



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή Εργασία
**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**

Προπτυχιακός Φοιτητής
ΜΠΑΧΤΑΛΙΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
A.M: TM6176

Επιβλέπων καθηγητής
Δρ. Μουτσοπούλου Αμαλία

ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΟΥΝΙΟΣ 2023



**HELLENIC MEDITERRANEAN UNIVERSITY
SCHOOL of ENGINEERING
DEPARTMENT of MECHANICAL ENGINEERING**

THESIS
**APPLICATION OF SMART MATERIALS IN
ENGINEERING CONSTRUCTIONS**

Undergraduate Student
BACHTALIAS ALEXANDROS

Supervisor
Dr. Moutsopoulou Amalia

HERAKLION JUNE 2023



“Η σκληρή δουλειά, η ολιγάρκεια και ο αυτοέλεγχος είναι τα ζητούμενα όχι επειδή δημιουργούν πλούτο, αλλά επειδή φτιάχνουν χαρακτήρα.”

Κάλβιν Κούλιτζ, 1872-1933, Αμερικανός Πρόεδρος [1923-1928]

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την πτυχιακή μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που συνέβαλαν στην διεκπεραίωση αυτής της πτυχιακής και επίσης σε όλους εκείνους που με τον δικό τους τρόπο έβαλαν το λιθαράκι τους για να φτάσω εδώ που είμαι τώρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Μουτσοπούλου που με εμπιστεύτηκε και με καθοδήγησε για να ολοκληρώσω την πτυχιακή μου , καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο ΤΕΙ.

Επίσης θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους καθηγητές που μου έμαθαν τόσα πράγματα και με ενέπνευσαν να ασχοληθώ πιο σοβαρά και να δω τα πράγματα από μια άλλη οπτική γωνιά , και ειδικότερα τους Κυρίους Κατσαπρακάκη, Παπαδάκη, Τζιράκη και Κονταξάκη που με τον τρόπο τους άφησαν ένα πολύ θετικό αποτύπωμα στην φοιτητική μου πορεία.

Και τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την παιδεία και τις αρχές που μου έδωσε ,που αποτέλεσε πολύ θετικό πρότυπο, που με στήριξε με κάθε τρόπο και δεν έπαψε στιγμή να πιστεύει σε εμένα και να μου το δείχνει έμπρακτα.

Σας ευχαριστώ όλους μέσα από την καρδιά μου!

Μπαχταλιάς Αλέξανδρος

Abstract

In this thesis, the study of smart materials and mainly piezoelectric elements is carried out, with a particular emphasis on the use of piezoelectrics for their use in mechanical constructions. In the first chapter, an introductory explanation of smart materials is given, as well as a description of existing smart materials, as well as their use in applications.

Then a complete analysis of piezoelectric materials is carried out, with an emphasis on the phenomenon of piezoelectricity, their structure and use. It also mentions epigrammatically and ways of controlling the piezoelectric elements.

In the third chapter, an extensive analysis is made of the use of piezoelectric materials in engineering constructions. You mainly notice how piezoelectric materials are applied as actuators or sensors. Some examples of using piezoelectric materials as actuators are piezoelectric motors, piezoelectric pumps, ultrasonic cleaners, piezoelectric drills, etc. While some examples of using piezoelectric materials as sensors are pressure sensor, accelerometer, microphone, buzzer, quartz oscillator, and sonar.

Finally, we study the control strategies used to control complex processes of piezoelectric actuators. The simplest control strategy that can be used for piezoelectric actuators is common PID control. But in several cases PID control is not enough to get the desired results, we use more sophisticated control techniques. Some of the ones used are, LQR control, Sliding Mode control, H infinity control, QFT control and inverse model control.

Keywords: smart materials, piezoelectrics, actuators, control strategies

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η μελέτη έξυπνων υλικών και κυρίως πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, με ιδιαίτερη έμφαση στην χρήση των πιεζοηλεκτρικών για την χρήση τους σε μηχανολογικές κατασκευές. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγική επεξήγηση των έξυπνων υλικών, καθώς και περιγραφή των υφιστάμενων έξυπνων υλικών, αλλά και χρήση τους σε εφαρμογές.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται μια πλήρης ανάλυση των πιεζοηλεκτρικών υλικών, με έμφαση στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, στην δομή αλλά και την χρήση τους. Επίσης αναφέρεται επιγραμματικά και τρόποι ελέγχου των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενή ανάλυση σε χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών σε μηχανολογικές κατασκευές. Παρατηρείτε κυρίως πως εφαρμόζονται τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ως επενεργητές ή αισθητήρες. Μερικά παραδείγματα από χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών ως επενεργητές είναι πιεζοηλεκτρικά μοτέρ, πιεζοηλεκτρική αντλία, καθαριστής υπερήχων, πιεζοηλεκτρικό τρυπάνι κλπ. Ενώ μερικά παραδείγματα από χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών ως αισθητήρες είναι ο αισθητήρας πίεσης, το επιταχυνσιόμετρο, το μικρόφωνο, το buzzer, ο χαλαζιακός ταλαντωτής, και το sonar.

Τέλος μελετάμε τις στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται για να ελέγξουμε σύνθετες διαδικασίες των πιεζοηλεκτρικών επενεργητών. Η πιο απλή στρατηγική ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές είναι ο κοινός PID έλεγχος. Όμως σε αρκετές περιπτώσεις ο έλεγχος PID δεν είναι αρκετός για να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, χρησιμοποιούμε πιο εξελιγμένες τεχνικές ελέγχου. Μερικές από αυτές που χρησιμοποιούνται είναι, έλεγχος LQR, έλεγχος Sliding Mode, έλεγχος Η άπειρο, έλεγχος QFT και έλεγχος του αντίστροφου μοντέλου.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ABSTRACT	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	10
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	12
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.2 ΈΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ	15
1.2.1 <i>Πιεζοηλεκτρικά Υλικά</i>	15
1.2.2 <i>Κράματα Μνήμης-Σχήματος</i>	15
1.2.3 <i>Ηλεκτροσυστολικά Υλικά</i>	17
1.2.4 <i>Μαγνητοσυστολικά Υλικά</i>	19
1.2.5 <i>Ηλεκτρο-μαγνητικορολογικά Ρευστά</i>	20
1.2.5.1 <i>Ηλεκτρορολογικά Ρευστά</i>	21
1.2.5.2 <i>Μαγνητορολογικά Ρευστά</i>	22
1.2.6 <i>Πολυηλεκτρολυτικά Τζελ</i>	23
1.2.7 <i>Πυροηλεκτρικά Υλικά</i>	25
1.3 ΈΞΥΠΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	27
2 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	30
2.1 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ	30
2.1.1 <i>Φαινόμενο Πιεζοηλεκτρικού</i>	33
2.1.2 <i>Φυσική σημασία του πιεζοηλεκτρισμού</i>	34
2.2 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	36
2.2.1 <i>Διαθέσιμα Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία</i>	36
2.2.1.1 <i>Lead Zirconate Titanate (PZT)</i>	36
2.2.1.2 <i>Lead Titanate</i>	37
2.2.1.3 <i>Lead Magnesium Niobate – Lead Titanate (PMN-PT)</i>	37
2.2.2 <i>Κριτήρια Διαλογής Πιεζοηλεκτρικών Υλικών</i>	37
2.3 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	38
2.3.1 <i>Δομή Περοβοσκίτη</i>	42
2.4 ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	42
2.4.1 <i>Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές</i>	42
2.4.2 <i>Πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες</i>	44
2.4.3 <i>Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές-Αισθητήρες</i>	45
2.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ	46
2.6 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ	47
3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	49
3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΈΞΥΠΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	49
3.1.1 <i>Έλεγχος Ενεργών Δονήσεων</i>	49
3.1.2 <i>Έλεγχος Ενεργών Θορύβων</i>	50
3.1.3 <i>Έλεγχος Σχήματος</i>	51
3.1.4 <i>Έλεγχος Υγείας Συστημάτων</i>	52
3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ	53
3.2.1 <i>Αναπτήρας</i>	54
3.2.2 <i>Αισθητήρας Πίεσης</i>	55



3.2.3	Επιταχυνσιόμετρο.....	56
3.2.3.1	Αρχή Λειτουργίας Επιταχυνσιόμετρου.....	56
3.2.3.2	Εύρος Συχνότητας Λειτουργίας Επιταχυνσιόμετρου.....	58
3.2.3.3	Είδη Πιεζοηλεκτρικών Επιταχυνσιόμετρων.....	58
3.2.4	Γυροσκόπιο.....	60
3.2.4.1	Πιεζοηλεκτρικό Γυροσκόπιο Δοκού.....	62
3.2.4.2	Πιεζοηλεκτρικό Γυροσκόπιο Συντονισμού.....	62
3.2.4.3	Πιεζοηλεκτρικό Κυλινδρικό Γυροσκόπιο.....	62
3.2.5	Μικρόφωνο.....	63
3.2.6	SONAR (Sound Navigation and Ranging).....	63
3.2.6.1	Ηχοβολέας Toprilz.....	64
3.2.6.2	Υποβρύχιος Ηχοβολέας Υψηλών Συχνοτήτων.....	65
3.2.7	Πιεζοηλεκτρικός Αισθητήρας Αφής.....	65
3.2.8	Συλλογή Ενέργειας.....	67
3.2.9	Πιεζοηλεκτρικό Ηλεκτρονικό Buzzer.....	68
3.2.10	Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές.....	69
3.2.10.1	Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές σοίθας.....	69
3.2.10.2	Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές Κάμψης.....	70
3.2.11	Πιεζοηλεκτρικά Μοτέρ.....	71
3.2.11.1	Γραμμικοί Πιεζοηλεκτρικοί Κινητήρες.....	72
3.2.11.2	Πιεζοηλεκτρικοί Περιστροφικοί Κινητήρες Υπερήχων.....	73
3.2.12	Πιεζοηλεκτρική Αντλία.....	74
3.2.13	Πιεζοηλεκτρικό Τρυπάνι Υπερήχων.....	75
3.2.14	Καθαριστής Υπερήχων.....	76
3.2.15	Ταλαντωτής Χαλαζιακών Κρυστάλλων.....	77
3.2.16	Σταθεροποιητής Χαλαζιακών Κρυστάλλων.....	78
3.2.17	Πιεζοηλεκτρικός Μετασχηματιστής.....	79
3.2.18	Μη Καταστροφική Μέθοδος Δοκιμής Υλικών (NDT).....	80
3.2.19	Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές και Αισθητήρες στην Ρομποτική.....	81
4	ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ.....	83
4.1	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ.....	84
4.1.1	Έλεγχος PID.....	85
4.1.2	Έλεγχος LQ.....	86
4.1.3	Έλεγχος Sliding Mode.....	89
4.1.4	Έλεγχος Η άπειρο.....	92
4.1.5	Έλεγχος QFT.....	95
4.1.6	Έλεγχος Αντίστροφου Μοντέλου.....	97
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	101
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

Περιεχόμενα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1.1: ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ-ΣΧΗΜΑΤΟΣ (Α) ΣΤΑΔΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ, (Β) ΕΛΑΤΗΡΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ, (Γ) ΣΥΡΜΑ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ.	15
ΕΙΚΟΝΑ 1.2: (Α) ΓΡΑΦΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΑΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, (Β) ΗΛΕΚΤΡΟΣΥΣΤΟΛΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.	17
ΕΙΚΟΝΑ 1.3: ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (Α) ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΟΣ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗΣ, (Β) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΡΗΓΜΑΤΩΝ.	19
ΕΙΚΟΝΑ 1.4: ΗΛΕΚΤΡΟΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ (Α) ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΟΡΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ, (Β) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.	21
ΕΙΚΟΝΑ 1.5: ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ (Α) ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΟΡΙΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ, (Β) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΜΕ Η ΧΩΡΙΣ ΜΑΓΝΗΤΗ.	22
ΕΙΚΟΝΑ 1.6: ΠΟΛΥΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΤΖΕΛ, ΧΡΗΣΗ ΩΣ ΠΑΙΧΝΙΔΙΑ ΚΑΘΩΣ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΟΥΝ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΟ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΡΕΥΣΤΟΥ.	24
ΕΙΚΟΝΑ 1.7: ΠΥΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (Α) ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ, (Β) ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΥΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.	26
ΕΙΚΟΝΑ 1.8: ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΚΥΡΙΟΙ ΠΥΛΩΝΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.	27
ΕΙΚΟΝΑ 1.9: ΣΥΝΟΛΟ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΙΔΩΝ ΔΟΜΩΝ/ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (Α) ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ, (Β) Η ΠΙΟ ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΟΥ ΣΥΝΑΝΤΑΤΑΙ ΠΑΝΤΟΥ (Γ) ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.	30
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ.	33
ΕΙΚΟΝΑ 2.3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΑ ΤΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ ΣΕ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΙΕΖΟΚΕΡΑΜΙΚΟ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΣ ΕΝΑ ΙΣΧΥΡΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΣΤΗΝ ΔΟΜΗ.	35
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: ΦΥΣΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ, ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.	36
ΕΙΚΟΝΑ 2.5: ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΕΡΟΒΟΣΚΙΤΗ ΒΑΡΙΟΥ ΤΙΤΑΝΙΟΥ. (Α) ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE ΤΟ ΚΕΛΙ ΕΙΝΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟ. (Β) ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΕΛΙΟΥ ΕΙΝΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΗ ΜΕ ΤΑ ΙΟΝΤΑ ΒΑΡΙΟΥ ΚΑΙ ΤΙΤΑΝΙΟΥ ΝΑ ΑΝΤΙΚΑΘΙΣΤΑΝΤΑΙ ΜΕ ΣΧΕΤΙΚΑ ΙΟΝΤΑ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ.	39
ΕΙΚΟΝΑ 2.6: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ.	40
ΕΙΚΟΝΑ 2.7: ΜΙΑ ΤΥΠΙΚΗ P-E ΛΟΥΠΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΑ ΦΕΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ.	41
ΕΙΚΟΝΑ 2.8: ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΡΟΒΟΣΚΙΤΗ. Η ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΙΝΑΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΗ.	42
ΕΙΚΟΝΑ 2.9: ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ.	43
ΕΙΚΟΝΑ 2.10: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.	44
ΕΙΚΟΝΑ 2.11: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ, ΜΙΑ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.	46
ΕΙΚΟΝΑ 2.12: ΚΟΛΛΗΜΕΝΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, (Α) ΕΙΔΙΚΗ ΕΠΟΞΙΚΗ ΚΟΛΛΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΟΛΛΗΣΗ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ, (Β) ΚΑΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ, (Γ) ΣΩΣΤΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΕ ΛΕΠΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ.	47
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΘΟΡΥΒΩΝ, (Α) ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΜΑΧΗΤΙΚΟΥ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ F/A-18 HORNET ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, (Β) ΤΟ ΜΑΧΗΤΙΚΟ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ F/A-18 HORNET, (Γ) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΣΕ ΛΕΠΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.	49
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ, (Α) ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΠΑΝΕΛ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ, (Β) ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΤΖΑΜΑΡΙΑ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΚΥΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΘΟΡΥΒΩΝ.	50
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΕ ΜΙΑ ΛΑΜΑΡΙΝΑ, ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ.	51
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΥΓΕΙΑΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ.	52
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΑΝΑΠΤΗΡΑΣ ΑΕΡΙΟΥ (Α) ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΟ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ, (Β) Ο ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗΣ, (Γ) ΑΝΑΠΤΗΡΑΣ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ.	54
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΙΕΣΗΣ (Α) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΥΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ, (Β) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΙΕΣΗΣ, (Γ) ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟ ΠΙΕΣΗΣ ΕΜΠΟΡΙΟΥ.	56
ΕΙΚΟΝΑ 3.7: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΡΩΝ ΕΝΟΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ.	57
ΕΙΚΟΝΑ 3.8: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΡΩΝ ΕΝΟΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ.	59



