



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

---

Βιβλιογραφική ανασκόπηση χρήσης  
παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών  
συστημάτων για τον έλεγχο κραδασμών και  
θορύβων σε έξυπνες κατασκευές

---

Διπλωματική Εργασία

**Οικονόμου Σωτήριος**

Επιβλέπων καθηγητής:

Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

**Χανιά, Ιούλιος 2024**

## Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας Εικόνων .....	3
Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract .....	5
1. Εισαγωγή .....	6
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	7
2.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	7
2.2 Παραδιακλαδωμένα Συστήματα Γενικά .....	9
2.2.1 Παθητικά Παραδιακλαδωμένα συστήματα .....	13
2.2.2 Ημιπαθητικά Παραδιακλαδωμένα συστήματα .....	14
2.2.3 Ενεργά Παραδιακλαδωμένα συστήματα .....	15
2.2.4 Αρνητικής Χωρητικότητας .....	18
2.3 Ακουστικός Έλεγχος με παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά .....	21
2.4 Παραδιακλαδωμένα κυκλώματα για τον έλεγχο μίας ιδιομορφής.....	26
2.5 Παραδιακλαδωμένα κυκλώματα για τον έλεγχο πολλών ιδιομορφών.....	27
2.6 Διακοπτόμενα συστήματα παραδιακλάδωσης.....	32
2.7 Συστήματα παραδιακλάδωσης σε σύνθετες κατασκευές δοκών-προβολών.....	36
2.8 Συστήματα παραδιακλάδωσης σε σύνθετες δομές όπως πλάκες και κελύφη. ....	39
2.9 Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της τοποθέτησης του PZT.....	48
2.10 Βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών στοιχείων παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών. .....	54
2.11 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων.....	67
2.12 Συγκομιδή ενέργειας με κύκλωμα παραδιακλάδωσης. ....	76
Βιβλιογραφία .....	79

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Πιεζοηλεκτρικά υλικά (Κρύσταλλος τουρμαλίνης, χαλαζίας, πολυμερές PVDF, τρυγικό καλιονάτριο και τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος).....	7
Εικόνα 2: Ένα απλό μοντέλο ενός πιεζοηλεκτρικού συστήματος παραδιακλάδωσης. ....	9
Εικόνα 3: Παθητικά στοιχεία όπως αντίσταση, πηνίο, πυκνωτής και δίοδος. ....	13
Εικόνα 4: Ενεργητικά στοιχεία, με δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος εξόδου, π.χ τρανζίστορ .....	15
Εικόνα 5: Διάταξη αρνητικής χωρητικότητας ( Αντίσταση και αρνητικός πυκνωτής). Benjamin S Beck, K. A. (2014). Response-based tuning of a negative capacitance shunt for vibration control. <i>Journal of Intelligent Material Systems and Structures</i> , σσ. 1585-1595.....	18
Εικόνα 6: Έξυπνο πάνελ για μείωση μεταφοράς ήχου. Πηγή: Jaehwan Kim, J.-K.L (2002, June 1). Broadband transmission noise reduction of smart panels featuring piezoelectric shunt circuits and sound-absorbing material. ....	21
Εικόνα 7: Κύκλωμα παραδιακλάδωσης μίας ιδιομορφής με 1 PZT. ....	26
Εικόνα 8: Κύκλωμα παραδιακλάδωσης πολλών ιδιομορφών με 1 PZT. ....	27
Εικόνα 9: Είδη διακοπτόμενων συστημάτων.....	32
Εικόνα 10: Δοκός με κυκλική βάση, με συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά τύπου στοίβας. Benedict Götz, M. S. (2016, August 12). Lateral vibration attenuation of a beam with circular cross-section by a support with integrated piezoelectric transducers shunted to negative capacitances. <i>Smart Materials and Structures</i> .....	36
Εικόνα 11: Μία δομή κελύφους με συνδεδεμένο πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα και το προσαρμοστικό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα του. J A B Gripp, L. C. ( 2015, November 3). An adaptive piezoelectric vibration absorber enhanced by a negative capacitance applied to a shell structure. <i>Smart Materials and Structures</i> . ....	39
Εικόνα 12: Μία δοκός συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικά και η παράλληλη-σε σειρά σύνδεση των πιεζοηλεκτρικών σε μία παραδιακλάδωση. J. Ducarne et al. / Journal of sound and vibration 331 (2012) 3286-3303.....	48
Εικόνα 13: Μία υποστηριζόμενη δοκός συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και δίπλα η αναπαράσταση του κυκλώματος της. ....	54
Εικόνα 14: Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών σε μηχανήμα λιθογραφίας, σε δίσκους από τουρμπίνες, σε ράγες σιδηροδρόμων, σε βάσεις CD-ROM αλλά και καθισμάτων επιβατών. ....	67
Εικόνα 15: Συγκομιδή ενέργειας με χρήση πιεζοηλεκτρικών σε παπούτσια, αθλητικά παντελόνια, βραχίονες αναπαράστασης κινήσεων του ανθρώπινου σώματος, όπως και εκμετάλλευση ταλαντώσεων λόγω του αέρα.....	76

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διπλωματική Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου για την στήριξη και υπομονή της ιδιαίτερα τα τελευταία έτη των σπουδών μου, τον φίλο που φρόντιζε να είμαι πάντα συνεπής, όπως και τους γονείς μου για την αδιάκοπη στήριξη σε όλη την διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας. Ακόμη ευχαριστώ πολύ τις γιαγιάδες και τον παππού μου, που έβαλαν όλοι με τον τρόπο τους τα λιθαράκια ώστε να φτάσω εδώ που είμαι σήμερα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη για την συνεργασία και τις συμβουλές του, όπως και τον Δρ. Κωνσταντίνο Μαρακάκη, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τον χρόνο που αφιέρωσε, τις οδηγίες και την βοήθεια του, ώστε να έρθει εις πέρας η παρούσα εργασία.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται μία βιβλιογραφική αναφορά στην πρόοδο που σημειώνεται τα τελευταία χρόνια στην αξιοποίηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται ως ότι μια μηχανική παραμόρφωση σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις προκαλεί αντίθετα ηλεκτρικά φορτία σε αντίθετες κρυσταλλικές επιφάνειες, οι οποίες είναι ανάλογες με το μέγεθος της μηχανικής παραμόρφωσης και το αντίστροφο. Στόχος των ερευνών είναι η χρήση και εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, παραδιακλαδωμένα με ηλεκτρικά κυκλώματα, αποσβένοντας κραδασμούς και μειώνοντας την μεταφορά ήχου, σε έξυπνες κατασκευές. Τα ηλεκτρικά αυτά κυκλώματα συνήθως αποτελούνται από μία αντίσταση, ένα πηνίο και έναν πυκνωτή (RLC), τοποθετημένα σε πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παρουσιάζουν πολύ καλές ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες σύζευξης, καθώς και εξαιρετική απόκριση συχνότητας, λόγω της φύσης τους, ενώ τα πιο διαδεδομένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι οι πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς και τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Τέλος, γίνεται αναφορά σε μεθόδους παραδιακλάδωσης και μοντελοποίησης παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών συστημάτων, όπως και εφαρμογών, για παράδειγμα συλλογής ενέργειας και απόσβεσης δομικών δονήσεων.

## Abstract

In this study, a bibliographic reference is made to the progress made in recent years in the exploitation of the piezoelectric effect. This phenomenon is interpreted as that a mechanical strain in specific directions induces opposite electrical charges on opposite crystal surfaces, which are proportional to the magnitude of the mechanical strain and vice versa. The aim of the research is the use and application of piezoelectric elements, shunted with electric circuits, damping vibrations and reducing the transfer of noise, in smart structures. These electrical circuits usually consist of a resistor, an inductor and a capacitor (RLC), placed in many different combinations. Piezoelectric materials exhibit very good electromechanical coupling properties, as well as excellent frequency response due to their nature, while the most common piezoelectric elements are piezoelectric transducers and piezoelectric patches. Finally, reference is made to shunting methods and modeling of shunted piezoelectric systems, as well as applications, for example energy harvesting and damping of structural vibrations.

## 1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού το οποίο ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί (1880) είναι η δυνατότητα υλικών κρυσταλλικής και κεραμικής μορφής να εμφανίσουν τάση, όταν σε αυτά ασκείται μηχανική καταπόνηση. Με βάση τα παραπάνω, τα τελευταία χρόνια έχουν λάβει μέρος, πλήθος ερευνών με σκοπό την βελτιστοποίηση και την μοντελοποίηση των συστημάτων παραδιακλάδωσης, δηλαδή του τρόπου σύνδεσης των στοιχείων της παραδιακλάδωσης και του είδους - τοποθέτησης των πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων σε έξυπνες κατασκευές. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά έχουν την μορφή αισθητήρων και ενεργοποιητών, ενώ η εφαρμογή τους γίνεται σε πτερύγια στροβιλομηχανών, σε σκληρούς δίσκους, σε ενεργές αναρτήσεις και καθίσματα οχημάτων, σε δισκόφρενα, σε εργαλεία κατεργασίας μετάλλων και σε κτηριακές κατασκευές με σκοπό την απόσβεση των κραδασμών με ταυτόχρονη μείωση του θορύβου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συγκομιδή ενέργειας μετατρέποντας κραδασμούς σε ηλεκτρική ενέργεια, ειδικά σε μία εποχή που η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον, σε ανανεώσιμη μορφή, είναι κάτι που απασχολεί και θα απασχολήσει την ανθρωπότητα τα επόμενα χρόνια. Εφαρμογές όπως η χρήση πιεζοηλεκτρικών στα μικρόφωνα των κινητών συσκευών, εκμεταλλευόμενα τις δονήσεις με σκοπό την φόρτιση τους όπως και η τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών σε δάπεδα δρόμων, γηπέδων, πεζοδρομίων, περιοχών δηλαδή με συνεχείς κραδασμούς λόγω της διέλευσης πεζών και οχημάτων, που θα έχει ως αποτέλεσμα την αυτόνομη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τον φωτισμό και την σήμανση της πόλης, θα είναι εφικτές με την ταχύτητα που σημειώνεται η πρόοδος των αναφερθέντων ερευνών. Κύριο θέμα της εργασίας, είναι η παρουσίαση των διαθέσιμων μεθόδων παραδιακλάδωσης οι οποίες χωρίζονται με βάση τα στοιχεία παραδιακλάδωσης και το εύρος των συχνοτήτων σε ενεργητικές, παθητικές ημιπαθητικές και αρνητικής χωρητικότητας, ενώ ακόμη επισυνάπτονται μέθοδοι για τον έλεγχο μίας ή πολλών ιδιομορφών καθώς και διακοπτόμενα συστήματα.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά



Εικόνα 1: Πιεζοηλεκτρικά υλικά (Κρύσταλλος τουρμαλίνης, χαλαζίας, πολυμερές PVDF, τρυγικό καλιονάτριο και τιτανικός ζirkονικός μόλυβδος).

Πιεζοηλεκτρικά υλικά, ονομάζονται τα υλικά με την ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής τάσης, όταν ασκηθεί σε αυτά μία αντίστοιχη μηχανική και το αντίστροφο, φαινόμενο που οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες. Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί το 1880 με χρήση κρυστάλλων τουρμαλίνης, ενώ άλλα υλικά που φέρουν τις παραπάνω ιδιότητες είναι ο χαλαζίας, το τρυγικό καλιονάτριο, το συνθετικό πολυμερές PVDF κ.α. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή η μηχανική παραμόρφωση του υλικού με εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, υπολογίστηκε αργότερα από τις θεμελιώδεις αρχές της θερμοδυναμικής του Gabriel Lippman. Συγκεκριμένα για εφαρμογές σε έξυπνες κατασκευές με σκοπό τον έλεγχο ταλαντώσεων, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά βρίσκουν εφαρμογές σε αισθητήρες και σε πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς, ενώ παράλληλα μελετιούνται για τον παραπάνω σκοπό, υλικά μη φυσικής προέλευσης με βελτιωμένες ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες.

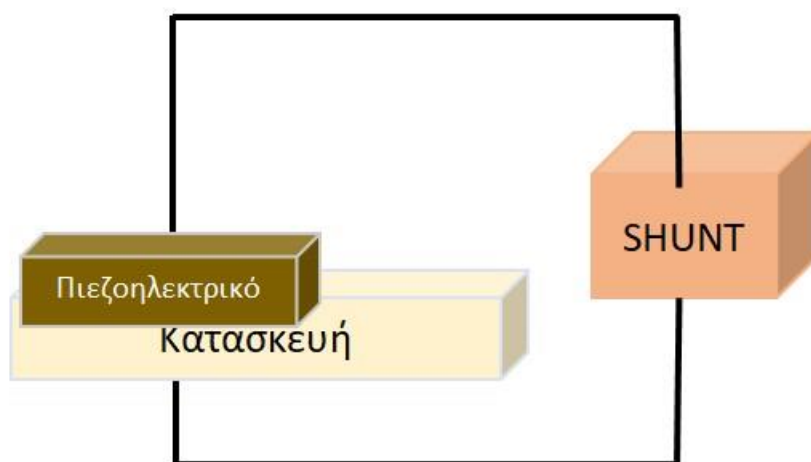
Πιο συγκεκριμένα οι (Wenwang Wu, 2019) παρουσιάζουν σχέδια δύο και τριών διαστάσεων από μηχανικά μεταϋλικά των οποίων η μηχανική συμπεριφορά και οι μηχανισμοί παραμόρφωσης ερευνούνται με τη χρήση της αρχής της ισορροπίας, της ανάλυσης ενέργειας παραμόρφωσης κ.α. Στην συνέχεια αναφέρονται ιδιότητες των υλικών αυτών όπως η εξασθένηση των κραδασμών, η απορρόφηση ενέργειας κρούσης και ο αρνητικός συντελεστής θερμικής διαστολής, ενώ ακόμη παρουσιάζονται μερικές επιτυχημένες εφαρμογές τους, όπως εύκαμπτα ηλεκτρονικά και δομές μετατροπής φάσης.

Στο έργο των (Stewart Sherrit, 2007), δημιουργήθηκε ένα μοντέλο σύνθετης κατηγοριοποίησης των πιεζοηλεκτρικών υλικών, ώστε να μπορεί ο σχεδιαστής των μορφοτροπέων και ενεργοποιητών να γνωρίζει την απόκριση υπό συνθήκες λειτουργίας. Παρότι είναι δύσκολη η εύρεση ενός κοινού σημείου με σκοπό την σύγκριση πιεζοηλεκτρικών υλικών, καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη το πώς και υπό ποιες συνθήκες θα χρησιμοποιηθούν, στο παραπάνω μοντέλο ποσοτικοποιήθηκε η ιδανική γραμμική συμπεριφορά των υλικών ώστε να δημιουργηθεί μία βάση σύγκρισης, με χρήση πολύπλοκων συντελεστών συσχέτισης των ιδιοτήτων των υλικών, ενώ λήφθηκαν μέτρα για ιδιότητες όπως το γήρας και η αποσύνθεση τους μέσω συναρτήσεων χρόνου.

Στο (ÖZGEN, Fall 2014-2015) γίνεται μία αναλυτική αναφορά στα κατά τα χρόνια διαθέσιμα πιεζοηλεκτρικά υλικά και την πρόοδο τους. Επί το πλείστον για εφαρμογές γίνεται χρήση κεραμικών και πολυμερών υλικών (PZT, PLZT, PVDF) και όχι κρυστάλλων που βρίσκονται στην φύση. Πιο συγκεκριμένα τα πιεζοκεραμικά είναι μείγματα λεπτών πιεζοκρυστάλλων, στα οποία αρχικά τα δίπολα είναι τυχαία προσανατολισμένα που σημαίνει ότι δεν έχουν πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά, η οποία αποκτάται με την διαδικασία Poling, η οποία ευθυγραμμίζει τα δίπολα. Τα πιεζοκεραμικά (PZTs), είναι πλέον ευρέως διαθέσιμα, έχοντας μεγάλο πιεζοηλεκτρικό συντελεστή σύζευξης, χαμηλό κόστος και ποικιλία σε σχεδιασμό. Τέλος παρότι υπάρχουν και πρόσθετα που βελτιώνουν τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, αυτά φαίνεται να έχουν περιορισμούς, καθώς υψηλά ηλεκτρικά πεδία, υψηλή μηχανική καταπόνηση, θερμοκρασίες που υπερβαίνουν της θερμοκρασίας Curie( θερμοκρασία που πάνω από αυτή τα δίπολα αλλάζουν προσανατολισμό ενώ κρυσταλλικές δομές μετατρέπονται σε συμμετρικές), αλλά και το γήρας, είναι υπεύθυνα για την καταστροφή των δίπολων και αποπόλωση των υλικών.



## 2.2 Παραδιακλαδωμένα Συστήματα Γενικά



Εικόνα 2: Ένα απλό μοντέλο ενός πιεζοηλεκτρικού συστήματος παραδιακλάδωσης.

Παρόλο που έχουν δημιουργηθεί αρκετές στρατηγικές για τον έλεγχο του θορύβου και των δονήσεων στο (J.A.B. Gripp, 2018) παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση της πιεζοηλεκτρικής παραδιακλαδωμένης απόσβεσης. Αποτελείται από πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς οι οποίοι αφού έχουν εγκατασταθεί σε μία κατασκευή (σε συγκεκριμένη θέση), συνδέονται με ηλεκτρικά κυκλώματα. Ενώ όμως συστήματα σαν το παραπάνω μελετούνται για χρόνια, βελτιώσεις απαιτούνται στις μηχανικές και ηλεκτρονικές τους πτυχές. Δίνεται λοιπόν έμφαση στον τρόπο σχεδιασμού και την αριθμητική μοντελοποίηση κυκλωμάτων παραδιακλαδωμένης απόσβεσης και ποιο συγκεκριμένα σε κυκλώματα παθητικά, πολλών ιδιομορφών, διακοπτόμενων, αρνητικής χωρητικότητας, ενώ αναφέρονται και ορισμένες αξιόλογες εφαρμογές.

Περιγραφή των ερευνών που γίνονται πάνω στον έλεγχο δομικών δονήσεων , παρουσιάζεται στο (Ehtesham Mustafa Qureshi, 2014), καθώς η τοποθέτηση και παραδιακλάδωση ενός μορφοτροπέα δονούμενης κατασκευής, με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από πολλές τεχνικές( παθητικές, ημιπαθητικές, ημιενεργητικές). Οι παραπάνω έρευνες αφορούν τις τεχνικές αυτές, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το εάν παρέχεται κάποια εξωτερική δύναμη στους μορφοτροπείς η όχι, τις υπάρχουσες μεθόδους μοντελοποίησης και τους νόμους του ελέγχου των δονήσεων.

Η πρώτη μέθοδος κατασκευής ενός ηλεκτρικού μοντέλου ενός μηχανικού συστήματος φαίνεται στο (A. BLOCH, 1944). Η μηχανική δύναμη παρουσιάζεται ως τάση, η ταχύτητα από συνεχές ρεύμα, ενώ η μηχανική αντίσταση ως μία αναλογική ηλεκτρική. Ακόμη παρουσιάζεται και μία μέθοδος ονομαζόμενη ως αντίστροφη αναλογία, όπου η μηχανική δύναμη παρουσιάζεται ως συνεχές ρεύμα, και η μηχανική ταχύτητα ως τάση. Στην εργασία αναπτύσσονται οι παραπάνω μέθοδοι, δείχνοντας πως οι μοχλοί εμπίπτουν στην γεωμετρική αυτή αντιστοιχία αν ερμηνευτούν ως αυτό-μετασχηματιστές. Τέλος αν το μηχανικό σύστημα εκπροσωπείται από ένα ηλεκτρικό μοντέλο, τότε ο ηλεκτρομηχανικός μορφοτροπέας, ο οποίος συνήθως το συνδέει στο ηλεκτρικό κύκλωμα, μπορεί να αντικατασταθεί από ένα παθητικό ηλεκτρικό δίκτυο αν επιλεγθεί η σωστή αναλογία ώστε να κατασκευαστεί το μοντέλο, καταλήγοντας σε ένα πλήρως ηλεκτρικό σύστημα.

Στο έργο των (P. GARDONIO, 2001) περιγράφονται και διατυπώνονται οι αναλογίες τόσο η ευθύς όσο και η αντίστροφη, όπως και μέθοδοι αντίστασης και κινητικότητας που αναπτύχθηκαν για μηχανικά συστήματα, που έχουν την βάση τους στο πεδίο του ηλεκτρισμού. Ακόμη αναλύονται οι μέθοδοι της αντίστασης, κινητικότητας και του πίνακα μετάδοσης οι οποίες εξελίχθηκαν για εύκαμπτα διανεμημένα μηχανικά συστήματα.

Μία βιβλιογραφική αναφορά των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και προσομοίωση των έξυπνων υλικών και κατασκευών δίνεται στο (Mackerle, 2003). Συμπεριλαμβάνονται θέματα όπως , έξυπνα υλικά, έξυπνες κατασκευές, έξυπνοι αισθητήρες και ενεργοποιητές καθώς και τεχνολογίες ελεγχόμενων κατασκευών, θέματα που απασχολούν έντονα των τομέα της μηχανικής, καθώς κατασκευές όπως κτήρια και οχήματα, αρχίζουν να αναγνωρίζουν παράγοντες τύπου καταπόνηση, θερμοκρασία, πίεση και να αντιδρούν σε αυτούς.

Στο (J.Bert, 2007) περιγράφεται η προέλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και αναλυτικά ο τρόπος που οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται σε συσκευές ελέγχου δονήσεων. Πιο συγκεκριμένα ο έλεγχος δονήσεων επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το σήμα που έρχεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, ως σήμα εισόδου για ένα εξωτερικό κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό στην συνέχεια μπορεί είτε να ανατροφοδοτήσει το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο στέλνοντας πίσω το σήμα σαν εξόδου, είτε να διαλύσει την ενέργεια δόνησης αποσβένοντας ηλεκτρικά το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.

Σε αυτό το κεφάλαιο του έργου των (Q. Mao, 2013) αναφέρεται η χρήση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων για τον περιορισμό των δονήσεων και των θορύβων. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται γενικευμένες μοντελοποιήσεις των κυκλωμάτων (πχ RL σε σειρά, RL παράλληλα, RLC και αρνητικής χωρητικότητας). Τέλος παρουσιάζονται οι βέλτιστες παράμετροι για τα παραδιακλαδωμένα κυκλώματα, αναλυτικοί αριθμητικοί υπολογισμοί, όπως και πειραματικά αποτελέσματα μίας σφιγμένης πλάκας συνδεδεμένης με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, χρησιμοποιώντας RL σε σειρά, παράλληλα και παλμό-διακοπτόμενα κυκλώματα.

Ο έλεγχος των δομικών δονήσεων και του θορύβου ενός έξυπνου συνδεδεμένου με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ορθογώνιου πάνελ 3 επιπέδων κάτω από αρμονικά και παροδικά φορτία επιτευχθεί στο (Shahraeeni, 2018) αποκλειστικά χρησιμοποιώντας ενεργά, παθητικά και υβριδικά παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, ένα τριών ιδιομορφών υβριδικό RLC παραδιακλαδωμένο κύκλωμα, σε σειρά με μία πηγή ενεργής τάσης, συνδέονται με ένα πιεζοηλεκτρικό τμήμα ενός ηλεκτροδίου και στη συνέχεια ρυθμίζονται στις κυρίαρχες συχνότητες δόνησης της κατασκευής. Έτσι οι επιδόσεις στον τομέα του χρόνου και των συχνοτήτων των 3 αυτών δικτύων υπολογίζονται και παρουσιάζονται σε μορφή αποτελεσμάτων τάσης εξόδου, πίεσης ήχου και προσπάθειας ελέγχου.

Ένα στάνταρ για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και τις εφαρμογές του παρουσιάζεται στο (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1987). Αυτό περιλαμβάνει εξισώσεις μετά από ανάλυση δονήσεων σε πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία έχουν απλά γεωμετρικά σχήματα. Οι ελαστικοί, πιεζοηλεκτρικοί και διηλεκτρικοί συντελεστές αντιμετωπίζονται ως σταθερές, ενώ τα αποτελέσματα είναι βασισμένα σε γραμμικό πιεζοηλεκτρισμό καθώς δεν λήφθηκαν υπόψη παράγοντες όπως η ηλικία των υλικών, ή διάφορες ηλεκτρομηχανικές τους αλληλεπιδράσεις, οι οποίες δημιουργούν μη γραμμικότητες στην συμπεριφορά τους.

Στο (KENNELLY., 1893) γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση για τον όρο της σύνθετης αντίστασης ( impedance) ενός αγωγού. Με σταθερά συνεχόμενα ρεύματα φαίνεται να είναι απλά η αντίσταση του αγωγού, όμως με περιοδικώς κυμαινόμενα ρεύματα θα διαφέρει από την αντίσταση και θα είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη. Γίνεται λοιπόν, ένα βήμα ώστε να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες που φέρουν τα εναλλασσόμενα ρεύματα και η διανομή τους, με την ανάπτυξη θεωριών για την έννοια της σύνθετης αντίστασης.

Μία νέα αναλογία μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρισμού που επιτρέπει τον σχεδιασμό του αντίστοιχου ηλεκτρικού κυκλώματος πιο άμεσα μελετάται στο (F.A.FIRESTONE, 1933). Με βάση ότι η επαγωγή και η χωρητικότητα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα , έχουν παρόμοιο ρόλο με αυτόν της μάζας και της υποχωρητικότητας ενός ελατηρίου σε ένα μηχανικό σύστημα, αποδεικνύεται ότι η νέα αναλογία είναι πιο ολοκληρωμένη και χρήσιμη από την παλαιά.

Οι τεχνικές, οι διαδικασίες και οι ρουτίνες που χρησιμοποιούνται στα προγράμματα ανάλυσης κυκλωμάτων μέσω υπολογιστικής υποστήριξης παρουσιάζονται στο (WILLIAM J. McCALLA, 1971). Τα προγράμματα προσομοίωσης εξετάζονται, ενώ συγκρίνονται επιλεγμένα χαρακτηριστικά για τις μεγάλες κατηγορίες της ανάλυσης κυκλωμάτων, δηλαδή της γραμμικής συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, μη γραμμικής συνεχούς, μη γραμμικής μεταβατικής και γραμμικής πόλου 0.

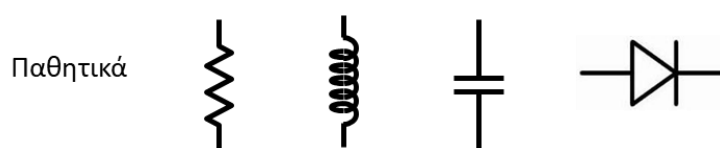
Στο (Konstantinos Marakakis, 2019) παρουσιάζεται το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου με σκοπό τον έλεγχο θορύβων και δονήσεων, στην σημερινή εποχή. Κορμός της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων, είναι η ικανότητα τους να μετατρέπουν μηχανική καταπόνηση σε ηλεκτρική ενέργεια, την οποία και στέλνουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Αναφέρεται ότι τα παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά συστήματα αποτελούνται από μία σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση, η οποία με την σειρά της αποτελείται από μία αντίσταση και από επαγωγή, ή χωρητικότητα σε κάθε πιθανό συνδυασμό, ενώ οι εφαρμογές τους πληθαίνουν σε έξυπνες κατασκευές.

Ανάλυση πάνω σε κρυστάλλους χαλαζία και ανάπτυξη των εξισώσεων για αντηχεία κατασκευασμένα από αυτούς, γίνεται στο (Cady, 1921). Στην συνέχεια μετά από αναφορά στην γενική θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού , αναπτύσσεται η θεωρία της συμπυκνωμένης μάζας των διαμηκών δονήσεων σε ράβδους. Τέλος η κατασκευή και λειτουργία αντηχείων χαλαζία και χαλαζία-μετάλλου περιγράφεται, ενώ δίνονται παραδείγματα των εφαρμογών τους όπως και άλλες πρακτικές εφαρμογές.

Η εφαρμογή της δυναμικής μηχανικής ανάλυσης στην έρευνα πάνω σε σιδηροηλεκτρική-παραηλεκτρική φάση μεταμόρφωσης, χαλάρωση χαμηλής συχνότητας, σιδηροηλεκτρική κόπωση και σύνθετη σιδηροηλεκτρική απόσβεση παρουσιάζεται στο (CHEN Yun, 2020). Η ανάλυση αυτή φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητη, να έχει καλύτερο σύστημα ψύξης, να έχει εύκαμπτο περιστρεφόμενο πειραματικό αντικείμενο, λειτουργία πολλαπλής παραμόρφωσης και λειτουργία έρευνας συνεχούς συχνότητας και θερμοκρασίας. Είναι δηλαδή εφικτό να κατηγοριοποιηθεί η απόκριση του στελέχους, υπό εναλλασσόμενη καταπόνηση και χαλάρωση.

Αναφορά στις έρευνες που γίνονται πάνω στην χρήση πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων, για τον έλεγχο των δομικών δονήσεων γίνεται στο (Moheimaní, 2003). Πιο συγκεκριμένα ένας πιεζοηλεκτρικός μορφοτροπέας συνδέεται με μία κατασκευή. Όταν η κατασκευή αυτή παραμορφώνεται το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο καταπονείται και μετατρέπει ένα μέρος της δομικής δόνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Διακλαδώνοντας τον μορφοτροπέα, με μία σύνθετη αντίσταση, ένα μέρος της εισερχόμενης ενέργειας μπορεί να διαλυθεί, με αποτέλεσμα η σύνθετη αντίσταση να λειτουργεί ως μηχανισμός εξόρυξης μηχανικής ενέργειας από την δονούμενη κατασκευή.

### 2.2.1 Παθητικά Παραδιακλαδωμένα συστήματα



Εικόνα 3: Παθητικά στοιχεία όπως αντίσταση, πηνίο, πυκνωτής και δίοδος.

Στόχος της μελέτης των (B. Lossouarn, 2018) είναι η ανάπτυξη του πρώτου πλήρως παθητικού μη γραμμικού αποσβεστήρα δονήσεων. Ο αποσβεστήρας αυτός σχεδιάστηκε ώστε να μετριάξει ένα συγκεκριμένο συντονισμό μίας μη γραμμικής κατασκευής. Για να αποφευχθεί τη χρήση συνθετικών πηνίων που απαιτούν εξωτερική ισχύ, κλειστά μαγνητικά κυκλώματα από φερρίτη λαμβάνουν τις μεγάλες τιμές επαγωγής που απαιτούνται από την μείωση των κραδασμών σε χαμηλές συχνότητες. Ο κορεσμός ενός πρόσθετου παθητικού επαγωγέα στη συνέχεια αξιοποιείται για τη δημιουργία της μη γραμμικότητας στον αποσβεστήρα.

Μία νέα τοπολογία κυκλώματος στοιχείων που έχουν άμεση 3-3 λειτουργία και σύγκριση με στοιχεία που λειτουργούν με έμμεση 3-1 εφαρμόζεται στο (ALBERTO BELLOLI, 2006) με σκοπό να συντεθούν οι πολλές μεγάλες επαγωγικότητες που απαιτούνται από την χωρητικότητα της πιεζοηλεκτρικής συσκευής σε σχετικά χαμηλές συχνότητες. Αυτό επιτρέπει τον αποτελεσματικό συντονισμό του κυκλώματος R-L ώστε η δομική συχνότητα συντονισμού να αποσβεσθεί. Ακόμη συγκρίνεται η απόδοση καταστολής κραδασμών των κεραμικών πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών με αυτών από σύνθετα υλικά ενεργών ινών σε αυτή τη μελέτη. Για το σκοπό αυτό, διαφορετικοί ενεργοποιητές είναι συνδέθηκαν σε πλάκες αλουμινίου με πρόβολο.

Στην εργασία του (W. Larbi J.-F. D., 2018) προτείνει ένα πρωτότυπο μοντέλο μειωμένης τάξης για την πρόβλεψη της παθητικής αναγωγής των δομικών δόνηση μέσω παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Το πρόβλημα αποτελείται από μια ελαστική κατασκευή με επιφανειακά τοποθετημένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται σε κυκλώματα συντονισμού παραδιακλάδωσης ώστε να αποσβέσουν ειδικές συχνότητες συντονισμού της κατασκευής. Παρουσιάζεται λοιπόν μία αποτελεσματική ηλεκτρομηχανική σύνθεση πεπερασμένων στοιχείων για τη δυναμική ανάλυση του προβλήματος, καθώς και αρκετά αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα με σκοπό να αποδειχθεί πόσο πιο αποδοτική είναι η νέα αυτή μέθοδος.

Η παθητικά παραδιακλαδωμένη απόσβεση περιλαμβάνει τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού δικτύου παραδιακλάδωσης με έναν δομικά προσαρτημένο πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα. Ένας μεγάλος όγκος ερευνών έχει επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την εφαρμογή των κυκλωμάτων ικανών να μειώσουν σημαντικά τους δομικούς κραδασμούς. Στο έργο των (Andrew J. Fleming S. B., An Autonomous Piezoelectric Shunt Damping System, 2003) εισάγεται μία αποτελεσματική, ελαφριά, και μικρού μεγέθους τεχνική για την υλοποίηση παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων απόσβεσης. Μια γέφυρα MOSFET χρησιμοποιήθηκε μαζί με έναν επεξεργαστή σήματος για τη σύνθεση της τερματικής αντίστασης του κυκλώματος.

## **2.2.2 Ημιπαθητικά Παραδιακλαδωμένα συστήματα**

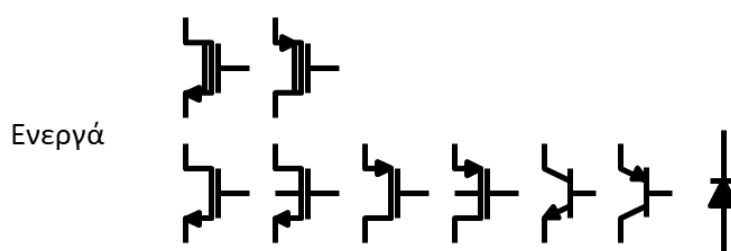
Ο στόχος της εργασίας των (G. Mikołowski, 2016) είναι να παράσχει αποτελέσματα μιας πειραματικής και αναλυτικής έρευνας πάνω στους ενισχυμένους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές ως αποσβεστήρες κραδασμών με διαμόρφωση ενός απλού μηχανικού βαθμού συστήματος ελευθερίας. Η έρευνα στοχεύει στην αξιολόγηση της ικανότητας τροποποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω τεχνικών παραδιακλάδωσης. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι είναι εφικτό να ληφθεί μείωση στη μετατόπιση ενίσχυσης άνω των 20 dB στο εύρος συντονισμού.

Στην έρευνα των (J Tang, 2001) , η παθητική απόσβεση και η αρχή ενεργητικού ελέγχου αρκετών βασικών ενεργό-παθητικών υβριδικών πιεζοηλεκτρικών δικτύων αναλύονται και συγκρίνονται. Η σύγκριση πραγματοποιείται με μη διαστασιολογημένο τρόπο, μέσα από την οποία επισημαίνεται η σημασία του γενικευμένου συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Συμπεραίνεται ότι αυτές οι διαμορφώσεις φέρουν πολύ παρόμοια ανοιχτού βρόχου απόδοση για την ίδια ηλεκτρομηχανική σύζευξη, ενώ η μεγαλύτερη ηλεκτρομηχανική σύζευξη οδηγεί σε υψηλότερη παθητική απόσβεση του δικτύου και ανάλογα με το σχεδιασμό και διαμόρφωσης, θα μπορούσε επίσης να αποφέρει καλύτερη συνολική απόδοση. Τέλος μια μέθοδος αύξησης του συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης

χρησιμοποιώντας αρνητικής χωρητικότητας κύκλωμα προτείνεται, αναλύεται και επαληθεύεται πειραματικά.

Έχει αποδειχθεί ότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παθητικοί ηλεκτρομηχανικοί αποσβεστήρες κραδασμών με τη χρήση ηλεκτρικών δικτύων. Ημιενεργοί πιεζοηλεκτρικοί αποσβεστήρες έχουν επίσης προταθεί για την καταστολή αρμονικών διεγέρσεων με μεταβλητή συχνότητα. Ωστόσο, αυτές οι ημιενεργές συσκευές έχουν περιορισμούς που μειώνουν την πρακτική τους εφαρμογή. Παρουσιάζεται λοιπόν στο (R. A. Morgan, 2002) μια ενεργητική-παθητική εναλλακτική λύση υψηλής απόδοσης έναντι των ημιενεργών αποσβεστήρων. Με τη χρήση ενός συνδυασμού παθητικού ηλεκτρικού κυκλώματος και ενεργές ενέργειες ελέγχου, το σύστημα συντίθεται για καταστολή διαταραχών στενής ζώνης και προσαρμοστικής μεταβλητής συχνότητας. Τέλος παρουσιάστηκαν 2 μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ως σύγκριση με το νέο αυτό είδος αποσβεστήρα, ενώ αποδεικνύεται ότι ο νέος σχεδιασμός είναι αποδοτικά ανώτερος σε σχέση με τις μεθόδους αυτές.

