

**Πολυτεχνείο Κρήτης**  
**Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών**  
**Υπολογιστών (ΗΜΜΥ)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Έλεγχος Κατασκευών με Παραδιακλαδόμενα Πιεζοηλεκτρικά**  
**Κυκλώματα**



**Επιμέλεια: Καλλιάρας Απόστολος**

**Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρακάκης Γεώργιος**

**Μέλη επιτροπής: Σταυρουλάκης Γεώργιος, Κουτρούλης Ευτύχιος**

Χανιά, 14/11/2019

# Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της ακόλουθης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γιώργο Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, που δέχθηκε να αναλάβει την επίβλεψη της εργασίας μου, χωρίς να με αντιμετωπίσει διαφορετικά από φοιτητές του τμήματος του σε κανένα σημείο της υλοποίησης της εργασίας.

Ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω στον Δρ. Γιώργο Ταϊρίδη, μεταδιδακτορικό ερευνητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, που καθημερινά έδινε λύση στις απορίες και τα προβλήματα που αντιμετώπιζα, με ταχύτητα και αστείρευτη προθυμία, αφιερώνοντας σημαντικό χρόνο σε εμένα.

Επίσης ευχαριστώ τον κ. Γιώργο Σταυρακάκη, καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, που με σύστησε και με παρότρυνε να απευθυνθώ στον κ. Σταυρουλάκη για την υλοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη και αδιάκοπη βοήθεια τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, οι οποίες δεν θα ήταν εφικτές χωρίς εκείνους.



## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή
2. Πιεζοηλεκτρισμός
  - 2.1 Ορισμός
  - 2.2 Ιστορική αναδρομή
  - 2.3 Υλικά
  - 2.4 Ευθύ και αντίστροφο φαινόμενο
  - 2.5 Λειτουργίες
  - 2.6 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών
  - 2.7 Πιεζοηλεκτρισμός ως μέγεθος
3. Απόσβεση μέσω παθητικών πιεζοηλεκτρικών διακλαδώσεων
  - 3.1 Μέθοδος Current-Block
  - 3.2 Μέθοδος Current-flow
  - 3.3 Μεθοδολογία υπολογισμού στοιχείων “Current-block” κυκλώματος
  - 3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού στοιχείων “Current-flow” κυκλώματος
4. Μοντελοποίηση
  - 4.1 Πιεζοηλεκτρικό μοντέλο
  - 4.2 Μοντέλο αμφιέρειστης δοκού
  - 4.3 Structural dynamics αμφιέρειστης δοκού
  - 4.4 Μοντέλο σύνθετου συστήματος
5. Αριθμητικά αποτελέσματα
  - 5.1 Σύστημα υπό μελέτη
  - 5.2 Απόκριση του συστήματος
6. Βελτίωση απόδοσης κυκλωμάτων
  - 6.1 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current-block”
  - 6.2 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current-flow”
7. Συμπεράσματα

## Βιβλιογραφία



## 1. Εισαγωγή

Στην εποχή που διανύουμε, λόγω των ραγδαίων τεχνολογικών εξελίξεων, ολοένα και περισσότερο γίνονται προσπάθειες για εύρεση και αξιοποίηση νέων μεθόδων και τεχνικών που θα αναπτύσσουν τους τομείς της ενέργειας, των σημάτων, των κατασκευών καθώς και της ασφάλειας. Φυσικά θα πρέπει πάντα να λαμβάνουμε υπόψη και τις επιταγές του περιβάλλοντος και γι' αυτό στρεφόμαστε συχνά στη φύση για την επίλυση σύνθετων τεχνικών θεμάτων. Πολλά είναι τα υλικά που ακόμα και χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία μπορούν να μας διευκολύνουν και να μας εμπνεύσουν λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους.

Στις κατασκευές φαίνεται να γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη τόσο η φύση, όσο και οι χρήσεις των πιεζοηλεκτρικών υλικών, χρησιμοποιούμενα είτε ως αισθητήρες είτε ως διεγέρτες, είτε με εναλλασσόμενους ρόλους. Η ανάπτυξή τους στον τομέα αυτόν έχει να κάνει κυρίως με τον έλεγχο και την αίσθηση των ταλαντώσεων καθώς και με τη μείωση των κραδασμών.

Το μοντέλο που μελετάμε περιλαμβάνει μια ελαστική κατασκευή (δοκός), κατασκευασμένη από αλουμίνιο, στην οποία είναι εγκατεστημένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και συνδέεται με μια γραμμική παθητική παραδιακλάδωση συντονισμού μέσω ηλεκτροδίων. Θα διατυπώσουμε το πρόβλημα σύζευξης μεταξύ ηλεκτρικού και μηχανικού πεδίου με σκοπό να υπολογίσουμε την απόκριση του συστήματος και να τροποποιήσουμε τη συμπεριφορά του ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή απόσβεση. Η παραδιακλάδωση συντονισμού είναι ρυθμισμένη κατάλληλα ώστε να αποσβένονται δυο ιδιοσυχνότητες ταυτόχρονα. Η υλοποίηση γίνεται με δυο διαφορετικές εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων της “Current Block” σε σειρά και της “Current Flow”. Το σύστημα μοντελοποιείται σε περιβάλλον Matlab, μελετώνται οι αποδόσεις των δυο τεχνικών και συγκρίνονται μεταξύ τους.



## 2. Πιεζοηλεκτρισμός

### 2.1 Ορισμός

Ως πιεζοηλεκτρισμός καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο κάποια υλικά αναπτύσσουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική πίεση ή ταλάντωση. Αντιστρόφως όταν τα συγκεκριμένα υλικά βρεθούν κάτω από ηλεκτρική τάση αυτά παραμορφώνονται.

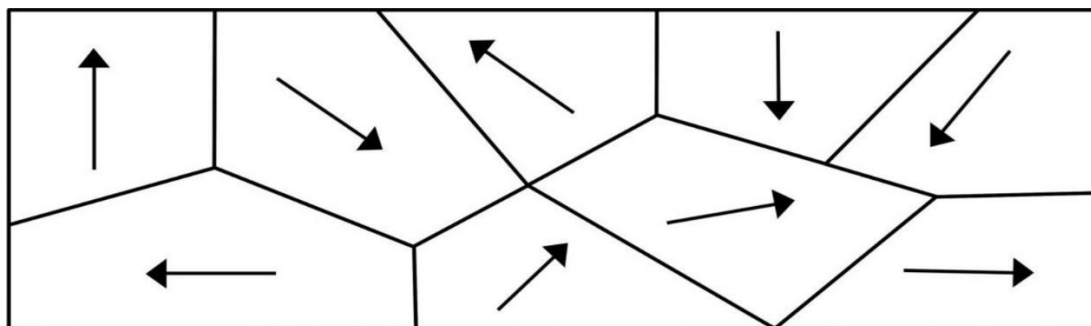
### 2.2 Ιστορική αναδρομή

Πριν από αιώνες μοναχοί στην Κεϋλάνη και στην Ινδία παρατήρησαν τυχαία συγκεκριμένες ιδιαίτερες ιδιότητες κάποιων κρυστάλλων. Έπειτα από καιρό ο τουρμαλίνης, το εν λόγω υλικό, φτάνει στην Ευρώπη από Ολλανδούς θαλασσοπόρους για να προσδιοριστεί εν τέλει η ηλεκτρική του συμπεριφορά το 1756 από το Γερμανό φυσικό Aepmum. Το 1817 το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρεται από το Γάλλο μεταλλειολόγο Ren 'e dust και ύστερα από 60 χρόνια λαμβάνουν χώρα τα πρώτα πειράματα και εφαρμογές από τον Pierre Curie που τον ώθησαν να διατυπώσει τη θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού. Οι πρώτες χρηστικές εφαρμογές παρουσιάστηκαν κατά την περίοδο ανάμεσα στον πρώτο και το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο με διάφορες πρωτοτυπίες (π.χ. υπερηχητικοί μετατροπείς).

Τέλος η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών, καθιερώθηκε στο πεδίο του ελέγχου θορύβου και δόνησης στα τέλη του εικοστού αιώνα από τον Forward και τους E.F. Crawley και J. de Luis.

### 2.3 Υλικά

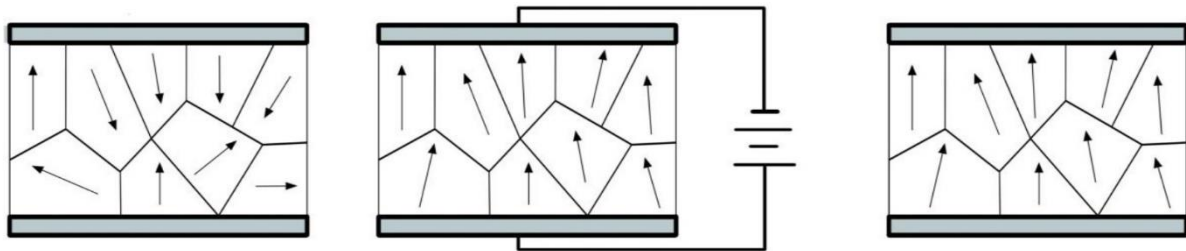
Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Συγκεκριμένα απαιτείται οι κρύσταλλοι να μην έχουν κανένα κέντρο συμμετρίας. Κάθε μόριο έχει μια πολικότητα αφού το ένα άκρο του έχει συγκεντρωμένα περισσότερα ηλεκτρόνια, είναι δηλαδή περισσότερο αρνητικά φορτισμένο. Εφόσον το άλλο άκρο είναι φορτισμένο θετικά δημιουργείται ένα δίπολο. Αφού υπάρχουν διαφορετικές περιοχές πολικότητας (περιοχές Weiss) τότε η κατανομή της συνολικής πολικότητας είναι ασύμμετρη. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η συγκεκριμένη διάταξη. [1]



Εικόνα 1. Διάταξη κρυσταλλικού πλέγματος



Για την εμφάνιση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, το πολυκρυσταλλικό υλικό θερμαίνεται από τη σύνδεσή του με ένα ηλεκτρικό πεδίο. Επομένως η κίνηση των μορίων γίνεται πιο έντονη με αποτέλεσμα να προκύπτει σταδιακά η ενιαία διεύθυνση για όλα τα δίπολα.



Εικόνα 2. Αναδιάταξη των μορίων λόγω θέρμανσης του υλικού από ηλεκτρικό πεδίο

Υπάρχουν αρκετά υλικά που παρουσιάζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες και είτε προέρχονται από τη φύση είτε είναι τεχνητά. Οι πιο διαδομένοι κρύσταλλοι είναι ο χαλαζίας, το άλας Rochelle και ο τουρμαλίνης. Το 1954 εμφανίστηκε στο Τόκιο το κεραμικό PZT το οποίο αποτελεί μέχρι και σήμερα το πιο διαδεδομένο τεχνητό κεραμικό με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Άλλα είναι ο τιτανικός μόλυβδος, το τιτανικό βάριο και το τιτανικό λίθιο.

## 2.4 Ευθύ και αντίστροφο φαινόμενο

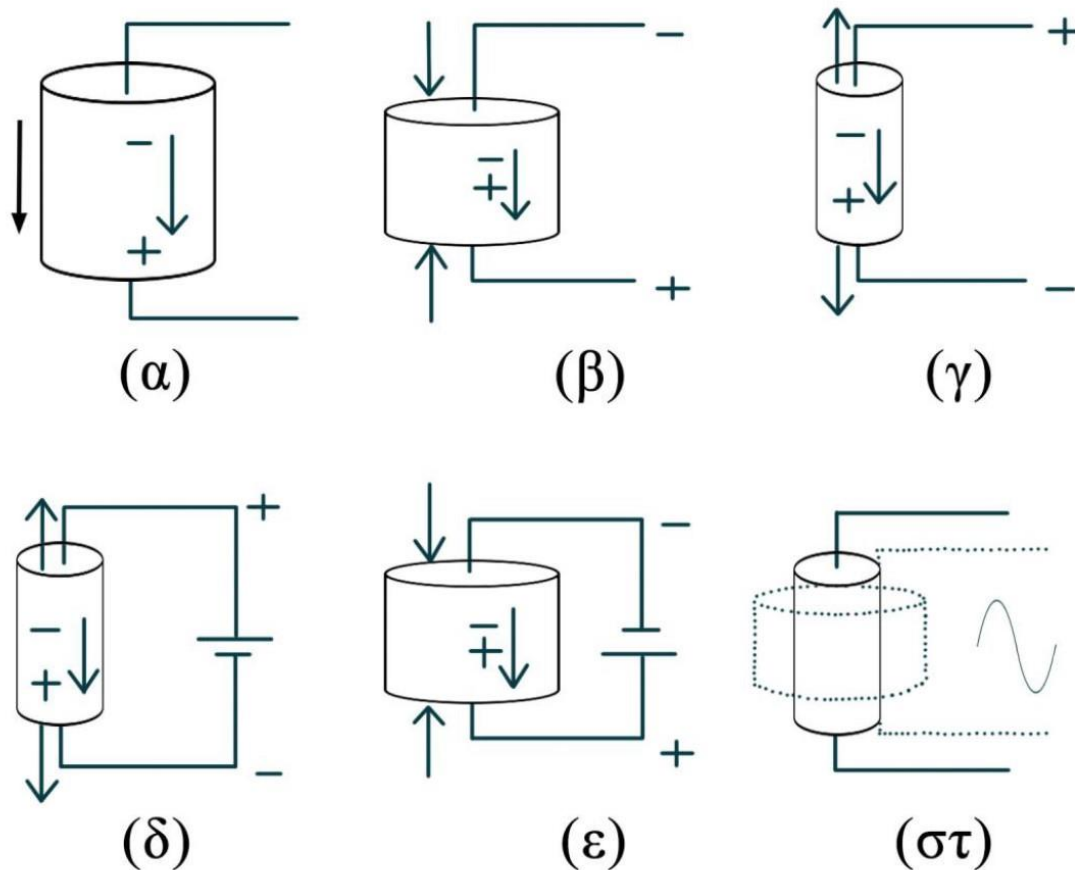
Ως ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται η μεταβολή της ηλεκτρικής πόλωσης του υλικού που προκαλείται από μια ανάλογη μηχανική παραμόρφωσή του. Έχουμε δηλαδή δημιουργία φορτίου λόγω της εφαρμογής δύναμης. Ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται η μηχανική παραμόρφωση του υλικού όταν βρίσκεται κάτω από την επίδραση κάποιου ηλεκτρικού πεδίου. Δηλαδή, σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται μεταβολή στο σχήμα του κρυστάλλου (δημιουργία δύναμης) όταν ο τελευταίος βρεθεί μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται ως διεγέρτες και ως αισθητήρες και η λειτουργία τους βασίζεται στην αλληλεπίδραση του ηλεκτρομηχανικού πεδίου. Αξίζει να αναφερθεί ότι άλλο ένα βασικό χαρακτηριστικό των υλικών αυτών που δικαιολογεί την χρήση τους ως αισθητήρες και ως διεγέρτες είναι και το πυροηλεκτρικό φαινόμενο. Κατά το φαινόμενο αυτό, το πιεζοηλεκτρικό υλικό αποκρίνεται στις μεταβολές της θερμοκρασίας αναπτύσσοντας επιπλέον ηλεκτρικό φορτίο και ηλεκτρικό δυναμικό στην πιεζοηλεκτρική στρώση.

