



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και επίδραση πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας σε παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά συστήματα**

*Ονοματεπώνυμο Φοιτητή:*

**Ζουγλής Ηρακλής**

*Αριθμός Μητρώου:*

**2017030053**

*Επιβλέπων:*

**Καρυστινός Γεώργιος**

*1ος Εξεταστής:*

**Γυφτάκης Κωνσταντίνος**

*2ος Εξεταστής:*

**Σταυρουλάκης Γεώργιος**

**Χανιά 2024**



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται η επίδραση πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας σε παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά συστήματα για την απόσβεση μηχανικών ταλαντώσεων. Οι μηχανικές ταλαντώσεις είναι ένα σύννηθες φαινόμενο σε διάφορα μηχανολογικά συστήματα και μπορούν να οδηγήσουν σε κραδασμούς, θορύβους και μειωμένη απόδοση. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα και οι εφαρμογές τους έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνών καθώς αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο για την απόσβεση των μηχανικών ταλαντώσεων.

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να διερευνηθεί η επίδραση της προσθήκης πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας στην αποτελεσματικότητα των πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων για την απόσβεση αυτών των ταλαντώσεων. Η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά πρόσφατη, εμφανίζεται στη βιβλιογραφία και κατατάσσεται στην κατηγορία των ημιενεργών συστημάτων απόσβεσης ενέργειας, με την έννοια ότι απαιτεί πιθανώς κάποια εξωτερική ενέργεια για την υλοποίησή της. Στόχος της εργασίας είναι να μελετηθεί η σχετική βιβλιογραφία και να ενσωματωθούν τα αποτελέσματά της σε υπάρχοντα προγράμματα υπολογιστή, ώστε να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά της.

## Abstract

This thesis studies the effect of a negative capacitance circuit on mechanical vibrations damping in piezoelectric shunt systems. Mechanical vibrations are a common phenomenon in various mechanical systems and can lead to vibration, noise and reduced efficiency. The piezoelectric systems and their applications have attracted a lot of attention as they represent a promising area of research for damping mechanical vibrations.

This study aims to investigate the effect of adding negative capacitances to the piezoelectric shunt circuits, on the efficiency of damping these vibrations. This technology is relatively recent, appears in the literature and is classified in the category of semi-active energy damping systems, in the sense that it probably requires some external energy for its implementation. The aim of the paper is to study the relevant literature and to integrate its results into existing computer programs in order to investigate its effectiveness.



*Η συγκεκριμένη διπλωματική αφιερώνεται στην οικογένειά μου, τις  
καλές παρέες και στον Ηρακλή.*

*Στη μνήμη των παππούδων μου Ηρακλή και Νίκου.  
Στον αδελφό μου Νίκο, του εύχομαι να είναι δυνατός και να επιτύχει  
τα όνειρά του.*

*Στους γονείς μου, τους εύχομαι να συνεχίσουν να κυνηγούν τη ζωή  
μέσα από οποιεσδήποτε καταστάσεις.  
Στις γιαγιάδες μου, να είναι καλά και να ξέρουν ότι θα τις φροντίσουμε.*

*Στις καλές παρέες που χωρίς αυτές η εμπειρία δεν θα ήταν η ίδια.*

*Σε σένα φίλε που όταν θα σκέφτεσαι "Δεν μπορώ", να φέρνεις στο νου  
σου το ταξίδι αυτό.*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα της σχολής  
Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης  
Μαρία- Στέλλα Δαράκη, για την βοήθεια και τον πολύτιμο χρόνο που  
αφιέρωσε για την επίλυση αποριών αλλά και για την εξοικείωση με το  
περιβάλλον προσομοίωσης.*

*Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή και δεύτερο μέλος της  
εξεταστικής επιτροπής κ.Γεώργιο Σταυρουλάκη για την υπομονετική  
και όμορφη συνεργασία του.*

*Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαρακάκη Κωνσταντίνο,  
διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του  
Πολυτεχνείου Κρήτης, για τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε και το  
κίνητρο που μου έδωσε.*

*-ΗΡΑΚΛΗΣ ΖΟΥΓΛΗΣ*



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	<b>12</b>
2.1	<i>Εισαγωγή</i> . . . . .	12
2.2	<i>Θεωρία Πιεζοηλεκτρικών Υλικών</i> . . . . .	12
2.2.1	Ορισμός Πιεζοηλεκτρισμού . . . . .	12
2.2.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	13
2.2.3	Πιεζοηλεκτρικά Υλικά . . . . .	14
2.3	<i>Πιεζοηλεκτρικά Παραδιακλαδωμένα Κυκλώματα</i> . . . . .	15
2.3.1	Παραδιακλαδωμένα Κυκλώματα . . . . .	15
2.3.2	Μηχανισμοί Απόσβεσης . . . . .	16
2.3.3	Κατηγορίες Παραδιακλαδωμένων Κυκλωμάτων . . . . .	17
2.4	<i>Πυκνωτές Αρνητικής Χωρητικότητας</i> . . . . .	19
2.4.1	Ορισμός Αρνητικής Χωρητικότητας . . . . .	19
2.4.2	Επίτευξη Αρνητικής Χωρητικότητας . . . . .	19
2.4.3	Κατασκευή Αρνητικής Χωρητικότητας . . . . .	20

2.4.4	Ιστορική Αναδρομή Αρνητικής Χωρητικότητας . . .	21
2.4.5	Αρνητική Χωρητικότητα και Παραδιακλαδωμένα Κυκλώματα	21
2.5	Συνδεσμολογίες και εφαρμογές πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας	22
2.5.1	Παράλληλη διάταξη (Parallel Configuration) . . . .	22
2.5.2	Σε σειρά διάταξη (Series Configuration) . . . . .	23
2.5.3	Μικτή διάταξη [Σε σειρά και παράλληλη συνδεσμολογία (Series + parallel configuration)] . . . . .	24
2.5.4	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Αρνητικής Χωρητικότητας (AX/NC) . . . . .	26
2.5.5	Εφαρμογές Αρνητικής Χωρητικότητας . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Μαθηματική και Υπολογιστική Ανάλυση του Προβλήματος</b>	<b>28</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	28
3.2	Ηλεκτρομηχανικό Μοντέλο Δομής . . . . .	28
3.3	Μοντέλο με κύκλωμα πυκνωτή αρνητικής χωρητικότητας	31
3.3.1	Μοντέλο με κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας και παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης	33
3.3.2	Ανάλυση Ευστάθειας . . . . .	34
3.4	Μοντέλο με κύκλωμα συντονισμού ( $R, L$ shunt) . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Μοντελοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης</b>	<b>36</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	36
4.2	Παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό σύστημα με κύκλωμα NC για τον έλεγχο μιας ιδιομορφής . . . . .	37
4.2.1	Μοντελοποίηση και προσομοίωση λειτουργίας . . .	37



<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>46</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	46
5.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων . . . . .	46
5.2.1	Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες . . . . .	47
5.2.2	Γραφήματα συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων .	52
5.2.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>69</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>73</b>



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Στις μέρες μας η αλληλεπίδραση ανθρώπων και μηχανής γίνεται ολοένα και εντονότερη. Για την καλύτερη εμπειρία στην αλληλεπίδραση αυτή, τα μηχανήματα και οι έξυπνες κατασκευές γενικότερα πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια, ευρωστία και σταθερότητα. Συνεπώς ο έλεγχος τους πρέπει να είναι το κύριο μέλημα του κατασκευαστή, καθώς η παρουσία δονήσεων ή κραδασμών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία σφαλμάτων ή και επιβλαβών συμπεριφορών ανάλογα την εφαρμογή.

Ένα στοιχείο που έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των μελετητών για την επίλυση των ζητημάτων αυτών είναι ο πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας. Η χρήση του ως αισθητήρας, ενεργοποιητής ή συνδιασμός των δύο, σε παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα αποτελεί μια χαμηλού κόστους λύση, παθητικού ελέγχου, με μικρή πολυπλοκότητα.

Μια σχετικά νέα μέθοδος είναι η χρήση πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας και η σύνδεσή τους με τα παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα για την απόσβεση των δονήσεων μέσω της αύξησης του ηλεκτρομηχανικού παράγοντα σύζευξης. Η αρνητική χωρητικότητα είναι μια τεχνική ημιενεργού ελέγχου που αυξάνει την πολυπλοκότητα του κυκλώματος, καθώς χρησιμοποιείται τελεστικός ενισχυτής για την κατασκευή της.

Η συγκεκριμένη διπλωματική ασχολείται με την μελέτη και την επίδραση μιας καινούριας διάταξης πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας στα παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά συστήματα. Στο πλαίσιο της

εργασίας εμπεριέχεται η σχεδίαση και υλοποίηση σε πρόγραμμα προσομοιώσεων της διάταξης αυτής καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της με αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοιώσεων ενός παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος συντονισμού (RL-resonant shunt). Επίσης γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και με αντίστοιχα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία.

#### Δόμηση διπλωματικής εργασίας:

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική έρευνα με αναφορές στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, στους πυκνωτές αρνητικής χωρητικότητας καθώς και στα πιεζοηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα κυκλώματα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Κατόπιν ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο όπου παρουσιάζεται η μοντελοποίηση στο εμπορικό πακέτο επίλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων *COMSOL Multiphysics*. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τέλος η διπλωματική κλείνει με συμπεράσματα και σκέψεις για μελλοντικές εργασίες.

# Κεφάλαιο 2

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο των εξής θεμάτων:

- ▶ *Θεωρία πιεζοηλεκτρικών υλικών*
- ▶ *Πιεζοηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα κυκλώματα*
- ▶ *Πυκνωτές αρνητικής χωρητικότητας*
- ▶ *Συνδεσμολογίες και εφαρμογές πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας*

### 2.2 Θεωρία Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

#### 2.2.1 Ορισμός Πιεζοηλεκτρισμού

Ο πιεζοηλεκτρισμός αναφέρεται στην ιδιότητα κάποιων υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν τους ασκείται κάποια μηχανική τάση-πίεση ή ταλάντωση (ευθύ φαινόμενο). Επίσης, ο όρος χαρακτηρίζεται

και από το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποδίδεται στην ύπαρξη ηλεκτρικού διπόλου στην κρυσταλλική δομή των στερεών (κρύσταλλοι χωρίς κέντρο συμμετρίας). Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα επιμέρους μόρια, καθώς το ένα άκρο τους είναι περισσότερο αρνητικά φορτισμένο ενώ το άλλο άκρο τους είναι θετικά φορτισμένο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός διπόλου [20].

### 2.2.2 Ιστορική Αναδρομή

Οι βάσεις για τη μελέτη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου προέρχονται από το πυροηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο ένα υλικό δημιουργεί ηλεκτρικό δυναμικό ως απόκριση σε μια αλλαγή της θερμοκρασίας. Έτσι τόσο ο René Just Haüy όσο και ο Antoine César Becquerel υπέθεσαν μια σχέση μεταξύ μηχανικής τάσης και ηλεκτρικού φορτίου ωστόσο, τα πειράματα και των δύο αποδείχθηκαν ατελέσφορα [20].

Το 1880 οι αδελφοί Pierre Curie και Jacques Curie παρουσίασαν το ευθύ μέρος του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Συνδιάζοντας τις γνώσεις τους για τον πυροηλεκτρισμό και έχοντας κατανοήσει τις κρυσταλλικές δομές που προκάλεσαν τον πυροηλεκτρισμό, κατάφεραν να προβλέψουν την κρυσταλλική συμπεριφορά και επέδειξαν το φαινόμενο χρησιμοποιώντας κρυστάλλους τουρμαλίνης, χαλαζία, τοπάζι, ζάχαρη από ζαχαροκάλαμο και αλάτι Rochelle. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έγινε πιο εμφανές στον χαλαζία και το αλάτι Rochelle [20].

Οι Curies, δεν κατάφεραν να προβλέψουν το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο το εξήγαγε μαθηματικά από τις θεμελιώδεις θερμοδυναμικές αρχές ο Gabriel Lippmann το 1881. Κατόπιν, οι Curies επιβεβαίωσαν την ύπαρξη του αντίστροφου φαινομένου και συνέχισαν να αποκτούν ποσοτική απόδειξη της πλήρους αντιστρεψιμότητας των ηλεκτροελαστικών- μηχανικών παραμορφώσεων σε πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους [20].

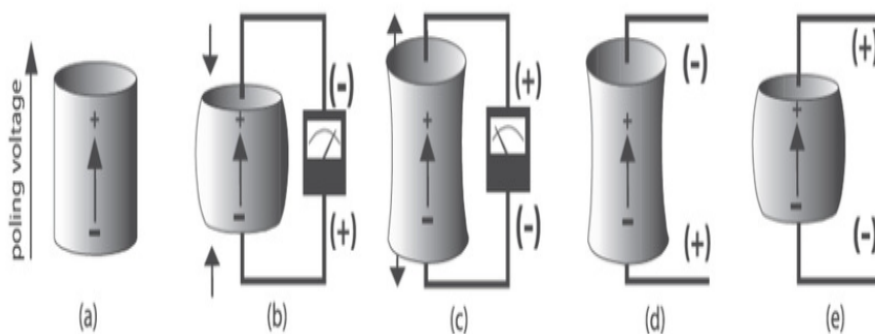
Τις ακόλουθες δεκαετίες, ο πιεζοηλεκτρισμός παρέμεινε ανεξερεύνητος, αν και αποτέλεσε ζωτικό εργαλείο για την ανακάλυψη του πολωνίου και του ραδίου από τον Pierre και τη Marie Curie το 1898. Η περισσότερη δουλειά για τη διερεύνηση και τον καθορισμό των κρυ-

σταλλικών δομών που παρουσίαζαν πιεζοηλεκτρισμό ήρθε το 1910. Τότε ο Woldemar Voigt με τη δημοσίευσή του "Lehrbuch der Kristallphysik" (Διδακτικό εγχειρίδιο για την κρυσταλλική φυσική), περιέγραψε τις 20 φυσικές κατηγορίες κρυστάλλων που είναι ικανές για πιεζοηλεκτρισμό και όρισε αυστηρά τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές χρησιμοποιώντας την ανάλυση τανυστών [20].

### 2.2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Στις μέρες μας υπάρχει πληθώρα από πιεζοηλεκτρικά υλικά καθώς πέρα από αυτά που προέρχονται από τη φύση, υπάρχουν και πολλά τεχνητά. Ενδεικτικά μερικά εκ φύσεως πιεζοηλεκτρικά είναι το άλας Rochelle, ο τουρμαλίνης, το τοπάζι, ο χαλαζίας και κάποιοι ανάλογοι κρύσταλλοί του (λαγκασίτης, ορθοφωσφορικό γάλλιο). Τα μη-τοξικά πολυμερή πιεζοηλεκτρικά (τεχνητά) μπορεί να μην πιάνουν τις υψηλές αποκρίσεις των κεραμικών πιεζοηλεκτρικών (π.χ. Νιοβικό κάλιο ( $\text{KNbO}_3$ ), τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος (PZT)), όμως χρησιμοποιούνται λόγω της ευκαμψίας και της μικρότερης ακουστικής τους σύνθετης αντίστασης. Επίσης ιδιότητες όπως η βιοσυμβατότητά τους, η βιοδιασπασιμότητά τους, το χαμηλό κόστος και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας τα καθιστούν σημαντικά σε σύγκριση με άλλα πιεζοϋλικά.

Στην [εικόνα 2.1](#), που ακολουθεί, απεικονίζεται μια σχηματική αναπαράσταση του ευθέως και του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.



Σχήμα 2.1: Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο (σχήμα από εργασία Moheimani, Fleming [13])

Όσον αφορά το ευθύ μέρος του φαινομένου κατά την πίεση- συστολή του υλικού δημιουργείται θετική τάση σύμφωνα με τη φορά που έχει οριστεί στο σχήμα και κατά την διαστολή του υλικού παράγεται αρνητική τάση. Στο ανάστροφο μέρος του φαινομένου όταν υπάρχει ορθή πόλωση παρατηρείται πως το υλικό διαστέλλεται, ενώ στην ανάστροφη πόλωση το υλικό συστέλλεται.

Το κύριο χαρακτηριστικό των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι η ύπαρξη ηλεκτρικού διπόλου στην κρυσταλλική δομή. Τα δίπολα των μοναδιαίων κυψελίδων της κρυσταλλικής δομής είναι αποπροσανατολισμένα αν δεν τους έχει ασκηθεί ηλεκτρικό πεδίο. Αυτός ο αποπροσανατολισμός "διορθώνεται" κατά την πόλωση του υλικού, οπότε και όλα τα δίπολα προσανατολίζονται προς την ίδια κατεύθυνση. Μετά την απομάκρυνση του πεδίου τα δίπολα συνεχίζουν να έχουν μια κάπως προσανατολισμένη κατεύθυνση.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε εφαρμογές ανίχνευσης και ενεργοποίησης. Αυτό λόγω της διττής φύσης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου καθώς λειτουργούν είτε ως αισθητήρες (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, είτε ως ενεργοποιητές (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) είτε ως συνδιασμός αισθητήρα-ενεργοποιητή. Ηλεκτρικά παρομοιάζονται και μοντελοποιούνται όπως ένας πυκνωτής, χωρητικότητας  $C_p$ , συνδεδεμένος σε σειρά με μια πηγή τάσης  $V_p$ . Μηχανικά μπορούν να θεωρηθούν ως ένα άκαμπτο ελατήριο.

## 2.3 Πιεζοηλεκτρικά Παραδιακλαδωμένα Κυκλώματα

### 2.3.1 Παραδιακλαδωμένα Κυκλώματα

Τα συστήματα παραδιακλάδωσης είναι ηλεκτρικά κυκλώματα που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία (π.χ. επιθέματα PZT, πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς (transducers) κλπ.). Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα είναι παθητικά (passive), ωστόσο πρόσφατα έχουν προταθεί κάποια ενεργά (active) και ημιενεργά συστήματα (semi-active).



### 2.3.2 Μηχανισμοί Απόσβεσης

Υπάρχουν τρία είδη μηχανισμών απόσβεσης σύμφωνα με την εργασία του Anisetti [1], τα οποία χωρίζονται ως εξής:

► Παθητικός Έλεγχος (Passive Damping):

Αυτό το είδος ελέγχου βασίζεται στο σκεπτικό της ενεργειακής διασποράς. Κατά τη διάρκεια του παθητικού ελέγχου παραδιακλάδωσης, όταν μια μηχανική ανατάραξη εισάγεται στο σύστημα, το πιεζοηλεκτρικό πιέζεται και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια διασκορπίζεται στα ηλεκτρικά στοιχεία του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος όπου μετασχηματίζεται και καταστέλλονται οι δονήσεις. Κατόπιν επιστρέφει στο μηχανικό σύστημα.

Το πλεονέκτημα αυτού του είδους ελέγχου είναι ότι το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία πάνω στην κατασκευή μαζί με το πιεζοηλεκτρικό έμπλαστρο.

Στο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα αντίστασης η αντίσταση μεταβάλλεται έως ότου η σταθερά χρόνου του κυκλώματος να είναι κοντά στις μορφές προς απόσβεση. Οι κύριες δυσκολίες στο συγκεκριμένο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα είναι η διάχυση επαρκούς ποσότητας ενέργειας και η χρήση μεγάλων αντιστάσεων για την διασκόρπιση υψηλών ποσοτήτων ενέργειας.

► Ενεργός Έλεγχος (Active Damping):

Στον ενεργό έλεγχο χρησιμοποιούνται ένας ενεργοποιητής και ένας αισθητήρας που ενεργούν σε κλειστό κύκλωμα. Το δυναμικό που αναγνωρίζει ο αισθητήρας μεταφέρεται στον ενεργοποιητή αντιστάσσοντας τη δόνηση της κατασκευής και επιτυγχάνοντας ενεργή απόσβεση.

Στις τεχνικές ενεργητικής καταστολής πραγματοποιείται μεγαλύτερη μείωση του πλάτους. Παρ' όλα αυτά είναι πιο δύσκολες στην εφαρμογή και παρουσιάζονται προβλήματα ευστάθειας λόγω αστοχιών στους αισθητήρες και ενεργοποιητές κατά τη διάχυση του ελέγχου. Σαν σύστημα έχει περίπλοκη και δαπανηρή εφαρμογή, γεγονός που θέτει περιορισμό στην πρακτική χρήση της σε εφαρμογές όπου το χαμηλό κόστος αποτελεί κρίσιμη ανάγκη.