### 2.2.3 Ενεργά Παραδιακλαδωμένα συστήματα



Εικόνα 4: Ενεργητικά στοιχεία, με δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος εξόδου, π.χ. τρανζίστορ

Ένα γενικό σχέδιο σχεδίασης ενεργά ελεγχόμενων έξυπνων κατασκευών με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές αναλύονται στο (S.X. Xu, 2002). Το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να κάνει χρήση οποιουδήποτε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και ο σχεδιασμός ελέγχου πραγματοποιείται σε μορφή χώρου που έχει δημιουργηθεί σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Με σκοπό την επίδειξη, χρησιμοποιήθηκε ένας εμπορικός κώδικας πεπερασμένων στοιχείων εξοπλισμένος με τον νόμο ελέγχου ανατροφοδότησης εξόδου, ώστε να σχεδιαστεί ένα σύνολο δομικών συστημάτων για ενεργό έλεγχο κραδασμών. Η εγκυρότητα και η αποτελεσματικότητα του παρόντος συστήματος επιβεβαιώθηκε με σύγκριση με τα αναφερόμενα αποτελέσματα.

Στόχος της εργασίας των (KAZUHIKO ADACHI, 2004) είναι η ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου σχεδίασης του ενεργού-παραδιακλαδωμένου υβριδικού τύπου πιεζοηλεκτρικού συστήματος απόσβεσης για καταστολή δομικών κραδασμών. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία οδηγούνται ενεργά με συντονισμένης σειράς κυκλώματα παραδιακλάδωσης RL. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραδιακλαδωμένα κυκλώματα ως αντισταθμιστές (ή φίλτρα), τότε οι παραδιακλαδωμένοι αντιστάτες σχεδιάζονται με τη χρήση της θεωρίας ελέγχου LQ. Τέλος ένα πειραματικό τεστ και μία αριθμητική προσομοίωση ενός απλού δοκαριού με πρόβολο δείχνει τη δομική ικανότητα απόσβεσης του υβριδικού πιεζοηλεκτρικού συστήματος απόσβεσης.

Μία ευρυζωνική ενεργή τεχνική παραδιακλάδωσης για τον έλεγχο των κραδασμών σε πιεζοηλεκτρικές ελασματοποιημένες κατασκευές είναι το θέμα στο έργο των (S Behrens, 2003). Η επίδραση του ελεγκτή αρνητικής χωρητικότητας μελετάται θεωρητικά και στη συνέχεια επικυρώνεται πειραματικά σε πιεζοηλεκτρική ελασματοποιημένη απλά υποστηριζόμενη πλάκα. Επιτυγχάνοντας συγκρίσιμες επιδόσεις με αυτές των παθητικών συστημάτων παραδιακλάδωσης, ο ελεγκτής αρνητικής χωρητικότητας έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα, καθώς είναι πιο απλός στην εφαρμογή, λιγότερο ευαίσθητος στις περιβαλλοντικές παραλλαγές και μπορεί να θεωρηθεί ως ευρυζωνικός απορροφητής κραδασμών.

Το έργο των (Andre PREUMONT) συνοψίζει μια έρευνα στον τομέα της ενεργής απόσβεσης κατασκευών. Η δοκιμαστική εγκατάσταση αποτελείται από μια δομή εφοδιασμένη με δύο ενεργά στοιχεία που μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες θέσεις. Κάθε ένα από τα ενεργά στοιχεία αποτελείται από έναν γραμμικό πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή που συνδυάζεται με έναν μορφοτροπέα δύναμης, ενώ κάθε ενεργό στοιχείο ελέγχεται με αποκεντρωμένο τρόπο. Αυτός ο νόμος ελέγχου είναι πάντα σταθερός και έχει βρεθεί πολύ αποτελεσματικός: ο λόγος απόσβεσης της πρώτης λειτουργίας έχει αυξηθεί από 0,003 (ανοιχτός βρόχος) στο 0,09 με έναν ενεργοποιητή.

Οι ηλεκτρομαγνητικοί μορφοτροπείς, χρησιμοποιούνται ενδελεχώς για έλεγχο ενεργής ανατροφοδότησης. Στο (Andrew J. Fleming S. B., Active LQR and H2 shunt control of electromagnetic transducers) , αναδεικνύεται μια νέα τεχνική όπου μία σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση, συνδεδεμένη με τους ακροδέκτες ενός ηλεκτρομαγνητικού ενεργοποιητή, έχει σχεδιαστεί για να μειώνει τους κραδασμούς στην κατασκευή. Μετρώντας την τάση των ακροδεκτών του πηνίου και ελέγχοντας το προκύπτον ρεύμα ή αντίστροφα το συζευγμένο μηχανικό σύστημα μπορεί να ελεγχθεί. Οι πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν: συστήματα ανάρτησης οχημάτων, πλατφόρμες απομόνωσης κραδασμών και έλεγχο κλειστών ηχητικών πεδίων. Οι ελεγκτές ενεργής σύνθετης αντίστασης δεν απαιτούν εξωτερικούς αισθητήρες ενώ οι τεχνικές που αναφέρθηκαν επαληθεύονται πειραματικά μέσω της εφαρμογής σε σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας.



Η εργασία των (Nesbitt W. Hagood, 1990) είναι μία προέκταση των παθητικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων, καθώς με βάση αυτά περιβάλλει την δυναμική μίας ελαστικής κατασκευής πιεζοηλεκτρικά συζευγμένης με ένα ενεργά οδηγούμενο δίκτυο. Μοντελοποιούνται λοιπόν τα αποτελέσματα της δυναμικής σύζευξης μεταξύ μιας κατασκευής και ενός ηλεκτρικού δικτύου μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Οι συζευγμένες εξισώσεις κίνησης μίας αυθαίρετης ελαστικής κατασκευής προκύπτουν με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και παθητικά ηλεκτρονικά. Ακόμη αναπτύχθηκαν μοντέλα χώρου κατάστασης για τρεις σημαντικές περιπτώσεις: ηλεκτρόδια με άμεση τάση, ηλεκτρόδια άμεσης φόρτισης και μίας έμμεσης περίπτωσης όπου τα πιεζοηλεκτρικά ηλεκτρόδια συνδέονται με ένα αυθαίρετο ηλεκτρικό κύκλωμα με ενσωματωμένες πηγές τάσης και ρεύματος. Τέλος οι εξισώσεις εφαρμόστηκαν σε περίπτωση δοκού με πρόβολο με επιφανειακά τοποθετημένα πιεζοκεραμικά και έμμεση οδήγηση τάσης και ρεύματος.

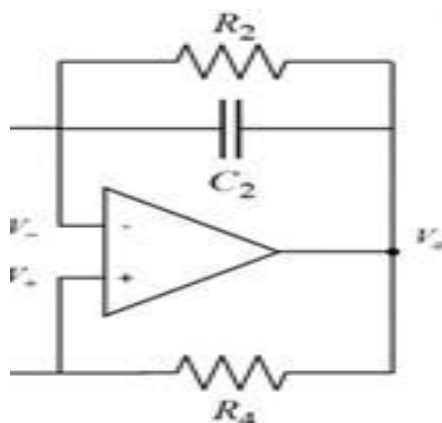
Μια νέα ιδέα δομικού ελέγχου κραδασμών, με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών με ημιενεργά ηλεκτρικά δίκτυα σε πραγματικό χρόνο, διερευνάται στο έργο του (WANG). Ένα ρυθμιζόμενο κύκλωμα, μια μεταβλητή αντίσταση και ο ρυθμός μεταβολής μιας μεταβλητής αυτεπαγωγής χρησιμοποιούνται ως είσοδος ελέγχου. Με βάση την ενεργειακή ανάλυση, σχήματα παραμετρικού ελέγχου συζητούνται για διαφορετικού είδους μελέτες. Η κύρια ιδέα είναι η μείωση της συνολικής ενέργειας του συστήματος περιορίζοντας παράλληλα την ενέργεια που ρέει στην κύρια κατασκευή.

Η ενεργή απόσβεση κραδασμών μηχανικών συστημάτων βασισμένη σε εφαρμογές έξυπνων υλικών έχει μεγάλες δυνατότητες εφαρμογής. Στα ενεργά συστήματα κραδασμών η γρήγορη απόκριση των ενεργοποιητών στα σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που κρίνουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Στην εργασία του (Płaczek, 2020) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που δείχνουν ότι η αλλαγή φάσης του σήματος επηρεάζει την απόδοση ενός συστήματος ενεργής απόσβεσης κραδασμών με βάση την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπών από σύνθετη ίνα (MFC). Τα MFC είναι σύγχρονοι πιεζοηλεκτρικοί σύνθετοι μορφοτροπείς που παράγονται ως λεπτές, ελαστικές μεμβράνες και μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν στην επιφάνεια του μηχανικού υποσυστήματος ή με την μορφή ελασματοποίησης σε σύνθετες κατασκευές.

Το θέμα της ανάπτυξης μιας έξυπνης πλατφόρμας ελέγχου κραδασμών που ακολουθεί μια καινοτόμο προσέγγιση βασισμένη σε μοντέλα αναλύεται στο (Maurizio Arena, 2020). Η απόκτηση πληροφοριών ακριβείας για την απόκριση του συστήματος στις φάσεις προσχεδιασμού και σχεδιασμού μπορεί να μειώσει τόσο τις υπολογιστικές όσο και τις πειραματικές προσπάθειες. Με βάση τα παραπάνω, ένα ηλεκτρομηχανικά συζευγμένο σύστημα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας

σχηματοποιήθηκε αριθμητικά εφαρμόζοντας μια διατύπωση πεπερασμένων στοιχείων. Αναπτύχθηκε λοιπόν ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης ενσωματώνοντας χαρακτηριστικά του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με δυνατότητες Simulink, ενώ η πιεζοηλεκτρική καταπόνηση μοντελοποιήθηκε με δισδιάστατη περιγραφή πεπερασμένων στοιχείων. Η θεωρητική μελέτη οδήγησε στην πρακτική ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος που επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης του ελέγχου κραδασμών. Ο έλεγχος μίας ιδιομορφής επικυρωποιήθηκε πειραματικά για ένα πρόβολο δοκαριού από αλουμίνιο. Τέλος το ζεύγος του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα-ενεργοποιητή τοποθετήθηκε σύμφωνα με μία διαδικασία βελτιστοποίησης βασισμένη στη μέγιστη αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια.

#### 2.2.4 Αρνητικής Χωρητικότητας



Εικόνα 5: Διάταξη αρνητικής χωρητικότητας ( Αντίσταση και αρνητικός πυκνωτής). Benjamin S Beck, K. A. (2014). Response-based tuning of a negative capacitance shunt for vibration control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, σσ. 1585-1595.

Στο (Pavel Mokry) παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός συστήματος περιορισμού κραδασμών βασισμένο σε μία μέθοδο ελέγχου της ελαστικής ακαμψίας των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Στο παραπάνω σύστημα ο περιορισμός των κραδασμών επιτυγχάνεται με την απορρόφηση αυτών που μεταδίδονται μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή συνδεδεμένου σε ένα ενεργό, αναλογικό κύκλωμα που συμπεριφέρεται ως αρνητικός πυκνωτής. Το πρόβλημα υψηλής ευαισθησίας του συστήματος με στόχο την σωστή τροποποίηση του πυκνωτή και τον περιορισμό κραδασμών σε συνθήκες λειτουργίας αναλύονται, ενώ εφαρμόστηκε και μία μέθοδος αυτόματης τροποποίησης του συστήματος προσθέτοντας ένα επιπρόσθετο ψηφιακό κύκλωμα ελέγχου στον αρνητικό πυκνωτή.

Στην εργασία των (Alan Gonçalves, 2020) στόχος είναι να πραγματοποιηθεί έλεγχος κραδασμών σε μία κατασκευή τύπου στοά με δύο βαθμούς ελευθερίας, χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς που σχετίζονται με κυκλώματα παραδιακλάδωσης αρνητικής χωρητικότητας, με ηλεκτρική αντίσταση σε σειρά. Για το σκοπό αυτό, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα με παθητικά και ενεργά εξαρτήματα που συνδέονται με τους πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς αναπτύχθηκε ώστε να παραχθεί ένα κύκλωμα παραδιακλάδωσης αρνητικής χωρητικότητας, το οποίο θα υλοποιηθεί μέσω μορφοτροπέων αρνητικής αντίστασης και χρήση ενισχυτών. Μείωση της τάξης των 9 db ήταν εφικτή για ελεύθερους κραδασμούς, ενώ για εξαναγκασμένους, η μείωση έφτασε τα 1,5 db.

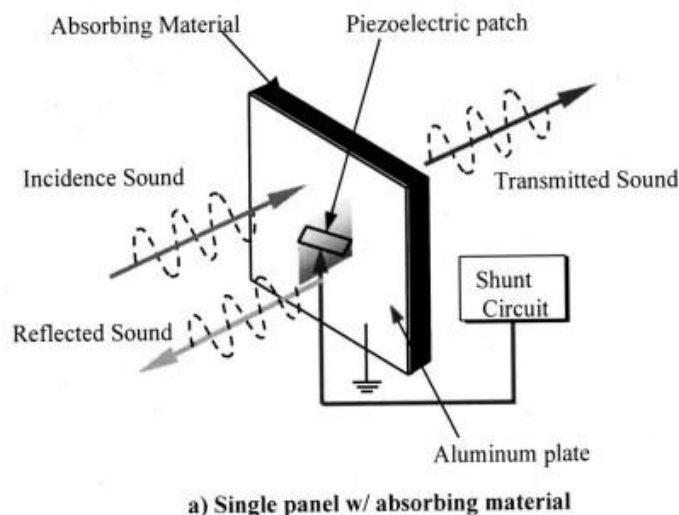
Στην εργασία των (Marcus Neubauer R. O., 2006), αναλύεται η επίδραση της αρνητικής χωρητικότητας σε συστήματα απόσβεσης και απορρόφησης που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς παραδιακλάδωσης. Διαφορετικές παθητικές και ήμι-ενεργητικές διαμορφώσεις δικτύων έχουν συγκριθεί σε μια γενική, κανονικοποιημένη μορφή, τονίζοντας την επίδραση του γενικού συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης και της αρνητικής χωρητικότητας. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται συνήθως για παθητικά δίκτυα προσαρμόζονται στη γενική διαμόρφωση αρνητικής χωρητικότητας με αποτέλεσμα τις βέλτιστες παραμέτρους. Συγκρίνονται οι επιδόσεις απόσβεσης και απορρόφησης βέλτιστων παθητικών και ήμι-ενεργών δικτύων. Με τη βέλτιστη παράμετρο για την αρνητική χωρητικότητα, μπορεί να δοθεί ένα ανώτερο όριο για το μέγιστο πλάτος που εμφανίζεται στη συνάρτηση απόκρισης συχνότητας. Τα αποτελέσματα επαληθεύονται πειραματικά με τη χρήση δοκιμαστικής εγκατάστασης.

Η πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση είναι μια πολύ γνωστή τεχνική για την απόσβεση των μηχανικών κραδασμών των κατασκευών. Λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, η πιεζοκεραμική μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Η σύνδεση ηλεκτρικών δικτύων με τα ηλεκτρόδια των πιεζοκεραμικών επιτρέπει τη διάχυση ενός μέρους αυτής της ενέργειας στην ηλεκτρική παραδιακλάδωση. Οι γραμμικές παραδιακλαδώσεις συντονισμού που αποτελούνται από επαγωγή και αντίσταση(R-L) χρησιμοποιούνται ευρέως, αλλά η δυνατότητα απόσβεσης τους είναι περιορισμένη. Προσθέτοντας μία αρνητική χωρητικότητα στην παραδιακλάδωση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά η απόδοση, όμως αυτά τα δίκτυα είναι επιρρεπή σε αστάθεια. Το έργο των (Marcus Neubauer J. W., Vibration Damping with Piezoceramics Shunted to Negative Capacitance Networks, 2009) καθορίζει την απόδοση απόσβεσης των παραδιακλαδώσεων αρνητικής χωρητικότητας. Παρουσιάζεται ο βέλτιστος συντονισμός των παραμέτρων του δικτύου καθώς και η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας και το περιθώριο σταθερότητας. Τα αποτελέσματα επικυρώνονται με μετρήσεις.

Η ικανότητα ενός μόνο πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με μία παραδιακλάδωση αρνητικής χωρητικότητας για την απόσβεση κραδασμών πολλών ιδιομορφών χρησιμοποιείται στο έργο των (C. Bricault, 2018) για να μειώσει δραστικά την ακουστική ακτινοβολία μιας δονούμενης πλάκας. Με μια σταθερή γεωμετρία, οι ελαστικές ιδιότητες μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας την αντίσταση και την αρνητική χωρητικότητα της παραδιακλάδωσης, μέσω μιας τιμής της αρνητικής χωρητικότητας κοντά στον τομέα αστάθειας του κυκλώματος, ενώ η ακαμψία μπορεί να τοποθετηθεί στην περιοχή αποσκλήρυνσης του συστήματος, με την αντίσταση να συντονίζει τόσο την ακαμψία όσο και τις απώλειες. Μέσω βέλτιστου σχεδιασμού, πολλές ιδιομορφές με μη μηδενικούς ηλεκτρομηχανικούς συντελεστές σύζευξης μπορούν να αποσβεστούν ταυτόχρονα. Ως αποτέλεσμα σε αυτές τις συχνότητες η ακουστική ακτινοβολία της πλάκας μειώνεται δραστικά. Τα αποτελέσματα ανοίγουν προοπτικές για την αντιμετώπιση των προβλημάτων δόνησης και ακουστικής σε βιομηχανικό πλαίσιο.

Τα τελευταία χρόνια, πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι η απορρόφηση ήχου ευρείας ζώνης ή η καταστολή κραδασμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με πιεζοηλεκτρικά υλικά παραδιακλαδισμένα με αρνητική χωρητικότητα. Ωστόσο, τα περισσότερα συστήματα που χρησιμοποιούν τα κυκλώματα παραδιακλάδωσης αρνητικής χωρητικότητας εμφανίζουν τις αστάθειες τους στη βέλτιστη κατάσταση, οι οποίες ουσιαστικά προκαλούνται από τις μοναδικές ιδιότητες μεταβολής των ελαστικών σταθερών των πιεζοηλεκτρικών υλικών όταν παραδιακλαδίζονται με αρνητική χωρητικότητα. Η εργασία των (Ji-Ying Hu, 2017) στοχεύει στη διερεύνηση των επιδράσεων των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης αρνητικής χωρητικότητας στις ελαστικές σταθερές μιας πιεζοηλεκτρικής κεραμικής πλάκας μέσω θεωρητικών αναλύσεων και πειραμάτων, δίνοντας μια ορθολογική εξήγηση στο γιατί το κύκλωμα παραδιακλάδωσης αρνητικής χωρητικότητας είναι επιρρεπές στο να κάνει τη δομή ασταθή. Αρχικά οι σχέσεις μεταξύ των ελαστικών σταθερών  $c_{11}$ ,  $c_{33}$ ,  $c_{55}$  του πιεζοηλεκτρικού κεραμικού και της αρνητικής χωρητικότητας παραδιακλάδωσης προκύπτουν με τον πιεζοηλεκτρικό συστατικό νόμο θεωρητικά. Στη συνέχεια, δημιουργείται μια πειραματική διάταξη για την επαλήθευση των θεωρητικών αποτελεσμάτων μέσω της παρατήρησης της αλλαγής της ελαστικής σταθεράς  $c_{55}$  της παραδιακλαδισμένης πιεζοηλεκτρικής πλάκας με τη μεταβολή της αρνητικής χωρητικότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν καλά με τις θεωρητικές αναλύσεις.

## 2.3 Ακουστικός Έλεγχος με παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά.



Εικόνα 6: Έξυπνο πάνελ για μείωση μεταφοράς ήχου. Πηγή: Jaehwan Kim, J.-K.L (2002, June 1). Broadband transmission noise reduction of smart panels featuring piezoelectric shunt circuits and sound-absorbing material.

Η παραδιακλαδωμένη πιεζοηλεκτρική απόσβεση χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικά παραδιακλαδωμένο αποσβεστήρα συνδεδεμένο με μία κατασκευή πάνελ ώστε να περιοριστεί η μετάδοση ακουστικού θορύβου. Το έργο των (Szu Cheng Lai, 2017) επεξηγεί τα αποτελέσματα της ισοδύναμης σε σειρά αντίστασης ενός πιεζοηλεκτρικού αποσβεστήρα σε ένα σύστημα και αποδεικνύεται ότι αυξημένη αντίσταση οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της μεταδοτικότητας του ήχου, καθώς μειώνεται η ικανότητα μηχανικής απόσβεσης του συστήματος. Τέλος φαίνεται με πειραματικά αποτελέσματα ότι η χρήση μίας τέτοιας αντίστασης σε ένα παραδιακλαδωμένο κύκλωμα, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην απόδοση μείωσης του θορύβου.

Στο έργο των (C.H. Nguyen, 2003) παρουσιάζεται μία μοντελοποίηση πεπερασμένου στοιχείου μιας δοκού αλουμινίου με πρόβολο, με δύο λεπτές πλάκες από πιεζοκεραμικό υλικό. Περιγράφονται οι ενεργοποιητές ως πηγή κυμάτων μέσα στη δοκό, που μόλις διεγερθεί ακτινοβολεί ηχητικά κύματα στον περιβάλλοντα αέρα. Καθώς οι πλάκες PZT πολώνονται μέσα κατεύθυνση του πάχους τους, ενώ λειτουργούν στην επίπεδη διάσταση, οι ιδιότητες του υλικού εισόδου τους είναι ορθότροπες. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνει υπόψη το φυσικό δεσμό μεταξύ ενεργοποιητών και δοκού, καθώς και τις συνθήκες απόσβεσης της δοκού. Η ηχητική ακτινοβολία της δονούμενης δοκού υπολογίζεται μέσα σε μια σφαίρα αέρα που περιβάλλει τη δοκό και σε επαφή με αυτό από μια ζώνη αλληλεπίδρασης υγρού-κατασκευής.

Ο αποσβεστήρας μικροδιάτρητου πάνελ (MPP), αποτελείται από ένα MPP τοποθετημένο μπροστά από έναν τοίχο ή μια κοιλότητα. Ένας πιθανός τρόπος βελτίωσης της απόδοσης του στην ηχητική απορροφητικότητα είναι η χρήση των κραδασμών του πάνελ του MPP για να επιτευχθεί επιπλέον ηχοαπορρόφηση μέσω της σύζευξης κατασκευής-ακουστικής. Το έργο των (Xiang Liu) διερευνάει τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης μεταξύ του παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού κεραμικού και του διάτρητου πάνελ και στη συνέχεια αναπτύσσεται μια στρατηγική για την κατασκευή πολλαπλών ηλεκτρικών συντονισμών στις επιθυμητές συχνότητες για μεγάλο εύρος ζώνης απορρόφησης με παράλληλο κύκλωμα παραδιακλάδωσης. Τα πειράματα έδειξαν ότι ο ηλεκτρικός συντονισμός μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια ρυθμίζοντας τις παραμέτρους του κυκλώματος.

Η δυνατότητα μείωσης θορύβου των πιεζοηλεκτρικών έξυπνων πάνελ μελετάται σε πειραματικό στάδιο στο (Jaehwan Kim, 2002). Ένα πιεζοηλεκτρικό έξυπνο πάνελ αποτελείται από μία κατασκευή από πλάκες πάνω στην οποία τοποθετούνται πιεζοηλεκτρικά επιθέματα με ηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα κυκλώματα. Το ηχοαπορροφητικό υλικό είναι κολλημένο στην επιφάνεια της κατασκευής και μπορεί να απορροφήσει τον ήχο που μεταδίδεται στην περιοχή μεσαίας συχνότητας αποτελεσματικά, ενώ η χρήση παραδιακλαδωμένου πιεζοηλεκτρικού αποσβεστήρα μπορεί να μειώσει τη μετάδοση και στις συχνότητες συντονισμού. Ένα παραδιακλαδωμένο κύκλωμα συντονισμού αποτελείται από μία αντίσταση και έναν επαγωγέα σε σειρά τοποθετημένους, που προσδιορίζονται μεγιστοποιώντας την ενέργεια που διαχέεται μέσω του κυκλώματος. Τέλος η απόδοση μείωσης του μεταδιδόμενου θορύβου των έξυπνων πάνελ δοκιμάστηκε σε μια ακουστική σήραγγα. Τα πάνελ ήταν τοποθετημένα στη μέση της σήραγγας και μετρήθηκε η μεταδιδόμενη ηχητική τους πίεση. Όταν ένα απορροφητικό υλικό συγκολλείται σε μία μόνο πλάκα, παρατηρείται μεγάλη μείωση του εκπεμπόμενου θορύβου στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, εκτός από τη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού της πλάκας. Με την ενεργοποίηση της πιεζοηλεκτρικής παραδιακλαδωμένης απόσβεσης, επιτυγχάνεται μείωση του θορύβου και στη συχνότητα συντονισμού.

Η ακουστική σύνθετη αντίσταση στο διάφραγμα ενός ηλεκτροακουστικού μορφοτροπέα μπορεί να μεταβληθεί χρησιμοποιώντας μία σειρά βασικών στρατηγικών ηλεκτρικού ελέγχου, μεταξύ των οποίων είναι τα ηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα κυκλώματα. Αυτά συγκρίνονται με τεχνικές ενεργητικής ακουστικής ανάδρασης. Στο έργο των (Herve Lissek, 2011) περιγράφεται η θεωρία που ενοποιεί όλες αυτές τις παθητικές και ενεργητικές στρατηγικές ελέγχου σύνθετης ακουστικής αντίστασης, εισάγοντας την έννοια των ηλεκτροακουστικών αποσβεστήρων. Επισημοποιείται η ισοδυναμία μεταξύ παραδιακλάδωσης και ενεργού ελέγχου μέσω της εισαγωγής ενός ακουστικού αντηχείου ενός βαθμού ελευθερίας που αντιπροσωπεύει και τις ηλεκτρικές παραδιακλάδωσεις και τις ακουστικές ανατροφοδοτήσεις. Αντίθετα παρουσιάζονται ηλεκτρικά δίκτυα που

μιμούνται τις επιδόσεις των τεχνικών ενεργητικής ανάδρασης, προσδιορίζοντας τις παραδιακλαδώσεις με έλεγχο ενεργής σύνθετης αντίστασης. Τέλος προτείνονται παραδείγματα ηλεκτρικών παραδιακλαδώσεων για ενεργή ηχοαπορρόφηση.

Στο έργο των (E. Fukada, 2004) η ηχομόνωση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια πιεζοηλεκτρική πολυμερική μεμβράνη συνδεδεμένη με ένα κύκλωμα ανάδρασης αρνητικής χωρητικότητας. Ένα κυρτό φιλμ εντοπίστηκε στη μέση ενός ακουστικού σωλήνα και η απώλεια μετάδοσης του ήχου μέσω του φιλμ προσδιορίστηκε στο εύρος συχνοτήτων ήχου. Σε οποιαδήποτε επιλεγμένη συχνότητα, η πλήρης απομόνωση του ήχου επιτεύχθηκε με την προσαρμογή της ανάδρασης, δηλαδή η πολύπλοκη χωρητικότητα του κυκλώματος αντιστοιχήθηκε ακριβώς με αυτή του φιλμ.

Μια μέθοδος μειωμένης τάξης πεπερασμένων/οριακών στοιχείων (FEM/BEM) για τον έλεγχο της ακτινοβολίας θορύβου και μετάδοσης του ήχου της δονούμενης κατασκευής με ιξωδοελαστικές και παθητικές πιεζοηλεκτρικές θεραπείες είναι το θέμα στην εργασία του (Larbi, 2017). Το σύστημα είναι μια δομή 'σάντουιτς' που αποτελείται από ελαστικές επιφάνειες και έναν ιξωδοελαστικό πυρήνα (με επιφανειακά τοποθετημένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα) και συνδέεται με εξωτερικούς/εσωτερικούς ακουστικούς τομείς. Η στρατηγική παθητικής παραδιακλαδωμένης απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε για την εξασθένηση των κραδασμών στο εύρος χαμηλής συχνότητας, ενώ χρησιμοποιήθηκαν ιξωδοελαστικά υλικά για την περιοχή υψηλότερης συχνότητας. Αυτό που κάνει την εργασία αυτή πρωτότυπη είναι ότι αξιολόγησε τις κλασικά χρησιμοποιούμενες μεθόδους FEM/BEM και ανέπτυξε ένα μοντέλο μειωμένης τάξης, ικανή να αποτυπώσει τα κύρια χαρακτηριστικά της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Μια θεωρητική και πειραματική ανάλυση του ευρυζωνικού ελέγχου μετάδοσης ήχου ενός πάνελ αλουμινίου στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 30 Hz και 1 kHz παρουσιάζεται στο (Ming Yuan, 2013). Με βάση την ανάλυση των χαρακτηριστικών των ζευγαριών αισθητήρων-ενεργοποιητών, πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδέθηκαν στην κατασκευή και χρησιμοποιήθηκαν ως ενεργοποιητές, ενώ επιταχυνσιόμετρα χρησιμοποιήθηκαν ως αισθητήρες. Ο υβριδικός αποκεντρωμένος νόμος ελέγχου περιλαμβάνει δύο μέρη: το πρώτο είναι ο ελεγκτής άμεσης ανάδρασης ταχύτητας, ενώ ο άλλος, ονομάζεται ελεγκτής αρνητικής επιτάχυνσης ανάδρασης. Ο αρχιτεκτονικός έλεγχος είναι αποκεντρωμένος, πράγμα που σημαίνει ότι ο κάθε ελεγκτής λειτουργεί ανεξάρτητα. Λόγω της δεύτερης τάξης δυναμικής ιδιότητας του ελεγκτή και το γεγονός ότι οι συχνότητες της κατασκευής μπορεί να μετατοπιστούν, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hilbert-Huang για τη γρήγορη και αυτοματοποιημένη αναγνώριση της φυσικής συχνότητας. Τέλος, τα πειράματα ανοιχτού και κλειστού βρόχου υποστήριξαν τη θεωρητική ανάλυση, ενώ τα αποτελέσματα ενεργού ελέγχου δείχνουν ότι το επίπεδο δόνησης του πάνελ μπορεί να μειωθεί κατά 16,7

ντεσιμπέλ και το επίπεδο ηχητικής πίεσης θα μπορούσε να μειωθεί περισσότερο από 7 db.

Δύο μέθοδοι για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών επαγωγής και αντίστασης του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος σε ένα πιεζοκεραμικό υλικό, το οποίο είναι συνδεδεμένο σε μια πλάκα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ηχητική ακτινοβολία και η ακουστική πίεση σε ένα σημείο της πλάκας είναι το θέμα στο (M. Bulent Ozer, 2003). Στην πρώτη μέθοδο χρησιμοποιείται η αρχή της απόσβεσης κραδασμών του den Hartog. Στη δεύτερη χρησιμοποιείται το θεώρημα της αντιστροφής πινάκων του Sherman Morrison. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και οι μελέτες παρουσιάστηκαν χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μοντέλο για το πιεζοκεραμικό και ένα μη γραμμικό μοντέλο για το πιεζοκεραμικό που ευθύνεται για την εγγενή διηλεκτρική υστέρηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δεύτερη μέθοδος ήταν ανώτερη γεγονός που καθιστά αναγκαίο την συμπερίληψη της μη γραμμικότητας στην διαδικασία βελτιστοποίησης.

Στο πλαίσιο της μείωσης του θορύβου και των κραδασμών από παθητικές πιεζοηλεκτρικές συσκευές, το (W. Larbi J.-F. D., 2011) παρουσιάζει τη θεωρητική διατύπωση και εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων κραδασμο-ακουστικών προβλημάτων σε πιεζοηλεκτρικές σύνθετες κατασκευές που συνδέονται με παραδιακλαδωμένα ηλεκτρικά κυκλώματα. Αυτό που κάνει το έργο πρωτότυπο είναι ότι διαμορφώθηκε ένα σύστημα ηλεκτρομηχανικής-ακουστικής σύζευξης, εφαρμόστηκε μίας ακριβή και φθηνή πολυστρωματική σύνθετη πλάκα με ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά στρώματα συνδεδεμένα σε κυκλώματα παραδιακλάδωσης συντονισμού και τέλος αναπτύχθηκε ένα αποδοτικό στοιχείο διεπαφής ρευστού-κατασκευής.

Στο έργο των (B.K. MUKHERJEE, 1997) κατηγοριοποιούνται υλικά για ακουστικούς μορφοτροπείς. Οι μορφοτροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται ως ακουστικοί αισθητήρες και προβολείς σε ενεργές μεθόδους ελέγχου κραδασμών, ενώ η σωστή χρήση τους απαιτεί καλή κατανόηση των μη γραμμικών ιδιοτήτων τους και των διηλεκτρικών, μηχανικών και πιεζοηλεκτρικών απωλειών στο υλικό. Η σύνθετη αντίσταση των πιεζοηλεκτρικών αντηχείων αναλύεται γύρω από τους συντονισμούς τους για τον προσδιορισμό των διηλεκτρικών, ελαστικών και πιεζοηλεκτρικών συντελεστών ως μιγαδικές σταθερές, για να ληφθούν υπόψη όλες οι απώλειες στα υλικά. Ακόμη οι καμπύλες σύνθετης αντίστασης μετριούνται ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης συνεχούς τάσης προκειμένου να προσδιοριστεί το πεδίο αντίστασης των σταθερών. Τέλος αναλύοντας τους θεμελιώδεις και υψηλότερους συντονισμούς, η διασπορά στις σταθερές μπορεί να μελετηθεί, ενώ ένα νέο ισοδύναμο κύκλωμα για το υλικό λαμβάνει υπόψη όλες τις απώλειες.



Η συμπίεσιμη περιορισμένη απόσβεση στρώσεων (CCLD) είναι μια νέα, ημιενεργή, ελαφριά, συμβατή λύση για τον περιορισμό των κραδασμών που βασίζεται στη γνωστή αρχή περιορισμένης απόσβεσης. Στο (Tom Ehrig M. D., 2020) μία διάταξη τέτοια που μοιάζει με σάντουιτς αποτελείται από μια κατασκευή, μια πλάκα περιορισμού και έναν συμπίεσιμο πυρήνα αφρού ανοιχτής κυψέλης ενδιάμεσα. Έτσι είναι επιτρεπτή η ρύθμιση της συμπεριφοράς των κραδασμών της κατασκευής, αλλάζοντας τη συμπίεση του πυρήνα με χρήση διαφορετικών πιέσεων ενεργοποίησης. Ο στόχος είναι να δείχτεί σε ποιο βαθμό και σε ποιο εύρος συχνοτήτων μπορεί να βελτιστοποιηθεί η ακουστική συμπεριφορά με χρήση της παραπάνω μεθόδου. Επιπροσθέτως η απώλεια μετάδοσης ήχου, σημαντικός δονητικός-ακουστικός δείκτης, προσδιορίζεται σε ένα ακουστικό παράθυρο δοκιμών διαφορετικών πιέσεων ενεργοποίησης που καλύπτουν συχνότητες από 0,5 έως 5 kHz. Τέλος οι διαφορετικές πιέσεις ενεργοποίησης που εφαρμόστηκαν προκαλούν μία διακύμανση του πάχους του στρώματος του πυρήνα, αλλά το αποτέλεσμα των αλλαγών της ακαμψίας και της απόσβεσης της δομής δεν έχει σημαντική επίδραση στο συντελεστή απώλειας μετάδοσης ήχου έως περίπου το 1 kHz. Ωστόσο, μεταξύ 1 kHz και 5 kHz, ο συντελεστής απώλειας μετάδοσης ήχου μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά εφαρμόζοντας πίεση ενεργοποίησης, λόγω μιας συμπεριφοράς στην οποία κυριαρχεί η απόσβεση γύρω από την κρίσιμη συχνότητα.

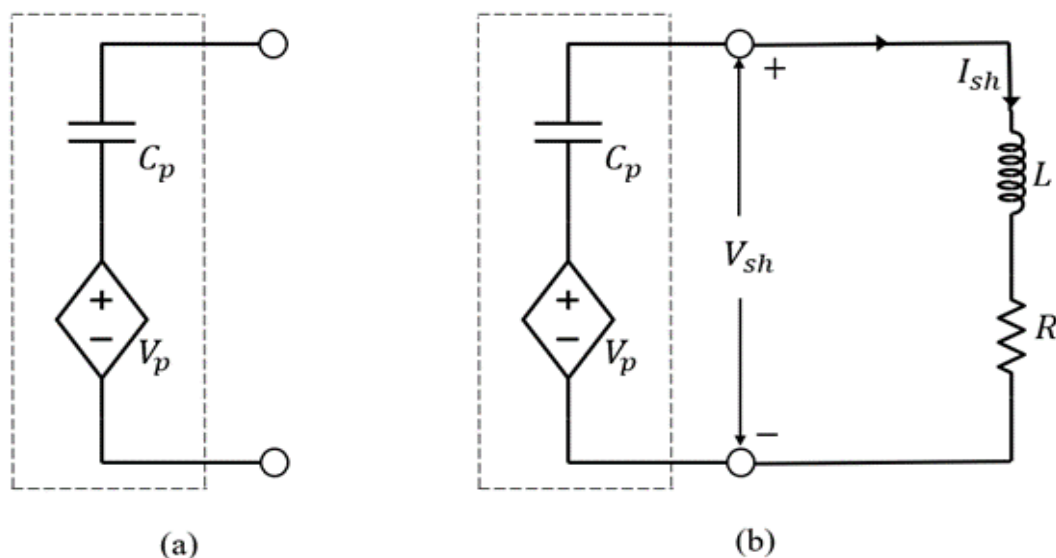
Στο (ANDREA BACIGALUPO, 2019) παρουσιάζεται μια νέα ειδική κατηγορία ενεργών περιοδικών μεταϋλικών που έχει σχεδιαστεί κατάλληλα για την επίτευξη υψηλών επιδόσεων σε ρυθμιζόμενα ακουστικά φίλτρα. Το μεταϋλικό κατασκευάζεται από έναν κρύσταλλο συνδεδεμένο με τοπικά αντηχεία, αποτελούμενα από μάζες που περικλείονται μέσα σε πιεζοηλεκτρικούς δακτυλίους παραδιακλαδωμένα με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που δεν διαχέεται. Η χρήση παθητικών δίπολων, με μεταβλητή σύνθετη αντίσταση/εισδοχή, καθιστά εφικτή την πλήρη βελτίωση των συστατικών ιδιοτήτων του πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωμένου υλικού. Με την εκμετάλλευση μιας γενίκευσης της θεωρίας των Floquet-Bloch, η διάδοση του ελεύθερου κύματος στο ενεργό μεταϋλικό ερευνάται, μεταβάλλοντας μια παράμετρο βελτιστοποίησης, για να αποδειχτεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου πιεζοηλεκτρικού συστήματος ως συσκευή παθητικού ελέγχου διάδοσης κυμάτων. Τέλος, παρέχονται ευρείες οδηγίες σχεδιασμού ενεργών ακουστικών φίλτρων, που προσαρμόζονται σε μια μεταβαλλόμενη απαίτηση απόδοσης σε πραγματικό χρόνο.

