεργοποιητές με την παραγωγή κυμάτων ή ως αισθητήρες με το να λαμβάνουν αυτά τα κύματα.

Επίσης, σε έξυπνες δομές, όπως έξυπνες επιφάνειες κτιρίων, για να παρέχουν παρακολούθηση και έλεγχο της δομικής συμπεριφοράς σε πραγματικό χρόνο



*Εικόνα 5 Τοποθέτηση  
Πιεζοηλεκτρικών Συστημάτων σε  
ένα διυλιστήριο πετρελαίου [15]*

Σε εξαρτήματα αυτοκινήτων και οχήματα για τη μείωση του θορύβου του δρόμου και τη βελτίωση της άνεσης οδήγησης αποσβένοντας ή μειώνοντας τις δονήσεις.



*Εικόνα 6 Τοποθέτηση  
Πιεζοηλεκτρικών Επιθεμάτων  
σε ένα αυτοκίνητο [15]*

Επιπλέον, σε διάφορες ακουστικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου του θορύβου σε κτίρια και της ηχομόνωσης σε στούντιο ηχογράφησης. Τέλος, σε αθλητικό εξοπλισμό, όπως ρακέτες τένις και μπαστούνια του γκολφ, για τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση των κραδασμών και των δονήσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Γενικές εξισώσεις τρισδιάστατης ελαστικότητας και πιεζοηλεκτρισμού

Οι κατασκευές είναι γενικά τρισδιάστατα πιεζοηλεκτρικά σώματα, τα οποία ακολουθούν τους κανόνες της μηχανικής του στερεού σώματος. Όταν το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι λεπτό και έχει μακρύ σώμα ακολουθούνται οι απαραίτητοι κανόνες και η θεωρία του ελαστικού παραμορφώσιμου σώματος έχει την δυνατότητα να απλοποιηθεί σε θεωρία δοκού σύμφωνα με τις αρχές της τεχνικής μηχανικής. Ο έλεγχος συντονισμού διαμορφώνεται από καθαρά μηχανικά συστήματα και τα ανάλογα ηλεκτρικά κυκλώματά τους. Βέλτιστες τιμές επαγωγής και αντίστασης βρίσκονται από την ελαχιστοποίηση της μετατόπισης σε περιοχές γύρω από τις ιδιοσυχνότητες. Ένα παράδειγμα πειραματικής ρύθμισης δείχνει ότι οι απαιτούμενες τιμές επαγωγής δεν μπορούν να ικανοποιηθούν με τα τυπικά παθητικά εξαρτήματα.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τις εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρομηχανικό ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Η παρουσίαση βασίζεται στην IEEE πρότυπο για τον πιεζοηλεκτρισμό (IEEE Standard on Piezoelectricity, 1987), το οποίο είναι ευρέως αποδεκτό ως ένα καλό αναπαράσταση των ιδιοτήτων των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Το πρότυπο IEEE υποθέτει ότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι γραμμικά. Αποδεικνύεται ότι σε χαμηλές ηλεκτρικές πεδία και σε χαμηλά επίπεδα μηχανικών τάσεων τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν γραμμικό προφίλ. Ωστόσο, μπορεί να παρουσιάσουν σημαντική μη γραμμικότητα εάν λειτουργούν υπό υψηλό ηλεκτρικό πεδίο ή υψηλό επίπεδο μηχανικής καταπόνησης. Οι περιγραφικές ηλεκτρομηχανικές εξισώσεις για τρισδιάστατο γραμμικό πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορούν να γραφούν ως εξής [14] :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} + d_{kij} E_k$$

*Εξίσωση 3*

$$D_i = \epsilon_{ijk} \sigma_{jk} + \epsilon_{00i} E_i$$

Όπου,

$\epsilon_{ij}$  —> διάνυσμα τάσεων έντασης (m/m)

$\sigma_{ij}$  —> διάνυσμα τάσεων (N/m<sup>2</sup>)

$D_i$  —> διάνυσμα της ηλεκτρικής μετατόπισης (C/m<sup>2</sup>)

$E_k$  —> διάνυσμα του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

$c_{ijkl}$  —> ελαστικότητα υπό σταθερό ηλεκτρικό πεδίο

$d_{kij}$  —> πιεζοηλεκτρικές σταθερές

$\epsilon_{00i}$  —> ηλεκτρική διαπερατότητα

Επιπλέον, οι δείκτες D, E και σ αντιπροσωπεύουν μετρήσεις που έχουν ληφθεί σε σταθερή ηλεκτρική μετατόπιση, σταθερό ηλεκτρικό πεδίο και σταθερή τάση. Το κεραμικό είναι ισοτροπικό στο επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση πόλωσης. Στην περίπτωση αυτή όταν το κεραμικό πολωθεί κατά μήκος της κατεύθυνσης '3', τότε με τον συμβολισμό Voigt (Voigt notation) το παραπάνω σύστημα παίρνει την μορφή μήτρας [16]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{32} \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \epsilon_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{22}^\sigma & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 4}$$

Τα κανονικά κεραμικά PZT είναι ισότροπα στο επίπεδο κάθετα στην κατεύθυνση πόλωσης  
 $\rightarrow (d_{31} = d_{32} \text{ και } d_{15} = d_{24})$ .

Επίσης, το μόνο μη μηδενικό στοιχείο του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατά μήκος του '3' και το PZT είναι ελεύθερο κατά μήκος '2' και '3', δηλαδή  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  ( $\sigma_y = \sigma_z = 0$ ).

Οπότε η εξίσωση παίρνει την μορφή [21]:

$$\varepsilon_1 = s_{11}^E \sigma_1 + d_{31} E_3$$

Εξίσωση 5

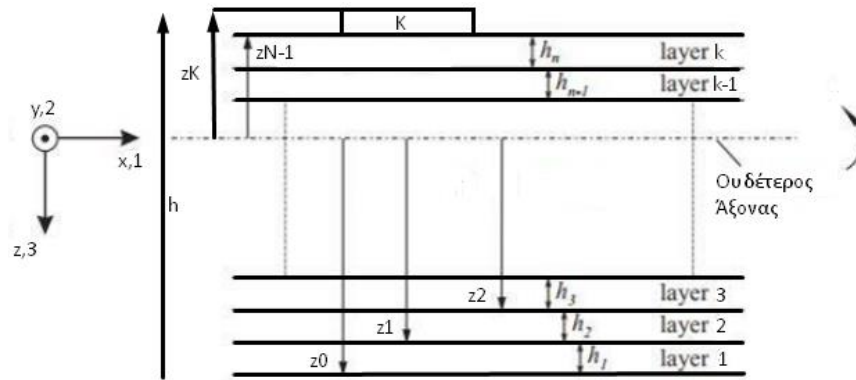
$$D_3 = d_{31} \sigma_1 + \epsilon_{33}^\sigma E_3$$

Συνεπώς,

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \epsilon_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{22}^\sigma & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad \text{Εξίσωση 6}$$

### 3.2 Πολυστρωματική δοκός με πιεζοηλεκτρικά ένθετα

Ένας πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής που αποτελείται από  $n$  στρώματα μπορεί επίσης να περιγραφεί ως δοκός. Ωστόσο, είναι σκόπιμο να οριστεί η θέση του ουδέτερου άξονα ως η απόσταση από το κάτω άκρο του πολυστρωματικού λυρισμού της δοκού [17],[18].



Εικόνα 7: Πολυστρωματική Δοκός με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα[17]

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει λόγω σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων σε δοκό, ερευνούμε την γενική διατύπωση που περιγράφεται στις δύο διαστάσεις, οδηγώντας σε μοντέλα μειωμένης τάξεως. Ακολουθώντας τις μηχανικές παραδοχές του Euler-Bernoulli με την κλασσικό πολυστρωματική θεωρία μοντελοποιείται η δοκός. Το πεδίο μετατόπισης είναι το ακόλουθο [17]:

$$u_x(x, z, t) = u(x, t) + z\theta(x, t) \quad \text{Εξίσωση 7}$$

$$u_z(x, z, t) = w(x, t) \quad \text{Εξίσωση 8}$$

Όπου,

- αξονικές εγκάρσιες μετατοπίσεις ( $u_x, u_y$ )
- αξονική μετατόπιση κεντρικής γραμμής της δέσμης ( $u$ )
- εγκάρσια μετατόπιση ( $w$ )
- περιστροφή ινών ( $\theta$ ), η οποία ορίζεται :

$$\theta = \frac{-\partial w}{\partial x} \quad \text{Εξίσωση 9}$$

Έχοντας τη σχέση κλίσης μεταξύ του γραμμικοποιημένου τανυστή παραμόρφωσης ( $\epsilon_{kl}$ ) και της μετατόπισης ( $u_k$ ) και τη παραπάνω περιγραφόμενη κινηματική, η αξονική παραμόρφωση μπορεί να γραφεί παίρνει την μορφή :

$$\epsilon_1 = e + z\kappa \quad \text{Εξίσωση 10}$$

Όπου,

- Παραμόρφωση στρώματος  $e$  :

$$e = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Εξίσωση 11}$$

- Καμπυλότητα  $k$  :

$$k = \frac{-\partial^2 w}{\partial^2 x} \quad \text{Εξίσωση 12}$$

Για την συγκεκριμένη περίπτωση , οι πιεζοηλεκτρικές στρώσεις είναι πολωμένες στην κατεύθυνση (z.3) με ταυτόχρονη πόλωση ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται κάθετα σε αυτήν. Η επίπεδη τάση ( $\sigma_2=\sigma_3=\sigma_y=\sigma_z=0$ ) ως υπόθεση λόγω διευκόλυνσης . Έτσι, οι γραμμικές πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις παίρνουν την μορφή :

$$\sigma_1^k = c_{11}^{-k} e_1 - e_{31}^{-k} E_3 \quad \text{Εξίσωση 13}$$

$$D_3^k = e_{31}^{-k} e_1 - \epsilon_{33}^{-k} E_3 \quad \text{Εξίσωση 14}$$

Όπου,

- $\square_1^{\square}$ , αξονική τάση
- $\square_3^{\square}$ , εγκάρσια ηλεκτρική μετατόπιση στο k-ιστό στρώμα
- $\square_{11}^{-k}$ , η τροποποιημένη ελαστική δυσκαμψία σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο
- $\square_{31}^{-\square}$ , η τροποποιημένη σταθερά πιεζοηλεκτρισμού
- $\square_{33}^{-\square}$ , η τροποποιημένη διηλεκτρική διαπερατότητα σε σταθερή παραμόρφωση

Συγκεκριμένα, έστω επίπεδη τάση μαζί με εγκάρσια ισοτροπία του υλικού στο επίπεδο (1,2) έχουμε :

$$c_{11}^{-k} = Y_1^k = c_{11} + \frac{c_{12}^2 c_{33} + c_{13}^2 c_{11} - 2c_{12} c_{13} c_{23}}{\Delta} \quad \text{Εξίσωση 15}$$

$$e_{31}^{-k} = e_{31} - \frac{c_{12} c_{33} - c_{11} c_{23}}{\Delta} e_{31} - \frac{c_{13} c_{11} - c_{12} c_{23}}{\Delta} e_{33} \quad \text{Εξίσωση 16}$$

$$\epsilon_{33}^{-k} = \epsilon_{33} + \frac{c_{33} e_{31}^2 + c_{11} e_{33}^2 - 2c_{23} e_{31} e_{33}}{\Delta} \quad \text{Εξίσωση 17}$$

$$\text{όπου,} \quad \Delta = c_{11} c_{33} - c_{23}^2 \quad \text{Εξίσωση 18}$$

Όπου,  $Y_1^k$  , ο συντελεστής Young του k-ιστού στρώματος στο επίπεδο (1,2) και οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν όταν εισάγουμε την υπόθεση επίπεδης τάσης στις εξισώσεις σε συνδυασμό τον προσανατολισμό των τάσεων σε επίπεδο μαζί με την ισοτροπία των δυνάμεων στο επίπεδο (1,2).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Πειραματική Διερεύνηση

#### 4.1.1 Εισαγωγή

Η ενότητα αυτή όπως έχει αναφερθεί ασχολείται με την απόσβεση των δονήσεων σε κατασκευές με την χρήση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων και παθητικών ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Συγκεκριμένα εξετάζει τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών για την μετατροπή μηχανικής ενέργειας δονούμενων δομών σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία εν συνεχεία απορρίπτεται ως θερμότητα μέσα σε μια αντίσταση. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί ένα είδος παθητικού ηλεκτρικού κυκλώματος το οποίο περιλαμβάνει μια επαγωγή και μια ηλεκτρική αντίσταση. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η αποτελεσματική μείωση των δονήσεων χωρίς κάποια αλλαγή στην μηχανική της δομή. Ταυτόχρονα, γίνεται χρήση παθητικών πηνίων στο κύκλωμα αντί για τις ενεργές πηγές ρεύματος ή τις σύνθετες λύσεις που συνηθίζονται.

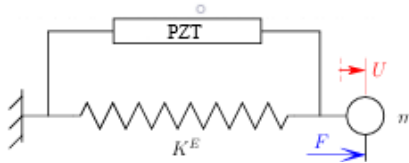
Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται χρήση ενός μοντέλου ελατηρίου-μάζας. Σε αυτό το μοντέλο, το πιεζοηλεκτρικό υλικό συνδέεται παράλληλα με ένα ελατήριο που αντιπροσωπεύει τη συνολική ακαμψία της δομής όταν ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει ένα πηνίο και έναν αντιστάτη, τα οποία επηρεάζουν τον έλεγχο των δονήσεων. Τέλος, αναλύει μαθηματικά μοντέλα και παρουσιάζει τα αντίστοιχα ηλεκτρικά κυκλώματα που επιτρέπουν τον υπολογισμό και τον έλεγχο της απόδοσης του συστήματος ελέγχου δονήσεων.

Οι βέλτιστες τιμές της αντίστασης και του πηνίου υπολογίζονται για να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη τιμή της συνάρτησης μεταφοράς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι βέλτιστες τιμές για το πηνίο και την αντίσταση υπολογίζονται από αναλυτικούς υπολογισμούς και εξαρτώνται από τον συντελεστή σύζευξης του πιεζοηλεκτρικού υλικού με τη δομή.

Συνοπτικά, η απόσβεση με πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη χρήση συγκεκριμένων τιμών αντίστασης και πηνίου που εξαρτώνται από το συγκριτικό κρίσιμο κοινό πολλαπλασιαστή και από τις χαρακτηριστικές συχνότητες της δομής.

#### 4.1.2 Μοντέλο Ελατηρίου-Μάζας

Η έννοια της παράκαμψης συντονισμού με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών αναφέρεται στη δυνατότητα ελέγχου μιας μηχανικής δομής μέσω της σύνδεσης ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού σε αυτήν. Για να γίνει κατανοητή η έννοια αρκεί να παρατηρηθεί μια πολύ απλή δομή, όπως ένα ελατήριο που συνδέεται με μια μάζα. Αυτό το ελατήριο αντιπροσωπεύει τη σταθερότητα της δομής όταν το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι σε κατάσταση βραχυκυκλώματος, δηλαδή όταν δεν λειτουργεί. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να ελέγχουμε τον τρόπο με τον οποίο αυτή η δομή ταλαντώνεται, συνδέοντας ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό παράλληλα με αυτήν. Αυτό το πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορεί να αντιδρά στις ταλαντώσεις και να δημιουργήσει επιπλέον ελατήρια ή αποσβεστική δύναμη, που επηρεάζουν τον τρόπο κίνησης της δομής. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για τον έλεγχο και τη μείωση των ταλαντώσεων της δομής, χωρίς να αλλάζουμε σημαντικά τη μηχανική δομή της [19].