► Υβριδικός Έλεγχος (Active-Shunted Hybrid Damping)

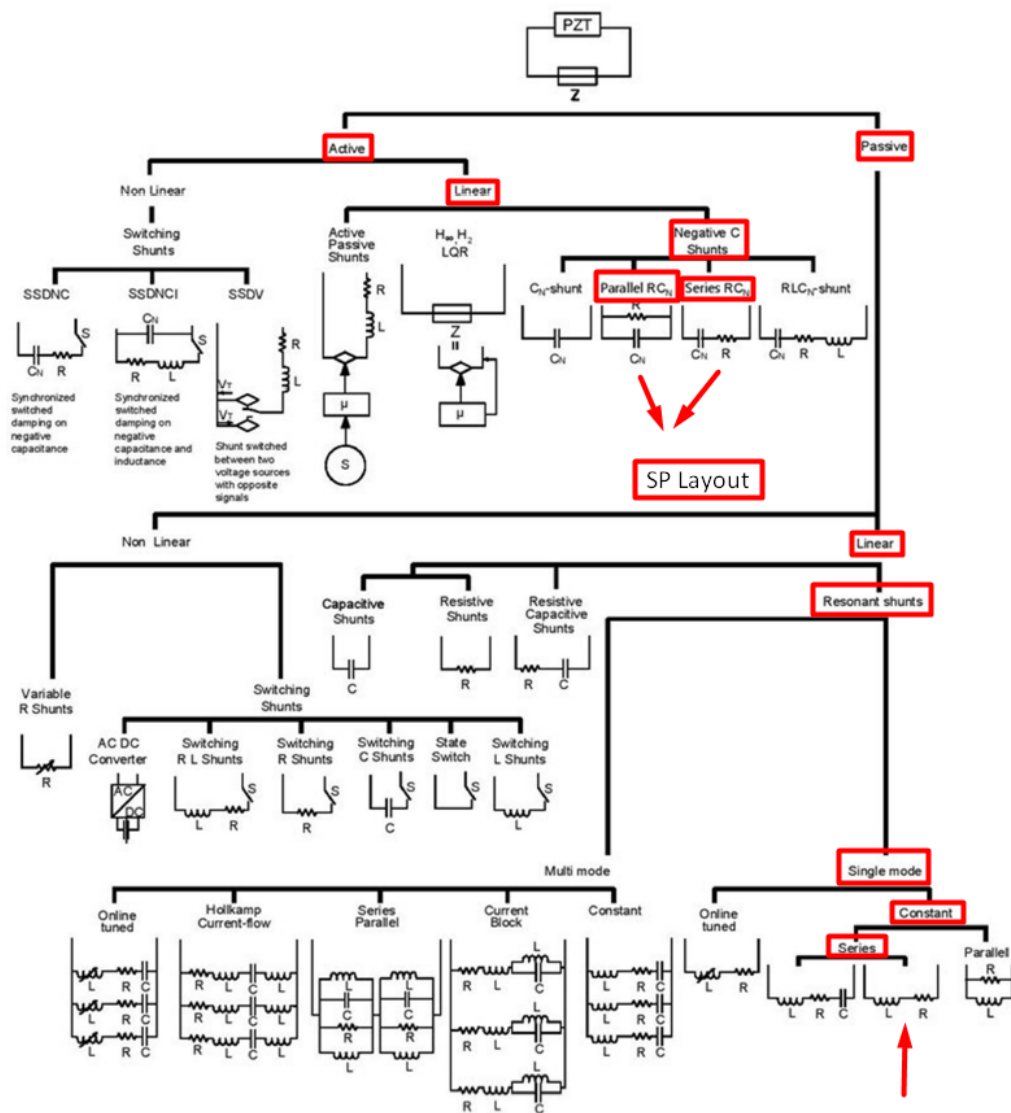
Στον υβριδικό έλεγχο ενσωματώνονται πιεζοηλεκτρικά στοιχεία με ενεργή πηγή τάσης ελέγχου και παραδιακλαδωμένο κύκλωμα. Οι ενεργοί επαγωγείς κατασκευάζονται με τελεστικούς ενισχυτές και άλλα παθητικά εξαρτήματα. Αυτού του είδους η απόσβεση ονομάζεται ημιενεργή. Έχει διαπιστωθεί πως το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα ενισχύει την ενεργό ενεργοποίηση για την καταστολή της ταλάντωσης στην κατασκευή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η υβριδική απόσβεση να είναι και η πιο αποτελεσματική.

Το κύριο πλεονέκτημά της είναι η ελαχιστοποίηση της προσπάθειας ελέγχου γεγονός που οφείλεται στον ενεργό έλεγχο και στην απλότητα του υλοποιημένου βρόχου όπου χρησιμοποιούνται μόνο αναλογικά στοιχεία για τη δοκιμή σε πραγματικό χρόνο. Επιπροσθέτως στον υβριδικό έλεγχο ενσωματώνονται τόσο τα πλεονέκτηματα των ενεργητικών όσο και των παθητικών τεχνικών απόσβεσης. Πέρα από τα πλεονέκτηματα παρουσιάζονται και τα μειονεκτήματα που ακολουθούν τον ενεργό έλεγχο, όπως είναι η κατανάλωση ενέργειας και η απαγωγή θερμότητας.

### 2.3.3 Κατηγορίες Παραδιακλαδωμένων Κυκλωμάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα παραδιακλαδωμένα συστήματα ταξινομούνται κυρίως σε παθητικά και ενεργητικά. Αυτά με τη σειρά τους μπορούν να διαφοροποιηθούν σε γραμμικά και μη γραμμικά. Επίσης μια ακόμη υποκατηγοριοποίηση είναι αυτή της μίας ή περισσότερων ιδιομορφών.

Τα πιο συνηθισμένα κυκλώματα παραδιακλάδωσης σύμφωνα με τους κυρίους Μαρακάκη, Ταϊρίδη, Κουτσιανίτη και Σταυρουλάκη [12] συγκεντρώνονται στο σχήμα 2.2. Για λόγους κατανόησης γίνονται επισημάνσεις πάνω στο σχήμα ώστε να είναι φανερό ποια κυκλώματα χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2.2: Κατηγορίες Κυκλωμάτων Παραδιακλάδωσης

## 2.4 Πυκνωτές Αρνητικής Χωρητικότητας

### 2.4.1 Ορισμός Αρνητικής Χωρητικότητας

Σε μια συσκευή δύο ακροδεκτών η χωρητικότητα δίνεται από την έκφραση:

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (2.1)$$

όπου  $Q$  το φορτίο των ακροδεκτών και  $V$  η τάση ανάμεσά τους. Η αρνητική χωρητικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι μια αύξηση στο φορτίο  $dQ$  οδηγεί σε μείωση του δυναμικού ή αντίστροφα σύμφωνα με τον Hoffmann [10].

Για ένα πυκνωτή παράλληλων πλακών με ένα διηλεκτρικό υλικό μεταξύ των πλακών ισχύει η σχέση:

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d} = \frac{dD}{dE} \frac{A}{d}, \quad (2.2)$$

όπου  $\epsilon_o$  η διαπερατότητα του κενού,  $A$  το εμβαδόν των πλακών,  $D$  το πεδίο μετατόπισης και  $E$  το ηλεκτρικό πεδίο. Αν η γεωμετρία του πυκνωτή είναι σταθερή, αρνητική χωρητικότητα συνεπάγεται αρνητική διαπερατότητα κατά τον Hoffmann [10].

### 2.4.2 Επίτευξη Αρνητικής Χωρητικότητας

Τα σιδηροηλεκτρικά υλικά πολώνονται ακόμη και όταν δεν τους ασκείται κάποιο ηλεκτρικό πεδίο. Η πόλωση αυτή, γνωστή και ως αυθόρμητη πόλωση ( $P_s$ ) προέρχεται από μια μη κεντροσυμμετρική κρυσταλλική δομή και μπορεί να αντιστραφεί με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το καταναγκαστικό πεδίο. Η διαπερατότητα του σιδηροηλεκτρικού εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο και μπορεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες να γίνει αρνητική [10].

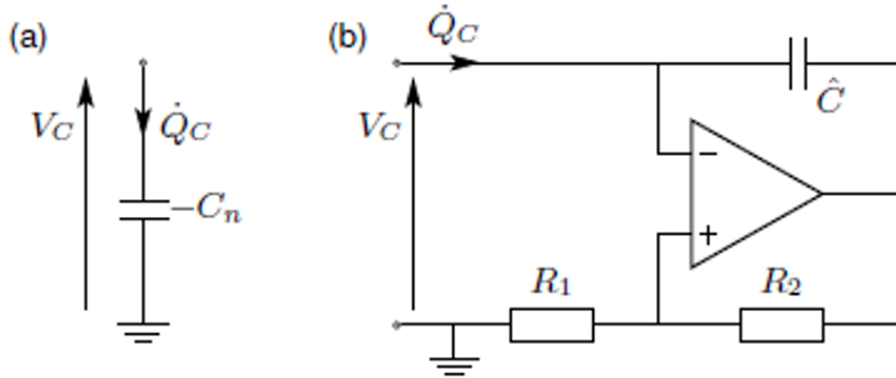
Η σιδηροηλεκτρική διαπερατότητα, θεωρώντας μόνο την συμπεριφορά του υλικού που οδηγεί σε αρνητική χωρητικότητα, προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon_o \epsilon_f = \frac{dD}{dE_f} = \epsilon_o + \frac{dP_s}{dE_f} \approx \frac{dP_s}{dE_f}, \quad (2.3)$$

όπου  $E_f$  το ηλεκτρικό πεδίο που ασκείται στο σιδηροηλεκτρικό. Εύκολα συμπεραίνεται πως η μεταβολή της πόλωσης αντίθετα με το πεδίο οδηγεί σε αρνητική χωρητικότητα [10].

### 2.4.3 Κατασκευή Αρνητικής Χωρητικότητας

Σε πειραματικό επίπεδο η αρνητική χωρητικότητα σαν οντότητα δεν υφίσταται, όμως κατασκευάζεται μέσω ενός κυκλώματος που περιλαμβάνει ένα τελεστικό ενισχυτή και κάποια παθητικά στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 από την δημοσίευση των Beradengo, Manzoni, Thomas και Giraud-Audine [4] για την περίπτωση παράλληλης σύνδεσης.



Σχήμα 2.3: Στοιχείο αρνητικής χωρητικότητας (a), κατασκευή αρνητικής χωρητικότητας για παράλληλη σύνδεση (b)

Για την σε σειρά σύνδεση, χρειάζεται να αντιστραφεί η πολικότητα στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή. Επίσης, προτείνεται από τους Beck, Cunefare και Collet [2] να προστεθεί μια αντίσταση παράλληλα στον πυκνωτή  $\hat{C}$  του παραπάνω σχήματος για μεγαλύτερη ευστάθεια στο DC. Η τιμή της αρνητικής χωρητικότητας δίνεται από την σχέση:

$$C_n = \hat{C} \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.4)$$

Η σχέση αυτή ισχύει όταν ο τελεστικός ενισχυτής θεωρείται ιδανικός και η είσοδος και η έξοδος του δεν έχουν φτάσει σε κορεσμό σύμφωνα με την δημοσίευση των Beradengo, Manzoni, Thomas και Giraud-Audine [4]. Εννοείται πως τα παθητικά στοιχεία αυτά χρειάζεται να επιλεγθούν προσεκτικά για να προκύψει η βέλτιστη απόδοση της αρνητικής χωρητικότητας.

#### 2.4.4 Ιστορική Αναδρομή Αρνητικής Χωρητικότητας

Στην δημοσίευση των Marneffe και Preumont [7] αναγράφεται πως αρνητική χωρητικότητα ανακαλύφθηκε από τον Forward το 1979, όπου πρότεινε την χρήση ενός ενεργού ηλεκτρονικού κυκλώματος που μειώνει τεχνητά την χωρητικότητα του μετατροπέα και κατά συνέπεια αυξάνει την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ο Forward δεν δημοσίευσε πειραματικά αποτελέσματα και η ιδέα της αρνητικής χωρητικότητας ξεχάστηκε για περίπου 20 χρόνια όπου επανασυστήθηκε από τους Behrens, Fleming, Moheimani, Tang, Wang, Wu στις έρευνές τους [3, 18, 21]. Έκτοτε η αρνητική χωρητικότητα έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα πειράματα [4, 7, 9, 11, 14, 16, 22] και αναμένεται να χρησιμοποιηθεί περισσότερο με την πάροδο των χρόνων.

#### 2.4.5 Αρνητική Χωρητικότητα και Παραδιακλαδωμένα Κυκλώματα

Η ενεργή απόσβεση δομών με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς γενικά συνεπάγεται την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος (για τον ενεργοποιητή) καθώς και ηλεκτρονικά επεξεργασίας (για τον αισθητήρα). Αυτό μπορεί να είναι μη πρακτικό σε πολλές εφαρμογές και έχει οδηγήσει στη χρήση παθητικών παραδιακλαδωμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων ως μηχανισμών απόσβεσης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προτείνεται από τον Forward , για την απόσβεση των ταλαντώσεων, η χρήση ενός ενεργού ηλεκτρονικού κυκλώματος που μειώνει τεχνητά την χωρητικότητα του μετατροπέα και κατά συνέπεια αυξάνει την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η κύρια επίδραση της αρνητικής χωρητικότητας είναι η τεχνητή

αύξηση του ηλεκτρομηχανικού παράγοντα σύζευξης, ο οποίος αποτελεί την βάση για την εκτίμηση της απόδοσης κατά την δημοσίευση των Beradengo, Manzoni, Thomas και Giraud-Audine [6].

Το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας δεν διασκορπίζει την ενέργεια αλλά ενισχυεί την διασκόρπιση της στο παθητικό κύκλωμα. Αξιοσημείωτο βέβαια είναι το γεγονός πως η λάθος ρύθμιση του ενεργού κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας οδηγεί την δομή σε αποσταθεροποίηση όπως αναφέρεται στην δημοσίευση των Marneffe, Preumont [7].

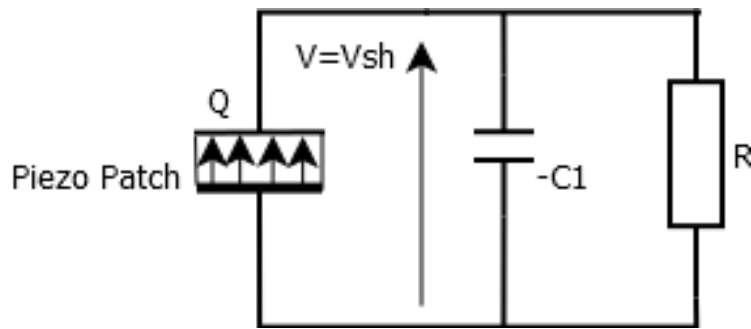
## 2.5 Συνδεσμολογίες και εφαρμογές πυκνωτών αρνητικής χωρητικότητας

Το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας μπορεί να κατασκευαστεί είτε με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4.3, είτε αλλάζοντας τη θέση του πυκνωτή και της αντίστασης  $R_1$  του σχήματος 2.3. Επίσης, πολλοί ερευνητές προσθέτουν μια επιπλέον αντίσταση παράλληλα στον πυκνωτή, ώστε να προκύψει πιο ευσταθές κύκλωμα στο συνεχές ρεύμα (DC), όπως αναφέρουν οι Beck, Cunefare και Collet [2].

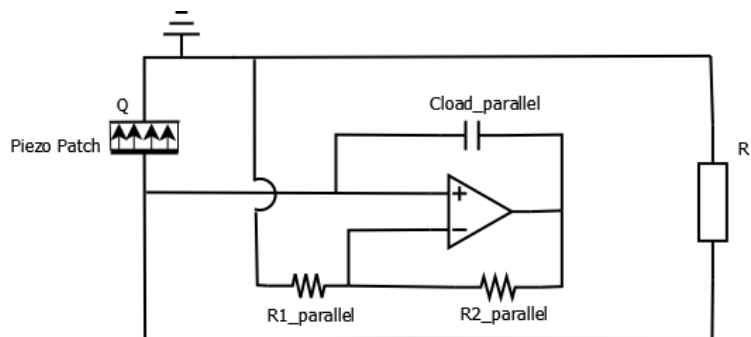
Στη συγκεκριμένη εργασία το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας κατασκευάζεται με τον τρόπο του σχήματος 2.3. Για την σύνδεση με το παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα υπάρχουν τρεις πιθανές συνδεσμολογίες, οι οποίες διακρίνονται ως εξής:

### 2.5.1 Παράλληλη διάταξη (Parallel Configuration)

Απεικονίζονται τα αντίστοιχα σχήματα απλής και σύνθετης αναπαράστασης της παράλληλης σύνδεσης του κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας.



Σχήμα 2.4: Απλή αναπαράσταση παράλληλης σύνδεσης κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας σε παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης



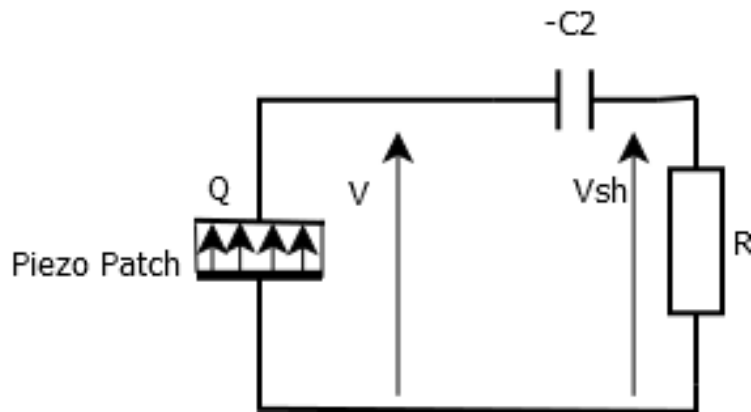
Σχήμα 2.5: Σύνθετη αναπαράσταση παράλληλης σύνδεσης κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας σε παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης

Να σημειωθεί πως όταν η αρνητική χωρητικότητα είναι συνδεδεμένη παράλληλα το αποτέλεσμα είναι να αυξάνονται οι φυσικές συχνότητες στο ανοικτό κύκλωμα [4]. Η παράλληλη σύνδεση συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι ιδιομορφές είναι μεγαλύτερες του 1 kHz [5].

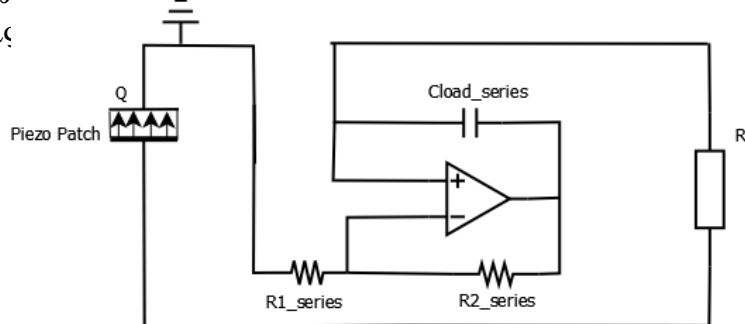
### 2.5.2 Σε σειρά διάταξη (Series Configuration)

Τα αντίστοιχα σχήματα για την σε σειρά σύνδεση της αρνητικής χωρητικότητας με το παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης είναι τα εξής:





Σχήμα 2.6: Απλή αναπαράσταση σε σειρά σύνδεσης κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας σε παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης



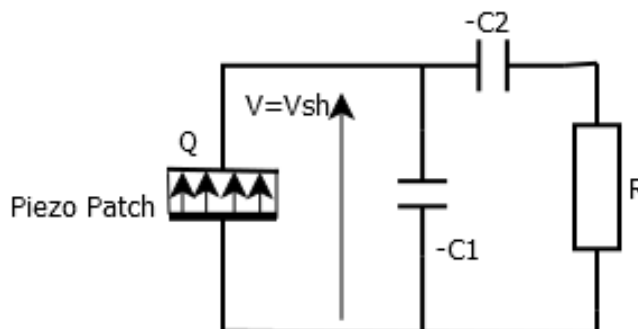
Σχήμα 2.7: Σύνθετη αναπαράσταση σε σειρά σύνδεσης κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας σε παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης

Οι Beradengo, Manzoni, Thomas και Giraud-Audine στην δημοσίευσή τους [4] εξηγούν πως το αποτέλεσμα της αρνητικής χωρητικότητας συνδεδεμένης σε σειρά είναι να μειώνονται οι φυσικές συχνότητες στο βραχυκυκλωμένο κύκλωμα. Επιπροσθέτως, οι Drago, Marelli και Vanali σε συνεργασία με τους προαναφερθέντες εκφράζουν την άποψη πως η σε σειρά σύνδεση συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι ιδιομορφές είναι κοντά στο 1 kHz [5].