Τα υπάρχοντα παθητικά υλικά είναι ανεπαρκή για να αντιμετωπίσουν πολλά προβλήματα στον έλεγχο του θορύβου, των κραδασμών και της αντήχησης. Μόνο πολύ πρόσφατα έχουν ληφθεί υπόψη τα ενεργά συστήματα για τον έλεγχο του ήχου. Στο (OLSON, 1956) παρουσιάζεται ο ηλεκτρονικός ηχοαπορροφητής, ο οποίος είναι ένας ενεργός τύπου απορροφητής ήχου. Ο απορροφητής αυτός αποτελείται από ένα μικρόφωνο, έναν ενισχυτή και ένα μεγάφωνο συνδεδεμένα με τρόπο αντίστροφης ανάδρασης. Το ηλεκτρονικό σύστημα μειώνει την αποτελεσματική

ακουστική σύνθετη αντίσταση στην περιοχή του αποσβεστήρα. Κατά συνέπεια ο ηλεκτρονικός απορροφητής ήχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμβατικός απορροφητής ήχου ή ως μειωτής ήχου τύπου ζώνης. Τέλος ο ηλεκτρονικός μειωτής κραδασμών αποτελείται από έναν αισθητήρα, έναν ενισχυτή και έναν οδηγό συνδεδεμένο είτε με αρνητικό είτε με θετικό τρόπο ανάδρασης.

Ο έλεγχος θορύβου έχει κερδίσει πολύ την προσοχή πρόσφατα. Ωστόσο, η παρουσία μη γραμμικοτήτων στα μονοπάτια σήματος για ορισμένες εφαρμογές μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές δυσκολίες στη λειτουργία των αλγορίθμων ελέγχου. Ειδικότερα, αυτό το πρόβλημα είναι κοινό στον έλεγχο του δομικού θορύβου, όπου χρησιμοποιείται ένα πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης. Όχι μόνο οι δονούμενες δομές μπορεί να παρουσιάσουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά, αλλά και οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές. Στο (Sebastian KURCZYK, 2018), εξετάζεται το περίβλημα της ενεργής συσκευής. Στόχος δηλαδή είναι να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος που προέρχεται από το περίβλημα, ελέγχοντας τους κραδασμούς των τοιχωμάτων του. Τέλος εφαρμόζεται η τεχνολογία παραδιακλάδωσης και ένας αλγόριθμος ελέγχου ο οποίος επαληθεύεται μέσω προσομοιώσεων χρησιμοποιώντας δεδομένα που λαμβάνονται από ένα πραγματικό αντικείμενο.

## 2.4 Παραδιακλαδωμένα κυκλώματα για τον έλεγχο μίας ιδιομορφής.

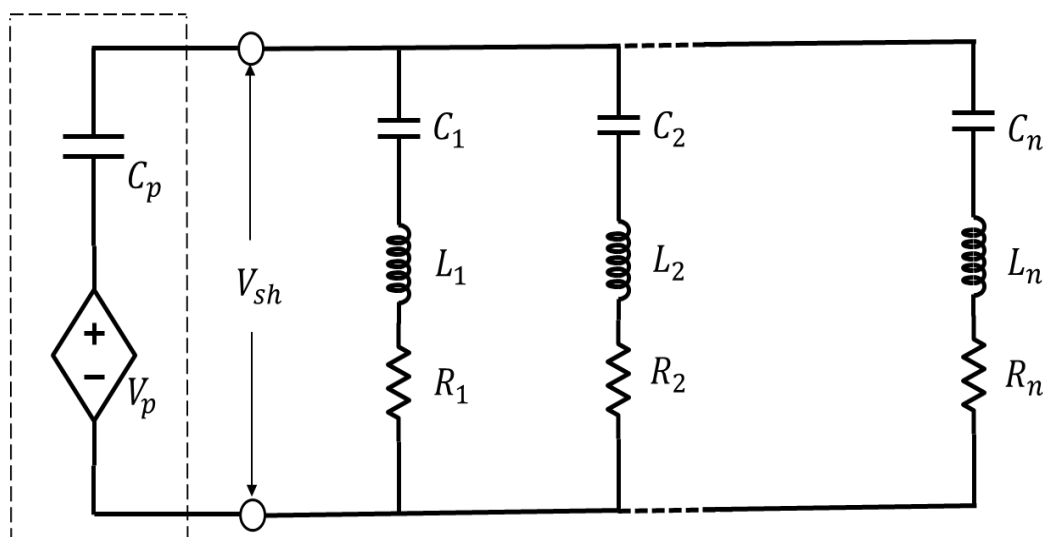


Εικόνα 7: Κύκλωμα παραδιακλάδωσης μίας ιδιομορφής με 1 PZT.

Η εργασία των (M. Berardengo A. C., 2015) ασχολείται με τον παθητικό έλεγχο κραδασμών μίας ιδιομορφής με την παραδιακλάδωση πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών σε ηλεκτρικές σύνθετες αντιστάσεις που αποτελούν τη σειρά μιας αντίστασης και μιας αυτεπαγωγής. Αν και αυτό το είδος στρατηγικών εξασθένησης κραδασμών χρησιμοποιείται για καιρό, υπάρχουν άλυτα ακόμα προβλήματα. Συγκεκριμένα, αυτού του είδους έλεγχος υποφέρει από ζητήματα σχετικά με την ευρωστία επειδή τα χαρακτηριστικά της σύνθετης ηλεκτρικής αντίστασης δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις αλλαγές του συστήματος. Διερευνώνται λοιπόν διαφορετικοί αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση των τιμών των ηλεκτρικών στοιχείων της σύνθετης αντίστασης παραδιακλάδωσης. Αρχικά παρέχεται μια ανάλυση απόδοσης, συγκρίνοντας την εξασθένηση που μπορεί να επιτευχθεί με αυτούς τους αλγόριθμους. Έπειτα, διενεργείται ανάλυση και σύγκριση των ίδιων αλγορίθμων ως προς την ευρωστία. Η προσέγγιση που υιοθετείται εδώ επιτρέπει τον προσδιορισμό του αλγορίθμου που είναι ικανός να παρέχει τον υψηλότερο βαθμό ευρωστίας και εξηγεί τις λύσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επίλυση ορισμένων από τα ζητήματα που αφορούν την πρακτική εφαρμογή αυτής της τεχνικής ελέγχου. Τα αναλυτικά και αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο έγγραφο έχουν επικυρωθεί πειραματικά μέσω μιας κατάλληλης δοκιμής

## 2.5 Παραδιακλαδωμένα κυκλώματα για τον έλεγχο πολλών ιδιομορφών.

Equivalent circuit  
for Piezo Element



Εικόνα 8: Κύκλωμα παραδιακλάδωσης πολλών ιδιομορφών με 1 PZT.

Στην εργασία των (Boris Lossouarn J.-F. D., 2018) προτείνεται η εφαρμογή ενός πολλών ιδιομορφών και πλήρως παθητικού πιεζοηλεκτρικού απορροφητή κραδασμών που μπορεί να μετριάξει αρκετούς συντονισμούς μιας μη γραμμικής κατασκευής. Με την επέκταση της αρχής της ομοιότητας, ένα ανάλογο ηλεκτρικό δίκτυο σχεδιάστηκε για να αναπαράξει τη δυναμική της μηχανικής κατασκευής. Αρκετά ηλεκτρικά αντηχεία είναι ταυτόχρονα συντονισμένα με τους μηχανικούς συντονισμούς, παρέχοντας έτσι έναν πολλών ιδιομορφών απορροφητή κραδασμών μέσω της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης μιας σειράς πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Επιπλέον, η χρήση ενός μη γραμμικού πυκνωτή στο ανάλογο δίκτυο δημιούργησε μια αυτόνομη προσαρμογή των συχνοτήτων των ηλεκτρικών αντηχείων όταν η δομή φτάσει στον μη γραμμικό τομέα. Τέλος η μέθοδος αποδεικνύεται πειραματικά μέσω της μείωσης των κραδασμών σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων που καλύπτει τις τρεις πρώτες ιδιομορφές ενός δοκαριού με κυβική μη γραμμικότητα.

Ένας ηλεκτρομαγνητικός αποσβεστήρας πολλών ιδιομορφών που χρησιμοποιεί τη μέθοδο ροής σταθερού ρεύματος για τον ημιενεργό έλεγχο δόνησης εύκαμπτων κατασκευών είναι το θέμα στο (Tai-Hong Cheng, 2009). Ο ηλεκτρομαγνητικός αποσβεστήρας παραδιακλάδωσης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την ηλεκτρομαγνητο-μηχανική συζευγμένη μεταγωγή μεταξύ δονούμενων κατασκευών με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης, αποτελείται από ένα πηνίο και ένα μαγνήτη. Το αγωγίμο πηνίο συνδέεται με τα δοκάρια ενώ τα δύο άκρα του πηνίου συνδέονται με το κύκλωμα παραδιακλάδωσης ρεύματος για τη μείωση των κραδασμών. Για την αναλυτική και πειραματική επικύρωση του ηλεκτρομαγνητικού αποσβεστήρα παραδιακλάδωσης πολλαπλών ιδιομορφών οι δύο πρώτες, αυτές του δοκαριού ελέγχθηκαν ημιενεργά. Για τις αποκρίσεις συχνότητας, τα χαρακτηριστικά δόνησης και απόσβεσης των εύκαμπτων κατασκευών διερευνήθηκαν μαζί με τον ηλεκτρομαγνητικό παραδιακλαδωμένο αποσβεστήρα με αναφορές σε αλλαγές στις παραμέτρους του κυκλώματος. Ακόμη η επίδραση της μαγνητικής έντασης στην παραδιακλαδωμένη απόσβεση μελετήθηκε μεταβάλλοντας το κενό μεταξύ της δοκού αλουμινίου και του μόνιμου μαγνήτη. Η θεωρητική πρόβλεψη της απόκρισης συχνότητας των ηλεκτρομαγνητο-μηχανικά συζευγμένων δοκών έδειξε καλή συμφωνία με το πειραματικό αποτελέσματα. Συμπερασματικά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αποσβεστήρας μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία για τη μείωση της δόνησης πολλών ιδιομορφών εύκαμπτων κατασκευών.

Δομικές δονήσεις πολλών ιδιομορφών μπορούν να κατασταλούν μέσω της σύνδεσης μιας ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης στους ακροδέκτες ενός συνδεδεμένου πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα. Οι λεγόμενες αντηχητικές παραδιακλαδώσεις, μια συνήθη κατηγορία σύνθετων αντιστάσεων παραδιακλάδωσης, παρέχουν καλή ονομαστική απόδοση απόσβεσης αλλά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της χωρητικότητας του μορφοτροπέα και στις δομικές συχνότητες συντονισμού. Στο (Dominik Niederberger, 2004)

αναφέρεται μια νέα τεχνική που ελαχιστοποιεί τη σχετική διαφορά φάσης μεταξύ ενός σήματος αναφοράς δόνησης και του παραδιακλαδωμένου ρεύματος, με αποτέλεσμα οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος να μπορούν να ρυθμιστούν βέλτιστα μέσω του διαδικτύου. Πειράματα σε μια δοκό επικύρωσαν την προτεινόμενη τεχνική και απέδειξαν την απλότητα της εφαρμογής της. Ο προσαρμοστικός νόμος συγκλίνει γρήγορα και διατηρεί τη βέλτιστη απόδοση παρουσία περιβαλλοντικών αβεβαιοτήτων.

Στο έργο των (S. Behrens S. O.) παρουσιάζεται ένας νέου τύπου παθητικός παραδιακλαδωμένος ελεγκτής, ο οποίος είναι ικανός να αποσβέσει πολλές ιδιομορφές μίας εύκαμπτης κατασκευής χρησιμοποιώντας έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα. Η παραδιακλαδωμένη μέθοδος της ροής ρεύματος έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες, όπως το ότι είναι πιο απλή στην εφαρμογή της και απαιτεί λιγότερο διακεκριμένα στοιχεία κυκλώματος. Τέλος η στρατηγική ελέγχου επιβεβαιώνεται μέσω πειραματικών εργασιών σε μία πιεζοηλεκτρική ελασματοποιημένη, απλώς στηριζόμενη δοκό.

Μία μέθοδος για παθητική πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση πολλών ιδιομορφών, χρησιμοποιώντας έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα PZT είναι το θέμα αναφοράς στο (WU, 1998). Η μέθοδος αποτελείται από ένα κύκλωμα μπλοκαρίσματος σε σειρά με κάθε παράλληλο κύκλωμα αντίστασης-επαγωγής σχεδιασμένο ώστε να ελέγχει μία δομική ιδιομορφή, ενώ το κύκλωμα μπλοκαρίσματος αποτελείται από ένα παράλληλο κύκλωμα συντονισμού αντίστασης-επαγωγής, ή μία σειρά αυτών. Ο αριθμός των συντονιστικών κυκλωμάτων σε κάθε παραδιακλαδωμένο κύκλωμα εξαρτάται από το αν ο αριθμός των δομικών ιδιομορφών ελέγχεται ταυτόχρονα. Επιπροσθέτως όταν τα επιμέρους παραδιακλαδωμένα κυκλώματα συνδέονται στους 2 ακροδέκτες του PZT, δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, καθώς το κάθε ένα είναι λειτουργικό για την δική του ιδιομορφή. Τέλος η μέθοδος αυτή είναι πιο εύκολη και αξιόπιστη για λεπτομερή ρύθμιση και απόσβεση, ενώ πειραματικά η μέθοδος έφερε μείωση κραδασμών 2 και 3 ιδιομορφών με χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα συζευγμένου με μία 2 φτερών αλουμινένια δοκό.

Παθητικές πιεζοηλεκτρικές συσκευές απόσβεσης συνεχίζουν να μελετώνται. Οι συσκευές αυτές, που αποτελούνται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και την αντηχών παραδιακλάδωση, είναι ανάλογες με τους μηχανικά αποσβεσμένους απορροφητές κραδασμών. Παλαιά, μια πιεζοηλεκτρική συσκευή χρησιμοποιούνταν για την καταστολή μίας μόνο δομικής ιδιομορφής. Στην εργασία του (HOLLKAMP, 1994) η θεωρία επεκτάθηκε έτσι ώστε ένα μόνο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή πολλαπλών ιδιομορφών. Ο αποσβεστήρας πολλαπλών ιδιομορφών παρουσιάστηκε πειραματικά ως μια συσκευή δύο ιδιομορφών που εφαρμόζεται σε μια δοκό.

Μια στρατηγική πολλών ιδιομορφών απόσβεσης εφαρμόζεται με σύζευξη μίας δοκού στο ανάλογο ηλεκτρικό της δίκτυο. Το δίκτυο αυτό προέρχεται από την άμεση ηλεκτρομηχανική αναλογία που εφαρμόζεται σε ένα εγκάρσιο πλέγμα σημειακών μαζών που αντιπροσωπεύει το διακριτό μοντέλο μιας δοκού, ενώ οι μηχανικές και ηλεκτρικές κατασκευές συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας σειράς πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Ένα διακριτικό και ένα ημι-συνεχές μοντέλο προτείνονται στο (B Lossouarn, 2015) για την περιγραφή της πιεζοηλεκτρικής σύζευξης. Και τα δύο βασίζονται στη διατύπωση του πίνακα μεταφοράς και θεωρούν έναν πεπερασμένο αριθμό επιθεμάτων, ενώ φαίνεται ότι μια απλή συνθήκη σύζευξης δίνει ένα δίκτυο που προσεγγίζει τις ιδιομορφές ιδιότητες της δοκού. Η στρατηγική και τα μοντέλα επικυρώθηκαν πειραματικά με τη σύζευξη μιας ελεύθερης δοκού σε ένα εντελώς παθητικό δίκτυο, με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μείωση κραδασμών πολλών ιδιομορφών, κάτι που απέδειξε την αποτελεσματικότητα της λύσης ελέγχου και τις δυνατότητές της από την άποψη της πρακτικής εφαρμογής.

Μια μέθοδος για την πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση πολλών ιδιομορφών παρουσιάζεται στο (S. Behrens S. O., 2002). Ο προτεινόμενος παραδιακλαδωμένος ελεγκτής ροής ρεύματος έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με προηγούμενα συστήματα παραδιακλαδωμένης απόσβεσης, καθώς είναι απλούστερος στην εφαρμογή και απαιτεί μικρό αριθμό παθητικών στοιχείων στο κύκλωμα. Η στρατηγική παθητικού ελέγχου επικυρώθηκε μέσω πειραματισμού σε δύο πιεζοηλεκτρικές δομές.

Στο έργο των (J. Tang, 1999) προτείνεται ένα σχέδιο περιορισμού κραδασμών πολλών ιδιομορφών για περιοδικά περιστρεφόμενες δομές. Σε κάθε μία από τις περιπτώσεις εφαρμόστηκαν πανομοιότυπα ενεργητικά-παθητικά υβριδικά πιεζοηλεκτρικά δίκτυα, όπου η ενεργή φόρτιση και η ανάδραση ρεύματος χρησιμοποιούνται μαζί με τα παθητικά παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά για βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Με την εκμετάλλευση της περιστροφικής περιοδικότητας, συντίθεται ένας νέος αλγόριθμος για τον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμέτρων ελέγχου. Τέλος αποδεικνύεται ότι αυτή η υβριδική προσέγγιση μπορεί να καταστείλει όλες τις χωρικές αρμονικές, πράγμα που δεν μπορεί να επιτευχθεί με καθαρά παθητικές πιεζοηλεκτρικές παραδιακλαδώσεις, ενώ η διαμόρφωση απαιτεί πολύ λιγότερη προσπάθεια ελέγχου (τάση και ισχύς) σε σύγκριση με μία καθαρά ενεργητική προσέγγιση.

Τα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους συνδυασμούς για τον παθητικό έλεγχο έξυπνων κατασκευών. Παραδιακλαδωμένα κυκλώματα συντονισμού με αντιστάσεις και πηνία μπορούν να ελέγχουν τις συχνότητες συντονισμού, καταναλώνοντας την ενέργεια που παράγεται από τους κραδασμούς, μεταβιβάζοντας την σε ηλεκτρικά εξαρτήματα.

Τέτοια συστήματα είναι πολύ αποτελεσματικά για προβλήματα μίας ιδιομορφής, ωστόσο, όσον αφορά τον έλεγχο πολλών, η απόδοσή τους επιδεινώνεται δραστικά. Σκοπός του έργου του (Tairidis, 2019) είναι η ανάπτυξη βελτιστοποιημένων πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων συντονισμού, μαζί με ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου που βασίζεται σε προσαρμοστικές νευροασαφείς τεχνικές, για καταστολή κραδασμών έξυπνων σύνθετων δομών. Τα κυκλώματα παραδιακλάδωσης είναι προ-συντονισμένα στις πρώτες τέσσερις ιδιοσυχνότητες, ενώ ένα σύστημα νευροασαφούς ελέγχου αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ενεργοποίηση του κατάλληλου παραδιακλαδωμένου κυκλώματος, κάθε φορά παρέχοντας την απαραίτητη προσαρμοστικότητα στο σύστημα.

Στο (S.O.R. Moheimani, 2001) προτείνεται μια νέα δομή ελεγκτή για την παραδιακλαδωμένη πιεζοηλεκτρική απόσβεση. Ο ελεγκτής έχει δομή υψηλής αντήρησης και υλοποιείται ψηφιακά σε μία πιεζοηλεκτρική ελασματοποιημένη δομή. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν απέδειξαν την αποτελεσματικότητα του ελεγκτή για καταστολή δομικών κραδασμών.

Το έργο των (S. O. R. Moheimani) προτείνει μια νέα δομή σύνθετης αντίστασης για την πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση. Η σύνθετη αντίσταση έχει φύση υψηλής αντήρησης και μπορεί να θεωρηθεί ως ελεγκτής ανάδρασης εφαρμόζοντας υψηλό όφελος σε κάθε συχνότητα συντονισμού της βασικής δομής. Η σταθερότητα κλειστού βρόχου του συστήματος αποδείχθηκε και οι ιδιότητες δύναμης του ελεγκτή μελετήθηκαν, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα, επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας.

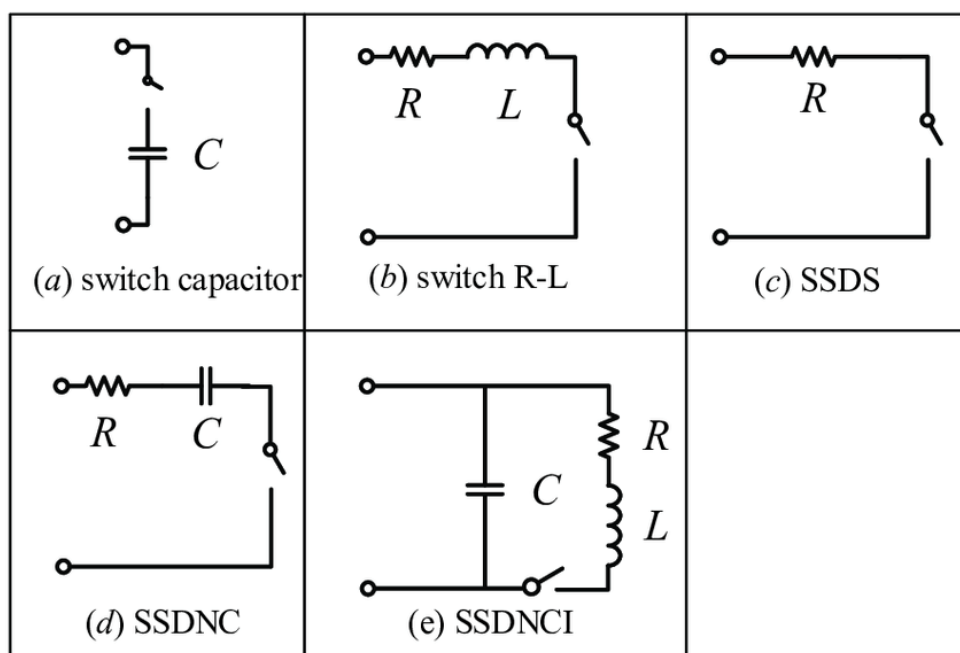
Μια βελτιωμένη μέθοδος για πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση πολλών ιδιομορφών παρουσιάζεται στο (S. Behrens S. O.). Ο προτεινόμενος ελεγκτής σύνθετης αντίστασης έχει έναν αριθμό πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με προηγούμενα προγράμματα παραδιακλάδωσης. Είναι πιο απλός στην εφαρμογή και απαιτεί μικρότερο αριθμό παθητικών στοιχείων στο κύκλωμα. Η στρατηγική του παθητικού ελέγχου επικυρώθηκε μέσω πειραμάτων πάνω σε μία πιεζοηλεκτρική ελασματοποιημένη δομή.

Στο έργο των (Robin Darleux, 2021), εφαρμόζεται μία μέθοδος ηλεκτρικής αναλογικής σύνθεσης ώστε να σχεδιαστεί ένα πιέζο-ηλεκτρομηχανικό τόξο ικανό να δείξει την ικανότητα της απόσβεσης πολλών ιδιομορφών. Ένα ηλεκτρικό-αναλογικό κύκλωμα σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας έναν πεπερασμένο αριθμό συσσωματωμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο μιας καμπυλωμένης δοκού. Οι συνθήκες συνοχής του χώρου και της συχνότητας αποδείχθηκε ότι επαληθεύουν τις ιδιομορφές απόσβεσης. Στην πραγματικότητα, το κύκλωμα ομαδοποιημένων στοιχείων μπορεί να αποσβέσει μόνο έναν πεπερασμένο αριθμό ιδιομορφών δόνησης. Ακόμη διασφαλίστηκαν ανάλογες οριακές συνθήκες, έτσι ώστε οι φυσικές συχνότητες και τα σχήματα λειτουργίας

τόσο της καμπυλωμένης δοκού όσο και του αναλογικού κυκλώματος να είναι ίσα. Στο παράδειγμα που εξετάστηκε στόχος είναι η μείωση των κραδασμών ενός πιέζο-ηλεκτρομηχανικού τόξου. Τέλος τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να αντιπροσωπεύσουν ένα βήμα προς το σχεδιασμό μεταυλικών με βάση μικροδομές που εκμεταλλεύονται την αρχή της απόσβεσης πολλών ιδιομορφών.

Η βελτιστοποίηση ενός απλοποιημένου παραδιακλαδωμένου κυκλώματος παρεμπόδισης ρεύματος ικανό να μετριάσει το εύρος κραδασμών πολλαπλών δομικών αντηχήσεων εξετάζεται στο (Ghislain Raze). Η προτεινόμενη στρατηγική εκμεταλλεύεται τον φορμαλισμό του δικτύου δύο θυρών, σε συνδυασμό με προσεγγίσεις με φυσικά κίνητρα, για να συντονιστούν διαδοχικά τα ηλεκτρικά στοιχεία των διαφορετικών κλάδων του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος. Αυτή η μέθοδος συντονισμού δεν καταφεύγει σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης και απαιτεί μόνο τη γνώση ποσοτήτων που είναι εύκολο να μετρηθούν πειραματικά. Τέλος αποδείχθηκε η μέθοδος τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά χρησιμοποιώντας μία πιεζοηλεκτρική δοκό.

## 2.6 Διακοπτόμενα συστήματα παραδιακλάδωσης.



Εικόνα 9: Είδη διακοπτόμενων συστημάτων

Η συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση είναι μια ημιενεργή τεχνολογία απόσβεσης που βασίζεται στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, έχοντας πλεονεκτήματα όπως η ευρυζωνική σύνδεση και η μη ανάγκη συντονισμού. Παρά τις μη γραμμικές εξισώσεις, οι δομές με συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά όπως και οι συχνότητες συντονισμού που δύσκολα ποικίλλουν σε σχέση με το ενεργειακό τους επίπεδο διέγερσης. Με έμπνευση από



αυτά τα φαινόμενα, στο έργο των (YAGUANG WU, 2019) προτείνεται μια μέθοδος γραμμικοποίησης για συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση, όπου η μη γραμμική δύναμη είναι ισοδύναμη με τη συχνότητα που εξαρτάται από ιξώδη απόσβεση και από γραμμικούς συντελεστές ακαμψίας. Εκφράσεις κλειστής μορφής αυτών των γραμμικοποιημένων παραμέτρων δόθηκαν, καθιστώντας τη μέθοδο εφαρμόσιμη τόσο για μοντέλα ομαδοποιημένων παραμέτρων όσο και για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Επιπροσθέτως χρησιμοποιήθηκε μια γενική εξίσωση δύναμης, ώστε η γραμμική μέθοδος να είναι εφαρμόσιμη για πολλές τυπικές παραλλαγές της συγχρονισμένης διακοπτόμενης απόσβεσης, ενώ επικυρώθηκε πρώτα σε κόντρα με μη γραμμικής προσομοιώσεις με αρμονική και τυχαία δόνηση αντίστοιχα. Δείχθηκε έτσι ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να επιταχύνει δραματικά την υπολογιστική απόδοση, η οποία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την πρόβλεψη της δυναμικής απόδοσης σύνθετων δομών με συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση. Τέλος, αναλύθηκε ένας δίσκος με ενσωματωμένη λεπίδα ώστε να απεικονιστεί μια πιθανή εφαρμογή της μεθόδου.

Στο έργο των (Lawrence R Corr, 2002), συγκρίθηκαν οι επιδόσεις δύο νέων πιεζοηλεκτρικών χαμηλής συχνότητας διακοπτόμενων τεχνικών παραδιακλάδωσης για δομική απόσβεση, με την παραδοσιακή τεχνική παθητικά συντονισμένου αντηχητικού παραδιακλαδωμένου κυκλώματος. Η πρώτη τεχνική, η μεταγωγή κατάστασης, είναι μια ημιενεργή τεχνική μεταβλητής ακαμψίας στην οποία συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία μεταβαίνουν από κατάσταση βραχυκυκλώματος σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, αλλάζει δηλαδή τη ακαμψία της δομής για τα δύο τέταρτα της περιόδου δόνησης της, διαχέοντας έτσι ενέργεια. Η δεύτερη τεχνική, η μεταγωγή παλμών, είναι μια ημιενεργή συνεχής μεταγωγής τεχνική κατά την οποία ένα παραδιακλαδωμένο κύκλωμα αντίστασης/επαγωγέα συνδέεται περιοδικά στα συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Αυτή η τεχνική εφαρμόζει φορτίσεις στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία με τρόπο παρόμοιο της ταχύτητας άμεσης ανάδραση και των τεχνικών βέλτιστου ελέγχου χρόνου bang–bang. Τέλος αριθμητικές προσομοιώσεις των τεχνικών παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν με την τεχνική παραδιακλαδωμένης απόσβεσης συντονισμού, ενώ εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε μία απλά υποστηριζόμενη δοκό.

Στόχος του έργου των (Sohair F. Rezeki, 2012) είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόσβεσης δομικών δονήσεων, ελαχιστοποιώντας την προσπάθεια ενεργού ελέγχου. Μία νέα μεταβλητή υβριδική πιεζοηλεκτρική απόσβεση που χρησιμοποιεί ασαφή λογική προτάθηκε για την εναλλαγή μεταξύ 2 τύπων υβριδικών συστημάτων απόσβεσης. Ο ένας είναι τύπος σε σειρά, όπου οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές οδηγούνται ενεργά μέσω τάσης εξωτερικής πηγής σε συνδυασμό με το παθητικά συντονισμένο σε σειρά κύκλωμα αντίστασης/επαγωγέα, ενώ ο άλλος τύπος είναι χωριστός σε ενιαία κατάσταση, όπου η εξωτερική πηγή τάσης και το κύκλωμα είναι διαχωρισμένα. Ο σκοπός του

συστήματος που προτάθηκε, φαίνεται μέσω προσομοίωσης της απόκρισης ενός μοντέλου απλής δοκού, με επιφανειακά συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Αποδείχτηκε ότι το υβριδικό σύστημα είναι καλύτερο και από τα 2, ωστόσο ο πρώτος τύπος παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα, με γνώμονα τον παράγοντα ενεργό έλεγχο, ενώ η μέθοδος με ασαφή λογική είναι πιο αποδοτική από αυτήν της απλής γραμμικά διακοπτόμενης.

Στο έργο των (Xu Han, 2012) προτάθηκε ένα προσαρμοστικό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα απόσβεσης για βελτιωμένη απόδοση. Αποτελείται από ένα δίκτυο αντίστασης επαγωγής με διακόπτη, το οποίο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με έναν πυκνωτή αρνητικής χωρητικότητας. Συνδυάζει δηλαδή την προσαρμοστική φύση της τεχνικής της συγχρονισμένης διακοπτόμενης απόσβεσης με τη βελτιωμένη απόδοση του πυκνωτή αρνητικής χωρητικότητας. Με τη δράση της συσκευής διακόπτη, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συγκρατιέται περιοδικά και στις δύο καταστάσεις της μη γραμμικής παραδιακλάδωσης και επομένως προσαρμόζεται στη συχνότητα διέγερσης. Η ανάλυση έγινε με βάση τις τυπικές παραδοχές ενός ταλαντωτή ενός βαθμού ελευθερίας, ενώ το σταθερό σήμα φόρτισης και η απαγωγή ενέργειας προκύπτουν ως συναρτήσεις του λόγου μεταξύ της αρνητικής χωρητικότητας και της πιεζοηλεκτρικής χωρητικότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενέργεια αυξάνεται με την αρνητική χωρητικότητα μέχρι το όριο ευστάθειας του συστήματος. Τέλος οι μετρήσεις έγιναν σε μια δοκιμαστική συσφιγμένη δοκό για την επικύρωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Οι ημιενεργές τεχνικές μείωσης κραδασμών εναλλάσσουν έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα μεταξύ ενός ανοιχτού κυκλώματος και ενός παραδιακλαδωμένου κυκλώματος με τρόπο τέτοιο που μειώνει τους κραδασμούς. Το πλάτος της δόνησης σε σταθερή κατάσταση μειώνεται μέσω της αλλαγής της ακαμψίας μεταξύ των καταστάσεων ή χειραγωγώντας τη μετατρεπόμενη ηλεκτρική ενέργεια ή και τα δύο. Οι ημιενεργές τεχνικές απαιτούν συνήθως τέσσερις διακόπτες ανά κύκλο δόνησης. Οι νόμοι ελέγχου, όπως η εναλλαγή κατάστασης και η συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση απαιτούν οι διακόπτες να εμφανίζονται σε κάθε ακρότατο μετατόπισης. Λόγω της πολυπλοκότητας της ανάλυσης ενός συστήματος με διακριτούς διακόπτες, οι νόμοι ελέγχου αναπτύχθηκαν με βάση τη διαίσθηση, με λίγες αναλύσεις που επιχειρούν να προσδιορίσουν έναν βέλτιστο νόμο διακοπής να αξιολογούν μαθηματικά μόνο το σύστημα σε συντονισμό. Η διατριβή του (KELLEY, 2016) διερευνά τις επιπτώσεις του χρόνου διακοπής στη μείωση των κραδασμών και την εξάρτηση της συχνότητας από τον βέλτιστο νόμο ελέγχου του χρόνου αυτού. Ανεξάρτητα από τον χρόνο διακοπής, οι αβεβαιότητες αίσθησης, ο θόρυβος, και τα σφάλματα μοντελοποίησης μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση των εναλλαγών μακριά από τη σχεδιασμένη στιγμή. Έτσι ποσοτικοποιήθηκαν η αναμενόμενη υποβάθμιση της απόδοσης της μείωσης των κραδασμών λόγω διακυμάνσεων στον σχεδιασμένο χρόνο εναλλαγής.

Στην εργασία της (Anisetti, 2007) εισάγεται μια καινοτόμος προσέγγιση για την καταστολή κραδασμών με χρήση παθητικά παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών υλικών. Αντί για στοιχεία γραμμικού κυκλώματος όπως αντιστάσεις και πυκνωτές, προτάθηκε μία διακοπτόμενη ηλεκτρομηχανική παραδιακλαδωμένη μέθοδος με σκοπό την καταστολή των κραδασμών μηχανικών κατασκευών. Σε αυτήν την τεχνική εναλλαγής κατάστασης, τα συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αλλάζουν από ανοιχτό κύκλωμα σε κλειστό κύκλωμα ανάλογα με την τάση που παράγεται από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Αυτό το νέο κύκλωμα παραδιακλάδωσης χρησιμοποιεί διόδους, τα οποία είναι μη γραμμικά στοιχεία όπου το πλάτος των κραδασμών μειώνεται λόγω της εισαγωγής της μη γραμμικότητας στο σύστημα. Η έξυπνη πλάκα που χρησιμοποιήθηκε πειραματικά, αποτελείται από μια ορθογώνια πλάκα αλουμινίου διαμορφωμένη σε διάταξη προβόλου με επιφανειακά συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, ενώ παρουσιάστηκαν η εξίσωση κίνησης για την δομή της πλάκας και οι βασικές εξισώσεις για πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές που χρησιμοποιήθηκαν. Η τεχνική εφαρμόστηκε σε δύο λειτουργίες και οι κορυφές των δονήσεων μειώθηκαν χρησιμοποιώντας το παραπάνω κύκλωμα. Στη συνέχεια ενσωματώθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο της πλάκας με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και το κύκλωμα στο Simulink αφού σχεδίασε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS. Τέλος τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τη χρησιμότητα των έξυπνων υλικών απόσβεσης για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτείται μείωση του θορύβου και των κραδασμών, ενώ είναι σαφές ότι η μέγιστη καταστολή που μπορεί να ληφθεί με αυτή τη μέθοδο εξαρτάται από την πτώση τάσης κατά μήκος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

Ένας νόμος ημιενεργού ελέγχου χρησιμοποιήθηκε για την εναλλαγή του ηλεκτρικού κυκλώματος παραδιακλάδωσης ενός πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή για την απαγωγή ενέργειας σε ένα απλό μηχανικό σύστημα στο (W.CLARK, 2000). Η εναλλαγή γίνεται μεταξύ καταστάσεων ανοικτού κυκλώματος (υψηλή ακαμψία) και βραχυκυκλώματος ή αντίστασης (χαμηλή ακαμψία). Ο ενεργοποιητής διατηρήθηκε στην κατάσταση υψηλής ακαμψίας του όταν το σύστημα κινούνταν έτσι ώστε να μπορεί να αποθηκευτεί ενέργεια σε αυτόν. Όταν η κίνηση του συστήματος τον ανάγκαζε να λάβει ενέργεια πίσω από τον ενεργοποιητή, ο ενεργοποιητής μεταβαίνει σε κατάσταση χαμηλής ακαμψίας, διαχέοντας την ενέργεια. Αναπτύχθηκε έτσι η παραπάνω μέθοδος ξεκινώντας από τις κυβερνώντες πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις, ενώ παρουσιάστηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνοντας ότι η μέθοδος παρέχει διασπορά ενέργειας συγκρίσιμη με άλλα πιεζοηλεκτρικούς μηχανισμούς παραδιακλάδωσης με χρήση της βέλτιστης αντίστασης σε κάθε περίπτωση.