## 2.5 Λειτουργίες

Στη συνέχεια, βάσει των παρακάτω μπλοκ σχημάτων διακρίνουμε τις πιθανές αντιδράσεις που μπορεί να έχει ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος ανάλογα με τη δράση που θα του επιβληθεί. Αρχικά (3α) απεικονίζεται το υλικό χωρίς να υπόκειται σε καμία διαδικασία. Σε περίπτωση που ασκηθεί θλίψη (3β) τότε μια τάση ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης παρουσιάζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αν ασκηθεί εφελκυσμός (3γ) εμφανίζεται τάση ανάστροφη προς την πόλωση. Μια τάση ανάστροφης πόλωσης ως προς την τάση πόλωσης θα προκαλέσει διαστολή του υλικού (3δ). Αντίθετα μια τάση ίδιας πολικότητας προκαλεί



συστολή-συμπίεση (3ε) του υλικού. Στην περίπτωση που εφαρμοστεί εναλλασσόμενο σήμα τότε το υλικό θα δονείται σύμφωνα με τη συχνότητα του σήματος (3στ). Δηλαδή για κάθε χρονική στιγμή το σώμα θα διαστέλλεται ανάλογα προς την πολικότητα της τάσης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Εικόνα 3. Πιθανές καταστάσεις πιεζοηλεκτρικών υλικών

Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος αποκρίνεται (συστέλλεται ή διαστέλλεται) με διαφορετικούς τρόπους σε διαφορετικές συχνότητες του σήματος. Προκειμένου να επιτύχουμε διαφορετικούς τρόπους δόνησης του υλικού παράγονται πιεζοκρύσταλλοι σε διάφορα σχήματα. Για την πραγματοποίηση μικρών τέτοιων προϊόντων χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένοι τύποι δόνησης, οι οποίοι προκύπτουν για συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Έτσι υπάρχει δυνατότητα παραγωγής πιεζοηλεκτρικών προϊόντων που λειτουργούν-αποκρίνονται σε συχνότητες της τάξης των kHz μέχρι και την τάξη των MHz [2].

## 2.6 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών

Η πολλαπλή λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι η αιτία του αυξημένου ενδιαφέροντος που επιδεικνύεται για αυτά την τελευταία 15ετία. Με την τοποθέτησή τους ως τμήματα δομικών στοιχείων σε ελαφρές κατασκευές, δίνεται η δυνατότητα στην



κατασκευή να αντιλαμβάνεται εντατικές καταστάσεις, μέσω της λειτουργίας τους ως αισθητήρες, και να μεταβάλλει τη συμπεριφορά της ανάλογα με την εφαρμογή, μέσω της δράσης τους ως διεγέρτες. Η κατασκευή γίνεται δηλαδή αυτοπροσαρμοζόμενη ή αλλιώς “ευφυής”. Με βάση τη σκέψη αυτή, η μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε κατασκευές αφορούσε αρχικά τη δράση τους μόνο ως διεγέρτες. Επιπλέον, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν πολύ γρήγορη απόκριση, γεγονός που τα κάνει κατάλληλα για εφαρμογές ενεργού ελέγχου ταλάντωσης. Σήμερα, ο πιεζοηλεκτρισμός επεκτείνεται σε πάρα πολλές εφαρμογές και δεδομένης της ταχύτητας ανάπτυξης αυτών, στο μέλλον η χρήση του θα είναι ακόμη πιο διευρυμένη. Μερικές χρήσεις του πιεζοηλεκτρισμού σήμερα είναι οι εξής:

- Ταλαντωτές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων
- Αισθητήρες επιτάχυνσης και γυροσκόπια
- Διεγέρτες
- Μετατροπείς ήχου
- Ελεγκτές συχνότητων
- Έλεγχος και συλλογή ενέργειας
- Έλεγχος, αίσθηση και μείωση δονήσεων σε δομές

## 2.7 Πιεζοηλεκτρισμός ως μέγεθος

Θεωρούμε μια πιεζοηλεκτρική κατασκευή που καταλαμβάνει ένα πεδίο  $\Omega p$  στην ισορροπία. Η κατασκευή υπόκειται σε μια προκαθορισμένη μετατόπιση  $Ud$ , σε ένα κομμάτι  $\Gamma u$  και σε μια προκαθορισμένη δύναμη επιφάνειας πυκνότητας  $t_{id}$  στο συμπληρωματικό μέρος  $\Gamma t$  του εξωτερικού ορίου. Οι ηλεκτρικές οριακές συνθήκες καθορίζονται από ένα προκαθορισμένο ηλεκτρικό δυναμικό  $\Psi d$  στο  $\Gamma \psi$  και μια πυκνότητα επιφάνειας χωρίς ηλεκτρικές φορτίσεις  $q d$  στο υπόλοιπο μέρος  $\Gamma q$ . Επομένως το συνολικό όριο κατασκευής που ορίζουμε ως  $\Omega p$  ισούται με  $d\Omega p = \Gamma u \cup \Gamma t = \Gamma \psi \cup \Gamma q$  με  $\Gamma u \cup \Gamma t = \Gamma \psi \cap \Gamma q = \emptyset$ . Επιπροσθέτως το  $\Omega p$  υπόκειται σε προδιαγεγραμμένες δυνάμεις και φυσικά θα παρουσιαστούν στη κατασκευή μας τα μεγέθη της τάσης και παραμόρφωσης.





### 3. Απόσβεση μέσω παθητικών πιεζοηλεκτρικών διακλαδώσεων

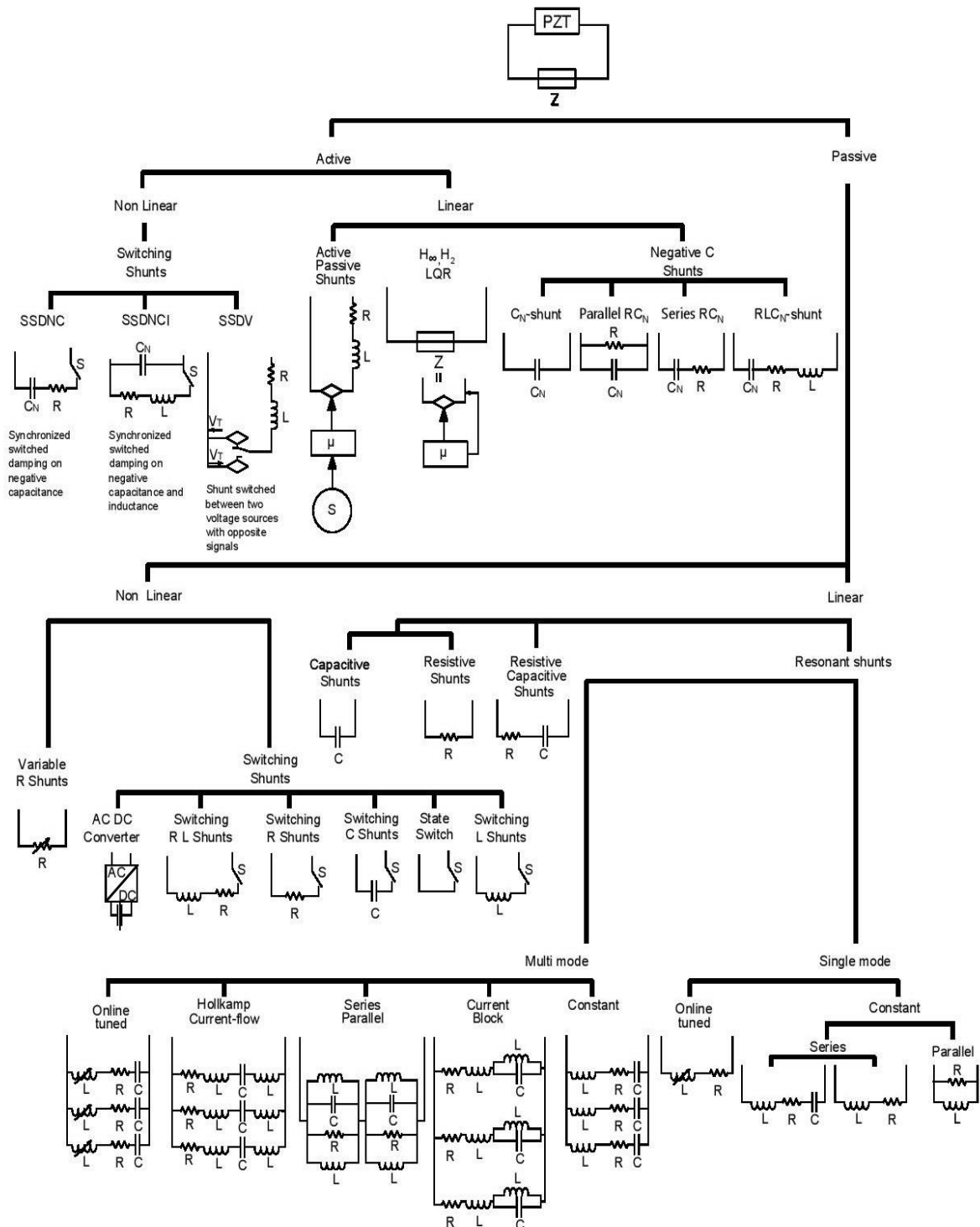
Η απόσβεση μέσω πιεζοηλεκτρικής διακλάδωσης είναι μια δημοφιλής μέθοδος για την απορρόφηση των κραδασμών σε ελαστικές κατασκευές. Η τεχνική χαρακτηρίζεται από τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού στοιχείου (π.χ. μιας ηλεκτρικής αντίστασης) με ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που βρίσκεται εγκατεστημένο σε μια κατασκευή. Τέτοιες μέθοδοι δεν απαιτούν εξωτερικό αισθητήρα και, αν έχουν σχεδιαστεί σωστά, εγγυώνται τη σταθερότητα του συστήματος. Σε αυτή την τεχνική το δίκτυο, μαζί με τη χωρητικότητα που εμπεριέχεται στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, συντονίζεται στην ιδιοσυχνότητα που πρέπει να αποσβεστεί. Μια συγκεκριμένη κατηγορία, οι αποκαλούμενες παραδιακλαδώσεις συντονισμού, αποτέλεσε το επίκεντρο σημαντικής ανάπτυξης κατά την περασμένη δεκαετία. Κυκλώματα απόσβεσης συντονισμού ταλαντώσεων με χρήση πηνίων, πυκνωτών και αντιστάσεων, είναι απλά σχεδιασμένα και μπορούν να αυξάνουν σημαντικά την απόσβεση των εύκαμπτων ελαστικών κατασκευών. Το κύριο μειονέκτημα που συνδέεται με τα κυκλώματα συντονισμού είναι η απαίτηση σε υπερβολικά υψηλές τιμές επαγωγής. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στις εργασίες ανασκόπησης [3] και [23].

Μπορούν να εφαρμοστούν αποσβέσεις μιας ιδιομορφής για τη μείωση των κραδασμών από διάφορα δομικά στοιχεία με χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπών και κυκλωμάτων απόσβεσης. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, αυτό μπορεί να μην είναι μια πρακτική λύση καθώς χρειάζεται μεγάλος αριθμός μετατροπών εάν απαιτείται απόσβεση σημαντικού αριθμού ιδιομορφών. Στην περίπτωση της αεροδιαστημικής για παράδειγμα, όπου οι κατασκευές πρέπει να είναι ελαφριές, αυτό δεν είναι επιθυμητό. Πολλές φορές ο αριθμός των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων που μπορούν να εγκατασταθούν σε μια κατασκευή περιορίζεται από τις φυσικές της διαστάσεις. Ακόμα όμως, και αν υπάρχει ο χώρος σε μια κατασκευή οι δομικές της ιδιότητες μπορεί να αλλάξουν με την προσθήκη μεγάλου αριθμού επιθεμάτων. Αυτό ενθάρρυνε τους ερευνητές να αναπτύξουν πολλαπλές λειτουργίες στα κυκλώματα απόσβεσης τα οποία χρησιμοποιούν μόνο έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα. Τα κυκλώματα αυτά πρέπει να αποσβένουν αποτελεσματικά τις ταλαντώσεις, ιδανικά οι απαιτήσεις τους περιλαμβάνουν ανθεκτικότητα στην αλλαγή παραμέτρων του συστήματος, ευστάθεια και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το κύκλωμα παραδιακλάδωσης για να ονομαστεί παθητικό πρέπει αν μην απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία, ενώ ημι-παθητικά ονομάζονται τα κυκλώματα που ενώ δέχονται εξωτερική τροφοδοσία για την λειτουργία τους δεν περνάνε ρεύμα στην κατασκευή [3].

Το πρώτο κύκλωμα διακλάδωσης πολλαπλών ιδιομορφών, το οποίο ήταν ικανό να αποσβέσει ταυτόχρονα με επιτυχία τη δεύτερη και την τρίτη ιδιομορφή μιας προβόλου δοκού κατά 19 και 12 dB αντίστοιχα, δημιουργήθηκε από τον Hollkamp. Το κύκλωμα απαιτεί τόσους παράλληλους κλάδους όσες και οι ιδιομορφές που ελέγχουμε, και έτσι ο Hollkamp πρότεινε μια αριθμητική βελτιστοποίηση για τον καθορισμό των κατάλληλων τιμών των μεγεθών που διέπουν τη διακλάδωση. Το προκύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μη γραμμικό, μη ομοαξονικό και σχετικά δύσκολο να λυθεί για μεγάλο αριθμό ιδιομορφών[4].



Στην περίπτωση που θα εξετάσουμε γίνεται χρήση δυο τύπων παθητικών γραμμικών κυκλώματος παραδιακλάδωσης τύπου συντονισμού πολλαπλών ιδιομορφών (βλ. εικόνα 4), του Current-block και του Current-flow.