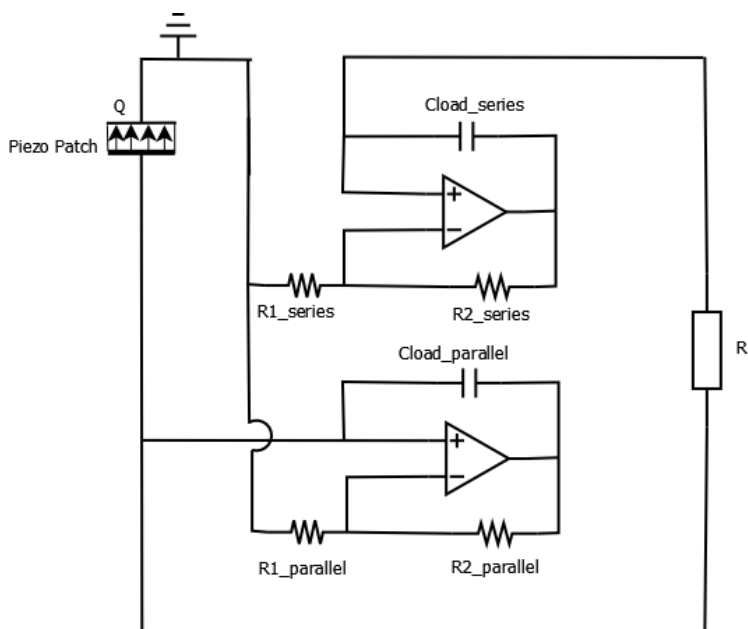
### 2.5.3 Μικτή διάταξη [Σε σειρά και παράλληλη συνδεσμολογία (Series + parallel configuration)]

Η διάταξη πάνω στην οποία βασίζεται η διπλωματική αυτή είναι η SP, δηλαδή η σύνδεση δύο αρνητικών χωρητικοτήτων, μια σε σειρά και μια παράλληλα με το παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντί-

στασης. Ακολουθούν τα σχήματα απλής και σύνθετης αναπαράστασης του κυκλώματος.



Σχήμα 2.8: Απλή αναπαράσταση SP διάταξης σε παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης



Σχήμα 2.9: Σύνθετη αναπαράσταση SP διάταξης σε παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης

Η διάταξη τύπου SP αποσκοπεί στην ταυτόχρονη αύξηση των φυσικών συχνοτήτων του ανοικτού κυκλώματος και στη μείωση των φυσικών συχνοτήτων του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος. Η ενέργεια αυτή εφόσον επιτευχθεί συνεπάγεται την αύξηση της απόστασης μεταξύ των φυσικών συχνοτήτων το οποίο με την σειρά του οδηγεί σε υψηλότερο ηλεκτρομηχανικό παράγοντα σύζευξης και άρα καλύτερη απόδοση [4].

#### 2.5.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Αρνητικής Χωρητικότητας (AX/NC)

Στην υποενότητα αυτή απαριθμούνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που επιφέρει η χρήση κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας.

Στα πλεονεκτήματα καταγράφονται τα εξής:

- ▶ Μείωση μηχανικής ακαμψίας και ιδιοσυχνότητας (Saloum [17])
- ▶ Βελτίωση απόδοσης εξασθένησης κατά τη σύνδεση της NC με κύκλωμα συντονισμού (Tang, Wang [18])
- ▶ Ενίσχυση ηχομόνωσης κατά την σύνδεση της NC με πιεζοηλεκτρικό πολυμερές φίλτρο (Fukada, Date, Kimura, Okubo, Kodama, Mokry, Yamamoto [9])
- ▶ Αποδοτικότητα σε εφαρμογές ημιενεργού συστήματος ελέγχου κραδασμών (Saloum [17])
- ▶ Επίτευξη ευρυζωνικότητας κατά την εισαγωγή της αρνητικής χωρητικότητας σε κύκλωμα παράκαμψης RL (Behrens, Fleming, Moheimani, Park, Baz [3, 16])
- ▶ Μείωση της απόκρισης σε κραδασμούς με την χρήση σε δομή δικτυώματος (Marneffe, Preumont [7])

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, αυτά απαριθμούνται στα εξής:

- ▶ Αύξηση της πολυπλοκότητας και του κόστους κατά την χρήση ως ηλεκτής κραδασμών, λόγω της κατασκευής μέσω συνθετικού κυκλώματος που βασίζεται σε τελεστικό ενισχυτή (Saloum [17])
- ▶ Πρόκληση ευαισθησίας και αστάθειας στο σύστημα όταν η απόλυτη τιμή της αρνητικής χωρητικότητας γίνει ίση με την εγγενή χωρητικότητα του πιεζοκεραμικού (Neubauer, Oleskiewicz, Popp, Krzyzynski, Wallaschek [14, 15])
- ▶ Έλλειψη πειραματικής χρήσης, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλης απόκλισης από τις θεωρητικές προβλέψεις (Saloum [17])

- *Σημαντική αποσταθεροποίηση αν δεν γίνει προσεκτική επιλογή της τιμής της αρνητικής χωρητικότητας (Saloun [17])*

### 2.5.5 Εφαρμογές Αρνητικής Χωρητικότητας

Το αντικείμενο της αρνητικής χωρητικότητας μπορεί να έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των ερευνητών, ωστόσο σε πειραματικό επίπεδο οι εφαρμογές κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας είναι ελάχιστες προς το παρόν. Ενδεικτικά το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας έχει χρησιμοποιηθεί για απόσβεση κραδασμών σε δομή δικτυώματος (Marneffe, Preumont [7]), για ενίσχυση της ηχομόνωσης κατά τη σύνδεση με πιεζοηλεκτρικό πολυμερές φίλτρο (Fukada, Date, Kimura, Okubo, Kodama, Mokry, Yamamoto [9]) και φυσικά για απόσβεση δονήσεων σε δοκό (Berardengo, Manzoni, Thomas, Giraud-Audine [4]). Επίσης στη δημοσίευση των Yu, Wang, Zhang [22] εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της αρνητικής χωρητικότητας στην απόδοση του δικτύου ως προς την αποκέντρωση. Επιπροσθέτως οι Neubauer, Oleskiewicz, Popp, Krzyzynski στη δημοσίευση [14] αναφέρουν πως η αρνητική χωρητικότητα χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση της απόδοσης απόσβεσης και απορρόφησης στα παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα. Τέλος, οι Kim, Wang, Smith εξετάζουν το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας ως ελεγκτή σε μια πιεζοηλεκτρική πολυστρωματική δομή [11] .

## Κεφάλαιο 3

# Μαθηματική και Υπολογιστική Ανάλυση του Προβλήματος

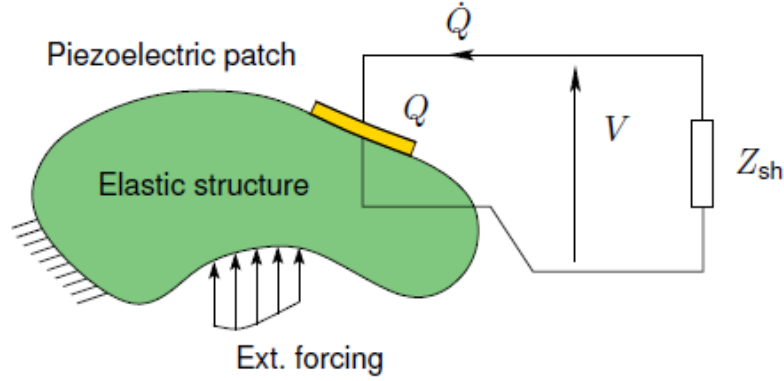
### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάλυση των κύριων εξισώσεων και υπολογιστικών μεθόδων, του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος με πυκνωτές αρνητικής χωρητικότητας, που χρησιμοποιούνται για την απόσβεση ταλαντώσεων. Επομένως, η ενότητα αυτή θα ασχοληθεί με τα εξής πεδία:

- ▶ Ηλεκτρομηχανικό Μοντέλο Δομής
- ▶ Μοντέλο με κύκλωμα (AX/NC) και παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης
- ▶ Μοντέλο με κύκλωμα συντονισμού ( $R, L$  shunt)

### 3.2 Ηλεκτρομηχανικό Μοντέλο Δομής

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ηλεκτρομηχανικής δομής αποτελείται από μία ελαστική δομή με προσκολλημένο ένα πιεζοηλεκτρικό έμπλαστρο και μια ηλεκτρική εμπέδηση  $Z_{sh}$  που συνδέεται στο πιεζοηλεκτρικό.



Σχήμα 3.1: Μια αυθαίρετη ελαστική δομή με ένα πιεζοηλεκτρικό έμπλαστρο συνδεδεμένη με παραδιακλαδωμένο κύκλωμα

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 η τάση  $V$  μεταξύ των ηλεκτροδίων του πιεζοηλεκτρικού εμπλάστρου είναι και η τάση της παραδιακλαδωμένης εμπέδησης. Θεωρώντας την μετατόπιση οποιουδήποτε  $x$  σημείου της δομής σε χρόνο  $t$ , ως  $U(x, t)$  και εκφράζοντάς τη σε συντεταγμένες ιδιομορφής, για  $N$  ιδιομορφές δόνησης προκύπτει ένα μοντέλο μειωμένης τάξης σύμφωνα με τους Berardengo κ.α, Thomas κ.α στις δημοσιεύσεις [4, 19], αντίστοιχα, ως εξής:

$$U(x, t) = \sum_{i=1}^N \Phi_i(x) q_i(t) \quad (3.1)$$

Το  $\Phi_i$  είναι η  $i$ -οστή ιδιομορφή της κατασκευής όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και το  $q_i$  είναι η  $i$ -οστή συντεταγμένη ιδιομορφής. Συγκεκριμένα το  $q_i$  είναι η λύση του συστήματος [4, 8]:

$$\begin{cases} \ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i - \chi_i V = F_i & \forall i \in 1 \dots N & (3.2.\alpha') \\ C_p V - Q + \sum_{j=1}^N \chi_j q_j = 0 & & (3.2.\beta') \end{cases}$$

Οι παράμετροι του παραπάνω συστήματος εξισώσεων είναι οι εξής:

- $\xi_i$ , είναι ο ι-οστος παράγοντας δομικής απόσβεσης
- $\omega_i$ , είναι η ι-οστη φυσική συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής δομής σε συνθήκες βραχυκυκλώματος
- $\chi_i$ , είναι ο ι-οστος συντελεστής διαμορφικής σύζευξης, ουσιαστικά αναπαριστά την μεταφορά της ενέργειας μεταξύ της ι-οστης ιδιομορφής και του πιεζοηλεκτρικού εμπλάστρου
- $C_p$ , είναι η ηλεκτρική χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού

Στο παραπάνω σύστημα εξισώσεων ο όρος  $\chi_i V$  αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική συμπεριφορά του συστήματος και μέσω αυτού συνδέονται οι δύο σχέσεις (3.2.α'), (3.2.β'). Επιπλέον η εξίσωση (3.2.β') σχετίζεται με την ισορροπία των ηλεκτρικών φορτίων στα πιεζοηλεκτρικά ηλεκτρόδια.

Εφαρμόζοντας τις κανονικοποιημένες μεταβλητές:

$$\bar{V} = V \sqrt{C_p}, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{\sqrt{C_p}} \quad (3.3)$$

στο σετ εξισώσεων (3.2) προκύπτει το κανονικοποιημένο σετ από εξισώσεις ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i - \omega_i k_i \sum_{j=1}^N \omega_j k_j q_j - \omega_i k_i \bar{Q} = F_i \\ \bar{V} - \bar{Q} + \sum_{j=1}^N \omega_j k_j q_j = 0 \end{array} \right. \quad (3.4.α')$$

$$\bar{V} - \bar{Q} + \sum_{j=1}^N \omega_j k_j q_j = 0 \quad (3.4.β')$$

Παρατηρείται πως έχει προκύψει ο όρος  $k_i$ , που είναι ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης και ορίζεται ως:

$$k_i = \frac{\chi_i}{\omega_i \sqrt{C_p}} \quad (3.5)$$

Θέτοντας  $\bar{Q} = 0$  στην εξίσωση (3.4.α') και μειώνοντας το μοντέλο στον ένα βαθμό ελευθερίας αποκτάται η έκφραση για την φυσική συχνότητα ανοικτού κυκλώματος ως εξής:

$$\hat{\omega}_i = \omega_i \sqrt{1 + k^2} \quad (3.6)$$

Από την παραπάνω έκφραση συμπεραίνεται πως ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης  $k_i$  πλησιάζει τον ι-οστό αποτελεσματικό συντελεστή σύζευξης κατά απόλυτη τιμή, ο οποίος ορίζεται ως:

$$|k_i| = \sqrt{\frac{(\omega_i^{oc})^2 - (\omega_i^{sc})^2}{(\omega_i)^2}}, \quad (3.7)$$

όπου  $\omega_i^{sc} = \omega_i$  και  $\omega_i^{oc} = \hat{\omega}_i$ .

Στην περίπτωση ενός δικτύου από πιεζοηλεκτρικά έμπλαστρα που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα σε ένα ενιαίο κύκλωμα η παραπάνω διατύπωση επεκτείνεται δίνοντας έναν ισοδύναμο συντελεστή σύζευξης  $k_i$  για να μετρηθούν οι μεταφορές ενέργειας μεταξύ του ηλεκτρικού κυκλώματος και της ι-οστης λειτουργίας μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Το συγκεκριμένο βέβαια δεν εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική απλώς αναφέρεται για βιβλιογραφικούς λόγους.

### 3.3 Μοντέλο με κύκλωμα πυκνωτή αρνητικής χωρητικότητας

Η συγκεκριμένη διπλωματική ασχολείται κυρίως με το μικτό κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας (διάταξη Series+Parallel), όπου γίνεται χρήση δύο αρνητικών χωρητικοτήτων. Παρ' όλα αυτά το μοντέλο που χρησιμοποιείται συμβαδίζει με τα αντίστοιχα μοντέλα για την περίπτωση μιας αρνητικής χωρητικότητας συνδεδεμένης είτε σε σειρά είτε παράλληλα, έχοντας φυσικά μερικές διαφοροποιήσεις ως προς τον ορισμό των μεταβλητών.

Στην περίπτωση που η αρνητική χωρητικότητα συνδέεται παράλληλα στο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα το φορτίο  $Q$  είναι το άθροισμα των φορτίων στον κλάδο της αρνητικής χωρητικότητας ( $-C_1$ ) και στον κλάδο της αντίστασης, εφόσον εξετάζεται η περίπτωση του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος αντίστασης. Συνεπώς η εξίσωση (3.2.β') αντικαθίσταται από την εξίσωση:

$$(C_p - C_1)V - Q_{sh} + \sum_{j=1}^N \chi_j q_j = 0, \quad (3.8)$$



όπου  $Q_{sh}$  το φορτίο που ρέει στον κλάδο της αντίστασης.

Αντίστοιχα αν η αρνητική χωρητικότητα ( $-C_2$ ) συνδεθεί σε σειρά με την αντίσταση η τάση είναι το άθροισμα της τάσης στα άκρα της αρνητικής χωρητικότητας και της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Έτσι η εξίσωση (3.2.β') παίρνει την μορφή

$$V_{sh} - \left( \frac{1}{C_p} - \frac{1}{C_2} \right) Q + \sum_{j=1}^N \frac{\chi_j}{C_p} q_j = 0, \quad (3.9)$$

όπου  $V_{sh}$  η τάση στα άκρα της αντίστασης.

Οι επόμενες εξισώσεις αναλύονται χρησιμοποιώντας την ι-οστη ιδιομορφή δόνησης. Πραγματοποιείται η ίδια αλλαγή μεταβλητών όπως και στην εξίσωση (3.3):

$$\bar{V}_{sh} = V_{sh} \sqrt{C_{eq}}, \quad \bar{Q}_{sh} = \frac{Q_{sh}}{\sqrt{C_{eq}}} \quad (3.10)$$

Το  $C_{eq}$  ορίζεται ανάλογα με την διάταξη που εξετάζεται. Επομένως για την διάταξη Series+Parallel (SP) ο ορισμός της δίνεται από την σχέση:

$$C_{eq} = C_{eqsp} = \frac{(C_p - C_1)C_2}{C_1 + C_2 - C_p} \quad (3.11)$$

Επομένως το σετ εξισώσεων (3.4) παίρνει την εξής μορφή:

$$\begin{cases} \ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + (\omega_i^{sc})^2 q_i - \omega_i \tilde{k}_i \bar{V}_{sh} = F_i & (3.12.α') \\ \ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + (\omega_i^{oc})^2 q_i - \omega_i \tilde{k}_i \bar{Q}_{sh} = F_i & (3.12.β') \\ \bar{V}_{sh} - \bar{Q}_{sh} + \omega_i \tilde{k}_i q_i = 0 & (3.12.γ') \end{cases}$$

όπου ορίζονται οι εξής παράμετροι:

- $\omega_i^{sc}$ , είναι η φυσική συχνότητα του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος ( $V_{sh} = 0$ ) και δίνεται από την σχέση:

$$\omega_i^{sc} = \sqrt{\omega_i^2 - \frac{\chi_i^2}{C_1 + C_2 - C_p}} \quad (3.13)$$

- $\omega_i^{oc}$ , είναι η φυσική συχνότητα του ανοικτού κυκλώματος ( $Q_{sh} = 0$ ) και δίνεται από την σχέση:

$$\omega_i^{oc} = \sqrt{\omega_i^2 + \frac{\chi_i^2}{C_p - C_1}} \quad (3.14)$$

- $\tilde{k}_i$ , είναι ο ενισχυμένος συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\tilde{k}_i = \frac{k_i}{\sqrt{(1 - \frac{C_1}{C_p})(1 + \frac{C_1}{C_2} - \frac{C_p}{C_2})}} \quad (3.15)$$

Το σύνολο των εξισώσεων (3.12) ορίζει τη δυναμική του ηλεκτρομηχανικού συστήματος εξεταζόμενη από την αντιστατική παράκαμψη, δεδομένου ότι οι ηλεκτρικοί άγνωστοι είναι τα  $V_{sh}$ ,  $Q_{sh}$ .

Παρατηρώντας την εξίσωση (3.13) και το [σχήμα 2.8](#) μπορεί κανείς να αντιληφθεί το γεγονός πως αν η αντίσταση τείνει προς το 0, δηλαδή στην περίπτωση που το κύκλωμα βραχυκυκλώνεται, η συνολική χωρητικότητα είναι  $C - C_1 - C_2$  και η φυσική συχνότητα  $\omega_i^{sc}$  μειώνεται ανάλογα με την ιδιοσυχνότητα  $\omega_i$ . Αντίστοιχα, παρατηρώντας την εξίσωση (3.14) και το ίδιο σχήμα, στην περίπτωση του ανοικτού κυκλώματος ( $R \rightarrow +\infty$ ) η συνολική χωρητικότητα είναι  $C - C_1$  και η φυσική συχνότητα  $\omega_i^{oc}$  αυξάνεται ανάλογα με την ιδιοσυχνότητα  $\omega_i$ . Το συμπέρασμα λοιπόν είναι πως η διάταξη SP φαίνεται ότι είναι ικανή να αλλάζει ταυτόχρονα τις  $\omega_i^{sc}$ ,  $\omega_i^{oc}$  διευρύνοντας την μεταξύ τους απόσταση με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ηλεκτρομηχανικός παράγοντας σύζευξης (χρήση του  $\tilde{k}_i$ , αντί του  $k_i$ ).