## 2.7 Συστήματα παραδιακλάδωσης σε σύνθετες κατασκευές δοκών-προβολών.

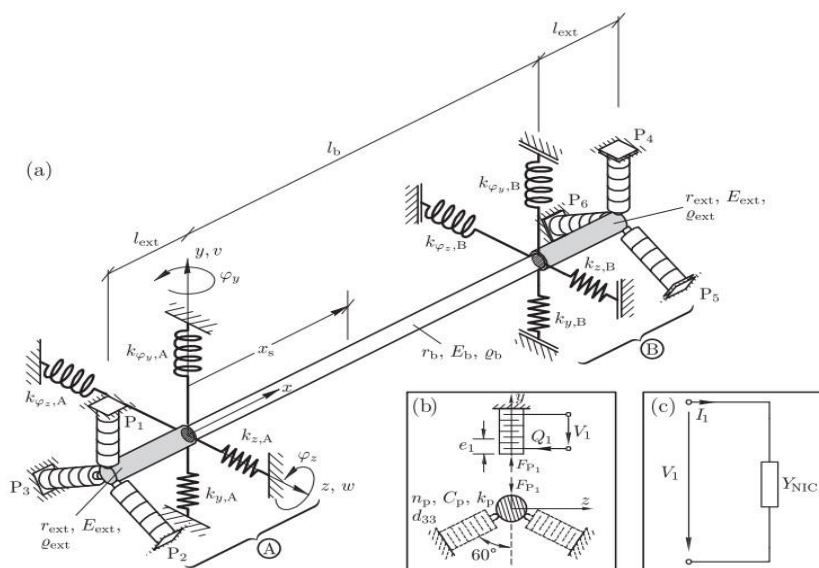


Figure 1. Beam system, (a) beam with piezoelectric supports A and B, (b) arrangement of piezoelectric transducers, (c) shunt circuit.

Εικόνα 10: Δοκός με κυκλική βάση, με συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά τύπου στοίβας.

Benedict Götz, M. S. (2016, August 12). Lateral vibration attenuation of a beam with circular cross-section by a support with integrated piezoelectric transducers shunted to negative capacitances. *Smart Materials and Structures*.

Πιεζοκεραμικοί ενεργοποιητές σε μορφή επιθέματος έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διέγερση και τον έλεγχο των κραδασμών δοκών και δομών που μοιάζουν με πλάκες. Στο έργο των (Z.K. Kusculuoglu, 2003), παρουσιάζεται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μιας δοκού με έναν πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή σε μορφή επιθέματος κολλημένο επάνω της. Τόσο η δοκός όσο και ο ενεργοποιητής μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας τη θεωρία δοκών του Timoshenko, ενώ εισάγονται περιορισμοί για να εξασφαλιστεί η συνέχεια των αξονικών και εγκάρσιων μετατοπίσεων στη διεπαφή των δύο στοιχείων Timoshenko. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την περιστροφή της διατομής κάθε στρώσης μεμονωμένα, γεγονός που αυξάνει την ακρίβεια σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους της βιβλιογραφίας. Το πεδίο μετατόπισης του συστήματος παρουσιάζεται σε μορφή παραγοντοποιημένου πίνακα, ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του πίνακα μάζας και ακαμψίας του στοιχείου. Καλύτερη συμφωνία παρατηρήθηκε μεταξύ του μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων από ότι επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Euler-Bernoulli και για τα δύο στρώματα ή τη θεωρία Timoshenko μόνο για το ένα στρώμα και τη θεωρία Euler-Bernoulli για το άλλο. Η πιεζοηλεκτρική και η διηλεκτρική συμπεριφορά του πιεζοκεραμικού επιθέματος περιλαμβάνονται στο μοντέλο στοιχείου.

Μια νέα μέθοδος προτάθηκε στο (S. Y. YANG, 1998) για άμεση και αναλυτική ανάλυση της κίνησης μιας εύκαμπτης δομής χρησιμοποιώντας κατανεμημένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες/ενεργοποιητές που αισθάνονται και ελέγχουν τις δονήσεις της. Η τεχνική του ζεύγους αισθητήρα ενεργοποιητή, αποτελείται από έναν αισθητήρα και έναν ενεργοποιητή που είναι τοποθετημένοι στην ίδια θέση αλλά συμμετρικά κατανεμημένοι με σεβασμό στο μέσο της κατασκευής. Ακριβείς αριθμητικοί υπολογισμοί καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι μία έξυπνη δοκός χρησιμοποιώντας την τεχνική του ζεύγους πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα/ενεργοποιητή δεν είναι εφικτή, γεγονός που προκύπτει άμεσα από τα δυναμικά χαρακτηριστικά κλειστού βρόγχου της κατασκευής. Το συμπέρασμα αυτό είναι αντίθετο από το προηγούμενο που προκύπτει από την προσεγγιστική ανάλυση (παραβλέποντας τις ανεπιθύμητες κινήσεις στις κατευθύνσεις που σχετίζονται με υψηλότερη ακαμψία μιας κατασκευής). Τα πειραματικά αποτελέσματα υποστηρίζουν αυτό το νέο συμπέρασμα, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες εύκαμπτες κατασκευές που χρησιμοποιούν την ασύμμετρη πιεζοηλεκτρική τεχνική αίσθησης/ενεργοποίησης.

Προβλήματα μοντελοποίησης και εφαρμογής ενός πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή διερευνώνται στο (Eric H. Anderson, 1992). Παρέχεται η απαραίτητη μέθοδος μοντελοποίησης του ταυτόχρονου φαινομένου αίσθησης και ενεργοποίησης, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκαν πειράματα ανοιχτού και κλειστού βρόγχου σε μία δοκιμαστική δοκό με πρόβολο. Τέλος αφού παρουσιάστηκαν τα σφάλματα και η ευαισθησία των αποτελεσμάτων, εφαρμόστηκε ο ενεργοποιητής χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό γόνατο σε μία δομή ζευκτού.

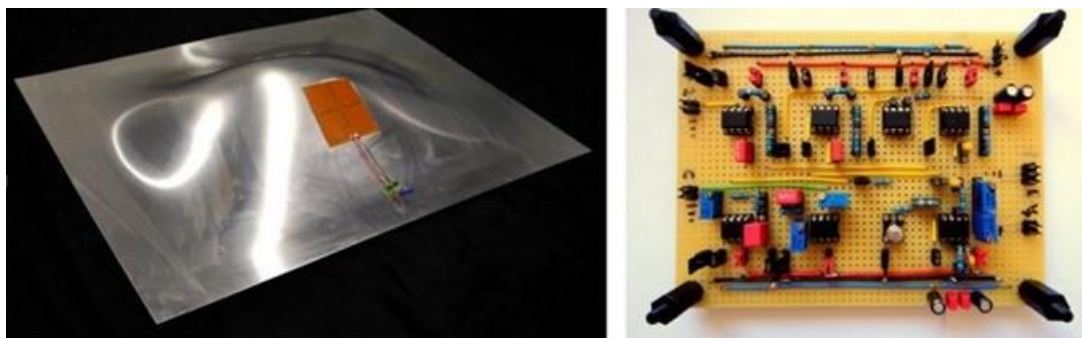
Σε ελαφριές κατασκευές μπορεί να προκύψουν ανεπιθύμητοι κραδασμοί λόγω της διέγερσης και της χαμηλής απόσβεσης. Με σκοπό την εξασθένηση των πλευρικών κραδασμών σε δομές δοκών, πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς παραδιακλαδωμένοι με αρνητικές χωρητικότητες μπορεί να είναι ένα κατάλληλο μέτρο. Στην εργασία των (Benedict Götz, 2016), παρουσιάζεται μια νέα ιδέα για την εξασθένηση των πλευρικών κραδασμών με χρήση ενσωματωμένων πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων τύπου στοίβας στην ελαστική στήριξη μιας δοκού με κυκλική διατομή. Στην πιεζοελαστική στήριξη, η κάμψη της δοκού προς μία αυθαίρετη κατεύθυνση μετατρέπεται σε μία σημαντική αξονική παραμόρφωση τριών μορφοτροπέων στοίβας και ως εκ τούτου η επιφάνεια της δοκού μπορεί να παραμείνει άνευ μορφοτροπέων. Για την εξασθένηση κραδασμών πολλών ιδιομορφών, κάθε πιεζοηλεκτρικός μορφοτροπέας είναι παραδιακλαδωμένος σε μία αρνητική χωρητικότητα. Τέλος δείχθηκε ότι η ιδέα μιας ελαστικής στήριξης δοκού με ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς παραδιακλαδωμένους μορφοτροπείς τύπου στοίβας είναι ικανή να μειώσει τους πλευρικούς κραδασμούς της δοκού προς μία αυθαίρετη κατεύθυνση.

Στο έργο των (Sam Behrens) προτείνεται μια μεθοδολογία που αντιμετωπίζει το πρόβλημα της επιλογής βέλτιστων ωμικών στοιχείων για παραδιακλαδωμένη απόσβεση πολλών ιδιομορφών ενός πιεζοηλεκτρικού ελάσματος. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη βελτιστοποίηση του κανόνα H2 για το σύνθετο σύστημα και επικυρώνεται μέσω πειραματικών εργασιών σε μια πιεζοηλεκτρική ελασματοποιημένη δοκό με απλή στήριξη.

Η πολλών ιδιομορφών απόσβεση κραδασμών μιας ελαστικής δοκού εξοπλισμένης με πολλαπλούς πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές συνδεδεμένους σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο παρουσιάζεται στο (P. Bisegna, 2005). Δύο αναλυτικά μοντέλα ηλεκτρομηχανολογικά συζευγμένης δομής αναλύονται. Το ένα ονομάζεται ομογενοποιημένο και είναι ακριβές όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός ενεργοποιητών και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή απλών κριτηρίων σχεδιασμού για το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ το άλλο, το διακριτικό, είναι ικανό να αντιμετωπίσει πραγματικές καταστάσεις όταν χρησιμοποιούνται λίγοι ενεργοποιητές και υιοθετείται για τη δοκιμή της απόδοσης του δικτύου. Μερικά ηλεκτρικά δίκτυα παρουσιάζονται και συγκρίνονται σε προσομοίωση με δίκτυα που είχαν προταθεί στη βιβλιογραφία, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιδόσεις τους για τον έλεγχο κραδασμών σε ευρύ φάσμα.

Η εργασία των (C H. Nguyen, 2006) παρουσιάζει την προσομοίωση προσαρμοστικών δομών με κυκλώματα παραδιακλάδωσης μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Η διαμόρφωση του πειράματος αποτελείται από μια δοκό αλουμινίου με πρόβολο που ενεργοποιείται από ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (PZT), του οποίου η καμπτική δόνηση μεταδίδεται σε έναν αισθητήρα PZT, ενώ είναι συνδεδεμένος σε ένα παράλληλο κύκλωμα παραδιακλάδωσης R-L που αποσβένει τη δόνηση. Ξεκινώντας από τις πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις, ορίζονται για το δονούμενο σύστημα ενεργοποιητή /δοκού/ αισθητήρα αναλυτικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Μαζί με τη συμμόρφωση του αισθητήρα, το συνδεδεμένο κύκλωμα παραδιακλάδωσης αναπαρίσταται έμμεσα μέσω μιας ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης ηλεκτρικού φορτίου. Βέλτιστες συντονισμένες τιμές της αντίστασης και του επαγωγέα για το κύκλωμα παραδιακλάδωσης υπολογίζονται σε επιλεγμένες συχνότητες αρμονικού συντονισμού, ενώ αναπτύσσονται περαιτέρω σχετικές εισροές δεδομένων πεπερασμένων στοιχείων και οριακές συνθήκες. Στη συνέχεια λαμβάνονται εκτεταμένα αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τον κώδικα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Multiphysics, ο οποίος έχει δυνατότητες πιεζοηλεκτρικής σύζευξης καθώς και ηλεκτρικά πεπερασμένα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση του κυκλώματος αντίστασης/επαγωγέα. Τέλος, μια εναλλακτική μέθοδος για την προσομοίωση του κυκλώματος αντίστασης/επαγωγέα αποτελείται από την εφαρμογή τάσης εισόδου ισοδύναμης παραδιακλάδωσης ως συμπληρωματική οριακή συνθήκη στον αισθητήρα.

## 2.8 Συστήματα παραδιακλάδωσης σε σύνθετες δομές όπως πλάκες και κελύφη.



Εικόνα 11: Μία δομή κελύφους με συνδεδεμένο πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα και το προσαρμοστικό παραδιακλαδωμένο κύκλωμα του.

J A B Gripp, L. C. ( 2015, November 3). An adaptive piezoelectric vibration absorber enhanced by a negative capacitance applied to a shell structure. *Smart Materials and Structures*.

Οι δισδιάστατες λεπτές πλάκες χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της θάλασσας. Η εξασθένιση των κραδασμών μπορεί να επιτευχθεί σε αυτές τις δομές με την προσάρτηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στη δομή που είναι ενσωματωμένη με παραδιακλαδωμένα κυκλώματα απόσβεσης. Αυτό ενεργοποιεί μια συμπαγή μέθοδο απόσβεσης κραδασμών χωρίς προσθήκη σημαντικής μάζας και ογκομετρικής πληρότητας, σε αντίθεση με τους ογκώδεις μηχανικούς αποσβεστήρες. Η πρακτική εφαρμογή της τεχνικής παραδιακλαδωμένης απόσβεσης απαιτεί ακριβή μοντελοποίηση της δομής, των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και της δυναμικής του κυκλώματος παραδιακλάδωσης. Η εργασία των (P. Lahe Motlagh, 2018) χρησιμοποιεί ένα ισοδύναμο πολλών ιδιομορφών μοντέλο κυκλώματος μιας λεπτής πλάκας με πολλαπλά πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, για να δείξει την απόδοση των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης. Το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος συνδέεται με τα κυκλώματα παραδιακλάδωσης στο λογισμικό SPICE, όπου η διαμόρφωση της παραδιακλάδωσης αποτελείται από τρεις κλάδους από ηλεκτρικούς συντονιστές, ο καθένας συντονισμένος σε μία ιδιομορφή δόνησης της δομής. Χρησιμοποιώντας την αρμονική ανάλυση στο SPICE για ένα εύρος συχνοτήτων διέγερσης, η έξοδος ρεύματος κάθε κλάδου υπολογίζεται για ανοιχτό κύκλωμα και βέλτιστες συνθήκες παραδιακλαδωμένου κυκλώματος. Τέλος αποδεικνύεται ότι η εξασθένιση των κραδασμών δόνησης μίας ιδιομορφής μπορεί να επιτευχθεί με επιτυχία όταν υπάρχει μείωση στο αντίστοιχο εύρος ρεύματος του κλάδου. Αυτή η συσχέτιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό αποδοτικών γραμμικών/μη γραμμικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης.

Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές και αισθητήρες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν συσκευές ελέγχου δόνησης/θέσης/σχήματος. Με βάση τον ενεργοποιητή αυτοανίχνευσης έννοια στην οποία οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές συνενώνονται απρόσκοπτα, η εργασία των (WENFENG ZHANG, 2004) παρουσιάζει μία μελέτη για τον έλεγχο μιας συσφιγμένης πλάκας. Ένα αναλυτικό μοντέλο μιας πλάκας με επιφανειακά συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα έχει προκύψει και ένας ελεγκτής σύνθεσης μ έχει σχεδιαστεί για να καταστείλει κραδασμούς πολλών ιδιομορφών της συσφιγμένης πλάκας υπό διαταραχές. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συμμετρικές και ασύμμετρες ιδιομορφές μπορούν να κατασταλούν αποτελεσματικά με έναν σχεδιασμένο έλεγχο ανάδρασης, χρησιμοποιώντας δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τοποθετημένα συμμετρικά και ασύμμετρα στην πλάκα.

Τα τελευταία χρόνια η προσοχή κατευθύνεται στα έξυπνα δομικά θέματα που χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά επιθέματα ως κατανεμημένους ενεργοποιητές και αισθητήρες. Ο στόχος αυτής της εργασίας των (Jean Lefevre, 2003) είναι να παρουσιάσει μια μέθοδο που βασίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία επιτρέποντας τη μοντελοποίηση και την αριθμητική ανάλυση τέτοιων πιεζοηλεκτρικών έξυπνων ελαφριών κατασκευών για τον έλεγχο κραδασμών και θορύβου. Αρχικά, περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο της σύνθεσης των πεπερασμένων στοιχείων συμπεριλαμβανομένης της παθητικής δομής, των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών και των αισθητήρων καθώς και του ακουστικού ρευστού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας σχεδιασμός ελέγχου βάσει του μοντέλου. Λόγω του μεγάλου αριθμού βαθμών ελευθερίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, η τεχνική ιδιομορφικής περικοπής εφαρμόζεται για τη μείωση του μοντέλου. Μερικοί επιλεγμένοι δομικές και ακουστικές ιδιομορφές έχουν ληφθεί υπόψη για να αναπαραστήσουν τη μηχανική συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος. Μετά τη μετατροπή του μοντέλου στον χώρο καταστάσεων χρησιμοποιείται το εργαλείο λογισμικού MatLab/Simulink για το σχεδιασμό του ελεγκτή. Ο ελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της λύσης στον τομέα του χρόνου με βάση το περικομμένο μοντέλο. Ως παράδειγμα δοκιμής διερευνώνται διαφορετικές σχεδιαστικές εκδόσεις μιας δομής έξυπνης πλάκας σε συνδυασμό με μια ακουστική κοιλότητα. Αποδεικνύεται ότι η δομική δόνηση και η ηχητική πίεση μειώνονται εμφανώς.

Βασισμένο στο χαρακτηριστικό της ηλεκτρομαγνητικής απόσβεσης, μία νέα λύση πολλών ιδιομορφών ελέγχου κραδασμών, αρνητικής ηλεκτρομαγνητικής αντίστασης, αρνητικής επαγωγής παραδιακλαδωμένης απόσβεσης (NINR-EMSD), προτείνεται στο (Xinong Zhang, 2011) και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο δόνησης πολλών ιδιομορφών μιας πλάκας με πρόβολο. Η αρνητική αυτεπαγωγή της σύνθετης παραδιακλαδωμένης αντίστασης μπορεί να ακυρώσει την εγγενή επαγωγή του ηλεκτρομαγνήτη, ενώ η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος που



αποτελείται από πηνία και παραδιακλάδώσεις θα είναι μια καθαρή αντίσταση, με το ρεύμα παραδιακλάδωσης να είναι ανεξάρτητο της συχνότητας όταν η αυτεπαγωγή της παραδιακλάδωσης και του ηλεκτρομαγνήτη είναι ίσες μεταξύ τους. Η αρνητική αντίσταση ακυρώνει την αντίσταση του ηλεκτρομαγνήτη με αποτέλεσμα να αλλάξει η αντίσταση και το ρεύμα του κλειστού κυκλώματος, γεγονός που κάνει εφικτό τον έλεγχο της πολλών ιδιομορφών δόνησης του συστήματος. Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης λαμβάνεται με βάση τη μέθοδο του ισοδύναμου ρεύματος. Η κυρίαρχη εξίσωση της πλάκας με την απόσβεση ηλεκτρομαγνητικής παραδιακλάδωσης καθιερώνεται σύμφωνα με την αρχή του Χάμιλτον. Ο έλεγχος κραδασμών πολλών ιδιομορφών του συστήματος προσομοιώνεται και πραγματοποιούνται πειράματα για την επαλήθευση της απόδοσης της (NINR-EMSD). Τέλος οι αριθμητικές προβλέψεις και τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν καλά μεταξύ τους και δείχνουν ότι η αρνητική αντίσταση αρνητικής επαγωγής (NINR) της σύνθετης αντίστασης παραδιακλάδωσης μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόσβεση της δομής, ενώ παράλληλα η μείωση της παραδιακλαδωμένης αντίστασης έχει σημαντική συμβολή στη βελτίωση της απόδοσης του ελέγχου των κραδασμών και οι τέσσερις πρώτες ιδιομορφές της πλάκας μπορούν να κατασταλούν ταυτόχρονα με τη (NINR-EMSD).

Η παραδιακλαδωμένη πιεζοηλεκτρική απόσβεση είναι μια πολύ γνωστή τεχνική για την απόσβεση των μηχανικών κραδασμών μίας δομής, χρησιμοποιώντας έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια διαχέεται σε μια ηλεκτρική αντίσταση. Αντηχητικές παραδιακλάδώσεις που αποτελούνται από μία αντίσταση και μια αυτεπαγωγή συνδεδεμένες με έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα χρησιμοποιούνται για την απόσβεση των δομικών δονήσεων σε στενές ζώνες συχνοτήτων, αλλά η απόδοσή τους είναι πολύ ευαίσθητη σε διακυμάνσεις σε δομικές ιδιομορφικές συχνότητες και στη χωρητικότητα των μορφοτροπέων. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, παρουσιάζεται στο (J A B Gripp, 2015) η πιεζοηλεκτρική τεχνική απόσβεσης με βελτιωμένη απόδοση και στιβαρότητα. Ο σχεδιασμός του προσαρμοστικού κυκλώματος λαμβάνει υπόψη τη διακύμανση της φυσικής συχνότητας της δομής ως παράμετρο του έργου και περιγράφεται ένας προσαρμοστικός πιεζοηλεκτρικός απορροφητής κραδασμών ενισχυμένος από μια συνθετική αρνητική χωρητικότητα που εφαρμόζεται σε μια δομή κελύφους. Το κύκλωμα παραδιακλάδωσης προσαρμόζει αυτόνομα την τιμή αυτεπαγωγής του συγκρίνοντας τη διαφορά φάσης της ταχύτητας δόνησης και του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα παραδιακλάδωσης. Επιπλέον μία συνθετική αρνητική χωρητικότητα προστίθεται στο κύκλωμα παραδιακλάδωσης για να ενισχύσει την εξασθένηση των κραδασμών που παρέχεται από τον πιεζοηλεκτρικό απορροφητή. Τέλος το κύκλωμα υλοποιείται με χρήση αναλογικών στοιχείων και η επικύρωση της

προτεινόμενης μεθόδου γίνεται με σύζευξη του πιεζοηλεκτρικού απορροφητή με ένα μεταλλικό κέλυφος.

Το έργο των (V. P. Matveenko, 2018) εξετάζει το πρόβλημα των φυσικών δονήσεων μίας παραμορφώσιμης δομής που περιέχει στοιχεία κατασκευασμένα από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται μέσω ηλεκτροδίων με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από ωμικά, επαγωγικά και χωρητικά στοιχεία. Με βάση τη λύση αυτού του προβλήματος, αναζητούνται οι παράμετροι των εξωτερικών ηλεκτρικών κυκλωμάτων για να επιτραπεί ο βέλτιστος παθητικός έλεγχος των δομικών δονήσεων. Η λύση στο πρόβλημα είναι οι πολύπλοκες φυσικές συχνότητες δόνησης, το πραγματικό μέρος των οποίων αντιστοιχεί στην κυκλική ιδιοσυχνότητα των κραδασμών και το φανταστικό μέρος αντιστοιχεί στον ρυθμό απόσβεσης (λόγος απόσβεσης). Η ανάλυση της συμπεριφοράς των φανταστικών μερών των πολύπλοκων ιδιοσυχνοτήτων στο χώρο του εξωτερικού κυκλώματος επιτρέπει την αποσβένει δοσμένες ιδιομορφές των δονήσεων της δομής. Αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιώντας μια πλάκα με πρόβολο και μια δομή κελύφους στη μορφή ενός ημικυλίνδρου συνδεδεμένης σε σειρά με κυκλώματα συντονισμού RL.

Σύμφωνα με το (Boris Lossouarn M. A., 2018) οι κραδασμοί μιας μηχανικής κατασκευής μπορούν να μειωθούν μέσω μιας πιεζοηλεκτρικής σύζευξης σε ένα παθητικό ηλεκτρικό δίκτυο που παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες ιδιομορφών. Για τον έλεγχο μιας πλάκας, λαμβάνεται υπόψη ο σχεδιασμός ενός δισδιάστατου ανάλογου ηλεκτρικού δικτύου. ,όπου ανάλογα με τις μηχανικές συνοριακές συνθήκες, μια διατύπωση πεπερασμένης διαφοράς της εξίσωση κίνησης των Kirchhoff-Love δείχνει ότι πρέπει να εξασφαλίσουμε συγκεκριμένες ηλεκτρικές συνδέσεις κατά μήκος των άκρων του δικτύου. Ένα αριθμητικό μοντέλο που περιλαμβάνει ένα σύνολο πινάκων στοιχείων επικυρώνει την ηλεκτρική τοπολογία, ενώ στη συνέχεια, το παθητικό ηλεκτρικό κύκλωμα υλοποιείται με πυκνωτές, πηνία και μετασχηματιστές, των οποίων ο πρακτικός σχεδιασμός περιγράφεται αναλυτικά. Εστιάζοντας στην συσφιγμένη πλάκα, τα πειράματα αποδεικνύουν την ικανότητα του προτεινόμενου ηλεκτρικού δικτύου για την προσέγγιση της συμπεριφοράς της μηχανικής κατασκευής.

Στο έργο των (Etienne Balmes) αφού γίνεται μία θεωρητική αναφορά στον πιεζοηλεκτρισμό και στις βασικές εξισώσεις που εφαρμόζονται σε πιεζοηλεκτρικές δομές, γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση μοντέλων αυτών. Οι εφαρμογές αφορούν πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε πλάκες, χρήση λεπτών, τριγωνικών και ορθοτροπικών μορφοτροπέων σε μοντέλα με πλάκες, χρήση παραδιακλαδωμένου κυκλώματος συντονισμού σε δοκό με πρόβολο κ.α. Ακόμη αναφέρεται ο τρόπος λειτουργίας και χρήσης του επιταχυνσιόμετρου, ενώ παρουσιάζονται εφαρμογές όπως αυτή της περιοδικής πιεζοηλεκτρικής ομογενοποίησης.

Μια νέα προσέγγιση για την απόσβεση κραδασμών και τον εντοπισμό των πλακών παρουσιάζεται στο (AboElSooud, 2003). Μελετάται η εισαγωγή περιοδικά διανεμημένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων με παθητικά παραδιακλαδωμένα αντιστατικά και επαγωγικά κυκλώματα. Αναπτύσσεται επίσης ένα αριθμητικό μοντέλο που περιγράφει τη σύζευξη του κυκλώματος παραδιακλάδωσης με τη δομή χρησιμοποιώντας φασματική προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων. Η μελέτη της συμπεριφοράς των περιοδικών πλακών πραγματοποιήθηκε πειραματικά και αριθμητικά για πλάκες με γεωμετρική και υλική περιοδικότητα. Τα αποτελέσματα τόνισαν την ικανότητα των περιοδικών πλακών στην εξασθένηση των κραδασμών και τον εντοπισμό τους, καθώς και την απόδειξη της ακρίβειας του αναπτυγμένου αριθμητικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα τόσο των αριθμητικών όσο και των πειραματικών μελετών έδειξαν την ικανότητα των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων με παθητική παραδιακλάδωση στην απόσβεση των δομικών κραδασμών των περιοδικών πλακών, ενώ φάνηκε η αποτελεσματικότητα των περιοδικά διανεμημένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων στην απόσβεση μιας ευρείας ζώνης συχνοτήτων δόνησης καθώς και η ικανότητα εντοπισμού της δόνησης εισάγοντας μία διαταραχή στα παθητικά παραδιακλαδωμένα κυκλώματα.

Οι έξυπνες κατασκευές γενικά, έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται και να μειώνουν κραδασμούς οι οποίοι δημιουργούνται από εξωτερικές δυνάμεις. Η ικανότητα αυτοπαρακολούθησης των έξυπνων κατασκευών οφείλεται στις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται, όπως πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές. Η παρούσα εργασία των (GEORGIOS K.TAIRIDIS) επικεντρώνεται στον έλεγχο των ταλαντώσεων μία έξυπνης σύνθετης πλάκας, εφοδιασμένης παραδιακλαδωμένους πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς. Λαμβάνονται υπόψη τα παραδιακλαδωμένα κυκλώματα συντονισμού δηλαδή κυκλώματα με αντίσταση και επαγωγή, τα οποία μπορούν να καταστρέψουν τις δονήσεις κοντά στις συχνότητες συντονισμού. Το δομικό μοντέλο της πλάκας διακρίνεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων που αποδίδεται σε ένα ελασματοποιημένο σύνθετο μοντέλο με ελαστικές και πιεζοηλεκτρικές στρώσεις. Για την ελασματοποιημένη σύνθετη πλάκα, έγινε μία παραμετρική ανάλυση με σκοπό να βρεθούν οι βέλτιστες τοποθεσίες πάνω στην πλάκα που μεγιστοποιούν τον συντελεστή ιδιομορφικής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Τέλος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, ώστε να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές της επαγωγής και της αντίστασης κάθε κυκλώματος, για ένα δίκτυο βέλιστα τοποθετημένων παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων, συνδεδεμένα με την πλάκα. Παρατηρήθηκε μείωση των κραδασμών για τις πρώτες 4 ιδιομορφές, ενώ τα αποτελέσματα επικυρώνουν τις προοπτικές της προτεινόμενης μεθόδου για τον σχεδιασμό των πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων συσκευών.

Η δημοτικότητα των ελασματοποιημένων σύνθετων δομών που μοιάζουν με πλάκες αυξάνεται σε διάφορες εφαρμογές της μηχανικής. Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα με στοιχεία ηλεκτρικού κυκλώματος μπορούν να ενσωματωθούν στις δομές αυτές για εφαρμογές παραδιακλαδωμένης απόσβεσης. Η εργασία των (Mehmet Murat Gozum, 2019) στοχεύει στον εντοπισμό των παραμέτρων του συστήματος που επηρεάζουν τον συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης, ένα μέγεθος για τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας της μορφοτροπής ενέργειας από μηχανική σε ηλεκτρική. Για το σκοπό αυτό, διενεργείται ενδεδειγμένη έρευνα για να διαπιστωθούν οι κρίσιμες παράμετροι του συστήματος και οι συνδυασμένες επιδράσεις τους στον συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης ελασματοποιημένων σύνθετων πλακών με συνδεδεμένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα στην επιφάνειά τους. Οι πρώτες τέσσερις φυσικές συχνότητες του ηλεκτρομηχανικού συστήματος λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Rayleigh–Ritz για διάφορα μεγέθη επιθεμάτων, ενώ στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις του συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης για διαφορετικά σύνολα παραμέτρων του συστήματος. Για να αποδειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου για ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων, τέσσερα ανεξάρτητα παραδιακλαδωμένα πιεζοηλεκτρικά ζεύγη προσαρτώνται στην πλάκα, με τα πλάτη των κραδασμών να μειώνονται με επιτυχία χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες παραμέτρους του συστήματος.

Ένα έξυπνο ελασματοποιημένο μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το μη γραμμικό πιεζοηλεκτρικό μοντέλο, δηλαδή ηλεκτροελαστικά και ηλεκτροσυστολικά αποτελέσματα και μία γεωμετρική μη γραμμικότητα προτείνονται στο (L Q Yao, 2004). Με βάση το μοντέλο, υπολογίζονται οι αναλυτικές λύσεις για τις εφελκυστικές και τις καμπτικές παραμορφώσεις των συμμετρικά κατασκευασμένων πιεζοηλεκτρικών ελασμάτων κάτω από μεγάλα ηλεκτρικά πεδία. Μια σύγκριση μεταξύ της παρούσας μη γραμμικής επεκτατικής παραμόρφωσης μιας πιεζοηλεκτρικής ελασματοποιημένης πλάκας, με το μοντέλο επαγωγικής παραμόρφωσης, δείχνει ότι επιτυγχάνονται πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα με το παρόν μοντέλο, με την αριθμητική προσομοίωση να αποκαλύπτει ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα.

Στο (K Y Lam, 1997) αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που βασίζεται στην κλασική θεωρία των ελασματοποιημένων πλακών, για τον ενεργό έλεγχο κραδασμών μιας σύνθετης πλάκας, που περιέχει κατανεμημένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και ενεργοποιητές. Η μάζα και η ακαμψία των πιεζοηλεκτρικών λαμβάνονται υπόψη, ενώ ένας απλός αλγόριθμος ελέγχου ανάδρασης αρνητικής ταχύτητας που συνδέει τις άμεσες και τις αντίστροφες πιεζοηλεκτρικές επιρροές χρησιμοποιείται για τον ενεργό έλεγχο της δυναμικής απόκρισης μιας δομής μέσω ενός ελέγχου κλειστού βρόγχου. Η στατική ανάλυση και η ενεργή καταστολή κραδασμών μίας σύνθετης πλάκας με πρόβολο εκτελούνται ως αριθμητικό παράδειγμα για την επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου, ενώ

η τεχνική ιδιομορφικής υπέρθεσης και η μέθοδος Newmark-β χρησιμοποιούνται στην αριθμητική προσομοίωση για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκρισης της ελασματοποιημένης σύνθετης πλάκας.

Μια περιοδική διάταξη  $4 \times 4$  αντιστατικών-επαγωγικών παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων μορφοτροπής (RL) μελετάται και εφαρμόζεται στο (F Casadei, 2009) για την επίτευξη μείωσης των κραδασμών ευρείας ζώνης μιας εύκαμπτης ιστροπικής πλάκας σε ρυθμιζόμενες ζώνες συχνοτήτων. Κάθε επιφανειακά συνδεδεμένο επίθεμα (PZT) συνδέεται σε ένα ανεξάρτητο κύκλωμα RL με όλα τα κυκλώματα παραδιακλάδωσης να συντονίζονται στην ίδια συχνότητα. Χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία σχεδίασης πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων εξασθένησης της μονάδας κυψέλης που χαρακτηρίζει την περιοδική διάταξη. Οι προβλέψεις επικυρώνονται πειραματικά με τη μέτρηση της μέσης χωρικής αρμονικής απόκρισης της πλάκας, με σημαντική εξασθένηση της ευρυζωνικότητας να επιτυγχάνεται στις ζώνες συχνοτήτων που επικεντρώνονται στη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος παραδιακλάδωσης.

Στο πλαίσιο του έργου των (MASSIMO VISCARDI, 2016), αναφέρονται ορισμένες προκαταρκτικές δραστηριότητες που στόχο έχουν τη δημιουργία ενός δομικά απλού, φθηνού και εύκολα αντικαταστάσιμου ενεργού συστήματος ελέγχου για μεταλλικά πάνελ. Ο μελλοντικός στόχος είναι ο έλεγχος και η μείωση του θορύβου, που παράγονται από δονήσεις των μεταλλικών πάνελ του αμαξώματος ενός αυτοκινήτου. Τα δύο κύρια σημεία της εργασίας είναι: Η υλοποίηση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος για αρχιτεκτονική συγχρονισμένων παραδιακλαδωμένων διακοπτών (SSSA), με τις σωστές διαστάσεις των εξαρτημάτων, για τον έλεγχο του προτεινόμενου αντικειμένου δοκιμής, που αντιπροσωπεύεται από μια ορθογώνια πλάκα αλουμινίου και μια προκαταρκτική πειραματική μελέτη στο αντικείμενο δοκιμής, σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, για σύγκριση των επιδόσεων των δύο πιθανών προσεγγίσεων ελέγχου, αυτής της SSSA και μιας προσέγγισης ελέγχου ανατροφοδότησης. Η σύγκριση αυτή θα συμβάλει στη μελλοντική επιλογή της καταλληλότερης αρχιτεκτονικής ελέγχου για τη συγκεκριμένη εξασθένηση του θορύβου που προκαλείται και σχετίζεται το πάτωμα ενός αυτοκινήτου υπό ντετερμινιστικές (αλληλεπίδραση κινητήρα και δρόμου-ελαστικού) και στοχαστικές (αλληλεπίδραση δρόμου-ελαστικού και αεροδυναμικής) αναγκαστικές ενέργειες.