ΕΙΚΟΝΑ 3.9: ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΑ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 3.10: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ (Α) ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΡΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΦΩΝΟΥ, (Γ) ΜΙΚΡΟΦΩΝΟ.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 3.11: ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΦΗΣ (Α)(Β) ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΦΗΣ, (Γ) ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΑΦΗΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΟΘΟΝΗ.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 3.12: ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ.....	70
ΕΙΚΟΝΑ 3.13: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΟΤΕΡ (Α) ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΟΤΕΡ, (Β) ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΟΤΕΡ, (Γ) ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΡΩΝ ΕΝΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΟΤΕΡ.....	72
ΕΙΚΟΝΑ 3.14: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ (Α) ΜΙΚΡΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ, (Β) ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΜΕΡΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ. ..	74
ΕΙΚΟΝΑ 3.15: ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΜΕΡΩΝ ΕΝΟΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΤΡΥΠΑΝΙΟΥ.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 3.16: ΚΑΘΑΡΙΣΤΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΗΧΟΒΟΛΕΑ (Β).....	76
ΕΙΚΟΝΑ 3.17: ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ ΧΑΛΑΖΙΑ (Α) ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ, (Β) ΤΟΜΗ ΕΝΟΣ "ΡΟΛΟΓΙΟΥ", (Γ) ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ ΧΑΛΑΖΙΑ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 3.18: ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ (Α) ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ (Β) ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΣΕ ΣΥΣΚΕΥΗ.....	79
ΕΙΚΟΝΑ 3.19: ΣΥΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΓΙΑ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΛΙΚΩΝ.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 3.20: ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ.....	82
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΔΙΑΘΕΤΕΙ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ.....	85
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΔΡΑΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ Ρ, Ι ΚΑΙ D. (Α) Ρ ΔΡΑΣΗ, (Β) Ι ΔΡΑΣΗ, ΚΑΙ (C) D ΔΡΑΣΗ.....	86
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΠΛΟΚ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ LQG.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΑΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ SMC. (Α) ΣΕΛΑ, (Β) ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΗΣ ΠΗΓΗ ΚΑΙ (Γ) ΜΕ ΛΟΓΙΚΗ ΕΝΑΛΛΑΓΗΣ.....	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΠΛΟΚ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ SMC.....	91
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ LSDP ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ H^∞	94
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ QFT.....	97
ΕΙΚΟΝΑ 4.8: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PREISACH. (Α) ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΙ (Β) ΡΕΛΕ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ PREISACH... ..	99
ΕΙΚΟΝΑ 4.9: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ PREISACH.....	100

Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: ΤΑ ΠΙΟ ΚΟΙΝΑ ΕΞΥΠΝΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟ ΕΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΚΑΛΥΦΘΗΚΑΝ.....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΧΡΗΣΕΙΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ.....	54

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική Εισαγωγή

Η έννοια των έξυπνων, ευφυών, και προσαρμοστικών υλικών και κατασκευών, προέρχονται από τα μέσα του 1980, και πρόκειται για μια προσπάθεια να περιγραφούν νέοι τομείς στον τομέα της επιστήμης. Περιγράφει ένα νέο αναδυόμενο ερευνητικό τομέα ηλεκτροενεργών υλικών, με εφαρμογή σε δομές μεγάλης κλίμακας, στην μορφή επενεργητών και αισθητήρων.

Πριν περιγραφεί αυτό ο νέος τομέας, τα ηλεκτροενεργά υλικά είχαν χρησιμοποιηθεί σε μικρότερη κλίμακα κατασκευές, ως μετατροπείς και συστήματα ελέγχου ακρίβειας. Η γενική αντίληψη των έξυπνων, ευφυών και προσαρμοστικών υλικών και κατασκευών, συνεπάγεται την δυνατότητα να είναι έξυπνα, δραστήρια, μοντέρνα και εξελιγμένα.

Πιεζοηλεκτρικά (1880)	Κράματα Μνήμης- Σχήματος (1932)	Ηλεκτρο- μαγνητοσυστελόμενα υλικά (1954/1840)	Ηλεκτρο- μαγνητορεολογικά ρευστά (1784/1947)
Πυροηλεκτρικά	Φωτοβολταϊκά Υλικά (1974)	Υπεραγωγοί (1911)	Υγροί Κρύσταλλοι
Πολυηλεκτρολυτικά Τζελ (1949)		Μαγνητο-οπτικά, ηλεκτρομαγνήτες, μαγνητοελαστικά υλικά	Ηλεκτροστατικά Υλικά
Οπτικές ίνες			

Πίνακας 1.1: Τα πιο κοινά έξυπνα υλικά και το έτος που ανακαλύφθηκαν.

Ωστόσο στην πραγματικότητα τα υλικά ή οι κατασκευές δεν μπορούν να έχουν αληθινή ευφυΐα ή λογική χωρίς την προσθήκη τεχνητής νοημοσύνης. Η τεχνητή νοημοσύνη πραγματοποιείται με την χρήση υπολογιστών, μικροεπεξεργαστών, ελέγχων λογικής, και λοιποί αλγόριθμοι ελέγχου.

Επιπλέον η συνεργατική ενοποίηση έξυπνων υλικών, δομών, αισθητήρων, επενεργητών και ηλεκτρονικών ελέγχου έχουν επαναπροσδιορίσει την έννοια των δομών από ένα συμβατικό παθητικό υλικό.

Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται μερικά από τα έξυπνα υλικά που έχουν ανακαλυφθεί ή κατασκευαστεί και το έτος ορόσημο, για αυτό το υλικό. Τα έξυπνα υλικά που θα αναλυθούν παρακάτω περιλαμβάνουν πιεζοηλεκτρικά υλικά, κράματα μνήμης-σχήματος, ηλεκτροσυστολικά υλικά, μαγνητοσυστολικά υλικά, ηλεκτρορεολογικά ρευστά, μαγνητορεολογικά ρευστά, Πυροηλεκτρικά, πολυηλεκτρικά τζελ, υπεραγωγία υλικά, μαγνητοπτικά υλικά και φωτοσυσταλτικά υλικά.

Έτσι ο στόχος της παρούσας εργασία είναι η ανασκόπηση των θεμελιωδών χαρακτηριστικών των έξυπνων υλικών και κατασκευών. Η εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών υλικών στην έξυπνες κατασκευές και στην μηχανολογία. Καθώς επίσης και την επεξήγηση συγκεκριμένου παραδείγματος με την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στην μηχανολογία.

1.2 Έξυπνα Υλικά

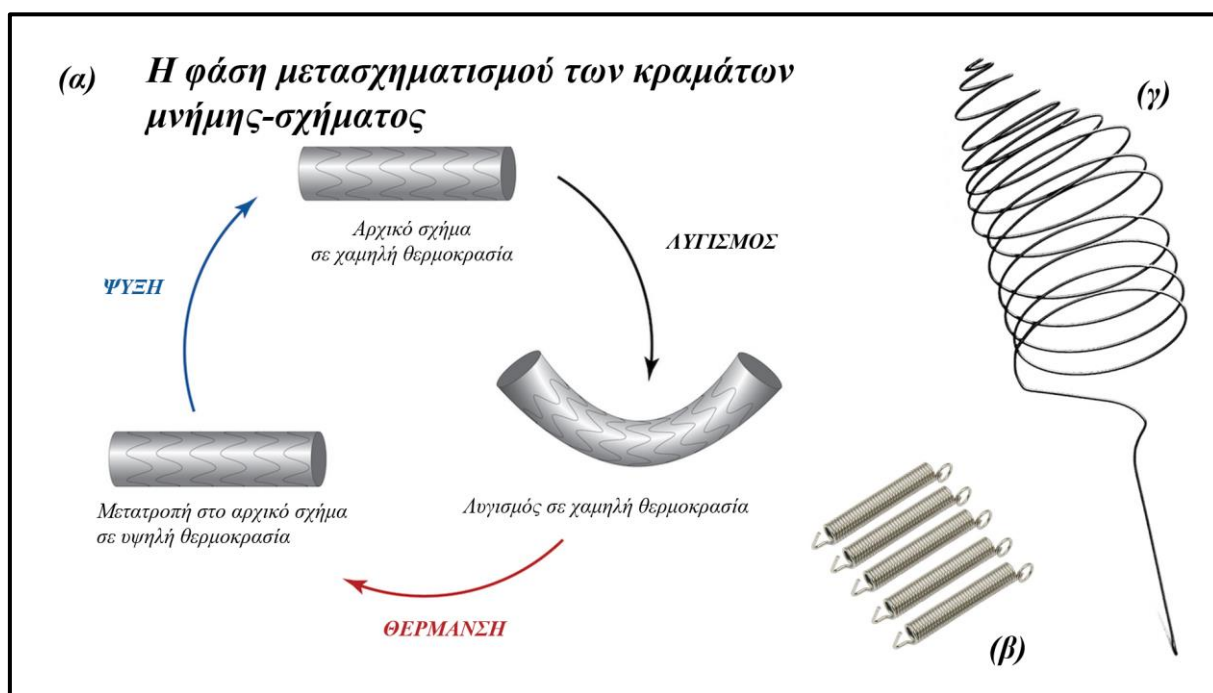
1.2.1 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι τα πιο διαδεδομένα έξυπνα υλικά, με τις περισσότερες χρήσεις στις έξυπνες κατασκευές. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αναλύονται πλήρως στο [Κεφάλαιο 2](#).

1.2.2 Κράματα Μνήμης-Σχήματος

Τα κράματα μνήμης-σχήματος παρατηρήθηκαν πρώτα από ένα δείγμα χρυσού καδμίου (AuCd) από τους Chang και Read το 1932. Αυτός ο σχηματικός μετασχηματισμός παρατηρήθηκε αργότερα στον ορείχαλκο το 1938, και στο χρυσό κάδμιο το 1952.

Το 1962 παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτού του κράματος μνήμης-σχήματος, σε μια σειρά κραμάτων νικελίου-τιτανίου από τους Buehler, Gilfrich και Wiley. Αυτό το κράμα μνήμης-σχήματος ονομάζεται πλέον Nitinol και είναι το πιο γνωστό στο εμπόριο. Αυτό το κράμα όχι μόνο παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά σε σχέση μνήμης-σχήματος, αλλά μπορεί να έχει μεταβλητή την θερμοκρασία μετασχηματισμού του, αλλάζοντας την σύνθεσή του.



Εικόνα 1.1: Κράματα μνήμης-σχήματος (α) στάδια μετάβασης των κραμάτων μνήμης σχήματος, (β) ελατήρια κραμάτων μνήμης σχήματος, (γ) σύρμα κράματος μνήμης σχήματος.

Και άλλα κράματα έχουν δοκιμαστεί για το ίδιο σκοπό. Ωστόσο, το Nitinol αποδεικνύεται ότι είναι το πιο ελκυστικό εμπορικά υλικό. Αν και το φαινόμενο της μνήμης-σχήματος συναντάται κυρίως σε κράματα μετάλλων, ορισμένα κεραμικά και πολυμερή εμφανίζουν επίσης αυτό το φαινόμενο της μνήμης-σχήματος. Αφού έχουμε παραμορφώσει μηχανικά αυτό το κράμα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του, αυτό μπορεί να επανέλθει στο αρχικό του σχήμα, το οποίο είναι γνωστό ως φαινόμενο σχήμα-μνήμης.

Σε χαμηλή θερμοκρασία, η κρυσταλλική δομή των κραμάτων παρουσιάζει μια δομή που μοιάζει με βελόνα η οποία ονομάζεται μαρτενσίτης, και παρουσιάζει μια ισχυρή κυβική δομή η οποία ονομάζεται ωστενίτης όταν αυτή θερμανθεί. Οι διαφορετικές φυσικές ιδιότητες στις

μαρτενσιτικές και ωστενιτικές κρυσταλλικές δομές, παράγουν το φαινόμενο της μνήμης-σχήματος. Όταν βρίσκεται στη μαρτενσιτική κρυσταλλική δομή, το υλικό είναι πιο ελαστικό από ό,τι όταν βρίσκεται στην ωστενιτική κρυσταλλική δομή. Η ωστενιτική κρυσταλλική δομή είναι σημαντικά πιο άκαμπτη.

Το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο τα κράματα μνήμης-σχήματος υφίστανται μαρτενσιτικό μετασχηματισμό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μερικοί από αυτούς μπορούν να τροποποιηθούν για να καλύπτουν συγκεκριμένες ανάγκες. Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να σχηματίζεται ο μαρτενσίτης, ποικίλλει για διαφορετικά υλικά και διαφορετικές αναλογίες σε κράματα μνήμης-σχήματος. Στα κράματα Ni-Ti, η θερμοκρασία στην οποία σχηματίζεται ο μαρτενσίτης, μπορεί να ποικίλλει από -200°C έως 100°C , ανάλογα με την αναλογία νικελίου ως προς τιτάνιο.

Το εύρος θερμοκρασίας μεταξύ των μαρτενσιτικών και ωστενιτικών καταστάσεων είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για τις εφαρμογές των κραμάτων μνήμης-σχήματος. Το τυπικό εύρος είναι περίπου 5°C έως 10°C . Η πιο σημαντική ιδιότητα αυτού του κρυσταλλικού μετασχηματισμού, είναι η ύπαρξη θερμοκρασίας. Ωστόσο, επειδή το υλικό είναι πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης, η θερμική ενέργεια που απορροφάει το περιβάλλον μετατρέπει τον μαρτενσίτη σε ωστενίτη μετά την εκτόνωση της πίεσης.

Το υλικό μετατρέπεται στο προηγούμενο σχήμα του ωστενίτη, παρέχοντας μια πολύ ελαστική συμπεριφορά στο κράμα. Αυτό το αποτέλεσμα επιτρέπει στα κράματα μνήμης-σχήματος να έχουν ανακτήσιμη καταπόνηση, σε σχέση με άλλα υλικά. Παραμόρφωση έως και 5% μπορεί να ανακτηθεί χρησιμοποιώντας σύρματα Ni-Ti. Ωστόσο, η κόπωση αποτελεί μεγάλο πρόβλημα.