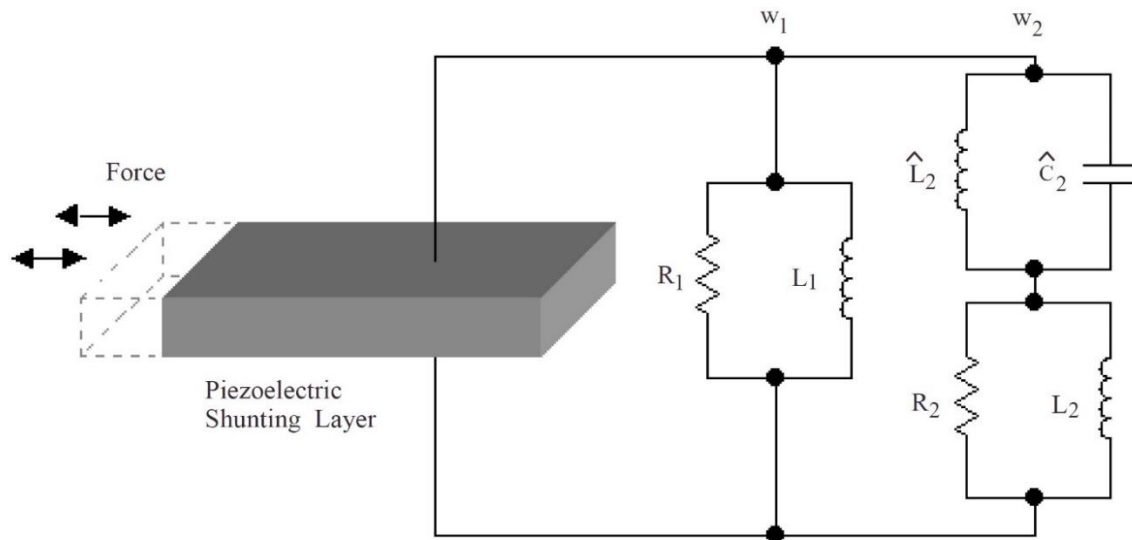


Εικόνα 4. Διάφοροι τύποι κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης [23]

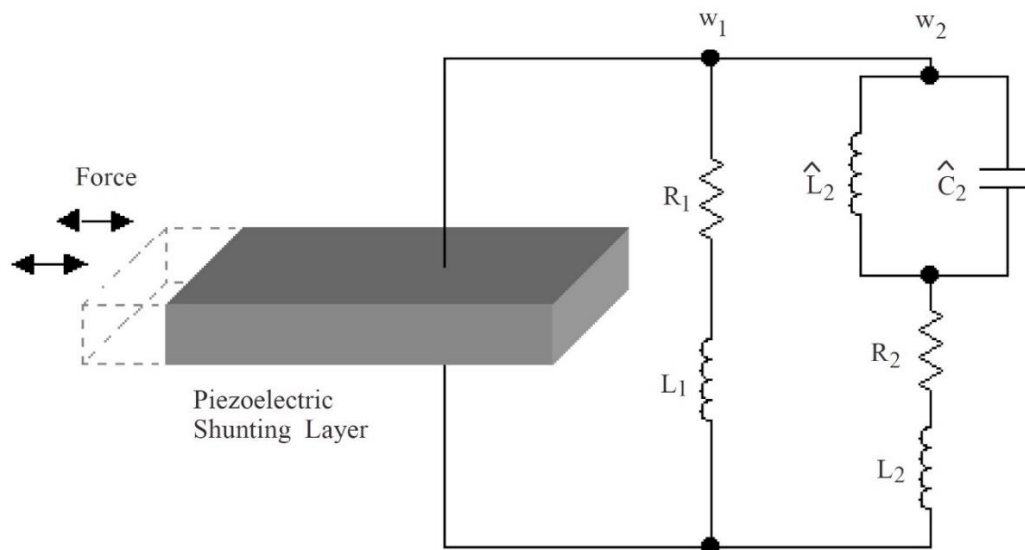


### 3.1 Μέθοδος Current-Block

Βασική αρχή αυτού του τύπου κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης πολλαπλών ιδιομορφών είναι η εισαγωγή κυκλωμάτων περιορισμού σε σειρά με κάθε ζευγάρι αντίστασης-πηνίου ( $R-L$ ). Τα ζευγάρια  $R-L$ , μπορεί να είναι συνδεδεμένα είτε παράλληλα (Εικόνα 5) είτε σε σειρά (Εικόνα 6) και είναι ρυθμισμένα κατάλληλα, ώστε κάθε ένα να αποσβένει μια συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα. Κάθε κύκλωμα έχει τόσα  $R-L$  ζευγάρια όσα και οι ιδιομορφές που θέλει να αποσβέσει [8]. Το κύκλωμα περιορισμού ή αντισυντονισμού αποτελείται από ένα πυκνωτή και ένα πηνίο συνδεδεμένα παράλληλα ( $C-L$ ). Αυτά τα κυκλώματα είναι σχεδιασμένα ώστε να παράγουν αντισυντονισμό, στις φυσικές συχνότητες όλων των άλλων  $R-L$  κυκλωμάτων.



Εικόνα 5. Κύκλωμα παραδιακλάδωσης Current-Block για αποσβεση σε  $\omega_1$  και  $\omega_2$  - παράλληλα

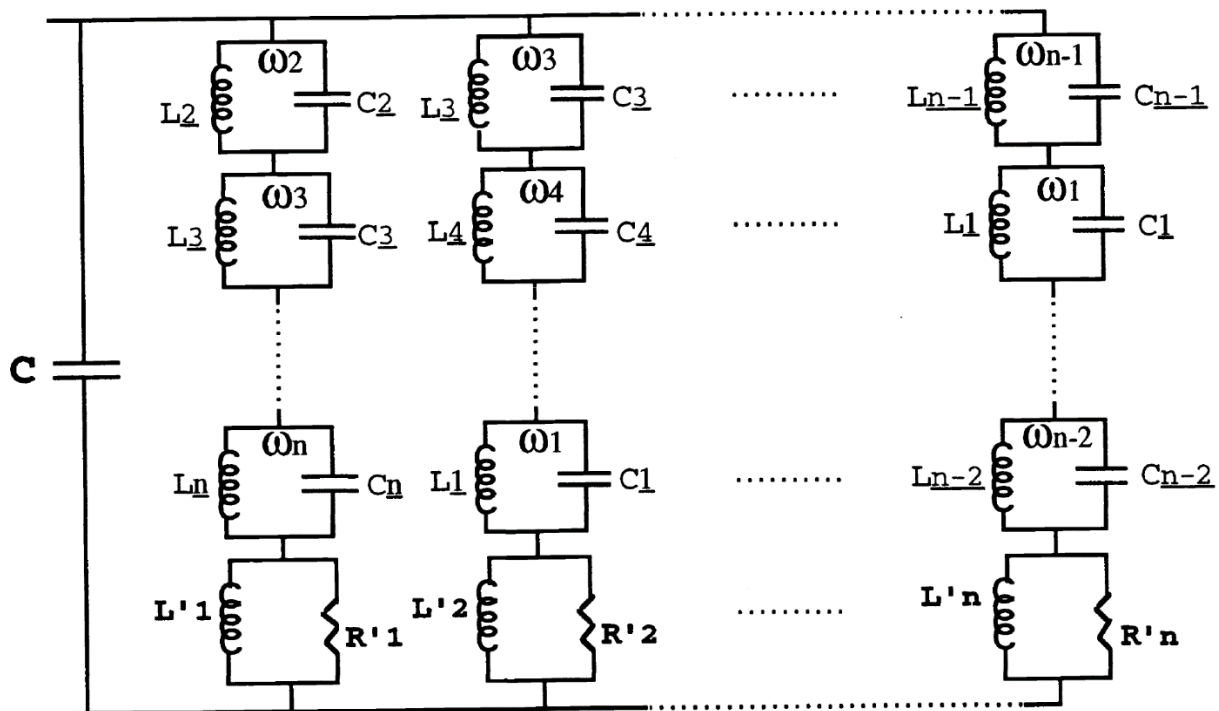


Εικόνα 6. Κύκλωμα παραδιακλάδωσης Current-Block για απόσβεση σε  $\omega_1$  και  $\omega_2$  - σε σειρά



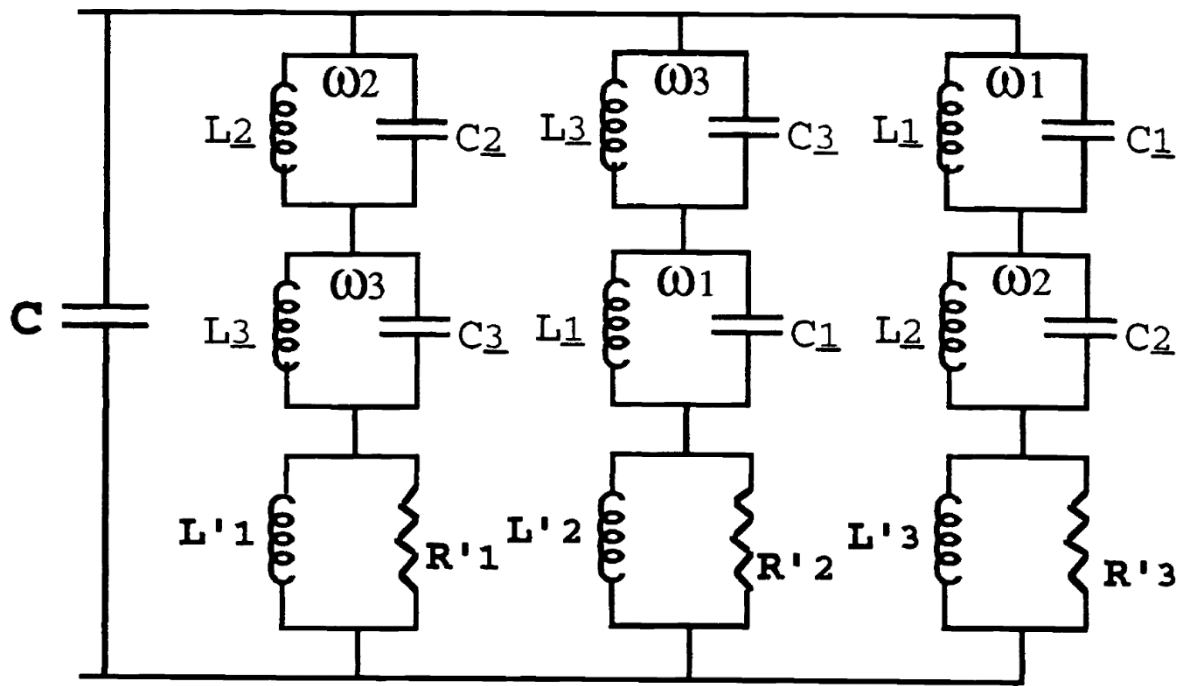
Ο αριθμός των κυκλωμάτων αντισυντονισμού που τοποθετούνται σε κάθε βρόγχο εξαρτάται από τον αριθμό των ιδιοσυχνοτήτων που θέλουμε να αποσβέσουμε. Στην Εικόνα 7 το κύκλωμα είναι σχεδιασμένο ώστε να αποσβένει  $N$  ιδιομορφές με φυσικές συχνότητες  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ . Στον πρώτο βρόγχο, που είναι ρυθμισμένος να αποσβένει την συχνότητα  $\omega_1$ , εισάγονται  $N-1$  κυκλώματα αντισυντονισμού, ένα για κάθε μια από τις υπόλοιπες συχνότητες ( $\omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N$ ). Στον δεύτερο βρόγχο, που είναι ρυθμισμένος για την απόσβεση της συχνότητας  $\omega_2$  εισάγονται  $N-1$  κυκλώματα αντισυντονισμού, για τις συχνότητες  $\omega_1, \omega_3, \dots, \omega_N$ . Αντίστοιχα, η ίδια συνδεσμολογία συνεχίζεται για όλους τους βρόγχους του κυκλώματος. Έτσι, κάθε βρόγχος του κυκλώματος είναι λειτουργικός μόνο για μια συχνότητα, αλλά είναι ανοιχτοκύκλωμα για όλες τις άλλες συχνότητες μηδενίζοντας ταυτόχρονα τις παρεμβολές μεταξύ των βρόγχων όταν συνδεθούν στο ίδιο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα [5].

Όσο λιγότερα στοιχεία έχει το κάθε κύκλωμα τόσο πιο μικρό, ελαφρύ και απλό θα είναι κατά κατασκευή του. Ευκολά παρατηρείς κάνεις ότι για μεγάλο  $N$ , ο αριθμός των “blocking” κυκλωμάτων ανά βρόγχο αυξάνεται κατακόρυφα. Αυτό στα [5,6,7,8] αντιμετωπίζεται με εφαρμογή της θεωρίας ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Έτσι, το κύκλωμα για  $N=3$  της εικόνας 8, υπό την υπόθεση ότι  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$  απλοποιείται σε εκείνο της εικόνας 9.

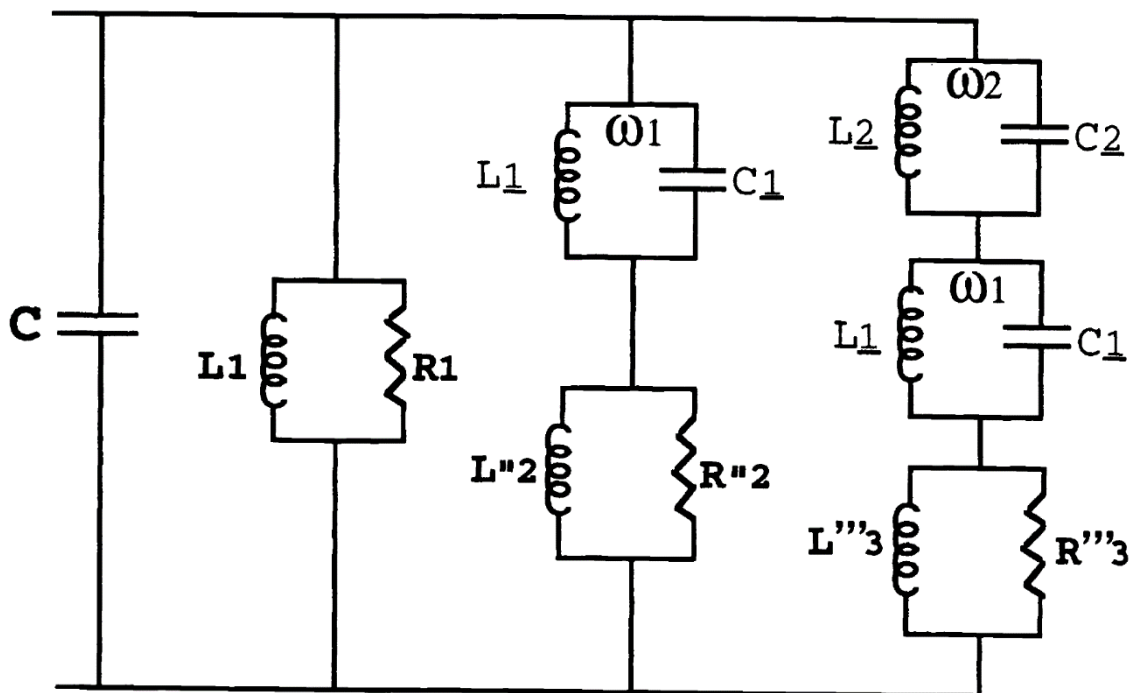


Εικόνα 7. Κύκλωμα Current-Block για απόσβεση  $N$  ιδιομορφών.





Εικόνα 8. Κύκλωμα Current-Block για απόσβεση  $N=3$  ιδιομορφών.



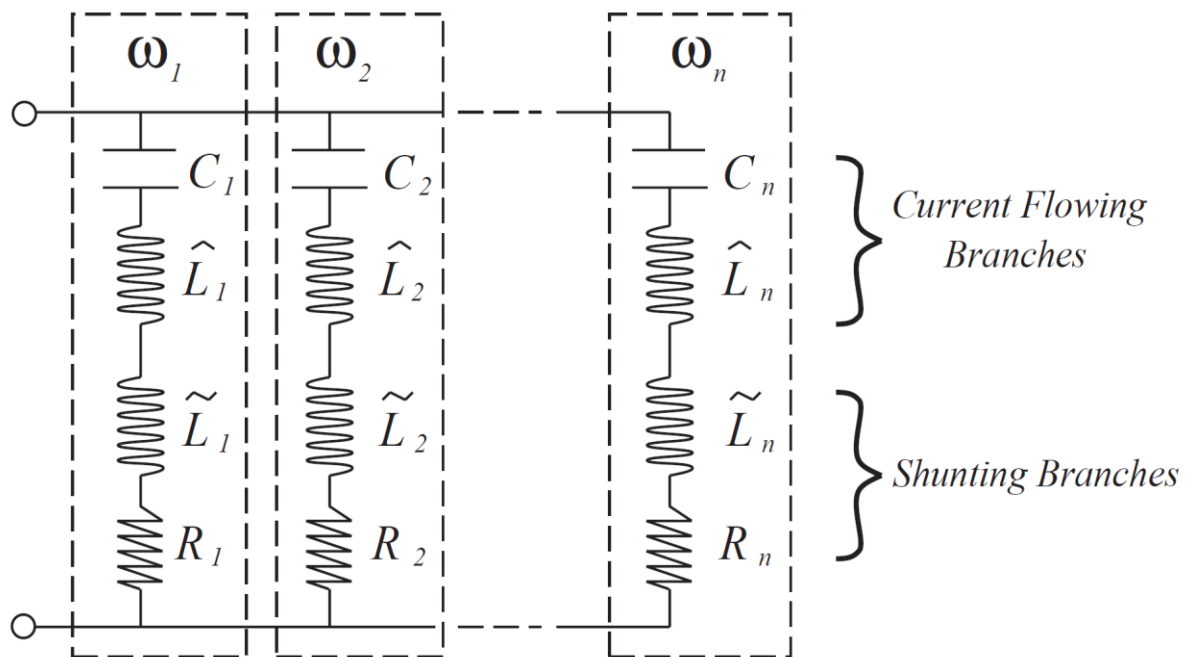
Εικόνα 9. Απλοποιημένο κύκλωμα Current-Block για απόσβεση  $N=3$  ιδιομορφών.