Οι μη γραμμικές εξαναγκασμένες δονήσεις κυκλικών πλακών, με τη συχνότητα διέγερσης κοντά στη φυσική συχνότητα μίας ασύμμετρης ιδιομορφής, διερευνώνται στο (O. Thomas, 2002). Παρουσιάζεται μία πειραματική διάταξη, η οποία επιτρέπει την εκτέλεση ακριβών μετρήσεων των πλατών των κραδασμών των δύο διαμορφώσεων που προτιμούνται. Πειραματικές καμπύλες συντονισμού που δείχνουν το πλάτος και τη φάση κάθε διαμόρφωσης ως συναρτήσεις της συχνότητας οδήγησης συγκρίνονται με τις θεωρητικές, οδηγώντας σε μια ποσοτική

επικύρωση των προβλέψεων που δίνονται από το μοντέλο. Τέλος, όλες οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν συζητούνται συστηματικά, προκειμένου να φανεί το εύρος και η συνάφεια της προσέγγισης.

Στη μελέτη που παρουσιάστηκε στο (R. Rimašauskienė, 2019), αναπτύχθηκαν και αναλύθηκαν πειραματικά τεχνικές ενεργητικού και παθητικού ελέγχου δονήσεων για μια σύνθετη δοκό με λεπτό τοίχωμα. Χρησιμοποιήθηκε ένας ενεργοποιητής MFC (Macro Fiber Composite), μαζί με τις μαγνητικές δυνάμεις μεταξύ δύο μόνιμων κυβοειδών μαγνητών για εφαρμογές απόσβεσης κραδασμών. Μετά τα πειράματα που διεξήχθησαν με ενεργό έλεγχο δόνησης, διαπιστώθηκε ότι σε όλες τις περιπτώσεις, η απόσβεση κραδασμών του αναλυόμενου συστήματος ήταν πολύ υψηλότερη στη συχνότητα συντονισμού του. Ωστόσο, λόγω των πειραματικών αποτελεσμάτων, θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα ενεργητικά και παθητικά συστήματα ελέγχου κραδασμών ήταν αποτελεσματικά στον έλεγχο του πλάτους των κραδασμών μίας σύνθετης δοκού με λεπτά τοιχώματα. Τέλος η μεθοδολογία για την ανάλυση σύνθετων δοκών με λεπτά τοιχώματα αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στο άρθρο.

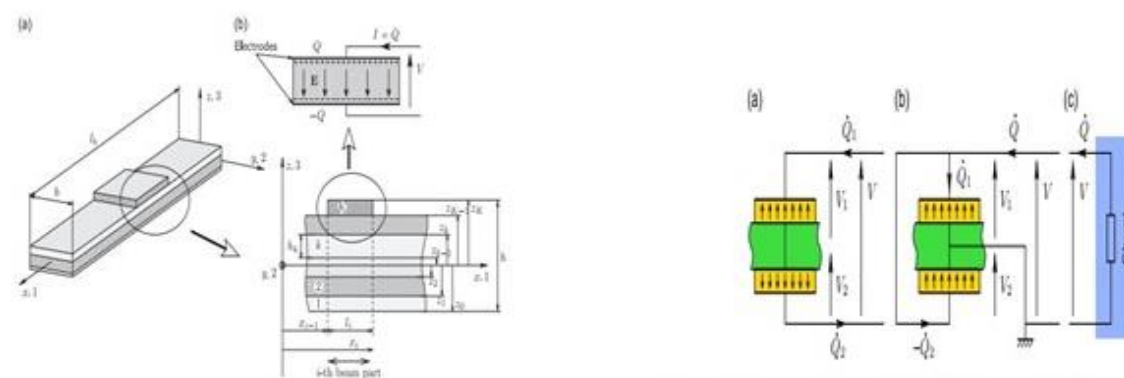
Μια πρακτική προσέγγιση που βασίζεται στη μεγιστοποίηση της απαγωγής ισχύος δόνησης για τον αυτοσυντονισμό μονόκλωνων και πολλαπλών αντηχήσεων που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε λεπτά ορθογώνια πλαίσια για τη μείωση των ευρυζωνικών καμπτικών κραδασμών που παράγονται από στοχαστικές διαταραχές σε χαμηλές συχνότητες παρουσιάζεται στο (Paolo Gardonio, 2019). Οι παραδιακλαδώσεις απλού και πολλαπλού συντονισμού σχηματίζονται είτε από έναν είτε από πολλαπλούς κλάδους αντίστασης-επαγωγής-χωρητικότητας (RLC) που συνδέονται παράλληλα. Η προτεινόμενη προσέγγιση αυτοσυντονισμού διαδοχικά προσαρμόζει τα στοιχεία RL στους κλάδους κάθε παραδιακλάδωσης, με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η απαγωγή ισχύος δόνησης από την συντονιστική απόκριση των καμπτικών ιδιομορφών της δομής που αντηχούν σε μια στοχευμένη ζώνη συχνοτήτων. Η ισχύς δόνησης που διαχέεται υπολογίζεται από τη μετρούμενη ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται από κάθε παραδιακλάδωση, έτσι ώστε ο αυτοσυντονισμός να μπορεί να εφαρμοστεί τοπικά και ανεξάρτητα σε κάθε παραδιακλάδωση χωρίς την ανάγκη αναγνώρισης συστήματος ή μέτρησης on-line της απόκρισης κραδασμών της δομής. Επομένως, ο on-line συντονισμός μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο των κραδασμών των κατανεμημένων κατασκευών, ακόμη και σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου χαρακτηρίζονται από χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική, που δημιουργείται, για παράδειγμα, από επιρροές τάνυσης, διακυμάνσεις μάζας, κινούμενα φορτία και ανομοιομορφους περιορισμούς. Παρουσιάζεται λοιπόν μια παραμετρική μελέτη σε ένα λεπτό ορθογώνιο πάνελ με δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδεδεμένα με παραδιακλαδώσεις πολλαπλών συντονισμών, το οποίο δείχνει ότι η χρονικά μέση συνολική καμπτική κινητική ενέργεια του έξυπνου πίνακα και ο μέσος χρόνος

ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνεται από κάθε παραδιακλάδωση χαρακτηρίζεται από αντιστοίχιση τοπικών ελάχιστων και μεγίστων, τα οποία προσδιορίζουν τις βέλτιστες παραμέτρους RL στους κλάδους κάθε παραδιακλάδωσης που είναι απαραίτητες για τον έλεγχο των συντονιστικών αποκρίσεων των καμπτικών ιδιομορφών χαμηλής τάξης του πίνακα. Μια πρακτική προσέγγιση, βασισμένη στη μεγιστοποίηση της μέσης χρονικής ηλεκτρικής ισχύος που διαχέεται από κάθε παραδιακλάδωση, στη συνέχεια εισάγεται για να βρεθούν on-line αυτές οι βέλτιστες παράμετροι RL.

Ο στόχος της εργασίας των (Tatiane Correa de Godoy, 2011) είναι να παρουσιάσει τη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων ελασματοποιημένων σύνθετων πλακών με ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα ή στρώματα που στη συνέχεια συνδέονται με κυκλώματα ενεργητικού-παθητικού συντονισμού παραδιακλάδωσης, που αποτελούνται από αντίσταση, επαγωγή και πηγή τάσης. Παρουσιάζονται επίσης και συζητούνται εφαρμογές για τον παθητικό έλεγχο κραδασμών και τη βελτίωση της αρχής του ενεργού ελέγχου. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε μία ισοδύναμη θεωρία ενός στρώματος σε συνδυασμό με μια θεωρία διατμητικής παραμόρφωσης τρίτης τάξης. Ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο καταπόνησης-τάσης θεωρείται για τα πιεζοηλεκτρικά υλικά πλήρως συζευγμένα με τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Για το σκοπό αυτό, οι εξισώσεις των ηλεκτρικών κυκλωμάτων περιλαμβάνονται στη διατύπωση μεταβλητής, με αποτέλεσμα η διατήρηση του φορτίου και η πλήρης ηλεκτρομηχανική σύζευξη να είναι εγγυημένη. Η διατύπωση οδηγεί σε ένα συζευγμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με μηχανικούς (μετατοπίσεις) και ηλεκτρικούς (φορτώσεις στα ηλεκτρόδια) βαθμούς ελευθερίας. Για μια σύνθετη πολυστρωματική πλάκα γραφίτη-εποξειδική (ενισχυμένη με ίνες άνθρακα), πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση για την αξιολόγηση των βέλτιστων θέσεων κατά μήκος του επιπέδου της πλάκας ( $xy$ ) και του πάχους ( $z$ ) που μεγιστοποιούν τον αποτελεσματικό συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Στη συνέχεια, η απόδοση του παθητικού ελέγχου κραδασμών αξιολογείται για ένα δίκτυο βέλτιστα τοποθετημένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων ενσωματωμένων στην πλάκα, μέσω του σχεδιασμού των τιμών αντίστασης και επαγωγής κάθε κυκλώματος, για μείωση του εύρους δόνησης των πρώτων τεσσάρων κραδαστικών ιδιομορφών. Ακόμη παρατηρήθηκε μείωση του πλάτους δόνησης κατά τουλάχιστον 10 dB για όλες τις κραδαστικές ιδιομορφές, ενώ παράλληλα εκτελείται μια ανάλυση της ενίσχυσης της αρχής ελέγχου λόγω του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος συντονισμού, όταν τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα χρησιμοποιούνται ως ενεργοποιητές. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι η αρχή ελέγχου μπορεί πράγματι να βελτιωθεί.

Ο θόρυβος και οι κραδασμοί είναι συνηθισμένα προβλήματα που μπορεί να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην υγεία του ανθρώπου. Για να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειές τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες δονητικές-ακουστικές μέθοδοι. Μια πολύ γνωστή μέθοδος είναι η πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση (PSD). Με τα χρόνια, έχουν διερευνηθεί πολλές προσεγγίσεις, από παθητικά κυκλώματα μεταβολής κατάστασης έως την ενεργή διακοπή παλμών. Στο (Krzysztof Mazur, 2021) προτείνονται τρεις υλοποιήσεις της PSD: Η παθητικά συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση σε πηνίο (SSDI), ημιανεργή SSDI και ενεργά συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση στην πηγή τάσης (SSDV) για μια δομή πάνελ τοποθετημένη σε ένα περίβλημα άκαμπτου πλαισίου. Τα εννέα στοιχεία σύνθετων μακροϊνών (MFC) τοποθετήθηκαν στην πλάκα με βάση προκαταρκτικές προσομοιώσεις στο Free FEM. Στη συνέχεια, τα θεωρητικά αποτελέσματα επικυρώθηκαν με ένα πείραμα ταυτοποίησης. Η κύρια έρευνα επικεντρώνεται στο επίπεδο πίεσης ήχου (SPL) και στη μείωση των δομικών δονήσεων για επιλεγμένες συχνότητες. Η ενεργή μέθοδος παρείχε την υψηλότερη μείωση των κραδασμών έως 5,5 dB για το μέγιστο δυνατό επίπεδο μεγαφώνου και έως 7,5 dB για το χαμηλότερο επίπεδο διέγερσης

## 2.9 Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της τοποθέτησης του PZT



Εικόνα 12: Μία δοκός συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικά και η παράλληλη-σε σειρά σύνδεση των πιεζοηλεκτρικών σε μία παραδιακλάδωση. J. Ducarne et al. / Journal of sound and vibration 331 (2012) 3286-3303

Η παθητική μείωση δομικών κραδασμών μέσω πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων παραδιακλάδωσης εξετάζονται στο (J. Ducarne, 2012). Παρουσιάζεται μια στρατηγική για τη βελτιστοποίηση, όσον αφορά την απόδοση απόσβεσης, τη γεωμετρία των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων καθώς και την τοποθέτησή τους στην ελαστική δομή. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στη μεγιστοποίηση του ιδιομορφικού συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης (MEMCF) της ιδιομορφής της μηχανικής δόνησης στον οποίο είναι συντονισμένη η παραδιακλάδωση. Για την απεικόνιση της μεθόδου, προτάθηκε ένα γενικό αναλυτικό μοντέλο μιας ελασματοποιημένης



δοκού. Διερευνώνται δύο διαμορφώσεις. Η πρώτη αφορά μία δοκό με δύο τοποθετημένα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα με την παραδιακλάδωση και η δεύτερη μια δοκό με πρόβολο με ένα μόνο επίθεμα. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν πρωτότυπες λύσεις κλειστής μορφής του MEMCF, οι οποίες επιτρέπουν τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών για την τοποθέτηση, όπως και το μήκος και το πάχος των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων που μεγιστοποιούν τον συντελεστή. Χρησιμοποιείται ακόμη ένα αδιάστατο μοντέλο έτσι ώστε αυτή η μελέτη να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό οποιασδήποτε έξυπνης δοκού, όποιες κι αν είναι οι διαστάσεις της. Αναφέρθηκαν επίσης πιο γενικά τα αποτελέσματα σχετικά με τους μηχανισμούς σύζευξης μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων και της δομής. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι το πάχος των επιθεμάτων είναι μια βασική παράμετρος και ότι είναι δυνατές διάφορες διαμορφώσεις, ανάλογα με τον εξεταζόμενο τρόπο δόνησης. Τέλος προτάθηκαν πειράματα για την επικύρωση του μοντέλου.

Ο δομικός έλεγχος κραδασμών μέσω παθητικής ηλεκτρικής παραδιακλάδωσης και ενεργητικής (υβριδικής) ενεργοποίησης ενός πιεζοκεραμικού επιθέματος τύπου wafer συνδεδεμένου στην επιφάνεια μιας απλά υποστηριζόμενης δοκού διερευνάται στο (SOON-HONG LEE, 2002) με έμφαση στη μοντελοποίηση και την κατανόηση της επίδρασης της πιεζοκεραμικής μη γραμμικότητας στην απόδοση του συστήματος. Ένα μη γραμμικό μοντέλο υστέρησης ανεξάρτητο από το ρυθμό, το μοντέλο υστέρησης Ishlinskii (IM), προσδιορίζεται από μόνη της πειραματικά για το πιεζοκεραμικό επίθεμα και στη συνέχεια ενσωματώνεται στις συζευγμένες δυναμικές εξισώσεις του συνολικού συστήματος που αποτελείται από τη δοκό και το ηλεκτρικά παραδιακλαδωμένο επίθεμα. Πειραματικές μελέτες του συστήματος επικυρώνουν το θεωρητικό μοντέλο, το οποίο στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για να διερευνηθεί το αντίκτυπο της υστέρησης PZT στην απόδοση του ελέγχου κραδασμών σε παθητικά και υβριδικά σενάρια που έχουν βελτιστοποιηθεί με βάση μια υπόθεση γραμμικού συστήματος. Μια πολλών όρων αναπαράσταση της συνάρτησης περιγραφής του μοντέλου υστέρησης IM διατυπώθηκε για να βοηθήσει τις υπολογιστικές μελέτες.

Στην εργασία του (Benjeddou, 2000) γίνεται μια πρώτη προσπάθεια να ερευνηθούν και να συζητηθούν οι πρόοδοι και οι τάσεις στις διατυπώσεις και τις εφαρμογές της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων προσαρμοστικών δομικών στοιχείων. Για τις περισσότερες συνεισφορές, οι συγκεκριμένες παραδοχές, ιδίως αυτές του ηλεκτρικού τύπου, και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων είναι επακριβείς. Οι πληροφορίες απεικονίζονται σε πίνακες και σχήματα για χρήσιμη χρήση από τους ερευνητές καθώς και από τους σχεδιαστές που ενδιαφέρονται για αυτό το αναπτυσσόμενο πεδίο έξυπνων υλικών και δομών. Έμφαση δίνεται μόνο στην ανάπτυξη προσαρμοστικών πιεζοηλεκτρικών πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, τα έγγραφα σχετικά με άλλες εφαρμογές και ενεργά συστήματα παρατίθενται επίσης

για λόγους πληρότητας. Συνολικά, περισσότερες από 100 εργασίες βρέθηκαν στην ανοιχτή βιβλιογραφία, ενώ λαμβάνοντας αυτόν τον αριθμό ως μέτρο της ερευνητικής δραστηριότητας, προσδιορίζονται και σκιαγραφούνται οι τάσεις και οι ιδέες για μελλοντική έρευνα.

Ηλεκτρικοί απορροφητές κραδασμών κατασκευασμένοι από κατανεμημένες πιεζοηλεκτρικές συσκευές για τον έλεγχο των κραδασμών της δοκού μελετούνται στο (Corrado Maurini, 2004). Οι απορροφητές λαμβάνονται με τη διασύνδεση μιας σειράς πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων ομοιόμορφα κατανεμημένων σε μια δοκό με διαφορετικά αρθρωτά ηλεκτρικά δίκτυα. Λαμβάνονται υπόψη πέντε διαφορετικές τοπολογίες των οποίων η απόσβεση αναλύεται και συγκρίνεται. Οι βέλτιστες παράμετροί τους βρίσκονται με την υιοθέτηση ενός κριτηρίου για την κρίσιμη απόσβεση των  $\tilde{k}$ -κυμάτων με τις παραμέτρους να επιλέγονται κατάλληλα ώστε να έχουν την ταχύτερη χρονικά μείωση κραδασμών για έναν μεμονωμένο αριθμό κύματος  $\tilde{k}$ . Η ανάλυση βασίζεται σε ομογενοποιημένα μοντέλα των αρθρωτών πιεζοηλεκτρομηχανικών συστημάτων, δηλαδή θεωρούνται ως συνεχή συστήματα υποθέτοντας ότι ο αριθμός των μονάδων ανά μονάδα μήκους είναι αρκετά υψηλός σε σχέση με τους εξεταζόμενους αριθμούς κυμάτων. Ονομάζοντας ως  $\tilde{k}$ -απορροφητές τους αντίστοιχους βέλτιστους απορροφητές, δείχνεται ότι, τα  $\tilde{k}$ -κύματα αποσβένονται σε  $\tilde{k}$ -απορροφητές με βέλτιστο χρόνο μείωσης ο οποίος είναι ανεξάρτητος από την τοπολογία διασύνδεσης του απορροφητή, ενώ εξαρτάται μόνο από τον συντελεστή πιεζοηλεκτρικής σύζευξης. Η απόδοση των  $\tilde{k}$ -απορροφητών εξαρτάται σημαντικά από την τοπολογία διασύνδεσης του απορροφητή για  $k$  διαφορετική από το  $\tilde{k}$ . Ένας από τους προτεινόμενους απορροφητές (που είναι κατασκευασμένος από μία ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς τέταρτης τάξης με ηλεκτρική διάχυση δεύτερης τάξης) λειτουργεί εξίσου για όλους τους αριθμούς κυμάτων και επιτυγχάνει μια αποτελεσματική απόσβεση πολλών ιδιομορφών για τη μηχανικά εξαναγκασμένη απόκριση. Τέλος αποδεικνύεται ότι οι βέλτιστες τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων εξαρτώνται διαφορετικά από τον αριθμό  $n$  των μονάδων κυκλώματος που χρησιμοποιήθηκαν για διαφορετικές τοπολογίες διασύνδεσης και ειδικότερα η βέλτιστη αυτεπαγωγή ανά μονάδα που απαιτείται σε μια γραμμή ηλεκτρικής μεταφοράς τέταρτης τάξης είναι ανάλογη του  $1/n^3$ .

Το έργο των (M Berardengo O. T.-A., 2016) ασχολείται με τον έλεγχο των κραδασμών μέσω πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων, που παραδιακλαδώνονται με ηλεκτρικές σύνθετες αντιστάσεις αποτελούμενες από μια αντίσταση και μια αρνητική χωρητικότητα. Η εργασία αναλύει τις περισσότερες από τις πιθανές διατάξεις με τις οποίες μπορεί να δημιουργηθεί μια αρνητική χωρητικότητα και δείχνει ότι είναι δυνατή μια μαθηματική περιγραφή. Αυτό επιτρέπει την εύρεση κλειστών μεθόδων προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το ηλεκτρικό δίκτυο για μίας και πολλών ιδιομορφών έλεγχο. Λαμβάνονται γενικές αναλυτικές μέθοδοι για την

εκτίμηση της απόδοσης της παραδιακλάδωσης όσον αφορά τη μείωση των κραδασμών. Ειδικότερα, επισημαίνεται ότι η κύρια επίδραση μιας αρνητικής χωρητικότητας είναι η τεχνητή ενίσχυση του συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης, που είναι η βάση της εκτίμησης της απόδοσης. Τα ζητήματα σταθερότητας που σχετίζονται με τη χρήση αρνητικών χωρητικοτήτων αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας αναδιαρθρωμένα μοντέλα για την χωρητικότητα των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Επιπλέον, προτείνεται και δοκιμάζεται ένα νέο κύκλωμα που βασίζεται σε μερικές αρνητικές χωρητικότητες, το οποίο παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις από αυτές που παρέχονται από τις συνήθεις διατάξεις με μία μόνο αρνητική χωρητικότητα. Τέλος, παρέχονται οδηγίες και αναλυτικές διατυπώσεις για την πρακτική εφαρμογή κυκλωμάτων αρνητικής χωρητικότητας.

Ο έλεγχος θέσης και η μηχανική καταστολή κραδασμών είναι ακόμα προβλήματα για τους συμβατούς μηχανισμούς ζεύξης. Βελτιώσεις στη λειτουργία και την ακρίβεια των χειριστών μπορούν να γίνουν με την εύρεση λύσεων για αυτά τα προβλήματα. Στο έργο των (Erfan Shojaei Barjuei, 2020) παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη σύγκριση απόδοσης μεταξύ ελεγκτών (δύο από αυτούς στιβαροί ελεγκτές) για τον έλεγχο της θέσης και τη μείωση των μηχανικών κραδασμών σε έναν συμβατό χειριστή ζεύξης σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον. Η σύγκριση αφορά: (i) έναν γραμμικό τετραγωνικό ρυθμιστή, (ii) έναν ελεγκτή πρόβλεψης μοντέλου, (iii) μία διαμόρφωση βρόχου  $H_\infty$  και μία (iv) μ-σύνθεση. Οι συγκρίσεις των ελεγκτών γίνονται με βάση την παρακολούθηση θέσης, την απόσβεση κραδασμών και την προσπάθεια ελέγχου στο περιβάλλον προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της βαρύτητας. Τέλος, η εργασία καταλήγει σε ένα συμπέρασμα παρέχοντας ορισμένες πληροφορίες σχετικά με τον κύριο σκοπό, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε ελεγκτή σε συμβατές εφαρμογές χειριστή ζεύξης.

Ορισμένα εύρη συχνοτήτων όπου τα κύματα δεν διαδίδονται και έτσι οι δονήσεις καταστέλλονται, ονομάζονται κενά ζώνης. Στην εργασία των (Panagiotis I. Koutsianitis, 2020) η εμφάνιση και η συμπεριφορά τέτοιων περιοχών διερευνάται σε αστεροειδή αυξητικές μικροδομές, οι οποίες είναι εξοπλισμένες με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία παραδιακλάδωσης. Η βέλτιστη θέση των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων βρίσκεται χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους, λαμβάνοντας υπόψη τη μεγιστοποίηση του συντελεστή ηλεκτρομηχανικής ζεύξης. Ένας γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τιμών των ηλεκτρικών παραμέτρων του παραδιακλαδωμένου κυκλώματος συντονισμού, με στόχο τη μεγιστοποίηση ορισμένων κενών ζώνης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεγιστοποίηση των κενών ζώνης σε ορισμένες περιοχές συχνοτήτων, καθώς και σε ζώνες συχνοτήτων που δεν έχουν ληφθεί υπόψη στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της μηχανικής μικροδομής.

Το έργο των (S. O. R. Moheimani, 2002) ασχολείται με το πρόβλημα της δυναμικής και της σταθερότητας ελασματοποιημένων πιεζοηλεκτρικών κατασκευών, στις οποίες πολλά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία παραδιακλαδώνονται από μια σύνθετη αντίσταση πολλαπλών εισόδων. Το πρόβλημα φαίνεται να είναι ισοδύναμο με ένα πρόβλημα ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών ανάδρασης. Δίνεται μια παραμετροποίηση των σταθεροποιητικών πινάκων συνάρτησης και μεταφοράς εισόδου και μια συγκεκριμένη κατηγορία ελεγκτών εισάγεται ικανή να μειώνει τους δομικούς κραδασμούς και να εγγυηθεί σταθερότητα κλειστού βρόχου. Παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του την προτεινόμενη μεθοδολογία.

(A J Fleming S. B., 2003) Οι δομικοί κραδασμοί μπορούν να μειωθούν με την παραδιακλάδωση ενός προσαρτημένου πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα (PZT) με μία ηλεκτρική αντίσταση. Σχέδια παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων ρεύματος, π.χ. ένα δίκτυο πηνίου-αντίστασης μίας ιδιομορφής, συνήθως απαιτούν μεγάλες τιμές επαγωγής. Στην πράξη, οι διακριτικοί επαγωγείς περιορίζονται στο μέγεθος περίπου 1 H. Τοποθετώντας μία επιπλέον χωρητικότητα στους ακροδέκτες του PZT, οι επαγωγές του κυκλώματος παραδιακλάδωσης μπορούν να μειωθούν δραστικά. Για να δικαιολογηθούν οι ισχυρισμοί, παρουσιάστηκε μια θεωρητική ανάλυση του συστήματος απόσβεσης και προσδιορίστηκε η επίδραση της πρόσθετης χωρητικότητας. Δύο ιδιομορφές μιας απλά υποστηριζόμενης δοκού αποσβένονται επιτυχώς χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα παραδιακλάδωσης τροποποιημένης χωρητικότητας, ενώ παράλληλα ένα κύκλωμα πολλών ιδιομορφών και χαμηλής επαγωγής μελετάται και επαληθεύεται πειραματικά.

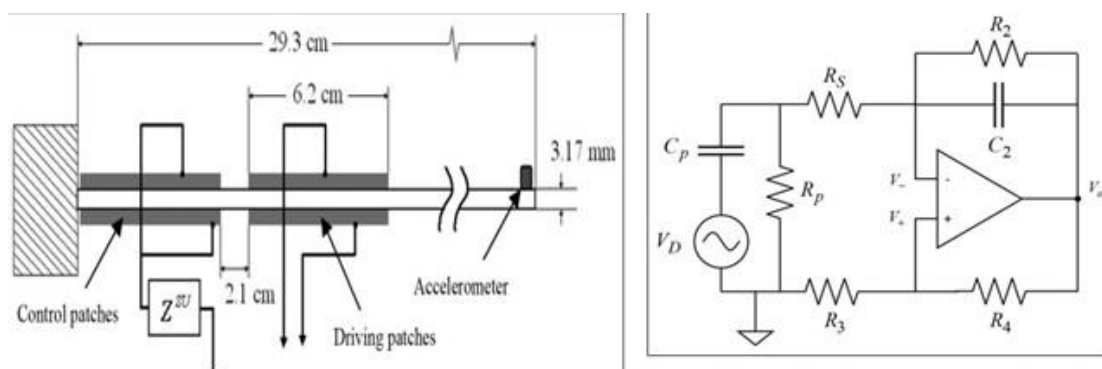
Το άρθρο των (Julien Ducarne, 2017) είναι αφιερωμένο στη μείωση των κραδασμών μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων παραδιακλάδωσης. Ένα μοντέλο δοκού με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα επεκτείνεται στις ιδιομορφές δόνησης ενός βραχέου κυκλώματος προκειμένου να ληφθεί μια απλή αναπαράσταση του προβλήματος ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Στη συνέχεια, από αυτήν την αναπαράσταση, υπολογίζονται οι βέλτιστες ωμικές και επαγωγικές παραδιακλαδώσεις και συνάγεται η λαμβανόμενη εξασθένηση. Τέλος, προτείνεται μία βελτιστοποίηση των διαστάσεων των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων καθώς και της θέσης τους στη δομή. Όλα αυτά τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα πειραματικά.

Στο έργο των (Alexandre Presas, 2017), αναπτύσσεται και επικυρώνεται μια μέθοδος για τον ακριβή προσδιορισμό της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας (FRF) βυθισμένων και περιορισμένων κατασκευών χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά επιθέματα (PZT). Η μέθοδος αποτελείται από τον πειραματικό προσδιορισμό ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων που ορίζουν το FRF, με ένα μη βαθμονομημένο PZT να διεγείρει τη δομή. Αυτές οι παράμετροι, που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά, στη συνέχεια εισάγονται σε ένα επικυρωμένο

αριθμητικό μοντέλο της δοκιμαζόμενης δομής. Με αυτόν τον τρόπο, η FRF της κατασκευής μπορεί να εκτιμηθεί με καλή ακρίβεια. Σε σχέση με προηγούμενες μελέτες, όπου ελήφθησαν υπόψη μόνο οι φυσικές συχνότητες και τα σχήματα των ιδιομορφών, αυτό το άρθρο αναλύει και αποδεικνύει πειραματικά το καλύτερο χαρακτηριστικό διέγερσης, ώστε να ληφθούν επίσης οι λόγοι απόσβεσης και προτείνει μια διαδικασία για τον πλήρη προσδιορισμό της FRF. Η μέθοδος που προτείνεται έχει επικυρωθεί για δομή που δονείται στον αέρα, συγκρίνοντας την FRF που ελήφθη πειραματικά με έναν βαθμονομημένο διεγέρτη (κρουστικό σφυρί) και την FRF που λαμβάνεται με την περιγραφόμενη μέθοδο. Τέλος, η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε για κατασκευή βυθισμένη και βρισκόμενη κοντά σε άκαμπτο τοίχο, όπου είναι εξαιρετικά σημαντικό να μην τροποποιηθούν οι οριακές συνθήκες για τον ακριβή προσδιορισμό της FRF. Όπως φαίνεται πειραματικά, σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση των PZT σε συνδυασμό με την προτεινόμενη μεθοδολογία δίνει πολύ πιο ακριβείς εκτιμήσεις της FRF από άλλους βαθμονομημένους διεγέρτες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον ίδιο σκοπό. Επομένως, η επικυρωμένη μεθοδολογία που προτείνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη της FRF μιας βυθισμένης και περιορισμένης δομής, χωρίς προηγούμενη βαθμονόμηση του PZT.

Η πιεζοηλεκτρική (PZT) παραδιακλαδωμένη απόσβεση είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη διάχυση ενέργειας από μια δονούμενη δομή. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις εφαρμογές επικεντρώνονται στη στόχευση συγκεκριμένων ιδιομορφών για δομές που δονούνται σε εύρος χαμηλής συχνότητας, δηλαδή ντετερμινιστική υποδομή (DS). Για την βέλτιστη εξασθένιση δομών που δονούνται σε εύρος υψηλών συχνοτήτων, δηλαδή μη ντετερμινιστική υποδομή (Non-DS) χρησιμοποιώντας έναν παραδιακλαδωμένο αποσβεστήρα PZT, διαπιστώθηκε ότι η σύνθετη αντίσταση του τερματικού του επιθέματος πρέπει να είναι το σύνθετο σύζευγμα της εγγενούς χωρητικότητας του παράλληλα με την αντίσταση που «αντιμετωπίζει» η μη ντετερμινιστική δομή τη στιγμή της ενεργοποίησης. Το τελευταίο προέκυψε μέσω της εκτίμησης της αποτελεσματικής κινητικότητας γραμμής ενός επιθέματος PZT σε μια πλάκα μη ντετερμινιστική, ενσωματώνοντας την έκφραση της στιγμιαίας κινητικότητας του σημείου οδήγησης μιας άπειρης λεπτής πλάκας. Στο έργο των (AsanG.A. Muthalif, 2021) διεξάγεται μια παραμετρική έρευνα ώστε να μελετηθεί το αποτέλεσμα της αλλαγής του μεγέθους, της ποσότητας και της διαμόρφωσης του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στην απόδοση των βέλτιστων πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων αποσβεστήρων στη διάχυση της ενέργειας της μη ντετερμινιστικής δομής. Τα αποτελέσματα φαίνονται ως προς την αναλογία μείωσης ενέργειας της λεπτής πλάκας όταν συνδέεται με τους βέλτιστους αποσβεστήρες.

## 2.10 Βελτιστοποίηση χαρακτηριστικών στοιχείων παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών.



Εικόνα 13: Μία υποστηριζόμενη δοκός συνδεδεμένη με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα και δίπλα η αναπαράσταση του κυκλώματος της.

Στην παθητική εξασθένηση κραδασμών, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που περιέχουν συνθετικές σύνθετες αντιστάσεις για να συντονιστούν με ένα τυπικό πρόβλημα μηχανικής δόνησης είναι ο απλούστερος τρόπος για να αποφευχθεί ο μεγάλος όγκος και το βάρος των κλασικών πηνίων, οι οποίοι πρέπει να είναι μεγάλοι λόγω του σεναρίου χαμηλής συχνότητας της δυναμικής μηχανικής. Για την κατασκευή αυτών των προσομοιωμένων πηνίων που πετυχαίνουν τη μεταφορά ενέργειας από μηχανική δόνηση στο ηλεκτρικό κύκλωμα, χρησιμοποιούνται σχήματα με λειτουργικούς ενισχυτές, που παρέχουν υψηλές τιμές henrys με τον νόμο σχηματισμού ανάλογα με τις αντιστάσεις και τους πυκνωτές που συνδέονται με αυτούς. Στη μελέτη των (Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini-Vicente, 2016) πραγματοποιήθηκε η πειραματική αξιολόγηση κυκλωμάτων που χρησιμοποιούν τρία είδη συνθετικών πηνίων, διαμορφώσιμων μεταξύ σειριακών και παράλληλων διατάξεων, εφαρμόζοντας τρεις τύπους κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης, συντονισμένοι για να μετριάσουν τρεις ιδιομορφές μιας δομής. Τα αποτελέσματα οργανώθηκαν για να παρέχουν μια επισκόπηση της ικανότητας εξασθένησης, δείχνοντας τον αντίκτυπο των συντονισμών του κυκλώματος για κάθε ιδιομορφή δόνησης. Έτσι, τα πειράματα δείχνουν, ότι για τα ονομαστικά κυκλώματα, ο συντονισμός με τη μεγαλύτερη εξασθένηση είναι ο Wu Parallel όταν ρυθμίζεται στην πρώτη ιδιομορφή. Συνολικά, στα αποτελέσματα φαίνεται μια πιθανή ικανότητα εξασθένησης, η οποία μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω από τη χρήση άλλων κυκλωμάτων πιο προσαρμοσμένων στη βιβλιογραφία.

Στο έργο των (RAED I. BOURISLI, 2010), η περιοχή πιεζοηλεκτρικής κάλυψης μιας διατμητικής παραμορφώσιμης δοκού με πρόβολο έχει βελτιστοποιηθεί με σκοπό τον μέγιστο συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διακριτής στρώσης με πιεζοηλεκτρική ικανότητα εφαρμόζεται για την επίλυση του προβλήματος των ελεύθερων κραδασμών σε ηλεκτρικές οριακές συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος και βραχύ κυκλώματος. Για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ένας δυαδικός γενετικός αλγόριθμος. Οι θέσεις πιεζοηλεκτρικής κάλυψης βρέθηκε ότι εξαρτώνται από τον τρόπο δόνησης, ο οποίος οφείλεται κυρίως στην ακύρωση φόρτισης σε υψηλότερες ιδιομορφές. Η βέλτιστη κατανομή τείνει να καλύπτει μέρος της δοκού βιώνοντας τη μέγιστη κάμψη. Αποδεικνύεται ότι ο τύπος του υλικού της βασικής δοκού έχει αμελητέα επίδραση στις βέλτιστες θέσεις του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Επιπλέον, υπάρχει μια βέλτιστη αναλογία πάχους πιεζοηλεκτρικού ως προς τη δοκό για τις τρεις πρώτες ιδιομορφές.

Ο έλεγχος δονούμενων κατασκευών με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων προσαρτημένων σε απλά κυκλώματα ελέγχου, γνωστά ως παραδιακλάδωσεις, είναι ένα πεδίο ευρέως μελετημένο. Πολλά διαφορετικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης έχουν ερευνηθεί που έχει αποδειχθεί ότι έχουν αποτελεσματική απόδοση τόσο σε στενές όσο και σε ευρυζωνικές περιοχές συχνοτήτων. Ωστόσο, η επιλογή των ακριβών παραμέτρων των στοιχείων του κυκλώματος για αυτές τις παραδιακλάδωσεις καταστολής κραδασμών μπορεί να βρεθεί με διάφορες μεθόδους. Στην μελέτη των (Benjamin S Beck, 2014), παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος επιλογής των παραμέτρων του κυκλώματος μιας παραδιακλάδωσης αρνητικής χωρητικότητας. Η μέθοδος προβλέπει το μέγεθος της τάσης που προκαλείται από το δονούμενο υπόστρωμα που υπολογίζεται από μία μέτρηση τάσης. Επομένως, η ελαχιστοποίηση της τάσης θα σημαίνει ότι ελαχιστοποιείται και η εκτροπή της κατασκευής. Η θεωρία συντονισμού επιβεβαιώνεται πειραματικά, η οποία επικυρώνει ότι είναι δυνατό να ληφθούν πειραματικά οι παράμετροι παραδιακλάδωσης που παράγουν το μέγιστο έλεγχο μέσω μέτρησης της απόκρισης παραδιακλάδωσης. Η ικανότητα καταστολής της παραδιακλάδωσης συγκρίνεται επίσης με τη μέγιστη ισχύ που καταναλώνεται. Διαπιστώθηκε ότι σε υψηλή συχνότητα, οι παράμετροι που προκαλούν τη μέγιστη καταστολή ισχύος αποκτούν μέγιστη καταστολή, αλλά δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης καταστολής ισχύος και της μέγιστης καταστολής σε χαμηλή συχνότητα.