Πραγματοποιείται διαρκής έρευνα, αφιερωμένη στην εύρεση νέων κραμάτων που παρουσιάζουν το φαινόμενο της μνήμης-σχήματος. Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας τα τελευταία χρόνια έχουν δείξει κράματα μνήμης σχήματος με υλικά όπως ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το αλουμίνιο σε συνδυασμό με μικρότερες ποσότητες νικελίου και τιτανίου. Το 1969, η Raychem παρήγαγε με επιτυχία έναν υδραυλικό σύνδεσμο σωλήνων NiTi που ονομάζεται Cryofit και χρησιμοποιήθηκε σε στρατιωτικά υδραυλικά συστήματα υψηλής απόδοσης.

Το ενδιαφέρον για τα κράματα μνήμης-σχήματος αυξήθηκε πολύ στην Ιαπωνία τη δεκαετία του 1970. Επειδή το φαινόμενο της αμφίδρομης λειτουργίας λειτουργεί τόσο με κανονικές όσο και με διατμητικές τάσεις, ένα ευρύ φάσμα γεωμετρικών διαμορφώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επενεργητές. Τα κράματα μνήμης-σχήματος μπορούν να κατασκευαστούν σε ευθεία σύρματα, ελικοειδή ελατήρια, ελατήρια προβόλου, σύρματα/ράβδοι στρέψης, σωλήνες στρέψης και ούτω καθεξής.

Τα ευθεία σύρματα και τα ελατήρια τείνουν να παράγουν μεγαλύτερη δύναμη και μικρότερη κίνηση από τα ελικοειδή ελατήρια. Το αμφίδρομο αποτέλεσμα, μπορεί επίσης να επιτευχθεί χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής δύναμης. Αυτό απαιτεί μια ειδική διαδικασία θερμικής επεξεργασίας που περιλαμβάνει την προένταση του υλικού σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Το πραγματικό αμφίδρομο αποτέλεσμα παράγει λιγότερη κίνηση και δύναμη και είναι λιγότερο κατανοητό από αυτό που περιλαμβάνει μια εξωτερική δύναμη.

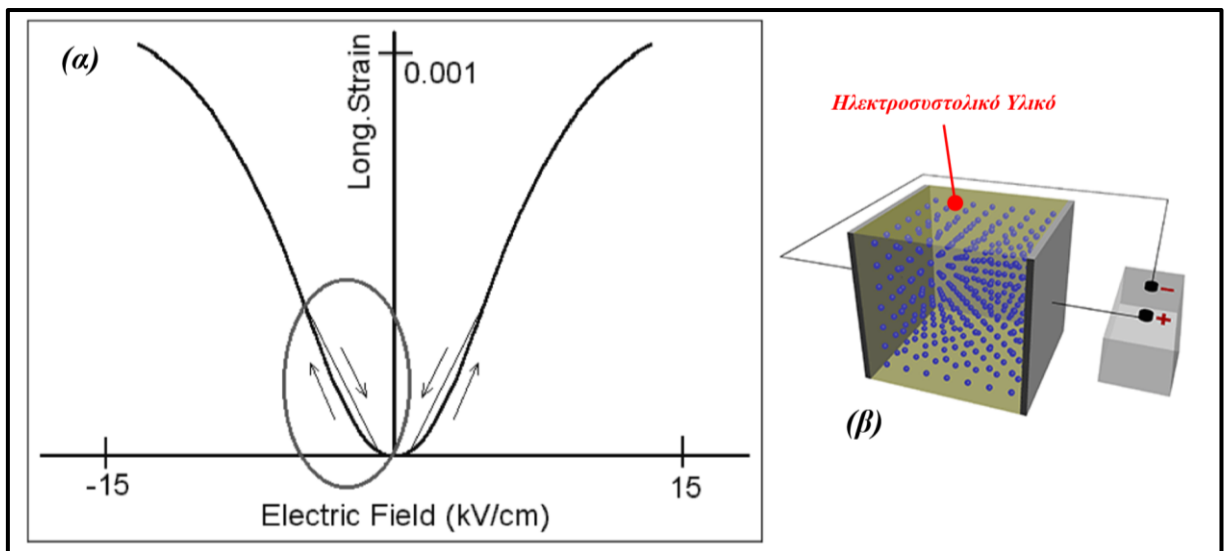
Η διαδικασία θερμικής επεξεργασίας είναι επίσης πιο δαπανηρή, καθιστώντας αυτό το είδος αμφίδρομης επίδρασης λιγότερο επιθυμητό από τη μέθοδο εξωτερικής δύναμης [65]. Πολλές εφαρμογές SMA περιλαμβάνουν προσθετικούς βραχίονες SMA [67], καφετιέρες, σφραγίδες και συνδετήρες, φίλτρα θρόμβων αίματος, φριτέζες, μηχανές εξπρές και ούτω καθεξής. [64]. Οι προτάσεις για νέες εφαρμογές περιλαμβάνουν μορφοποίηση πτερυγίων, διακόπτες κυκλώματος, αποσβεστήρες πυρκαγιάς, συστήματα αυτόματης εξαέρωσης, χειριστήρια πάνελ πόρτας και ούτω καθεξής.

1.2.3 Ηλεκτροσυστολικά Υλικά

Τόσο τα ηλεκτροσυστολικά όσο και τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ανήκουν στην οικογένεια των σιδηροηλεκτρικών. Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι ένα φαινόμενο πρώτης τάξης. Ωστόσο, η ηλεκτροδιάσπαση είναι ένα φαινόμενο δεύτερης τάξης, δηλαδή, η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη με το τετράγωνο του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Έτσι, η επαγόμενη τάση είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου και η ίδια παραμόρφωση συμβαίνει όταν το πεδίο αντιστρέφεται. Η ηλεκτροσυστολή είναι συνήθως παρούσα σε όλα τα διηλεκτρικά υλικά, αλλά είναι πολύ αδύναμη λόγω του κυρίαρχου ισχυρότερου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου πρώτης τάξης. Έτσι, κατά την ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών εφαρμογών, το μικρότερο, δεύτερης τάξης ηλεκτροσυστολικό αποτέλεσμα αγνοείται για πρακτικούς σκοπούς.

Ωστόσο, υλικά που έχουν υψηλές διηλεκτρικές σταθερές, όπως τα σιδηροηλεκτρικά υλικά, μπορούν να παρουσιάσουν πολύ μεγάλες ηλεκτροσυστολές. Σε αντίθεση με τα πιεζοηλεκτρικά, η αυθόρμητη πόλωση σε ένα σιδηροηλεκτρικό υλικό, δεν εξαφανίζεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, αλλά διασπάται αργά με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.2: (α) Γράφημα ηλεκτροσυστολικών υλικών σε σχέση με την μηχανική τάση ως προς το ηλεκτρικό πεδίο, (β) ηλεκτροσυστολικό υλικό.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί από τη φύση της μετάβασης, που σχετίζεται με μια μερικώς διαταραγμένη κατανομή κατιόντων σε ένα σιδηροηλεκτρικό υλικό, επιτρέποντας ένα μείγμα πυροηλεκτρικών φάσεων. Ως εκ τούτου, η διηλεκτρική υστέρηση στην περιοχή

μετάβασης εξαφανίζεται πριν από την αυθόρμητη πόλωση, επιτρέποντας σημαντική ηλεκτροδιάσπαση με ελάχιστη υστέρηση.

Επίσης, οι παραμορφώσεις της τάξης του 0,1% είναι τυπικές για τα ηλεκτροσυστολικά υλικά, καθώς τα υλικά είναι σταθερά στη φύση, επειδή δεν απαιτείται ηλεκτρικός χειρισμός των περιοχών για τον προσανατολισμό των διπόλων. Το 1958, οι Smolenski και Agranovskaya ανακάλυψαν για πρώτη φορά το ηλεκτροσυστολικό υλικό, το οποίο περιγράφεται ως σιδηροηλεκτρικός περοβσκίτης.

Έχει υψηλή διηλεκτρική σταθερά με ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Υλικά με βάση ηλεκτροσυστολικά που λειτουργούν πάνω από την ονομαστική θερμοκρασία μετάβασης θα έχουν τυπικά υψηλές επαγόμενες παραμορφώσεις (>0,1%) και χαμηλή υστέρηση. Το ηλεκτροσυστολικό υλικό είναι ένα καθαρά μη πιεζοηλεκτρικό υλικό στο οποίο μπορεί να διακριθεί έντονα η ηλεκτροσυστολή.

Τα τελευταία χρόνια αναφέρθηκαν και πολυμερή ηλεκτροσυστολικά υλικά. Ωστόσο, τα ηλεκτροσυστολικά υλικά μπορεί να είναι πιο αξιόπιστα από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά με βάση ορισμένες φυσικές ιδιότητες όπως υστέρηση, πόλωση, μέτρο, επίδραση θερμοκρασίας, εξωτερικές παρεμβολές κ.λπ., όπως αναλύονται παρακάτω:

- Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά εμφανίζουν αμελητέα υστέρηση (<1%), το οποίο είναι απαραίτητο για τον επανειλημμένο εντοπισμό και τη διατήρηση της ακρίβειας των σημείων ρύθμισης αλλά και τον έλεγχο αποκρίσεων ανοιχτού βρόχου.
- Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά δεν απαιτούν πόλωση, πράγμα που σημαίνει ότι παραμένουν σταθερά χωρίς γήρανση που συναντάται συνήθως σε πιεζοηλεκτρικές συσκευές.
- Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά έχουν πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας που δίνει μια σχετικά υψηλή ακαμψία, ενισχύοντας την ικανότητα δύναμης/παραμόρφωσης.
- Οι επενεργητές ηλεκτροσυστολικών υλικών έχουν αμελητέα θερμική ανάπτυξη επειδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής διαχέει πολύ μικρή ισχύ. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας, επιτρέπει περαιτέρω στις ηλεκτροσυστολικές συσκευές να λειτουργούν σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες.
- Τα ηλεκτροσυστολικά έχουν επίσης βελτιωμένη ευαισθησία καταπόνησης, που μειώνουν την τάση λειτουργίας κάτω από 150V.
- Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά παράγουν ελάχιστη ή καθόλου, ηλεκτρική ή μαγνητική παρεμβολή με άλλα εξαρτήματα. Συνεπώς, οι ηλεκτροσυστολικοί επενεργητές έχουν αντικαταστήσει πολλούς πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές που χρησιμοποιούνται σε συσκευές ακριβείας, επειδή η μετατόπιση τους είναι μικρότερη από 3% σε δύο ημέρες, σε σύγκριση με 10-15% ενός πιεζοηλεκτρικού επενεργητή υπό φόρτωση.

Οι επενεργητές ακριβείας και οι μετατροπείς μετατόπισης είναι ιδανικά για εφαρμογές ηλεκτροσυστολικών υλικών. Τόσο τα ηλεκτροσυστολικά υλικά όσο και τα πιεζοηλεκτρικά υλικά

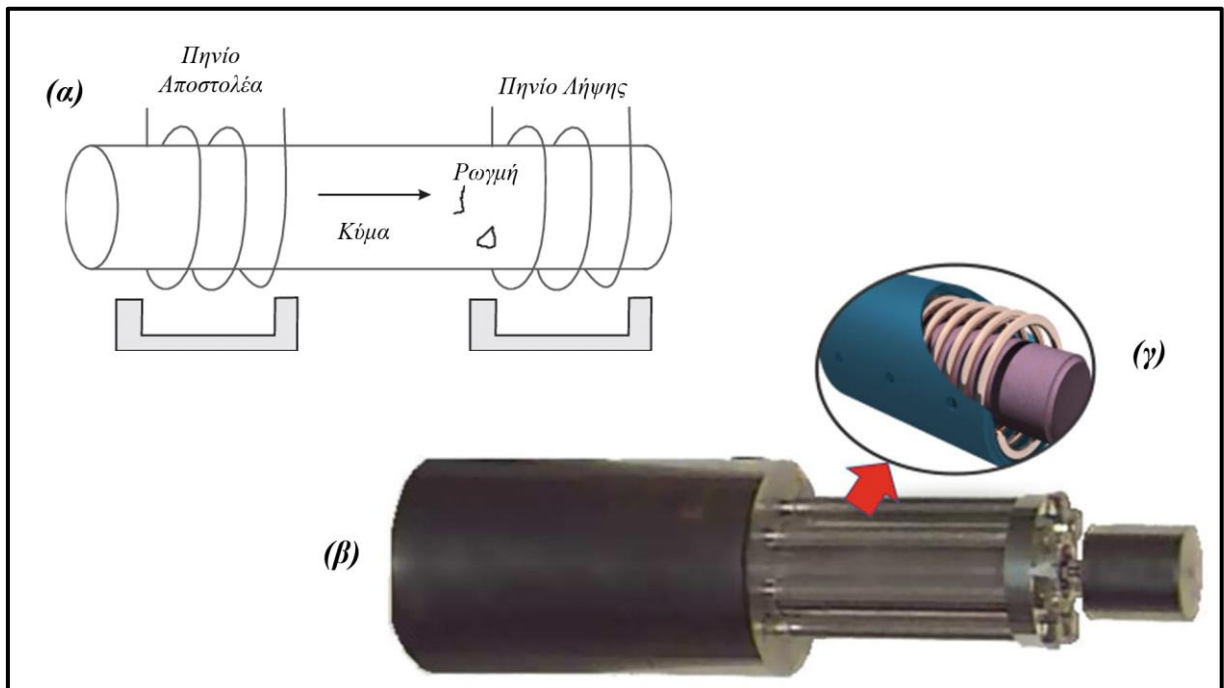
παρέχουν ακριβείς μετατοπίσεις με γρήγορο χρόνο απόκρισης σε εφαρμογές επενεργητών. Σε σύγκριση με τους ηλεκτρομαγνητικούς επενεργητές, τα ηλεκτροσυστολικά ή πιεζοηλεκτρικά συστήματα είναι πιο συμπαγή, καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και έχουν λιγότερα προβλήματα υπερθέρμανσης.

Έτσι, αυτά τα υλικά είναι ανοιχτά σε μια μεγάλη ποικιλία εμπορικών εφαρμογών. Οι πρακτικές εφαρμογές των ηλεκτροσυστολικών υλικών περιλαμβάνουν επενεργητές μετατόπισης, κινητήρες, αντλίες, συστήματα οπτικής σάρωσης, απομονωτές κραδασμών και ούτω καθεξής. Μια εφαρμογή σε οπτικές συσκευές είναι η τοποθέτηση παραμορφώσιμων κατόπτρων, όπως αυτά στο διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble. Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά ήταν διατεταγμένα σε μια διάταξη, στο πίσω μέρος της επιφάνειας του καθρέφτη, η οποία μπορούσε να ελέγξει την επιφάνεια της ανάκλασης του καθρέφτη.

Επίσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στον έλεγχο ακριβείας μια δέσμης λέιζερ υψηλής ισχύος. Παρόμοια ισχύει για την πόλωση οπτικών ινών, που ελέγχεται από τη συμπίεση των μεμονωμένων ινών. Άλλη σημαντική εφαρμογή, είναι η ανάπτυξη γραμμικών και περιστροφικών κινητήρων με τυπικό εύρος κίνησης αρκετών μικρομέτρων για κάθε εκατοστό ηλεκτροσυστολικού υλικού. Και πάλι, με τα συστήματα μοχλού, μπορεί κανείς είτε να επεκτείνει είτε να μειώσει το εύρος λειτουργίας του.