### 3.3.1 Μοντέλο με κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας και παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης

Εφόσον στον παραδιακλαδωμένο κλάδο η εμπέδηση ουσιαστικά είναι μια αντίσταση  $R$ , ορίζεται η ηλεκτρική χρονική σταθερά

$$\tau_e = RC_{eqsp} \quad (3.16)$$

και επίσης η τάση στα άκρα του κλάδου παραδιακλάδωσης δίνεται από τον τύπο  $V_{sh} = -R\dot{Q}_{sh}$ . Επομένως η εξίσωση (3.12.γ') ξαναγράφεται ως:

$$\tau_e \dot{Q} + \bar{Q}_{sh} - \omega_i \tilde{k}_i q_i = 0 \quad (3.17)$$

Η συνάρτηση απόκρισης συχνότητας (*FRF*)  $H(\Omega)$  μεταξύ μιας αρμονικής δύναμης συχνότητας  $\Omega$  που εφαρμόζεται στο σημείο  $\chi_f$  της κατασκευής και η απόκρισής της στο σημείο  $\chi_m$ , δίνεται με βάση τις εξισώσεις (3.1), (3.12.β'), (3.17) από τον τύπο:

$$H(\Omega) = \{\Phi_i(\chi_m)\Phi_i(\chi_f)(1 + j\tau_e\Omega)\} \times \{(\omega_i^{sc})^2 - (1 + 2\xi_i\omega_i\tau_e)\Omega^2 + j\Omega[\tau_e(\omega_i^{oc})^2 + 2\xi_i\omega_i - \tau_e\Omega^2]\}^{-1} \quad (3.18)$$

### 3.3.2 Ανάλυση Ευστάθειας

Για την ανάλυση της ευστάθειας χρησιμοποιείται το κριτήριο Routh-Hurwitz στη συνάρτηση απόκρισης σήματος (3.18) και προκύπτουν οι εξής δύο συνθήκες ευστάθειας:

$$C_1 < C_p \quad (3.19.α')$$

$$C_1 + C_2 > C_p(1 + k_i^2) \quad (3.19.β')$$

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τα όρια ευστάθειας είναι η επίδραση των αρνητικών χωρητικοτήτων στις συχνότητες ανοικτού και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος. Συγκεκριμένα, από την εξίσωση (3.13) παρατηρείται πως αν  $C_1 + C_2 \rightarrow C_p$  η  $\omega_i^{sc}$  τείνει στο 0, επομένως η αποσταθεροποίηση προέρχεται από έναν τρόπο λειτουργίας χαμηλής συχνότητας του οποίου η συχνότητα βραχυκυκλώματος τείνει στο 0. Αντίστοιχα από την εξίσωση (3.14) φαίνεται πως αν  $C_1 \rightarrow C_p$  τότε  $\omega_i^{oc} \rightarrow +\infty$ . Συνεπώς η αποσταθεροποίηση προέρχεται από ένα τρόπο λειτουργίας υψηλής συχνότητας του οποίου η συχνότητα ανοικτού κυκλώματος φτάνει στο  $+\infty$ .

Στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη όλοι οι τρόποι λειτουργίας του ηλεκτρομηχανικού συστήματος οι συνθήκες (3.19) μετατρέπονται στις εξής:

$$C_1 < C_\infty \quad (3.20.α')$$

$$C_1 + C_2 > C_0 \quad (3.20.β')$$

όπου οι τιμές των  $C_\infty$ ,  $C_0$  είναι:

$$C_\infty = C_p, \quad C_0 = C_p \left( 1 + \sum_{i=1}^N k_i^2 \right) \quad (3.21)$$

### 3.4 Μοντέλο με κύκλωμα συντονισμού ( $R, L$ shunt)

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής μελετήθηκε το κύκλωμα συντονισμού μόνο μέσω του περιβάλλοντος προσομοίωσης. Παρ'όλα αυτά, ενδεικτικά παρουσιάζονται η συνάρτηση μεταφοράς και οι παράμετροι που την καθορίζουν, σύμφωνα με την δημοσίευση των Thomas, Ducarne, Deü [19]. Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$H(\Omega) = \left\{ 1 - \frac{\Omega^2}{\omega_e^2} + 2i\xi_e \frac{\Omega}{\omega_e} \right\} \times \left\{ \frac{\Omega^4}{\omega_e^2} - \Omega^2 \left( 1 + \frac{\hat{\omega}_i^2}{\omega_e^2} + 4\xi_e \xi_i \frac{\omega_i}{\omega_e} \right) + \omega_i^2 + 2i\Omega \left[ \frac{\xi_e}{\omega_e} (\hat{\omega}_i^2 - \Omega^2) + \xi_i \omega_i \left( 1 - \frac{\Omega^2}{\omega_e^2} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3.22)$$

Οι μεταβλητές που εμφανίζονται στην εξίσωση (3.22) είναι οι εξής:

- $\omega_e$  είναι η συχνότητα συντονισμού του παραδιακλαδωμένου και ορίζεται ως εξής  $\omega_e = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- $\xi_e$  είναι ο παράγοντας δομικής απόσβεσης και ορίζεται ως εξής  $\xi_e = \frac{RC\omega_e}{2} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$
- $\xi_i$  είναι ο ι-οστος παράγοντας απόσβεσης
- $\omega_i$  είναι η ι-οστη φυσική συχνότητα βραχυκλώματος
- $\hat{\omega}_i$  είναι η ι-οστη φυσική συχνότητα στο ανοικτό κύκλωμα

## Κεφάλαιο 4

# Μοντελοποίηση σε περιβάλλον προσομοίωσης

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση, που έγινε με τη βοήθεια του εμπορικού πακέτου επίλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων *COMSOL Multiphysics*, των πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων με αρνητική χωρητικότητα αλλά και με τον κλάδο συντονισμού (resonant shunt).

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί πως το μοντέλο στο εργαλείο προσομοίωσης είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποίησαν η υποψήφια διδάκτορας Μαρία-Στέλλα Δαράκη στην διπλωματική εργασία της [24] και ο μεταδιδακτορικός ερευνητής Κωνσταντίνος Μαρακάκης στη διδακτορική του διατριβή [25]. Φυσικά, το μοντέλο της παρούσας διπλωματικής έχει ελάχιστες διαφορές σε κάποιες μεταβλητές και στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Παρόλο που το μοντέλο δεν δημιουργήθηκε εξ αρχής είναι σημαντικό να αναφερθούν τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση. Αυτά ήταν τα εξής:

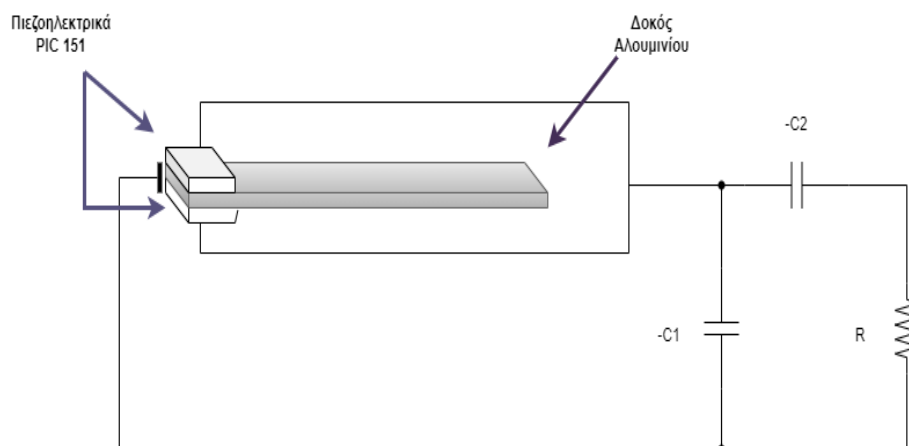
- Εισαγωγή γεωμετρίας
- Κατασκευή παραμετρικού πίνακα για τις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του συστήματος

- Τοποθέτηση υλικών σε κάθε μέρος του συστήματος
- Ορισμός Μοντέλων (Μηχανικού και Ηλεκτρικού)
- Ένωση των μοντέλων (ηλεκτρομηχανική σύζευξη)
- Προσθήκη παραδιακλαδωμένου κυκλώματος
- Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων
- Προσθήκη έρευνας ανάλυσης του προβλήματος
- Εξαγωγή Αποτελεσμάτων

## 4.2 Παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό σύστημα με κύκλωμα NC για τον έλεγχο μιας ιδιομορφής

### 4.2.1 Μοντελοποίηση και προσομοίωση λειτουργίας

Το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από μια δοκό αλουμινίου, δύο πιεζοηλεκτρικά τύπου PIC 151, το κύκλωμα της αρνητικής χωρητικότητας και το κύκλωμα παραδιακλάδωσης με αντίσταση  $R$ . Για καλύτερη κατανόηση παρουσιάζεται το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση συστήματος

Ακολουθεί ο πίνακας με την γεωμετρία τόσο της δοκού όσο και των πιεζοηλεκτρικών:

Παράμετρος (mm)	Δοκός	Μέγεθος	PIC 151	Μέγεθος
Μήκος	lb	178.8	lp	30
Πλάτος	b	3.05	b	3.05
Πάχος	hb	1.1	hp	0.5
Θέση PZT	-	-	x <sub>-</sub>	0.5

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικές διαστάσεις δοκού και πιεζοηλεκτρικών

Φυσικά πέρα των γεωμετρικών παραμέτρων υπάρχουν και οι ηλεκτρικές και μηχανικές παράμετροι των οποίων οι τιμές είχαν εισαχθεί ήδη από το έτοιμο μοντέλο, όπως φαίνεται στην εικόνα [4.2](#) στο *COMSOL*.

Parameters			
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
lb	178.8	178.8	
hb	1.1	1.1	
b	3.05	3.05	
rb	2800	2800	
Yb	$72 \cdot 10^9$	7.2E10	
lp	30	30	
hp	0.5	0.5	
rp	8500	8500	
Yp	$66.7 \cdot 10^9$	6.67E10	
e31t	-14	-14	
e33t	$2068 \cdot 8.854 \cdot 10^{\dots}$	1.831E-8	
x_	.5	0.5	
vb	0.34	0.34	
vp	0.34	0.34	
s11	15e-12	1.5E-11	
s12	-4.5e-12	-4.5E-12	
s13	-5.7e-12	-5.7E-12	
s33	19e-12	1.9E-11	
s44	5.096e-11	5.096E-11	
d31	-210e-12	-2.1E-10	
d33	500e-12	5E-10	
d15	610e-12	6.1E-10	
E11	1980	1980	
E33	2400	2400	

Σχήμα 4.2: Ηλεκτρικές και μηχανικές παράμετροι

#### 4.2.1.1 Μηχανικό Μοντέλο

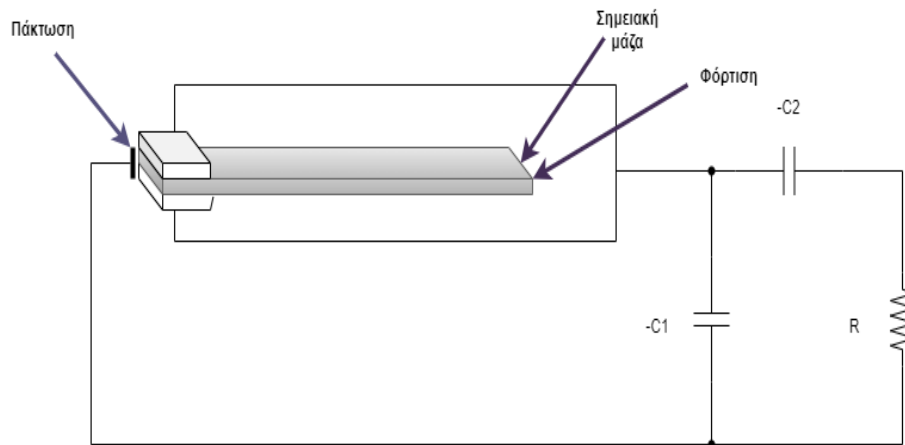
Στο μηχανικό μοντέλο εισάγονται οι εξής παράμετροι:

- Το είδος στήριξης, συγκεκριμένα είναι η πάκτωση στο αριστερό άκρο της δοκού.
- Η σημειακή μάζα, που αφορά τη θέση όπου θα μελετηθεί το πρόβλημα και είναι στο ελεύθερο άκρο της δοκού.



- Η φόρτιση στο ελεύθερο άκρο της δοκού, ουσιαστικά είναι η δύναμη που δέχεται η δοκός ώστε να ξεκινήσει την αποσταθεροποίηση.

Ακολουθεί σχηματική αναπαράσταση της τοποθέτησης των προαναφερθέντων παραμέτρων.



Σχήμα 4.3: Μηχανικό Μοντέλο

Επιπλέον, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη μνεία και στον ορισμό των πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες αυτές όπως ορίζονται στο εργαλείο προσομοίωσης παρατίθενται στην εικόνα [4.4](#).

Settings

Piezoelectric Material

s11	s12	s13	0	0	0
s12	s11	s13	0	0	0
s13	s13	s33	0	0	0
0	0	0	s44	0	0
0	0	0	0	s44	0
0	0	0	0	0	2*(s11-s12)

1/Pa

Coupling matrix, Voigt notation:

d<sub>ET</sub> User defined

0	0	0	0	d15	0
0	0	0	d15	0	0
d31	d31	d33	0	0	0

C/N

Relative permittivity:

ε<sub>rr</sub> User defined

E11	0	0
0	E11	0
0	0	E33

1

Diagonal

Use mixed formulation:

None

Remanent electric displacement:

0	X
0	Y
0	Z

C/m²

Density:

ρ User defined

rp

kg/m³

Σχήμα 4.4: Εισαγωγή ιδιοτήτων πιεζοηλεκτρικών υλικών

Οι παράμετροι αυτές που ουσιαστικά αποτελούν τις ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών εμφανίζονται στις εξής σχέσεις:

$$S = s_E T + d^T E \quad (4.1.α')$$

$$D = dT + \epsilon_T E, \quad (4.1.β')$$

,

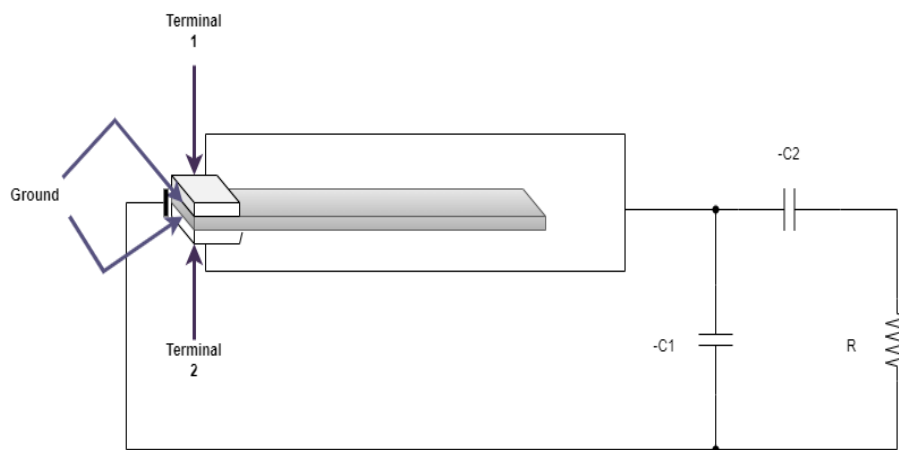
όπου:

- $S$ , η μηχανική παραμόρφωση
- $s_E$ , η ελαστική συμμόρφωση
- $T$ , η μηχανική τάση
- $d$ , μία πιεζοηλεκτρική παράμετρος
- $E$ , το ηλεκτρικό πεδίο
- $D$ , η ηλεκτρική μετατόπιση

- $\epsilon_T$ , η διηλεκτρική διαπερατότητα

#### 4.2.1.2 Ηλεκτρικό Μοντέλο

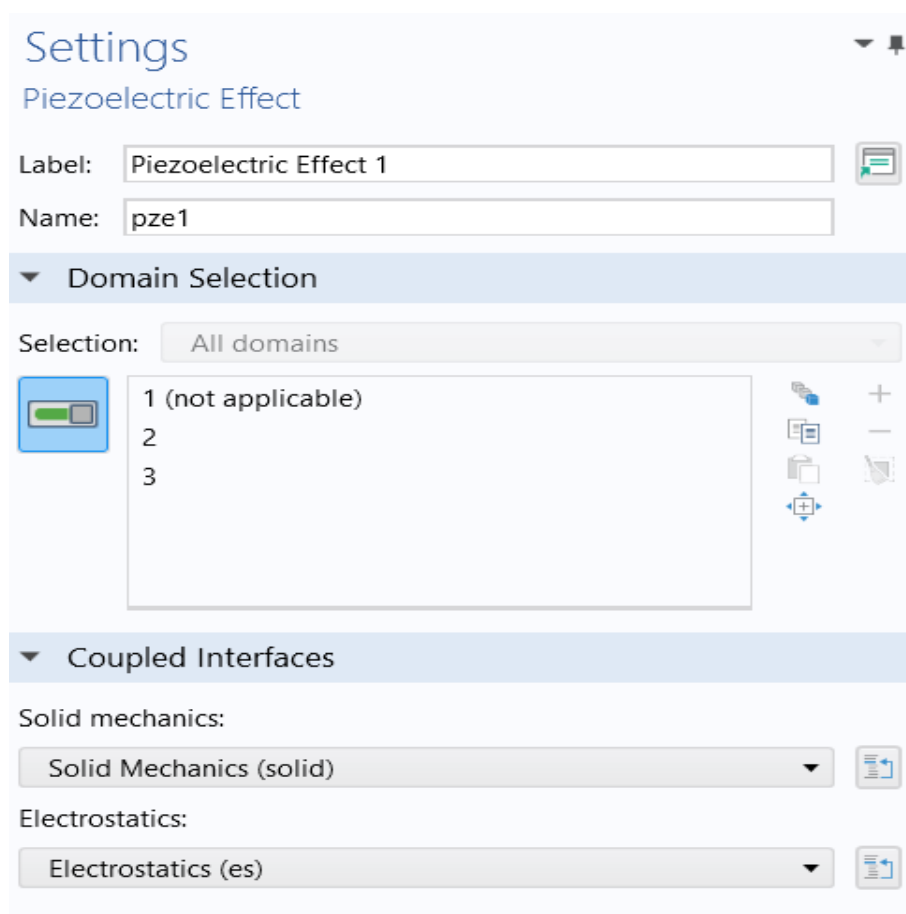
Μετά τον καθορισμό του μηχανικού μοντέλου, εισάγονται δύο ακροδέκτες στο θετικό μέρος των πιεζοηλεκτρικών, ένας για το πάνω πιεζοηλεκτρικό που τοποθετείται στη πάνω πλευρά και ένας για το κάτω πιεζοηλεκτρικό που τοποθετείται στη κάτω πλευρά. Αυτό γιατί τα πιεζοηλεκτρικά είναι τοποθετημένα έτσι ώστε η γείωση να βρίσκεται στην πλευρά που γίνεται η επαφή με τη δοκό. Επομένως, εισάγεται και το καλώδιο γείωσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχηματική αναπαράσταση.



Σχήμα 4.5: Ηλεκτρικό Μοντέλο

#### 4.2.1.3 Πολυφυσικό Σύστημα

Ουσιαστικά αναφέρεται στη σύζευξη του ηλεκτρικού και του μηχανικού μοντέλου. Η σύζευξη αυτή οφείλεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Για να προκύψει το συζευγμένο ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα στο πρόγραμμα προσομοίωσης αρκεί να ενωθούν τα δύο προηγούμενα μοντέλα, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



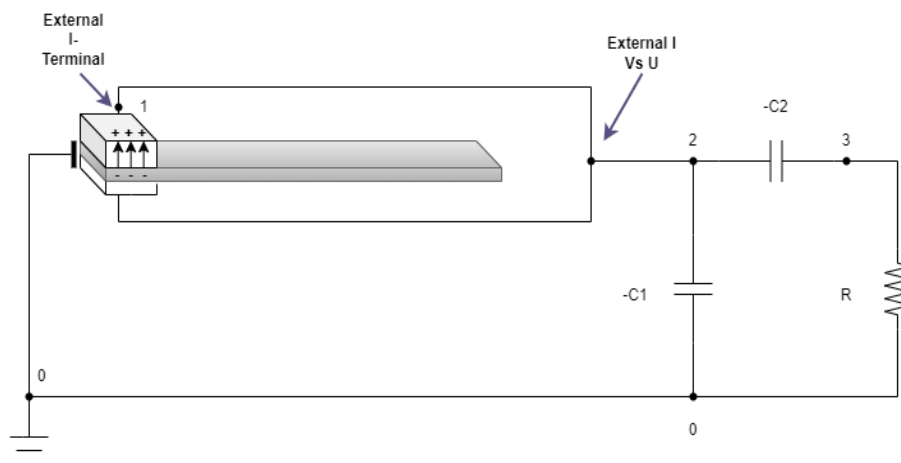
Σχήμα 4.6: Σύζευξη μηχανικού και ηλεκτρικού μοντέλου

Φυσικά στη λειτουργία του συστήματος εμπεριέχεται και το ηλεκτρικό σύστημα που είναι η διάταξη Series + Parallel αρνητικών χωρητικοτήτων. Στο πίνακάκι 4.2, που παρουσιάζεται στη συνέχεια καταγράφεται η αρίθμηση των κόμβων που συντελεί στην εισαγωγή του ηλεκτρικού κυκλώματος στο εργαλείο προσομοίωσης.