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλά βιομηχανικά προϊόντα λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής/βάρους και της δυνατότητας προσαρμογής χαρακτηριστικών λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις απόδοσης για τυπικές εφαρμογές στατικής ή/και δυναμικής φόρτισης. Ως αποτέλεσμα, ενσωματώθηκαν σε πολλά προϊόντα υψηλής τεχνολογίας, ειδικά σε κατασκευές αεροδιαστημικής και αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου οι περιορισμοί

ασφάλειας, αξιοπιστίας και απόδοσης απαιτούν σημαντική προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης τεχνικών για την παρακολούθηση των δομών, τον έλεγχο σχήματος και τον έλεγχο θορύβου και κραδασμών των κατασκευών. Στο πλαίσιο της εξασθένησης των κραδασμών, στο έργο των (B. G. G. L. Zambolini-Vicente, 2019) το ενδιαφέρον περιορίζεται στη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών σε συνδυασμό με παθητικά ηλεκτρικά κυκλώματα για εφαρμογή σε σύνθετες κατασκευές με σκοπό την άσκηση παθητικού ελέγχου δονήσεων. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες στην εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων και κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης σε συνδυασμό με μεταλλικά υλικά για πρόβλημα της εξασθένησης των κραδασμών. Ωστόσο, δεν είναι πολλές οι εργασίες που αφιερώνονται στην εφαρμογή κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης σε σύνθετες κατασκευές με έμφαση στην παραμετροποίηση του ηλεκτρομηχανικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, που παρακινεί τη μελέτη που αναφέρεται εδώ. Επίσης, ως φυσική προέκταση της διαδικασίας αριθμητικής μοντελοποίησης, μια σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ισχυρή βελτιστοποίηση των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης. Ένα από τα ενδιαφέροντα είναι η χρήση μιας στρατηγικής βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που ενσωματώνει συναρτήσεις ευπάθειας για να ληφθούν υπόψη οι εισαγόμενες παραμετρικές αβεβαιότητες. Αυτές οι αβεβαιότητες μοντελοποιούνται μέσω της μεθόδου μέγιστης εντροπίας για μεταβλητές σχεδιασμού που ελέγχουν την απόδοση των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης. Τέλος, οι ισχυροί σχεδιασμοί που προέκυψαν για τα συζευγμένα πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης αξιολογούνται με τη δημιουργία των περιβλημάτων των συναρτήσεων απόκρισης της συχνότητας και επισημαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Δομικοί κραδασμοί μπορεί να εμφανιστούν σε μηχανικά συστήματα οδηγώντας σε κόπωση, μειωμένη αντοχή ή ανεπιθύμητο θόρυβο. Σε αυτό το πλαίσιο, η παραδιακλάδωση πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων σε συντονιστικές παραδιακλαδώσεις μπορεί να είναι ένα κατάλληλο μέτρο για την εξασθένηση των δονήσεων. Η επιτευχθείσα εξασθένηση εξαρτάται σημαντικά από τον συντονισμό των παραμέτρων παραδιακλάδωσης. Η αβεβαιότητα στο σχεδιασμό και την εφαρμογή των συντονισμένων πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων παραδιακλάδωσης μπορεί να οδηγήσει σε ένα αποσυντονισμένο σύστημα εξασθένησης και σε απώλεια της απόδοσης εξασθένησης. Ως εκ τούτου, στο (Anja Kuttich, 2017) προτείνεται μια προσέγγιση που βασίζεται σε ισχυρή βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας το Bounded Real Lemma για τον περιορισμό της απώλειας εξασθένησης κραδασμών λόγω αβεβαιότητας. Αποδεικνύεται για τις συντονιστικές παραδιακλαδώσεις, ότι αύξοντες συντελεστές ηλεκτρομηχανικής σύζευξης συγκλίνουν τα μέγιστα πλάτη δόνησης της χειρότερη περίπτωσης για τη μη στιβαρή και τη στιβαρή βελτιστοποίηση των παραμέτρων παραδιακλάδωσης. Επιπλέον, με την προσθήκη μιας αρνητικής χωρητικότητας στην παραδιακλάδωση συντονισμού,



το μέγιστο πλάτος στη χειρότερη περίπτωση παραμένει σχεδόν σταθερό για όλους τους συντελεστές σύζευξης που εξετάζονται για τη μη στιβαρή και τη στιβαρή βελτιστοποίηση των παραμέτρων παραδιακλάδωσης.

Οι πιεζοηλεκτρικοί σωληνωτοί σαρωτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης υψηλής ανάλυσης, όπως σε μακροσκοπικό ανιχνευτή σάρωσης και η νανοκατασκευή. Πολλές έρευνες έχουν προχωρήσει με το στόχο της μείωσης της υστέρησης και των κραδασμών, τα δύο κύρια προβλήματα που σχετίζονται με τους πιεζοηλεκτρικούς σωληνωτούς σαρωτές. Στο έργο του (Fleming, 2006) προτείνονται δύο απλές τεχνικές ταυτόχρονης μείωσης της υστέρησης και των κραδασμών. Ο πρώτος είναι ένας νέος ακριβής φόρτισης συνεχούς ρεύματος ενισχυτής που φαίνεται ότι μειώνει σημαντικά την υστέρηση αποφεύγοντας τη χαρακτηριστική μετατόπιση τάσης και η δεύτερη μία τεχνική πιεζοηλεκτρικής παραδιακλαδωμένης απόσβεσης, που υπήρχε στο παρελθόν στον τομέα των έξυπνων κατασκευών και έχει εφαρμοστεί σε κραδασμούς σωλήνα. Με την τοποθέτηση μίας σύνθετης αντίστασης LCR σε ένα ηλεκτρόδιο ενός σωλήνα, η πρώτη μηχανική ιδιομορφή μειώνεται κατά 20 dB

Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα παραδιακλαδωμένης απόσβεσης μειώνουν τους δομικούς κραδασμούς παραδιακλαδώνοντας έναν συνδεδεμένο πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα με μία ηλεκτρική αντίσταση. Σε πρακτικές καταστάσεις, η διακύμανση του δομικού φορτίου ή των περιβαλλοντικών συνθηκών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στις δομικές συχνότητες συντονισμού. Αυτή η διακύμανση μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση της απόσβεσης της παραδιακλάδωσης καθώς η ηλεκτρική αντίσταση παραμένει συντονισμένη στις ονομαστικές συχνότητες συντονισμού. Το έργο των (A J Fleming S. O., 2003) εισάγει μια μέθοδο για την ηλεκτρονική προσαρμογή της αντίστασης παραδιακλάδωσης. Μια ανακατασκευασμένη εκτίμηση της καταπόνησης RMS ελαχιστοποιείται μεταβάλλοντας τις τιμές συνιστωσών ενός συνθετικού κυκλώματος παραδιακλαδωμένης απόσβεσης. Οι τεχνικές που παρουσιάζονται εφαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο ώστε να συντονιστούν οι τιμές των συνιστωσών μιας τυχαία διεγερμένης δοκού.

Όταν βελτιστοποιηθούν, οι συντονισμένοι αποσβεστήρες μάζας (TMD) μπορούν να μετριάσουν αποτελεσματικά τη δόνηση της κύριας δομής, επειδή εισάγεται πρόσθετος συντονισμός και απόσβεση από το βοηθητικό σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα. Παρόμοιο αποτέλεσμα μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς βοηθητική μάζα όταν μια παραδιακλάδωση ηλεκτρομαγνητικού μορφοτροπέα με το κύκλωμα συντονισμού R-L-C τοποθετείται μεταξύ της κύριας δομής και της βάσης. Στόχος της εργασίας των (Xiudong Tang, 2016) είναι να βελτιστοποιήσει αναλυτικά τις παραμέτρους των κυκλωμάτων R-L-C για την μείωση των κραδασμών. Διερευνώνται και τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης  $H_2$  και  $H_1$ , τα οποία είναι η

ελαχιστοποίηση της δόνησης ριζικού μέσου τετραγώνου (RMS) υπό τυχαία διέγερση και του μέγιστου μεγέθους στον τομέα συχνότητας, αντίστοιχα. Στη συνέχεια συνοψίζονται οι συνοπτικές λύσεις κλειστής μορφής των βέλτιστων παραμέτρων μαζί με αυτές που λαμβάνονται με τη μέθοδο σταθερού σημείου, για ευκολία πρακτικής εφαρμογής. Οι βελτιστοποιήσεις  $H_2$  και  $H_1$  για συλλογή ενέργειας συζητούνται, ενώ παράλληλα αναλύεται και η ευαισθησία των επιδόσεων του συστήματος στις αλλαγές των παραμέτρων συντονισμού του κυκλώματος ηλεκτρομαγνητικής παραδιακλάδωσης.

Ο πιεζοηλεκτρικός συντονισμός παραδιακλάδωσης είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μπορεί να αποσβέσει σημαντικά τους μηχανικούς κραδασμούς εάν είναι καλά συντονισμένος. Ωστόσο, η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει τα ηλεκτρικά εξαρτήματα της παραδιακλάδωσης και τις μηχανικές παραμέτρους της δονούμενης δομής και ως συνέπεια να επιδεινώσει την απόδοση της απόσβεσης. Ο στόχος της εργασίας των (R. Darleux, 2018) είναι να περιγράψει πώς μπορούν να επιλεγούν επαγωγικά και χωρητικά εξαρτήματα έτσι ώστε να διατηρείται ο συντονισμός της παραδιακλάδωσης στην περίπτωση διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Δύο λύσεις πλήρως παθητικής προσαρμοστικής παραδιακλάδωσης αναπτύσσονται, δοκιμάζονται και συγκρίνονται. Η πρώτη λύση περιλαμβάνει μια μεταβλητή αυτεπαγωγή, ενώ η δεύτερη λύση περιλαμβάνει μια μεταβλητή χωρητικότητα και σκοπεύει να διατηρήσει την επαγωγή της παραδιακλάδωσης όσο το δυνατόν πιο σταθερή. Τα πειράματα επικυρώνουν την ιδέα μιας συντονισμένης παραδιακλάδωσης που προσαρμόζεται αυτόνομα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Ο σχεδιασμός του πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα περιλαμβάνει μαθηματική μοντελοποίηση και πειραματική επαλήθευση, τα οποία είναι απαραίτητα για την επικύρωση του. Για να γίνει ένα ακριβές αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε διηλεκτρικές, πιεζοηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Επομένως, η απόσβεση είναι μια ιδιότητα δύσκολο να μετρηθεί, καθώς σχετίζεται με μηχανικές απώλειες και εξαρτάται από τη συχνότητα. Ο στόχος της εργασίας των (Gilder Nader, 2004) είναι να προσδιορίσει τις τιμές απόσβεσης αυτών των υλικών ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λογισμικό FEM. Οι τιμές απόσβεσης προσδιορίζονται με τον συνδυασμό πειραματικών και αριθμητικών τεχνικών. Για τα πιεζοκεραμικά η απόσβεση προσδιορίζεται μέσω του συντελεστή ποιότητας ( $Q_m$ ) που προκύπτει μετρώντας την καμπύλη εισόδου που επηρεάζεται από την απόσβεση. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές, εκτελούνται αρμονικές προσομοιώσεις FEM πιεζοκεραμικών και πιεζοηλεκτρικών μορφοτροπέων και συγκρίνεται η προσομοιωμένη καμπύλη ηλεκτρικής αποδοχής με τη μετρούμενη. Ο προσδιορισμός της απόσβεσης για μη πιεζοηλεκτρικά υλικά γίνεται με σύγκριση πειραματικών και προσομοιωμένων αποτελεσμάτων.

Το κύριο θέμα της εργασίας των (Johan Frederik Toftekær, 2019) είναι η συνεπής διατύπωση μίας νέας μεθόδου συντονισμού για R-L παραδιακλάδωσεις ως προς τις μεταβλητές που είναι άμεσα διαθέσιμες ως λύσεις σε οποιονδήποτε εμπορικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS). Μια εναλλακτική μέθοδος βασίζεται σε οιονεί στατικές λύσεις με ηλεκτρόδια ανοιχτού και βραχύ κυκλώματος, βολικές τόσο για αριθμητική ανάλυση όσο και για πειράματα. Η προτεινόμενη μέθοδος συντονισμού παραδιακλάδωσης είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε οποιοδήποτε εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που υποστηρίζει ηλεκτρομηχανική ανάλυση, ενώ το ANSYS χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της ακρίβειάς της για ένα πρόβλημα αναφοράς πιεζοηλεκτρικής έξυπνης πλάκας. Η μέθοδος τελικά επεκτείνεται σε πολλαπλά πιεζοκεραμικά επιθέματα, τοποθετημένα συμμετρικά στη δομή με παραδιακλάδωσεις σε ένα ενιαίο δίκτυο RL.

Στο (Bart P. Van Parys, 2012) παρουσιάζεται μια μέθοδος δέσμευσης της απόδοσης των αιτιολογικών ελεγκτών για αβέβαια γραμμικά συστήματα με μικτές καταστάσεις και περιορισμούς εισόδου. Η απόδοση μετριέται με τη χειρότερη τιμή (σε όλες τις πιθανές εισροές διαταραχών) μίας κυρτού τμηματικά γραμμικού κόστους συνάρτησης σε έναν πεπερασμένο ορίζοντα. Η μέθοδός υπολογίζει μια πολιτική ελέγχου αιτιώδους συνάφειας που ικανοποιεί τους περιορισμούς, ενώ ταυτόχρονα παρέχει ένα χαμηλότερο όριο στην εφικτή απόδοση αυτής ή οποιασδήποτε άλλης πολιτικής αιτιώδους ελέγχου που έχει κατασκευαστεί με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Ο ελεγκτής και η εγγύηση απόδοσης μπορούν να βρεθούν επιλύοντας μια σειρά από προβλήματα κυρτής κωνικής βελτιστοποίησης που συνδέονται στενά.

Η χωρητικότητα διαφορετικών συσκευών που παρέχονται αυτόματα χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης μελετάται στο (Stéphanie Livet, 2012) για τη βελτίωση της δομικής απόσβεσης αποφεύγοντας την εφαρμογή πολύπλοκων και βαρέων συσκευών ελέγχου. Η παρουσιαζόμενη τεχνική χρησιμοποιεί ένα αποκλειστικό αριθμητικό πιεζομηχανικό μοντέλο που συνδυάζει μηχανικές και ηλεκτρικές παραμέτρους ζεύξης. Ακόμη μια πρωτότυπη μεθοδολογία εισάγεται για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης που συνδέονται με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και των δομικών θέσεων των ενσωματωμένων μορφοτροπέων. Τα αποτελέσματα, πειραματικά επικυρωμένα (σε δοκούς και μία πλάκα), αποδεικνύουν ότι οι δονήσεις μπορούν να μειωθούν σημαντικά όταν οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές παραδιακλάδωσης τοποθετούνται σε μία πραγματική δομή. Τέλος, η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του σχήματος και της θέσης των παραδιακλαδισμένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων για την απόσβεση πολλών ιδιομορφών μιας πλάκας.

Στόχος του έργου των (Cu-Hai Nguyen, 2004) είναι η διερεύνηση της ευαισθησίας της μεταφοράς της αποδοτικότητα της πιεζοηλεκτρικής ενεργοποίησης σε μια δοκό με πρόβολο λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και πιθανών διακυμάνσεων στο πάχος των συγκολλητικών στρωμάτων που συνδέουν του ενεργοποιητές σε μια δοκό. Οι έρευνες γίνονται αναλυτικά με βάση μια στατική γραμμική κατανομή διαμήκους καταπόνησης κατά μήκος ολόκληρου του τμήματος δοκού/συγκόλλησης/ενεργοποιητών, καθώς και του μοντέλου υστέρησης διάτμησης. Εκτός από τις γνωστές προϋποθέσεις για την μεταφορά της αποτελεσματικότητας της ενεργοποίησης, όπως η αντιστοίχιση σύνθετης αντίστασης, λαμβάνει κανείς περαιτέρω απαιτήσεις για τη μεταφορά αυτής, από τις οποίες η πιο σημαντική είναι το μικρό πάχος του συγκολλητικού στρώματος. Ωστόσο, οι επιδράσεις της θερμοκρασίας και του πάχους σύνδεσης είναι μικρότερες από τις αναμενόμενες, δηλαδή, οι παραλλαγές που προκαλούνται από πρακτική τοποθέτηση και χρήση εκτός εργαστηρίου δεν έχουν έντονο αποτέλεσμα στη μεταφορά της απόδοσης ενεργοποίησης. Χρησιμοποιώντας στη συνέχεια το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και μοντελοποιήθηκε το πλήρες σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των στρώσεων κόλλας. Για τους υπολογισμούς πεπερασμένων στοιχείων, οι εξαρτήσεις της θερμοκρασίας από όλες οι ιδιότητες του υλικού γραμμικοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ιδιοσυχνότητες της δόνησης της δοκού μειώνονται ελαφρώς μόνο σε υψηλότερες θερμοκρασίες και για παχύτερες στρώσεις κόλλας, χωρίς καμία μείωση στο πλάτος συντονισμού.

Η εργασία των (P Soltani, 2015) προτείνει έναν πιεζοηλεκτρικό απορροφητή κραδασμών, που ονομάζεται μη γραμμικός πιεζοηλεκτρικός συντονισμένος απορροφητής κραδασμών (NPTVA), για την μείωση των μη γραμμικών συντονισμών μηχανικών συστημάτων. Το νέο χαρακτηριστικό του NPTVA είναι ότι η μη γραμμική δύναμη επαναφοράς του σχεδιάζεται σύμφωνα με μια αρχή ομοιότητας, δηλαδή, το NPTVA θα πρέπει να είναι ένα ηλεκτρικό ανάλογο του μη γραμμικού συστήματος υποδοχής. Οι αναλυτικοί τύποι για τις παραμέτρους του NPTVA προέρχονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαταραχής ομοτοπίας. Κάνοντας αυτό, μια μη γραμμική γενίκευση του κανόνα συντονισμού ίσης κορυφής του Den Hartog έχει αναπτυχθεί για πιεζοηλεκτρικούς απορροφητές κραδασμών.

Η χρήση πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδώσεων για την καταστολή των κραδασμών και η σύζευξη μεταξύ της κλασικής συντονιστικής παραδιακλάδωσης και των αρνητικών χωρητικότητας είναι το επίκεντρο του ενδιαφέροντος στο (M Berardengo S. M., 2019). Παρέχονται γενικές συνθέσεις για τον συντονισμό των στοιχείων που συνθέτουν την αντίσταση παραδιακλάδωσης και διερευνώνται οι επακόλουθες επιδόσεις της εξασθένησης κραδασμών. Επιπλέον, η εργασία εξηγεί ποια προβλήματα θα μπορούσαν να προκύψουν σε πρακτικές εφαρμογές και πώς να τα ξεπεράσουμε. Τα θεωρητικά αποτελέσματα επικυρώνονται μέσω πειραματικής καμπάνιας.

Ο έλεγχος κραδασμών των κατασκευών εισάγεται από έναν πιεζοηλεκτρικό απορροφητή μάζας με παραδιακλάδωση αντίστασης επαγωγής, εισάγοντας τη δομική μάζα, τη μάζα απορρόφησης και την τάση κατά μήκος της παραδιακλάδωσης ως τρεις βαθμούς ελευθερίας. Οι πόλοι του συστήματος ακολουθούν ημικυκλικές διαδρομές στο επίπεδο, όπου η ίση απόσβεση εξασφαλίζεται από συνθήκες αντίστροφου σημείου για τις μη αποσβεσμένες ρίζες που σχετίζονται με εξαφανιζόμενη και άπειρη αντίσταση. Οι υπόλοιπες παράμετροι βαθμονομούνται σχετικά με μία λύση αναφοράς με σημείο διχοτόμησης τριπλής ρίζας. Στο (Høgsberg, 2018) παρουσιάζονται διαδικασίες σχεδιασμού για παράλληλες και σε σειρά παραδιακλαδώσεις, επιδεικνύοντας ένα επίπεδο στις καμπύλες πλάτους για επαρκώς διαχωρισμένους ριζικούς τόπους χωρίς σημεία παραδιακλάδωσης.

Οι πιεζοηλεκτρικοί μορφοτροπείς παραδιακλάδωσης χρησιμοποιούνται για την καταστολή των κραδασμών εδώ και δεκαετίες. Μεταξύ της πληθώρας κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης που έχουν προταθεί, τα κυκλώματα συντονισμού, δηλαδή τα κυκλώματα που ενσωματώνουν επαγωγείς και αντιστάσεις, είναι πολύ δημοφιλή λόγω της αποτελεσματικότητάς τους στην εξασθένιση των κραδασμών σε συγκεκριμένες συχνότητες, και ιδιαίτερα γύρω από αυτές του συντονισμού. Ωστόσο, τέτοια κυκλώματα συνήθως απαιτούν επαρκή συντονισμό των εμπλεκόμενων ηλεκτρικών παραμέτρων, δηλαδή της αντίστασης  $R$  και της επαγωγής  $L$ , καθώς είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της συχνότητας συντονισμού. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για το σκοπό αυτό. Στην έρευνα των (Georgios K. Tairidis), εξελικτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, και πιο συγκεκριμένα γενετικοί αλγόριθμοι και βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων, έχουν χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση της αντίστασης παραδιακλάδωσης. Η χρήση τέτοιων μεθόδων δεν είναι μόνο νέα, αλλά και αποτελεσματική. Πραγματοποιούνται αριθμητικά πειράματα σε ένα έξυπνο μοντέλο πιεζοηλεκτρικής δοκού. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με άλλα δημοσιευμένα αριθμητικά και πειραματικά. Ένα απλό μηχανικό μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας χρησιμοποιείται επίσης για επικύρωση.

Στο έργο των (Guoying Zhao, 2015), προτείνεται και αναλύεται θεωρητικά ένας συντονισμένος απορροφητής κραδασμών με βάση το πιεζοηλεκτρικό σύστημα. Η προτεινόμενη συσκευή αποτελείται από μια μάζα απόδειξης, έναν πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή και ένα ελαστικό στοιχείο (ελατήριο). Ένα ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο όπου το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συνδέεται με ένα γενικό κύκλωμα που αποτελείται από μια αντίσταση, έναν επαγωγέα και έναν πυκνωτή σε σειρά ( $R-L-C$ ) παρουσιάζεται για να απεικονίσει τη σύζευξη των ηλεκτρικών εξαρτημάτων με τα μηχανικά συστήματα. Με βάση το μοντέλο της μηχανικής αντικατάστασης, ένα κύκλωμα  $C$  ή  $L$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση ενός συντονισμένου πιεζοηλεκτρικού αποσβεστήρα κραδασμών, ενώ με ένα κύκλωμα  $R-C$  ή  $R-L$  ο

πιεζοηλεκτρικός συντονισμένος απορροφητής κραδασμών μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συντονισμένος αποσβεστήρας μάζας. Για τα κυκλώματα C και L, προκύπτουν στρατηγικές συντονισμού για τη ρύθμιση της χωρητικότητας και της επαγωγής της παραδιακλάδωσης για την παρακολούθηση της συχνότητας διαταραχής. Στην περίπτωση των κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης R-C και R-L, χρησιμοποιείται ένα κριτήριο βελτιστοποίησης  $H_2$  για τον συντονισμό του συντονισμένου αποσβεστήρα μάζας. Παρέχονται τέλος εκφράσεις κλειστής μορφής για τις βέλτιστες παραμέτρους συντονισμού.

Η εγκυρότητα της χρήσης τεχνικών z-transform για τη μοντελοποίηση τη συμπεριφορά του μορφοτροπέα ιδιομορφής πιεζοηλεκτρικού πάχους παρουσιάζεται στο (GORDON HAYWARD, 1984). Με τη μοντελοποίηση του μορφοτροπέα ως αναδρομικού ψηφιακού ρυθμιστή, η απόκριση σε μια ποικιλία αυθαίρετων συναρτήσεων εισόδου μπορούν να αξιολογηθούν απευθείας στο πεδίο του χρόνου. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για πιο συμβατικές τεχνικές μετασχηματισμού που έχουν περιορισμένη έκταση ή παραμορφώνουν την απόκριση του πεδίου χρόνου υπό ορισμένες συνθήκες. Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του μορφοτροπέα σε ένα ευρύ φάσμα πρακτικών συνθηκών λειτουργίας και αυτό επαληθεύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η θεωρητική ανάλυση μιας βελτιωμένης πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο PZT παραδιακλαδισμένο με ένα παράλληλο κύκλωμα αντίστασης-επαγωγέα για παθητική δομική απόσβεση και έλεγχο κραδασμών μελετάται στο (Shu-yau Wu). Αναφέρονται αποτελέσματα σχετικά με τα πειράματα της βελτιωμένης τεχνικής παραδιακλάδωσης που πραγματοποιήθηκαν και επιδείχθηκαν με επιτυχία για τον παθητικό έλεγχο κραδασμών στο πρόγραμμα SPICES της κοινοπραξίας ARPA σε διάφορες κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων θερμοσκληρυμένων πλακών από υαλοβάμβακα/εποξειδικές σύνθετες πλάκες με ενσωματωμένα επιθέματα PZT και δοκούς με πρόβολο με επιφανειακά κολλημένα επιθέματα. Μειώσεις κραδασμών σε απόκριση συντονισμού άνω των 17 dB με τη χρήση παραδιακλάδωσης μίας ιδιομορφής επιτεύχθηκαν σε μια σύνθετη πλάκα 18" x 18" x 0,5" με οκτώ ενσωματωμένα επιθέματα PZT. Όταν διεγείρεται μια άλλη σύνθετη πλάκα με έναν συμπίεστη τοποθετημένο στην κορυφή της και ενεργοποιούνται τα κυκλώματα παραδιακλάδωσης, το επίπεδο δόνησης που μεταδίδεται μετρούμενο με ένα μανόμετρο σε ένα στύλο στήριξης της πλάκας μειώνεται περίπου κατά 15 dB. Η βελτιωμένη τεχνική πιεζοηλεκτρικής παρεκκλίσεως έχει μελετηθεί περαιτέρω για την παραδιακλάδωση και απόσβεση κραδασμών πολλαπλών ιδιομορφών χρησιμοποιώντας μόνο ένα επίθεμα PZT. Παρουσιάστηκε επίσης το πειραματικό αποτέλεσμα της παραδιακλάδωσης πολλών ιδιομορφών.

Στην εργασία των (Andrew J. Fleming S. O.) εισάγεται μια νέα τεχνική για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση πιεζοηλεκτρικών σύνθετων αντιστάσεων παραδιακλάδωσης. Λαμβάνοντας υπόψη την τάση και το φορτίο του μορφοτροπέα ως εισόδους και εξόδους, το πρόβλημα σχεδιασμού μειώνεται σε ένα τυπικό πρόβλημα γραμμικού ρυθμιστή, που επιτρέπει την εφαρμογή τυπικών τεχνικών σύνθεσης όπως LQG,  $H_2$  και  $H_\infty$ . Η προκύπτουσα σύνθετη αντίσταση μπορεί να επεκταθεί σε συστήματα πολλαπλών μορφοτροπέων, είναι απεριόριστη στη δομή και είναι ικανή να ελαχιστοποιήσει έναν αυθαίρετο στόχο απόδοσης. Μια πειραματική σύγκριση με ένα κύκλωμα παραδιακλάδωσης συντονισμού πραγματοποιείται σε μια δοκό με πρόβολο. Προηγούμενα προβλήματα όπως ο συντονισμός ad-hoc, η περιορισμένη απόδοση και η ευαισθησία στη διακύμανση των συχνοτήτων δομικού συντονισμού μετριάζονται σημαντικά.

Στο (H. Neustadt, 1984) ένας μορφοτροπέας υπερήχων μοντελοποιείται ως κύκλωμα που έχει τρεις παράλληλους κλάδους. Οι παράμετροι R-L-C για το ισοδύναμο κύκλωμα υπολογίζονται από τις μετρούμενες τιμές της σύνθετης αντίστασης του σημείου οδήγησης του μορφοτροπέα στην περιοχή συχνοτήτων 0 έως 6 MHz. Οι υπολογισμένες τιμές R-L-C που αντιπροσωπεύουν το ακουστικά ενεργό μέρος του κρυστάλλου είναι εξαιρετικά αναπαραγώγιμες υπό συνεχή φόρτο. Είναι σημαντικό ότι αυτές οι τιμές αλλάζουν κατά πολύ όταν το φόρτο αλλάζει από αέρα σε νερό ή σε μέταλλο. Οι μετρήσεις της σύνθετης αντίστασης και οι υπολογισμοί R-L-C για τον μορφοτροπέα εκτελούνται on-line σε λιγότερο από 1 λεπτό από έναν φορητό μικροϋπολογιστή 16 bit χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο FFT 512 σημείων.

Η παροδική μορφοποίηση σε συνδυασμό με μια πρωτότυπη ιδέα της Συμπιεζόμενης Περιορισμένης Απόσβεσης Επιπέδων (CCLD) είναι μια νέα και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη δυναμική προσαρμογή της συμπεριφοράς και παρουσιάζεται στο (Tom Ehrig K. H., 2019). Το κρίσιμο συστατικό του CCLD είναι ένα συμπίεσιμο ενδιάμεσο στρώμα με το πάχος και τις ιδιότητες του υλικού του, να ελέγχονται από την ενεργοποίηση ρευστού, επιτρέποντας τη ρύθμιση της απόσβεσης και της ακαμψίας του συνολικού συστήματος. Για να εκτιμηθεί το δυναμικό του CCLD, χρησιμοποιήθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο το οποίο περιγράφει τη συμπεριφορά δόνησης της συνολικής δομής, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες που οδηγούνται από τη συμπίεση του ενδιάμεσου στρώματος. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ορθότητα των αρχικών θεωρητικών παραδοχών σχετικά με την προσαρμοστική δυναμική συμπεριφορά κατασκευών με επεξεργασία CCLD. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των κραδασμών καθώς και υψηλή προσαρμοστικότητα δυναμικής συμπεριφοράς, ωστόσο, δείχνουν μια πολύπλοκη εξάρτηση από τη διαμόρφωση του συστήματος. Ωστόσο, η προσέγγιση αναλυτικής μοντελοποίησης μπορεί ήδη να χρησιμοποιηθεί για έναν προκαταρκτικό σχεδιασμό συστήματος. Εκτός από των αναλυόμενων πολυμερών αφρού ως το ενδιάμεσο

στρώμα, τα μη υφαντά εμφανίζουν επίσης ιδιότητες διάτμησης που εξαρτώνται από τη συμπίεση και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε CCLD. Οι πρώτες έρευνες δείχνουν ότι η απόδοση απόσβεσης είναι κατά μέσο όρο περίπου δέκα φορές καλύτερη από αυτή των πολυμερών αφρού.

Το έργο των (S. Behrens A. F., 2002) παρουσιάζει έναν παθητικό πιεζοηλεκτρικό παραδιακλαδωμένο ελεγκτή, με σκοπό την απόσβεση πολλών ιδιομορφών μίας εύκαμπτης κατασκευής, χρησιμοποιώντας έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα. Η κατασκευή σύνθετης αντίστασης σε σειρά-παράλληλη έχει έναν αριθμό από πλεονεκτήματα σε σύγκριση με παλαιότερες τεχνικές, καθώς είναι πιο απλή στην εφαρμογή της, απαιτεί λιγότερα παθητικά στοιχεία και περιέχει μικρότερες τιμές επαγωγής. Η μέθοδος ελέγχου κραδασμών επικυρώνεται μέσω πειραματικού έργου πάνω σε μία πιεζοηλεκτρική ελασματοποιημένη δομή με πρόβολο.

Τα μοντέλα μειωμένης τάξης γραμμικών πιεζοηλεκτρικών δομών είναι χρήσιμα στον έλεγχο των κραδασμών και στην παρακολούθηση της υγείας. Μελετάται στο (M Porfiri) η πειραματική αναγνώριση των θεμελιωδών παραμέτρων αυτών των μοντέλων. Προτείνονται δύο τεχνικές αναγνώρισης για την εκτίμηση των πιεζοηλεκτρικών ζεύξεων ιδιομορφών και των πιεζοηλεκτρικών ιδιομορφικών χωρητικότητων. Και οι δύο μέθοδοι είναι ευκόλως εφαρμόσιμες και βασίζονται σε στοιχειώδεις δοκιμές δόνησης. Δείχνεται η εφαρμογή αυτών των μεθόδων σε μια δομή δείγματος που φιλοξενεί πολλαπλούς μορφοτροπές.

Η γνώση της ιδιομορφικής χωρητικότητας και του συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης είναι απαραίτητη για τον σωστό σχεδιασμό συστημάτων με ενσωματωμένους πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπές και υλικά. Υπό το πρίσμα αυτό, η εργασία των (M. Berardengo S. M., 2020) παρουσιάζει δύο έμμεσες μεθόδους για τη μέτρηση της πιεζοηλεκτρικής ιδιομορφικής χωρητικότητας και μια μέθοδο εκτίμησης του ιδιομορφικού ηλεκτρομηχανικού συντελεστή σύζευξης. Όλες οι μέθοδοι βασίζονται σε απλές μετρήσεις κραδασμών της δομής με τον πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα συνδεδεμένο σε μια κατάλληλη αντίσταση παραδιακλάδωσης, αποφεύγοντας έτσι τις μετρήσεις του πιεζοηλεκτρικού ρεύματος και της τάσης με ακριβό εξοπλισμό. Για τον συντελεστή σύζευξης, η προτεινόμενη μέθοδος εγγυάται μειωμένη αβεβαιότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πειραματικές διαδικασίες εκτίμησης. Με την εισαγωγή της υποκείμενης θεωρίας, η εργασία καταδεικνύει πειραματικά την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων σε σύγκριση με καθιερωμένες διαδικασίες.

Η εργασία των (Jérôme Antoni, 2009) διερευνά τα σφάλματα μέτρησης που εμπλέκονται στην εκτίμηση των συναρτήσεων απόκρισης συχνότητας (FRFs) – και των σχετικών μεγεθών όπως η συνάρτηση συνοχής από τον σταθμισμένο μέσο όρο επικαλυπτόμενων τμημάτων, μια τεχνική που έχει γίνει πρότυπο στους σύγχρονους αναλυτές δεδομένων, λόγω των υπολογιστικών πλεονεκτημάτων της. Ιδιαίτερη



προσοχή δίνεται στα σφάλματα διαρροής, για τα οποία η τεχνική έχει συχνά επικριθεί. Το κύριο αποτέλεσμα είναι ότι ένα παράθυρο ημιτονοειδές ή διαφορικό με επικάλυψη περίπου  $2/3$  επιτυγχάνει τον καλύτερο συμβιβασμό για τη μείωση των σφαλμάτων διαρροής στην περίπτωση στατικών τυχαίων διεγέρσεων το οποίο είναι ανεξάρτητο από το FRF του συστήματος. Αυτό το συμπέρασμα πρέπει να αντισταβληθεί με τη συνήθεια της χρήσης ενός παραθύρου Hanning με επικάλυψη  $1/2$ . Το ίδιο σκεπτικό επιβεβαιώνει ότι ένα ορθογώνιο παράθυρο χωρίς επικάλυψη ελαχιστοποιεί τα σφάλματα μέτρησης στην ειδική περίπτωση των πολυημιτονικών διεγέρσεων. Επιπλέον, παρέχονται πρακτικοί τύποι για τον υπολογισμό της μεροληψίας και της διακύμανσης της απόκρισης συχνότητας και των συναρτήσεων συνοχής στη γενική περίπτωση.

Μία διαδικασία συντονισμού για πιεζοηλεκτρική παραδιακλαδωμένη απόσβεση, βασισμένη πάνω σε μετρήσιμα πειραματικά δεδομένα προτείνεται στο (Toftekær, 2019). Η διαδικασία είναι συμπληρωματική μίας μεθόδου σχεδιασμένης για εφαρμογή σε εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένης της συνεισφοράς από μη- συντονιστικές ιδιομορφές δόνησης. Βρέθηκε ότι η διαδικασία είναι αποτελεσματική για την μείωση των κραδασμών σε δομές πλακών και δοκών. Στην παρούσα, ένα ψευδοτυχαίο σήμα διέγερσης εφαρμόζεται στην δομή με προσκολλημένα πιεζοκεραμικά επιθέματα, ενώ τα πιεζοηλεκτρικά ηλεκτρόδια είναι είτε σε ανοιχτό είτε σε βραχύ κύκλωμα. Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται μία καταγραφή χρόνου του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και της τάσης, με την χρήση ενός υψηλής ποιότητας πολύμετρου. Στην συνέχεια ένας γρήγορος μετασχηματισμός Fourier χρησιμοποιείται σε αυτές τις καταγραφές χρόνου, ώστε να βρεθούν οι συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας της τάσης και του ηλεκτρικού ρεύματος. Τέλος οι βέλτιστες επαγωγές και αντιστάσεις της παραδιακλάδωσης συντονισμού καθορίζονται από τις ιδιομορφικές ιδιότητες, οι οποίες εξάγονται από τις δύο συναρτήσεις απόκρισης συχνότητας. Η μέθοδος δοκιμάζεται σε μία ελεύθερη δοκό με δύο ζεύγη πιεζοκεραμικών επιθεμάτων, όπου το ένα χρησιμοποιείται για την διέγερση των δονήσεων και το άλλο για την μείωση τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα ταυτίζονται με το αριθμητικό μοντέλο του ANSYS.