1.2.4 Μαγνητοσυστολικά Υλικά

Η μαγνητοσυστολή είναι επίσης ένα φαινόμενο δεύτερης τάξης. Δηλαδή, η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη με το τετράγωνο του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, το οποίο είναι παρόμοιο με την ηλεκτροδιάσπαση. Έτσι, η επαγόμενη παραμόρφωσή του είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και η ίδια παραμόρφωση συμβαίνει όταν το πεδίο αντιστρέφεται.



Εικόνα 1.3: Μαγνητοσυστολικά υλικά (α) μαγνητοσυστολικός επενεργητής, (β) πειραματική διάταξη μαγνητοσυστολικών υλικών για τον εντοπισμό ρηγμάτων.

Το νικέλιο ήταν το πρώτο γνωστό μαγνητοσυστολικό υλικό που εμφάνισε παραμορφώσεις περίπου 50 ppm ή παραμόρφωση 50 μm σε μια ράβδο 1m, που συνήθως ονομάζεται μικροστέλεχος. Το 1963, οι Alstad και Rhyne ανακάλυψαν ότι το στοιχείο σπάνιας γαίας τερβίου σε συνδυασμό με σίδηρο παρήγαγε πολύ μεγαλύτερα στελέχη. Αυτό το γιγάντιο στέλεχος, ωστόσο, επιτεύχθηκε μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και παρουσία μεγάλου μαγνητικού πεδίου.

Το 1972, ο Clark και ο Savage παρήγαγαν τελικά ένα κράμα από τέρβιο, δυσπρόσιο και σίδηρο που παρήγαγε γιγάντια στελέχη σε θερμοκρασία δωματίου και χωρίς την ανάγκη για μεγάλα μαγνητικά πεδία. Αυτό το νέο κράμα ονομάστηκε Terfenol-D ή γιγάντιο μαγνητοσυστολικό υλικό. Το νέο υλικό μπορεί επίσης να παράγει μεγάλες δυνάμεις, γρήγορη κίνηση υψηλής ακρίβειας, υψηλή απόδοση και υψηλά επίπεδα ισχύος.

Τα μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν ένα άλλο πολύτιμο χαρακτηριστικό, ότι μπορούν να μετατρέψουν αποτελεσματικά την ενέργεια από ηλεκτρική μορφή σε μηχανική μορφή και αντίστροφα. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα υλικά μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε εφαρμογές αισθητήρων όσο και σε εφαρμογές επενεργητών. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά μειονεκτήματα του Terfenol-D, είναι η υψηλή ευφλεκτότητα και ευθραυστότητα. Τα τελευταία χρόνια υπήρξε ανάπτυξη μαγνητοσυστολικού πολυμερούς στην Ιαπωνία.

Ένα μαγνητικό πεδίο αναγκάζει το μαγνητοσυστολικό υλικό να αυξηθεί σε μήκος όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται παράλληλα. Αυτή η γραμμική μετατόπιση μεγιστοποιείται όταν το μαγνητοσυστολικό υλικό είναι μηχανικά προεντεταμένο και η διαφορά στην παραμόρφωση μπορεί να είναι έως και 1700 ppm. Η προένταση του υλικού τείνει επίσης να αυξάνει τη γραμμική του απόκριση, σε χαμηλά πεδία και η μεταβολή της προέντασης επιτρέπει στην πραγματικότητα περιορισμένη διακύμανση στην απόκριση.

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, το Terfenol-D μπορεί να παρέχει μόνο θετική μετατόπιση παρουσία ενός πεδίου AC. Για να ληφθούν θετικά και αρνητικά στελέχη, απαιτείται μαγνητική πόλωση. Αυτό το φαινόμενο πόλωσης μπορεί να παρέχεται από μόνιμους μαγνήτες ή άλλες εξωτερικές πηγές.

Οι εφαρμογές των μαγνητοσυστολικών υλικών μπορούν να χωριστούν κυρίως σε δύο κατηγορίες, αισθητήρες και επενεργητές. Οι εφαρμογές επενεργητών ακριβείας περιλαμβάνουν μαγνητοσυστολικούς σφικτήρες, κινητήρες άμεσης μετάδοσης κίνησης, αυτοπροωθημένους αρθρωτούς οδηγούς, αντηρίδες αυτοανίχνευσης, μαγνητοσυστολούς δονητές και ούτω καθεξής. Οι εφαρμογές αισθητήρων είναι μεγάφωνα, μετατροπείς ήχου χαμηλής συχνότητας, υδρόφωνα και ούτω καθεξής.

1.2.5 Ηλεκτρο-μαγνητορολογικά Ρευστά

Συνήθως, η θερμοκρασία και η πίεση επηρεάζουν το κινηματικό ιξώδες των περισσότερων ρευστών. Ωστόσο, το ιξώδες των ηλεκτρο-μαγνητορολογικών ρευστών ελέγχεται από τη μοριακή τους δομή και ενεργοποιείται από εξωτερικά ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Έτσι, το ιξώδες ενός ηλεκτρο-μαγνητορολογικού ρευστού μπορεί να μεταβληθεί χωρίς αλλαγή της θερμοκρασίας ή της πίεσης του ρευστού.

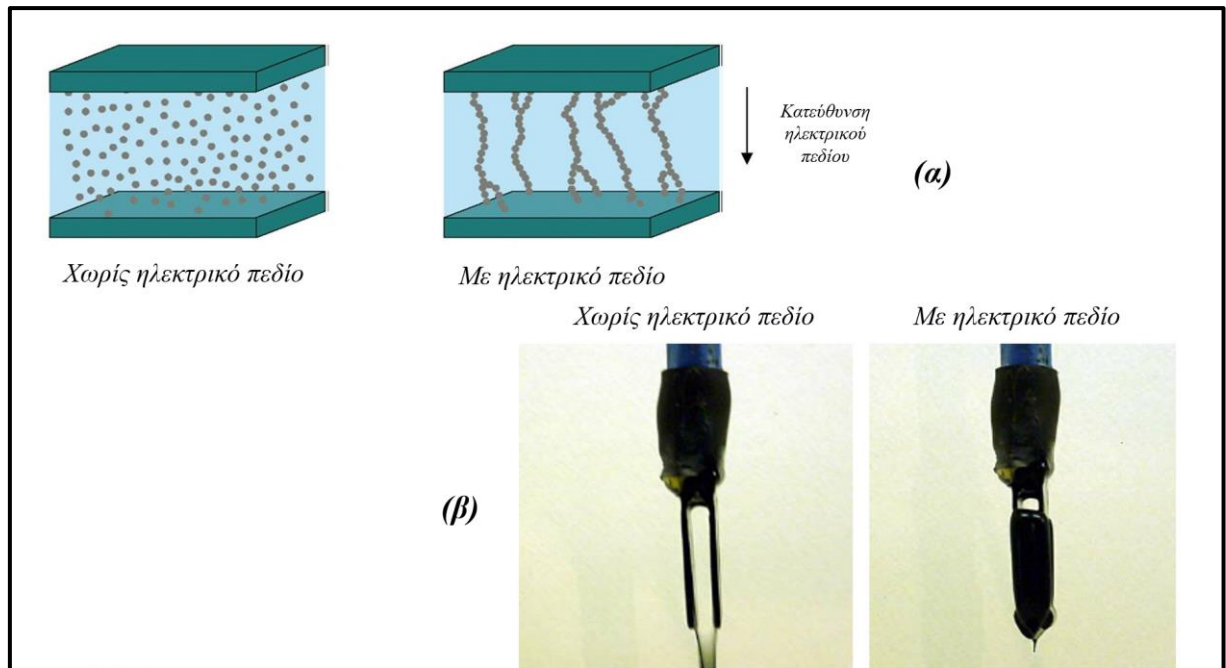
Τα ενεργά ρεολογικά υγρά μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ηλεκτρορεολογικά (ER) υγρά, (2) μαγνητορεολογικά (MR) ρευστά και σιδηρορευστά. Αυτά τα ρευστά αλλάζουν τις φυσικές τους ιδιότητες όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο. Συνήθως, τα υγρά ER και MR περιέχουν σωματίδια μικρού μεγέθους διασκορπισμένα σε ένα υγρό (συνήθως λάδι) και αναπτύσσουν τάση διαρροής ως απόκριση σε ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο.

Ωστόσο, το ferrofluid περιέχει σωματίδια μεγέθους νανομέτρων διασκορπισμένα σε ένα λάδι. Τα σωματίδια έλκονται με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, δεν υπάρχει τάση διαρροής που αναπτύσσεται ως απόκριση στο μαγνητικό πεδίο. Όταν ένα ρεολογικό ρευστό εκτίθεται στο κατάλληλο ενεργειακό πεδίο, τα στερεά σωματίδια στο ρευστό ευθυγραμμίζονται. Αυτή η ευθυγράμμιση σωματιδίων προκαλεί μείωση ή αύξηση του ιξώδους του ρευστού. Το ιξώδες είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης ενός ρευστού λόγω της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης.

Η έμφαση σε αυτή την ενότητα είναι στα δύο πρώτα ξεχωριστά υλικά: ER και MR.

1.2.5.1 Ηλεκτρορεολογικά Ρευστά

Η παρατήρηση του χαρακτηριστικού ER ευθύνεται στο Winkler το 1784. Ωστόσο, ο Winslow μελέτησε συστηματικά τις αλλαγές ιδιοτήτων του ER το 1947, και συνεπώς το φαινόμενο ER αναφέρεται μερικές φορές ως το φαινόμενο Winslow. Τα υγρά ER είναι κολλοειδή εναιωρήματα που αλλάζουν δραματικά τις ιδιότητες όταν εφαρμόζεται ένα κατάλληλο ηλεκτρικό πεδίο.



Εικόνα 1.4: Ηλεκτρορεολογικά ρευστά (α) αναπαράσταση κίνησης μορίων ηλεκτρορεολογικών ρευστών, (β) πειραματική διάταξη σύγκριση ηλεκτρορεολογικών ρευστών με ή χωρίς ηλεκτρικό πεδίο.

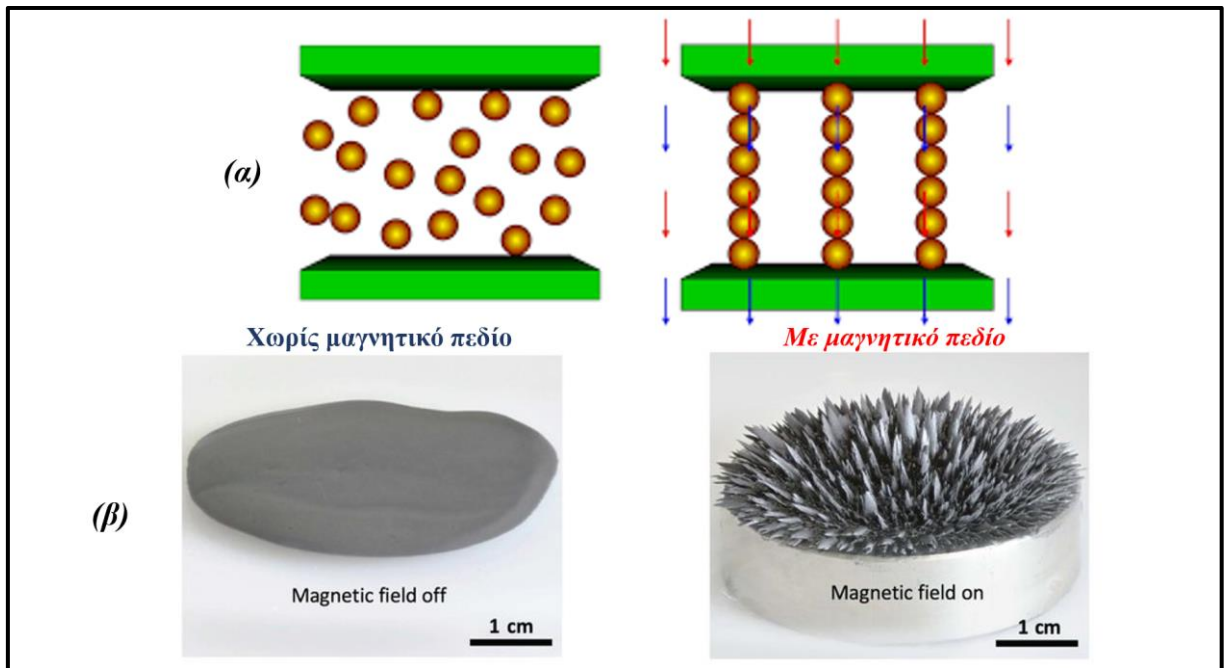
Κανονικά, τα υγρά ER συμπεριφέρονται όπως τα κανονικά νευτώνεια υγρά. Ωστόσο, οι γραμμικές δομές που σχηματίζονται όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο εμποδίζουν την ελεύθερη ροή του ρευστού ER. Τα υγρά ER υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου τόσο μικρού όσο 3 kV/mm συμπεριφέρονται όπως τα πλαστικά Bingham, με δυναμική τάση διαρροής της τάξης των 10 kPa.

Επιπλέον, ο χρόνος μετασχηματισμού που απαιτείται για ένα ρευστό ER, για να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του, τάσης διαρροής και ιξώδες, είναι μόνο μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Έτσι, τα υγρά ER μπορούν να αλλάξουν από υγρή σε στερεή δομή σχεδόν αμέσως, κάτι που είναι εξαιρετικά πλεονεκτικό σε εφαρμογές μηχανικής.

1.2.5.2 Μαγνητορρολογικά Ρευστά

Τα υγρά μαγνητικής τομογραφίας περιέχουν μαγνητιζόμενα σωματίδια: ινώδη άνθρακα που αιωρείται σε ένα ρευστό φορέα. Σιδηρομεταλλικά σωματίδια, όπως ο καρβονυλικός σίδηρος και άλλες ενώσεις χρησιμοποιούνται ως μαγνητιζόμενα σωματίδια. Το λάδι πυριτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υγρός φορέας. Το υγρό της μαγνητικής τομογραφίας μπορεί επίσης να περιέχει ένα επιφανειοδραστικό υλικό για την ενίσχυση του εναιωρήματος των στερεών μαγνητισμένων σωματιδίων.

Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτά τα ρευστά, τα χαρακτηριστικά ροής αλλάζουν σχεδόν αμέσως. Έτσι, ένα ρευστό με χαμηλό ιξώδες μπορεί να γίνει παχύρρευστο εφαρμόζοντας απλώς ένα μαγνητικό πεδίο ηλεκτρικά ελεγχόμενο. Ο βαθμός στον οποίο μεταβάλλεται το ιξώδες είναι ανάλογος με το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται.



Εικόνα 1.5: Μαγνητορρολογικά ρευστά (α) αναπαράσταση κίνησης μορίων μαγνητορρολογικών ρευστών, (β) πειραματική διάταξη σύγκριση μαγνητορρολογικών ρευστών με ή χωρίς μαγνητή.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των υγρών ER και MR είναι τα κατάλληλα εφαρμοσμένα ενεργειακά πεδία. Τα υγρά ER είναι αυτά που ανταποκρίνονται σε ηλεκτρικά πεδία υψηλής τάσης και χαμηλού ρεύματος, ενώ τα υγρά MR ανταποκρίνονται σε μαγνητικά πεδία, λειτουργούν με τάση μπαταρίας και δημιουργούν υψηλή διατμητική τάση ρευστού.