Στοιχείο Κυκλώματος	Αριθμός Κόμβου/ων
Γείωση	0
External I Terminal	1
Τάση PZT	0,1
External I Vs U	1,2
Series NC	2,3
Parallel NC	2,0
Αντίσταση R	3,0

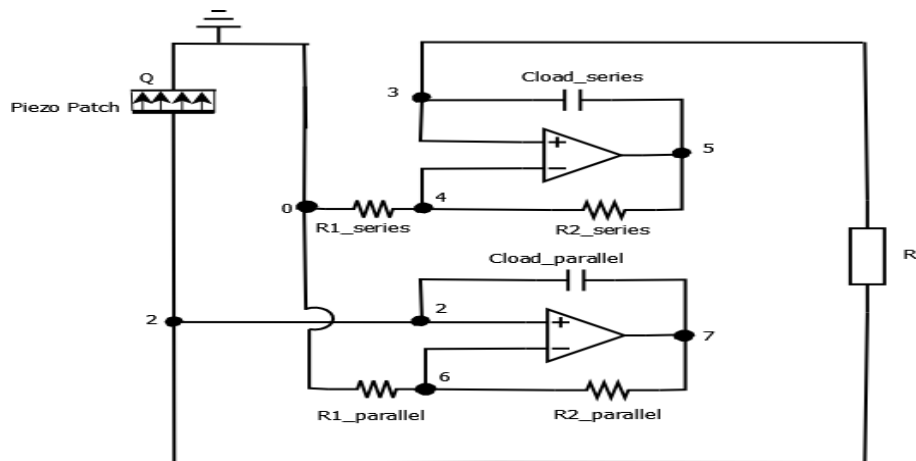
Πίνακας 4.2: Αρίθμηση κόμβων συστήματος

Για περαιτέρω κατανόηση της αρίθμησης παρουσιάζεται και το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.7: Αρίθμηση κόμβων στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αρνητική χωρητικότητα κατασκευάζεται με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 2.3. Επομένως, για την υλοποίησή της χρησιμοποιήθηκε ένα ήδη ενσωματωμένο, στο πρόγραμμα προσομοίωσης, μοντέλο για τον ενισχυτή και γύρω από αυτό στήθηκαν τα υπόλοιπα στοιχεία (αντιστάσεις-πυκνωτές). Η αρίθμηση των κόμβων μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου του ενισχυτή ώστε να μοντελοποιηθεί το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4.8: Αρίθμηση κόμβων στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο (αναλυτική προσέγγιση)

Στο παραπάνω σχήμα δεν φαίνεται η εσωτερική αρίθμηση των τελεστικών ενισχυτών. Γενικότερα για την χρήση του έτοιμου μοντέλου του τελεστικού χρησιμοποιούνται δύο στιγμιότυπα ένα για κάθε μία από τις δύο αρνητικές χωρητικότητες. Η εσωτερική αρίθμηση και μία μικρή περιγραφή των στοιχείων που συνθέτουν τον τελεστικό φαίνονται στον πίνακα 4.3. Τα στοιχεία που φαίνονται με δείκτη  $s$  αντιστοιχούν στην σε σειρά αρνητική χωρητικότητα, ενώ αυτά με τον δείκτη  $p$  στην παράλληλη.

Στοιχείο Κυκλώματος	Περιγραφή	Αριθμός Κόμβου/ων
$R_{IN,s}$ $R_{IN,p}$	Αντίσταση εισόδου ενισχυτή	3,4 2,6
$EGAIN(s)$ $EGAIN(p)$	Κέρδος ενισχυτή	3,0 2,0
$R_{P,s}, C_{P,s}$ $R_{P,p}, C_{P,p}$	Μονοπολικό χαμηλοπερατό φίλτρο	3,4 - 4,0 2,6 - 6,0
$EBUFFER(s), R_{OUT,s}$ $EBUFFER(p), R_{OUT,p}$	Ρυθμιστής εξόδου με μοναδιαίο κέρδος	5,0 7,0

Πίνακας 4.3: Αρίθμηση στοιχείων για το μοντέλο του ενισχυτή

# Κεφάλαιο 5

## Αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μοντέλου που περιγράφηκε στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που είναι τα γραφήματα συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων και οι ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Είναι προφανές πως τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα έχουν προκύψει μετά από πληθώρα προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων αφορούν το βραχυκυκλωμένο και το ανοικτό κύκλωμα και είναι τα πρώτα που θα παρουσιαστούν. Κατόπιν, θα ακολουθήσουν τα σήματα απόκρισης εξόδου τόσο για το ανοικτό, βραχυκυκλωμένο και κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας (διάταξη SP), όσο και για το παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συντονισμού (RL). Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα από την δημοσίευση των Berardengo, Manzoni, Thomas, Giraud-Audine [4].

### 5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η προσομοίωση του συστήματος και κατόπιν η παρουσίαση των ιδιομορφών γίνεται στο τρισδιάστατο επίπεδο σχεδίασης (3D) [23]. Οι ιδιομορφές χωρίζονται σε αυτές για το βραχυκυκλωμένο κύκλωμα, όπου

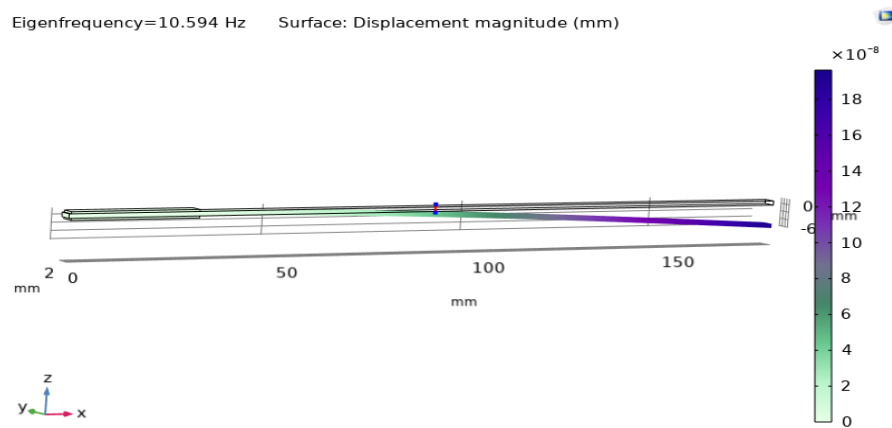
$R = 0$  και αυτές για το ανοικτό κύκλωμα όπου ουσιαστικά το κύκλωμα απενεργοποιείται τελείως. Επίσης να σημειωθεί πως η εν λόγω διπλωματική επικεντρώνεται στις μεταφορικές και όχι τις στρωφικές ιδιομορφές.

## 5.2.1 Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες

### 5.2.1.1 Ιδιομορφές βραχυκυκλωμένου κυκλώματος (SC)

Οι ιδιομορφές του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος ( $R = 0$ ) είναι οι εξής:

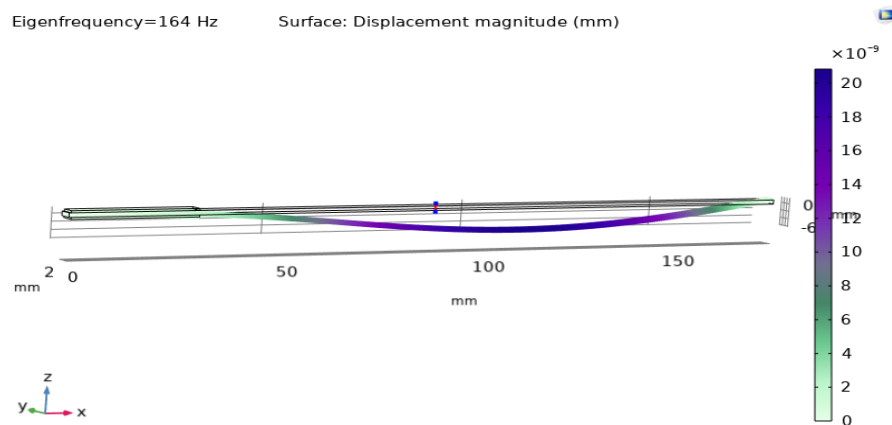
$1_{\eta}$  Ιδιομορφή:



Σχήμα 5.1: Πρώτη ιδιομορφή για το βραχυκυκλωμένο κύκλωμα

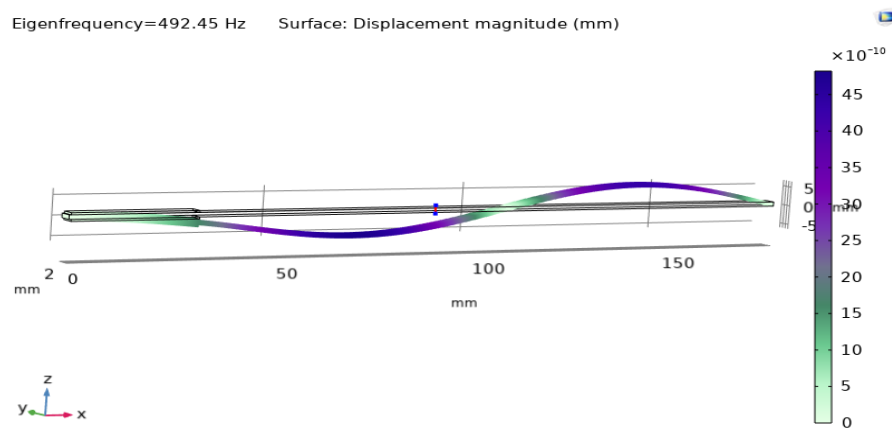


### $2_{\eta}$ Ιδιομορφή:



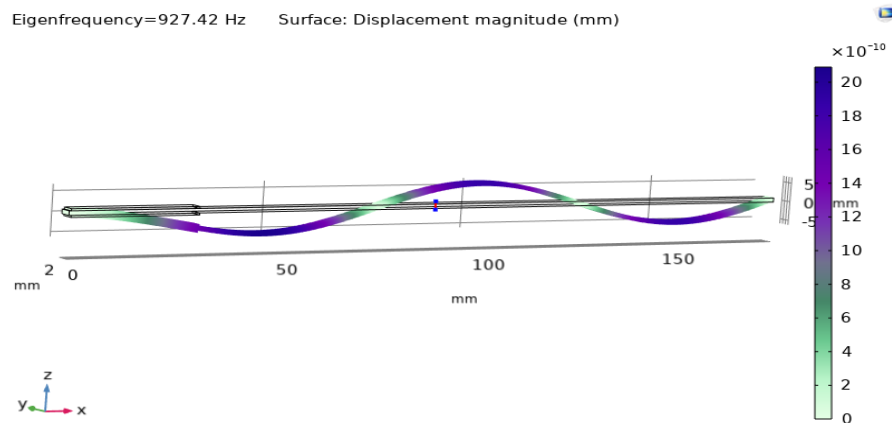
Σχήμα 5.2: Δεύτερη ιδιομορφή για το βραχυκυκλωμένο κύκλωμα

### $3_{\eta}$ Ιδιομορφή:



Σχήμα 5.3: Τρίτη ιδιομορφή για το βραχυκυκλωμένο κύκλωμα

#### 4<sub>η</sub> Ιδιομορφή:

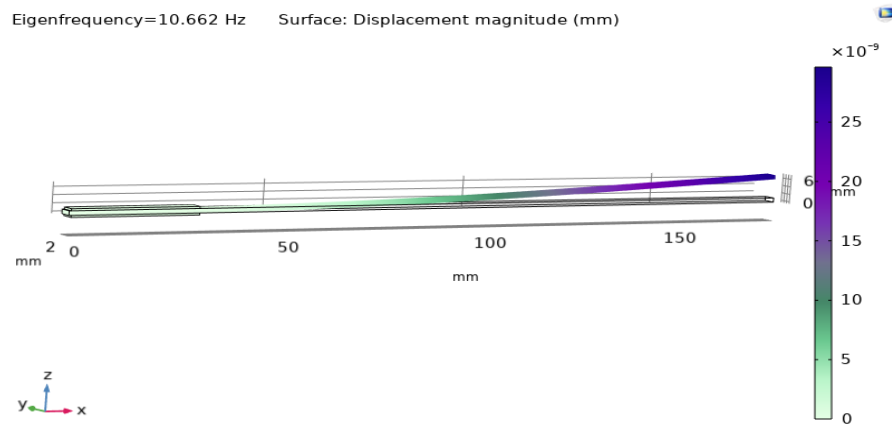


Σχήμα 5.4: Τέταρτη ιδιομορφή για το βραχυκυκλωμένο κύκλωμα

#### 5.2.1.2 Ιδιομορφές ανοικτού κυκλώματος (OC)

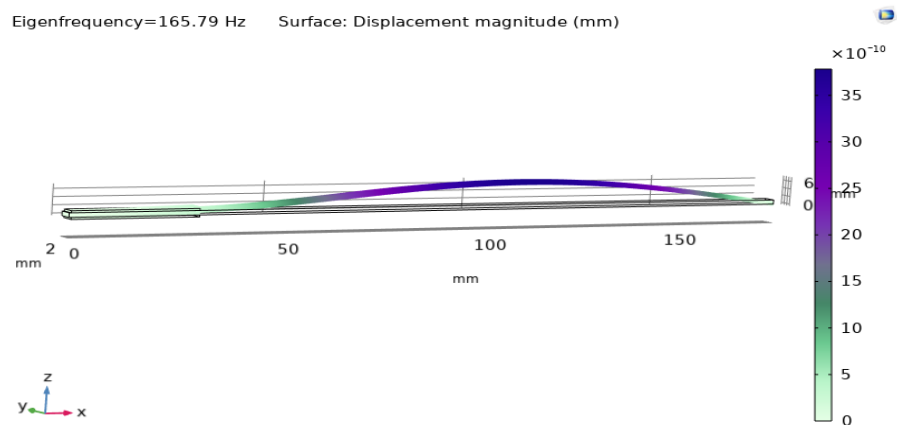
Οι ιδιομορφές του ανοικτού κυκλώματος είναι οι εξής:

#### 1<sub>η</sub> Ιδιομορφή:



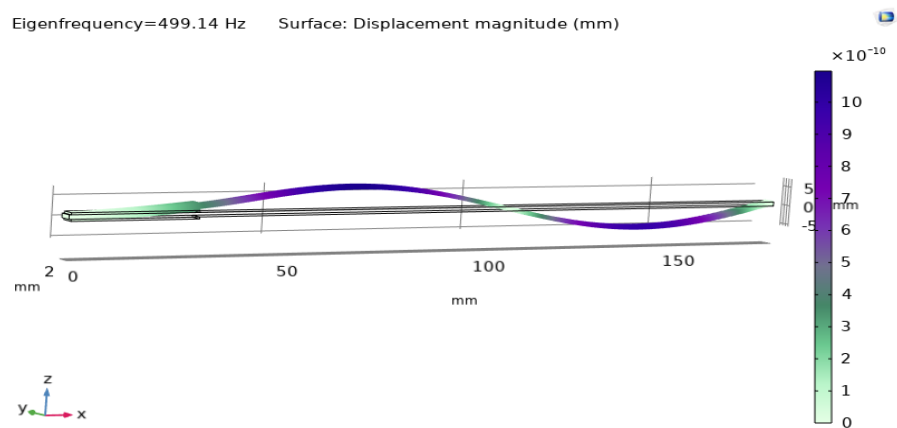
Σχήμα 5.5: Πρώτη ιδιομορφή για το ανοικτό κύκλωμα

### $2_{\eta}$ Ιδιομορφή:



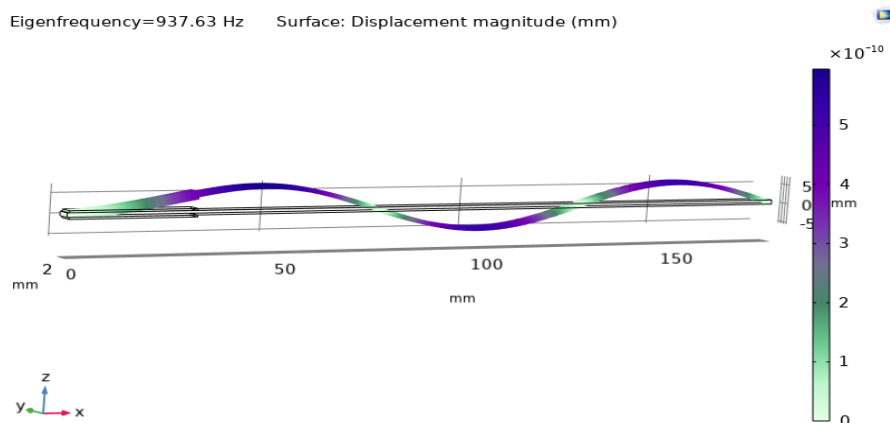
Σχήμα 5.6: Δεύτερη ιδιομορφή για το ανοικτό κύκλωμα

### $3_{\eta}$ Ιδιομορφή:



Σχήμα 5.7: Τρίτη ιδιομορφή για το ανοικτό κύκλωμα

#### 4<sub>η</sub> Ιδιομορφή:



Σχήμα 5.8: Τέταρτη ιδιομορφή για το ανοικτό κύκλωμα

#### 5.2.1.3 Παρατηρήσεις

Σε όλα τα προηγούμενα σχέδια η μαύρη σκιαγράφηση αντιπροσωπεύει την αρχική θέση της δοκού, ενώ με τα χρώματα φαίνεται η μορφή της ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, τα μέρη της δοκού που χρωματίζονται μωβ φέρουν μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης και όσο ανοίγει το χρώμα (πράσινο) τόσο μικρότερες είναι οι τιμές της μετατόπισης. Παραδείγματος χάριν σε όλες τις εικόνες παρατηρείται πως η πιάκτωση επειδή είναι σταθερή έχει λευκοπράσινο χρώμα. Η δοκός από την άλλη μπορεί να λάβει μωβ χρώμα σε όλα τα σημεία του μήκους της, όχι ταυτόχρονα βέβαια, ανάλογα με την συχνότητα της δύναμης που της ασκείται.

Επίσης, εύκολα γίνεται αντιληπτό το γεγονός ότι οι ιδιομορφές του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος παρουσιάζονται πάντα σε μικρότερες ιδιοσυχνότητες από τις αντίστοιχες του ανοικτού κυκλώματος. Αυτό συμβαίνει διότι στο βραχυκυκλωμένο κύκλωμα το ρεύμα των πιεζοηλεκτρικών διαχέεται στα καλώδια με αποτέλεσμα αυτά να μαλακώνουν. Αντίθετα στο ανοικτό κύκλωμα η ενέργεια δεν διοχετεύεται κάπου και έτσι παρουσιάζεται σε μεγαλύτερη τιμή.

Οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων για τις δύο συνδεσμολογίες απεικονίζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα [5.1](#)

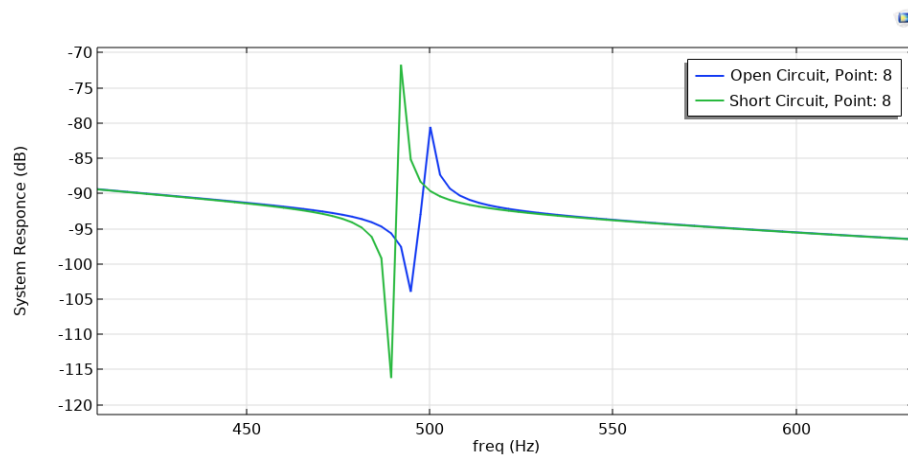
Ιδιοσυχνότητα	Βραχυκύκλωμα (SC)-Hz	Ανοικτό κύκλωμα (OC)-Hz
1	10.594	10.662
2	164	165.79
3	492.45	499.14
4	927.42	937.63

Πίνακας 5.1: Ιδιοσυχνότητες ανοικτού και και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος

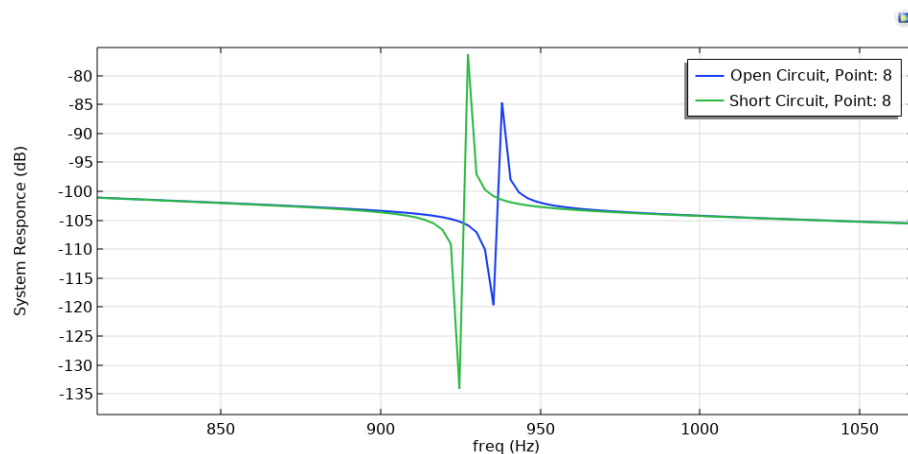
### 5.2.2 Γραφήματα συναρτήσεων απόκρισης συχνοτήτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αρνητική χωρητικότητα δίνεται μέσω της σχέσης (2.4) όταν οι τελεστικοί ενισχυτές θεωρούνται ιδανικοί και οι είσοδοι και έξοδοί τους δεν έχουν φτάσει σε κορεσμό. Έχοντας ως στόχο αφενός την απόσβεση των κραδασμών και αφετέρου την σύγκριση της δουλειάς που έγινε με αντίστοιχα στη βιβλιογραφία αποτελέσματα, πραγματοποιούνται πολλές προσομοιώσεις με ποικίλες τιμές για τις αρνητικές χωρητικότητες αλλά και για τα παθητικά στοιχεία της σχέσης (2.4). Επίσης, γίνονται πολλές δοκιμές πειράζοντας την αντίσταση ενώ οι τιμές των αρνητικών χωρητικοτήτων διατηρούνται σταθερές. Αντίστοιχα και στο απλό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συντονισμού (resonant R-L) διεκπαιρεώνεται πληθώρα προσομοιώσεων είτε διατηρώντας σταθερή την αντίσταση και πειράζοντας το πηνίο, είτε το αντίστροφο, είτε πειράζοντας ταυτόχρονα και τα δύο. Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως εξετάζεται η απόσβεση κυρίως στην  $3_{\eta}$  και την  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα.

Οι πρώτες προσομοιώσεις που έλαβαν μέρος αφορούν το βραχυκυκλωμένο και το ανοικτό κύκλωμα. Αυτές απεικονίζονται στις δύο εικόνες που έπονται, όπου έχει γίνει μεγένθυση για να φαίνονται η  $3_{\eta}$  και  $4_{\eta}$  ιδιομορφή αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων  $3_{\eta\varsigma}$  ιδιομορφής για το ανοικτό (μπλε) και βραχυκυκλωμένο (πράσινη) κύκλωμα



Σχήμα 5.10: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιομορφής για το ανοικτό (μπλε) και βραχυκυκλωμένο (πράσινη) κύκλωμα

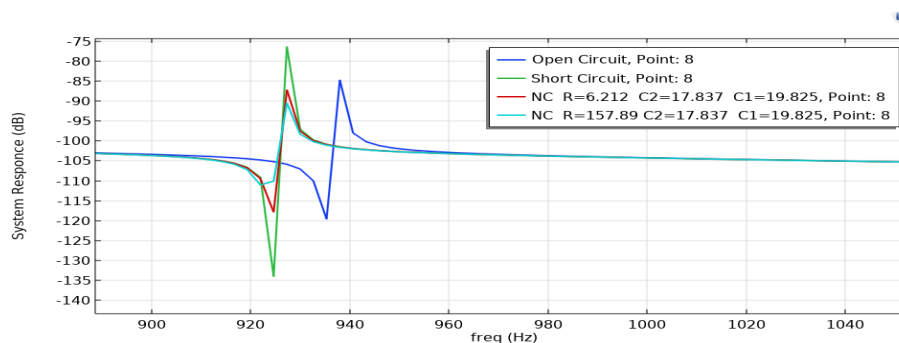
Από τις δύο εικόνες φαίνεται πως η ιδιομορφή του ανοικτού κυκλώματος παρουσιάζεται σε μεγαλύτερη συχνότητα από την αντίστοιχη του βραχυκυκλωμένου, γεγονός που έρχεται και σε συμφωνία με τις ιδιοσυχνότητες του πίνακα 5.1.

### 5.2.2.1 Σήματα απόκρισης εξόδου για το κύκλωμα αρνητικών χωρητικοτήτων

Σε συνέχεια των προσομοιώσεων του ανοικτού και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος δοκιμάζεται το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας (SP), όπου στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η σχεδίαση του. Τα παθητικά στοιχεία λαμβάνουν τις εξής τιμές:

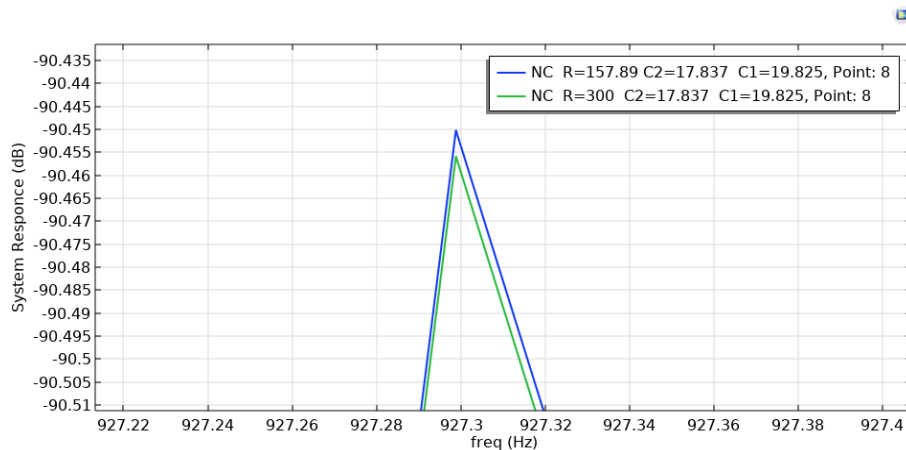
- $R_1 = 470 \Omega$  τόσο για την αντίσταση της παράλληλης όσο και για την αντίσταση της σε σειράς αρνητικής χωρητικότητας
- $R_2 = 4700 \Omega$  τόσο για την αντίσταση της παράλληλης όσο και για την αντίσταση της σε σειράς αρνητικής χωρητικότητας
- $\hat{C}_{series} = 1.7837 nF$
- $\hat{C}_{parallel} = 1.9825 nF$

Οι τιμές αυτές επιλέγονται ώστε οι αρνητικές χωρητικότητες να είναι  $C_{series} = 17.837 nF$  και  $C_{parallel} = 19.825 nF$ . Αυτό γιατί αντίστοιχες τιμές αρνητικών χωρητικοτήτων χρησιμοποιούνται και από τους Berardengo κ.α στα πειράματά τους [4], με τα οποία θα γίνουν οι περισσότερες συγκρίσεις. Με βάση τη συγκεκριμένη δημοσίευση δίνονται και οι τιμές  $6.212 k\Omega$ ,  $157.89 k\Omega$  στην αντίσταση  $R$  του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος αντίστασης. Οι συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας για την  $4\pi$  ιδιοσυχνότητα απεικονίζονται ως εξής:



Σχήμα 5.11: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4\pi$  ιδιοσυχνότητα για το ανοικτό (μπλε), βραχυκυκλωμένο (πράσινη) και το κύκλωμα NC με  $R = 6.212 k\Omega$  (κόκκινη) και  $R = 157.89 k\Omega$  (μπλε ανοικτή)

Στο σχήμα 5.11 φαίνεται πως με την χρήση του κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας υπάρχει απόσβεση της ταλάντωσης στην συγκεκριμένη ιδιοσυχνότητα, καθώς το πλάτος είναι μικρότερο σε σχέση με τα αντίστοιχα πλάτη του ανοικτού και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος. Στη συνέχεια, εφόσον φαίνεται πως η αύξηση της αντίστασης μειώνει το πλάτος, δοκιμάζονται κάποιες τιμές αντιστάσεων μεγαλύτερες των  $157.89\text{ k}\Omega$ . Ενδεικτικά:



Σχήμα 5.12: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην κορυφή της  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιοσυχνότητας για το κύκλωμα NC με  $R = 300\text{ k}\Omega$  (πράσινη) και  $R = 157.89\text{ k}\Omega$  (μπλε)

Στο σχήμα 5.12 απεικονίζονται τα σήματα απόκρισης εξόδου για το κύκλωμα με τις αρνητικές χωρητικότητες και για τιμές αντιστάσεων παραδιακλάδωσης  $R = 157.89\text{ k}\Omega$  και  $R = 300\text{ k}\Omega$ . Παρατηρώντας το σχήμα γίνεται κατανοητό πως η μείωση του πλάτους είναι υπερβολικά μικρή συγκριτικά με το πόσο αυξάνεται η τιμή της αντίστασης, καθώς η αντίσταση σχεδόν διπλασιάζεται, ενώ το πλάτος του σήματος μειώνεται λιγότερο από 0.01 dB.

Κατόπιν, ακολουθούν πολλές δοκιμές χωρίς όμως κάποια σημαντική βελτίωση στο σήμα απόκρισης εξόδου. Έτσι με γνώμονα την εργασία [5] συμπεραίνεται πως οι έξοδοι των τελεστικών ενισχυτών που χρησιμοποιούνται έχουν φτάσει σε κορεσμό και γίνεται αντιληπτό πως πρέπει να δοθούν διαφορετικές τιμές στα παθητικά στοιχεία.

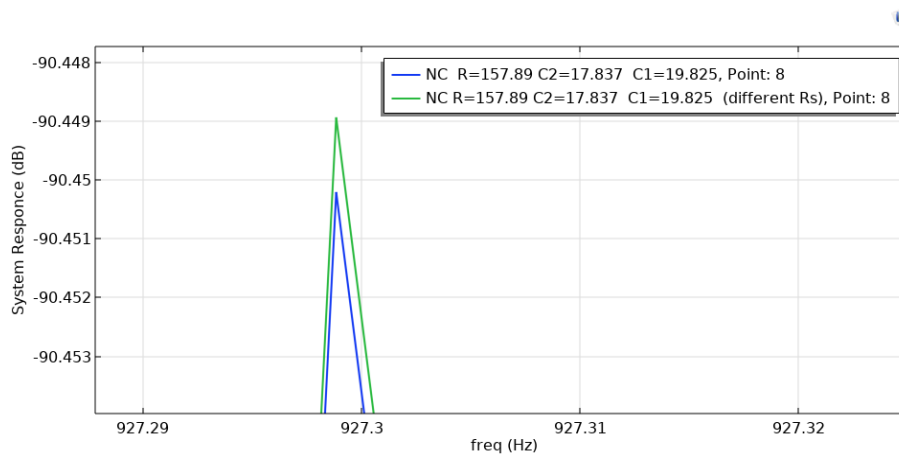
Παρόλο που στην εργασία [5] οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται αφορούν τις απλές διατάξεις αρνητικής χωρητικότητας (series ή parallel), λόγω της μερικής συμβατότητας των παραμέτρων του μηχανικού μοντέλου, επιλέχθηκε να δοθούν στα παθητικά στοιχεία οι



τιμές που συμβάλλουν στις καλύτερες αποκρίσεις. Παράλληλα οι τιμές των αρνητικών χωρητικοτήτων διατηρούνται σταθερές, στα  $C_{series} = 17.837\text{ nF}$  και  $C_{parallel} = 19.825\text{ nF}$ . Επομένως τα παθητικά στοιχεία λαμβάνουν τις εξής τιμές:

- $R_1 = 25\text{ k}\Omega$  τόσο για την αντίσταση της παράλληλης όσο και για της σε σειράς αρνητικής χωρητικότητας
- $R_{2,s} = 15.43\text{ k}\Omega$  για την αντίσταση της σε σειράς αρνητικής χωρητικότητας
- $R_{2,p} = 12.69\text{ k}\Omega$  για την αντίσταση της παράλληλης αρνητικής χωρητικότητας
- $\hat{C}_{series} = 28.89594\text{ nF}$
- $\hat{C}_{parallel} = 39.05525\text{ nF}$

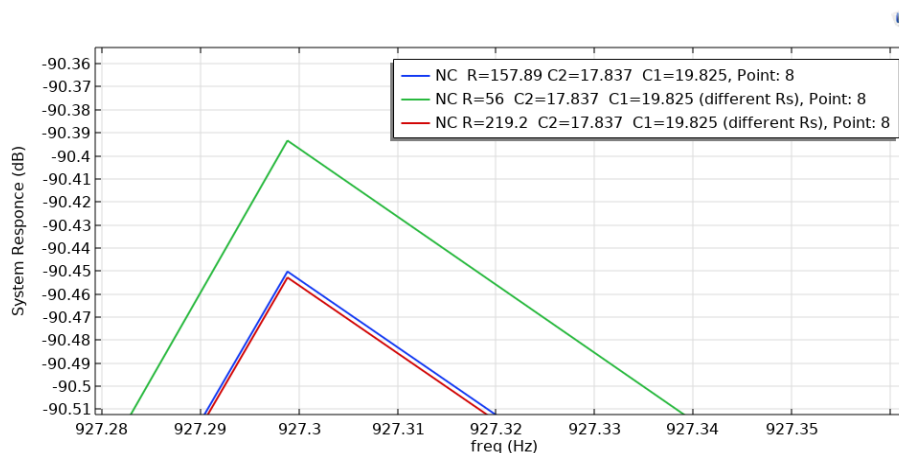
Η προκύπτουσα συνάρτηση απόκρισης συχνοτήτων για τις νέες τιμές των παθητικών στοιχείων απεικονίζεται μαζί με την αντίστοιχη για τις αρχικές τιμές των παθητικών στοιχείων [5.2.2.1](#) στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.13: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην κορυφή της  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιοσυχνότητας για το κύκλωμα NC για  $R = 157.89\text{ k}\Omega$  με τις νέες τιμές παθητικών στοιχείων (πράσινη) και για  $R = 157.89\text{ k}\Omega$  με τις παλιές τιμές παθητικών στοιχείων (μπλε)

Στο σχήμα 5.13 δεν παρουσιάζεται κάποια πρόοδος καθώς το πλάτος του σήματος απόκρισης εξόδου με τις αρχικές τιμές για τα παθητικά στοιχεία είναι καλύτερο από το αντίστοιχο σήμα εξόδου με τις νέες τιμές παθητικών στοιχείων. Επίσης, η διαφορά μεταξύ των δύο κορυφών των σημάτων εξακολουθεί και είναι ελάχιστη.

Το αποτέλεσμα αυτό, ωστόσο, δεν εξέπληξε καθώς η απόδοση εξασθένισης δεν μεταβάλλεται αν δεν μεταβληθούν έστω ένα εκ των  $R$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  [5]. Έτσι, η πρώτη κίνηση που γίνεται υπό αυτές τις συνθήκες, είναι η δοκιμή διάφορων τιμών στην αντίσταση όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.

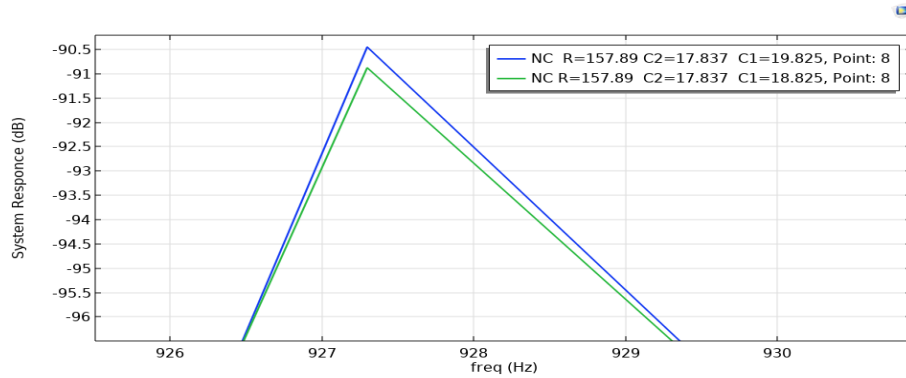


Σχήμα 5.14: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην κορυφή της  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιοσυχνότητας για το κύκλωμα NC για  $R = 56 \text{ k}\Omega$  (πράσινη) και  $R = 219.2 \text{ k}\Omega$  (κόκκινη) με τις νέες τιμές παθητικών στοιχείων και για  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$  (μπλε) με τις παλιές τιμές παθητικών στοιχείων

Στο σχήμα 5.14, αλλάζοντας την αντίσταση το αποτέλεσμα εξακολουθεί να μην είναι το επιθυμητό. Η προσομοίωση με μικρότερη τιμή της αντίστασης χειροτερεύει την απόσβεση (πράσινη FRF), καθώς αντί το πλάτος να μειωθεί, αυξάνεται. Με την τοποθέτηση μεγαλύτερης τιμής αντίστασης (κόκκινη FRF) καλυτερεύει η απόσβεση (μείωση πλάτους). Όσοι ξανά είναι πολύ ασήμαντη η διαφορά στον κατακόρυφο άξονα στα dB μεταξύ της κόκκινης και της μπλε κορυφής που αντιστοιχεί στην αντίσταση  $157.89 \text{ k}\Omega$ .

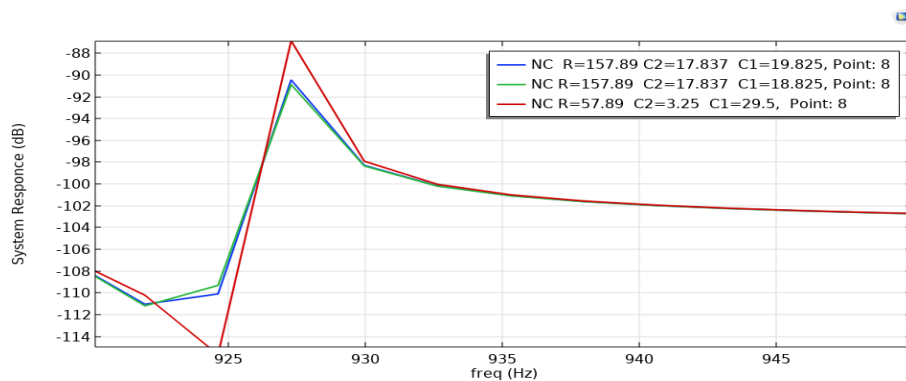
Η αλλαγή της αντίστασης από μόνη της δεν επέφερε κάποια σημαντική αλλαγή, επομένως οι προσομοιώσεις που ακολουθούν πραγματοποιούνται με διαφορετικές τιμές στις αρνητικές χωρητικότητες. Αρχικά μόνο η τιμή της παράλληλης αρνητικής χωρητικότητας δέχεται αλλαγή.