Η χωρητικότητα διαφορετικών αυτοσυμπληρούμενων συσκευών που χρησιμοποιούν παραδιακλαδωμένα κυκλώματα μελετώνται στο (Stephanie Livet, 2021) με σκοπό τη βελτίωση της δομικής απόσβεσης, αποφεύγοντας την εφαρμογή πολύπλοκων και βαρέων συσκευών ελέγχου. Η παρουσιαζόμενη τεχνική χρησιμοποιεί ένα αριθμητικό πιεζομηχανικό μοντέλο, που συνδυάζει μηχανικές και ηλεκτρικές παραμέτρους σύζευξης. Ακόμη, μία πρωτότυπη μεθοδολογία που βελτιστοποιεί τις παραμέτρους των ηλεκτρικών παραδιακλαδωμένων κυκλωμάτων συνδεδεμένων με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και τις δομικές τοποθετήσεις των μορφοτροπέων, παρουσιάζεται. Τα αποτελέσματα που επικυρώθηκαν πειραματικά, δείχνουν ότι οι δονήσεις μπορούν να μειωθούν δραματικά, όταν οι

παραδιακλαδωμένες πιεζοηλεκτρικές συσκευές τοποθετούνται σε μία πραγματική κατασκευή. Τέλος η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση του σχήματος και της τοποθεσίας των παραδιακλαδωμένων πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων, ώστε να αποσβεστούν αρκετές ιδιομορφές μίας πλάκας.

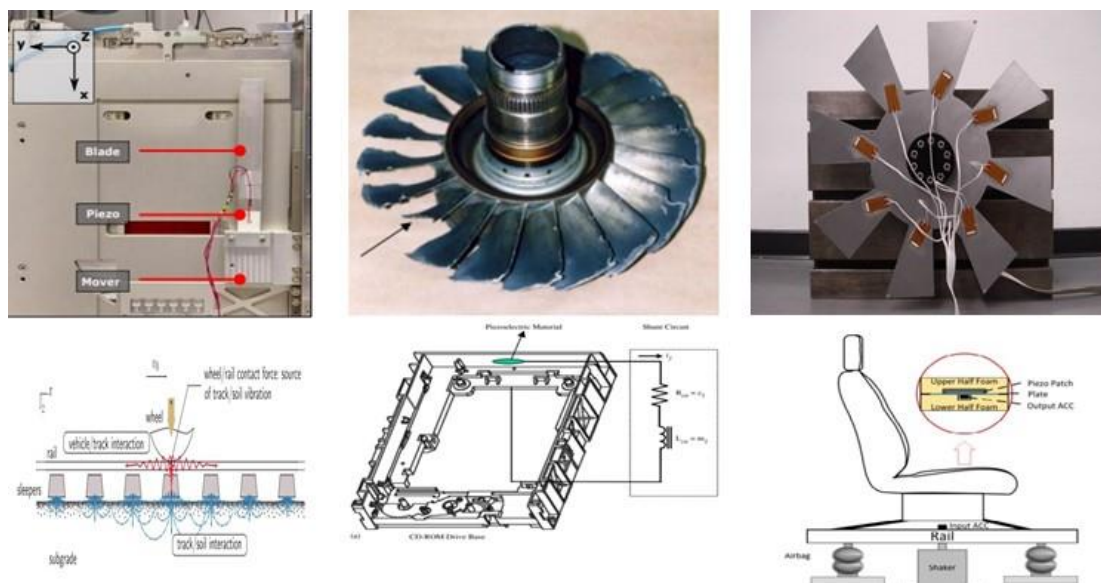
Στο (James Kennedy, 1995) εισάγεται μια ιδέα για τη βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία του σμήνους σωματιδίων. Σκιαγραφείται η εξέλιξη πολλών παραδειγμάτων και συζητείται η εφαρμογή ενός από αυτά. Περιγράφεται η δοκιμή συγκριτικής αξιολόγησης του παραδείγματος και προτείνονται εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της μη γραμμικής βελτιστοποίησης συναρτήσεων και της εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων. Τέλος περιγράφονται οι σχέσεις μεταξύ της βελτιστοποίησης του σμήνους σωματιδίων και των τεχνητών ζωής και των γενετικών αλγορίθμων.

Ένας τρόπος για να βελτιωθεί η απόδοση του ελέγχου κραδασμών με πιεζοηλεκτρική παραδιακλάδωση είναι η χρήση μιας αρνητικής χωρητικότητας. Ωστόσο, οι αρνητικές χωρητικότητες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας λειτουργικούς ενισχυτές και σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει ο κίνδυνος κορεσμού των εξόδων του ενισχυτή, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει μη ομαλή λειτουργία και αστάθεια στο σύστημα. Με γνώμονα τα παραπάνω, το έργο των (M. Berardengo S. M.-A., 2021) προτείνει στρατηγικές για τη μείωση των εξόδων του ενισχυτή προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος κορεσμού που επηρεάζει μόνο τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος, χωρίς να μειώνεται η απόδοση εξασθένησης κραδασμών. Όταν η επιτεύξιμη μείωση δεν είναι επαρκής, είναι εφικτό να γίνει μία ενέργεια σε άλλα εξαρτήματα με αποδοχή της επιδείνωσης της απόδοσης εξασθένησης. Αποδεικνύεται επίσης ότι το μηχανικό μέρος του συστήματος δεν μπορεί να παραμεληθεί στην ανάλυση κατά την αξιολόγηση των εξόδων του λειτουργικού ενισχυτή, ενώ δύο διαφορετικοί τύποι κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της αρνητικής χωρητικότητας συγκρίνονται ως προς τις απαιτήσεις εξόδου. Αυτή η ανάλυση δείχνει ότι δεν υπάρχει κύκλωμα πάντα λιγότερο απαιτητικό από το άλλο και ότι η επιλογή του κυκλώματος δεν είναι πάντα απλή. Επομένως, παρουσιάζεται ένα μοντέλο πολλαπλών βαθμών ελευθερίας.

Στην εργασία των (Marta Berardengo, 2015) προτείνεται μια νέα διάταξη ηλεκτρικού δικτύου που βασίζεται σε δύο κυκλώματα αρνητικής χωρητικότητας, με στόχο την αύξηση των επιδόσεων μίας παραδοσιακής πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης με αντίσταση για τη μείωση των δομικών κραδασμών. Είναι ισοδύναμο με την τεχνητή αύξηση του ιδιομορφικού συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης της ηλεκτρομηχανικής δομής τόσο μειώνοντας τις φυσικές συχνότητες βραχυκυκλώματος όσο και αυξάνοντας αυτές του ανοικτού κυκλώματος. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του παράγοντα ηλεκτρομηχανικής ζεύξης σε σχέση με

απλές διαμορφώσεις αρνητικής χωρητικότητας, όταν λαμβάνεται υπόψη το ίδιο περιθώριο σταθερότητας. Αυτή η τεχνική φαίνεται να είναι ισχυρή στην ενίσχυση του ελέγχου απόδοσης όταν συσχετίζεται με μια απλή ωμική παραδιακλάδωση, που συνήθως αποφεύγεται λόγω των κακών επιδόσεων της.

## 2.11 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων.



Εικόνα 14: Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών σε μηχανήματα λιθογραφίας, σε δίσκους από τουρμπίνες, σε ράγες σιδηροδρόμων, σε βάσεις CD-ROM αλλά και καθισμάτων επιβατών.

Ο στόχος της διατριβής του (Tippmann, 2014) είναι η ανάπτυξη παθητικών τεχνικών για τον έλεγχο κραδασμών, καθώς και παρακολούθηση της υγείας των κατασκευών που λειτουργούν υπό συνθήκες υψηλού περιβάλλον θορύβου. Αυτός επετεύχθη με την χρήση πειραματικού πτερυγίου ανεμογεννήτριας, η οποία αναπαριστά τα υλικά και τον σχεδιασμό μίας τουρμπίνας πλήρους κλίμακας συμπεριλαμβανομένων συσκευών που προσομοιώνουν την ύπαρξη γνωστών κατασκευαστικών ελαττωμάτων. Ο έλεγχος των κραδασμών επετεύχθη χρησιμοποιώντας μια παραδιακλαδωμένη σειρά πιεζοηλεκτρικών στοιχείων συντονισμένα στις ιδιότητες δόνησης της επιφάνειας του πτερυγίου. Ο πιεζοηλεκτρικός μορφοτροπέας συνθετικών μακροϊνών συνδέθηκε με την επιφάνεια και με το συντονισμένο παραδιακλαδωμένο κύκλωμα. Οι τεχνικές ανίχνευσης ζημιάς εξελίχθηκαν χρησιμοποιώντας μία πλάκα από αλουμίνιο και ένα πτερύγιο τουρμπίνας. Ακόμη παρουσιάζονται 2 μέθοδοι που χρησιμοποιούν παλμική απόκριση, καθώς η παθητική ανακατασκευή της συνάρτησης απόκρισης παλμών μεταξύ 2 αισθητήρων, είναι σημαντική.

Διάφοροι ερευνητές έχουν διερευνήσει τη συμπεριφορά ενός γραμμικού μηχανικού ταλαντωτή ασθενώς συζευγμένου με ένα μη γραμμικό μηχανικό εξάρτημα που έχει ουσιαστική μη γραμμικότητα ακαμψίας. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, η ουσιαστικά μη γραμμική προσάρτηση δρα ως μη γραμμική απορρόφηση ενέργειας (NES) με αποτέλεσμα να μπορεί να επιτευχθεί μονόδρομη μεταφορά ενέργειας από την κύρια κατασκευή στο εξάρτημα. Δεδομένου ότι μια ουσιαστικά μη γραμμική προσάρτηση δεν διαθέτει συχνότητα συντονισμού, έχει αυξημένη στιβαρότητα έναντι του αποσυντονισμού, επιτρέποντας την απόδοση ευρείας ζώνης ως προς τη συχνότητα. Στην εργασία, των (Gabriela Mayumi de Freitas Otsubo, 2018) μελετώνται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ μιας ουσιαστικά μη γραμμικής πιεζοηλεκτρικής προσάρτησης και μιας ηλεκτρομηχανικά συζευγμένης τυπικής αεροελαστικής τομής δύο βαθμών ελευθερίας. Παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν το ηλεκτρομηχανικά συζευγμένο τυπικό τμήμα με πιεζοηλεκτρική σύζευξη που προστίθεται στο βυθισμένο βαθμό ελευθερίας. Ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο του συζευγμένου αεροελαστικού συστήματος παρουσιάζεται και συνδυάζεται σε ένα μη γραμμικό κύκλωμα παραδιακλάδωσης. Η απόδοση του πιεζοηλεκτρικού NES για την τροποποίηση της αεροελαστικής συμπεριφοράς του τυπικού τμήματος συζητείται χρησιμοποιώντας την κατάσταση βραχυκυκλώματος ως περίπτωση αναφοράς.

Στην εργασία του (Abdelmoeti, 2017), εξετάζεται μια συγκεκριμένη εφαρμογή ελέγχου κραδασμών σε μια μηχανή λιθογραφίας υψηλής ακρίβειας. Η απόσβεση θα μπορούσε να εισαχθεί παθητικά χρησιμοποιώντας συντονισμένους αποσβεστήρες μάζας ή ιξωδοελαστικά υλικά, όμως ο όγκος και η παραγωγή θερμότητας επιβάλλουν περιορισμούς στην εφαρμογή. Η παθητική εκτροπή τυπικά απαιτεί τεράστιες τιμές επαγωγής που μπορούν να προσομοιωθούν μόνο με τη χρήση ενεργών κυκλωμάτων. Αυτό οδηγεί στο γεγονός ότι τόσο στην παθητική εκτροπή όσο και στην ενεργητική ανάδραση η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών απαιτεί ισχύ για λειτουργία. Η εφαρμογή μιας προσέγγισης απόσβεσης με τροφοδοσία σε μηχανήματα υψηλής ακρίβειας είναι πρακτικά δύσκολη όσον αφορά τη σύνδεση φυσικής καλωδίωσης ισχύος σε κάθε εύκαμπτη κατασκευή. Στην βιβλιογραφία είναι διαθέσιμες αρκετές εργασίες αυτόνομης/αυτοτροφοδοτούμενης απόσβεσης με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούν την ενέργεια των κραδασμών ως πηγή ισχύος. Ωστόσο, αυτό δεν είναι εφικτό σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη ενέργεια των δονήσεων κλίμακας νανο/μικρόμετρου. Αυτή η εργασία στοχεύει στην επίτευξη απόσβεσης κραδασμών των πτερύγιων σάρωσης σε μια μηχανή λιθογραφίας χρησιμοποιώντας ενσωματωμένα πιεζοηλεκτρικά υλικά με μια αυτοτροφοδοτούμενη προσέγγιση που μπορεί να εφαρμοστεί σε δονήσεις χαμηλού επιπέδου.

Ο κύριος στόχος της έρευνας του (Lorr, 2015) είναι να προσδιοριστεί η ενεργοποίηση διακόπτη που βελτιστοποιεί την απόκριση για τη μέθοδο αποσυντονισμού της συχνότητας συντονισμού. Διερευνήθηκε μια θεμελιώδη κατανόηση των επιπτώσεων που έχουν οι διάφορες παράμετροι σχεδιασμού στο χρονισμό της ενεργοποίησης του διακόπτη και διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης είναι ο κύριος συντελεστής. Αυτό το αποτέλεσμα προβλέφθηκε για μια περιοριστική περίπτωση μηδενικού ρυθμού σάρωσης και επαληθεύτηκε με προσομοιώσεις. Η απόκριση εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία στην ενεργοποίηση του διακόπτη όταν ο συντελεστής ζεύξης είναι μικρός σε σύγκριση με περιπτώσεις με μεγαλύτερες τιμές. Η φάση της δόνησης έχει μια πρόσθετη επίδραση στη βέλτιστη ενεργοποίηση του διακόπτη και την αντίστοιχη απόκριση στην οποία ένας διακόπτης που είναι στην ενέργεια μέγιστης τάσης έφερε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση των κραδασμών και εμφανίζεται σε μεταγενέστερο χρόνο από έναν διακόπτη σε μέγιστη κινητική ενέργεια. Παρουσιάστηκε επίσης μια μέθοδος εφαρμογής της βέλτιστης ενεργοποίησης διακόπτη χωρίς γνώση των παραμέτρων του συστήματος. Προέκυψε ένας βέλτιστος νόμος ελέγχου ενεργοποίησης που βασίζεται σε μια πιο διαθέσιμη ποσότητα επί του πτερυγίου, όπως το περίβλημα απόκρισης πιεζοηλεκτρικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος και τα παράγωγά του. Αν και η γνώση του συντελεστή σύζευξης, ο κύριος παράγοντας για τον καθορισμό του βέλτιστου διακόπτη, είναι άγνωστος, η τιμή αυτή ουσιαστικά κωδικοποιείται στην απόκριση τάσης ανοιχτού κυκλώματος, επιτρέποντας την εξαγωγή ενός νόμου ελέγχου που βασίζεται σε αυτή τη μέτρηση.

Στην έρευνα των (Andreas Hohl, 2009) παρουσιάζεται ένα μοντέλο σύζευξης μεταξύ πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών ή αισθητήρων και υποδομών, που περιγράφονται από το Component Mode Synthesis (CMS) σε συνδυασμό με τη λεγόμενη Wave Based Substructuring (WBS). Η μέθοδος εφαρμόζεται σε μοντέλο δίσκου με πτερύγια . Ο δίσκος και τα πτερύγια, τα οποία είναι εξοπλισμένα με δύο πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές, περιγράφονται μέσω υποδομών που βασίζονται σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Η εκτέλεση μιας στατικής ανάλυσης της μονής υποδομής χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη τάση που εφαρμόζεται στα πιεζοκεραμικά, οι ισοδύναμες δυνάμεις διέγερσης και οι συντελεστές σύζευξης στον τομέα της υποδομής μπορούν να εξαχθούν. Ο δεύτερος πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής συνδέεται με ένα δίκτυο αντίστασης-επαγωγής, το οποίο περιγράφεται από έναν ηλεκτρικό βαθμό ελευθερίας. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, έχει κατασκευαστεί μια εξέδρα δοκιμής με το μοντέλο δίσκου με 8 πτερύγια και εξοπλισμένο με δύο τοποθετημένα πιεζοκεραμικά σε κάθε μία.

To (Marcus Neubauer J. W., Vibration damping with shunted piezoceramics: Fundamentals and technical applications, 2011) περιγράφει την απόδοση απόσβεσης των παραδιακλαδισμένων πιεζοκεραμικών για παθητικά δίκτυα R-L, παραδιακλαδώσεις αρνητικής χωρητικότητας (R-L-C) και την τεχνική διακοπής SSDI. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε μια γενική περιγραφή για μηχανικές κατασκευές με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Εισάγονται κανονικοποιημένες παράμετροι και η απόδοση απόσβεσης περιγράφεται από τον γενικευμένο συντελεστή ηλεκτρομηχανικής σύζευξης. Για κάθε ηλεκτρική παραδιακλάδωση προσδιορίζονται οι βέλτιστες παράμετροι του δικτύου και συγκρίνεται η προκύπτουσα μέγιστη απόσβεση. Επιπρόσθετα, ένα δισκόφρενο που τσιρίζει και ένα μοντέλο δίσκου με πτερύγια μελετώνται ως τεχνικές εφαρμογές. Παρουσιάζονται πρακτικά συμπεράσματα για τη συμπερίληψη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και τις μετρήσεις που επικυρώνουν την υπολογιζόμενη απόδοση απόσβεσης. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι τα παραδιακλαδωμένα πιεζοκεραμικά είναι ικανά να καταστέλλουν το τρίζιμο του φρένου.

Με κίνητρο κάποια πειραματικά αποτελέσματα σε μια εξέδρα δοκιμών, η εργασία των (R. Aiello, 2017) παρουσιάζει ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με την απόκριση της συχνότητας ενός πρωτεύων γραμμικού ταλαντωτή όταν είναι συνδεδεμένος με αυτόν ένας βοηθητικός μη γραμμικός, ο οποίος λειτουργεί ως αποσβεστήρας κραδασμών. Στα πειράματα, ένας ηλεκτροδυναμικός δονητής χρησιμοποιείται ως ο γραμμικός πρωτεύων ταλαντωτής ενός βαθμού ελευθερίας και διεγείρεται από μία αρμονική δύναμη. Ο μη γραμμικός αποσβεστήρας είναι προσαρτημένος στην κινούμενη κεφαλή του δονητή και συναρμολογείται για να επιτύχει χαρακτηριστικά κυβικής ακαμψίας, λόγω της γεωμετρικής διάταξης των γραμμικών ελαστικών στοιχείων.

Για πολύ χαμηλά πλάτη δονήσεων, ολόκληρο το σύστημα συμπεριφέρεται κυρίως ως γραμμικός ταλαντωτής δύο βαθμών ελευθερίας, αλλά όταν η διέγερση της δύναμης στον δονητή αυξάνεται, το σχήμα της καμπύλης απόκρισης της συχνότητας αλλάζει και εμφανίζει κάμψη της κορυφής συντονισμού, φαινόμενα άλματος και αστάθειες της αρμονικής απόκρισης. Παρουσιάζεται ένα θεωρητικό μοντέλο του συστήματος, με στόχο να αποτυπωθούν τα ποιοτικά φαινόμενα που παρατηρήθηκαν στα πειράματα.

Η υπερβολική δόνηση των πτερυγίων της στροβιλομηχανής προκαλεί προβλήματα κόπωσης υψηλού κύκλου που απαιτούν παρεμβάσεις απόσβεσης για την μείωση των επιπέδων δόνησης. Μια μέθοδος είναι η χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών ως παθητικών ή ενεργών αποσβεστήρων. Με βάση τις τεχνικές προκλήσεις και τις απαιτήσεις που προέκυψαν από προηγούμενες έρευνες σχετικά με τα πτερύγια του ρότορα των στροβιλομηχανών, έχει γίνει προσπάθεια να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα ενός πιεζοηλεκτρικού παραδιακλαδωτή για τον έλεγχο των

κραδασμών των πτερυγίων του ρότορα, ειδικά για μια κατάσταση με φυγόκεντρη περιστροφή. Η εργασία των (James B. Min, 2010) επιχειρεί να καλύψει το κενό που υπάρχει στην μελέτη των περιστροφικών φαινομένων. Συγκεκριμένα, οι στόχοι είναι η δημιουργία και η ανάλυση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση των κραδασμών αρμονικής εξαναγκασμένης απόκρισης σε συνδυασμό με πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης για συνθήκες λειτουργίας του πτερυγίου κινητήρα, καθώς και η επικύρωση των προσεγγίσεων των πειραματικών δοκιμών με αριθμητικά αποτελέσματα και αντίστροφα και τέλος η δημιουργία μιας ικανότητας αριθμητικής μοντελοποίησης για τον έλεγχο των κραδασμών χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά κυκλώματα παραδιακλάδωσης υπό περιστροφή. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε έναν συντονιστικό έλεγχο απόσβεσης χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά επιθέματα σε δείγματα πλακών. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και αναλύσεις για τα περιστρεφόμενες και μη συνθήκες. Οι προσομοιώσεις της απόσβεσης του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος παραδιακλάδωσης πεπερασμένων στοιχείων (FE) πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον κώδικα ANSYS Multiphysics για το πιεζοηλεκτρικό κύκλωμα αντίστασης και επαγωγής. Τα αποτελέσματα της FE έδειξαν καλή συσχέτιση με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών.

Η εργασία των (Y. G. Wu, 2020) διερευνά έναν νέο παθητικό αποσβεστήρα που συνδέει τους μηχανισμούς διάχυσης ενέργειας της ξηρής τριβής και του πιεζοηλεκτρικού κυκλώματος παραδιακλάδωσης για Δίσκους Ολοκληρωμένων Πτερυγίων (blisks). Η ιδέα είναι να διανεμηθεί το πιεζοηλεκτρικό υλικό στον ξηρό δακτύλιο τριβής έτσι ώστε η ελαστική παραμόρφωση του δακτυλίου ξηρής τριβής να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πρόσθετης απόσβεσης. Η τοποθέτηση του πιεζοηλεκτρικού υλικού στην πρόσθετη δομή αντί της δομής υποδοχής είναι μια πιο πρακτική εναλλακτική λύση για την εγκατάσταση πιεζοηλεκτρικών συσκευών απόσβεσης σε ρεαλιστικά μηχανικά συστήματα. Αυτό βελτιώνει την αξιοπιστία και τη δυνατότητα συντήρησης τόσο των αμορτισέρ όσο και των δομών υποδοχής. Με βάση την έννοια των σύνθετων μη γραμμικών ιδιομορφών (CNMs), το αποτέλεσμα απόσβεσης της ξηρής τριβής του προτεινόμενου αποσβεστήρα μετρίεται μέσω του λόγου απόσβεσης για τις στοχευόμενες ιδιομορφές. Ο ηλεκτρομηχανικός ιδιομορφικός συντελεστής σύζευξης (MEMCF) επεκτείνεται και σε μη γραμμικά ηλεκτρομηχανικά συστήματα ζεύξης προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η πρόσθετη πιεζοηλεκτρική αναλογία απόσβεσης. Το αποτέλεσμα απόσβεσης του υβριδικού αποσβεστήρα αξιολογείται επίσης από το μέγιστο εύρος απόκρισης στον τομέα της συχνότητας από την ανάλυση εξαναγκασμένης απόκρισης.

Στο (C. Willberg, 2012), παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο ηλεκτρομηχανικά συζευγμένο ίσο-γεωμετρικό πεπερασμένο στοιχείο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα τέτοιων στοιχείων είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης των γεωμετρικών δεδομένων με τη βοήθεια υπολογιστικών συστημάτων σχεδίασης στην περιγραφή των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Η ίσο-γεωμετρική προσέγγιση επεκτείνεται σε ένα συζευγμένο ηλεκτρομηχανικό πεπερασμένο στοιχείο με μηχανικούς και ηλεκτρικούς βαθμούς ελευθερίας. Το προτεινόμενο στοιχείο βασίζεται σε μη ομοιόμορφες ορθολογικές συναρτήσεις σχήματος B-spline. Προκειμένου να αποδειχθεί η λειτουργικότητα και τα πλεονεκτήματα του ίσο-γεωμετρικού πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για μία έξυπνη δομή και για εφαρμογές παρακολούθησης της υγείας, παρουσιάζονται διάφορα παραδείγματα. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με ίσο-γεωμετρικά στοιχεία συμφωνούν πολύ καλά με τις αναλυτικές και τις αριθμητικές λύσεις αναφοράς. Αποδεικνύεται ότι η καλύτερη γεωμετρική προσέγγιση που εισάγεται από τα ίσο-γεωμετρικά στοιχεία έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της λύσης.

Υπάρχει μεγάλη ανάγκη ανάπτυξης σιδηροδρομικών δικτύων για μεγάλες αποστάσεις και μέσα στις πόλεις ως πιο βιώσιμες επιλογές μεταφοράς. Ωστόσο, ο θόρυβος και οι κραδασμοί θεωρούνται αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Σε σύγκριση με τον αερομεταφερόμενο θόρυβο, το σχετικό πρόβλημα της δόνησης του εδάφους είναι πολύ πιο περίπλοκο. Οι ιδιότητες του εδάφους ποικίλλουν σημαντικά από τη μια τοποθεσία στην άλλη. Δεν υπάρχει κοινό κριτήριο αξιολόγησης ή ποσότητα μέτρησης και δεν υπάρχει κάτι ισοδύναμο με τους χάρτες θορύβου. Η επίγεια δόνηση μεταδίδεται στα κτίρια και γίνεται αντιληπτή είτε ως αισθητή δόνηση ολόκληρου του σώματος είτε ως θόρυβος χαμηλής συχνότητας. Μπορεί επίσης να επηρεάσει ευαίσθητο εξοπλισμό, αλλά είναι γενικά σε πολύ χαμηλό επίπεδο για να προκαλέσει δομικές ή αισθητικές ζημιές στα κτίρια. Δίνεται λοιπόν στο (David J. Thompson, 2019) μία ανασκόπηση των κριτηρίων αξιολόγησης τόσο για τους αισθητούς κραδασμούς όσο και για τον θόρυβο του εδάφους, τις εμπειρικές και αριθμητικές μεθόδους πρόβλεψης, τις κύριες παραμέτρους του οχήματος και των ραγών που μπορούν να επηρεάσουν τα επίπεδα κραδασμών και μια σειρά πιθανών μεθόδων μετριασμού.

Στο (Seung-Bok Choi, 2006) παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία σχεδιασμού για το παραδιακλαδωμένο πιεζοηλεκτρικό σύστημα απόσβεσης και εφαρμόζεται σε πολλαπλή ιδιομορφική καταστολή κραδασμών μιας μονάδας CD-ROM. Εισάγεται η είσοδος για την πρόβλεψη της απόδοσης της απόσβεσης της πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης. Η αριθμητική παραδοχή που προκύπτει από τον εμπορικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, ANSYS, συγκρίνεται με έναν πειραματικά μετρημένο και επαληθεύεται η αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Η πολλών ιδιομορφών πιεζοηλεκτρική απόσβεση παραδιακλάδωσης πραγματοποιείται πειραματικά με βάση την στοχευόμενη ιδιομορφή και τις συχνότητες που



λαμβάνονται από την ανάλυση εισδοχής. Η δόνηση της βάσης της μονάδας CD-ROM μειώνεται αποτελεσματικά με την ενεργοποίηση των πιεζοηλεκτρικών κυκλωμάτων παραδιακλάδωσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτή το αποδεικνύουν ότι η παραδοχή της πιεζοηλεκτρικής δομής είναι ικανή να προβλέψει την απόδοση της απόσβεσης της πιεζοηλεκτρικής παραδιακλάδωσης.

Μία βελτιωμένη προσέγγιση SSDI (συγχρονισμένη διακοπτόμενη απόσβεση σε πηνίο) για την καταστολή των δονήσεων των δίσκων με πτερύγια στους αεροκινητήρες, είναι το θέμα στην εργασία των (Fengling Zhang, 2020) όπου οι δύο τομείς των πτερυγίων διασυνδέονται με ένα κοινό κύκλωμα SSDI. Με αυτόν τον τρόπο, η διακοπτόμενη δράση του SSDI ενεργοποιείται από τη σχετική μετατόπιση μεταξύ δύο τομέων του πτερυγίου. Η σκοπιμότητα του SSDI διπλής σύνδεσης εξετάζεται αριθμητικά από ένα μηχανικό σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας και επικυρώνεται περαιτέρω πειραματικά σε ένα σύστημα μονής και διπλής δοκού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση της απόσβεσης αυξάνεται με το πλάτος της σχετικής μετατόπισης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό για την εφαρμογή δίσκων όπου το πτερύγιο δονείται κανονικά σε διαφορετικά πλάτη και φάσεις. Τελικά, διεξάγεται αριθμητική προσομοίωση στην αναγκαστική απόκριση λάθος συντονισμένου δίσκου με πτερύγια που υφίστανται διέγερση κινούμενου κύματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διαμόρφωση διπλής σύνδεσης μπορεί να μειώσει τουλάχιστον το μισό αριθμό των διακοπτόμενων παραδιακλαδώσεων ενώ διατηρεί σχεδόν την ίδια απόδοση όπως το συμβατικό (τοπικό) SSDI.

Η ανίχνευση πολύ μικρών μαζών όπως οι πρωτεΐνες και τα παθογόνα έχει καταστεί δυνατή ως αποτέλεσμα της προόδου της νανοτεχνολογίας. Η ανάπτυξη βιοαισθητήρων υψηλής ευαισθησίας και χωρίς ετικέτες επέτρεψε τη μεταγωγή της μοριακής αναγνώρισης σε ανιχνεύσιμες φυσικές ποσότητες. Τα συστήματα που βασίζονται σε συστήματα μικρού προβόλου (MC) έχουν ευρέως διαδεδομένο ρόλο στην ανάπτυξη τέτοιων βιοαισθητήρων. Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα όλων των διαθέσιμων βιοαισθητήρων είναι ότι όλοι έχουν πολύ υψηλό κόστος. Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στους εξοπλισμούς μέτρησης που συνδέονται με τους βιοαισθητήρες, που είναι ως επί το πλείστον οπτικά συστήματα μέτρησης. Προτείνεται μια τεχνική αυτοανίχνευσης στο (Samira Faegh, 2013) προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι περισσότεροι από τους περιορισμούς των σημερινών συστημάτων μέτρησης. Μια γέφυρα αυτοανίχνευσης χρησιμοποιείται για να διεγείρει τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα MC που λειτουργεί σε δυναμική λειτουργία, ο οποίος μετρά ταυτόχρονα την απόκριση του συστήματος μέσω της αυτο-επαγόμενης τάσης που παράγεται στο πιεζοηλεκτρικό υλικό. Ως αποτέλεσμα, η ανάγκη για ογκώδη, ακριβό εξοπλισμό ανάγνωσης εξαλείφεται. Ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο παρουσιάζεται για την προτεινόμενη πλατφόρμα αυτοανίχνευσης χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση του συστήματος κατανεμημένων παραμέτρων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια στρατηγική

προσαρμογής στο δεύτερο μέρος προκειμένου να αντισταθμιστεί η χρονική διακύμανση των πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων η οποία βελτιώνει δυναμικά τη συμπεριφορά του συστήματος. Τέλος, αναφέρονται αποτελέσματα από μια εκτεταμένη πειραματική έρευνα που πραγματοποιήθηκε για να αποδειχθεί η ικανότητα της προτεινόμενης πλατφόρμας. Τα πειραματικά αποτελέσματα επαλήθευσαν την προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάστηκε στο πρώτο μέρος της μελέτης με ακρίβεια 97,48%. Η εφαρμογή της στρατηγικής προσαρμογής αύξησε την ακρίβεια στο 99,82%.

Ο στόχος της εργασίας των (Tadao TAKIGAMI, 2005) είναι η μείωση της καμπτικής δόνησης οχημάτων σιδηροδρόμου, εφαρμόζοντας μία τεχνική μείωσης των κραδασμών που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ηλεκτρικά παραδιακλαδωμένα με ένα εξωτερικό κύκλωμα. Παρουσιάζεται μία έρευνα που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο κλίμακας τρένου τύπου Shinkansen μήκους 5 μέτρων. Μικρά κομμάτια πιεζοηλεκτρικών στοιχείων συνδέονται στην βάση του , ενώ παράλληλα είναι συνδεδεμένα με ένα κύκλωμα παραδιακλάδωσης, με σχεδιασμό βασισμένο σε μία νέα μέθοδο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών διέγερσης δείχνουν ότι οι καμπτικές δονήσεις του σώματος του οχήματος μπορούν να μειωθούν επιτυχώς.

Στο (Yang-Soo Yun, 2020) προτείνεται η εφαρμογή μίας παραδιακλάδωσης συντονισμού σε τροχούς για τη μείωση του θορύβου των τροχών υψηλής συχνότητας που δημιουργείται από τα σιδηροδρομικά οχήματα. Ο θόρυβος των τροχών υψηλής συχνότητας προκαλείται από τον συντονισμό των τροχών λόγω της επαφής μεταξύ των ραγών και των τροχών. Εφαρμόζεται μια παραδιακλάδωση συντονισμού σε συγκεκριμένες συχνότητες για τη μείωση του συντονισμού του τροχού. Ο θόρυβος υψηλής συχνότητας που παράγεται από έναν τροχό που κινείται σε μια καμπύλη σιδηροδρομική γραμμή αναλύθηκε και συγκρίθηκε με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του τροχού. Επιπλέον, για την αναπαραγωγή του θορύβου υψηλής συχνότητας του, ένα εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα εισήχθη σε ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα συνδεδεμένο στον τροχό για να δημιουργήσει θόρυβο και κραδασμούς στη φυσική συχνότητα του τροχού. Η βέλτιστη θέση τοποθέτησης του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος προσδιορίστηκε με αριθμητική ανάλυση της ενέργειας καταπόνησης του τροχού. Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα συνδέθηκαν με τις αντίστοιχες αντηχητικές παραδιακλαδώσεις τους για να σχηματίσουν μια συστοιχία μείωσης κραδασμών. Ένας συνθετικός επαγωγέας ρυθμίστηκε για να μειώνει αποτελεσματικά τους κραδασμούς υψηλής συχνότητας και τον θόρυβο του τροχού που δημιουργείται στη φυσική συχνότητα. Στον τροχό που διεγείρεται στη φυσική του συχνότητα, οι κραδασμοί και ο θόρυβος μειώθηκαν κατά περίπου 4–10 dB και 8–12 dB(A), αντίστοιχα, ενώ στους τροχούς που διεγέρθηκαν ταυτόχρονα σε δύο φυσικές συχνότητες, οι κραδασμοί και ο θόρυβος μειώθηκαν κατά 5 dB και 5 dB(A), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραδιακλάδωση συντονισμού θα

μπορούσε να μειώσει αποτελεσματικά τον θόρυβο και τους κραδασμούς που δημιουργούνται από τον τροχό. Επομένως, είναι ένα αποτελεσματικό σύστημα κυκλώματος για τη μείωση του θορύβου και των κραδασμών ακόμη και σε μεγάλες κατασκευές.

Η μετάδοση της δομικής δόνησης του καθίσματος στο ανθρώπινο σώμα συμβάλλει στην ενόχληση από τους κραδασμούς, ιδιαίτερα κοντά στις συχνότητες συντονισμού ( $> 10$  Hz). Οι συμβατικές μέθοδοι ελέγχου των κραδασμών του καθίσματος του οχήματος δεν χρησιμοποιούνται πλέον αποτελεσματικά σε ελαφριές δομές καθισμάτων. Στο (Neng Zhang and Mohammad Fard, 2021) προτείνεται μια νέα μέθοδος ελέγχου που προέρχεται από την απόσβεση πολλαπλών ιδιομορφών με χρήση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων και εφαρμόζεται σε ένα κάθισμα για την καταστολή της μετάδοσης των κραδασμών του καθίσματος στο σώμα του επιβάτη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι αποτελεσματική για τον έλεγχο της δόνησης του καθίσματος στις συχνότητες συντονισμού του. Η εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού συστήματος απόσβεσης παραδιακλάδωσης υπόσχεται τη μελλοντική ανάπτυξη ελαφρών καθισμάτων οχημάτων με βελτιωμένη οδηγική άνεση.

Στο (Ufuk Yigit, 2014) μελετάται η επίδραση της απόσβεσης πιεζοηλεκτρικών παραδιακλαδώσεων (PSD) στις δονήσεις κραδασμών κατά τη διαδικασία στροφής. Το Chatter είναι ένας αυτοδιεγειρόμενος τύπος δόνησης που αναπτύσσεται κατά τη μηχανική κατεργασία λόγω δυναμικών αλληλεπιδράσεων διαδικασίας-δομής με αποτέλεσμα το διαμορφωμένο πάχος γρεζιού. Η δόνηση αυτή ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς έχει ως αποτέλεσμα κακή ποιότητα επιφάνειας, μειωμένη παραγωγικότητα και μειωμένη διάρκεια ζωής του εργαλείου. Η αναγεννητική αυτή δόνηση προκύπτει από διαφορές φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών περασμάτων του κοπτικού εργαλείου και εμφανίζεται νωρίτερα από τη δόνηση σύζευξης στις περισσότερες περιπτώσεις. Στη θεωρία αναγεννητικής δόνησης, το όριο σταθερότητας στη διαδικασία κοπής είναι αντιστρόφως ανάλογο με το αρνητικό πραγματικό μέρος της συνάρτησης απόκρισης της συχνότητας (FRF) του συστήματος κοπτικού εργαλείου-τεμαχίου κατεργασίας. Εάν το αρνητικό πραγματικό μέρος της FRF στο σημείο κοπής μπορεί να μειωθεί, το βάθος κοπής, με άλλα λόγια τα ποσοστά παραγωγικότητας, θα αυξηθούν. Στη μέθοδο απόσβεσης με πιεζοηλεκτρική παραδιακλάδωση, μια ηλεκτρική αντίσταση συνδέεται με έναν πιεζοηλεκτρικό μορφοτροπέα που είναι συνδεδεμένος στην κύρια δομή. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιείται κύκλωμα ωμικής – επαγωγικής – χωρητικής (R-L-C) παραδιακλάδωσης, τα στοιχεία του οποίου βελτιστοποιούνται με γενετικό αλγόριθμο για την ελαχιστοποίηση του πραγματικού τμήματος της FRF για ορισμένες στοχευόμενες συχνότητες. Στη συνέχεια, η επίδραση της βελτιστοποιημένης πιεζοηλεκτρικής απόσβεσης διερευνάται στο απόλυτο όριο σταθερότητας της διαδικασίας κοπής.