### 3.2 Μέθοδος Current-flow

Παρά την επιτυχία της απλοποιημένης μεθόδου “Current-block” στην απόσβεση ταλαντώσεων, εξακολουθούν να υπάρχουν μερικά προβλήματα. Το σημαντικότερο είναι η πολυπλοκότητα του κυκλώματος για ταυτόχρονη απόσβεση μεγάλου αριθμού



ιδιοσυχνοτήτων [10]. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η μέθοδος “Current-flow”. Η τεχνική αυτή γειτνιάζει ως προς την φύση της με την “Current-blocking”, υπό την έννοια ότι και σε αυτή ένα μόνο επίθεμα χρησιμοποιείται για την απόσβεση πολλαπλών ιδιομορφών. Ωστόσο, οι δυο μέθοδοι διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο την επιτυγχάνουν. Αντί να σταματάει την κυκλοφορία του ρεύματος στους βρόγχους για συγκεκριμένες συχνότητες  $\omega_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ), το “Current-flow” αφήνει το ρεύμα να τους διατρέχει. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα πυκνωτή-πηνίου  $C_i\text{-}\hat{L}_i$  σε σειρά όπως φαίνεται στην εικόνα 10.



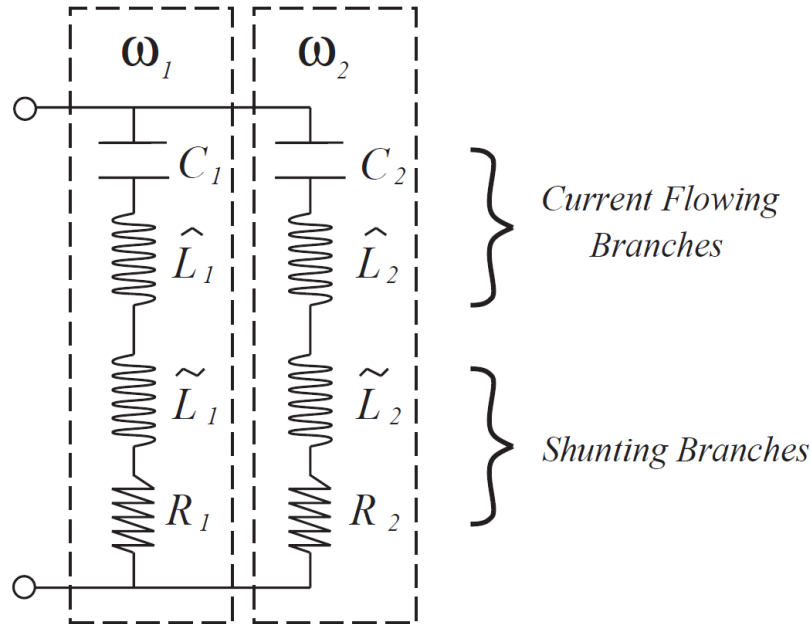
Εικόνα 10. Κύκλωμα Current-Flow για την απόσβεση  $n$  ιδιομορφών.

Το  $C_i\text{-}\hat{L}_i$  κύκλωμα είναι ρυθμισμένο ως προς την συχνότητα συντονισμού του κάθε  $\omega_i$ . Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα για την συχνότητα  $\omega_i$  και σχεδόν ως ανοιχτοκύκλωμα (η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη) ως προς τις υπόλοιπες συχνότητες, ενώ ο βρόγχος παραδιακλάδωσης  $\tilde{L}_i\text{-}C_p$  είναι επίσης ρυθμισμένος ως προς  $\omega_i$ . Συνεπώς κάθε βρόγχος του κυκλώματος,  $C_i\text{-}\hat{L}_i\text{-}\tilde{L}_i\text{-}R_i$ , είναι λειτουργικός μόνο για μια συγκεκριμένη συχνότητα [9, 11]. Σημειώνεται ένα επίπεδο παρεμβολών ανάμεσα σε κοντινές ιδιομορφές είναι αναμενόμενη. Ωστόσο, για ιδιομορφές που βρίσκονται μακριά οι παρεμβολές είναι μηδαμινές [9].

Στην εικόνα 11 βλέπουμε ένα παράδειγμα κυκλώματος “Current-flowing” για δυο ιδιομορφές  $\omega_1$  και  $\omega_2$ , αντίστοιχο με το “Current-Blocking” των εικόνων 5, 6, της προηγούμενης υποενότητας. Στον πρώτο βρόγχο με πηνίο  $\tilde{L}_1=1/(\omega_1^2 C_p)$  και αντίσταση  $R_1$ , εισάγεται ένα ζευγάρι πυκνωτή-πηνίου  $C_1\text{-}\hat{L}_1$  σε σειρά (κλάδος ροής ρεύματος) με ηλεκτρική εμπέδηση σχεδιασμένη να λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα στην ιδιοσυχνότητα του συγκεκριμένου βρόγχου  $\omega_1$  και ως ανοιχτοκύκλωμα (πολύ μεγάλη αντίσταση) στις υπόλοιπες συχνότητες. Αυτό γίνεται επιλέγοντας τα  $C_1$  και  $\hat{L}_1$  έτσι ώστε  $\omega_1 = 1/\sqrt{C_1\hat{L}_1}$ , που είναι ένα



βασικό χαρακτηριστικό των παραδιακλαδόμενων κυκλωμάτων συντονισμού [9]. Κατά τον ίδιο τρόπο στον δεύτερο βρόγχο επιλέγεται  $C_2$  και  $\hat{L}_2$ , ώστε  $\omega_2 = 1/\sqrt{C_2\hat{L}_2}$ . Έτσι όταν οι δυο βρόγχοι ενώνονται και συνδέονται στο ίδιο πιεζοηλεκτρικό, δρουν ανεξάρτητα. Ο πρώτος βρόγχος αποσβένει την συχνότητα  $\omega_1$ , χωρίς να εμπλέκεται στην λειτουργία του δευτέρου. Το ίδιο ισχύει και για τον δεύτερο βρόγχο.



Εικόνα 11. Κύκλωμα Current-flow για απόσβεση  $n=2$  ιδιοσυχνοτήτων.

### 3.3 Μεθοδολογία υπολογισμού στοιχείων “Current block” κυκλώματος

Σύμφωνα με το [10] για τα απλοποιημένα κυκλώματα δυο ιδιομορφών των εικόνων 5 και 6 της υποενότητας 3.2, οι τύποι για τον υπολογισμό των πηνίων είναι :

$$L_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_p} \quad \tilde{L}_2 = \frac{1}{\omega_2^2 C_p} \quad \hat{L}_2 = \frac{1}{\omega_1^2 \hat{C}_2}$$

$$L_2 = \frac{(L_1 \tilde{L}_2 + \tilde{L}_2 \hat{L}_2 - L_1 \hat{L}_2 - \omega_2^2 L_1 \tilde{L}_2 \hat{L}_2 \hat{C}_2)}{(L_1 - \tilde{L}_2)(1 - \omega_2^2 \hat{L}_2 \hat{C}_2)}$$

Όπου  $C_p$  η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού. Το  $C_p$  είναι διαφορετικό για κάθε μοντέλο και αναγράφεται στον πίνακα προδιαγραφών του ή μετράται πειραματικά.

Και για τις δυο περιπτώσεις, δηλαδή σύνδεση σε σειρά και παράλληλα, η σχεδίαση έχει γίνει υποθέτοντας ότι  $\omega_1 < \omega_2$ .

Για την παράμετρο  $\hat{C}_2$  του κυκλώματος αντισυντονισμού συνήθης πρακτική αποτελεί η τοποθέτηση πυκνωτή με μεγάλη εμπορική διαθεσιμότητα όπως 100nF ή 10nF.





Η εύρεση των κατάλληλων τιμών για τα  $R$  είναι μια διαδικασία που συχνά βασίζεται στη μεθοδολογία της δοκιμής και σφάλματος, κάνοντας τη βελτιστοποίηση των παραδιακλαδόμενων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων πολλαπλών ιδιομορφών εξαιρετικά χρονοβόρα και μη αποδοτική. Στο [8] εισάγεται μια νέα μεθοδολογία που αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα. Η νέα αυτή μεθοδολογία είναι βασισμένη στην βελτιστοποίηση της  $H_2$  νόρμας και αποδεικνύεται πειραματικά στην παραπάνω αναφορά.

### 3.4 Μεθοδολογία υπολογισμού στοιχείων “Current flowing” κυκλώματος

Για την γενική περίπτωση (Εικόνα 10), για  $n$  ιδιομορφές ο υπολογισμός των πηνίων στους βρόγχους του κυκλώματος είναι [10],

$$\tilde{L}_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_p}, \dots, \tilde{L}_n = \frac{1}{\omega_n^2 C_p},$$

Όπου  $C_p$  η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού. Το  $C_p$  είναι διαφορετικό για κάθε μοντέλο και αναγράφεται στον πίνακα προδιαγραφών του ή μετράται πειραματικά. Το  $\tilde{L}_i$  είναι ρυθμισμένο στο  $C_p$  και  $\omega_i$  είναι οι ιδιοσυχνότητες που θέλουμε να αποσβέσουμε. Υποθέτουμε ότι  $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$ .

Η σχέση για τον προσδιορισμό του  $\hat{L}_i$  είναι,

$$\hat{L}_1 = \frac{1}{\omega_1^2 C_1}, \dots, \hat{L}_n = \frac{1}{\omega_n^2 C_n}.$$

Όπου  $C_i$  ο πυκνωτής του κάθε βρόγχου, ο οποίος επιλέγεται βάσει της διαθεσιμότητας στο εμπόριο, συχνά 100nF ή 10nF.

Αν απλώς συνενώσουμε για κάθε βρόγχο του κυκλώματος, τα δυο πηνία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά  $L_i = \tilde{L}_i + \hat{L}_i$ , τότε έχουμε [9]:

$$L_1 = \frac{C_p + C_1}{\omega_1^2 C_1 C_p}, L_2 = \frac{C_p + C_2}{\omega_2^2 C_2 C_p}, \dots, L_n = \tilde{L}_n + \hat{L}_n = \frac{C_p + C_n}{\omega_n^2 C_n C_p},$$

Έτσι η ολική εμπέδηση του κυκλώματος έχει απλοποιηθεί. Εύκολα κανείς μπορεί να καταλάβει ότι το σχήμα της Εικόνας 10 μπορεί να απλοποιηθεί στο σχήμα της εικόνας 12 το οποίο έχει ένα λιγότερο στοιχείο, σε κάθε βρόγχο, σε σχέση με το προηγούμενο.

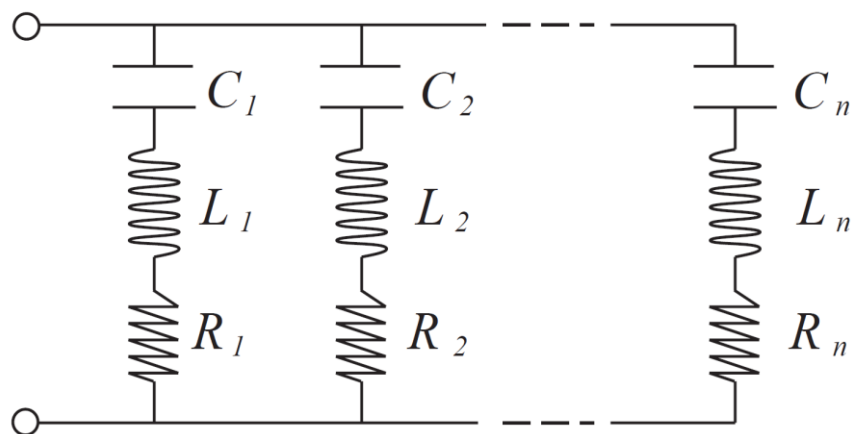
Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων  $R$  του κυκλώματος ισχύει [22],

$$R_i = \frac{\sqrt{1 - k_{31}^2}}{(1 - k_{31}^2) C_p \omega_i}$$

Εναλλακτικά για τον προσδιορισμό των τιμών των  $R$  μπορεί να ακολουθηθεί η μεθοδολογία βελτιστοποίησης της νόρμας  $H_2$ , [8] όπως και στην περίπτωση των “Current block” κυκλωμάτων.







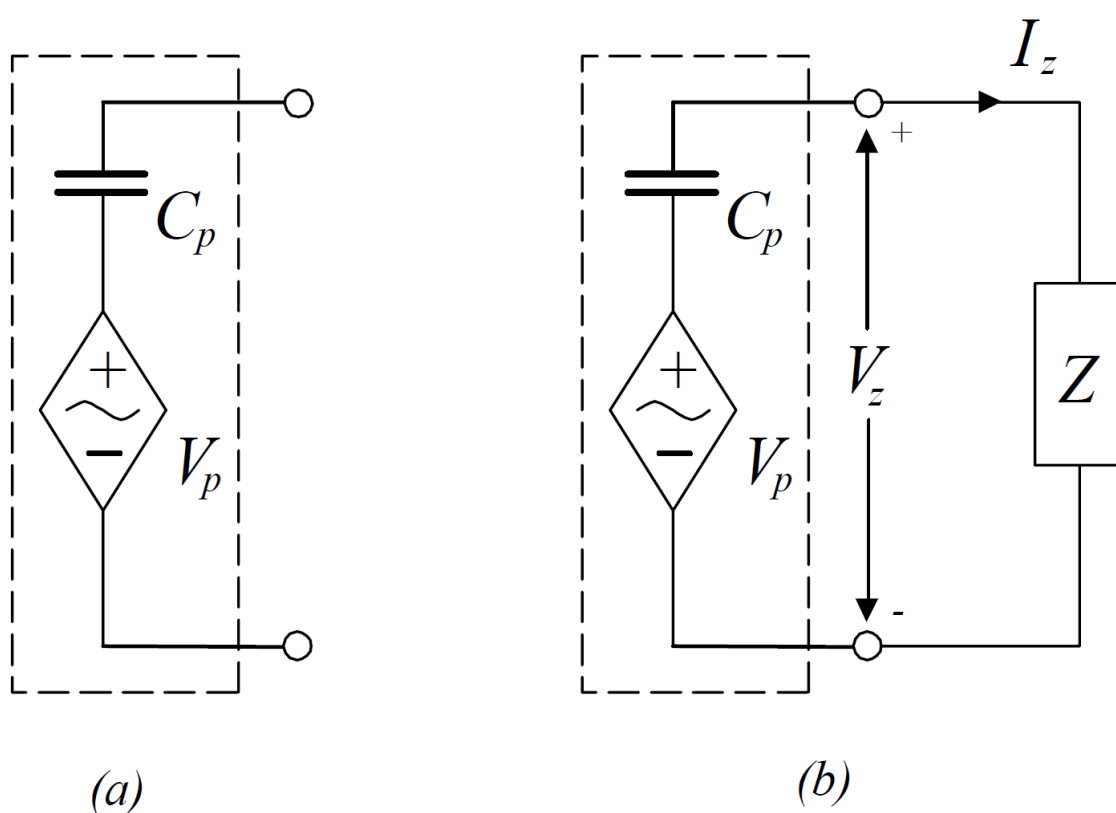
Εικόνα 12. Απλοποιημένο κύκλωμα *Current flow* για απόσβεση  $n$  ιδιομορφών



## 4. Μοντελοποίηση

### 4.1 Πιεζοηλεκτρικό μοντέλο

Για την σωστή μοντελοποίηση του παραδιακλαδομένου κυκλώματος απόσβεσης πάνω στην κατασκευή, πρέπει να γίνει αναφορά στην δομή του συστήματος. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς συμπεριφέρονται ηλεκτρικά ως ένας πυκνωτής  $C_p$  και μηχανικά ως ένα δύσκαμπτο ελατήριο [12]. Στην βιβλιογραφία είναι σύνηθες να μοντελοποιείται το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο ως ένας πυκνωτής  $C_p$  συνδεδεμένος σε σειρά με μια πηγή τάσης  $V_p$  [13, 14]. Το υπόλοιπο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα (Εικόνα 6 ή Εικόνα 12) συμβολίζεται σαν μια συνθήκη εμπέδηση  $Z$  όπως φαίνεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13. (α) Πυκνωτής  $C_p$  και πηγή τάσης  $V_p$  ως αντιστοιχία πιεζοηλεκτρικού. (β) Σχημα πιεζοηλεκτρικού με συνθετη αντίσταση  $Z$ .