Υπάρχει μια άλλη διαφορά σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους. Τα υγρά ER απαιτούν χιλιάδες βολτ για λειτουργία και αποδίδουν χαμηλές διατμητικές τάσεις. Με αυτή την ενέργεια που απαιτείται, υπάρχει προφανής ανησυχία για την ασφαλή συγκράτηση της τάσης ώστε να

ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού. Επειδή τα υγρά MR ανταποκρίνονται μαγνητικά, δεν χρειάζονται την υψηλή τάση όπως τα υγρά ER, και τα υγρά MR συνήθως παράγουν πολύ υψηλότερη διατμητική τάση σε σύγκριση με τα υγρά ER.

Τα υγρά MR παρουσιάζουν επίσης πολύ χαμηλή αντίσταση διάτμησης σε μηδενικό πεδίο, υψηλές διατμητικές τάσεις στο μέγιστο εφαρμοζόμενο πεδίο, χαμηλή υστέρηση, χημική αδράνεια, σταθερότητα σε μεταβαλλόμενη θερμοκρασία και γρήγορο χρόνο απόκρισης.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι σχεδίασης συσκευών και συστημάτων ER/MR:

- Η πρώτη είναι η λειτουργία άμεσης διάτμησης στην οποία ένας από τους μόνιμους μαγνήτες ή ηλεκτρόδια κινείται και το ρευστό υφίσταται το φαινόμενο της διάτμησης.
- Η δεύτερη είναι η λειτουργία βαλβίδας στην οποία το ρευστό τοποθετείται μεταξύ δύο σταθερών μόνιμων μαγνητών ή ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα ένα επιβαλλόμενο πεδίο ροής μεταξύ των ηλεκτροδίων.
- Η τελευταία λειτουργία είναι η λειτουργία μεμβράνης συμπίεσης όπου η δύναμη και η μετατόπιση του ρευστού είναι παράλληλες με τους μαγνητικούς πόλους ή τα ηλεκτρόδια.

Οι ελεγχόμενες εφαρμογές των υγρών ER/MR περιλαμβάνουν ενεργή απομόνωση κραδασμών, έλεγχο, αποσβεστήρες, συσκευές απόσβεσης συμπίεσης, ενεργά αμορτισέρ οχημάτων, βάσεις κινητήρων και ούτω καθεξής.

1.2.6 Πολυηλεκτρολυτικά Τζελ

Τα ιοντικά πολυμερικά πηκτώματα είναι πολυμερικά διαλύματα που έχουν την ικανότητα να αλλάζουν τις φυσικές τους ιδιότητες ανάλογα με τις επιβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως pH, ηλεκτρικά πεδία, ηλεκτρικό φορτίο, φως κ.λπ. Οι Katchalsky και Kuhn ανέφεραν τη διόγκωση και τη συρρίκνωση των πολυμερικών οξέων με ιονισμό το 1949. Πολλά νέα πολυμερή ανακαλύφθηκαν μεταξύ των ετών 1988 και 1991, αλλά δεν άρχισαν πολλές θεωρητικές εργασίες μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990.

Πολλά από τα προηγούμενα πολυμερή έπρεπε να δοκιμαστούν για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες που παρουσίαζαν. Ακόμη και τώρα οι θεωρίες που υπάρχουν για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πολυμερών δεν περιλαμβάνουν όλα τα πηκτώματα. Ορισμένες ιδιότητες των πολυηλεκτρικών τζελ πρέπει ακόμη να προσδιοριστούν πειραματικά. Τα ιοντικά πολυμερή πηκτώματα διαστέλλονται και συστέλλονται με αλλαγές σε διάφορους επιβαλλόμενους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

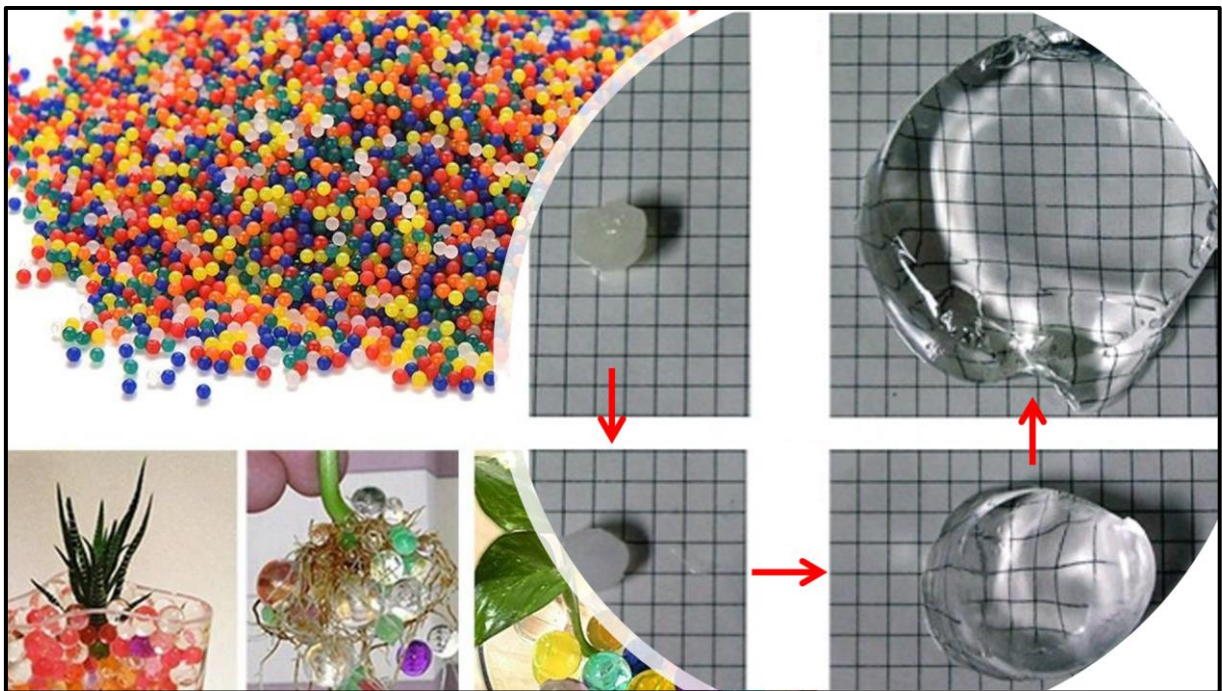
Υπάρχουν γενικά τέσσερις ανταγωνιστικές δυνάμεις που δρουν στο πολυηλεκτρικό τζελ:

- Η ελαστικότητα,
- Η ιξώδης αλληλεπίδραση πολυμερούς-υγρού,
- Το αδρανειακό αποτέλεσμα
- Η ιονική αλληλεπίδραση και η πίεση ιόντων.

Είναι γνωστό εδώ και αρκετό καιρό ότι τα πηκτώματα που αποτελούνται από ιοντικά πολυμερή παραμορφώνονται όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο μέσω του διαλύματος που αναδύεται από το πήκτωμα. Η διόγκωση/συστολή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από το pH, τις συγκεντρώσεις αλάτων και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η διόγκωση του τζελ προκαλείται από ελκυστική αλληλεπίδραση μεταξύ πολυμερούς και διαλύτη. Αυτό θα πρέπει να καθορίσει τον συνολικό όγκο του πολυηλεκτρικού τζελ. Ωστόσο, εάν το τζελ περιέχει ηλεκτρικά φορτία, τα ιόντα εντός του τζελ δεν είναι ισοδύναμα με εκείνα εκτός του τζελ.

Ως εκ τούτου, προκαλείται μια ηλεκτρική ανισορροπία και προκαλείται περαιτέρω διαστολή/συστολή. Όταν τα τζελ εισάγονται σε αλκαλικό ή όξινο περιβάλλον, η συμπεριφορά των τζελ τροποποιείται. Όταν εμφανίζεται μια ανισορροπία ιόντων σε μια όξινη περιοχή, η διαστολή του τζελ τείνει να είναι λιγότερο σοβαρή από ό,τι εάν το ίδιο πολυμερές έρθει σε μια αλκαλική περιοχή, δηλαδή τα πηκτώματα συρρικνώνονται σε όξινο διάλυμα και διογκώνονται σε αλκαλικό διάλυμα. Επιπλέον, φαίνεται ότι η διαστολή ενός ουδέτερου διαλύματος τζελ είναι παρόμοια με εκείνη ενός αλκαλικού διαλύματος εκτός από υψηλές και χαμηλές ιοντικές συγκεντρώσεις.



Εικόνα 1.6: Πολυηλεκτρικά τζελ, χρήση ως παιχνίδια καθώς μπορούν να απορροφήσουν πολύ μεγάλο ποσότητα ρευστού.

Αρχικά, αυτά τα δύο είδη λειτουργικών ομάδων θεωρούνται ότι είναι αντίθετα φορτισμένα και ηλεκτροστατικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Σε αλκαλικό διάλυμα, οι αμινομάδες θα εξουδετερωθούν και οι σουλφονικές ομάδες θα παραμείνουν αρνητικά φορτισμένες. Επομένως, η ηλεκτροστατική σύνδεση μεταξύ των δύο λειτουργικών ομάδων θα εξαφανιστεί και η ηλεκτροστατική απόθεση μεταξύ των σουλφονικών ομάδων θα συμβάλει στη διόγκωση του τζελ.

Τέτοια ηλεκτροστατική απόθεση μεταξύ ομοίως φορτισμένων ομάδων, είναι γνωστό ότι συμβάλλει στη διόγκωση του τζελ με σταυροειδείς δεσμούς. Για το όξινο διάλυμα, οι σουλφονικές ομάδες θα παραμείνουν αρνητικά φορτισμένες και ο ηλεκτροστατικός δεσμός δεν θα εξαφανιστεί, με αποτέλεσμα να μην υπάρξει διόγκωση.

Όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, προκαλείται ανισορροπία εντός του τζελ και εμφανίζεται συστολή/διαστολή. Η συμπεριφορά ενός κατιονικού τζελ, υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να εξηγηθεί ως εξής:

- Πρώτον, η πλευρά της ανόδου συρρικνώνεται εάν το τζελ έρχεται σε επαφή με την άνοδο, ενώ η πλευρά της ανόδου διογκώνεται και στη συνέχεια συρρικνώνεται εάν το τζελ είναι επαρκώς διαχωρισμένο από την άνοδο.
- Δεύτερον, η κάθοδος συρρικνώνεται ελαφρώς τόσο σε περιπτώσεις επαφής όσο και σε περιπτώσεις χωρίς επαφή.

Επιπλέον, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση του τζελ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Αν και η διάχυση των ιόντων είναι ίδια, η παραμόρφωση διέπεται περαιτέρω από τα κυρίαρχα ιόντα, αλκαλικά ή όξινα. Έτσι, οι επενεργητές ή οι ρυθμιστές είναι οι φυσικές τους εφαρμογές.

Παραδείγματα περιλαμβάνουν τεχνητούς κερατοειδείς, αισθητήρες αερίων, ιατρικά εμφυτεύματα, συστήματα χορήγησης φαρμάκων, τεχνητά δάχτυλα, μύες, επενεργητές ρομποτικής, οπτικούς κυματοδηγούς, κόλλες, μεμβράνες και ενσωματωμένες συστοιχίες δυνάμεων.

1.2.7 Πυροηλεκτρικά Υλικά

Ο πυροηλεκτρισμός ορίζεται ως η στιγμιαία πόλωση των κρυστάλλων, αποτέλεσμα απόκρισης σε μια διαφορά θερμοκρασίας. Οι πυροηλεκτρικοί κρύσταλλοι αναφέρθηκαν για πρώτη φορά από τον Έλληνα φιλόσοφο Θεόφραστο, ο οποίος περιέγραψε ένα υλικό που είναι γνωστό ότι έχει την ιδιότητα να έλκει λεπτά κομμάτια μετάλλου ή ξύλου.

Αυτή η έλξη αργότερα αποδείχθηκε ότι προέρχεται από θερμικά φαινόμενα, τα οποία προκάλεσαν μια ανομοιογενή αλλαγή της θερμοκρασίας του πυροηλεκτρικού υλικού. Αυτό, με τη σειρά του, προκάλεσε τη δημιουργία φορτίων στα άκρα των πυροηλεκτρικών κρυστάλλων. Από τις 32 ομάδες κρυστάλλων, οι 20 ομάδες είναι πιεζοηλεκτρικές και μόνο 10 ομάδες χαρακτηρίζονται ως πυροηλεκτρικές.

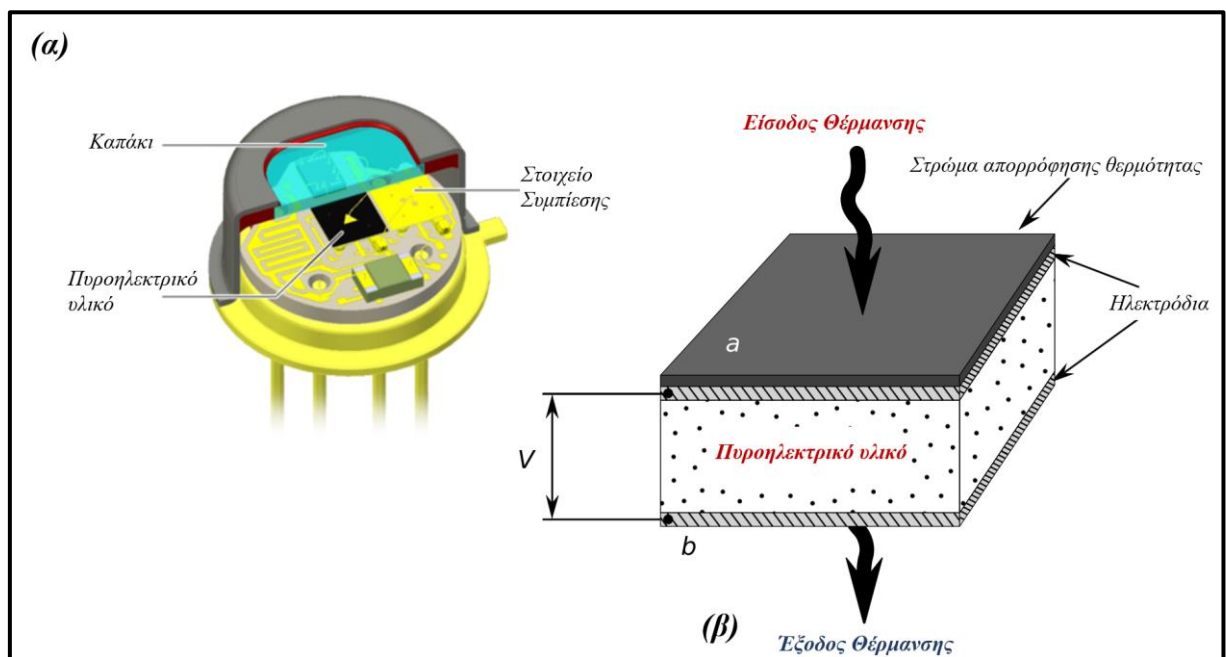
Όλα τα πυροηλεκτρικά είναι μια υποομάδα των πιεζοηλεκτρικών, μιας κρυσταλλικής ομάδας που χαρακτηρίζεται από πόλωση λόγω μηχανικής καταπόνησης. Η τουρμαλίνη είναι ένας από τους πιο γνωστούς πυροηλεκτρικούς κρυστάλλους. Υπάρχουν αρκετές ποικιλίες, με τις σκουρόχρωμες ποικιλίες να έχουν μικρή ή καθόλου πυροηλεκτρική επίδραση. Αυτό οφείλεται στην υψηλή αγωγιμότητα των πιο σκούρων ποικιλιών.