Εικόνα 8 Απεικόνιση μοντέλου ελατηρίου-μάζας με σύνδεση πιεζοηλεκτρικού υλικού για τον έλεγχο μιας μηχανικής δομής[19]

#### 4.1.2.1 Εξισώσεις απόσβεσης συντονισμού

Η πιεζοηλεκτρική σύζευξη δηλώνεται :

$$N = K^E U - eV$$

Εξίσωση 19

$$q = eU + C^E V$$

Όπου,

$N$  : η διαμήκης δύναμη στο πιεζοηλεκτρικό υλικό

$U$  : η μετατόπιση της μάζας  $m$

$V$  : η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων

$q$  : η μετατόπιση του ηλεκτρικού φορτίου

$e$  : σταθερά ( N/V ή C/m), ο συνολικός πιεζοηλεκτρικός συντελεστής

$C$  : η φραγμένη χωρητικότητα (η πιεζοηλεκτρική χωρητικότητα που μετριέται όταν εμποδίζεται η μετατόπιση του του μηχανικού συστήματος ( $U = 0$ ) )

Έστω η  $F$  , μια εξωτερική δύναμη που εφαρμόζεται στη μάζα  $m$  , διαπιστώνεται από την Εικόνα 8. ότι  $m\ddot{U} = FN$  και η Εξίσωση 46, τότε ορίζεται :

$$m\ddot{U} = F - K^E U + eV$$

Εξίσωση 20

$$q = eU + C^E V$$

Η φυσική γωνιακή συχνότητα στον συντονισμό της μηχανικής δομής όταν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι βραχυκυκλωμένο, ( $V=0$ ):

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K^E}{m}}$$

Εξίσωση 21

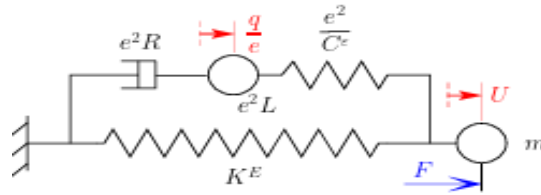
Όταν η παράκαμψη αποτελείται από ένα πηνίο  $L$  σε σειρά με μία αντίσταση  $R$ , τότε η σύνθετη αντίσταση  $Z(\omega) = R + j\omega L$  οδηγεί :

$$V = -R\dot{q} - L\ddot{q}$$

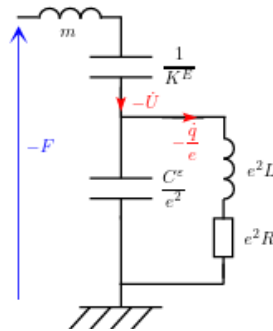
Εξίσωση 22

Το πηνίο που χρησιμοποιείται δεν υπόκειται σε μαγνητικό κορεσμό με σκοπό η αυτεπαγωγή ( $L$ ) να μην εξαρτάται από το πλάτος του ρεύματος, έτσι βάζοντας την Εξίσωση 22 στην Εξίσωση 20 προκύπτει :





Εικόνα 9 Μηχανική Αναπαράσταση μιας συντονισμένης πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης[19]



Εικόνα 10 Ηλεκτρική Αναπαράσταση μιας συντονισμένης πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης[19]

$$m\ddot{U} = F - K^E U - \frac{e^2}{C^\varepsilon} \left( U - \frac{q}{e} \right)$$

Εξίσωση 23

$$e^2 L \frac{\ddot{q}}{e} = -e^2 R \frac{\dot{q}}{e} + \frac{e^2}{C^\varepsilon} \left( U - \frac{q}{e} \right)$$

Ο αποσβεστήρας δεν βρίσκεται μεταξύ των δύο κινούμενων μαζών αλλά μεταξύ της προστιθέμενης μάζας και του εδάφους, πράγμα που σημαίνει ότι μια εγγενής απόσβεση είναι ισοδύναμη με την περίπτωση ανοικτού κυκλώματος. Τα μηχανικά μοντέλα της Εικόνας 9 μπορούν να μετατραπούν στην ηλεκτρική του ανά λογία αναδιατυπώνοντας την Εξίσωση 23 ως εξής:

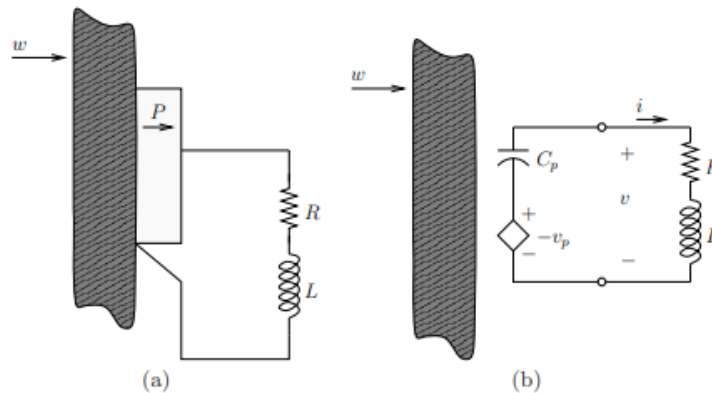
$$-F = -j\omega m\dot{U} - \frac{K^E}{j\omega} \dot{U} + \frac{e^2}{j\omega C^\varepsilon} \left( \frac{\dot{q}}{e} - \dot{U} \right)$$

Εξίσωση 24

$$-j\omega e^2 L \frac{\dot{q}}{e} - e^2 R \frac{\dot{q}}{e} = \frac{e^2}{j\omega C^\varepsilon} \left( \frac{\dot{q}}{e} - \dot{U} \right)$$

Προκειμένου να εισαχθεί το ηλεκτρικό κύκλωμα στην Εικόνα 10. Η Εξίσωση 24 δείχνει ότι το  $-\dot{q}/e$  αντιστοιχεί στο ρεύμα που διαρρέει τον κλάδο RL που προκύπτει και το πηνίο  $m$  αντιπροσωπεύει τη μάζα της μηχανικής κατασκευής. Όταν υπάρχουν ισοδυναμίες μεταξύ μάζας και επαγωγής, αποσβεστήρα και αντιστάτη και ελατηρίου και πυκνωτή. Αυτό αναφέρεται στην άμεση ηλεκτρομηχανική αναλογία [19]. Τέλος, το δυναμικό σύστημα ελατηρίου- μάζας- απόσβεσης, προσφέρει τον έλεγχο με ελατήριο-μάζα, σε συνδυασμό με τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και τη σύνδεση τους σε παραδιακλαδωμένο κύκλωμα και ορίζεται ως ένας έλεγχος.

#### 4.1.2.2 Εξισώσεις Κυκλώματος Παραδιακλάδωσης «Αντίστασης-Πηνίου» (RL) για απόσβεση μιας ιδιομορφής



Εικόνα 11 (a) Πιεζοηλεκτρικός Μετατροπέας με κύκλωμα διακλάδωσης (RL) (b) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα [1]

Επέκταση της τεχνικής της απόσβεσης μίας ιδιομορφής για να επιτρέψει την απόσβεση πολλαπλών ιδιομορφών δόνησης καταστολής ταλαντώσεων έχει αποτελέσει αντικείμενο έντονης έρευνας τα τελευταία χρόνια. Μια λύση είναι να προσαρτηθεί ένας αριθμός πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων σε μια δομή, ο καθένας από τους οποίους παρακάμπτεται από ένα κύκλωμα RL συντονισμένο σε έναν συγκεκριμένο τρόπο. Η κύρια εστίαση σε αυτόν τον τομέα, ήταν η επινόηση μεθόδων απόσβεσης κραδασμών πολλαπλών τρόπων που χρησιμοποιούν έναν μόνο πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα [13].

Μια διαδικασία συντονισμού με πιεζοηλεκτρική παράκαμψη βασίζεται στα προβλήματα ιδιοτιμών που σχετίζονται με βραχυκύκλωμα και ανοικτό κύκλωμα των πιεζοηλεκτρικών περιοχών που συνδέονται με μια δονούμενη δομή. Ενώ οι συχνότητες βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος λαμβάνονται απευθείας από τις ιδιοτιμές, η σχετική ηλεκτρική εξίσωση προσδιορίζει περαιτέρω ένα διαμορφωτικό φορτίο ως βραχυκύκλωμα δύναμη αντίδρασης του κυκλώματος και μια νέα διαμορφωτική τάση από την ηλεκτρική εκτροπή στο όριο του ανοικτού κυκλώματος. Ο συντονισμός διακλάδωσης λαμβάνεται από τη χαρακτηριστική εξίσωση για τον τρόπο δόνησης, στην οποία ο υπολειπόμενος τρόπος διόρθωση αναπαρίσταται από την αποτελεσματική διαμορφωτική χωρητικότητα. Η διαδικασία συντονισμού με μια αποτελεσματική διαμορφωτική χωρητικότητα γενικεύεται σε πολλαπλούς πιεζοηλεκτρικούς τομείς με ανεξάρτητες διακλαδώσεις για την ταυτόχρονη απόσβεση πολλαπλών τρόπων δόνησης. Η ακρίβεια

της προτεινόμενης παράκαμψης συντονισμού καταδεικνύεται από ένα παράδειγμα δοκού με δύο πιεζοκεραμικά υλικά και ανεξάρτητες αντιστατικές-επαγωγικές διακλαδώσεις. Μπορεί να εφαρμοστεί απόσβεση μονής λειτουργίας για τη μείωση των δονήσεων διαφόρων δομικών τρόπων με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων και απόσβεσης κυκλωμάτων.

Το κύκλωμα αντίσταση-πηνίο (R-L) είναι ένα παθητικό σύστημα απόσβεσης που χρησιμοποιείται για τη μείωση της απόκρισης δόνησης της ιδιομορφής μιας κατασκευής, η οποία είναι μια φυσική συχνότητα δόνησης. Το κύκλωμα διακλάδωσης R-L λειτουργεί με την προσθήκη ενός ηλεκτρικού στοιχείου απόσβεσης παράλληλα με το δονούμενο σύστημα. Το ηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από μια αντίσταση και ένα πηνίο (επαγωγέας), τα οποία συνδέονται σε σειρά. Όταν μια δομή δονείται στην ιδιοσυχνότητά της, η κίνηση της δομής δημιουργεί μια ηλεκτροκινητική δύναμη στο πηνίο. Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη παράγει ρεύμα που διαρρέει τον αντιστάτη, παράγοντας μια δύναμη απόσβεσης ανάλογη με το μέγεθος του ρεύματος. Η δύναμη απόσβεσης αντιτίθεται στην ταλάντωση της δομής, μειώνοντας αποτελεσματικά τη δονητική της κίνηση. Η μεγιστοποίηση της ποσότητας της ενέργειας στα ηλεκτρικά στοιχεία είναι το βασικό κριτήριο για τη βελτιστοποίηση. Τα πειράματα με δοκούς και πλάκες προβόλου δείχνουν καλή συμμόρφωση της προτεινόμενης μεθόδου με τις κοινές μεθόδους ρύθμισής. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ρύθμισης, εντοπίζονται οι βέλτιστες παράμετροι των παραδιακλαδωμένων από δεδομένα της μετρούμενης εμπίδησης, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ενέργεια στο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα. [5]

Όταν μια συντονισμένη πιεζοηλεκτρική διακλάδωση συνδέεται σε μια μηχανική δομή, η απόδοση απόσβεσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί επιλέγοντας κατάλληλες τιμές αντίστασης και επαγωγής. Αν εστιάσουμε σε βελτιστοποίηση στη μετατόπιση  $U$  της μάζας  $M$ , τότε ο σκοπός να ελαχιστοποιήσουμε το μέγιστο της μεταφοράς της μετατόπισης λειτουργίας  $U/F$ , όπου η διέγερση εισόδου είναι μια αρμονική δύναμη  $F$  σταθερού εύρους. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών για μεγάλες τιμές των  $L$  και  $R$ . Σύμφωνα, με δημοσιεύσεις, όπως του Jeon (2009), του Deu (2014) και του Lossouarn (2017) για την διερεύνηση των τιμών αντίστασης και πηνίου, η μεθοδολογία που ακολουθείται και στην συγκεκριμένη έρευνα είναι η ακόλουθη [17], [19]:

Συντελεστής σύζευξης :

$$k_c = \sqrt{e^2/(K^E C^E)} \quad \text{Εξίσωση 25}$$

Ιδιοσυχνότητα παραδιακλάδωσης συντονισμού (η γωνιακή συχνότητα συντονισμού):

$$\omega_e = 1/\sqrt{LC^E} \quad \text{Εξίσωση 26}$$

Ανοιχτό κύκλωμα

Ιδιοσυχνότητα (η φυσική γωνιακή συχνότητα) ανοιχτού κυκλώματος ( $q=0$ ) :

$$\omega_0 = \sqrt{K^D/m} \quad \text{Εξίσωση 27}$$

Δυσκαμψία της δομής όταν το κύκλωμα παραδιακλάδωσης είναι ανοικτό ( $q=0$ ) :

$$K^D = K^E + e^2/C^E \quad \text{Εξίσωση 28}$$

Κλειστό κύκλωμα

Ιδιοσυχνότητα (η φυσική γωνιακή συχνότητα) βραχυκυκλωμένου κυκλώματος :

$$\omega_s = \sqrt{K^E/m} \quad \text{Εξίσωση 29}$$

Συντελεστής απόσβεσης :

$$\xi_e = \left(\frac{R}{2}\right)\sqrt{C^\varepsilon/L} \quad \text{Εξίσωση 30}$$

Ως συμπέρασμα, ο συντελεστής σύζευξης μπορεί να καθοριστεί από τις φυσικές συχνότητες του ανοιχτού και του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος όπως φαίνεται παρακάτω

$$k_c = \sqrt{\frac{e^2}{K^E C^\varepsilon}} = \sqrt{\frac{K^D - K^E}{K^E}} = \sqrt{\frac{\omega_0^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2}} \quad \text{Εξίσωση 31}$$

Σύμφωνα με τη δημοσίευση του Thomas et al. (2012) αξιοποιείται η πρόταση του για την βελτιστοποίηση της συντονισμένης παράκαμψης [17] .

Έχοντας σαν δεδομένο ότι η διέγερση εισόδου είναι μια δύναμη (F), μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς (D(ω) ).

Αναδιατύπωση μηχανικού και ηλεκτρικού μοντέλου ως εξής [18]:

$$m\ddot{U} + K^D U = F + \frac{e}{C^\varepsilon} q \quad \text{Εξίσωση 32}$$

$$\text{με } K^D = K^E + \frac{e^2}{C^\varepsilon}$$

Για πιεζοηλεκτρικά επιθέματα με ανοιχτό κύκλωμα (q=0)

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{1}{C^\varepsilon} q = \frac{e}{C^\varepsilon} U \quad \text{Εξίσωση 33}$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} \ddot{U} + U = \frac{F}{K^D} + \frac{e}{K^D C^\varepsilon} q \quad \text{Εξίσωση 34}$$

$$\frac{1}{\omega_\varepsilon^2} \ddot{q} + \frac{2\xi_e}{\omega_\varepsilon} \dot{q} + q = eU \quad \text{Εξίσωση 35}$$

Σε συνθήκες αρμονικής διέγερσης με βάση την Εξίσωση 35 έχουμε :

$$\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) U - \frac{e}{K^D C^\varepsilon} q = \frac{F}{K^D} \quad \text{και} \quad q = \frac{e}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_\varepsilon^2} + 2j\xi_e \frac{\omega}{\omega_\varepsilon^2}} U \quad \text{Εξίσωση 36}$$

Έχοντας την Εξίσωση 31 και τετραγωνίζοντας της προκύπτει ότι:

$$\frac{e^2}{K^D C^\varepsilon} = \frac{\omega_0^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2} \quad \text{Εξίσωση 37}$$

Άρα η αδιάστατη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς μετατόπισης, χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 35 γίνεται :

$$D(\omega) = \frac{U}{K^D} = \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2} + 2j\xi_e \frac{\omega}{\omega_e}}{\frac{\omega_s^2}{\omega_0^2} - \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\omega_e^2}\right)\omega^2 + \frac{\omega^4}{\omega_0^2\omega_e^2} + 2j\xi_e \frac{\omega}{\omega_e} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)} \quad \text{Εξίσωση 38}$$

Που δίνει,

$$|D(\omega)|^2 = \frac{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}\right]^2 + 4\frac{\omega^2}{\omega_e^2}\xi_e^2}{\left[\frac{\omega_s^2}{\omega_0^2} - \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{1}{\omega_e^2}\right)\omega^2 + \frac{\omega^4}{\omega_0^2\omega_e^2}\right]^2 + 4\frac{\omega^2}{\omega_e^2}\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right]^2\xi_e^2} \quad \text{Εξίσωση 39}$$

Η τελειοποίηση του συστήματος γίνεται με τον προσδιορισμό του  $\omega_e$  και του  $\xi_e$  , παράγοντες που ελαχιστοποιούν το μέγιστο της ποσότητας  $|D(\omega)|$  , συνεπώς προκύπτει ότι :

$$\omega_e = \omega_0 \quad \text{και} \quad \xi_e = \sqrt{\frac{3}{8}}k_c \quad \text{Εξίσωση 40}$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις σε συνδυασμό με τα  $\square_\square, \square_\square, \square_\square \square\square\square \square_c$  δίνουν τις βέλτιστες τιμές επαγωγής και αντίστασης για την μείωση των κραδασμών σε ευρύτερη συχνότητα:

$$L = \frac{1}{C^\varepsilon\omega_0^2} \quad \text{και} \quad R = \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{k_c}{C^\varepsilon\omega_0} \quad \text{Εξίσωση 41}$$

Ταυτόχρονα η ηλεκτρική εμπίδηση (Z) για το κύκλωμα RL είναι :

$$Z = L_s + R \quad \text{Εξίσωση 42}$$

Η συνολική ηλεκτρική εμπίδηση της πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης είναι:

$$Z_{total} = \frac{L_s + R}{LC^\varepsilon s^2 + RC^\varepsilon s + 1} \quad \text{Εξίσωση 45}$$