### 4.2 Μοντέλο αμφιέρειστης δοκού

Στις εικόνες 14 και 15 φαίνεται το σχέδιο με την διάταξη της αμφιέρειστης δοκού η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η κατασκευή μοντελοποιείται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [17] και είναι εξοπλισμένη με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τα οποία συνδέονται εκατέρωθεν της. Το ένα από τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιείται ως ενεργοποιητής, ενώ το άλλο δρα ως στρώμα παραδιακλάδωσης.





$Y(x,s)/V_a(s)$ , όπως και της συνάρτησης μεταφοράς μεταξύ της τάσης του παραδιακλαδομένου πιεζοηλεκτρικού και της τάσης του ενεργοποιητή  $V_s(s)/V_a(s)$  [15].

Η μέγιστη ελαστική μετατόπιση μιας αμφιέρειστης δοκού περιγράφεται από την μονοδιάστατη εξίσωση Bernoulli-Euler [16] τροποποιημένη ως εξής:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ E_b I_b \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} - C_a v_a(x,t) \right] + \rho_b A_b \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

Όπου τα  $E_b$ ,  $I_b$ ,  $A_b$  και  $\rho_b$  αντιπροσωπεύουν το μετρώ ελαστικότητα (Young's modulus), την ροπή αδράνειας, την επιφάνια διατομής, και την πυκνότητα μάζας της δοκού αντίστοιχα. Ο πρόσθετος όρος αφορά την ροπή που εφαρμόζεται στον ουδέτερο άξονα της δοκού από τον ενεργοποιητή  $M_a = C_a v_a(x,t)$ , όπου  $C_a$  σταθερά εξαρτώμενη από τις ιδιότητες του ενεργοποιητή [18]. Υποθέτουμε ότι κάθε πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι εξαιρετικά λεπτό και ότι η δοκός αποκλίνει μόνο ως προς τον  $y$  άξονα. Ισχύουν οι οριακές συνθήκες της αμφιέρειστης  $y(0,t) = y(L,t) = 0$  και  $E_b I_b \frac{\partial y(0,t)}{\partial x} = E_b I_b \frac{\partial y(L,t)}{\partial x} = 0$ . Με την τεχνική ανάλυσης ιδιομορφών [19] η συνάρτηση θέσης  $y(x,t)$  μπορεί να επεκταθεί ως:  $y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) q_i(t)$ , όπου  $\varphi_i(x)$  είναι οι κανονικοποιημένες ιδιομορφές δεδομένου ότι το  $\varphi_i(x) = \sqrt{\frac{2}{\rho_b A_b L}} \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)$  [19] και το  $q_i(t)$  είναι η ιδιομορφική μετατόπιση [16].

Για να διατυπωθεί η δυναμική απόδοση του συστήματος, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Lagrange [19] για να βρεθεί η διαφορική εξίσωση που αντιστοιχεί σε κάθε ιδιομορφή.

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = C_a [\varphi'_i(x_1) - \varphi'_i(x_2)] v_a(t)$$

Η τάση του πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου αισθητήρα μπορεί να περιγράψει από:

$$v_s(t) = C_s \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \bigg|_{x_3}^{x_4}$$

Οπού  $C_s$  η πιεζοηλεκτρική σταθερά [8]. Στην συνέχεια η σημειογραφία  $(\bullet)'$ , θα συμβολίζει την παράγωγο ως προς  $x$ . Οι συχνότητες συντονισμού  $\omega_i$  δίνονται από  $\omega_i = \left(\frac{i\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{E_b I_b}{\rho_b A_b}}$ .

Η δυναμική απόκριση βρίσκεται παίρνοντας τον μετασχηματισμό Laplace της παραπάνω εξίσωσης και αντικαθιστώντας  $Y_i(x,s) = \varphi_i(x) q_i(s)$ .

$$G_{yv}(x,s) \triangleq \frac{Y_{(x,s)}}{V_a(s)} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{C_a [\varphi'_i(x_1) - \varphi'_i(x_2)] \varphi_i(x)}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει την μέγιστη ελαστική μετατόπιση ολόκληρης της εύκαμπτης δοκού. Σημειώνεται ότι οι όροι  $2\zeta_i \omega_i s$ , προστίθενται για να ισορροπηθεί η δομική απόσβεση και συνήθως βρίσκεται πειραματικά [15]. Η τάση της παραδιακλάδωσης



μπορεί να εκφραστεί ως  $v_s(t) = C_s \sum_{i=1}^{\infty} q_1(t)(\varphi'_i(x_3) - \varphi'_i(x_4))$ . Παίρνοντας τον μετασχηματισμό Laplace, προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της τάσης του ενεργοποιητή και της τάσης της παραδιακλάδωσης [18] ως

$$G_{vv}(s) \triangleq \frac{Y_s(s)}{V_a(s)} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{C_s C_a [\varphi'_i(x_1) - \varphi'_i(x_2)][\varphi'_i(x_3) - \varphi'_i(x_4)]}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}$$

Τέλος σε μορφή διανύσματος κατάστασης για το  $G_{yv}(x, s)$  και  $G_{vv}(s)$  έχουμε

$$\dot{x}_b = Ax_b + BV_a$$

$$Y = C_Y x_b$$

$$V_s = C_{V_s} x_b$$

όπου  $x_b$  οι καταστάσεις της δοκού,  $C_Y$  και  $C_{V_s}$  εξαρτώνται από  $Y_{(x,s)}$  και  $Y_s(s)$ .

#### 4.4 Μοντέλο σύνθετου συστήματος

Όπως φαίνεται στις εικόνες 13(b), 14, 15 το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα παραδιακλαδώνεται από μια εμπέδηση  $Z$ . Έτσι, η σχέση αντίστασης ρεύματος-τάσης για την αντίσταση είναι

$$V_z(s) = I_z(s)Z(s)$$

όπου  $V_z$  η τάση στην αντίσταση και  $I_z$  το ρεύμα που την διαπερνά. Χρησιμοποιώντας τον νόμο τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα της εικόνας 13(b) η  $V_z(s)$  εκφράζεται ως

$$V_z(s) = V_p(s) - \frac{1}{C_p s} I_z(s)$$

όπου  $V_p$  η τάση που επάγεται από το φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης [14] και  $C_p$  η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού. Συνεπώς έχουμε

$$V_z(s) = \frac{Z(s)}{\frac{1}{C_p s} + Z(s)} V_p(s),$$

η ισάξια

$$V_z(s) = \frac{C_p s Z(s)}{1 + C_p s Z(s)} V_p(s)$$

Όταν το πιεζοηλεκτρικό παραδιακλαδώνεται με πεπερασμένη εμπέδηση  $Z$ ,

$$V_p(s) = G_{vv}(s)V_a(s) - G_{vv}(s)V_z(s)$$

αντικαθιστώντας την στην παραπάνω εξίσωση η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ  $V_p(s)$  και  $V_a(s)$ , έχουμε



$$\hat{G}_{vv}(s) \triangleq \frac{Y_s(s)}{V_a(s)} = \frac{G_{vv}(s)}{1 + G_{vv}(s)K(s)}$$

όπου

$$K(s) = \frac{Z(s)}{Z(s) + \frac{1}{C_p s}}$$

ομοίως η συνάρτηση μεταφοράς  $\hat{G}_{yv}(x, s)$  είναι

$$\hat{G}_{yv}(x, s) \triangleq \frac{Y_{(x,s)}}{V_a(s)} = \frac{G_{yv}(s)}{1 + G_{vv}(s)K(s)}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να φανεί ότι η απόσβεση μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων είναι στην πραγματικότητα ένα πρόβλημα ελέγχου με ανάδραση, όπως επιδεικνύεται από τον Behrens και συν. στα [15, 20, 21]. Έτσι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχες τεχνικές ελέγχου για να προσδιοριστεί η κατάλληλη εμπέδηση [10].

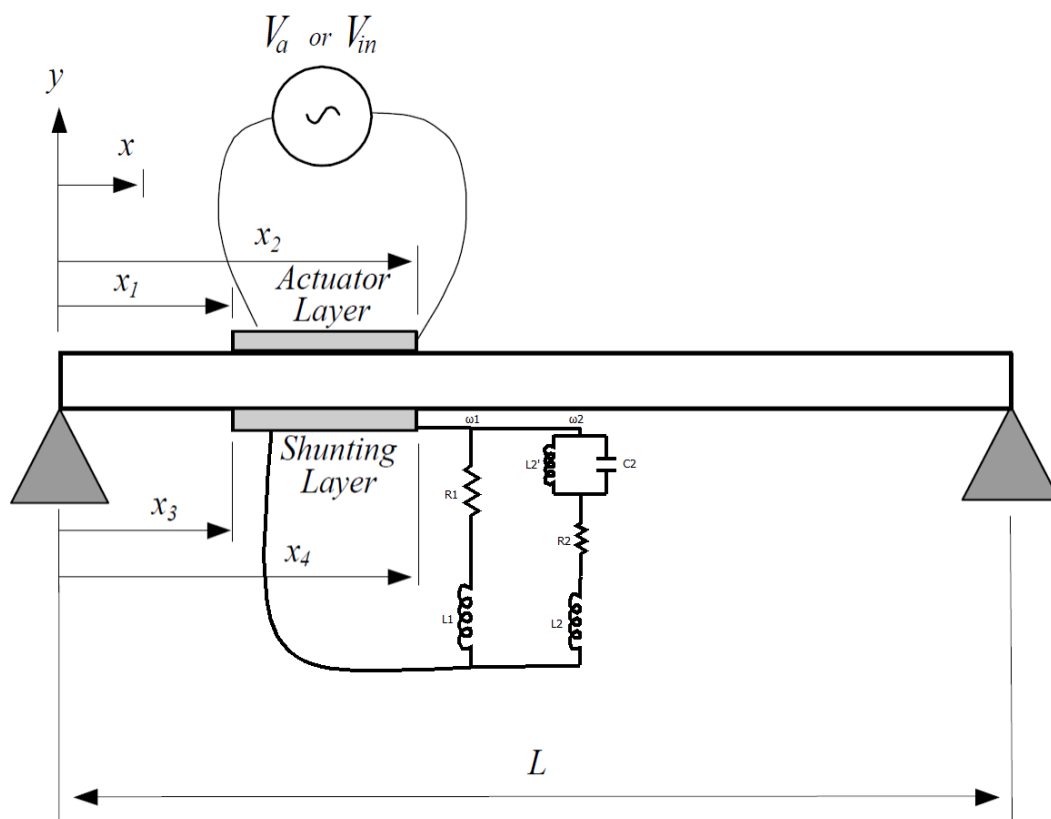


## 5. Αριθμητικά αποτελέσματα

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εφαρμογή της τάσης που αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες με σκοπό την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη απόσβεση ταυτόχρονα της δεύτερης και τρίτης ιδιοσυχνότητας μιας δοκού χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και δυο διαφορετικούς τύπους παθητικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων. Η δοκός και τα κυκλώματα προσομοιώθηκαν σε περιβάλλον Matlab. Αρχικά στην δοκό τοποθετήθηκε κύκλωμα "Current-block" και έπειτα κύκλωμα "Current-flow". Τέλος η επίδραση των δυο κυκλωμάτων πάνω στο σύστημα αξιολογείται και τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται.

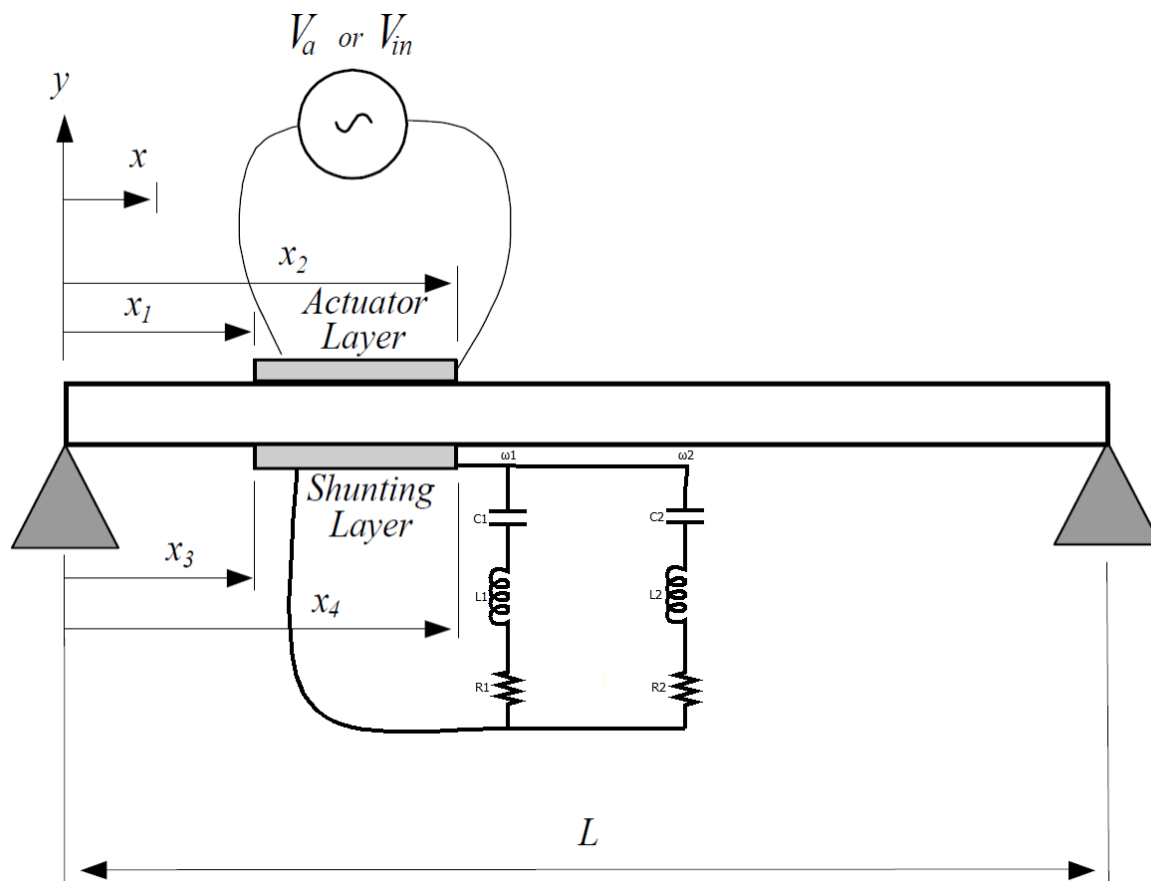
### 5.1 Σύστημα υπό μελέτη

Μια αμφιέρειστη δοκός η οποία μοντελοποιείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [17] καλύπτεται μερικώς από δυο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Το ένα επίθεμα συνδέεται με ένα παθητικό κύκλωμα απόσβεσης δυο ιδιομορφών. Αυτό το κύκλωμα είναι είτε τύπου "Current-block" σε σειρά, είτε "Current-flow" όπως αυτά αναλύθηκαν στις υποενότητες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα. Τα συστήματα με τους δυο τύπους παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων φαίνονται στις εικόνες 16 και 17 αντίστοιχα. Το υλικό της δοκού είναι ελαστικό, ομοιογενές και ισότροπο με πυκνότητα  $\rho$  και μέτρο ελαστικότητας  $E_b$ .