Η τιμή που της δόθηκε είναι η  $C_1 = 18.825 \text{ nF}$ , δηλαδή κατά  $1 \text{ nF}$  μικρότερη από την αρχική. Το αποτέλεσμα όπως θα φανεί και στο σχήμα 5.15 είναι ελάχιστα καλύτερο από το αρχικό (μπλε FRF).



Σχήμα 5.15: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην κορυφή της  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιοσυχνότητας για το κύκλωμα NC για  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$  και  $C_1 = 18.825 \text{ nF}$  (πράσινη) και για  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$  και  $C_1 = 19.825 \text{ nF}$  (μπλε)

Μετά από αρκετές προσομοιώσεις όπου δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές στις αρνητικές χωρητικότητες, διαπιστώνεται πως όταν η σε σειρά αρνητική χωρητικότητα ( $C_2$ ) δέχεται μικρές τιμές και η παράλληλη αρνητική χωρητικότητα ( $C_1$ ) δέχεται μεγάλες τιμές, το αποτέλεσμα γίνεται χειρότερο. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το γεγονός αυτό στην παρακάτω εικόνα, όπου  $C_2 = 3.25 \text{ nF}$  και  $C_1 = 29.5 \text{ nF}$ .

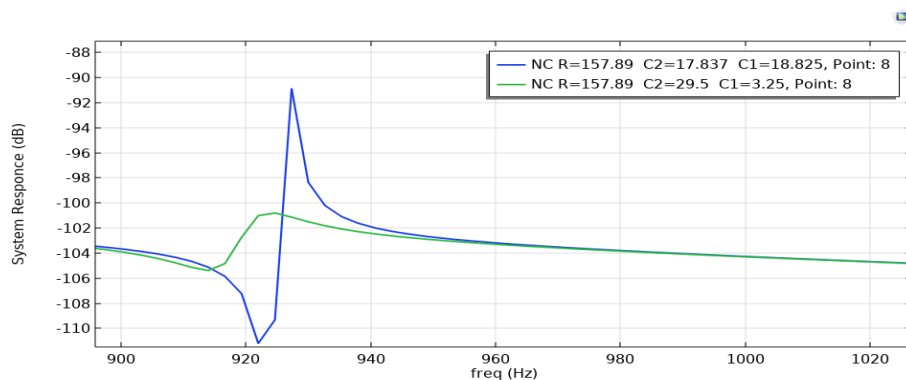


Σχήμα 5.16: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα για το κύκλωμα NC για  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 18.825 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 17.837 \text{ nF}$  (πράσινη), για  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 19.825 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 17.837 \text{ nF}$  (μπλε) και για  $R = 57.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 29.5 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 3.25 \text{ nF}$  (κόκκινη)

Στο σημείο αυτό παρατηρείται πως η  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα παρουσιάζ-

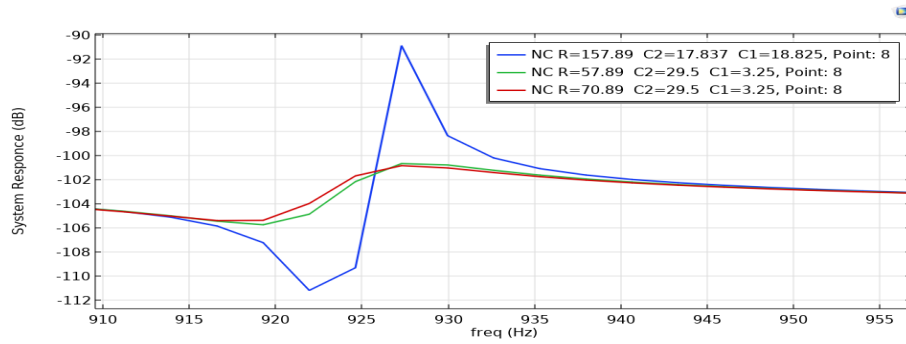
ζεται σε τιμή μικρότερη του  $1\text{ kHz}$ . Στη δημοσίευσή των Berardengo, Manzoni, Thomas, Giraud-Audine, Drago, Marelli, και Vanali [5], αναφέρεται πως σε αυτό το εύρος συχνοτήτων το κύκλωμα με την αρνητική χωρητικότητα συνδεδεμένη σε σειρά είναι πιο αποδοτικό στην απόσβεση της δόνησης. Ο συνδυασμός της παρατήρησης αυτής και των όχι τόσο καλών αποτελεσμάτων που προκύπτουν για μικρές τιμές στην σε σειρά αρνητική χωρητικότητα οδηγούν στο συμπέρασμα πως πρέπει να δοθούν μεγάλες τιμές στην σε σειρά NC και μικρότερες στην παράλληλη NC.

Συνεπώς, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στη συνέχεια γίνονται βάσει αυτού του σκεπτικού. Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας για τις τιμές των αρνητικών χωρητικοτήτων  $C_1 = 18.825\text{ nF}$ ,  $C_2 = 17.837\text{ nF}$  και για τις τιμές  $C_1 = 3.25\text{ nF}$  και  $C_2 = 29.5\text{ nF}$ .



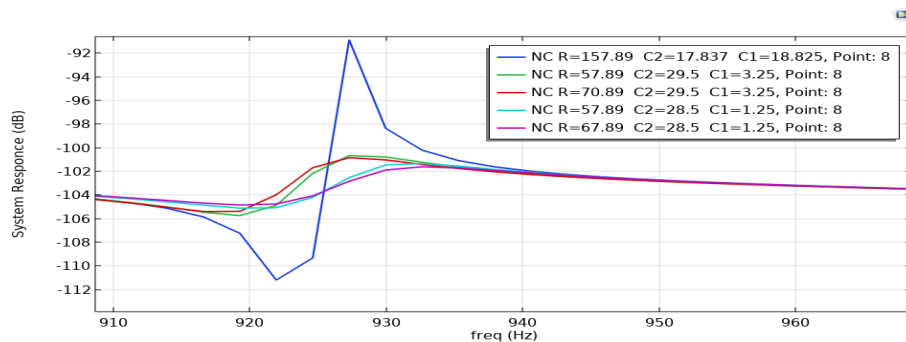
Σχήμα 5.17: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4_\eta$  ιδιοσυχνότητα για το κύκλωμα NC για  $R = 157.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 18.825\text{ nF}$ ,  $C_2 = 17.837\text{ nF}$  (μπλε), για  $R = 157.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 3.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 29.5\text{ nF}$  (πράσινη)

Είναι φανερό πως το αποτέλεσμα έχει βελτιωθεί αισθητά με τις νέες τιμές αρνητικών χωρητικοτήτων. Επίσης φαίνεται πως η αντίσταση των  $157.89\text{ k}\Omega$  μετατοπίζει προς τα αριστερά την απόσβεση, το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Επομένως προτιμούνται μικρότερες τιμές για την αντίσταση όπως αυτές που απεικονίζονται στο σχήμα 5.18 παρακάτω.



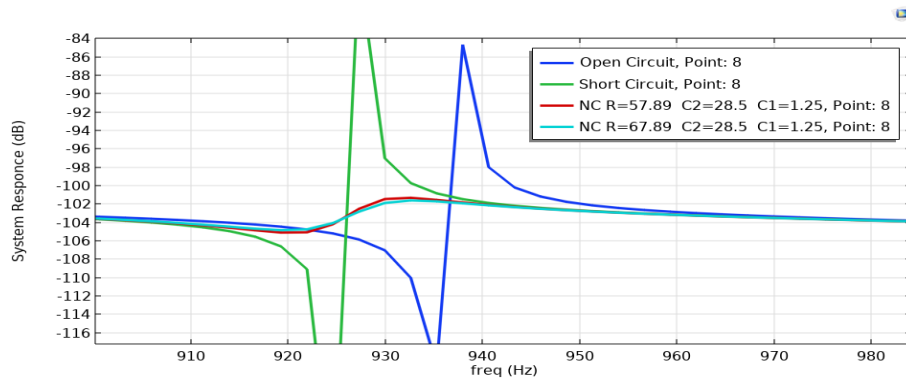
Σχήμα 5.18: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4_\eta$  ιδιοσυχνότητα για το κύκλωμα NC για  $R = 157.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 19.825\text{ nF}$ ,  $C_2 = 17.837\text{ nF}$  (μπλε), για  $R = 57.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 3.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 29.5\text{ nF}$  (πράσινη) και για  $R = 70.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 3.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 29.5\text{ nF}$  (κόκκινη)

Τέλος, στην προσπάθεια εύρεσης ακόμα καλύτερων αποτελεσμάτων, δοκιμάζονται οι τιμές  $C_1 = 1.25\text{ nF}$  και  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  για τις αρνητικές χωρητικότητες και οι τιμές  $57.89\text{ k}\Omega$  και  $67.89\text{ k}\Omega$  για την αντίσταση παραδιακλάδωσης. Οι προκύπτουσες FRFs φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



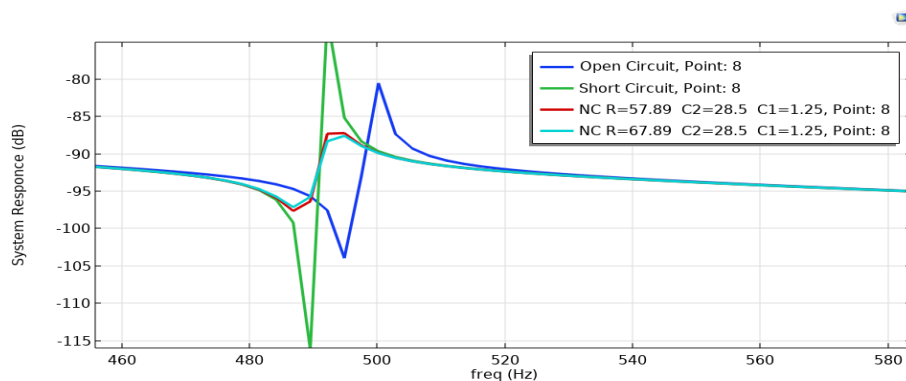
Σχήμα 5.19: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4_\eta$  ιδιοσυχνότητα για το κύκλωμα NC για  $R = 157.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 19.825\text{ nF}$ ,  $C_2 = 17.837\text{ nF}$  (μπλε), για  $R = 57.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 3.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 29.5\text{ nF}$  (πράσινη), για  $R = 70.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 3.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 29.5\text{ nF}$  (κόκκινη), για  $R = 57.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  (ανοικτή μπλε) και για  $R = 67.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  (μωβ)

Στο σχήμα 5.19 γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι τιμές  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  για τις αρνητικές χωρητικότητες είναι ακόμα καλύτερες από τις τιμές  $C_1 = 3.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 29.5\text{ nF}$ , καθώς για την ίδια τιμή αντίστασης  $R = 57.89\text{ k}\Omega$  το αποτέλεσμα του σήματος εξόδου βελτιώνεται. Τα νέα αποτελέσματα φαίνονται αρκετά επιθυμητά καθώς είναι μετατοπισμένα προς τα δεξιά, δηλαδή ανάμεσα σε αυτά του βραχυκυκλωμένου και του ανοικτού κυκλώματος (βλ. σχήμα 5.20) και έχουν αποσβέσει σε μεγάλο βαθμό την ταλάντωση καθώς το πλάτος τους είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με τα αντίστοιχα του ανοικτού κυκλώματος και του βραχυκυκλώματος.



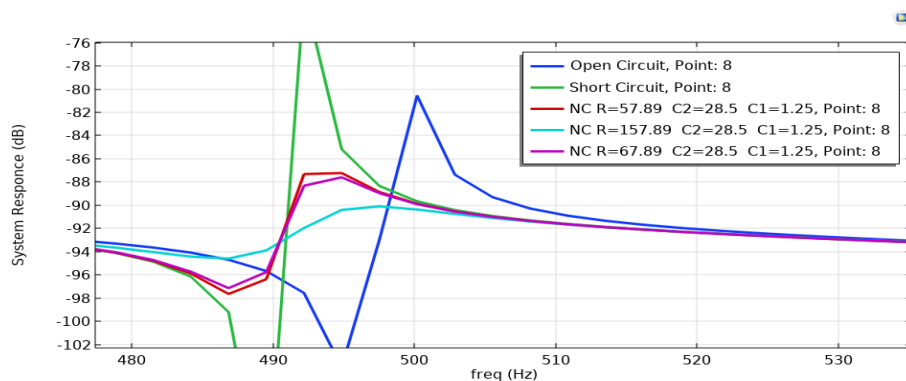
Σχήμα 5.20: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4\eta$  ιδιοσυχνότητα για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), το ανοικτό (μπλε) καθώς και για το κύκλωμα NC με  $R = 57.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  (κόκκινη) και με  $R = 67.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  (ανοικτή μπλε)

Όλα τα προηγούμενα σχήματα και αποτελέσματα σχετίζονται με την τέταρτη ιδιοσυχνότητα. Όσον αφορά την τρίτη ιδιοσυχνότητα παρόλο που δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά για το κύκλωμα με την αρνητική χωρητικότητα, οι τελευταίες προσομοιώσεις για τιμές  $C_1 = 1.25\text{ nF}$  και  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  στις αρνητικές χωρητικότητες και για τιμές  $57.89\text{ k}\Omega$  και  $67.89\text{ k}\Omega$  για την αντίσταση παραδιακλάδωσης παρουσιάζουν ένα αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Τουτέστιν:



Σχήμα 5.21: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $3\eta$  ιδιοσυχνότητα για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), το ανοικτό (μπλε) καθώς και για το κύκλωμα NC με  $R = 57.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5 \text{ nF}$  (κόκκινη) και με  $R = 67.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5 \text{ nF}$  (ανοικτή μπλε)

Από το σχήμα 5.21 φαίνεται πως μεγαλώνοντας την αντίσταση το σήμα απόκρισης μετριάζει, κατάσταση επιθυμητή. Επομένως, δόθηκε στην αντίσταση η τιμή των  $157.89 \text{ k}\Omega$  και το αποτέλεσμα, που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα (FRF ανοικτή μπλε), είναι ακόμα καλύτερο.



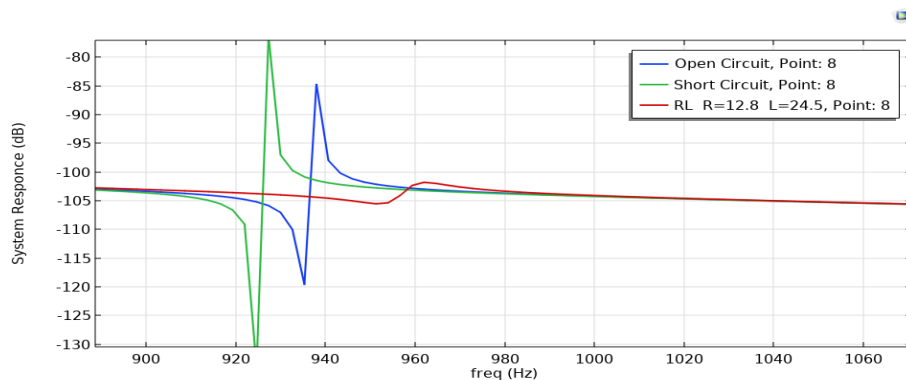
Σχήμα 5.22: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $3\eta$  ιδιοσυχνότητα για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), το ανοικτό (μπλε) καθώς και για το κύκλωμα NC με  $R = 57.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5 \text{ nF}$  (κόκκινη),  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5 \text{ nF}$  (ανοικτή μπλε) και με  $R = 67.89 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5 \text{ nF}$  (μωβ)

Δύο αξιοσημείωτες παρατηρήσεις που εξάγονται εξετάζοντας τα σχήματα 5.17, 5.20, 5.22 είναι πρώτον πως το κύκλωμα με τις αρνητικές χωρητικότητες μπορεί να αποσβέσει ταυτόχρονα παραπάνω από μια ιδιομορφή. Σίγουρα δεν πρόκειται για την βέλτιστη επιτεύξιμη απόσβεση και στις δύο ιδιομορφές, αλλά είναι σε σημαντικό βαθμό. Δεύτερον, μεγαλύτερη τιμή της αντίστασης ( $R = 157.89 \text{ k}\Omega$ ) αποσβαίνει καλύτερα την

3η ιδιομορφή, ενώ μικρότερη τιμή ( $R = 67.89\text{ k}\Omega$ ) αποσβαίνει καλύτερα την 4η ιδιομορφή. Η δεύτερη παρατήρηση έρχεται και σε συμφωνία με τη δημοσίευση των Berardengo κ.α [4], καθώς για την 4<sub>η</sub> ιδιομορφή χρησιμοποιείται μια αντίσταση τιμής  $R = 6.212\text{ k}\Omega$ .

### 5.2.2.2 Σήματα απόκρισης εξόδου για το πιεζοηλεκτρικό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συντονισμού

Μετά τις προσομοιώσεις του κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας ακολουθούν οι προσομοιώσεις για το πιεζοηλεκτρικό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συντονισμού. Αρχικά στα στοιχεία του κόμβου παράκαμψης δίνονται οι τιμές  $12.8\text{ k}\Omega$  και  $24.5\text{ H}$  για την αντίσταση και το πηνίο αντίστοιχα. Ακολουθεί η συνάρτηση απόκρισης συχνότητας, εστιασμένη στην 4<sub>η</sub> ιδιομορφή, για το RL κύκλωμα καθώς και για το ανοικτό και βραχυκυκλωμένο κύκλωμα.



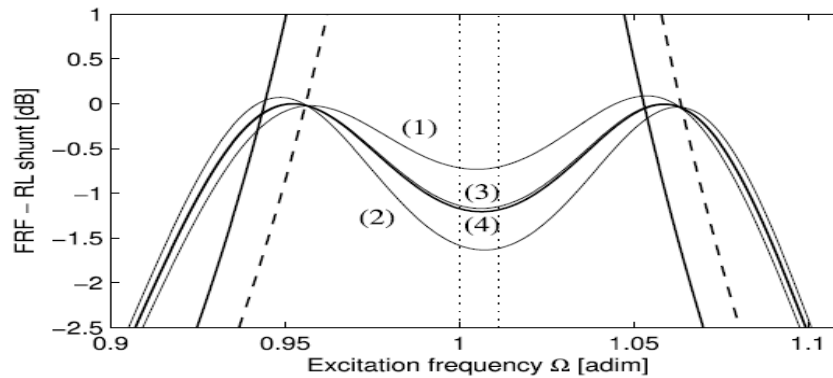
Σχήμα 5.23: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην 4<sub>η</sub> ιδιοσυχνότητα για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), το ανοικτό (μπλε) καθώς και για το κύκλωμα RL με  $R = 12.8\text{ k}\Omega$ ,  $L = 24.5\text{ H}$  (κόκκινη)

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως οι τιμές που δέχονται τα παθητικά στοιχεία R,L στην παραπάνω προσομοίωση (σχήμα 5.23) είναι οι βέλτιστες τιμές που είχε βρει η υποψήφια διδάκτορας Μαρία-Στέλλα Δαράκη [24]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα το κόκκινο σήμα απόκρισης είναι μετατοπισμένο πέρα από την ιδιοσυχνότητα του ανοικτού κυκλώματος γεγονός που δεν είναι τόσο επιθυμητό.

Γενικά, στο σήμα απόκρισης εξόδου του πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου κυκλώματος συντονισμού παρουσιάζονται δύο περίπου

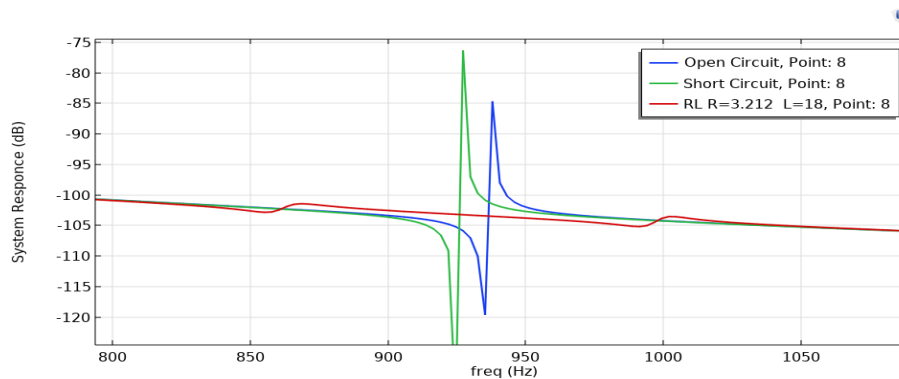


ισοϋψείς κορυφές σύμφωνα με το σχήμα που είναι από την εργασία του Thomas [19].