Τα αποτελέσματα στην τουρμαλίνη είναι βασικά δευτερεύοντα με μόνο 10-20% λόγω πρωτογενούς πυροηλεκτρισμού. Παρατηρήθηκε ότι οι κρύσταλλοι τουρμαλίνης προσελκύουν

σωματίδια σκόνης κατά τη θέρμανση και την ψύξη. Ο πυροηλεκτρισμός μπορεί περαιτέρω να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: διανυσματικό και τεντωτικό.

Ο διανυσματικός πυροηλεκτρισμός, είναι ο πιο συνηθισμένος, μπορεί να οριστεί ως η μεταβολή της θερμοκρασία των θετικών και αρνητικών φορτίων πόλωσης σε ορισμένα τμήματα κρυστάλλων, που ανήκουν σε ορισμένες κατηγορίες.

Ομοίως, ο τανυστικός πυροηλεκτρισμός εκδηλώνεται με την παραγωγή μικρών φορτίων παρόμοιας πόλωσης στις άκρες που εμφανίζονται, όταν ο κρύσταλλος θερμαίνεται ομοιόμορφα. Ο τανυστικός πυροηλεκτρισμός ασχολείται με τις τετραπολικές ροπές στους κρυστάλλους, και είναι θεωρητικά εφαρμόσιμος σε όλες τις κρυσταλλικές δομές εκτός από τις κυβικές. Η ομοιόμορφη θέρμανση προκαλεί αλλαγές στο πεδίο στην γειτονιά των τετραπόλων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται διπλά στρώματα ηλεκτρισμού στην επιφάνεια.



Εικόνα 1.7: Πυροηλεκτρικά υλικά (α) ανιχνευτής πρκαγιάς και επεξήγηση επιμέρους κομματιών, (β) σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας πυροηλεκτρικών υλικών.

Ο συνολικός πυροηλεκτρισμός ενός κρυστάλλου αποτελείται από δύο μέρη: ένα πρωτεύον συστατικό που αντιστοιχεί σε μια διαφορά θερμοκρασίας, σε έναν πλήρως περιορισμένο κρύσταλλο, και ένα δευτερεύον συστατικό, που ασχολείται με την πιεζοηλεκτρική παραμόρφωση, που συμβαίνει λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της θερμικής διαστολής.

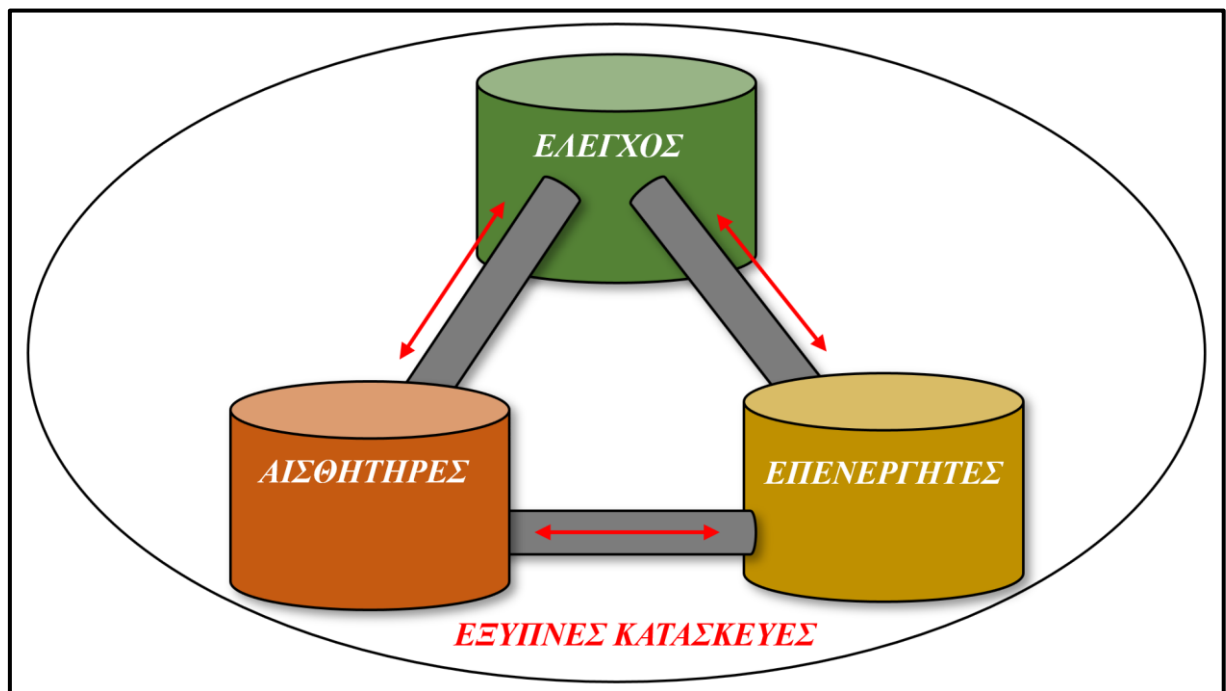
Τα δευτερεύοντα πυροηλεκτρικά φαινόμενα μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω ανάλογα με το εάν η θέρμανση είναι ομοιόμορφη. Αυτά αναφέρονται ως το πρώτο και δεύτερο είδος, αντιπροσωπεύοντας ανομοιόμορφη και ομοιόμορφη θέρμανση, αντίστοιχα. Το αντίστροφο του πυροηλεκτρισμού είναι το ηλεκτροθερμιδικό φαινόμενο, το οποίο είναι γνωστό ως η αλλαγή στη θερμοκρασία ενός πυροηλεκτρικού κρυστάλλου που προκαλείται από μια αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο.

Οι πυροηλεκτρικές συσκευές εφαρμόζονται κυρίως σε μετρήσεις που σχετίζονται με τη θερμοκρασία ή σε ανίχνευση υπέρυθρων. Πολλές χρήσιμες εφαρμογές για πυροηλεκτρικά υλικά περιλαμβάνουν τη μέτρηση θερμικών παραμέτρων, τη δημιουργία ακτίνων X, την ηλεκτροστατική έλξη, τη δοκιμή ανακλαστικότητας, την υπέρυθη κάμερα CCD, την παρακολούθηση ολοκληρωμένου κυκλώματος, και ούτω καθεξής

1.3 Έξυπνες Κατασκευές

Μια έξυπνη κατασκευή περιλαμβάνει τοποθετημένους αισθητήρες και επενεργητές καθώς και ένα ή περισσότερους μικροεπεξεργαστές, οι οποίοι αναλύουν την συμπεριφορά του συστήματος από τους αισθητήρες και χρησιμοποιούν τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόχου, ώστε να εφαρμόσουν την εντολή στους επενεργητές. Όπου με την σειρά τους θα εφαρμόσουν συγκεκριμένη μηχανική τάση στην κατασκευή για να περιορίσουν τις μετατοπίσεις του συστήματος.

Μια έξυπνη κατασκευή έχει την δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε διαφορετικούς εξωτερικούς παράγοντες, καθώς μπορεί να ανταποκρίνεται και σε εσωτερικούς παράγοντες. Περιλαμβάνει έξυπνα υλικά, επενεργητές οι οποίοι επιτρέπουν την μεταβολή των χαρακτηριστικών του συστήματος, καθώς και την συμπεριφορά του συστήματος με έναν ευγενή τρόπο.



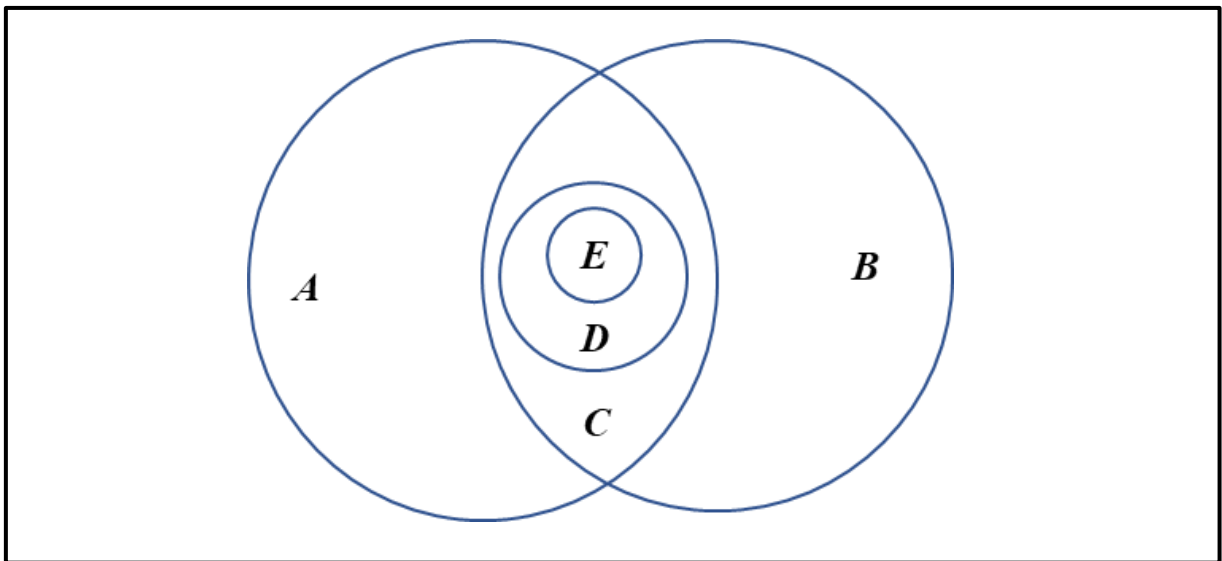
Εικόνα 1.8: Οι τρεις κύριοι πυλώνες για τις έξυπνες κατασκευές.

Έτσι, μια έξυπνη κατασκευή περιλαμβάνει πέντε κύρια στοιχεία: επενεργητές, αισθητήρες, στρατηγικές ελέγχου, ηλεκτρονικά τροφοδοσίας και σήματος και φυσικά έναν υπολογιστή. Αρκετοί τύποι επενεργητών και αισθητήρων, όπως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα κράματα μνήμης-σχήματος, τα ηλεκτροσυστολικά υλικά, μαγνητοσυστολικά υλικά, ER/MR fluids και οι οπτικές ίνες, βρίσκουν εφαρμογή σε έξυπνες κατασκευές. Αυτά μπορούν να προσαρμοστούν στο κύριο σύστημα μέσω της επιφανειακής σύνδεσης ή ενσωμάτωσης, χωρίς να προκαλούν εξαιρετικές αλλαγές στην μάζα ή στην ακαμψία του συστήματος.

Αρκετές εφαρμογές τεχνολογιών έξυπνων κατασκευών έχουν εφαρμοστεί σε φυσικά συστήματα και περιλαμβάνουν το ενεργό έλεγχο των ταλαντώσεων, θορύβου, αποσβέσεων, αλλαγής μορφολογίας και ομοιόμορφη κατανομή μηχανικής τάσης. Οι εφαρμογές ποικίλουν από διαστημικά συστήματα σε φτερά αεροσκαφών, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε δομικές κατασκευές, σε εργαλειομηχανές και ιατρικά μηχανήματα.

Αυτή την στιγμή, οι σερβοβαλβίδες υδραυλικών επενεργητών χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδιαστημική, καθώς και σε άλλες εφαρμογές εξαιτίας της μεγάλης αξιοπιστίας που διαθέτουν σε συνθήκες υπό υψηλές δυνάμεις. Τα μειονεκτήματά τους, όπως η μηχανολογική περιπλοκότητα που έχουν, το μέγεθος και το βάρος τους, επιτρέπουν την ευκαιρία για περαιτέρω ανάπτυξη στην εύρεση ελαφρύτερων και πιο συμπαγών επενεργητών, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές.

Ένα έξυπνο υλικό, ορίζεται ως ένα υλικό που μετατρέπει τα χαρακτηριστικά του, όπως την μηχανική του κατάσταση ή τα χαρακτηριστικά του υλικού, κάτω από εξωτερική διέγερση. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των έξυπνων κατασκευών έχει επικεντρωθεί σε διαστημικές εφαρμογές και κυρίως στις δονήσεις και στον έλεγχο του σχήματος, σε εύκαμπτες διαστημικές κατασκευές.



Εικόνα 1.9: Σύνολο διαφόρων ειδών δομών/κατασκευών.

Οι ενσωματωμένοι ή επιφανειακά συνδεδεμένοι έξυπνοι επενεργητές σε πτέρυγα αεροπλάνου ή έλικες ελικοπτέρων, μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή συστροφής που με τη σειρά του μπορεί να προκαλέσει διακύμανση στην κατανομή της ανύψωσης, και μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο στατικών και δυναμικών προβλημάτων. Οι εφαρμογές της τεχνολογίας των έξυπνων κατασκευών στην αεροδιαστημική, αλλά και σε άλλα συστήματα επεκτείνονται με ταχείς ρυθμούς.

Τα κυριότερα εμπόδια περιλαμβάνουν τη χαμηλή κίνηση των επενεργητών, την έλλειψη αξιοπιστίας βάσης, τη μη διαθεσιμότητα ισχυρών κατανεμημένων προσαρμοστικών στρατηγικών ελέγχου και την ανεπαρκή μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση έξυπνων συστημάτων. Μια έξυπνη κατασκευή ενσωματώνει κατανεμημένους επενεργητές και αισθητήρες καθώς και λογική έλεγχο, επεξεργαστές και ηλεκτρονικά ισχύος.