Εικόνα 16. Σύστημα υπό μελέτη με κύκλωμα "Current-block"





Εικόνα 17 Σύστημα υπό μελέτη με κύκλωμα "Current-flow"

Η γεωμετρία του συστήματος περιγράφεται από το μήκος, το πλάτος και το πάχος της δοκού και των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων τα οποία εκφράζονται κατά αντιστοιχία ως  $L/l$ ,  $w_b/w_s w_a$  και  $h_b/h_s h_a$ . Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τοποθετούνται συμμετρικά σε απόσταση  $0.05m$  από ένα από τα άκρα της δοκού,  $x_1 = x_3 = 0.05m$ , ενώ τα όρια τους ορίζονται από τα  $x_3$  και  $x_4$  ισχύει ότι  $x_4 - x_3 = l$ . Τα χαρακτηριστικά της δοκού και του πιεζοηλεκτρικού υλικού PIC151 παρατίθενται στους πίνακες 1 και 2 αντίστοιχα.

Μήκος, $L$	$0.6m$
Πλάτος, $w_b$	$0.05m$
Πάχος, $h_b$	$0.003m$
Μέτρο του Youngs, $E_b$	$65 \times 10^9 N/m^2$
Πυκνότητα, $\rho$	$2650 kg/m^3$

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά αμφιέρειστης δοκού.

Charge Constraint, $d_{31}$	$-210 \times 10^{-12} m/V$
Voltage Constant, $g_{31}$	$-11.5 \times 10^{-3} Vm/N$
Coupling Coefficient, $k_{31}$	$0.340$
Capacitance, $C_p$	$0.105 \mu F$
Width, $w_s w_a$	$0.025m$
Thickness, $h_s h_a$	$0.25 \times 10^{-3} m$
Youngs Modulus, $E_s E_a$	$63 \times 10^9 N/m^2$

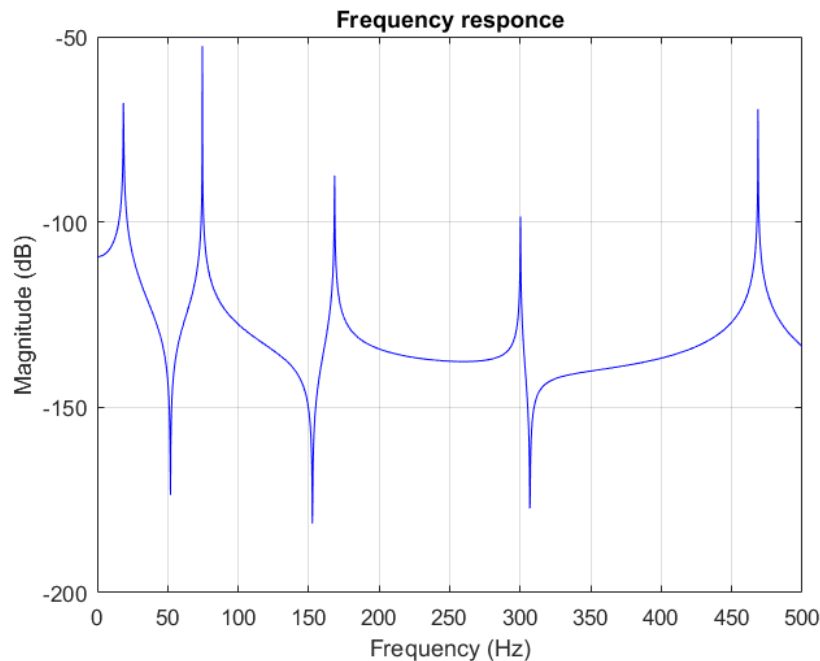
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων PIC151.





## 5.2 Απόκριση του συστήματος

Η απόκριση του συστήματος στον χώρο των συχνοτήτων για κλειστό κύκλωμα που υπόκειται σε αρμονική δύναμη, φαίνονται το διάγραμμα της εικόνας 18. Συγκεκριμένα, βλέπουμε τις πέντε πρώτες ιδιοσυχνότητες.



Εικόνα 18. Απόκριση του συστήματος  $Y(x,s)/V_o(s)$  όπου  $x=0.170m$  από το στηριζόμενο άκρο της δοκού

Οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων είναι  $\omega_1 = 18.6Hz$ ,  $\omega_2 = 74.6Hz$ ,  $\omega_3 = 168.4Hz$ ,  $\omega_4 = 300.2Hz$ ,  $\omega_5 = 468.6Hz$  (Πίνακας 3). Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η απόσβεση που επιτυγχάνουν οι δυο τύποι παθητικών κυκλωμάτων συνδεδεμένοι με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για τις συχνότητες  $\omega_2$  και  $\omega_3$ . Οι συχνότητες αυτές επιλέχθηκαν επειδή έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο σύστημα λόγω της επιλεγμένης θέσης του πιεζοηλεκτρικού πάνω στην δοκό [8].

Ιδιοσυχνότητα	Τιμή(Hz)
$\omega_1$	18.6
$\omega_2$	74.6
$\omega_3$	168.4
$\omega_4$	300.2
$\omega_5$	468.6

Πίνακας 3. Ιδιοσυχνότητες συστήματος.

## 5.3 Απόσβεση με κύκλωμα “Current-block”

Στην δοκό συνδέεται παραδιακλαδωμένο κύκλωμα τύπου “Current-block” ρυθμισμένο να αποβαίνει τις ιδιοσυχνότητες  $\omega_2$  και  $\omega_3$  του συστήματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 16. Για των υπολογισμό των στοιχείων του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της



υποενότητας 3.3. Οι τιμές των πηνίων  $L_1$ ,  $L_2$  του κυκλώματος καθώς και το πηνίο  $L_2'$  του κυκλώματος αντισυντονισμού βρίσκονται στον πίνακα 4.

Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή (H)
$L_1$	43
$L_2$	20.9
$L_2'$	45.2

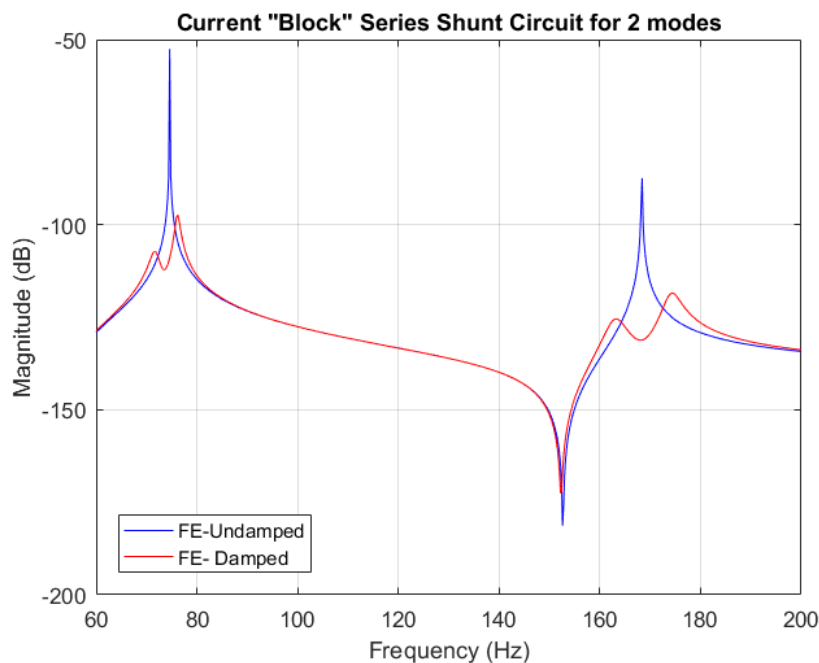
Πίνακας 4. Τιμές πηνίων για κύκλωμα "Current-Block".

Για την εύρεση των αντιστάσεων ακολουθήθηκε η ελαχιστοποίηση της  $H_2$  νόρμας του συστήματος. Οι τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  φαίνονται στον πίνακα 5.

Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή ( $\Omega$ )
$R_1$	1533.2
$R_2$	1132.4

Πίνακας 5. Τιμές αντιστάσεων για κύκλωμα "Current-block".

Ο πυκνωτής  $C_2$  του κυκλώματος είναι επιλέγεται να είναι χωρητικότητας 100nF λόγω της εμπορικής διαθεσιμότητας τους. Η απόσβεση που επιτυγχάνει το κύκλωμα πάνω στο σύστημα με τις τιμές αυτές φαίνεται στην εικόνα 19.

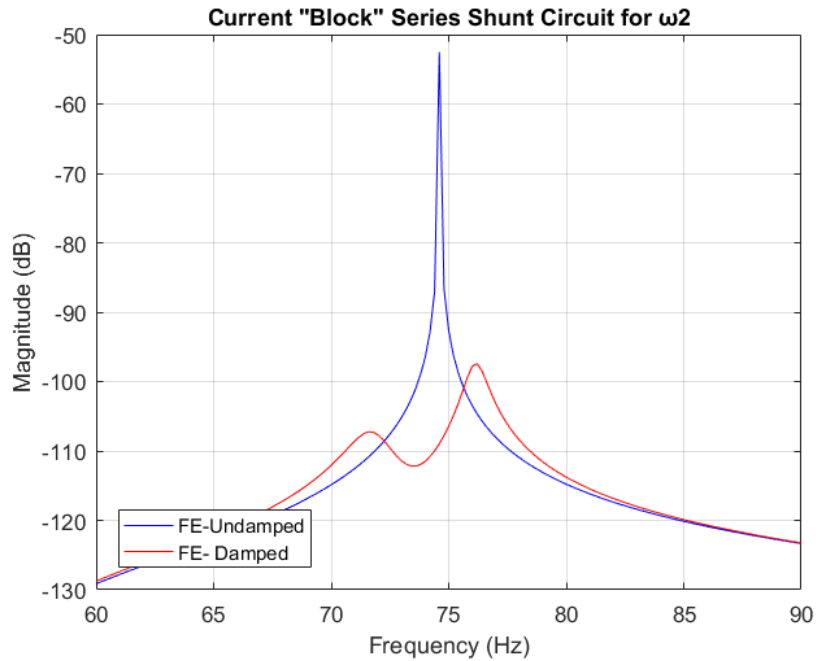


Εικόνα 19. Απόσβεση κυκλώματος "Current-Block" για  $\omega_2$  και  $\omega_3$ .

### Δεύτερη ιδιοσυχνότητα

Πιο αναλυτικά, το κύκλωμα τύπου "Current-block" αποσβένει τις ταλαντώσεις της αμφίερευστης δοκού, για την δεύτερη ιδιοσυχνότητα  $\omega_2$  από -52.53dB σε -97.8dB, όπως φαίνεται στην εικόνα 20 και στον Πίνακα 6.

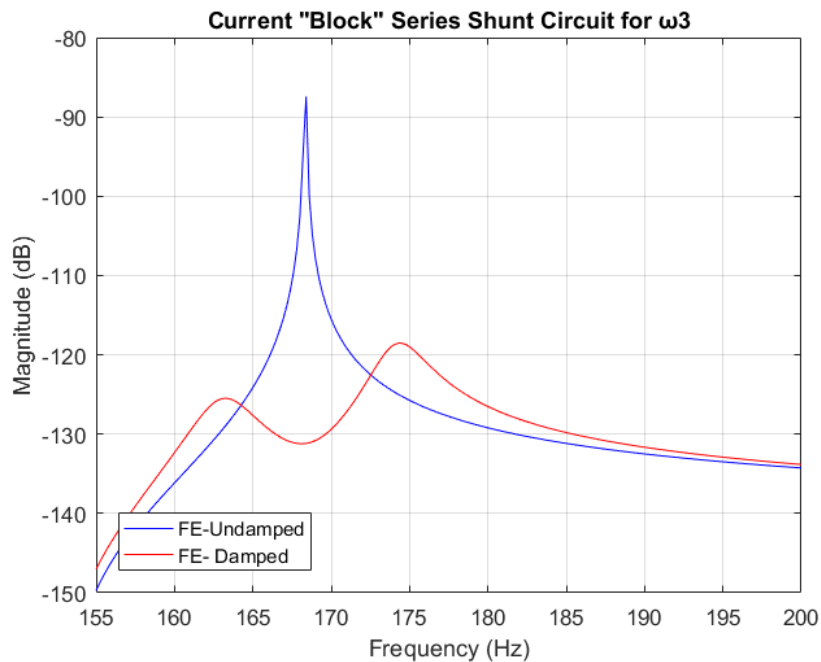




Εικόνα 20. Απόσβεση κυκλώματος "Current-Block" για  $\omega_2$

### Τρίτη ιδιοσυχνότητα

Για συχνότητα  $\omega_3$  παρατηρείται απόσβεση από -87.44dB σε -118.6dB (βλ. Πίνακα 6).



Εικόνα 21. Απόσβεση κυκλώματος "Current-Block" για  $\omega_3$ .

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση (dB)
$\omega_2$	45.27
$\omega_3$	31.16

Πίνακας 6. Μείωση που επιτυγχάνει το κύκλωμα "Current-block".



## 5.4 Απόσβεση με κύκλωμα “Current-flow”

Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται κύκλωμα τύπου “Current-Flow” το οποίο είναι ρυθμισμένο ώστε να αποσβένει ταυτόχρονα την δεύτερη  $\omega_2$  και την τρίτη  $\omega_3$  ιδιοσυχνότητα του κυκλώματος, ομοίως με το κύκλωμα “Current-Block” προηγουμένως. Η προτεινόμενη συνδεσμολογία φαίνεται στην εικόνα 17. Για την εύρεση των τιμών των στοιχείων του κυκλώματος ακολουθήθηκε η μεθοδολογία της υποενότητας 3.4. Οι τιμές των πηνίων  $L_1$ ,  $L_2$  του κυκλώματος, βρίσκονται στον πίνακα 7.

Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή (H)
$L_1$	480
$L_2$	92.6

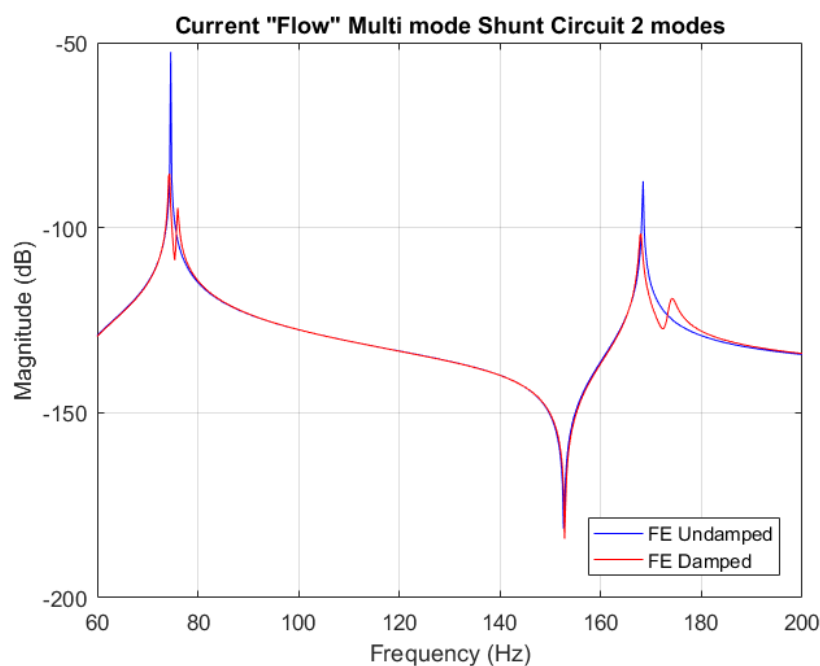
Πίνακας 7. Τιμές πηνίων για κύκλωμα “Current-Flow”.