#### 4.1.2.3 Εξισώσεις ρεύματος που ρέει μέσω του επαγωγέα

Όταν οι βέλτιστες τιμές των ηλεκτρικών εξαρτημάτων είναι γνωστές, για να ρυθμιστεί το ρεύμα που ρέει τη διακλάδωση συντονισμού, είναι σημαντικό να επιλεγθεί ο κατάλληλος επαγωγέας. Μέσω της Εξίσωσης 36 συμπεραίνουμε ότι η μετατόπιση του ηλεκτρικού φορτίου  $q$  σχετίζεται με τη μηχανική μετατόπιση  $U$  μέσω της αδιάστατης μεταφοράς λειτουργίας.

$$G(\omega) = \frac{q}{U} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2} + 2j\xi_e \frac{\omega}{\omega_e}} \quad \text{Εξίσωση 46}$$

Με τετράγωνο συντελεστή :

$$|G(\omega)|^2 = \frac{1}{[1 - \frac{\omega^2}{\omega_e^2}]^2 + 4\frac{\omega^2}{\omega_e^2}\xi_e^2} \quad \text{Εξίσωση 47}$$

Το μέγιστο  $G(\omega)$  επιτυγχάνεται όταν  $\omega = \omega_e \sqrt{1 - 2j\xi_e^2} \approx \omega_e$  και  $\xi_e = \sqrt{\frac{3}{8}}k_c$ . Συνεπώς :

$$|G(\omega)|_{max} \approx \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{k_c} \quad \text{Εξίσωση 48}$$

Επίσης, με  $i_{max} \approx |i(\omega_0)| = \omega_0 |q(\omega_0)|$ , το μέγιστο ρεύμα που ρέει στη διακλάδωση είναι το εξής :

$$i_{max} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\omega_0}{k_c} |e| U_{max} \quad \text{Εξίσωση 49}$$

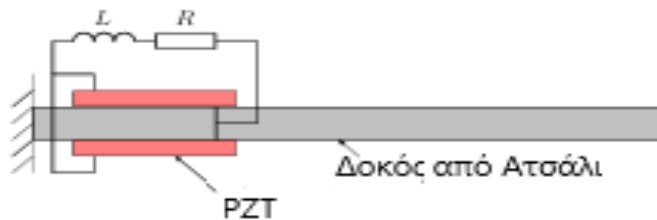
Η μέγιστη ενέργεια που αποθηκεύεται στον επαγωγέα είναι :

$$E_{max} = \frac{1}{2} L i_{max}^2 \quad \text{Εξίσωση 50}$$

Τέλος, σύμφωνα και με τις εξισώσεις 31, 41, 49, 50 η μέγιστη ενέργεια μπορεί να εκφραστεί και ως εξής :

$$E_{max} = \frac{1}{3} K^E U_{max}^2 \quad \text{Εξίσωση 51}$$

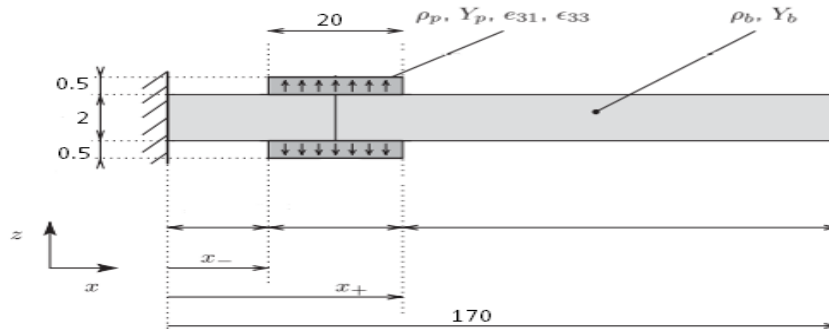
#### 4.1.3 Σύστημα Δοκού με Πιεζοηλεκτρικά Επιθέματα



Εικόνα 12 Δοκός με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδεδεμένα σε μια συντονισμένη διακλάδωση [19]

Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει μια ατσάλινη δοκό στην οποία είναι τοποθετημένο ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων (PZT). Η εγκατάσταση διεγείρεται ανέπαφα από ένα σύστημα που περιλαμβάνει ένα πηνίο και έναν μαγνήτη στο ελεύθερο άκρο της δοκού. Αυτή η ρύθμιση παρουσιάζεται αρχικά από τον Thomas et al. [17] για πειράματα που περιλαμβάνουν αντίσταση και συντονισμό πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδώσεων.

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος δοκού και επιθεμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 13 Απεικόνιση των παραμέτρων της Δοκού

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά παραμέτρων της Δοκού και των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων

Παράμετροι (Μονάδες)	Δόκος	Μέγεθος	PIC 255	Μέγεθος
Μήκος (mm)	$l_b$	170	$l_p$	20
Πάχος (mm)	$h_b$	2	$h_p$	0.5
Πλάτος (mm) (κοινό)	$b$	20	$b$	20
Θέση επιθέματος (mm)			$x_-$	0.5
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_b$	2800	$\rho_p$	7800
Μέτρο Young (GPa)	$Y_b$	72	$Y_p$	62.1
Πιεζοηλεκτρική σταθερά (C/m <sup>2</sup> )			$e^{-31}$	-11.18
Λόγος Poisson	$\nu_b$	0.31	$\nu_p$	0.34
Διηλεκτρική σταθερά (F/m)			$e^{33} / \epsilon^{33}$	$1623 * \epsilon_0$
$\epsilon_0$				$8.854 * 10^{-12}$

Για την πειραματική διερεύνηση, υλοποιήθηκε πειραματική διάταξη με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά (διαστάσεις, ιδιότητες υλικών κλπ.). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε μια έξυπνη δοκός-πρόβολος από ατσάλι με ελαστικό ομογενές και ισότροπο υλικό, δηλαδή παρουσίαση ίδιων ιδιοτήτων προς όλες τις κατευθύνσεις και χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα.



*Εικόνα 14: Δοκός Ατσάλι*

Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικό υλικό τροποποιημένο με τιτανικό μόλυβδο PIC255 όπου έχει πολικότητα, αφού στο ένα άκρο του έχει περισσότερα συγκεντρωμένα ηλεκτρόνια (είναι αρνητικά φορτισμένο) ενώ στο άλλο άκρο του είναι φορτισμένο θετικά, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα δίπολο και μία πολικότητα που δεν έχει κανένα κέντρο συμμετρίας. Τοποθετήθηκαν δύο κολλητά πιεζοηλεκτρικά υλικά, πολωμένα μεταξύ τους σε αντίθετες κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, στο πείραμα θεωρήσαμε την περίπτωση μίας ελαστικής δομής εφοδιασμένης με λεπτά πιεζοηλεκτρικά επιθέματα κολλημένα στο εξωτερικό της επιφάνειας.

Το PZT 255, είναι κατάλληλο για εφαρμογές ενεργοποιητή για δυναμικές συνθήκες λειτουργίας και υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, μετατροπείς υπερήχων χαμηλής ισχύος, μη συντονισμένα ευρυζωνικά συστήματα, αισθητήρες δύναμης και ακουστικής παραλαβής.



*Εικόνα 15: Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που είναι σημαδεμένο συμβολίζει τη θετική φόρτιση και το μη σημαδεμένο την αρνητική φόρτιση*



Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τοποθετήθηκαν με χρήση εποξικής κόλλας (Bison Epoxy) σε συγκεκριμένες θέσεις πάνω στη δοκό σύμφωνα με τον πίνακα. Στους πόλους των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων τοποθετούνται ακροδέκτες (καλώδια) για τη σύνδεση τους με τα παραδιακλαδωμένα ηλεκτρικά κυκλώματα. Για το πείραμα επιλέχθηκε η συσκευή υψηλής ποιότητας για την συγκόλληση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε κυκλώματα.



*Εικόνα 16: Εποξική  
κόλλα Bison Epoxy*

Βήματα συγκόλλησης ακροδεκτών( καλωδίων) πάνω στο πιεζοηλεκτρικό ζεύγος:

#### Βήμα Πρώτο



*Εικόνα 17: Σύρμα*

#### Βήμα Δεύτερο



*Εικόνα 18:  
Κοπτικό*

### Βήμα Τρίτο



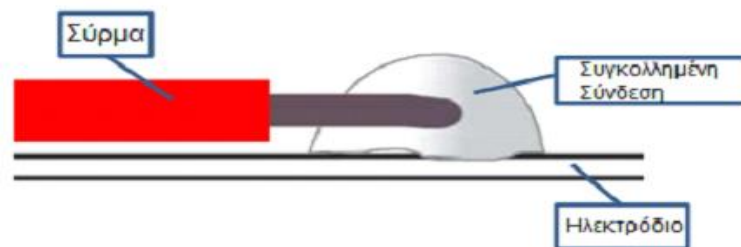
*Εικόνα 19: Κολλητήρι  
Parkside Soldering  
Station PLS 48 D2*

### Βήμα Τέταρτο



*Εικόνα 20: Στάδια Συγκόλλησης*

### Βήμα Πέμπτο



*Εικόνα 21: Απεικόνιση Συγκόλλησης*

Στο ελεύθερο άκρο της κατασκευής τοποθετήθηκε ένας ισχυρός μαγνήτης 4.20 γραμμάρια για την εφαρμογή της δύναμης διέγερσης με ανέπαφο τρόπο. Η κόλληση του μαγνήτη έγινε με εξίσου με την ίδια κόλλα, ώστε να μείνει σταθερή η θέση του σε όλη την διάρκεια του πειράματος.

Στην συνέχεια, η τοποθέτηση του πηνίου, όπου αποτελείται από ένα συρμάτινο τύλιγμα στο εσωτερικό του μπορεί να αναπτύξει μαγνητικό πεδίο όταν διαρρέεται από ρεύμα. Ταυτόχρονα, στο εσωτερικό του δημιουργείται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, και μπορεί να είναι είτε κενό είτε να περιέχει κάποιον σιδηρομαγνητικό υλικό. Το μέγεθος του πηνίου (L) είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής το οποίο μετριέται σε Henry. Η χαρακτηριστική ιδιότητα του είναι να μπορεί να μετατρέπει την μαγνητική ενέργεια σε ηλεκτρική καθώς και το αντίστροφο.

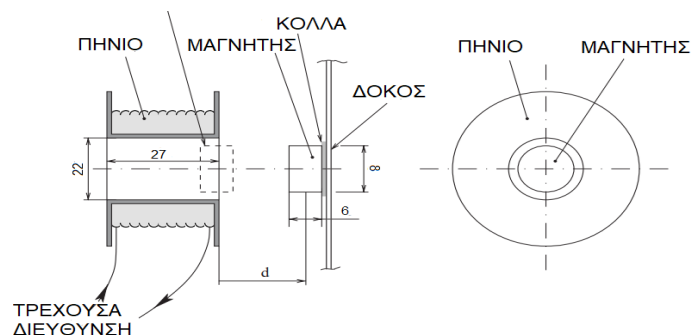
Στη διαδικασία βαθμονόμησης του συστήματος πηνίου-μαγνήτη, προκειμένου να εκτιμηθεί η δύναμη που ασκείται στον μαγνήτη, συναρτήσει της έντασης του ρεύματος στο πηνίο, διαπιστώθηκε ότι η δύναμη είναι ανάλογη της έντασης, με την προϋπόθεση ότι η θέση του μαγνήτη σε σχέση με το πηνίο θα είναι σταθερή.



Εικόνα 22: Πηνίο/Διεγέρτης και θέση μαγνήτη



Εικόνα 23: Δοκός μαζί με πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και Πηνίο

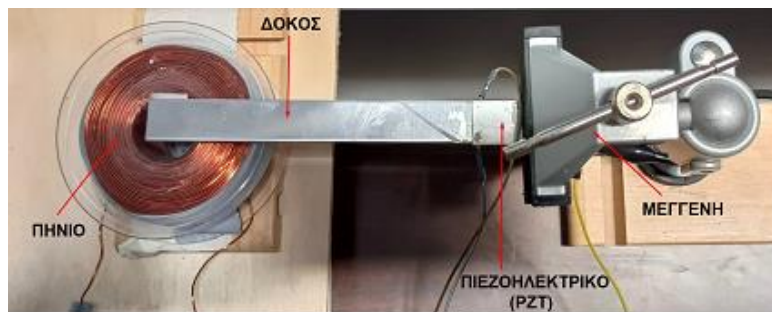


Εικόνα 24: Μηχανολογικό σχέδιο όπου παρουσιάζεται η θέση του μαγνήτη συγκριτικά με το πηνίο

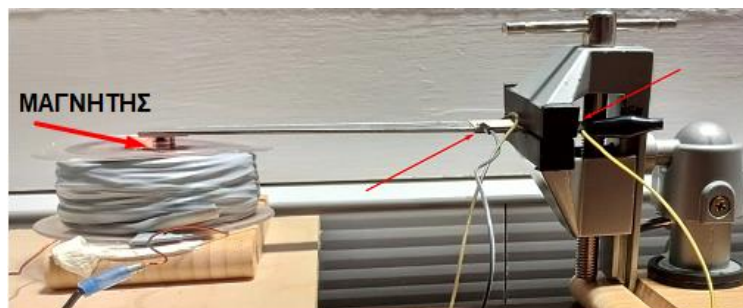
Το άλλο άκρο της δοκού πακτώνεται με τη βοήθεια αλουμινένιας μέγγενης της εταιρίας Hotech η οποία παρέχει τη δυνατότητα χρήσης της δοκού σε πολλές διαφορετικές διευθύνσεις εκτός της οριζόντιας. Για παράδειγμα μπορεί η δοκός να τοποθετηθεί κατακόρυφα, υπό κλίση ή σε όποια διεύθυνση απαιτεί το εκάστοτε πείραμα. Σκοπός της μέγγενης, ενός μηχανισμού ο οποίος αποτελείται από δύο μεταλλικά σκέλη και πλησιάζουν μεταξύ τους μέσω μιας βίδας, είναι να γίνει εφικτή η σταθεροποίηση της δοκούς-προβόλου, ώστε να πραγματοποιηθούν όλες οι μετρήσεις που χρειάστηκαν να γίνουν.



*Εικόνα 25: Μέγγηση  
HOTECH*



*Εικόνα 26: Κάτοψη Συστήματος*



*Εικόνα 27: Πρόοψη Συστήματος*

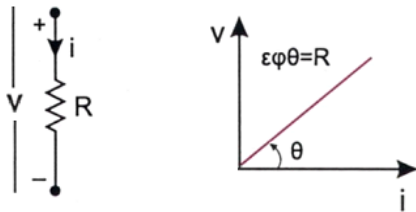
#### 4.1.4 Ηλεκτρικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης για απόσβεση

Στο παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείται από ένα πηνίο (L) και μία αντίσταση (R), μίας ιδιομορφής, συνδέονται τα ηλεκτρόδια, το γαλάζιο (+) και το κίτρινο (-) δημιουργώντας το φαινόμενο του συντονισμού. Οι καμπτικές παραμορφώσεις της δοκού συνδέονται με το ηλεκτρικό κύκλωμα, γνωρίζοντας ότι οι διευθύνσεις πόλωσης είναι αντίθετες

Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδέονται σε σειρά με κύκλωμα Αντίστασης R- Πηνίου L (RL). Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του κυκλώματος συντονισμού το οποίο αποτελείται από τα εξής παθητικά στοιχεία.

- Αντίσταση R

Ωμική αντίσταση ή αντιστάτης είναι το ηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, έχει την τάση να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα. Η ηλεκτρική αντίσταση είναι η ιδιότητα οπου έχει ένα υλικό να αντιστέκεται στη ροή του ρεύματος μέσω αυτού. Όταν υπάρξει το φαινόμενο του συντονισμού στο παραδιακλαδωμένο σύστημα το φορτίο διαχέεται στην αντίσταση και το ποσό ενέργειας εξαρτάται από αυτήν. Η μονάδα μέτρησης είναι το 1Ohm ( $\Omega$ ).



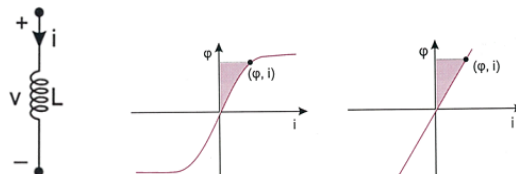
Εικόνα 28: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος (V-I) γραμμικής αντίστασης



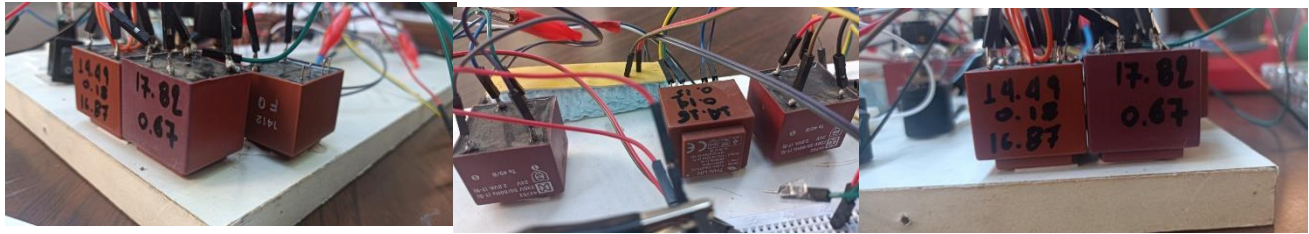
Εικόνα 29: Αντιστάσεις Κυκλώματος με εύρος τιμών 0-10k $\Omega$

- Πηνίο-Επαγωγή L

Το πηνίο (inductor) ή στοιχείο αυτεπαγωγής είναι και αυτό ένα ηλεκτρικό στοιχείο που αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Σε ένα πηνίο η μαγνητική ροή  $\phi$  είναι συνάρτηση του ρεύματος που το διαρρέει. Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber (Wb). Ο συντελεστής αυτεπαγωγής μετράτε σε (H) Χένρι που αντιστοιχεί σε 1Weber/Ampere Βέμπερ ανά Αμπέρ.