Η παραπάνω εικόνα ορίζει διάφορους τύπους κατασκευών, ως εξής:

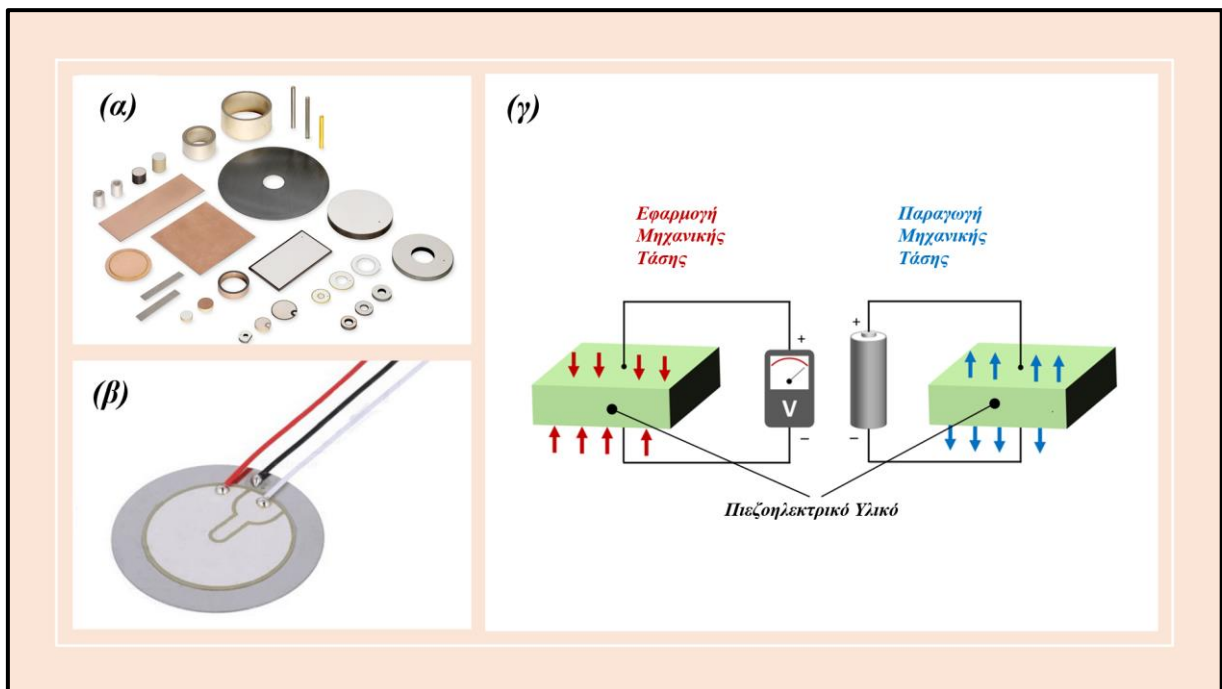
- Προσαρμοστικές Δομές (A): έχουν κατανεμημένους επενεργητές για να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά με προκαθορισμένο τρόπο. Μπορεί να μην έχουν αισθητήρες. Παραδείγματα είναι τα συμβατικά φτερά αεροσκάφους με πτερύγια.
- Αισθητήρια δομές (B): διαθέτουν κατανεμημένους αισθητήρες για την παρακολούθηση των χαρακτηριστικών της δομής (π.χ. παρακολούθηση της υγείας). Οι αισθητήρες μπορεί να ανιχνεύσουν καταπόνηση, μετατόπιση, επιτάχυνση, θερμοκρασία, ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες και έκταση της ζημιάς.
- Ελεγχόμενες δομές (C): επικαλύπτονται τόσο προσαρμοστικές όσο και αισθητήριες δομές. Αποτελούνται από επενεργητές-αισθητήρες και ένα σύστημα ελέγχου ανάδρασης, για τον ενεργό έλεγχο των χαρακτηριστικών της κατασκευής.
- Ενεργές Δομές (D): είναι ένα υποσύνολο ελεγχόμενων δομών. Οι ενσωματωμένοι επενεργητές και αισθητήρες έχουν ικανότητα μεταφοράς φορτίου.
- Έξυπνες Δομές (E): είναι ένα υποσύνολο ενεργών δομών. Επιπλέον, διαθέτουν εξαιρετική ενσωματωμένη λογική ελέγχου και ηλεκτρονικά ισχύος.

2 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

2.1 Πιεζοηλεκτρισμός

Οι αδερφοί Κιουρί (Jacques και Pierre) παρατήρησαν τάσεις ηλεκτρικού πεδίου σε κρυστάλλους χαλαζία όταν υποβλήθηκαν σε μηχανικές τάσεις το 1880. Επίσης παρατήρησαν και μηχανική παραμόρφωση όταν ο κρύσταλλος υποβλήθηκε σε ηλεκτρικά πεδία. Ο πιεζοηλεκτρισμός γενικά είναι ένα ηλεκτρομηχανικό φαινόμενο που συνδέει το ελαστικό πεδίο και το ηλεκτρικό πεδίο.

Ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό ανταποκρίνεται σε μηχανικές δυνάμεις/πιέσεις και παράγει ηλεκτρικά φορτία/τάσεις, το οποίο αναφέρεται ως το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αντίθετα, τα ηλεκτρικά φορτία/πεδία που εφαρμόζονται στο υλικό μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές τάσεις ή καταπονήσεις, και αυτό ονομάζεται αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπως διακρίνεται στην **Εικόνα 2.1 (γ)**.



Εικόνα 2.1: Πιεζοηλεκτρικά υλικά (α) πιεζοηλεκτρικά υλικά σε διάφορες γεωμετρίες, (β) η πιο συνηθισμένη πιεζοηλεκτρική γεωμετρία που συναντάται παντού (γ) απεικόνιση λειτουργιών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Συνήθως, το άμεσο αποτέλεσμα είναι η βάση για εφαρμογές αισθητήρων και το αντίστροφο είναι για επενέργηση και χειρισμό σε εφαρμογές ελέγχου. Η διαδρομή των επενεργητών κυμαίνεται από κλίμακες νάνο, έως μικρο, έως και χιλιοστών, ανάλογα με τις διαμορφώσεις \ ή με/χωρίς μηχανικές ενισχύσεις ή αφαιρέσεις μέσω συστημάτων μοχλού. Σε χαμηλό ηλεκτρικό πεδίο, ο πιεζοηλεκτρισμός είναι ένα φαινόμενο πρώτης τάξης που παράγει μια τάση ανάλογη με το ηλεκτρικό πεδίο και την κατεύθυνση της μετατόπισης, που εξαρτάται από το πρόσημο του ηλεκτρικού πεδίου.

Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το ηλεκτρικό πεδίο, εμφανίζεται ηλεκτρομηχανική υστέρηση και η περιοχή της μεγαλώνει σε ισχυρά ηλεκτρικά πεδία, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ελέγχου μετατόπισης του σερβομηχανισμού σε επενέργηση υψηλής ακριβείας και μεγάλης διαδρομής. Πολλά φυσικά και συνθετικά υλικά παρουσιάζουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- ✓ Φυσικούς κρυστάλλους
- ✓ υγρούς κρυστάλλους
- ✓ Μη κρυσταλλικά υλικά
- ✓ Συνθετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά

Σημειώστε ότι τα ακατέργαστα συνθετικά υλικά είναι συνήθως ισότροπα και μη πιεζοηλεκτρικά. Γίνονται ανισότροπα και πιεζοηλεκτρικά μόνο μετά τη διαδικασία πόλωσης που περιλαμβάνει την εφαρμογή υψηλού ηλεκτρικού πεδίου σε υψηλή θερμοκρασία. Το πεδίο ευθυγραμμίζει τα μοριακά δίπολα στο υλικό, και τα δίπολα στη συνέχεια στερεώνονται στον ευθυγραμμισμένο προσανατολισμό, όταν το υλικό ψύχεται διατηρώντας το ισχυρό πεδίο. Το πολωμένο πιεζοηλεκτρικό θα παραμορφωθεί παρουσία ηλεκτρικού πεδίου και θα πολωθεί όταν υπόκειται σε μηχανική καταπόνηση.

Επειδή τα συνθετικά υλικά και πολυμερή μπορούν να κατασκευαστούν σε αυθαίρετες γεωμετρίες και σχήματα, είναι πολύ δημοφιλή σε πολλές εφαρμογές αισθητήρων και επενεργητών. Οι θεμελιώδεις θεωρίες για τον πιεζοηλεκτρισμό, την πιεζοθερμοελαστικότητα και την οπτοπιεζοθερμοελαστικότητα έχουν προταθεί και τελειοποιηθεί με τα χρόνια. Η μηχανική εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών υλικών ξεκίνησε με μια συσκευή βάθους, βασισμένη στο άλας Rochelle, που εφευρέθηκε από τον Langevin το 1917.

Αισθητήρες	Επιταχυνσιόμετρο, αισθητήρας πίεσης, αισθητήρας δύναμης, αισθητήρας ήχου, μικρόφωνο, αισθητήρας πρόσκρουσης, παρακολούθηση υγείας συστήματος κ.λπ.
Επενεργητές	Γεννήτρια πιέσεων, επενεργητές ακριβείας, ψεκασμός καυσίμου/μελανιού, επενεργητές μετατόπισης, μοτέρ υπερήχων, απομονωτές δονήσεων, έλεγχος δονήσεων και θορύβου, υδριβικοί επενεργητές,
Κατασκευές	Δονήσεις, θόρυβος, τάση, επιτήρηση υγείας, μετρήσεις (ροή, πίεση, δύναμη), παραμόρφωση
Μηχανές και μηχανολογικά συστήματα	Έλεγχος και καταγραφή θορύβου και δονήσεων, μηχανική τάση, επιτήρηση και διαγνωστικά υγείας κατασκευής, οπτικά συστήματα, μετρήσεις (δύναμης, επιτάχυνσης, πίεσης, κρούσης, θορύβου)
Ιατρικές και βιοιατρικές εφαρμογές	Αισθητήρες μια χρήσης, συσκευές υπερήχων, συσκευές ελέγχου ακριβείας

Ρομποτικά και μηχανικά συστήματα	Επενεργητές ακριβείας, χειρισμός, έλεγχος, ρομπότ ακριβείας, αρπάγες, εύκαμπτα ρομπότ, μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα, μικροί αισθητήρες/ επενεργητές
Έξυπνες κατασκευές	Προσαρμοστικές κατασκευές, έλεγχος στατικής δομής, έλεγχος προσαρμοστικής γεωμετρίας και σχήματος, προσαρμοστικά πτερύγια και έλικες ελικοπτέρων, έλεγχος θορύβου και δονήσεων, έλεγχος κόπωσης, παρακολούθηση υγείας, επισκευή ζημιών, τοποθέτηση, αεροδιαστημικές εφαρμογές και δορυφόροι

Πίνακας 2.1: Χρήσεις πιεζοηλεκτρικών υλικών και εφαρμογή τους σε έξυπνες κατασκευές.

Νέες πιεζοηλεκτρικές συσκευές εφευρέθηκαν και εφαρμόστηκαν σε μια ποικιλία εφαρμογών μηχανικής. Πολλοί αισθητήρες (π.χ. επιταχυνσιόμετρα, μετατροπείς πίεσης, μικρόφωνα κ.λπ.), επενεργητές (χειριστές ακριβείας, χειριστές ρομπότ, κινητήρες υπερήχων, μηχανισμός οδήγησης για μικροσκόπια σάρωσης κ.λπ.), έξυπνες κατασκευές (π.χ. έλικες ελικοπτέρων, πτερύγια αεροπλάνων, διαστημικές κατασκευές κ.λπ.) έχουν κατασκευαστεί. Στην πραγματικότητα, ο τομέας των έξυπνων κατασκευών ξεκίνησε με την κατανομημένη έρευνα πιεζοηλεκτρικής ανίχνευσης και ελέγχου στις αρχές της δεκαετίας του 1980.

Νέες συσκευές εφευρίσκονται και κατοχυρώνονται με διπλώματα ευρεσιτεχνίας κάθε χρόνο. Ο **Πίνακας 2.1** δίνει μια λίστα με δείγματα εφαρμογών. Η πρόσφατη ανάπτυξη προσαρμοστικών δομών και μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων ενσωματώνει περαιτέρω τα πιεζοηλεκτρικά, με δομές και ηλεκτρονικά ελέγχου, τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές εφαρμογές.

Παραδείγματα περιλαμβάνουν δομές αεροδιαστημικής/αεροσκαφών, χειριστήρια ρομπότ, αποσβέσεις κραδασμών, συσκευές υψηλής ακρίβειας, μικροαισθητήρες / επενεργητές, MEMS λεπτής μεμβράνης, παρακολούθηση υγείας συστήματος, επενέργηση και έλεγχος μετατόπισης και ούτω καθεξής.

Πρόσθετες εφαρμογές σε έξυπνες κατασκευές και δομικά συστήματα περιλαμβάνουν κατανομημένο δομικό έλεγχο, δυναμικό έλεγχο, αυτοαισθητήρες-επενεργητές, ορθογώνιους αισθητήρες/επενεργητές, έλεγχος θορύβου, απομονωτές κραδασμών, ενεργή απόσβεση, μορφοποίηση πτερυγίων, χαρακτηριστικά μικροσκοπικής νευρικής ανίχνευσης και επενέργησης κωνικών, παραβολοειδών, δακτυλιοειδών και σφαιρικών δομικών κελυφών και ούτω καθεξής.

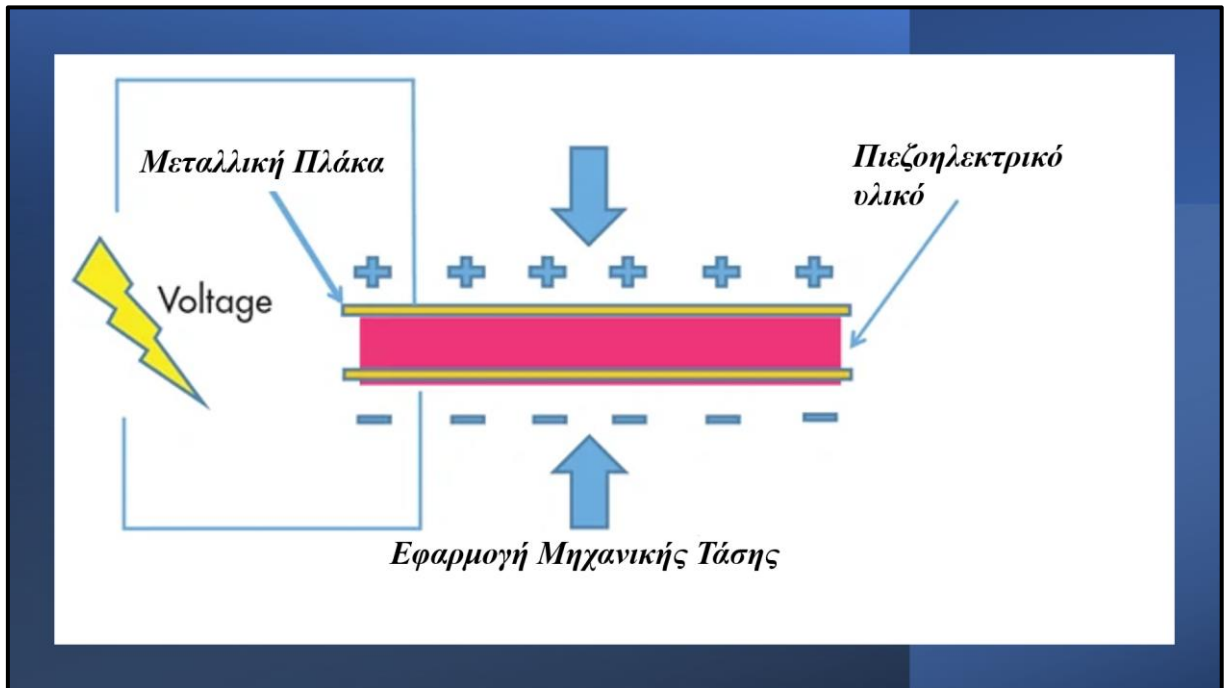
Άλλες πρόσφατες πρακτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν πιεζοηλεκτρικά αποσβεσμένα σκι, έλεγχο αεροελαστικού πτερυγίσματος πτερυγίων, οπτικό έλεγχο δοκών μέτρησης, έλεγχο λεπίδων ελικοπτέρου, μείωση θορύβου, βιοϊατρικές εφαρμογές και κινητήρες υπερήχων.