Οι τιμές που προέκυψαν για τις αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  από την διαδικασία της ελαχιστοποίησης της  $H_2$  νόρμας [8] φαίνονται στον πίνακα 8.

Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή ( $\Omega$ )
$R_1$	1423
$R_2$	1212

Πίνακας 8. Τιμές αντιστάσεων για κύκλωμα “Current-Flow”.

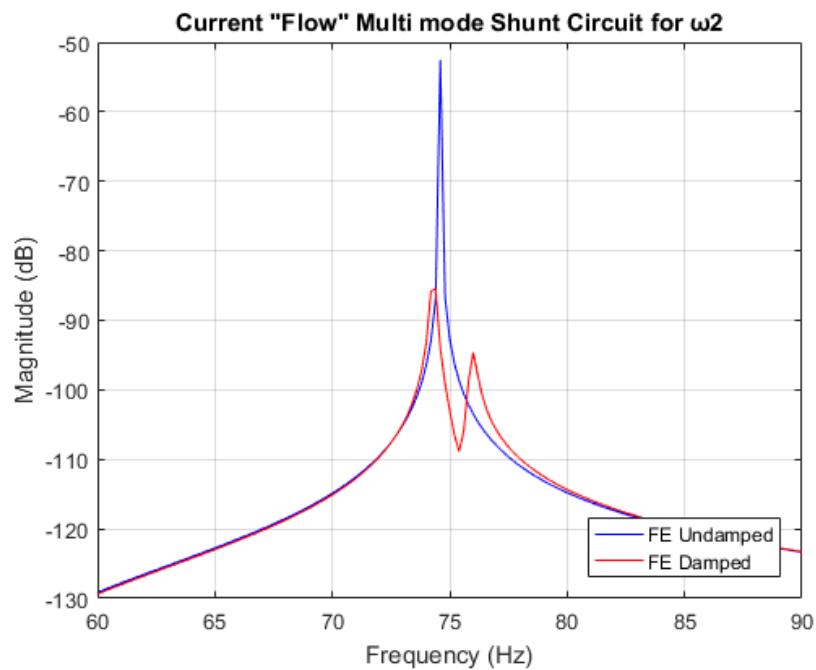
Οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  του κυκλώματος “Current-flow” επιλέγονται με χωρητικότητα  $10nF$  λόγω της εμπορικής διαθεσιμότητας τους [10]. Η απόσβεση που επιτυγχάνει το κύκλωμα πάνω στο σύστημα με τις τιμές αυτές φαίνεται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22. Απόσβεση κυκλώματος “Current-Flow” για  $\omega_2$  και  $\omega_3$ .



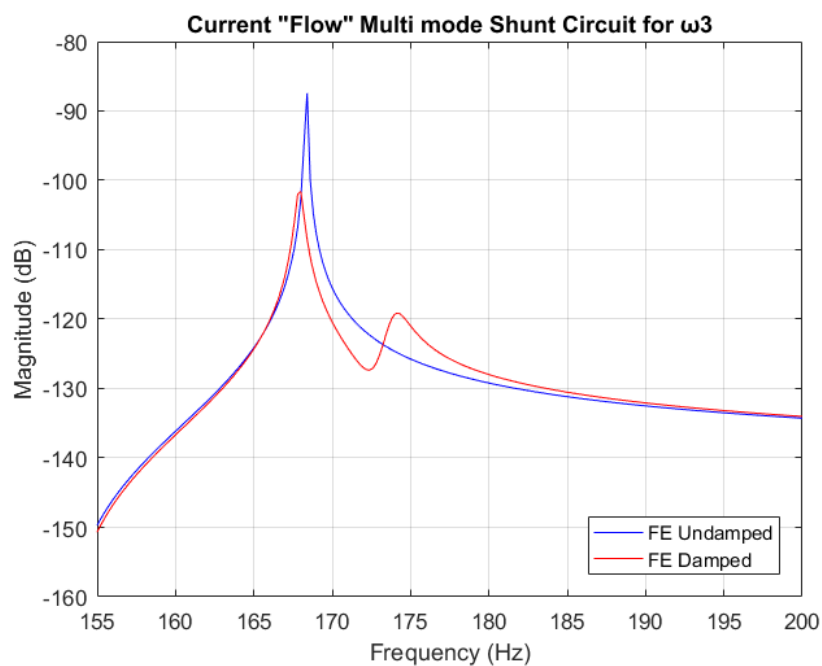
## Δεύτερη ιδιοσυχνότητα



Εικόνα 23. Απόσβεση κυκλώματος "Current-flow" για  $\omega_2$ .

Αναλυτικότερα, το κύκλωμα τύπου "Current-flow", αποσβένει τις ταλαντώσεις της αμφίερευσης δοκού, για την δεύτερη ιδιοσυχνότητα  $\omega_2$  από -52.53dB σε -85.45dB.

## Τρίτη ιδιοσυχνότητα



Εικόνα 24. Απόσβεση κυκλώματος "Current-flow" για  $\omega_3$ .



Στην τρίτη ιδιοσυχνότητα  $\omega_3$  παρατηρείται απόσβεση από -87.44dB σε -101.6dB. Στον πίνακα 9 παρατίθεται η μείωση που πέτυχε το κύκλωμα "Current-flow" σε dB.

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση (dB)
$\omega_2$	32.95
$\omega_3$	14.16

Πίνακας 9. Μείωση που επιτυγχάνει το κύκλωμα "Current-flow".

Στην πρώτη αυτή εκτίμηση είναι εμφανές ότι και οι δυο τύποι κυκλωμάτων πετυχαίνουν σημαντική απόσβεση στο σύστημα. Τα δυο κυκλώματα συνδέονται σε πανομοιότυπο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και αυτό με την σειρά του στην ίδια αμφίεριστη δοκό. Το γεγονός αυτό κάνει τα αποτελέσματα συγκρίσιμα. Όπως φαίνεται στον συγκριτικό πίνακα 10 το κύκλωμα "Current-block" πετυχαίνει μεγαλύτερες αποσβέσεις και στις δυο ιδιοσυχνότητες  $\omega_2$  και  $\omega_3$ . Αυτό επιβεβαιώνει τα πειραματικά αποτελέσματα των [8] και [10].

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση "Current-Block"(dB)	Μείωση "Current-flow"(dB)
$\omega_2$	45.27	32.95
$\omega_3$	31.16	14.16

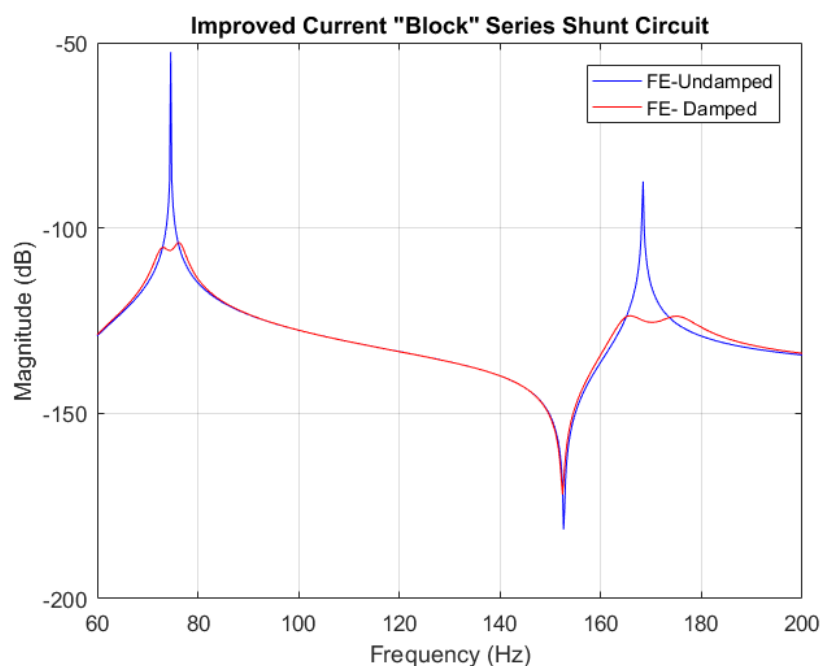
Πίνακας 10. Συγκριτικός πίνακας αποσβέσεων "Current-block" και "Current-flow".



## 6. Βελτίωση απόδοσης κυκλωμάτων

Μολονότι οι αποσβέσεις που επιτυγχάνουν τα κυκλώματα “Current-Block” και “Current-Flow” είναι σημαντικές, μπορούν να γίνουν καλύτερες. Γνωρίζουμε ότι για να είναι οι τιμές των παραμέτρων  $L$  και  $R$  βέλτιστες, πρέπει οι δυο κορυφές εκατέρωθεν των στοχευμένων συχνοτήτων  $\omega_2$  και  $\omega_3$  να είναι στο ίδιο επίπεδο. Με βάση τα αποτελέσματα που πέτυχαμε με τις παραπάνω παραμέτρους, έγινε προσπάθεια βελτίωσης των αποτελεσμάτων μέσω δοκιμής και σφάλματος. Τα βελτιωμένα αποτελέσματα για το κύκλωμα “Current-Block” φαίνονται στην εικόνα 25.

### 6.1 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current-Block”



Εικόνα 25. Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος “Current-Block”.

Τα στοιχεία  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $L_2$  και  $R_2$  του κυκλώματος της εικόνας 16 τροποποιήθηκαν για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα του κυκλώματος ως προς την απόσβεση των ταλαντώσεων. Τα στοιχεία  $L'_2$  και  $C_2$  του κυκλώματος αντισυντονισμού δεν άλλαξαν καθώς είναι ρυθμισμένα να λειτουργούν σαν ανοιχτοκύκλωμα στην συχνότητα  $\omega_2$ . Οι τιμές των πηνίων και των αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες 11 και 12 αντίστοιχα.

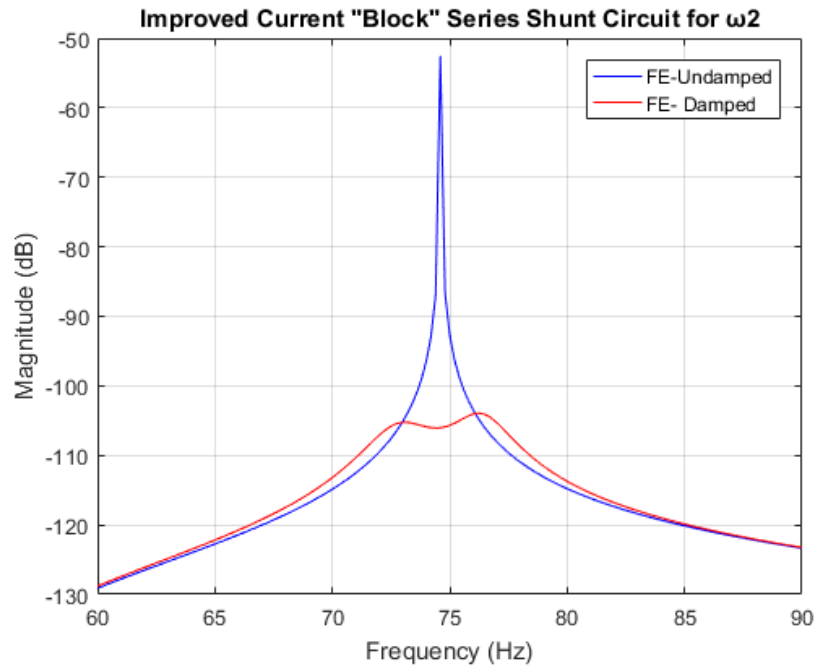
Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή (H)
$L_1$	41
$L_2$	20.2
$L'_2$	45.2

Πίνακας 11. Βελτιωμένες τιμές πηνίων για κύκλωμα “Current-Block”.

Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή ( $\Omega$ )
$R_1$	2500.4
$R_2$	2040.2

Πίνακας 12. Βελτιωμένες τιμές αντιστάσεων για κύκλωμα "Current-block".

### Δεύτερη ιδιοσυχνότητα



Εικόνα 26. Βελτιωμένη απόσβεση κυκλώματος "Current-block" για συχνότητα  $\omega_2$ .

Με τα νέα στοιχεία τοποθετημένα στο κύκλωμα παραδιακλάδωσης, για την δεύτερη ιδιοσυχνότητα  $\omega_2$ . Παρατηρείται μείωση από  $-52.53\text{dB}$  σε  $-104.1\text{dB}$ .

### Τρίτη ιδιοσυχνότητα

Στην τρίτη ιδιοσυχνότητα  $\omega_3$  παρατηρείται μείωση από  $-87.44\text{dB}$  σε  $-123.9\text{dB}$ .

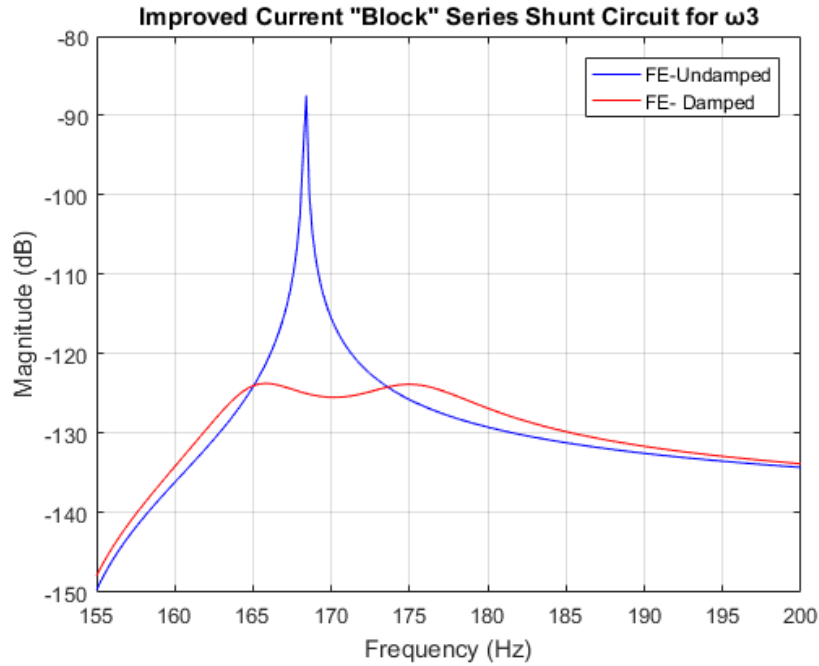
Στον πίνακα 13 παρατίθεται η μείωση που επιτυγχάνει στις δύο ταλαντώσεις της αμφιέριστης δοκού το βελτιωμένο κύκλωμα "Current-block".

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση (dB)
$\omega_2$	51.57
$\omega_3$	36.44

Πίνακας 13. Μείωση που επιτυγχάνει το βελτιωμένο κύκλωμα "Current-block".







Εικόνα 27. Βελτιωμένη απόσβεση κυκλώματος "Current-Block" για συχνότητα  $\omega_3$ .