Σχήμα 5.24: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος συντονισμού

Ένα αποτέλεσμα για την  $4_{\eta}$  ιδιομορφή που προσεγγίζει το σχήμα 5.24 είναι αυτό του σχήματος που ακολουθεί για τιμή αντίστασης  $R = 3.212 \text{ k}\Omega$  και τιμή πηνίου  $L = 18 \text{ H}$ .



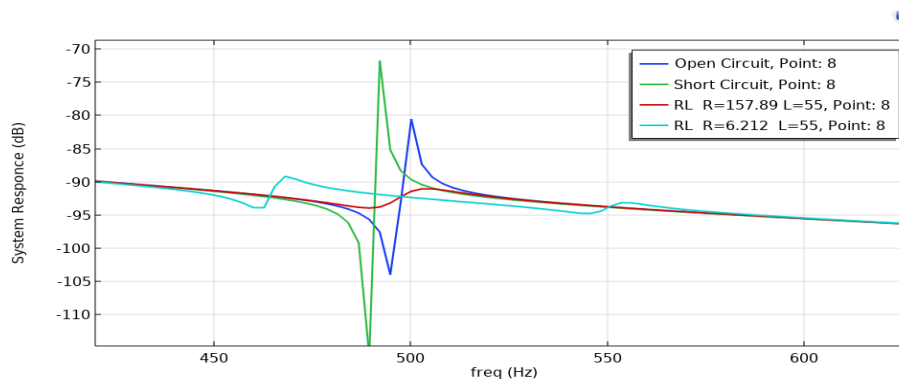
Σχήμα 5.25: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4_{\eta}$  ιδιομορφή για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), ανοικτό (μπλε) και το RL με  $R = 3.212 \text{ k}\Omega$ ,  $L = 18 \text{ H}$  (κόκκινη)

Το σήμα απόκρισης εξόδου του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος συντονισμού στο σχήμα 5.25 αποτελεί το καλύτερο αποτέλεσμα για την απόσβεση της  $4_{\eta}$  ιδιομορφής. Παρόλο που προσεγγίζει την μορφή των δύο ισοϋψών κορυφών, οι κορυφές έχουν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους συγκριτικά με τις FRFs που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.24.

Στη συνέχεια δίνονται διάφορες τιμές στις  $R, L$  παραμέτρους με σκοπό την απόσβεση της  $3_{\eta}$  ιδιοσυχνότητας. Από τις προκύπτουσες δοκιμές, δύο συνδυασμοί τιμών έφεραν πολύ καλό αποτέλεσμα. Αυτοί είναι οι εξής:

- $R = 157.89 \text{ k}\Omega$  και  $L = 55 \text{ H}$
- $R = 6.212 \text{ k}\Omega$  και  $L = 55 \text{ H}$

Διαπιστώνεται πως το πηνίο έχει πολύ μεγάλη τιμή και σε πειραματικό επίπεδο θα υπάρχει πρόβλημα κατασκευής. Ωστόσο στα πλαίσια της προσομοίωσης τα αποτελέσματα είναι τα εξής:



Σχήμα 5.26: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $3_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), το ανοικτό (μπλε), καθώς και για το κύκλωμα RL με  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$ ,  $L = 55 \text{ H}$  (κόκκινη) και με  $R = 6.212 \text{ k}\Omega$ ,  $L = 55 \text{ H}$  (ανοικτή μπλε)

Η ανοικτή μπλε συνάρτηση απόκρισης συχνοτήτων του σχήματος 5.26 έχει την καλύτερη μορφή από όλες τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής για το RL κύκλωμα. Αυτό γιατί προσεγγίζει την μορφή με τις δύο ισοϋψείς κορυφές. Το αρνητικό στο συγκεκριμένο σήμα απόκρισης εξόδου είναι και πάλι η απόσταση μεταξύ των κορυφών. Ωστόσο σε οποιαδήποτε δοκιμή που έγινε πειράζοντας είτε μόνο την αντίσταση, είτε μόνο το πηνίο, είτε αμφότερα, δεν βρέθηκε κάποιο καλύτερο αποτέλεσμα.

### 5.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Όσον αφορά το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην συγκεκριμένη εργασία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της δημοσίευσης [4]. Αρχικά συγκρίνονται η  $3_{\eta}$  και  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος οι τιμές των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ιδιοσυχνότητα	Βραχυκύκλωμα-HZ (Hz)	Βραχυκύκλωμα-BMTGA (Hz)
3	492.45	509
4	927.42	986.42

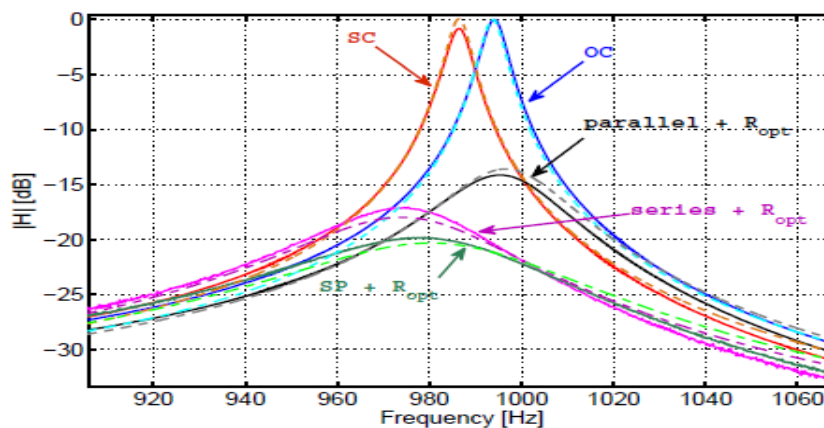
Πίνακας 5.2: Σύγκριση  $3_{\eta}$  και  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητας βραχυκυκλωμένου κυκλώματος με αντίστοιχες από τη δημοσίευση των Berardengo, Manzoni, Thomas, Giraud-Audine

Όπως απεικονίζεται και στον πίνακα 5.2 υπάρχει μεγάλη διαφορά ιδίως για την  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα. Αυτή η διαφορά δεν εκπλήσσει καθώς παρόλο που τα δύο μοντέλα που έχουν χρησιμοποιηθεί έχουν αρκετές κοινές παραμέτρους, ωστόσο δεν υπάρχει πλήρης αντιστοιχία στον τύπο και στις διαστάσεις των πιεζοηλεκτρικών, στα υλικά και στις διαστάσεις της δοκού, στη θέση του μαγνήτη, καθώς και στις τιμές των παθητικών στοιχείων που συνθέτουν τις αρνητικές χωρητικότητες.

Για τις συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας οι Berardengo, Manzoni, Thomas, Giraud-Audine, θεωρούν ότι η αντίσταση  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$  αποσβαίνει καλύτερα την  $1_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα και η  $R = 6.212 \text{ k}\Omega$  αποσβαίνει την  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα. Οι αποκρίσεις, όμως, όπως δείχνει το σχήμα 5.11 δείχνουν το αντίθετο για την  $4_{\eta}$  ιδιοσυχνότητα, καθώς η κορυφή της απόκρισης με  $R = 157.89 \text{ k}\Omega$ , είναι σε χαμηλότερη τιμή από το αντίστοιχη κορυφή της απόκρισης για  $R = 6.212 \text{ k}\Omega$ . Αυτό συμβαίνει για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε και πιο πάνω (έλλειψη πλήρους αντιστοιχίας).

Μια αξιοσημείωτη σύγκριση είναι και η θέση που εμφανίζεται η μέγιστη κορυφή στο σήμα απόκρισης συχνότητας για το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας με την βέλτιστη αντίσταση παραδιακλάδωσης στη δημοσίευση [4]. Συγκεκριμένα η κορυφή εμφανίζεται εκεί που τέμνονται τα σήματα απόκρισης εξόδου του ανοικτού και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος. Ενδεικτικά παρουσιάζεται μια απεικόνιση των συναρτήσεων απόκρισης συχνότητας από την προαναφερθείσα δημοσίευση (σχήμα 5.27, ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η προηγούμενη πρόταση. Ωστόσο δεν

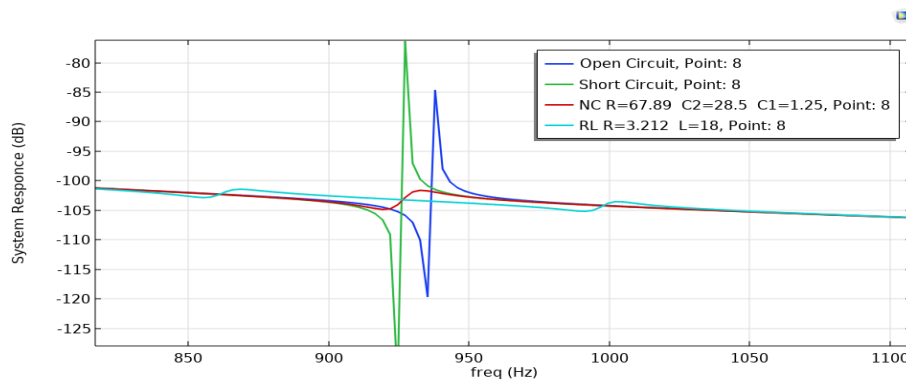
παρουσιάζεται κάτι αντίστοιχο στις προσομοιώσεις που διεκπεραιώνονται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, όποτε συμπεραίνεται πως δεν βρέθηκε η βέλτιστη τιμή αντίστασης.



Σχήμα 5.27: Σήματα απόκρισης εξόδου  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιομορφής για το βραχυκυκλωμένο (κόκκινη), ανοικτό (μπλε) κύκλωμα καθώς και για τα κυκλώματα αρνητικής χωρητικότητας με σύνδεση σε σειρά (μωβ), παράλληλα (μαύρη) και διάταξη SP (πράσινη), έχοντας δώσει την βέλτιστη τιμή στην αντίσταση (σχήμα από εργασία [4])

Παρατηρώντας το σχήμα 5.27 εύκολα γίνεται αντιληπτό πως η κορυφή της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας για το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας (SP) (πράσινη κυματομορφή) βρίσκεται κάτω από το σημείο τομής των συναρτήσεων απόκρισης συχνότητας του ανοικτού (μπλε κυματομορφή) και του βραχυκυκλωμένου κυκλώματος (κόκκινη κυματομορφή).

Στη συνέχεια, εύλογη είναι και μια σύγκριση μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου κυκλώματος με αρνητικές χωρητικότητες και του πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου RL κυκλώματος. Η σύγκριση θα γίνει για τα σήματα απόκρισης εξόδου της  $4_{\eta\varsigma}$  ιδιομορφής, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.28: Συναρτήσεις απόκρισης συχνοτήτων εστιασμένες στην  $4\eta$  ιδιοσυχνότητα για το βραχυκυκλωμένο (πράσινη), το ανοικτό (μπλε), καθώς και για το κύκλωμα RL με  $R = 3.212\text{ k}\Omega$ ,  $L = 18\text{ H}$  (ανοικτή μπλε) και το κύκλωμα NC με  $R = 67.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  (κόκκινη)

Στο σχήμα 5.28 απεικονίζονται τα σήματα απόκρισης συχνότητας για το κύκλωμα συντονισμού RL με τιμές  $R = 3.212\text{ k}\Omega$ ,  $L = 24.8\text{ H}$ , το σήμα απόκρισης για το κύκλωμα αρνητικής χωρητικότητας με τιμές  $R = 67.89\text{ k}\Omega$ ,  $C_2 = 28.5\text{ nF}$  και  $C_1 = 1.25\text{ nF}$ , καθώς και τα σήματα απόκρισης για το βραχυκυκλωμένο και ανοικτό κύκλωμα.

Το RL κύκλωμα φαίνεται να έχει ελάχιστα καλύτερη απόσβεση, παρουσιάζονται και οι δύο κορυφές, όμως η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγάλη. Από την άλλη το NC αποσβαίνει μεταξύ του ανοικτού και βραχυκυκλωμένου κυκλώματος, όμως δεν χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες τιμές στα  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R$  για να ξέρουμε σίγουρα αν μέχρι εκεί μπορεί να φτάσει η απόσβεση ή μπορεί να κατέβει περισσότερο η κορυφή της απόκρισης. Επομένως, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους δεν εξάγεται με σιγουριά ότι η μία υπερτερεί της άλλης καθώς τα προκύπτοντα αποτελέσματα δεν προέρχονται από τις βέλτιστες τιμές. Και οι δύο μέθοδοι απόσβεσης πάντως δείχνουν πως μπορούν να αποσβέσουν τις ταλαντώσεις και με το παραπάνω.

## Κεφάλαιο 6

### Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη χρήση πιεζοηλεκτρικών μετατροπών και παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων για τον έλεγχο ταλαντώσεων. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση ενός νέου κυκλώματος αρνητικής χωρητικότητας στα πιεζοηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα συστήματα απόσβεσης ως εναλλακτική λύση των κλασικών μεθόδων για τη καταστολή μιας ιδιομορφής της δομής. Η σύζευξη του μηχανικού και ηλεκτρικού μοντέλου αποτελεί ένα χαρακτηριστικό των πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων συστημάτων που τα καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην εφαρμογή τους. Αφού το σύστημα σχεδιαστεί, προσκολλάται σε μια δομική κατασκευή και προσομοιώνεται σε κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα.

Μετά από υπολογιστικά πειράματα, στο πεδίο των συχνοτήτων, λαμβάνονται αποτελέσματα όπως γραφήματα απόκρισης σήματος εξόδου και φυσικές ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Πρόκειται για αποτελέσματα ελέγχου μιας ιδιομορφής. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκρίνονται με δημοσιευμένα, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί η λειτουργία τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα κατά τη σύγκριση τους έχουν αρκετή απόκλιση. Ο επικρατέστερος λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι οι διαφοροποιήσεις που υπάρχουν ως προς τον τύπο και στις διαστάσεις των πιεζοηλεκτρικών, των υλικών και τις διαστάσεις της δοκού, της θέσης του μαγνήτη, καθώς και των τιμών των παθητικών στοιχείων που συνθέτουν τις αρνητικές χωρητικότητες. Παρόλο που δεν υπάρχει ακριβής ταύτιση με τα δημοσιευμένα, να αναφερθεί πως επιτυγχάνεται απόσβεση σε παραπάνω από μια ιδιοσυχνότητα, συγκεκριμένα της  $3_{\eta\varsigma}$  και  $4_{\eta\varsigma}$  συχνότητας συντο-

νισμού.

Μελλοντικές Προτάσεις:

Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να έχει πολλές μελλοντικές επεκτάσεις και εφαρμογές. Μια ιδέα για πιθανή επέκταση είναι να διεξαχθεί μια έρευνα όπου θα συγκρίνονται οι διαφορετικές διατάξεις αρνητικής χωρητικότητας. Δηλαδή θα αντιπαρατεθούν τα τρία είδη κυκλωμάτων αρνητικής χωρητικότητας (σε σειρά, παράλληλη, SP). Όσον αφορά την ιδέα της εφαρμογής μπορεί να εφαρμοστεί πειραματικά το σύστημα της παρούσας διπλωματικής και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αντίστοιχα πειράματα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

# Βιβλιογραφία

- [1] Anusha Anisetti. Non-linear shunting of piezo-actuators for vibration suppression. *Masterns thesis*, 2007.
- [2] Benjamin S Beck, Kenneth A Cunefare, and Manuel Collet. The power output and efficiency of a negative capacitance shunt for vibration control of a flexural system. *Smart Materials and Structures*, 22(6):065009, 2013.
- [3] Sam Behrens, Andrew Fleming, and S.O.R. Moheimani. A broadband controller for shunt piezoelectric damping of structural vibration. *Smart Materials and Structures*, 12:18–28, 02 2003.
- [4] Marta Berardengo, Stefano Manzoni, Olivier Thomas, and Christophe Giraud-Audine. A new electrical circuit with negative capacitances to enhance resistive shunt damping. In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, volume 57298, page V001T03A006. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [5] Marta Berardengo, Stefano Manzoni, Olivier Thomas, Christophe Giraud-Audine, Loris Drago, Stefano Marelli, and Marcello Vanali. The reduction of operational amplifier electrical outputs to improve piezoelectric shunts with negative capacitance. *Journal of sound and vibration*, 506:116163, 2021.
- [6] Marta Berardengo, Olivier Thomas, Christophe Giraud-Audine, and Stefano Manzoni. Improved resistive shunt by means of negative capacitance: new circuit, performances and multi-mode control. *Smart Materials and Structures*, 25(7):075033, 2016.
- [7] B de Marneffe and A Preumont. Vibration damping with negative capacitance shunts: theory and experiment. *Smart Materials and Structures*, 17(3):035015, apr 2008.



- [8] J. Ducarne, O. Thomas, and J. F. Deü. Placement and dimension optimization of shunted piezoelectric patches for vibration reduction. *Journal of Sound Vibration*, 331(14):3286–3303, July 2012.
- [9] E. Fukada, M. Date, K. Kimura, T. Okubo, H. Kodama, P. Mokry, and K. Yamamoto. Sound isolation by piezoelectric polymer films connected with negative capacitance circuits. In *Proceedings. 11th International Symposium on Electrets*, pages 223–226, 2002.
- [10] Michael Hoffmann, Stefan Slesazeck, and Thomas Mikolajick. Progress and future prospects of negative capacitance electronics: A materials perspective. *APL Materials*, 9(2), 2021.
- [11] Jun-Sik Kim, Kon-Well Wang, and Edward Smith. High authority piezoelectric actuation system synthesis through mechanical resonance and electrical tailoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures - J INTEL MAT SYST STRUCT*, 16:21–31, 01 2005.
- [12] Konstantinos Marakakis, Georgios K Tairidis, Panagiotis Koutsianitis, and Georgios E Stavroulakis. Shunt piezoelectric systems for noise and vibration control: a review. *Frontiers in Built Environment*, 5:64, 2019.
- [13] SO Reza Moheimani and Andrew J Fleming. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [14] Marcus Neubauer, Robert Oleskiewicz, Karl Popp, and Tomasz Krzyzynski. Optimization of damping and absorbing performance of shunted piezo elements utilizing negative capacitance. *Journal of Sound and Vibration*, 298(1):84–107, 2006.
- [15] Marcus Neubauer and Jörg Wallaschek. Vibration damping with shunted piezoceramics: Fundamentals and technical applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 36(1):36–52, 2013. Piezoelectric Technology.
- [16] Chul H Park and Amr Baz. Vibration control of beams with negative capacitive shunting of interdigital electrode piezoceramics. *Journal of Vibration and Control*, 11(3):331–346, 2005.
- [17] Rogério Salloum. *Optimization of shunt damped composite structures using negative capacitances*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt Darmstadt, Germany, 2016.

- [18] J Tang and K W Wang. Active-passive hybrid piezoelectric networks for vibration control: comparisons and improvement. *Smart Materials and Structures*, 10(4):794, aug 2001.
- [19] O Thomas, J Ducarne, and J-F Deü. Performance of piezoelectric shunts for vibration reduction. *Smart Materials and Structures*, 21(1):015008, dec 2011.
- [20] Wikipedia contributors. Piezoelectricity — Wikipedia, the free encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Piezoelectricity&oldid=1214698018>, 2024. [Online; accessed 24-April-2024].
- [21] Shu-Yau Wu. Broadband piezoelectric shunts for structural vibration control, June 13 2000. US Patent 6,075,309.
- [22] Hongbiao Yu, K.W. Wang, and Jianhua Zhang. Piezoelectric networking with enhanced electromechanical coupling for vibration delocalization of mistuned periodic structures—theory and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 295(1):246–265, 2006.
- [23] Μαρία-Στυλιανή Δαράκη. Θεωρία και εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων συστημάτων σε τεχνολογικούς τομείς, Διδακτορική Διατριβή (υπό προετοιμασία).
- [24] Μαρία-Στυλιανή Δαράκη. Προσομοίωση και παραμετρική ανάλυση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών συστημάτων με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων - Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, Ιούλιος, 2022.
- [25] Κωνσταντίνος Μαρακάκης. Προσομοίωση και βελτιστοποίηση ευφών κατασκευών”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2022.