## 2.12 Συγκομιδή ενέργειας με κύκλωμα παραδιακλάδωσης.

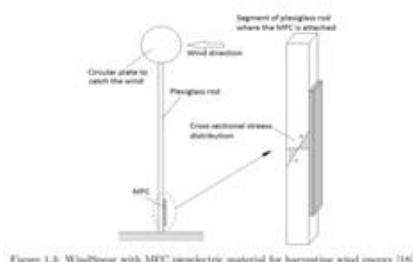


Figure 1.4: Running tights with MFC

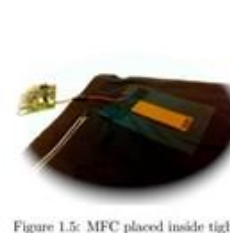
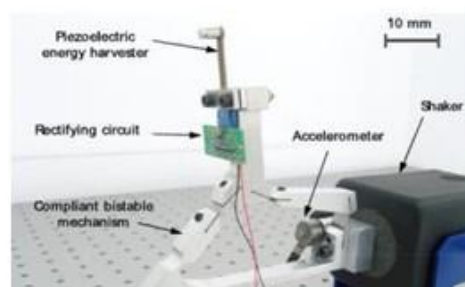


Figure 1.5: MFC placed inside tights



Εικόνα 15: Συγκομιδή ενέργειας με χρήση πιεζοηλεκτρικών σε παπούτσια, αθλητικά παντελόνια, βραχίονες αναπαράστασης κινήσεων του ανθρώπινου σώματος, όπως και εκμετάλλευση ταλαντώσεων λόγω του αέρα.

Τα τελευταία χρόνια η συνεχής ζήτηση για εξοικονόμηση ενέργειας έχει φέρει συνεχή έρευνα για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, αποθήκευση ενέργειας και νέες πηγές ενέργειας. Η εργασία των (Enrico Camilloni, 2013) παρουσιάζει ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο ενός πιεζοηλεκτρικού μορφοτροπέα σε διάταξη προβόλου. Το μοντέλο έχει χαρακτηριστεί μετρώντας την επιτάχυνση και την τάση του ανοιχτού κυκλώματος ενός πιεζοηλεκτρικού προβόλου που υπόκειται σε ημιτονοειδή δύναμη με διαφορετικές τιμές συχνότητας και με μια παρορμητική δύναμη. Το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης στην οποία πρέπει να τοποθετηθεί ο πιεζοηλεκτρικός πρόβολος σε ένα παπούτσι προκειμένου να ληφθεί η μέγιστη ενέργεια κατά το περπάτημα ή το τρέξιμο. Ως δεύτερο βήμα σχεδιάσαμε τον μορφοτροπέα DC-DC με έναν ελεγκτή υστέρησης. Το κύκλωμα είναι σε θέση να δώσει ενέργεια για την ενεργοποίηση ενός μικροεπεξεργαστή για αρκετό χρόνο ώστε να συλλάβει και να αποθηκεύσει τις απαιτούμενες πληροφορίες. Το πλήρες σύστημα έχει εφαρμοστεί, τοποθετηθεί σε παπούτσι και χρησιμοποιήθηκε σε αγώνα τρεξίματος 10 Km.

Το έργο του (Pedersen, 2011) διερευνά τη σκοπιμότητα ενός μη γραμμικού διακοπόμενου κυκλώματος για τη βελτιστοποίηση της συλλογής δονητικής ενέργειας χαμηλής τάσης και χαμηλής συχνότητας από μια πιεζοηλεκτρική γεννήτρια συνθετικής μακροίνας που τροφοδοτεί έναν αισθητήριο κόμβο. Η ανάλυση δείχνει ότι, σε σύγκριση με άλλες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται, η τοπολογία της συγχρονισμένης διακοπόμενης συγκομιδής σε επαγωγέα είναι ανώτερη σε ισχύ εξόδου σε μικρούς κραδασμούς των 2 Hz. Τα επίπεδα ισχύος που

διερευνήθηκαν είναι στην περιοχή microwatt, γεγονός που καθιστά σημαντικό να ληφθεί υπόψη ακόμη και μια μικρή απώλεια της ισχύος των εξαρτημάτων. Η απόδοση της τοπολογίας σε συχνότητα 2 Hz και σε επίπεδα ισχύος εξόδου περίπου 10  $\mu\text{W}$  βρέθηκε να ανεβαίνουν και να πέφτουν με την απόδοση του κυκλώματος ελέγχου ανίχνευσης κορυφής. Προτάθηκε ένα κύκλωμα ενεργού ελέγχου βασισμένο σε IC εξαιρετικά χαμηλής ισχύος και εφαρμόστηκε και δοκιμάστηκε ένα πρωτότυπο της μεθόδου. Το πρωτότυπο έδειξε να αυξάνει την ισχύ εξόδου κατά παράγοντα δύο, σε σύγκριση με τον τυπικό ανορθωτή πλήρους γεφύρωσης, αλλά όταν υπολογίστηκε η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος ελέγχου στα 15,4  $\mu\text{W}$  η ισχύς εξόδου που αποκτήθηκε χάθηκε. Το κύκλωμα ελέγχου έδειξε να είναι περισσότερο περιοριστικός παράγοντας από το αναμενόμενο και δημιουργήθηκε ένα σύνολο απαιτήσεων για ένα νέο κύκλωμα ελέγχου. Σε υψηλότερα επίπεδα ενέργειας, το πρωτότυπο αναμένεται να αυξήσει την ενέργεια εξόδου έως και 8 φορές και να επεκτείνει το φάσμα των εφικτών πηγών και εφαρμογών συλλογής ενέργειας χαμηλής συχνότητας.

Στο (Renato Caliò, 2014) εξετάζεται η κατάσταση της τέχνης στη συγκομιδή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζονται τα βασικά του πιεζοηλεκτρισμού και συζητείται η επιλογή υλικών. Η έμφαση των χώρων εργασίας στις λειτουργικές ιδιομορφές του υλικού και τις διαμορφώσεις των συσκευών, από συσκευές συντονισμού σε συσκευές χωρίς συντονισμό και επίσης σε λύσεις περιστροφής. Η αναθεωρημένη βιβλιογραφία συγκρίνεται με βάση την πυκνότητα ισχύος και το εύρος ζώνης. Τέλος, εξετάζεται το ζήτημα της μετατροπής ισχύος εξετάζοντας διάφορες λύσεις κυκλωμάτων.

Μία προσαρμοστική δυναμική ανάλυση συστημάτων ασυνεχούς έξυπνης συγκομιδής ενέργειας μίας έξυπνης δοκού με χρήση ελέγχου κραδασμών παραδιακλάδωσης παρουσιάζεται στο (M.F. Lumentut, 2020). Τα έξυπνα δομικά συστήματα, που συνδέονται με τις διεπαφές του κυκλώματος παραδιακλάδωσης και συγκομιδής, αποτελούνται από τρεις τύπους μη ομοιογενών δομικών συνδυασμών με διαφορετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά. Οι συστατικές συζευγμένες δυναμικές εξισώσεις με πλήρεις μεταβλητές παραμέτρους μειώνονται χρησιμοποιώντας τη μηχανική Hamiltonian με βάση τον τύπο φορτίου και την αναλυτική προσέγγιση ασθενούς μορφής που βασίζεται της μεθόδου Ritz. Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές, αυτή η μελέτη επεξεργάζεται την εμφάνιση των δύο συντονισμών με μια ευρύτερη μετατόπιση σε ένα συγκεκριμένο εύρος των βέλτιστων συχνοτήτων εξόδου ισχύος, χρησιμοποιώντας μόνο την πρώτη ιδιομορφή των έξυπνων δομικών συστημάτων. Επιπλέον, οι δύο ίσες κορυφές της βέλτιστης απόκρισης μπορεί ενδεχομένως να εμφανιστούν όχι μόνο στον πρώτο συντονισμό, αλλά και στον δεύτερο. Αυτό αντιπροσωπεύει εγγενώς ισχυρό ηλεκτρομηχανικό αποτέλεσμα, ανάλογα με τις ιδιότητες και τα πάχη των πιεζοηλεκτρικών υλικών και τις παραμέτρους του κυκλώματος. Περαιτέρω λεπτομέρειες των παραμετρικών

μελετών συζητούνται για να δείξουν την πρόβλεψη της συγκομιδής ενέργειας με την ικανότητα συντονισμού μιας προσαρμοστικής απόκρισης συχνότητας.

Πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν βρεθεί σε αρκετές εφαρμογές ως μορφοτροπείς μέσω των οποίων είναι δυνατή η συγκομιδή ενέργειας από δονούμενες δομές. Ένα απλό εγκάρσιας ιδιομορφής μοντέλο πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας με βάση τη θεωρία δοκών Euler–Bernoulli παρουσιάζεται στο (Andreza Tangerino Mineto, 2010) με τις ακόλουθες παραδοχές. Το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στρώματος σε σύγκριση με το μήκος της δοκού είναι πολύ λεπτό και το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ της άνω επιφάνειας και της κάτω επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού στρώματος είναι ομοιόμορφο. Εφαρμόστηκε αυτό το μοντέλο με σκοπό την πρόβλεψη της ισχύς που παράγεται από μια χαλύβδινη δοκό με πρόβολο με αρμονικές ταλαντώσεις χρησιμοποιώντας PZT-PIC 255. Γίνεται επίσης μία παραμετρική μελέτη για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας του συστήματος της πιεζοηλεκτρικής δοκού.

## Βιβλιογραφία

1. A J Fleming, S. B. (2003, January 10). Reducing the inductance requirements of piezoelectric shunt damping systems. *Smart Material Structures*, σσ. 57-64.
2. A J Fleming, S. O. (2003, January 10). Adaptive piezoelectric shunt damping. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*.
3. A. BLOCH, D. M. (1944, November 28). ELECTROMECHANICAL ANALOGIES AND THEIR USE FOR THE ANALYSIS OF MECHANICAL AND ELECTROMECHANICAL SYSTEMS.
4. Abdelmoeti, S. (2017, August). Self-powered Vibration Control using Piezoelectric Materials in High Precision Machines. *Robotics and Mechatronics*.
5. AboElSooud, M. T. (2003, May). VIBRATION CONTROL OF PLATES USING PERIODICALLY DISTRIBUTED SHUNTED PIEZOELECTRIC PATCHES .
6. Alan Gonçalves, A. A. (2020, May 30). Active vibration control in a two degrees of freedom structure using piezoelectric transducers associated with negative capacitance shunt circuits. *International Journal of Dynamics and Control*.
7. ALBERTO BELLOLI, D. N. (2006, December 13). Structural Vibration Control via R–L Shunted Composites. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
8. Alexandre Presas, D. V. (2017, March 22). Accurate Determination of the Frequency Response Function of Submerged and Confined Structures by Using PZT-Patches .
9. Andre PREUMONT, J.-P. C. (n.d.). ACTIVE DAMPING BY A LOCAL FORCE FEEDBACK WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS.
10. ANDREA BACIGALUPO, M. L. (2019, December 24). Design of active acoustic metamaterials with periodic piezoelectric microstructure.
11. Andreas Hohl, M. N. (2009, July). Modelling of Shunted Piezoceramic Actuators with Substructure Techniques and Application to a Bladed Disk Model.
12. Andrew J. Fleming, S. B. (2003, July). An Autonomous Piezoelectric Shunt Damping System.
13. Andrew J. Fleming, S. B. (n.d.). Active LQR and H2 shunt control of electromagnetic transducers.
14. Andrew J. Fleming, S. O. (n.d.). Optimal Impedance Design for Piezoelectric Vibration Control .
15. Andreza Tangerino Mineto, M. P. (2010, June). MODELING OF A CANTILEVER BEAM FOR PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING .
16. Anisetti, A. (2007). Non-linear Shunting of Piezo-actuators for Vibration Suppression.

17. Anja Kuttich, B. G. (2017). Robust Optimization of Shunted Piezoelectric Transducers for Vibration Attenuation Considering Different Values of Electromechanical Coupling.
18. AsanG.A. Muthalif, A. N. (2021). Optimal piezoelectric shunt dampers for non-deterministic substructure vibration control: estimation and parametric investigation.
19. B Lossouarn, J.-F. D. (2015). Multimodal vibration damping of a beam with a periodic array of piezoelectric patches connected to a passive electrical network. *Smart Materials and Structures*.
20. B. G. G. L. Zambolini-Vicente, V. A. (2019, June). ROBUST DESIGN OF SHUNT CIRCUITS FOR PASSIVE CONTROL OF VIBRATIONS OF COMPOSITE STRUCTURES.
21. B. Lossouarn, J.-F. D. (2018, March 13). A fully passive nonlinear.
22. B.K. MUKHERJEE, S. S. (1997, December). CHARACTERISATION OF PIEZOELECTRIC AND ELECTROSTRICTIVE MATERIALS FOR ACOUSTIC TRANSDUCERS: I. RESONANCE METHODS.
23. Bart P. Van Parys, P. J. (2012, August). Performance bounds for min-max uncertain constrained systems.
24. Benedict Götz, M. S. (2016, August 12). Lateral vibration attenuation of a beam with circular cross-section by a support with integrated piezoelectric transducers shunted to negative capacitances. *Smart Materials and Structures*.
25. Benjamin S Beck, K. A. (2014). Response-based tuning of a negative capacitance shunt for vibration control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, σσ. 1585-1595.
26. Benjeddou, A. (2000). Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey. *Computers and Structures*, σσ. 347-363.
27. Boris Lossouarn, J.-F. D. (2018, February). Multimodal Damping of a Nonlinear Structure with a Passive Piezoelectric Network. σσ. 161-163.
28. Boris Lossouarn, M. A. (2018, March 22). Design of a passive electrical analogue for piezoelectric damping of a plate. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
29. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini-Vicente, A. M. (2016, November). EXPERIMENTAL EVALUATION OF SYNTHETIC INDUCTORS APPLIED IN PASSIVE SHUNT CIRCUITS TO VIBRATION MITIGATION.
30. C H. Nguyen, S. P. (2006, July 26). FE analysis of a PZT-actuated adaptive beam with vibration damping using a parallel R–L shunt circuit.



31. C. Bricault, C. P.-G. (2018, October 15). Multimodal reduction of acoustic radiation of thin plates by using a single piezoelectric patch with a negative capacitance shunt. *Applied Acoustics*.
32. C. Willberg, U. G. (2012, March 18). Development of a three-dimensional piezoelectric isogeometric finite element for smart structure applications. *Acta Mechanica*.
33. C.H. Nguyen, S. P. (2003, August 14). Piezoelectric–mechanical–acoustic couplings from a PZT-actuated vibrating beam and its sound radiation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 18.
34. CADY, W. G. (1921, October 8). THE PIEZO-ELECTRIC RESONATOR.
35. CHEN Yun, W. X. (2020, August). Dynamic Mechanical Analysis in the Investigation on Ferroelectrics. *Journal of Inorganic Materials*.
36. Corrado Maurini, F. d. (2004). Comparison of piezoelectronic networks acting as distributed vibration absorbers. *Mechanical Systems and Signal Processing* , σσ. 1243-1271.
37. Cu-Hai Nguyen, S. P. (2004, June 16). The influence of temperature and bonding thickness on the actuation of a cantilever beam by PZT patches. *Smart Mater. Struct.*
38. David J. Thompson, G. K. (2019, March 17). Modelling, simulation and evaluation of ground vibration caused by rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*.
39. Dominik Niederberger, A. F. (2004, July 8). Adaptive multi-mode resonant piezoelectric shunt damping.
40. E. Fukada, M. D. (2004, April). Sound Isolation by Piezoelectric Polymer Films Connected to Negative Capacitance Circuits. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 2*, σσ. 328-333.
41. Ehtesham Mustafa Qureshi, X. S. (2014). Vibration control laws via shunted piezoelectric transducers: A review.
42. Enrico Camilloni, M. C. (2013). Energy Harvesting with piezoelectric applied on shoes.
43. Erfan Shojaei Barjuei, J. O. (2020, May 8). *International Journal of Dynamics and Control*.
44. Eric H. Anderson, N. W. (1992). SELF-SENSING PIEZOELECTRIC ACTUATION: ANALYSIS AND APPLICATION TO CONTROLLED STRUCTURES.
45. Etienne Balmes, A. D. (n.d.). Modeling structures with piezoelectric materials.

46. F Casadei, M. R. (2009, November 19). Broadband vibration control through periodic arrays of resonant shunts: experimental investigation on plates. *Smart Material Structures*.
47. F.A.FIRESTONE. (1933, January). A NEW ANALOGY BETWEEN MECHANICAL AND ELECTRICAL SYSTEMS.
48. Fengling Zhang, L. L. (2020, February 21). Dual-Connected Synchronized Switch Damping for Vibration Control of Bladed Disks in Aero-Engines.
49. Fleming, A. J. (2006, February). Sensorless Vibration Suppression and Scan Compensation for Piezoelectric Tube Nanopositioners.
50. G. Mikułowski, M. F. (2016, June). Semi-Passive Vibration Control Technique via Shunting of Amplified Piezoelectric Actuators.
51. Gabriela Mayumi de Freitas Otsubo, C. D. (2018, September). ESSENTIALLY NONLINEAR PIEZOELECTRIC ATTACHMENT FOR AEROELASTIC FLUTTER SUPPRESSION.
52. Georgios K. Tairidis, K. M.-F. (n.d.). Optimization of shunt circuits using evolutionary methods.
53. GEORGIOS K.TAIRIDIS, K. M. (n.d.). VIBRATION CONTROL OF SMART COMPOSITE PLATES USING SHUNTED PIEZOELECTRIC ELEMENTS.
54. Ghislain Raze, A. P. (n.d.). Multimodal vibration damping using a simplified current blocking shunt circuit. *Journal of Intelligent Material Systems*, σσ. 1-17.
55. Gilder Nader, E. C. (2004). Effective Damping Value of Piezoelectric Transducer Determined by Experimental Techniques and Numerical Analysis. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, σσ. 271-279.
56. GORDON HAYWARD, M. N. (1984, May). Discrete-Time Modeling of the Thickness Mode Piezoelectric Transducer. *IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS*, VOL. SU-31, NO. 3,.
57. Guoying Zhao, N. A. (2015). Dynamic analysis and H2 optimisation of a piezo-based tuned vibration absorber. *Journal of Intelligent Material Systems*.
58. H. Neustadt, D. H. (1984, October 16). Computer derivation of equivalent-circuit RLC values for an ultrasonic transducer from measured values of the transducer's driving-point impedance.
59. Herve Lissek, R. B. (2011, February 24). Electroacoustic absorbers: Bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129, σσ. 2968-2978.

60. Høgsberg, J. (2018, November 19). Vibration control by piezoelectric proof-mass absorber with resistive-inductive shunt. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
61. HOLLKAMP, J. J. (1994). Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
62. J A B Gripp, L. C. ( 2015, November 3). An adaptive piezoelectric vibration absorber enhanced by a negative capacitance applied to a shell structure. *Smart Materials and Structures*.
63. J Tang, K. W. (2001, August 7). Active–passive hybrid piezoelectric networks for vibration control: comparisons and improvement. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*.
64. J. Ducarne, O. T.-F. (2012, March 7). Placement and dimension optimization of shunted piezoelectric patches for vibration reduction. *Journal of Sound and Vibration*.
65. J. Tang, K. W. (1999, July). Vibration Control of Rotationally Periodic Structures Using Passive Piezoelectric Shunt Networks and Active Compensation.
66. J.A.B. Gripp, D. R. (2018). Vibration and noise control using shunted piezoelectric. *Mechanical Systems and Signal Processing* 112, σσ. 359-383.
67. J.Bert. (2007, October 29). Vibration Control Using Piezoelectric Transducers.
68. Jaehwan Kim, J.-K. L. (2002, June 1). Broadband transmission noise reduction of smart panels featuring piezoelectric shunt circuits and sound-absorbing material.
69. James B. Min, K. P. (2010, April ). Shunted Piezoelectric Vibration Damping Analysis Including Centrifugal Loading Effects.
70. James Kennedy, R. E. (1995). Particle Swarm Optimization.
71. Jean Lefevre, U. G. (2003, July). SIMULATION OF PIEZOELECTRIC CONTROLLED SMART STRUCTURES BY THE FINITE ELEMENT METHOD INCLUDING VIBROACOUSTIC EFFECTS.
72. Jérôme Antoni, J. S. (2009, September). Optimal Settings for Measuring Frequency Response Functions With Weighted Overlapped Segment Averaging. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*.
73. Ji-Ying Hu, Z.-H. L.-H. (2017, November 20). Singular variation property of elastic constants of piezoelectric ceramics shunted to negative capacitance. *Chin. Phys. B*.
74. Johan Frederik Toftekær, A. B. (2019, January 25). General numerical implementation of a new piezoelectric shunt tuning method based on the effective

electromechanical coupling coefficient. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.

75. Julien Ducarne, O. T.-F. (2017, March 14). Optimisation de dispositifs passifs d'atténuation de vibration par shunt piézoélectrique.
76. K Y Lam, X. Q. (1997, May 6). A finite-element model for piezoelectric composite laminates. *Smart Material Structures*, σσ. 583-591.
77. KAZUHIKO ADACHI, Y. A. (2004, November). Hybrid Piezoelectric Damping for Structural Vibration Suppression. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, σσ. 795-801.
78. KELLEY, C. R. (2016).
79. KENNELLY., A. E. (1893, April 18). KENELLY ON IMPEDANCE.
80. Konstantinos Marakakis, G. K. (2019, May 15). Shunt Piezoelectric Systems for Noise and Vibration Control: A Review.
81. Krzysztof Mazur, J. R. (2021, April 4). Vibroacoustical Performance Analysis of a Rigid Device Casing with Piezoelectric Shunt Damping.
82. L Q Yao, J. G. (2004, February 20). Nonlinear extension and bending of piezoelectric laminated plate under large applied field actuation. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*.
83. Larbi, W. (2017, July 29). Numerical modeling of sound and vibration reduction using viscoelastic materials and shunted piezoelectric patches. *Computers and Structures*.
84. Lawrence R Corr, W. W. (2002, May 24). Comparison of low-frequency piezoelectric switching shunt techniques for structural damping.
85. Lopp, G. K. (2015). Determination of Frequency-Based Switch Triggers for Optimal Vibration Reduction via Resonance Frequency Detuning.
86. M Berardengo, O. T.-A. (2016, June 14). Improved resistive shunt by means of negative capacitance: new circuit, performances and multi-mode control. *Smart Material Structures*.
87. M Berardengo, S. M. (2019). THE USE OF NEGATIVE CAPACITANCES TO IMPROVE THE VIBRATION ATTENUATION OF PIEZOELECTRIC RESONANT SHUNT.
88. M Porfiri, C. M. (n.d.). Identification of electromechanical modal parameters of linear piezoelectric structures. *Smart Mater. Struct.*
89. M. Berardengo, A. C. (2015, April 14). Vibration Control by Means of Piezoelectric Actuators Shunted with LR Impedances: Performance and Robustness Analysis.

90. M. Berardengo, S. M. (2020, October 3). Vibration control with piezoelectric elements: The indirect measurement of the modal capacitance and coupling factor. *Mechanical Systems and Signal Processing* 151.
91. M. Berardengo, S. M.-A. (2021, April 22). The reduction of operational amplifier electrical outputs to improve piezoelectric shunts with negative capacitance. *Journal of Sound and Vibration*.
92. M. Bulent Ozer, T. J. (2003, July 14). Passively minimizing structural sound radiation using shunted piezoelectric materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
93. M.F. Lumentut, Y. S. (2020, February 24). Shunted optimal vibration energy harvesting control of discontinuous smart beams. *Composite Structures*.
94. Mackerle, J. (2003, July 2). Smart materials and structures—a finite element. *MODELLING AND SIMULATION IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, σσ. 707-744.
95. Marcus Neubauer, J. W. (2009). Vibration Damping with Piezoceramics Shunted to Negative Capacitance Networks.
96. Marcus Neubauer, J. W. (2011, May 17). Vibration damping with shunted piezoceramics: Fundamentals and technical applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
97. Marcus Neubauer, R. O. (2006, July 13). Optimization of damping and absorbing performance of shunted piezo elements utilizing negative capacitance. *Journal of Sound and Vibration* , σσ. 84-107.
98. Marta Berardengo, S. M.-A. (2015, September). A NEW ELECTRICAL CIRCUIT WITH NEGATIVE CAPACITANCES TO ENHANCE RESISTIVE SHUNT DAMPING.
99. MASSIMO VISCARDI, R. D. (2016). IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC CIRCUIT FOR SSSA CONTROL APPROACH OF A PLATE TYPE ELEMENT AND EXPERIMENTAL MATCH WITH A FEED-FORWARD APPROACH. *Archive of Mechanical Engineering*.
100. Maurizio Arena, M. V. (2020, October 16). SISO Piezo Based Circuit Development for Active Structural Vibration Control.
101. Mehmet Murat Gozum, A. A. (2019). An investigation of the electromechanical coupling and broadband shunt damping in composite plates with integrated piezo-patches. *Journal of Intelligent Material Systems*, σσ. 1-17.
102. Ming Yuan, J. Q. (2013, October 27). Active control of sound transmission using a hybrid/blind decentralized control approach. *Journal of Vibration and Control*.
103. Moheimani, S. O. (2003, July). A Survey of Recent Innovations in Vibration Damping. *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, σσ. 482-494.

104. Neng Zhang and Mohammad Fard, J. L. (2021, January). Advanced seating comfort: suppression of vibration using multi-mode piezoelectric shunt damping . *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*.
105. Nesbitt W. Hagood, W. H. (1990). MODELLING OF PIEZOELECTRIC ACTUATOR DYNAMICS FOR ACTIVE STRUCTURAL CONTROL.
106. O. Thomas, C. T. (2002, August 29). Asymmetric non-linear forced vibrations of free-edge circular plates. Part II: experiments. *Journal of Sound and Vibration*, σσ. 1075-1101.
107. OLSON, H. F. (1956, May 1). Electronic Control of Noise, Vibration, and Reverberation. *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*.
108. ÖZGEN, D. G. (Fall 2014-2015). MDM 513 Smart Structures and Materials, METU, Ankara.
109. P Soltani, G. K. (2015, June 4). The nonlinear piezoelectric tuned vibration absorber. *Smart Mater. Struct.*
110. P. Bisegna, G. C. (2005, June 21). Optimized electric networks for vibration damping of piezoactuated beams. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*.
111. P. GARDONIO, M. J. (2001, June 26). ON THE ORIGINS AND DEVELOPMENT OF MOBILITY. *Journal of Sound and Vibration*, σσ. 557-573.
112. P. Lahe Motlagh, A. A. (2018, March). Passive vibration control of a plate via piezoelectric shunt damping with FEM and ECM.
113. Panagiotis I. Koutsianitis, G. K. (2020, October 1). Shunted piezoelectric patches on auxetic microstructures for the enhancement of band gaps.
114. Paolo Gardonio, M. Z. (2019, August 8). Panel with self-tuning shunted piezoelectric patches for broadband flexural vibration control. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
115. Pavel Mokry, M. K. (n.d.). On the vibration control using a piezoelectric actuator and a negative capacitor adjusted by a microprocessor.
116. Pedersen, J. H. (2011, November). Low Frequency Low Voltage Vibration Energy Harvesting Converter.
117. Płaczek, M. (2020). The Study of a Control Signal's Phase Shift Influence on the Efficiency of a System for Active Vibration Damping Based on MFC Piezoelectric Transducers.
118. Q. Mao, S. P. (2013). Shunt Piezoelectric Circuits. *Control of Noise and Structural Vibration: A MATLAB®-Based*, σσ. 325-366.

119. R. A. Morgan, K. W. (2002, January). An Active-Passive Piezoelectric Absorber for Structural Vibration Control Under Harmonic Excitations With Time-Varying Frequency, Part 1: Algorithm Development and Analysis. *Journal of Vibration and Acoustics*.
120. R. Aiello, G. G. (2017). Vibration mitigation of a linear host structure using a passive neutralizer: effect of nonlinearity in the neutralizer suspension. *Procedia Engineering*, σσ. 1659-1664.
121. R. Darleux, B. L.-F. (2018, September). Effect of temperature on the tuning of a piezoelectric resonant shunt composed of variable inductance or variable capacitance.
122. R. Rimašauskienė, V. J. (2019, May 8). Experimental analysis of active–passive vibration control on thin-walled composite beam. *Composite Structures*.
123. RAED I. BOURISLI, M. A.-A. (2010, June). Optimization of Smart Beams for Maximum Modal Electromechanical Coupling Using Genetic Algorithms. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
124. Renato Calìò, U. B. (2014, March 10). Piezoelectric Energy Harvesting Solutions.
125. Robin Darleux, B. L.-F. (2021, June 2). Electrical analogs of curved beams and application to piezoelectric network damping. *Mathematics and Mechanics of Solids*.
126. S Behrens, A. J. (2003, January 10). A broadband controller for shunt piezoelectric damping of structural vibration.
127. S. O. R. Moheimani, S. B. (n.d.). Multi-mode piezoelectric shunt damping with a highly resonant impedance.
128. S. Behrens, A. F. (2002). Series-Parallel Impedance Structure for Piezoelectric Vibration Damping.
129. S. Behrens, S. O. (2002, October 1). Multiple mode current flowing passive piezoelectric shunt controller. *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION*.
130. S. Behrens, S. O. (n.d.). Current Flowing Multiple Mode Piezoelectric Shunt Dampener.
131. S. Behrens, S. O. (n.d.). MULTIPLE MODE PASSIVE PIEZOELECTRIC SHUNT DAMPENER. *Mechatronic Systems*.
132. S. O. R. Moheimani, S. B. (2002). DYNAMICS AND STABILITY OF WIDEBAND VIBRATION ABSORBERS WITH MULTIPLE PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS .
133. S. Y. YANG, W. H. (1998, April 27). IS A COLLOCATED PIEZOELECTRIC SENSOR/ACTUATOR PAIR FEASIBLE FOR AN INTELLIGENT BEAM?

134. S.O.R. Moheimani, A. F. (2001, December 6). Highly resonant controller for multimode piezoelectric shunt damping. *ELECTRONICS LETTERS*.
135. S.X. Xu, T. K. (2002, August 25). Finite element analysis and design of actively controlled piezoelectric smart structures. *Finite Elements in Analysis and Design* 40.
136. Sam Behrens, S. O. (n.d.). Optimal Resistive Elements for Multiple Mode Shunt Damping of a Piezoelectric Laminate Beam.
137. Samira Faegh, N. J. (2013, May 10). A Self-Sensing Piezoelectric MicroCantilever Biosensor for Detection of Ultrasmall Adsorbed Masses: Theory and Experiments. *Sensors*.
138. Sebastian KURCZYK, M. P. (2018, May 30). Nonlinear Structural Acoustic Control with Shunt Circuit Governed by a Soft-Computing Algorithm. *ARCHIVES OF ACOUSTICS*, σσ. 397-402.
139. Seung-Bok Choi, H. S.-S. (2006, July 24). Multi-mode vibration reduction of a CD-ROM drive base using a piezoelectric shunt circuit. *Journal of Sound and Vibration*.
140. Shahraeeni, M. (2018, July 27). Assessment of shunted piezoelectric devices for simultaneous.
141. Shu-yau Wu, A. S. (n.d.). Structural vibration damping experiments using improved piezoelectric shunts.
142. Sohair F. Rezeka, B. M.-S.-G. (2012, May). Fuzzy Switching of Hybrid Piezoelectric Damping System.
143. SOON-HONG LEE, M. B. (2002, March). Piezoceramic Hysteresis in the Adaptive Structural Vibration Control Problem. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*.
144. Stephanie Livet, M. C. (2021, April 7). Structural multi-modal damping by optimizing shunted piezoelectric transducers.
145. Stéphanie Livet, M. C.-M. (2012, May 15). Structural multi-modal damping by optimizing shunted piezoelectric transducers. *European Journal of Computational Mechanics*.
146. Stewart Sherrit, B. K. (2007, November). Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers.
147. Szu Cheng Lai, M. S. (2017, April 25). Effects of equivalent series resistance on the noise mitigation performance of piezoelectric shunt damping.
148. Tadao TAKIGAMI, T. T. (2005, November). Investigation to Suppress Bending Vibration of Railway Vehicle Carbodies using Piezoelectric Elements.



149. Tai-Hong Cheng, I.-K. O. (2009, August 10). A current-flowing electromagnetic shunt damper for multi-mode vibration control of cantilever beams. *Smart Materials and Structures*.
150. Tairidis, G. K. (2019, May 11). Vibration control of smart composite structures using shunted piezoelectric systems and neuro-fuzzy techniques. *Journal of Vibration and Control*.
151. Tatiane Correa de Godoy, M. A. (2011, January). Modeling and analysis of laminate composite plates with embedded active-passive piezoelectric networks. *n Journal of Sound and Vibration*.
152. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (1987, September 7). IEEE Standard on Piezoelectricity.
153. Tippmann, J. D. (2014, January 1). Applications of passive vibration control and damage detection in composite wind turbine blades.
154. Toftækær, J. F. (2019). Resonant Piezoelectric Shunt Tuning Based on the Electric Current and Voltage Response to Pseudo-Random Vibration Excitation. *9th Conference on Smart Structures and Materials*.
155. Tom Ehrig, K. H. (2019, August 23). Dynamic Behaviour Adaptation of Lightweight Structures by Compressible Constrained Layer Damping with Embedded Polymeric Foams and Nonwovens.
156. Tom Ehrig, M. D. (2020, September 18). Sound Transmission Loss of a Sandwich Plate with Adjustable Core Layer Thickness. *Materials*.
157. Ufuk Yigit, E. C. (2014, June). Chatter Reduction in Turning by Using Piezoelectric Shunt Circuits.
158. V. P. Matveenko, N. A. (2018, March 30). An approach to determination of shunt circuits parameters for damping vibrations. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SMART AND NANO MATERIALS*.
159. W. Larbi, J.-F. D. (2011, August 25). Finite element formulation of smart piezoelectric composite plates coupled with acoustic fluid. *Composite Structures*.
160. W. Larbi, J.-F. D. (2018, March 14). Reduced order finite element formulations for vibration reduction using. *Applied Acoustics*.
161. W. CLARK, W. (2000, April). Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials.
162. WANG, K. W. (n.d.). STRUCTURAL VIBRATION SUPPRESSION VIA PARAMETRIC CONTROL ACTIONS-PIEZOELECTRIC MATERIALS WITH REAL-TIME SEMI-ACTIVE NETWORKS. *Series on Stability, Vibration and Control of Structures: Vol. 1*.

163. WENFENG ZHANG, J. Q. (2004). Robust Vibration Control of a Plate Using Self-sensing Actuators of Piezoelectric Patches. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
164. Wenwang Wu, W. H. (2019). Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical. *Materials & Design* 180.
165. WILLIAM J. McCALLA, D. O. (1971, January). Elements of Computer-Aided Circuit Analysis. *TRANSACTIONS ON CIRCUIT THEORY*.
166. WU, S.-Y. (1998, December). Method for Multiple Mode Piezoelectric Shunting with Single PZT Transducer for Vibration Control. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES* .
167. Xiang Liu, ,. W. (n.d.). Broadband Noise Absorber with Piezoelectric Shunting.
168. Xinong Zhang, H. N. (2011, December 25). A novel multimode negative inductance negative resistance shunted electromagnetic damping and its application on a cantilever plate. *Journal of Sound and Vibration*.
169. Xiudong Tang, Y. L. (2016, February). Analytical Solutions to  $H_2$  and  $H_\infty$  Optimizations of Resonant Shunted Electromagnetic Tuned Mass Damper and Vibration Energy Harvester. *Journal of Vibration and Acoustics*.
170. Xu Han, M. N. (2012, August 1). Improved piezoelectric switch shunt damping technique using negative capacitance. *Journal of Sound and Vibration*.
171. Y. G. Wu, L. L. (2020, March). Design of dry friction and piezoelectric hybrid ring dampers for integrally bladed disks based on complex nonlinear modes. *Computers & Structures* .
172. YAGUANG WU, L. L. (2019, September). A linearised analysis for structures with synchronized switch damping.
173. Yang-Soo Yun, J.-C. K.-M.-S. (2020, November 26). Reduction in High-Frequency Wheel Noise/Vibration of Railway Vehicles Using Piezoelectric Shunt.
174. Z.K. Kusculuoglu, B. T. (2003, July 19). Finite element model of a beam with a piezoceramic patch actuator.