Εικόνα 30: Χαρακτηριστική Μαγνητικής ροής - Έντασης ( $\phi - i$ ) γραμμικού πηνίου



Εικόνα 31: Πηνία Κυκλώματος THAI LIN

Για την επίτευξη των τιμών της αντίστασης και της επαγωγής, προμηθευτήκαμε μια παθητική μεταβλητή αντίσταση με ροοστάτη, η οποία παράγει τιμές ηλεκτρικής αντίστασης από 0 έως 10kΩ. Αντίστοιχα, για την επίτευξη των τιμών της επαγωγής, έγινε προμήθεια μετασχηματιστή THAI LIN TL30D-150-060 και TL30D-120-075 (μονοφασικός μετατροπέας). Οι μετασχηματιστές είναι οι συσκευές που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Οι συγκεκριμένοι μετασχηματιστές της εταιρίας THAI LIN που χρησιμοποιήσαμε έχουν ενσωματωμένα τρία πηνία διαφορετικής επαγωγής το καθένα, ένα πρωτεύον τύλιγμα των 230V και δυο δευτερεύοντα τυλίγματα των 15V. Ωστόσο, η τιμή της επαγωγής που απαιτείται από το πείραμα δεν συμπεριλαμβάνεται σε κανένα από τα κυκλώματα (πρωτεύοντα ή δευτερεύοντα) των παραπάνω μετασχηματιστών.

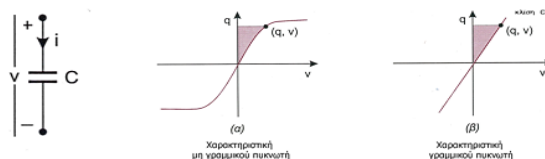
- Ο Πυκνωτής C

Ο Πυκνωτής ή αλλιώς στοιχείο χωρητικότητας, είναι το ηλεκτρικό στοιχείο του κυκλώματος, το οποίο συντελεί στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια του ηλεκτρικού φορτίου το οποίο συσσωρεύεται στις αγωγίμες επιφάνειες του.

Οι δύο αγωγίμες επιφάνειες ονομάζονται οπλισμοί του πυκνωτή, ενώ το παρεμβαλλόμενο υλικό ονομάζεται διηλεκτρικό του πυκνωτή. Όταν ένας πυκνωτής είναι φορτισμένος, οι οπλισμοί του έχουν ηλεκτρικά φορτία κατά μέτρο ίσα και αντίθετα.

Η μονάδα μέτρησης (F) της χωρητικότητας πυκνωτή είναι το 1 Φαράντ/Farad. Το ρεύμα που ρέει μέσω του πυκνωτή είναι ο ρυθμός αλλαγής του φορτίου στον πυκνωτή και εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από το ρυθμό μεταβολής της τάσης στα άκρα του. Εάν ο πυκνωτής συνδέεται σε μία πηγή σταθερής τάσης είναι και επομένως το ρεύμα του πυκνωτή είναι μηδέν. Τέλος, για να φορτιστεί ένας πυκνωτής απαιτείται ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σε αυτόν. Η ενέργεια είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης του πυκνωτή και αποθηκεύεται με τη μορφή ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου

Οι αποδόσεις των πυκνωτών μπορεί να φτάσουν μέχρι και το 99,75%. Το μέγεθος τους ποικίλει, από πολύ μικρές διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε πλακέτες ηλεκτρονικών συσκευών, έως συσκευές εκατοντάδων τόνων που χρησιμοποιούνται από τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας στα εθνικά δίκτυα ηλεκτροδότησης.



Εικόνα 32: Χαρακτηριστική Φορτίου - Τάσης ( $q-V$ )



Το ηλεκτρονικό εξάρτημα, με τους τρεις ακροδέκτες, το λεγόμενο ποτενσιόμετρο είναι ένας μεταβλητός αντιστάτης που έχει συνήθως την χρήση ως διαιρέτης τάσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται ως ροοστάτης αφού για να λειτουργήσει χρησιμοποιήθηκαν οι δύο ακροδέκτες του, ο ακριανός (πρώτος) και ο μεσαίος (δεύτερος). Στα γραμμικά ποτενσιόμετρα η πλάκα έχει την ίδια ωμική αντίσταση οπότε η μεταβολή της αντίστασης γίνεται με γραμμικό τρόπο. Τα ποτενσιόμετρα μπορεί να έχουν ενσωματωμένο διακόπτη ώστε όταν η μεταβαλλόμενη επαφή φτάσει σε προκαθορισμένο άκρο να διακόπτεται τελείως η παροχή ρεύματος.

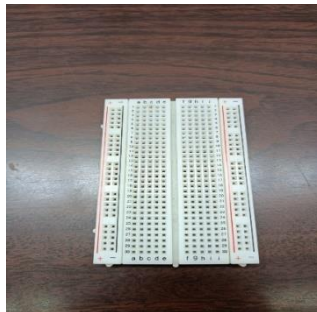
Χρησιμοποιείται συχνά ως μεταβλητή αντίσταση για τον έλεγχο του ρεύματος σε ένα κύκλωμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λειτουργίες όπως η ρύθμιση της έντασης του ήχου σε ένα στερεοφωνικό ή ο έλεγχος της φωτεινότητας ενός φωτός.

Ένα ποτενσιόμετρο αποτελείται από ένα στοιχείο αντίστασης, μια περιστρεφόμενη επαφή (wiper) και δύο ή περισσότερες σταθερές επαφές. Το στοιχείο αντίστασης είναι συνήθως μια μακριά λωρίδα από υλικό αντίστασης, όπως ο άνθρακας, που συνδέεται σε κάθε άκρο της με τις σταθερές επαφές. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως ρυθμιζόμενες από τον χρήστη εισοδοί σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, καθώς παρέχουν έναν απλό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο ρύθμισης της αντίστασης σε ένα κύκλωμα.

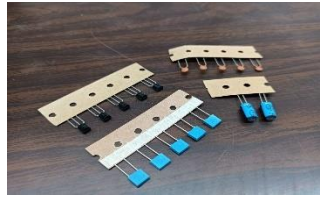


*Εικόνα 33: Γραμμικό Ποτενσιόμετρο με μέγιστη αντίσταση  $2\Omega$*

Για το συγκεκριμένο πείραμα με σκοπό να γίνουν επιπλέον δοκιμαστικοί έλεγχοι για τον συνδυασμό και την προσθήκη νέων ηλεκτρονικών στοιχείων στο κύκλωμα χωρίς έξτρα συγκόλληση αλλά με ευκολία και ταχύτητα χρησιμοποιήθηκε ένας δοκιμαστικός πίνακας (breadboard). Πάνω σε αυτόν τοποθετήθηκαν πυκνωτές, αντιστάσεις καθώς και επαναχρησιμοποιούμενα καλώδια για την δημιουργία και σύνδεση σημείων και στοιχείων του κυκλώματος.



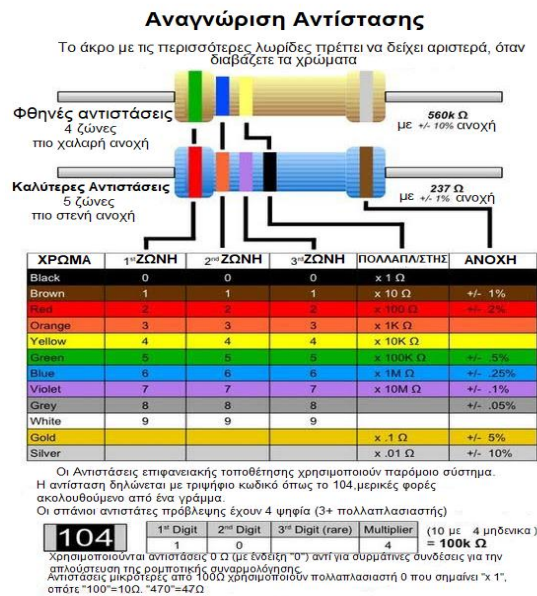
*Εικόνα 34: Breadboard*



Εικόνα 35: Πυκνωτές στο Breadboard



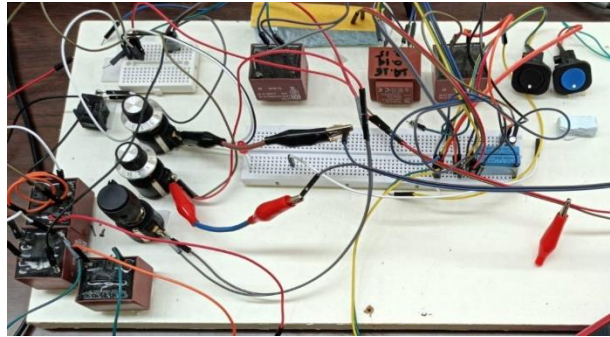
Εικόνα 36: Είδη Αντιστάσεων στο Breadboard



Εικόνα 37: Πίνακας Αναγνώρισης Αντίστασης

Τοποθετήθηκε διακόπτης on/off ανάμεσα στο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα και στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία λόγω διευκόλυνσης στο πείραμα όπως φαίνεται στην εικόνα 38.





Εικόνα 38: Φωτογραφία Παραδιακλαδωμένου Κυκλώματος

#### 4.1.5 Πολύμετρα παθητικών κυκλωμάτων

Στη συνέχεια έγινε προμήθεια ενός εξειδικευμένου οργάνου της εταιρίας UNIT-T μοντέλο UT603, το οποίο μας έδωσε τη δυνατότητα να μετράμε τα παθητικά στοιχεία όταν βρίσκονται χωρίς τάση, και να παίρνουμε τις αντίστοιχες τιμές (αντίστασης, επαγωγής, χωρητικότητας). Με τη βοήθεια του παραπάνω πολυμέτρου και συνδέοντας τα επαγωγικά κυκλώματα του μετασχηματιστή σε σειρά ή παράλληλα (ανάλογα με την επαγωγή που χρειαζόμαστε) λαμβάνουμε τελικά την επιθυμητή επαγωγή στο κύκλωμα συντονισμού RL .



Εικόνα 39: Πολύμετρο με χρήση Ωμόμετρου

Χρησιμοποιώντας το μπλε πλήκτρο πάνω δεξιά ώστε να οριστεί ό,τι γίνεται η μέτρηση του πυκνωτή. Η εκκίνηση γίνεται με το πλήκτρο Power κ τοποθέτηση των καλωδίων (κόκκινο καλώδιο συνδεδεμένο, στο COM) και του δείκτη μέτρησης (20M) γίνεται σύμφωνα με την (Εικόνα 39).

Στην συνέχεια, η χρήση του έγινε ως αμπερόμετρο με σκοπό να γίνει η μέτρηση της έντασης του ρεύματος του πηνίου. Αντίστοιχα με πριν με την χρήση του μπλε πλήκτρου για να οριστεί το πηνίο και με την εκκίνηση του από το πλήκτρο Power, ο δείκτης (20n) και τα καλώδια τοποθετήθηκαν με τον εξής τρόπο που φαίνεται στην (Εικόνα 40).



Εικόνα 40: Πολύμετρο

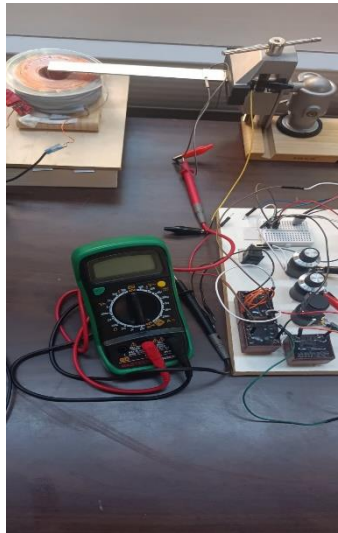
Έπειτα με την χρήση ενός κλασικού πολυμέτρου γίνεται μέτρηση για την τάση στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού που παράγεται κατά τη διέγερση της κατασκευής σε συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Αφού πρώτα έγινε έλεγχος αν κάνει σώμα, δηλαδή να δημιουργείται γείωση Έπειτα, με την τοποθέτηση των καλωδίων όπως απεικονίζεται το κόκκινο καλώδιο στο COM και τον δείκτη μας στο συνεχές ρεύμα και στην κλίμακα 20 γίνανε οι μετρήσεις του πειράματος.



Εικόνα 41: Γείωση Πολυμέτρου

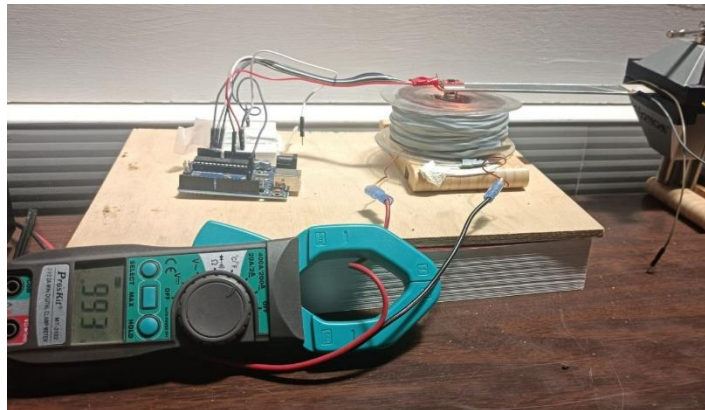


Εικόνα 42: Δείκτης Πολυμέτρου



Εικόνα 42: Συνδεσμολογία Πολυμέτρου

Το φαινόμενο του Hall, ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Edwin Herbert Hall, [20] συνδέει το ηλεκτρικό ρεύμα με τα μαγνητικά πεδία. Όταν ένα ρεύμα διαρρέει ένα υλικό σε ένα μαγνητικό πεδίο, προκαλείται μια διαφορά δυναμικού, που είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των φορέων του ρεύματος με το μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Έτσι λοιπόν, η τοποθέτηση της αμπεροτσιμπίδας ή αλλιώς δαγκάνας έχει την χρήση ενός αμπερομέτρου, έχοντας το πλεονέκτημα να μη διακόπτεται το κύκλωμα όταν το βάλουμε σε σειρά, όπως συμβαίνει στο αμπερόμετρο. Συνεπώς, για τις μετρήσεις τοποθετήθηκε η αμπεροτσιμπίδα ή αλλιώς δαγκάνα ώστε το ένα καλώδιο ή αγωγός από τους δύο να περάσει μέσα από το δαχτυλίδι με σκοπό να παρουσιάσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων της έντασης του ρεύματος (Εικόνα 43.). Η λειτουργία της είναι απλή και το άνοιγμα της τσιμπίδας που είναι χωρισμένη γίνεται πατώντας το τρίγωνο πλήκτρο που βρίσκεται στα αριστερά της. Στα πειραματικά αποτελέσματα, οι μετρήσεις έντασης πραγματοποιήθηκαν στα 20A/2A~, χρησιμοποιώντας επαγωγικό τρόπο, την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.



Εικόνα 43: Αμπεροτσιμπίδα

#### 4.1.6 Συσκευές καταγραφής

Για την καταγραφή των ταλαντώσεων έγινε χρήση δύο συσκευών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το καταγραφικό της εταιρίας Picoscope που συνδέεται με τον υπολογιστή και γίνεται η καταγραφή μέσω του λογισμικού PicoScope 6, σε συνδυασμό με τον αισθητήρα ADXL 335 λόγω μεγέθους και μικρού βάρους. Το ADXL335 είναι ένα λεγόμενο επιταχυνσιόμετρο MEMS (MicroElectro Mechanical System) και διαθέτει έναν αισθητήρα/επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων ADXL 335 με σκοπό να ανιχνεύσει την κλίση των δονήσεων και να εμφανίσει τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Το σήμα της διέγερσης που δίνεται στο πηνίο καταγράφεται επίσης στο δεύτερο κανάλι του καταγραφικού και γίνεται η ανάλογη επεξεργασία των δύο σημάτων.