## 6.2 Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος "Current- Flow"

Όπως το "Current-block" στην προηγούμενη υποενότητα, έτσι και το "Current-flow" της εικόνας 17 τροποποιείται ώστε να γίνει πιο αποδοτικό ως προς την απόσβεση των ταλαντώσεων της αμφιέρειστης δοκού. Πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $L_2$  και  $R_2$  αλλάζουν. Οι δυο πυκνωτές του κυκλώματος  $C_1$ ,  $C_2$  παραμένουν ίδιοι και ίσοι με  $10nF$ . Η βελτιωμένη απόσβεση που επιτυγχάνεται, με τα νέα στοιχεία στο σύστημα φαίνεται στην εικόνα 28. Τα τροποποιημένα πηνία και οι νέες αντιστάσεις βρίσκονται στους πίνακες 14 και 15 αντίστοιχα.

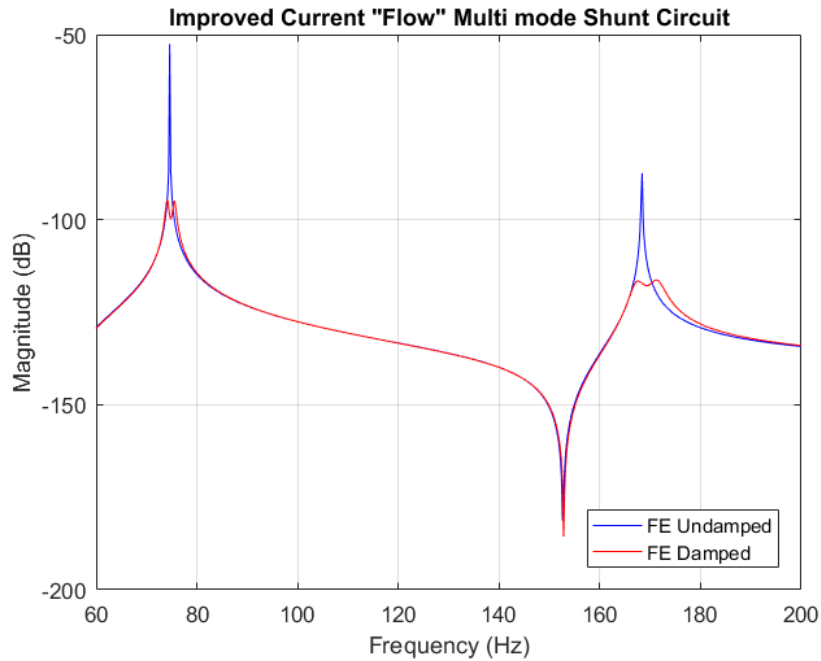
Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή (H)
$L_1$	488
$L_2$	96.1

Πίνακας 14. Βελτιωμένες τιμές πηνίων για κύκλωμα "Current-Flow".

Στοιχείο κυκλώματος	Τιμή ( $\Omega$ )
$R_1$	3955
$R_2$	3620

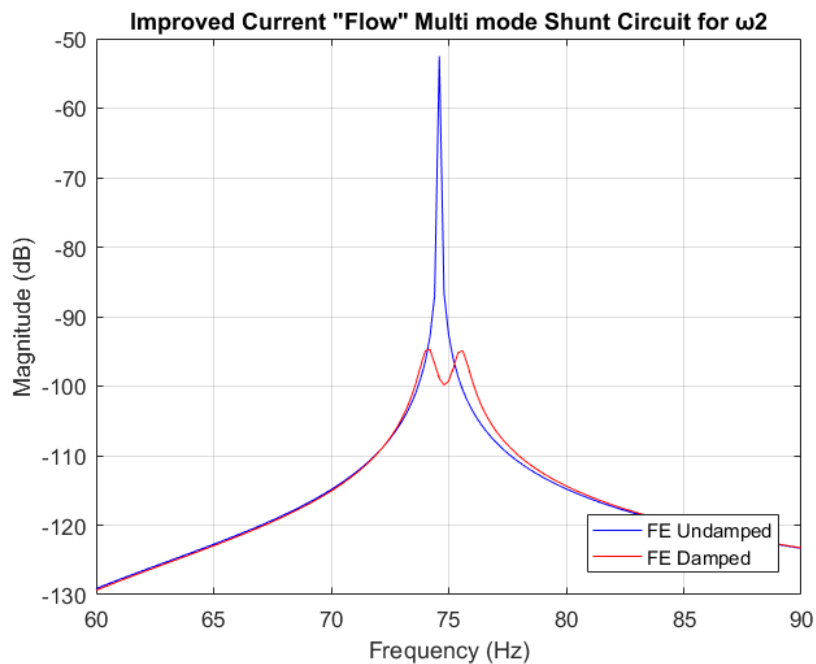
Πίνακας 15. Βελτιωμένες τιμές αντιστάσεων για κύκλωμα "Current-Flow".





Εικόνα 28. Βελτιωμένα αποτελέσματα κυκλώματος "Current-Flow".

### Δεύτερη ιδιοσυχνότητα



Εικόνα 29. Βελτιωμένη απόσβεση κυκλώματος "Current-flow" για συχνότητα  $\omega_2$ .

Αναλυτικότερα το κύκλωμα με διαμόρφωση "Current-flow", με τα νέα αυτά στοιχεία για την ιδιομορφή του συστήματος που αντιστοιχεί στην συχνότητα  $\omega_2$  επιτυγχάνεται μείωση από τα -52.53 στα -94.93.



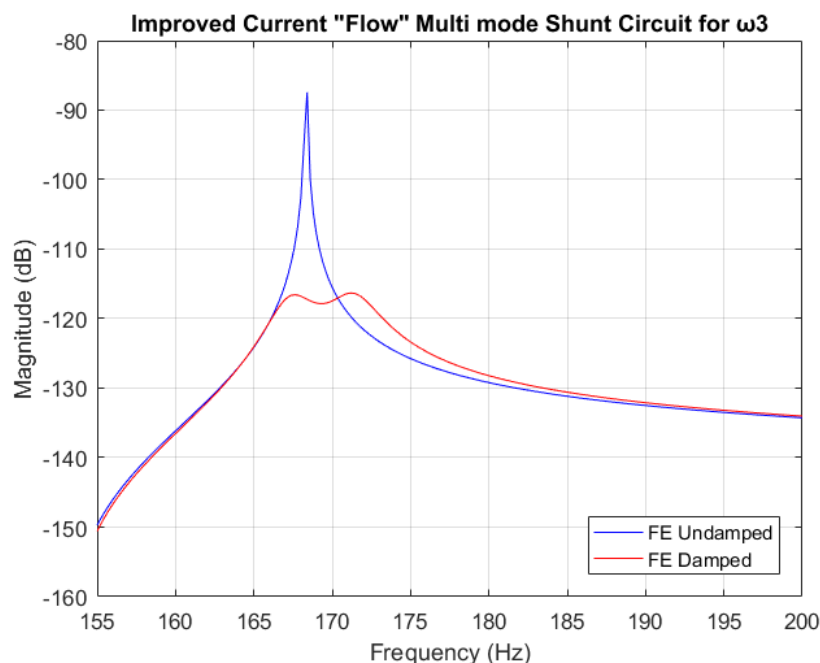
### Τρίτη ιδιοσυχνότητα

Για τη συχνότητα  $\omega_3$  το κύκλωμα με τα βελτιωμένα στοιχεία που βρίσκονται στους πίνακες 14 και 15, πετυχαίνει απόσβεση από τα -87.44dB στα -116.4.

Στον πίνακα 16 φαίνονται οι μειώσεις που κατεγράφησαν με τα τροποποιούμενα στοιχεία του κυκλώματος "Current-flow" και για τις δυο συχνότητες  $\omega_2$  και  $\omega_3$ , ενώ στον συγκριτικό πίνακα 17 καταγράφονται οι μειώσεις που πετυχαίνουν τα δυο κυκλώματα "Current- block" και "Current-flow" με τα νέα πλέον στοιχεία.

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση (dB)
$\omega_2$	42.4
$\omega_3$	28.96

Πίνακας 16. Μείωση που επιτυγχάνει το βελτιωμένο κύκλωμα "Current-flow".



Εικόνα 30. Βελτιωμένη απόσβεση κυκλώματος "Current-flow" για συχνότητα  $\omega_3$ .

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση "Current-block" (dB)	Μείωση "Current-flow" (dB)
$\omega_2$	51.57	42.4
$\omega_3$	36.44	28.96

Πίνακας 17. Συγκριτικός πίνακας αποσβέσεων βελτιωμένων "Current-block" και "Current-flow".

Ιδιοσυχνότητα	Μείωση "Current-lock"	Μείωση "Current-flow"
$\omega_2$	49.53%	44.66%
$\omega_3$	29.42%	24.87%

Πίνακας 18. Συγκριτικός πίνακας ποσοστιαίων αποσβέσεων βελτιωμένων "Current-block" και "Current-flow".



## 7. Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η σύγκριση δυο διαφορετικών τύπων κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης πολλαπλών ιδιομορφών με πιεζοηλεκτρικά υλικά. Τα κυκλώματα αυτά ήταν το “Current- Block” και το “Current- Flow”. Για να είναι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα τα δυο κυκλώματα τοποθετήθηκαν στο ίδιο σύστημα που προσομοιώθηκε σε περιβάλλον Matlab.

Το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από μια αμφιέρειστη δοκό, στην οποία τοποθετήθηκαν πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, στα οποία συνδέθηκαν κυκλώματα παραδιακλάδωσης. Οι ιδιομορφές που επιλέχθηκε να αποσβεστούν ήταν η δεύτερη και η τρίτη. Τα αποτελέσματα για τις αποσβέσεις των ιδιομορφών αυτών ήταν ιδιαιτέρως ικανοποιητικά και για τους δυο τύπους πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων. Πιο συγκεκριμένα το “Current-Block” κατάφερε μεγαλύτερη απόσβεση, η οποία ήταν της τάξης του 49.53% για  $\omega_2$  και 29.42% για  $\omega_3$ . Εντούτοις το κύκλωμα “Current- Flow” δεν είναι πολύ πίσω με μειώσεις 44.66% για  $\omega_2$  και 24.87% για  $\omega_3$ . Αυτό προσέφερε στην κατασκευή επιπλέον σταθερότητα.

Πάρα το γεγονός ότι το “Current-Block” πετυχαίνει μεγαλύτερες μειώσεις, η σχεδίαση του μπορεί να οδηγήσει σε κάποια προβλήματα. Για μεγάλο αριθμό ιδιομορφών που θέλουμε να αποσβέσουμε ταυτόχρονα, ο αριθμός των στοιχείων ανά βρόγχο αυξάνεται κατακόρυφα. Το γεγονός αυτό, λαμβάνοντας υπόψη και την απλούστερη σχεδίαση, αλλά και κοντινή σε απόδοση απόσβεση του “Current-Flow”, κάνει το κύκλωμα “Current-block” προτιμητέο για χρήσεις όπου το μέγεθος της απόσβεσης αποτελεί προτεραιότητα και δεν τίθεται περιορισμός χώρου και βάρους στο σύστημα. Αντίθετα το κύκλωμα “Current-Flow” είναι κατάλληλο για χρήση σε κατασκευές με περιορισμένο χώρο που επιθυμούμε να αποσβέσουμε περισσότερες ιδιομορφές.

Στο μέλλον για το παρόν σύστημα θα μπορούσε να εφαρμοστεί κάποια τεχνική βελτιστοποίησης ώστε να αποφευχθεί η χρονοβόρος διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος για τον προσδιορισμό των στοιχείων των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.



## Βιβλιογραφία

- [1] Μπαλάφα Παναγιώτα, “Ομογενοποίηση σύνθετων πολυλειτουργικών υλικών”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2017.
- [2] Στρατάκης Κωνσταντίνος, “Κατασκευή ενσωματωμένου για την ανίχνευση, αποθήκευση και επεξεργασία ακουστικών βιοσημάτων”, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2017.
- [3] Gripp, J.A.B. and Rade D.A., “*Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review*”. Mechanical Systems and Signal Processing 112: 359–383, 2018.
- [4] S.O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming, “*Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*”, Springer-Verlag London, 2006.
- [5] S. Y. Wu. “*Method for multiple mode shunt damping of structural vibration using a single PZT transducer.*” In Proc. SPIE Symposium on Smart Structures and Materials – Smart Structures and Intelligent Systems, pages 159–167, March 1998.
- [6] S. Y. Wu and A. S. Bicos, “*Structural vibration damping experiments using improved piezoelectric shunts.*” In Proc. SPIE Conference on Passive Damping and Isolation, SPIE Vol. 3045, pages 40–50, 1997.
- [7] S. Y. Wu. “*Piezoelectric shunts with a parallel R-L circuit for structural damping vibration control*”, SPIE Vol. 2720, pages 259-269, 1996.
- [8] S. Behrens and S. O. R. Moheimani, “*Optimal resistive elements for multiple shunt-damping of a piezoelectric laminate beam.*”, In Proc. IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, December 2000.
- [9] S. Behrens, S. O. R. Moheimani and A. J. Fleming. “*Multiple mode current flowing passive piezoelectric shunt controller.*”, Journal of Sound and Vibration, 266(5): pages 929-942, October 2003.
- [10] Behrens S and Moheimani S O R. “*Current flowing multiple mode piezoelectric shunt dampener*”, Proc. SPIE Smart Materials and Structures, pp 4697–24 pages 217-226, San Diego, California, March 2002.
- [11] A J Fleming, Behrens S and Moheimani S O R, “*Reducing the inductance requirements of piezoelectric shunt damping systems*”, Proc. SPIE Smart Materials and Structures, pp 0964 pages 57-64, San Diego, Ca, January 2003.
- [12] H. Janocha, “*Actuators in adaptronics*”, in Adaptronics and Smart Structures, B. Clephas, 2<sup>nd</sup> ed., ch. 6, Springer, 1999.



- [13] N. W. Hagood and E. F. Crawley, “*Experimental investigations of passive enhancement of damping space structures.*” *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 14(6):1100, 1991.
- [14] N. W. Hagood and A. Von Flotow, “*Damping of structure vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks.*”, *Journal of Sound and Vibration*, 14(2):243, 1991.
- [15] Sam Behrens, Andrew J. Fleming and S. O. Reza Moheimani, “*New method for multiple-mode shunt damping of structural vibration using a single piezoelectric transducer.*” *Proc. SPIE 4331, Smart Structures and Materials 2001: Damping and Isolation*, 2 July 2001.
- [16] C. R. Fuller, S. J. Elliott and P. A. Nelson, “*Active Control of Vibration*”, Academic Press, 1996
- [17] Tairidis G.K, Foutsitzi G., Stavroulakis G.E. Optimal design of smart composites, in *Approximation and Optimization - Algorithms, Complexity and Applications*, Eds. Demetriou I., Pardalos P., 2019, Springer, Cham, pp 185-217
- [18] S. O. R Moheimani, “*Experimental verification of the corrected transfer function of a piezoelectric laminate beam.*”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 8, pp. 660-666, July 2000.
- [19] L. Meirovitch, “*Elements of Vibration Analysis*”, McGraw-Hill, Sydney, 2<sup>nd</sup> ed., 1996.
- [20] S. Behrens, “*Passive and semi-active vibration control of piezoelectric laminates*”, Master’s thesis, University of Newcastle, Australia, April 2001.
- [21] S. O. R. Moheimani, A. J. Fleming and S. Behrens, “*On the feedback structure of wideband piezoelectric shunt damping systems*”, *Smart Materials and Structures*, Accepted for publication 2002.
- [22] Amr M. Baz, “*Active and Passive Vibration Damping*”, Wiley, Year: 2019
- [23] Marakakis K., Tairidis G.K., Koutsianitis P., Stavroulakis G.E. (2019) “*Shunt piezoelectric systems for noise and vibration control: A review*”, *Front Built Environ - Computational Methods in Structural Engineering*, 5:64 (17 pages)