Εικόνα 44:  
PicoScope

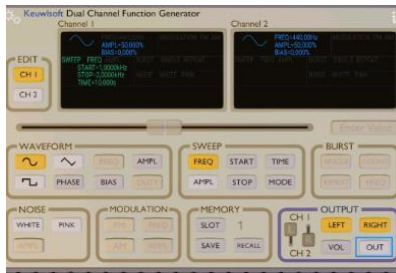


Εικόνα 45: Αισθητήρας  
ADXL 335

Το σήμα δίνεται από μια αποτελεσματική και χαμηλού κόστους γεννήτρια συχνοτήτων Hewlett-Packard's 3312A (HP) [24] που μπορεί να λάβει καθαρά σήματα χαμηλής στάθμης, μέσω ενός ενισχυτή Phillips FA 564 Amplifier ή αλλιώς μέσω της εφαρμογής Function Generator της Keuwlsoft Dual Channel και με την λειτουργία του αισθητήρα το αρχικό σήμα μεταφέρεται στον παλμογράφο.



Εικόνα 46: Γεννήτρια Παλμογράφων  
Hewlett- Packard's 3312A (HP)



Εικόνα 47: Function Generator



Εικόνα 48: Ενισχυτής Philips FA 564 Amplifier , μπροστινή και πίσω όψη

Η εφαρμογή διαθέτει δύο οθόνες στο επάνω μέρος (Εικόνα 50) που δείχνουν τις κυματομορφές για τα κανάλια 1 και 2 αντίστοιχα. Η έξοδος μπορεί να ενεργοποιηθεί με το μπλε κουμπί κάτω δεξιά. Η αριστερή και η δεξιά έξοδος ήχου μπορούν να αντιστοιχιστούν είτε στο κανάλι 1 είτε στο κανάλι 2 και να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν σε αυτό το πλαίσιο εξόδου. Τα υπόλοιπα κουμπιά επιτρέπουν τον καθορισμό της κυματομορφής. Στο κέντρο υπάρχει ένα ρυθμιστικό ελατηρίου που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τρέχουσας επιλεγμένης παραμέτρου. Εάν εισαχθεί μια ακριβή τιμή χειροκίνητα, ορίζεται με το κουμπί enter value θα εμφανιστεί ένα num-pad για την εισαγωγή της τιμής. Οι τιμές εκτός εύρους θα εξαναγκαστούν στην πλησιέστερη επιτρεπόμενη τιμή.

Για την μέτρηση του ελέγχου των δονήσεων και την ανάλυση του συντονισμού χρησιμοποιείται το Adash A4400 VA4 Pro όπου η άκρη του τοποθετείται πάνω στην δοκό και εμφανίζει αναλυτικά αποτελέσματα μέσω του παλμογράφου που διαθέτει.

Βάρος βάσης : 7.56 gr

Βάρος Αισθητήρα : 11.6 gr

Βάρος μαγνήτη στην δοκό : 4.20 gr

Συνολικό βάρος : 127.76 gr

Συνολικό βάρος μαζί με καλώδιο : 183 gr



Εικόνα 49: Adash A4400 VA4 Pro

Τέλος άλλη μια καταγραφή υλοποιήθηκε μέσω του παλμογράφου Rigol DS2202A 200MHz Digital Oscilloscope.



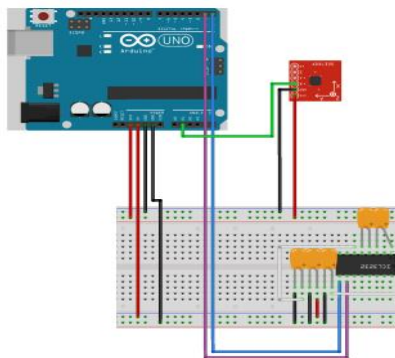
*Εικόνα 50: Rigol DS2202A 200MHz Digital Oscilloscope*

Ο μικροελεγκτής Arduino προγραμματίζεται μέσω της γλώσσας Arduino, η οποία έχει βάση την C/C++.



*Εικόνα 51: Arduino*

Η συνδεσμολογία του κυκλώματος στο πείραμα έχει γίνει με το τρόπο που απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 52.



*Εικόνα 52: Συνδεσμολογία Κυκλώματος*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 Φυσική Συχνότητα

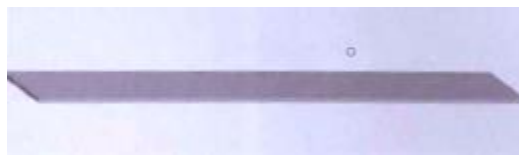
#### 5.1.1 Εισαγωγή

Οποιοδήποτε υλικό , μηχανή ή δομή έχει φυσικές συχνότητες οι οποίες αν σχεδιαστούν σωστά παραμένουν αδρανείς και δεν επηρεάζουν την αξιοπιστία και λειτουργία των μηχανών. Η φυσική συχνότητα είναι διαφορετική σε κάθε υλικό και εξαρτάται από την σύσταση και την δομή του υλικού, συγκεκριμένα από τις ιδιότητες του κάθε υλικού καθώς και από την γεωμετρία-διαστάσεις αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η φυσική συχνότητα ενός υλικού χαρακτηρίζεται η συχνότητα, με την οποία το υλικό όταν υπόκειται σε εξωτερικές δυνάμεις τότε αυτό ταλαντώνεται. Ο συντονισμός όπως έχει προαναφερθεί είναι μια κατάσταση όπου μία φυσική συχνότητα διεγείρεται από μια διέγερση [21]. Αποτέλεσμα του συντονισμού είναι η ενίσχυση της συχνότητας εξαναγκασμού των κραδασμών που μπορεί να προκύψει σε επιβλαβείς ή σε καταστροφικές επιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντική η κατανόηση του για την ανίχνευση και την απόσβεση του.

Μία βασική δομή δονητικού συστήματος είναι το μοντέλο ελατηρίου-μάζας που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.1.2. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει μια μόνο φυσική συχνότητα. Για παράδειγμα, αν η μάζα τραβηχτεί προς τα κάτω και έπειτα αφεθεί, τότε θα δονείται σε φυσική συχνότητα και στην συνέχεια λόγω απόσβεσης θα σταματήσει η δόνηση.

#### 5.1.2 Φυσική Συχνότητα Δοκός-Πρόβολος

Η ατσάλινη δοκός- πρόβολος είναι στερεωμένη στην μέγγενη. Εάν δεν διεγερθεί με οποιονδήποτε τρόπο η δοκός τότε δεν επηρεάζεται η φυσική συχνότητα της και δεν θα υπάρξει δόνηση.



Εικόνα 53: Δοκός-Πρόβολος χωρίς διέγερση[21]

Ως εφαρμογή στο πείραμα, για να μελετηθούν οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές των ταλαντώσεων της δοκού όταν σε αυτή ασκηθεί δύναμη ή σταλεί κάποιο σήμα, τοποθετήθηκε μια μάζα ισορροπίας (μαγνήτης) πάνω από το σημείο που είναι τοποθετημένο το πηνίο και στο αντίθετο άκρο από το σημείο που είναι στερεωμένη με την μέγγενη. Η φυσική συχνότητα εκτός από την σύσταση του υλικού και την γεωμετρία του, επηρεάζεται και από την μάζα και την στιβαρότητα της κατασκευής . Συγκεκριμένα, από τον μαγνήτη που τοποθετήθηκε στο άκρο της δοκού, προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα, τόσο θα μειώνεται η φυσική συχνότητα , διότι η μάζα προσθέτει αδράνεια και καθιστά τις ταλαντώσεις πιο αργές. Αντίστοιχα, σε περίπτωση που υπάρξει μικρότερη μάζα, θα έχουμε υψηλότερη φυσική

συχνότητα. Η προσθήκη της μάζας έχει ως αποτέλεσμα να μετακινείται η συχνότητα συντονισμού σε χαμηλότερη περιοχή. Η σταθερότητα της μέγγηνς περιορίζει την ελευθερία των ταλαντώσεων, οδηγώντας σε υψηλότερες φυσικές συχνότητες καθώς και αντίστροφα όσο λιγότερη είναι η στιβαρότητα τόσο χαμηλότερη είναι η φυσική συχνότητα. Αυτοί οι δύο παράγοντες, μάζα και στιβαρότητα μείνουν σταθεροί σε όλη την διάρκεια του πειράματος.[21]

Όταν στην δοκό ασκηθεί κάποια δύναμη ή ένα σήμα τότε μπορεί να μετρηθεί το αποτέλεσμα της δόνησης. Εάν η δόνηση αυτή αυξηθεί με κάποιον από τους δυο τρόπους τότε παρατηρείται :

1. Το επίπεδο της δόνησης αρχίζει να αυξάνεται
2. Το επίπεδο της δόνησης θα είναι υψηλότερο στο ελεύθερο άκρο της δοκού.

Μια συχνότητα διέγερσης δημιουργεί το υψηλότερο επίπεδο δόνησης. Όταν μια εξωτερική συχνότητα διέγερσης αντιστοιχεί με τη φυσική συχνότητα του συστήματος τότε προκύπτει ο συντονισμός του συστήματος. Όσο η ταχύτητα αυξάνεται , το επίπεδο πλάτος της δόνησης μειώνεται σταδιακά και προκύπτει ο πρώτος τρόπος δόνησης.



*Εικόνα 54 Δοκός στον πρώτο τρόπο δόνησης [21]*

Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, η διέγερση της συχνότητας θα αρχίζει να πλησιάζει την δεύτερη λειτουργία, η δόνηση θα ενισχυθεί ξανά με διαφορετικό μοτίβο κατά μήκος της δοκού. Με την επαφή μας ως προς την δοκό, το σημείο όπου αντιλαμβανόμαστε ότι δεν υπάρχει δόνηση ονομάζεται κόμβος. Στον δεύτερο τρόπο δόνησης, υπάρχει ένας κόμβος.

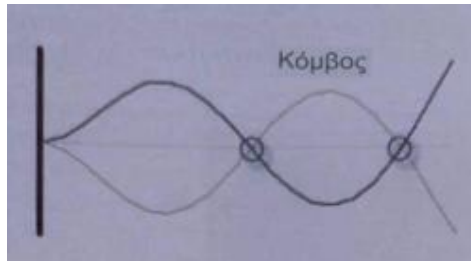


*Εικόνα 55: Δοκός στον δεύτερο τρόπο δόνησης με έναν κόμβο [21]*

Στην συνέχεια, η δόνηση θα μειωθεί ξανά, διότι η συχνότητα διέγερσης δεν συμπίπτει πλέον με την φυσική συχνότητα της δέσμης. Μέσω της αύξησης της ταχύτητας διεγείρει τον τρίτο τρόπο δόνησης. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν δύο κόμβοι όπου ουσιαστικά δεν υπάρχει κίνηση. Η έκταση της κίνησης



φανερόνεται στο παρακάτω σχήμα και οι δυο γραμμές δείχνουν την ανώτερη και χαμηλότερη κίνηση. Τέλος, η ταχύτητα του διεγέρτη δεν χρειάζεται να ταιριάζει με τη φυσική συχνότητα αλλά αρχίζει να διεγείρει τη φυσική συχνότητα καθώς την πλησιάζει.



Εικόνα 56: Ο τρίτος κόμβος δόνησης με δύο κόμβους[21]

Συμπερασματικά ο καλύτερος τρόπος για να εντοπιστούν οι φυσικές συχνότητες είναι να τις διεγείρουμε. Κάθε δομή έχει πολλαπλές φυσικές συχνότητες και εμφανίζονται σε διαφορετικούς άξονες. Κατά την διάρκεια αυτής της εκτέλεσης πρέπει να σημειωθεί ότι στους κόμβους που αναφέρθηκαν και νωρίτερα, η δόνηση θα πρέπει να μη μετρηθεί σε αυτό το κομβικό σημείο διότι δεν υπάρχει.

## 5.2 Εντοπισμός Ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών

### Ιδιοσυχνότητα

Η συχνότητα ταλάντωσης ή αλλιώς ιδιοσυχνότητα (Natural Frequency) ορίζεται ως η συχνότητα με την οποία το σύστημα ταλαντώνεται την στιγμή που δεν υπάρχει σε αυτό εξωτερική επίδραση. Η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος όπως είναι η μάζα και η στιβαρότητα.

### Ιδιομορφή

Το μοτίβο ταλάντωσης ενός συστήματος σε μία συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα ορίζεται ως ιδιομορφή (Mode Shape). Μέσω του μοτίβου ταλάντωσης φαίνεται το πως κινείται το κάθε μέρος του συστήματος στο χώρο. Οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος είναι υπεύθυνες για το πως προκύπτουν οι ιδιομορφές.

Ο Εντοπισμός ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών μπορεί να γίνει με τρεις μεθόδους :

- **Αναλυτική Μέθοδος :** Η ανάλυση ιδιομορφών αποτελεί κρίσιμο βήμα στη μοντελοποίηση δομικών συστημάτων, απαιτεί λεπτομερείς φυσικές πληροφορίες για τους αισθητήρες, τους ενεργοποιητές και το μηχανικό σύστημα καθώς και πειραματικά δεδομένα. Ο εντοπισμός τους υπολογίζεται από τις διαφορικές εξισώσεις κίνησης του συστήματος και συχνά η χρήση της μεθόδου γίνεται για τον προσδιορισμό των ιδιοτιμών με ζητούμενα τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές.
- **Πειραματική Μέθοδος :** Η ταυτοποίηση συστήματος απαιτεί τη δημιουργία μοντέλων μέσω ενός σύνθετου δομικού και πιεζοηλεκτρικού μοντέλου απευθείας από πειραματικά δεδομένα, εστιάζοντας σε τεχνικές που διαχειρίζονται πολλαπλές εισόδους και εξόδους. Σε περίπτωση περίπλοκων συστημάτων προκύπτει η ανάγκη για ακριβείς μετρήσεις και μεγάλα μεγέθη

δεδομένων. Ο εντοπισμός των ιδιοσυχνοτήτων μπορεί να γίνει με την χρήση αισθητήρων κίνησης για την καταγραφή αποκρίσεων του συστήματος σε διάφορες συχνότητες.

- Αριθμητική Μέθοδος : Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι δημοφιλής, διότι προτιμάται σε περιπτώσεις περίπλοκης γεωμετρίας λόγω της προσεγγιστικής φύσης της και της απλότητας της στην εφαρμογή καθώς δεν χρειάζεται η επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης. Εξακολουθεί να απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες για τα υλικά κατασκευής και τις οριακές συνθήκες. Ο εντοπισμός τους μπορεί να γίνει υπολογιστικά, με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.[22]

Στο συγκεκριμένο πείραμα γίνεται χρήση πειραματικής καταγραφής, τοποθετώντας αισθητήρες κίνησης (Μέθοδος Bump Test, χτυπήματος με σφυρί), καθώς και χρήση ηλεκτρονικής καταγραφή σημάτων (Μέθοδος Δόνησης από Εξωτερικό Σήμα, μέσω του πηνίου που έχει τοποθετηθεί κάτω από τον μαγνήτη). Στις επόμενες δυο παραγράφους θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι παραπάνω μεθοδολογίες.

### 5.2.1 Μέθοδος Bump Test με ιδιομορφική ανάλυση και απόκριση κραδασμών

Το Bump Test είναι μια μέθοδος όπου εμπεριέχει αρχικά το χτύπημα της δομής με μία πηγή κρουστικής διέγερσης, όπως με ένα σφυρί πάνω στην δοκό που χρησιμοποιείται σε αυτήν την έρευνα. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται η μέτρηση της δυναμικής απόκρισης με τη χρήση του αισθητήρα που διαθέτει το Adash A4400 VA4 Pro, περιλαμβάνοντας την ανάλυση κόμβων και ιδιομορφών που επηρεάζουν την δοκό κατά την ταλάντωση που προκαλείται από το σφυρί. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη μέσω του παλμογράφου που διαθέτει το συγκεκριμένο εξάρτημα. Έχοντας τα δεδομένα της δομικής κρούσης με το σφυρί, γίνεται ανάλυση για τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων, του λόγου απόσβεσης και των ιδιομορφών της δομής που προκύπτουν. Έτσι, εξηγείται ο όρος ανάλυση ιδιομορφών. Ταυτόχρονα, έχοντας τα δεδομένα επαναλαμβάνεται η διαδικασία και η ανάλυση κραδασμών χρησιμοποιείται με σκοπό να μελετηθεί ο τρόπος στον οποίο η δομή ανταποκρίνεται στην δυναμική διέγερση. Έχοντας αποτελέσματα από αυτή την μέθοδο, μπορούν να μελετηθούν και να εντοπιστούν συχνότητες συντονισμού καθώς και συμπεράσματα για την ευστάθεια του συστήματος. Τέλος, είναι μια μέθοδος όπου χαρακτηρίζεται ως ένα πολύτιμο εργαλείο για πειραματικές μελέτες κατασκευών, δίνοντας σημαντικές πληροφορίες για την κατανόηση και τη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς τους [22].

### 5.2.2 Μέθοδος Δόνησης από Εξωτερικό Σήμα με ιδιομορφική ανάλυση και απόκριση κραδασμών

Η Μέθοδος Δόνησης από Εξωτερικό Σήμα είναι μια μέθοδος στην οποία εισάγουμε το σήμα δόνησης στην συγκεκριμένη περίπτωση με την γεννήτρια Hewlett- Packard's 3312 (HP) ή αλλιώς μέσω της εφαρμογής του κινητού Function Generator της Keuwlsoft Dual Channel, που λαμβάνουν σήματα χαμηλής στάθμης από τον ενισχυτή Philips FA 564 Amplifier και το αρχικό σήμα απεικονίζεται στον παλμογράφο. Το πηνίο είναι υπεύθυνο για την αντίδραση στις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από την κίνηση του μαγνήτη στο ελεύθερο άκρο της δοκού. Η αντίδραση προκαλεί την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο και την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης σε αυτό (Νόμος Faraday) και είναι η ένδειξη της δυναμικής της δοκού κατά τη δόνηση. Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα, αναλύεται και καταγράφεται μέσω του κυκλώματος. Η μορφή του ηλεκτρικού σήματος αντιστοιχεί στην κίνηση-ταλάντωση της δοκού περιλαμβάνοντας τις

ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές της [21]. Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπάρχουν δύο σήματα εισόδου, το πρώτο είναι το σήμα που χρησιμοποιείται ως ερέθισμα από την γεννήτρια ή την εφαρμογή του κινητού που χρησιμοποιείται και διεγείρει μέσω του ενισχυτή αυξάνοντας την ένταση του σήματος με σκοπό την σωστή λειτουργία του συστήματος. Το δεύτερο σήμα προέρχεται από τον κατακόρυφο άξονα z της δοκού, μετρώντας τις μεταβολές της θέσης της καθώς και τις δονήσεις της. Το δεύτερο σήμα, επιτρέπει να γίνουν αντίστοιχες μετρήσεις και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την συμπεριφορά του συστήματος σε περίπτωση ύπαρξης εξωτερικών δυνάμεων. Συμπερασματικά, το πρώτο σήμα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και τη ρύθμιση του συστήματος, ενώ το δεύτερο είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση και τη μελέτη του. Μετά την ανάλυση και καταγραφή των στοιχείων επόμενο βήμα είναι να εφαρμοστούν μαθηματικοί υπολογισμοί για τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές.

### 5.3 Πειραματικές μετρήσεις με τη Μέθοδο Bump Test για την πρώτη ιδιοσυχνότητα συντονισμού σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα

Με τη χρήση της μεθόδου Bump Test που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2.1, για την εκτίμηση και παρακολούθηση των ιδιοσυχνοτήτων της δομικής κατασκευής μέσω του χτυπήματος της δοκού με ένα σφυρί, πραγματοποιήθηκαν κάποιες ενδεικτικές μετρήσεις.

#### Βήματα της μεθόδου Bump Test:

- I. Τοποθετείται με κόλλα στο δεξιό άκρο της δοκού η βάση του αισθητήρα, με βάρος 7.56 gr όπως απεικονίζεται παρακάτω.



*Εικόνα 57 Θέση Βάσης αισθητήρα στην δοκό*

- II. Ο αισθητήρας του Adash A4400 VA4 Pro με βάρος 116 gr τοποθετείται πάνω στη βάση.



*Εικόνα 58 Αισθητήρας Adash A4400 VA4 Pro*

- III. Λαμβάνοντας υπόψιν το βάρος του μαγνήτη που έχει τοποθετηθεί κάτω από την δοκό ( 4.20 gr) και μετρώντας το βάρος του αισθητήρα και της βάσης του αισθητήρα, υπολογίζεται ό,τι το συνολικό βάρος είναι το άθροισμα τους:

$$\text{Συνολικό Βάρος} = \text{Βάρος Μαγνήτη} + \text{Βάρος Βάσης Αισθητήρα} + \text{Βάρος Αισθητήρα} = 4.20 \text{ gr} + 7.56 \text{ gr} + 116 \text{ gr} = 127.76 \text{ gr}$$

*Εξίσωση 52*

Το συνολικό βάρος μαζί με το καλώδιο υπολογίστηκε στα 183gr.

- IV. Καθώς η δόνηση στη δοκό γίνεται χειροκίνητα χτυπώντας την με ένα σφυρί, η ανάλυση του συντονισμού μέσω του Adash A4400 VA4 Pro εμφανίζει τα αποτελέσματα στην οθόνη μέσω του παλμογράφου που διαθέτει. Επιτρέπει την εύρεση της συχνότητας συντονισμού του δομικού συστήματος. Το Bump Test περιέχει δύο μέρη :

1ο. Το επίπεδο ενεργοποίησης πλάτους.

2ο. Τη γραφική παράσταση της μέγιστης συχνότητας της κατασκευής

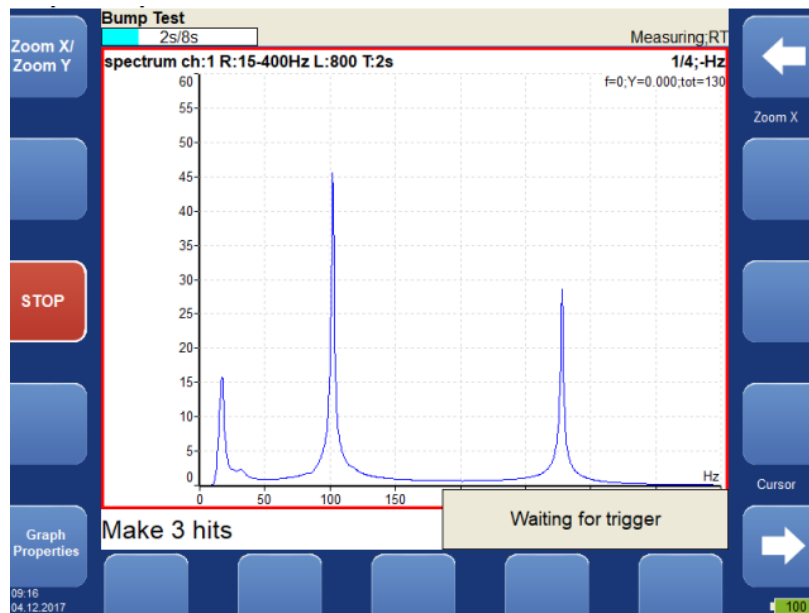
Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία , συνιστάται να πραγματοποιηθούν τουλάχιστον τρία με τέσσερα επαναλαμβανόμενα χτυπήματα ίδιας δύναμης στο αντίστοιχο σημείο[25].

Παράδειγμα για εφαρμογή του Adash A4400VA4 Pro στα 400Hz:

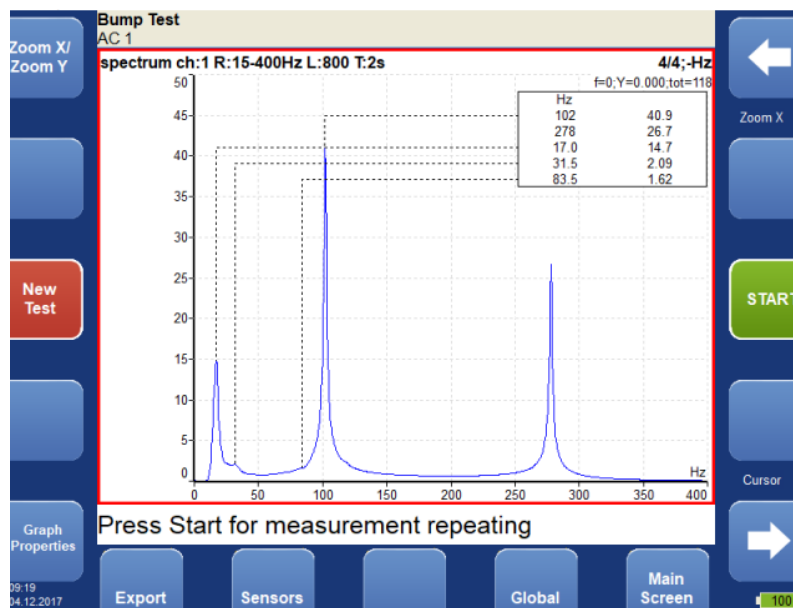
### **Settings**

Channel:	1
Hits:	4
Range[Hz]:	400
Unit:	mm/s
Neg. Averaging:	no
Save	

*Εικόνα 59 Καταχώρηση Στοιχείων στην εφαρμογή*



Εικόνα 60 Εμφάνιση αποτελεσμάτων στο πρώτο από τα τέσσερα χτυπήματα της διαδικασίας



Εικόνα 61 Εμφάνιση αποτελεσμάτων ολοκληρώνοντας και τα τέσσερα χτυπήματα της διαδικασίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης της συχνότητας συντονισμού, απεικονίζοντας τις ιδιοσυχνότητες με τα αντίστοιχα πλάτη τους και της επιτάχυνσης που προκύπτει (tot).

Με την ίδια διαδικασία έγιναν ενδεικτικές μετρήσεις για την πρώτη ιδιομορφή με εσωτερική χωρητικότητα πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων  $C_p = 11.5\text{nF} = 11.5 \cdot 10^{-9}\text{F}$ .

Δοκιμή για πρώτη ιδιομορφή τα στοιχεία που δόθηκαν από το Adash 4400 VA4 Pro είναι τα εξής:

- 77 Hz σε ανοιχτό κύκλωμα ~ ταχύτητα 0.488mm/s
- 77 Hz σε παραδιακλαδωμένο κύκλωμα ~ με ταχύτητα 0.481mm/s

Το ποσοστό απόσβεσης του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος σε σχέση με το ανοιχτό κύκλωμα είναι :  $((0.488\text{mm/s} - 0.481\text{mm/s}) / 0.488\text{mm/s}) \cdot 100\% = 1.43\%$

#### **5.4 Αποτελέσματα μέσω της πειραματικής διάταξης για την εύρεση πρώτης και δεύτερης ιδιοσυχνότητας συντονισμού σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα**

Το πείραμα έχει συνδεσμολογία και χαρακτηριστικά όπως προαναφέρθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 4. Με σκοπό να πάρουμε τις απαραίτητες μετρήσεις μέσω του πειράματος αρχικά πρέπει να γνωρίζουμε την εσωτερική χωρητικότητα των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων  $C_p$  που έχουν τοποθετηθεί με παράλληλη συνδεσμολογία και αντίθετη πολικότητα μεταξύ τους. Σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.5 και στην Εικόνα 40, η εσωτερική χωρητικότητα των πιεζοηλεκτρικών είναι  $C_p = 11.5\text{nF}$ . Η τοποθέτηση του επιταχυνσιόμετρου με βάρος 3.43gr έγινε στα 30mm από το δεξιό άκρο της δοκού, σημείο όπου επηρεάζει λιγότερο την ταλάντωση.

Σε αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μετρήσεις. :

1. μελετήθηκε η πρώτη ιδιοσυχνότητα σε ανοικτό κύκλωμα. (Αντίσταση  $R \rightarrow \infty$  και αγωγιμότητα  $G = 0$ )
2. μελετήθηκε η πρώτη ιδιοσυχνότητα σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα. (Αντίσταση  $R = 0$  και Άπειρη αγωγιμότητα  $G \rightarrow \infty$ )
3. μελετήθηκε η δεύτερη ιδιοσυχνότητα, σε ανοικτό κύκλωμα, (Αντίσταση  $R \rightarrow \infty$  και αγωγιμότητα  $G = 0$ )
4. μελετήθηκε η δεύτερη ιδιοσυχνότητα, σε ένα κύκλωμα βραχυκυκλώματος. (Αντίσταση  $R = 0$  και Άπειρη αγωγιμότητα  $G \rightarrow \infty$ )

Πίνακας 6 Ιδιοσυχνότητες παραδιακλάδωσης

ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ	OPEN CIRCUIT ( $R \rightarrow \infty, G = 0$ )	SHORT CIRCUIT ( $R=0, G \rightarrow \infty$ )
$1^H$	43.55 Hz	43.40 Hz
$2^H$	298.3 Hz	297.8 Hz

Μέσω αυτών των μετρήσεων των ιδιοσυχνοτήτων μπορεί να υπολογιστεί:

$$\text{Ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής σύζευξης } k_c = \sqrt{\frac{\omega_0^2 - \omega_s^2}{\omega_s^2}} \quad \text{Εξίσωση 53}$$

Οι βέλτιστες τιμές πηνίου και αντίστασης αντίστοιχα [17],[23].

$$L = \frac{1}{c_p \omega_0^2} \quad \text{και} \quad R = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_c}{c_p \omega_0} \quad \text{Εξίσωση 54}$$

**Μέσω της Εξίσωσης 52 και την Εξίσωσης 53 προκύπτει :**

$$\text{➤ Για την πρώτη ιδιομορφή: } k_c = \sqrt{\frac{(43.55^2 - 43.40^2) H_z}{43.40^2 H_z}} = 0,0832$$

Μετατρέποντας  $C_p = 11.5 \text{ nF} = 11.5 \cdot 10^{-9} \text{ F}$  και  $\omega_0 = 2\pi \cdot \omega_0 = 2 \cdot 3.1416 \cdot 43.55 \text{ Hz} = 273,63 \text{ Hz}$

$$\text{Υπολογίζεται } L = \frac{1}{11.5 \times 10^{-9} (273.63)^2} H = 1161 H$$

$$\text{Τέλος, } R = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{0.0832}{11.5 \times 10^{-9} \times 273.63} = 32,382 \text{ k}\Omega$$

$$\text{➤ Για τη δεύτερη ιδιομορφή: } k_c = \sqrt{\frac{(298.3^2 - 297.8^2) H_z}{297.8^2 H_z}} = 0,0579$$

Μετατρέποντας  $C_p = 11.5 \text{ nF} = 11.5 \cdot 10^{-9} \text{ F}$  και  $\omega_0 = 2\pi \cdot \omega_s = 2 \cdot 3.14 \cdot 298.3 \text{ Hz} = 1874,27 \text{ Hz}$

$$\text{Υπολογίζεται } L = \frac{1}{11.5 \times 10^{-9} (1874.27)^2} H = 24,75 H$$

$$\text{Τέλος, } R = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{0.0832}{11.5 \times 10^{-9} \times 1874.27} = 3,290 \text{ k}\Omega$$

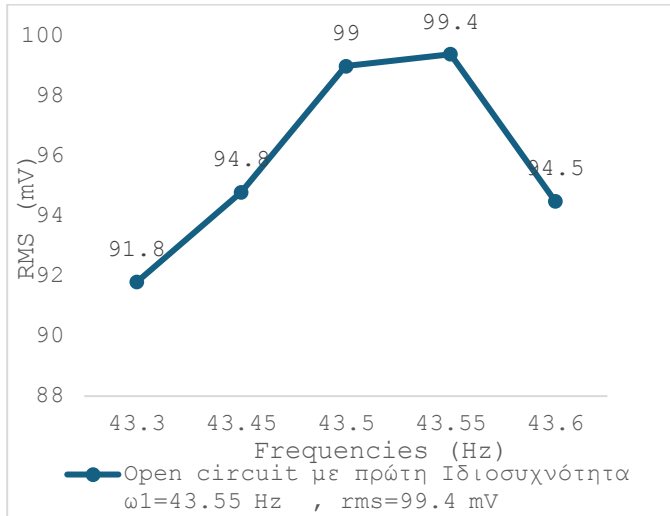
Συνεπώς, προκύπτει ο εξής παρακάτω πίνακα με τις ιδιοσυχνότητες , σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα, τον συντελεστή σύζευξης και την βέλτιστη επαγωγή και αντίσταση για την αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα.

*Πίνακας 7 Πειραματικοί υπολογισμοί*

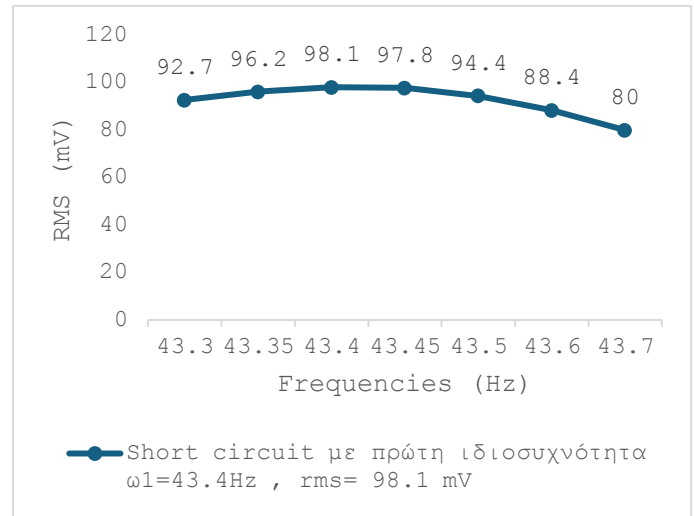
<b>ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ</b>	<b>ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ OPEN CIRCUIT (<math>R \rightarrow \infty, G = 0</math>)</b>	<b>ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ SHORT CIRCUIT (<math>R=0, G \rightarrow \infty</math>)</b>	<b><math>k_c</math></b>	<b>L</b>	<b>R</b>
<b>1<sup>H</sup></b>	43.55 Hz	43.40 Hz	0.0832	1161 H	32382 $\Omega$
<b>2<sup>H</sup></b>	298.3 Hz	297.5 Hz	0.0579	24.75 H	3290 $\Omega$

Εν συνεχεία, μέσω του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού συστήματος έγινε η μέτρηση τάσης της ταλάντωσης για την αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο σύστημα. Το ανοιχτό σύστημα, είναι ένα απενεργοποιημένο κύκλωμα με μαλακά πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, οπότε η συχνότητα θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το βραχυκυκλωμένο σύστημα όπου είναι ένα ενεργό κύκλωμα με πιο σκληρά πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Παρακάτω απεικονίζονται τα γραφήματα Τάση-Ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης.

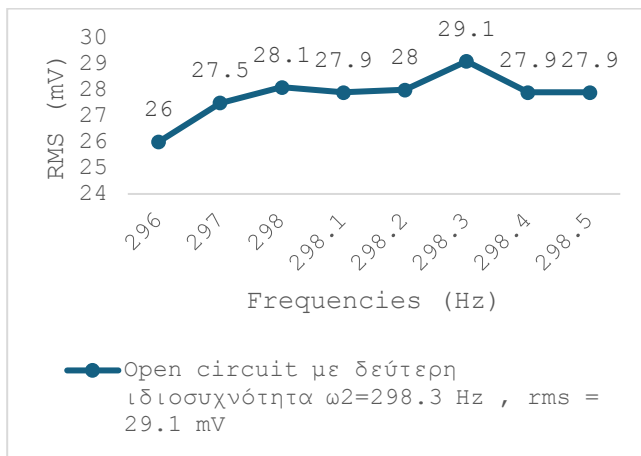


**OPEN CIRCUIT****SHORT CIRCUIT*****Πρώτη Ιδιομορφή (1<sup>η</sup>)***

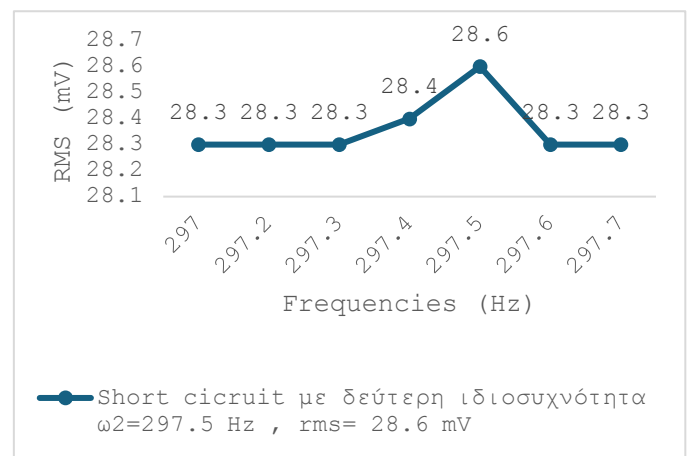
*Εικόνα 62 Πρώτη Ιδιοσυχνότητα σε Ανοιχτό Κύκλωμα με  $\omega_1=43.55\text{Hz}$  και  $rms=99.4\text{mV}$*



*Εικόνα 63 Πρώτη Ιδιοσυχνότητα σε Κλειστό Κύκλωμα με  $\omega_2=43.4\text{Hz}$  και  $rms=98.1\text{mV}$*

***Δεύτερη Ιδιομορφή (2<sup>η</sup>)***

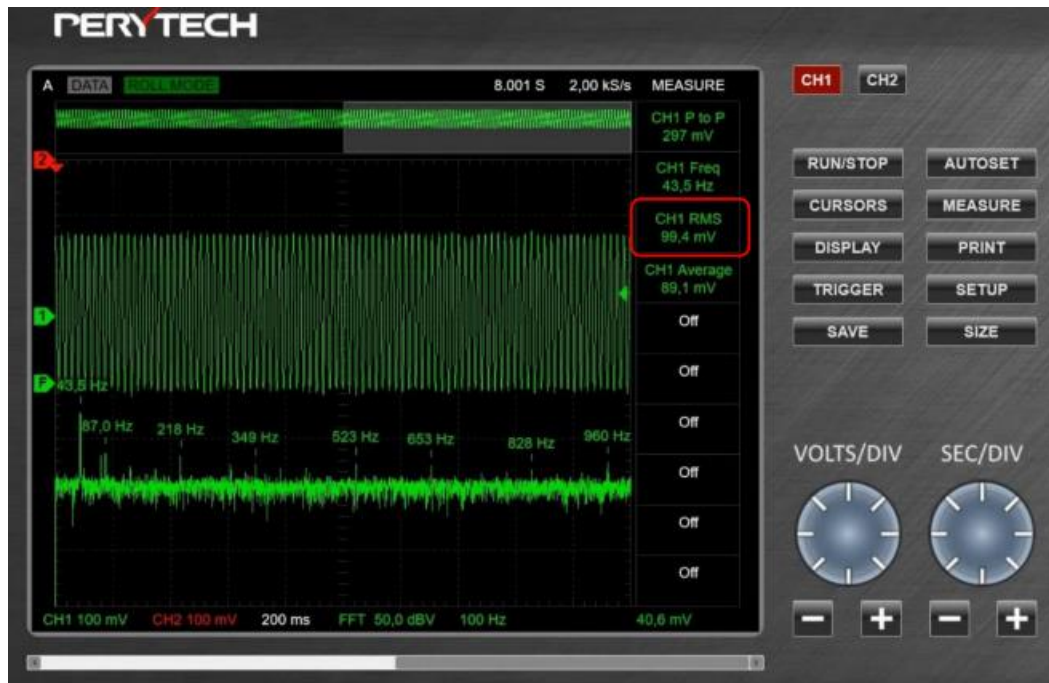
*Εικόνα 64 Δεύτερη Ιδιοσυχνότητα σε Ανοιχτό Κύκλωμα με  $\omega_2=298.3\text{Hz}$  και  $rms=29.1\text{mV}$*



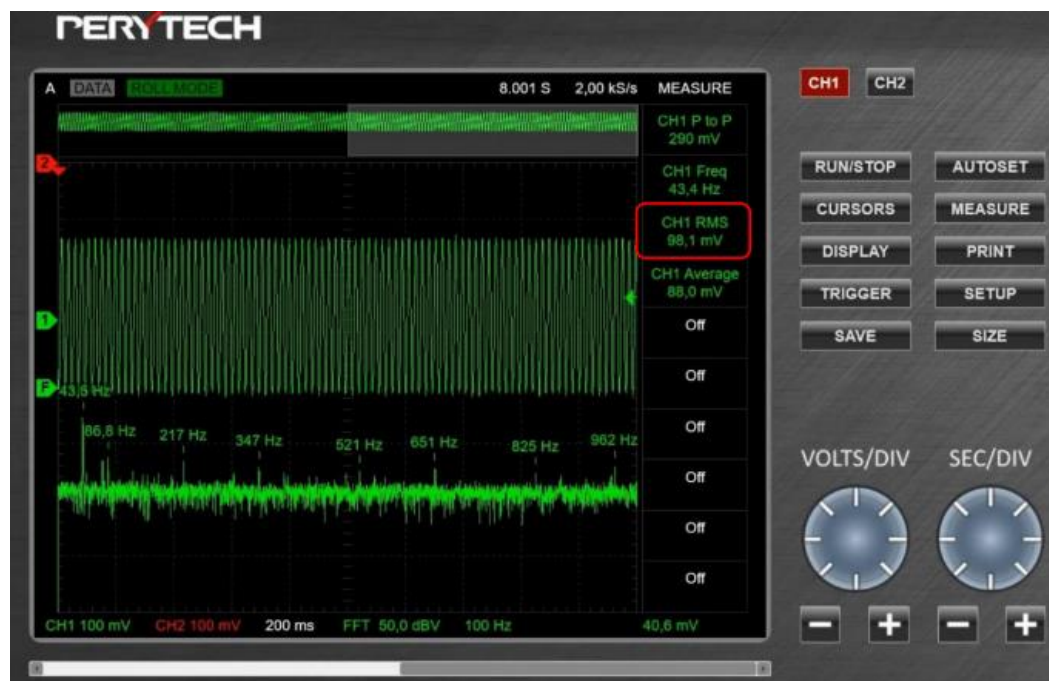
*Εικόνα 65 Δεύτερη Ιδιοσυχνότητα σε Κλειστό Κύκλωμα με  $\omega_2=297.5\text{Hz}$  και  $rms=28.6\text{mV}$*

Μέσω του παλμογράφου βρίσκουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για την πρώτη και δεύτερη ιδιοσυχνότητα σε ανοιχτό και κλειστό κύκλωμα .

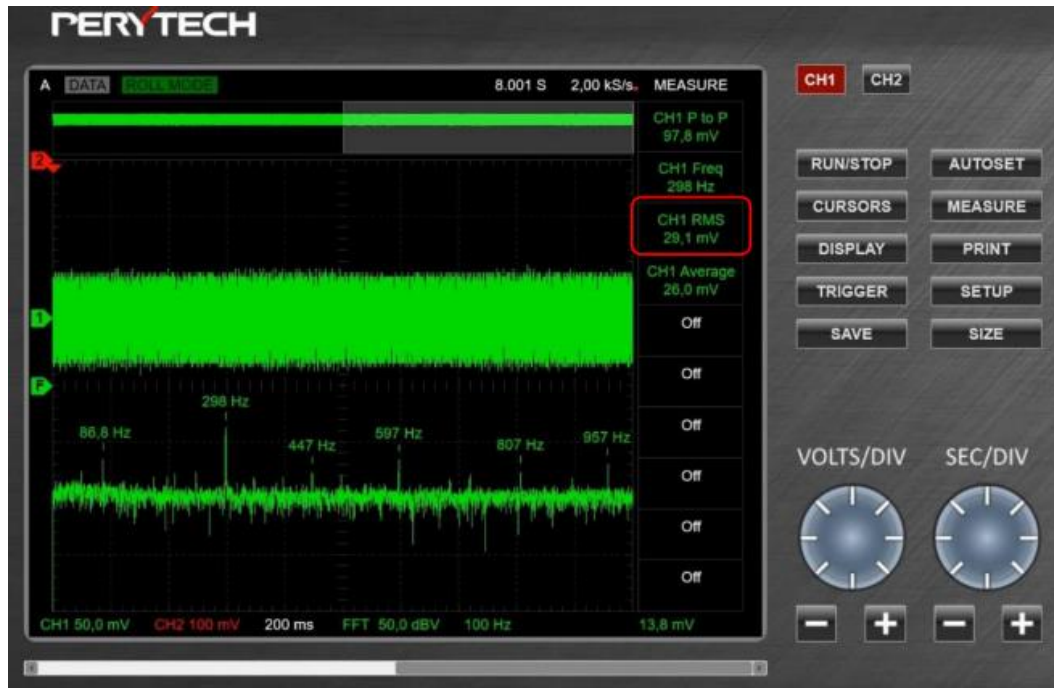
Η τάση είναι κυκλωμένη με κόκκινο περίγραμμα .



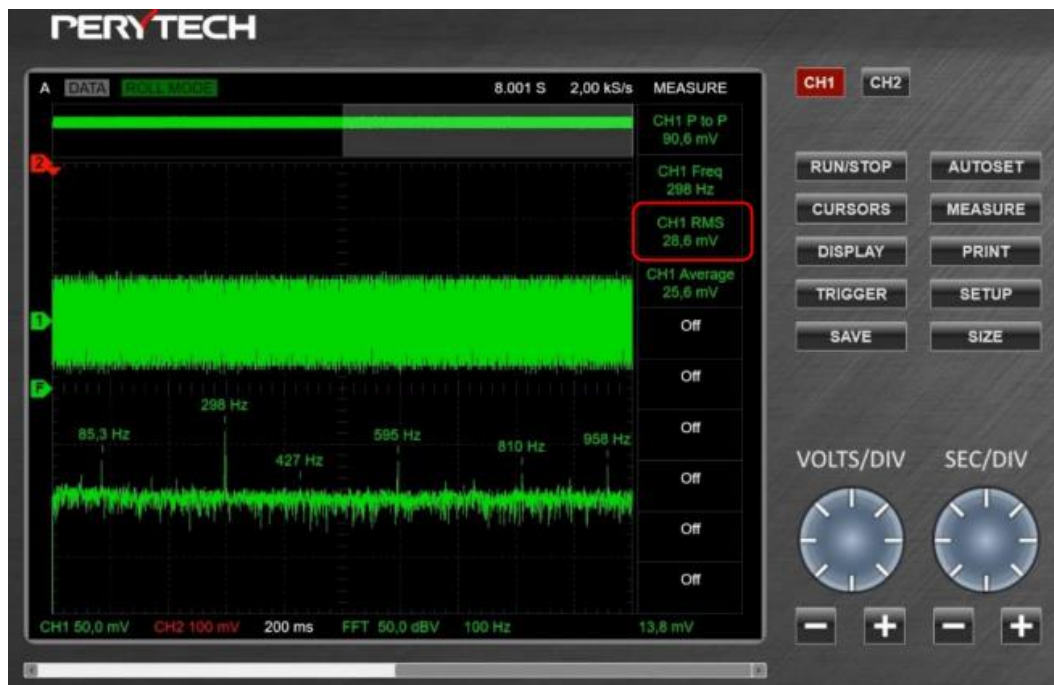
Εικόνα 66 Πρώτη Ιδιοσυχνότητα σε Ανοιχτό Κύκλωμα με  $\omega_1=43.55\text{Hz}$  και  $rms=99.4\text{mV}$



Εικόνα 67 Πρώτη Ιδιοσυχνότητα σε Κλειστό Κύκλωμα  $\omega_2=43.4\text{Hz}$  και  $rms=98.1\text{mV}$



Εικόνα 68 Δεύτερη Ιδιοσυχνότητα σε Ανοιχτό Κύκλωμα με  $\omega_2=298.3\text{Hz}$  και  $rms=29.1\text{mV}$



Εικόνα 69 Δεύτερη Ιδιοσυχνότητα σε Κλειστό Κύκλωμα με  $\omega_2=297.8\text{Hz}$  και  $rms=28.6\text{mV}$

Για την μελέτη αρχικά αυξάνεται η συχνότητα εισόδου του πηνίου έως ότου παρατηρηθεί ότι το πλάτος της ταλάντωσης αυξομειώνεται. Με αυτόν τον τρόπο, όταν εντοπιστεί το μέγιστο πλάτος τότε προσδιορίζεται και η πρώτη ιδιοσυχνότητα και αντίστοιχα όταν παρατηρηθεί το δεύτερο μεγαλύτερο πλάτος ορίζεται η δεύτερη ιδιοσυχνότητα .

Παρατηρείται ότι στην πρώτη ιδιοσυχνότητα οι τιμές των  $R$  και  $L$  είναι πολύ μεγάλες και δεν μπορούν να βρεθούν και να κατασκευαστούν στην αγορά καθώς και ότι οι μεγάλες μετρήσεις δεν μπορούν να αποσβεστούν εύκολα. Στην δεύτερη ιδιοσυχνότητα οι τιμές των  $R$  και  $L$  είναι καλύτερες, γεγονός που επιτρέπει να γίνει μελέτη σε αυτήν. Έτσι, η πρώτη ιδιοσυχνότητα χαρακτηρίζεται για την πολυπλοκότητά της , για τον λόγο αυτό η μελέτη της είναι επιφανειακή και η βασική μελέτη γίνεται στην δεύτερη ιδιοσυχνότητα του παραδιακλαδωμένου συστήματος για σαφή αποτελέσματα.

Ορίζοντας στην γεννήτρια εισόδου βήμα συχνότητας 0.01 Hz με τον ρόλο του αισθητήρα ADXL 335 η τιμή της ταλάντωσης μετατρέπεται σε τάση και απεικονίζεται στον παλμογράφο μέσω του οποίου διακρίνεται το πλάτος της ταλάντωσης.

## 5.5 Απόσβεση δεύτερης ιδιομορφής με κύκλωμα RL

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7, στον οποίο υπολογίστηκαν τα πειραματικά χαρακτηριστικά με τις αντίστοιχες εξισώσεις για την δεύτερη ιδιομορφή με κύκλωμα RL σε ανοιχτό και βραχυκυκλωμένο σύστημα έχουμε :

- Αντίσταση,  $R = 3290 \Omega = 3.29 \text{ k}\Omega$
- Επαγωγή,  $L = 24.75 \text{ H}$

Οι αντίστοιχες μετρήσεις που έγιναν στο πείραμα μετρώντας τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος είναι :

- Αντίσταση  $R=2.93 \text{ k}\Omega$



Εικόνα 70 Μέτρηση Αντίστασης Πειράματος

- Επαγωγή των δύο πηνίων που είναι σε σειρά  $L_1=19.02 \text{ H}$  και  $L_2= 6.15 \text{ H}$  είναι η συνολική επαγωγή  $L= L_1+ L_2= (19.02+6.15)\text{H}= 25.17 \text{ H}$

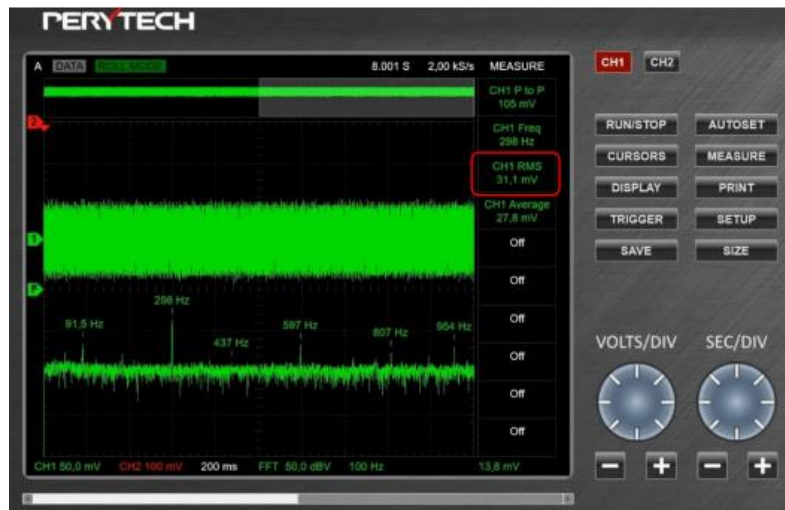


Εικόνα 71 Μέτρηση Πηνίων Πειράματος

Εστιάζοντας στην δεύτερη ιδιοσυχνότητα έχουμε τα εξής γραφήματα σε κατάσταση ανοιχτού και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος πριν και μετά την εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου .

Στάδιο 1 (ανοιχτό κύκλωμα) πριν την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου :

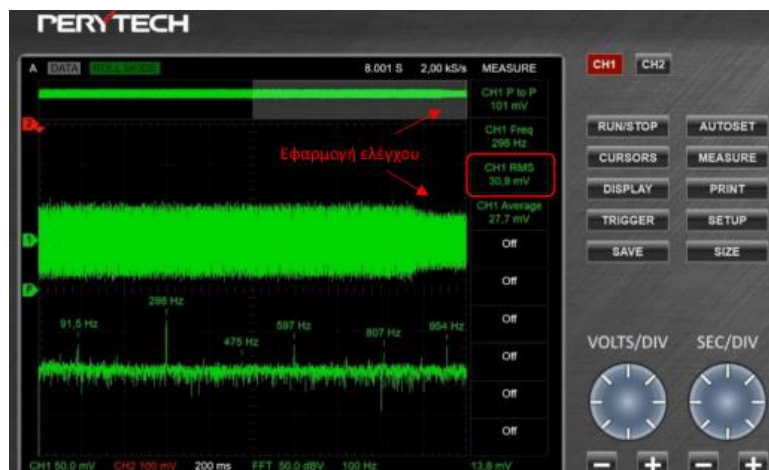
- Ιδιοσυχνότητα  $\rightarrow \omega_{2\pi} = 298 \text{ Hz}$
- Αισθητήρας Επιτάχυνσης  $\rightarrow \text{rms} = 31.1 \text{ mV}$



Εικόνα 72 Απεικόνιση Δεύτερης Ιδιομορφής πριν την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου με  $\omega_{2\pi}=298\text{Hz}$  και  $\text{rms}=31.1\text{mV}$  σε ανοιχτό κύκλωμα

Στάδιο 2 κατά την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου:

- Ιδιοσυχνότητα  $\rightarrow \omega_2 = 298 \text{ Hz}$
- Αισθητήρας Επιτάχυνσης  $\rightarrow \text{rms} = 30.9 \text{ mV}$



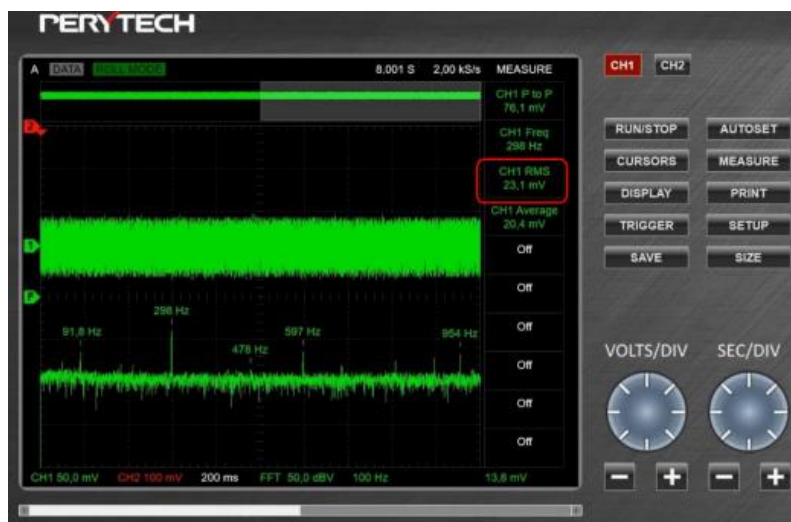
Εικόνα 73 Απεικόνιση Δεύτερης Ιδιομορφής κατά την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου με  $\omega_1=298\text{Hz}$  και  $\text{rms}=30.9\text{mV}$  σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα



Από το παραπάνω γράφημα διακρίνεται η μείωση της καμπύλης για την δεύτερη ιδιοσυχνότητα σε βραχυκυκλωμένο κύκλωμα, έχοντας ενώσει τα ηλεκτρόδια από τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στο παραδιακλαδωμένο σύστημα.

Στάδιο 3 μετά την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου:

- Ιδιοσυχνότητα  $\rightarrow \omega_{2\mu} = 298 \text{ Hz}$
- Αισθητήρας Επιτάχυνσης  $\rightarrow \text{rms} = 23.1 \text{ mV}$



Εικόνα 74 Απεικόνιση Δεύτερης Ιδιομορφής μετά την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου με  $\omega_{2\mu}=298\text{Hz}$  και  $\text{rms}=23.1 \text{ mV}$

Συμπερασματικά, μετά την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου ελέγχου στη δονούμενη κατασκευή υπάρχει μείωση του επιταχυνσιόμετρου από τα 31.1 mV στα 23.1 mV έχοντας 330mV/g την ευαισθησία του οργάνου, ώστε να μη καεί κάποιο εξάρτημα. Σημειώνεται ότι όλα τα αποτελέσματα έχουν μειωθεί, συμπεραίνοντας ότι έχει γίνει απόσβεση και οι τιμές R και L είναι ικανές να αποσβεστούν. Έτσι, στο συγκεκριμένο πείραμα για την απόσβεσης ταλάντωσης της δεύτερης ιδιοσυχνότητας με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα PIC255 στην δοκό, συνδεδεμένα σε παραδιακλαδωμένο κύκλωμα μιας ιδιομορφής και με μέγιστες τιμές αντίστασης R και επαγωγής L παρατηρήθηκε η μείωση της ταλάντωσης κατά 25.72% σε παραδιακλαδωμένο κύκλωμα, συγκριτικά με την αρχική τιμή της κατασκευής πριν την εφαρμογή ελέγχου σε ανοιχτό κύκλωμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 Συμπεράσματα

Με βάση το πείραμα και την ανάλυση συχνοτήτων του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα για τον έλεγχο μιας ιδιομορφής που βρέθηκαν είναι τα εξής:

- οι φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές του συστήματος
- οι βέλτιστες τιμές των στοιχείων του κυκλώματος που προκύπτουν έχουν μικρές τιμές του πηνίου  $L$
- τα γραφήματα απόκρισης σήματος εξόδου.

Ένας σημαντικός συντελεστής στο παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα μας που είναι συνδεδεμένο με την δοκό, είναι ο συντελεστή σύζευξης  $k_c$ , του οποίου ο ρόλος έχει καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση του συστήματος καθώς σχετίζεται με τον συντελεστή απόσβεσης και τις συχνότητες του συστήματος. Μέσω του συντελεστή μπορεί να βγει το συμπέρασμα της απόκλισης που έχει η συχνότητα του συστήματος  $\omega_o$  (συχνότητα ανοιχτού κυκλώματος) με την συχνότητα επιβολής  $\omega_s$  (συχνότητα βραχυκυκλωμένου κυκλώματος) σε αυτό και να ορίσει πόσο ανθεκτικό είναι το κύκλωμα μας σε εξωτερικές μεταβολές. Στο πείραμα ο συντελεστής σύζευξης  $k_c$  έχει μικρή τιμή, γεγονός που οδηγεί στα εξής συμπεράσματα :

- η συχνότητα επιβολής  $\omega_s$  είναι κοντά στην συχνότητα του συστήματος μας  $\omega_o$
- το σύστημα μας είναι ευαίσθητο στις μικρές αλλαγές στη συχνότητας.

Σύμφωνα με παρόμοιες μελέτες, δημιουργήθηκε αυτό το πείραμα, όπου μια δοκός-πρόβολος διεγείρεται ανέπαφα μέσω του πηνίου και είναι συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε ένα παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συντονισμού RL. Η συγκεκριμένη έρευνα επικεντρώνεται στον έλεγχο την δεύτερης ιδιομορφής, όπου τα παραδιακλαδωμένα στοιχεία συντονισμού RL έχουν καλύτερη απόδοση απόσβεσης κοντά στις συχνότητες συντονισμού. Το πηνίο έχει σημαντικό ρόλο για την μείωση της ταλάντωσης στην εφαρμογή του ελέγχου καθώς και η αντίσταση, όπου η απουσία της θα αποσυντόνιζε όλη την δομική κατασκευή. Μέσω της αντίστασης μπορεί να απορροφηθεί το μέγιστο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος και να το κρατήσει σε μία σταθερότητα.

Τα αποτελέσματα της έρευνας γύρω από τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές που αναφέρθηκαν, είναι σημαντικά για την μελέτη της συμπεριφοράς της δοκού με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, όταν σε αυτή ασκήσουμε εξωτερικές δυνάμεις ή ηλεκτρική τάση. Τέλος, όπως αποδείχθηκε στη δεύτερη ιδιοσυχνότητα του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος, υπήρξε απόσβεση της ταλάντωσης κατά 25.72% σε σχέση με το ανοιχτό κύκλωμα.

## 6.2 Μελλοντικές προτάσεις για έρευνα

Η συγκεκριμένη καινοτομία βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, υποσχόμενη αποτελεσματική απόσβεση ταλαντώσεων ή δονήσεων σε διάφορους τομείς. Περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να γίνει γύρω από τον τομέα της μηχανικής, της ακουστικής και της ιατρικής.

### Προτάσεις :

- Μελέτη μέσω χρήσης παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων σε κατασκευές όπως γέφυρες ή τουρμπίνες με σκοπό την παρακολούθηση (χρήση πιεζοηλεκτρικών με ρόλο ως αισθητήρα ) και τον έλεγχο των δονήσεων/ ταλαντώσεων σε αυτές.
- Μελέτη μέσω χρήσης παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων σε μονωτικά υλικά για την βελτίωση της ηχομόνωσης σε διάφορα κτίρια μετατρέποντας την ηχητική ενέργεια σε ηλεκτρική και έπειτα απορροφώντας την.
- Μελέτη μέσω χρήσης παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων ενσωματώνοντάς τα σε φορητές συσκευές, ανιχνεύοντας τα σήματα από τους μύες ή την καρδιά με σκοπό την παρακολούθηση της υγείας.



## Βιβλιογραφία

- [1] S.O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming ‘Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping’ / 1 (Book) Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping Moheimani and Fleming.pdf / ( accessed February 14, 2006) .
- [2] ‘History of Piezoelectricity | PIEZO.COM’/ <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity> (accessed June 29, 2022 ) .
- [3] ΠΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΙΕΖΟ /Πιεζοκεραμικά υλικά.pdf / ( accessed 2020).
- [4] Δρακόπουλος Μεταξάς ‘Προσομοίωση σύνθετων πιεζοηλεκτρικών υλικών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων’. Μεταπτυχιακή Διατριβή / Drakopoulos\_Metaxas\_MSc\_2016 .pdf / ( accessed 2016).
- [5] Κωνσταντίνος Εμμ. Μαρακάκης ‘Προσομοίωση και βελτιστοποίηση ευφών κατασκευών’. Διδακτορική Διατριβή / Marakakis\_Konstantinos\_PhD\_2022.pdf / (( accessed June, 2022).
- [6] A. J. Fleming and S. O. R. Moheimani, "Improved current and charge amplifiers for driving piezoelectric loads, and issues in signal processing design for synthesis of shunt damping circuits.," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, pp. 77-92, 2004.
- [7] L. R. Corr and W. W. Clark, "A Novel Semi-Active Multi-Modal Vibration Control Law for a Piezoceramic Actuator," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 125, no. 2, pp. 214-222, 2003.
- [8] A. Buchacz, M. Płaczek and A. Wróbel, "Control of characteristics of mechatronic systems using piezoelectric materials," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 51, no. 1, pp. 225-234, 2013.
- [9] J. Ducarne, O. Thomas and J.-F. Deü, "Structural Vibration Reduction by Swith Shunting of Piezoelectric Elements: Modelling and Optimization," *Journal of intelligent material systems and structures*, vol. 21, pp. 797-816, 2010.
- [10] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures. Solid Mechanics and Its Applications*, Springer, 2018.
- [11] A. Preumont, *Mechatronics Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems. Solid Mechanics and Its Applications*, Springer, 2006.
- [12] Marakakis, G. K. Tairidis, P. Koutsianitis, and G. E. Stavroulakis, ‘Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review’, *Front. Built Environ.*, vol. 5, p. 64, May 2019, doi: 10.3389/fbuil.2019.00064.
- [13] J.-Y. Jeon, ‘Z. Chen, B. Guo, Y. Xiong, C. Cheng, and Y. Yang, “Melnikov-method-based broadband mechanism and necessary conditions of nonlinear rotating energy harvesting using piezoelectric beam”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 27, no. 18, pp. 2555–2567, Nov. 2016, doi: 10.1177/1045389X16635844.’, *J Mech Sci Technol*, vol. 23, no. 5, pp. 1435–1445, May 2009, doi: 10.1007/s12206-009-0402-8.
- [14] ‘IEEE Standard on piezoelectricity, 1987’, IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.1988.79638.
- [15] ΠΙ ‘Flexible Piezo Transducers find Applications in Structural Health Monitoring, Contouring, and Sound Cancellation’ /<https://www.pi-usa.us/en/tech-blog/flexible-piezo-transducers-find-applications-in-structural-health-monitoring-contouring-and-sound-cancellation>
- [16] ‘Piezoelectric module – SDTools’. <https://www.sdtools.com/sdt/piezo/> (accessed Jul. 05, 2022).
- [17] O. Thomas, J.-F. Deü, and J. Ducarne, ‘Vibrations of an elastic structure with shunted piezoelectric patches: efficient finite element formulation and electromechanical coupling

- coefficients', Int. J. Numer. Meth. Engng, vol. 80, no. 2, pp. 235–268, Oct. 2009, doi: 10.1002/nme.2632.
- [18] Μαρία Στυλιανή Ι. Δαράκη 'Προσομοίωση και παραμετρική ανάλυση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών συστημάτων με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων'. file:///C:/Users/dayad/Desktop/THOMAS/dps/Daraki\_Maria-Styliani\_Dip\_2022.pdf / (accessed Jul , 2022).
- [19] Boris Lossouarn, M Aucejo, J.-F Deü, B. Multon '43 Design of inductors with high inductance values for resonant piezoelectric damping .pdf' . HAL Id: hal-01657528 / (accessed Dec .6 , 2017).
- [20] Γ.Α ' Πώς λειτουργεί η αμπεροτσιμπίδα' . Πώς λειτουργεί η αμπεροτσιμπίδα.pdf. file:///C:/Users/dayad/Desktop/%CE%A0%CF%8E%CF%82%20%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%AF%20%CE%B7%20%CE%B1%CE%BC%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%84%CF%83%CE%B9%CE%BC%CF%80%CE%AF%CE%B4%CE%B1.pdf.
- [21] D. T. Erbessd, "Resonance & Natural Frequency," RELIABILITY CONNECT®. Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.reliabilityconnect.com/resonance-natural-frequency/>.
- [22] Dsa2gamba and abbottds, "Natural frequency", Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://pressbooks.pub/sound/chapter/whats-resonance-and-what-isnt/>.
- [23] P. Soltani, G. Kerschen, G. Tondreau and A. Deraemaeker, "Piezoelectric vibration damping using," Smart Materials and Structures, vol. 23, p. 11, 2014.
- [24] R.-S. Marinescu and C. Burileanu, "Function generator by direct-digital frequency synthesis," in 2008 International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania: IEEE, 2008, pp. 427–430. doi: 10.1109/SMICND.2008.4703445.
- [25] 'USER MANUAL A4400 VA4 Pro' / <https://adash.com/documents/A4400/Adash-A4400-VA4-Pro-manual.pdf> / pp. 135-137 (accessed May 18, 2021).