Αν και ο παραπάνω πίνακας συνοψίζει δείγματα εφαρμογών πιεζοηλεκτρικών, οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές μπορούν επίσης να επιτευχθούν και από άλλα έξυπνα υλικά, για

παράδειγμα ηλεκτρο-μαγνητοσυστολικά υλικά, υλικά με μνήμη σχήματος κ.λπ. με διαφορετικές αρχές σχεδίασης.

2.1.1 Φαινόμενο Πιεζοηλεκτρικού

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι μια ιδιότητα που παρουσιάζεται από υλικά που φορτίζονται ηλεκτρικά όταν υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση. Επίσης εμφανίζεται και το αντίστροφο φαινόμενο, στο οποίο προκαλείται μια μηχανική παραμόρφωση από ένα εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο. Η πειραματική μέτρηση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τους Pierre και Jacques Curie το 1880.



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού.

Οι Curies μελέτησαν φυσικούς κρυστάλλους όπως ο χαλαζίας, το άλας Rochelle και η τουρμαλίνη. Αργότερα παρατήρησαν το αντίστροφο φαινόμενο, το οποίο προβλέφθηκε από τις θερμοδυναμικές αρχές από τον Lippmann το 1881. Το άμεσο αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ανίχνευσης, ενώ το έμμεσο αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επενέργηση και την ακουστική μεταγωγή.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκαλείται από μια ασυμμετρία στη μονάδα και τη σχέση μεταξύ μηχανικής παραμόρφωσης και διαχωρισμού ηλεκτρικών διπόλων. Το αποτέλεσμα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών συντελεστών. Η μέτρηση των οποίων έχει περιγραφεί σε διάφορα πρότυπα για τον πιεζοηλεκτρισμό. Ο συντελεστής πιεζοηλεκτρικού φορτίου είναι ο λόγος του ηλεκτρικού φορτίου προς την εφαρμοζόμενη δύναμη που προκάλεσε το φορτίο.

Εκφράζεται ως Coulomb/Newton (C/N) και η εξίσωση του είναι:

$$d = \frac{\text{Παραγόμενη ηλεκτρική τάση}}{\text{Εφαρμοζόμενη μηχανική τάση}} \quad (2.1)$$

Με το αντίθετο φαινόμενο η ίδια σταθερά έχει το αντίστοιχο ρόλο, οπότε η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

$$d = \frac{\text{Παραγόμενη μηχανική τάση}}{\text{Εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση}} \quad (2.2)$$

Το τετράγωνο της σταθεράς σύζευξης ορίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης μηχανικής ενέργειας στο σύστημα ως προς την εξαγόμενη ηλεκτρική ενέργεια:

$$k^2 = \frac{\text{Αποθηκευμένη Ηλεκτρική Ενέργεια}}{\text{Εφαρμοζόμενη Μηχανική Ενέργεια}} \quad (2.3)$$

Αντίστοιχα για το άλλο φαινόμενο:

$$k^2 = \frac{\text{Αποθηκευμένη Μηχανική Ενέργεια}}{\text{Εφαρμοζόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια}} \quad (2.4)$$

Οι σταθερές d και k παραπάνω συνήθως αντιπροσωπεύονται ως μεγέθη πινάκων d_{ij} και k_{ij} όπου ο δείκτης i αναφέρεται στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου ή επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου και j στην κατεύθυνση της τάσης ή της παραμόρφωσης. Κατά σύμβαση $i, j = 3$ αντιστοιχεί στην κατεύθυνση πόλων του υλικού, και οι κατευθύνσεις 1,2 και 3 είναι αμοιβαία ορθογώνιες. Οι δείκτες $j = 4, 5$ και 6 χρησιμοποιούνται για τάσεις διάτμησης γύρω από 1,2 και 3 άξονες αντίστοιχα.

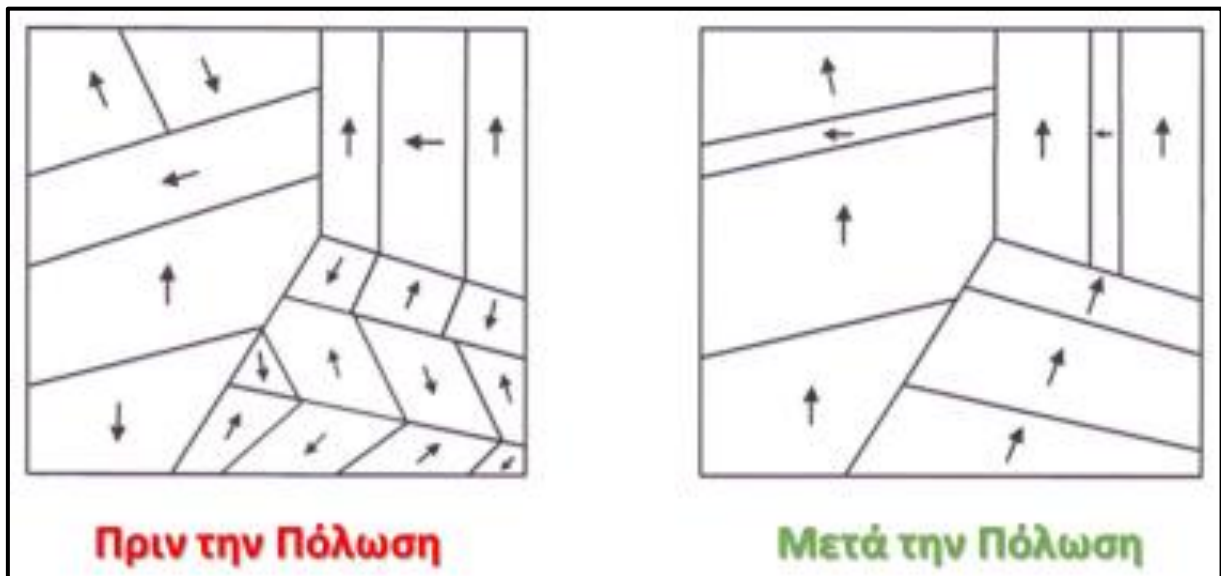
2.1.2 Φυσική σημασία του πιεζοηλεκτρισμού

Πιεζοηλεκτρισμός ονομάζεται η ιδιότητα ορισμένων διηλεκτρικών υλικών να αλλοιώνονται φυσικά στην παρουσία ηλεκτρικού πεδίου ή αντίστροφα, να παράγουν ηλεκτρικού φορτίο όταν υποστούν μηχανική παραμόρφωση. Υπάρχουν πολλά υλικά που παρουσιάζουν αυτό το φαινόμενο σε κάποιο βαθμό, σε αυτά τα υλικά συμπεριλαμβάνονται και οι φυσικοί κρύσταλλοι χαλαζία, τα ημι-κρυσταλλικά πολυμερή πολυβινυλίδια, τα πολυκρυσταλλικά πιεζοκεραμικά, τα οστά και ακόμη και το ξύλο.

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι αποτέλεσμα του αυθόρμητου διαχωρισμού του φορτίου με ορισμένες κρυσταλλικές δομές κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες. Το φαινόμενο της αυθόρμητης πόλωσης προκαλείται από μια μετατόπιση των νεφών ηλεκτρονίων σε σχέση με τα ατομικά τους κέντρα, αυτό σημαίνει μια μετατόπιση θετικών ιόντων σε σχέση με τα αρνητικά ιόντα μέσα στα κρυσταλλικά τους κύτταρα. Το αποτέλεσμα αυτής της κατάστασης είναι η παραγωγή ενός ηλεκτρικού δίπολου.

Ένα από τα πιο ενεργά πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι το πολυκρυσταλλικό κεραμικό, το οποίο αποτελείται από μικροσκοπικούς κρυσταλλίτες τυχαία προσανατολισμένους. Οι κρυσταλλίτες αυτοί χωρίζονται σε μικροσκοπικά τμήματα που έχουν παραπλήσιες διευθετήσεις διπόλων. Ο ακανόνιστος προσανατολισμός των πολικών περιοχών έχει ως αποτέλεσμα έλλειψη πιεζοηλεκτρικής συμπεριφοράς σε κάποιο βαθμό.

Παρόλα αυτά το υλικό είναι πολύ πιθανό να προκληθεί να εμφανίσει μακροσκοπική πόλωση σε οποιαδήποτε δεδομένη κατεύθυνση υποβάλλοντας το σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, όπως στο φαίνεται στην **Εικόνα 2.3**. Αυτού του είδους επαγωγίμα υλικά τα ονομάζουμε σιδηροηλεκτρικά. Η διαδικασία της πόλωσης πραγματοποιείται εφαρμόζοντας ένα πεδίο περίπου 2350 volts/mm (60 V/mil) στα ηλεκτρόδια που είναι εφαρμοσμένα σε εξωτερικές επιφάνειες. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της πόλωσης, το σιδηροηλεκτρικό υλικό θα εξακολουθήσει να είναι πολωμένο έως ότου να εκτοπιστεί από ένα αντίθετο πεδίο ή από αυξημένη θερμοκρασία.



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση μακροσκοπικά της πόλωσης σε πολυκρυσταλλικό πιεζοκεραμικό εφαρμόζοντας ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο σε τυχαίο προσανατολισμό στην δομή.

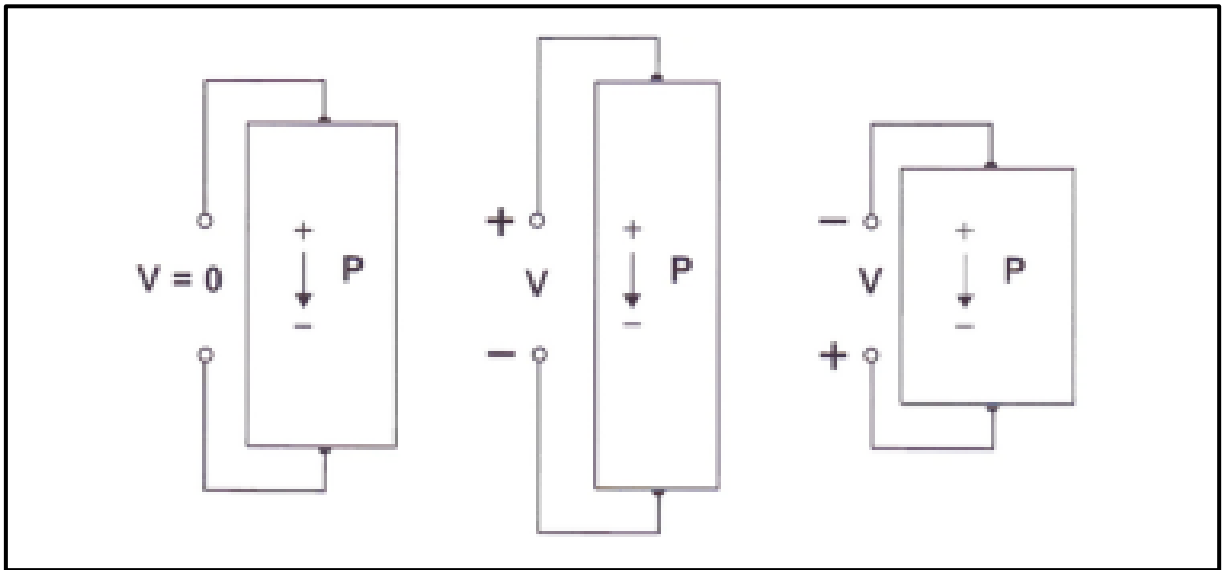
Με την εφαρμογή ηλεκτρικής πόλωσης το υλικό εμφανίζει μόνιμη επιμήκυνση προς την κατεύθυνση του πολικού πεδίου (πολικός άξονας) και συστολή στην εγκάρσια κατεύθυνση. Στη συνέχεια, όταν εφαρμόζεται τάση στο υλικό πόλωσης, αυτό εμφανίζει επιπλέον επιμήκυνση κατά μήκος του πολικού άξονα και εγκάρσια συστολή σύμφωνα με την αναλογία Poisson.

Μόλις η τάση αφαιρεθεί, τότε το υλικό επιστρέφει στις αρχικές του πολικές διαστάσεις. Όταν εφαρμόζεται τάση η οποία είναι αντίθετη από την πολική κατεύθυνση, τότε το υλικό συστέλλεται κατά μήκος του πολικού άξονα και διαστέλλεται στην εγκάρσια διεύθυνση. Και πάλι αφού αφαιρεθεί η τάση τότε επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις. Οι παραμορφώσεις αυτές απεικονίζονται στην **Εικόνα 2.4** για ένα τεμάχιο το οποίο έχει ορθογώνιο σχήμα.

Σε περίπτωση που εφαρμοστεί πολύ μεγάλη τάση προς την κατεύθυνση αποπόλωσης, τότε θα υποβαθμιστεί η αρχική πόλωση. Υπάρχει όμως και η περίπτωση τα ηλεκτρικά δίπολα να αντιστραφούν μερικώς ή πλήρως έως και 180° , με αποτέλεσμα την επαναπόλωση του αντικειμένου προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το μέγιστο πεδίο αποπόλωσης που μπορεί να αντέξει ένα υλικό χωρίς να επηρεαστεί η πόλωση ονομάζεται πεδίο καταναγκασμού.

Όταν ένα φορτίο εφαρμόζεται κατά μήκος του άξονα πόλωσης, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο σώμα που αντιτίθεται στη δύναμη που ασκεί πάνω του. Η θλιπτική τάση παράγει ένα

ηλεκτρικό πεδίο στην ίδια κατεύθυνση με το αρχικό πεδίο πόλωσης, αναγκάζοντας το τμήμα να επιμηκυνθεί έναντι της συμπιεστικής δύναμης.



Εικόνα 2.4: Φυσική παραμόρφωση ορθογώνιου πιεζοηλεκτρικού κομματιού, υπό την επιρροή του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Όταν αφαιρεθεί η τάση, τα κομμάτια επανέρχονται στις αρχικές τους διαστάσεις. Η τάση εφελκυσμού παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο που έχει κατεύθυνση αντίθετη από αυτήν του αρχικού πεδίου. Αυτά τα ηλεκτρικά πεδία είναι απεικονισμένα στην **Εικόνα 2.4** για ένα τμήμα ορθογώνιου σχήματος.

2.2 Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία

2.2.1 Διαθέσιμα Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία

Τα μονοκρυσταλλικά υλικά όπως ο χαλαζίας εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπως ο έλεγχος συχνότητας και συσκευές επιφανειακών ακουστικών κυμάτων. Ωστόσο, η χρήση τους σε άλλες εφαρμογές μειώθηκε γρήγορα μετά την ανάπτυξη πολυκρυσταλλικών κεραμικών όπως το τιτανικό βάριο τη δεκαετία του 1940 και ο τιτανικός ζirkονικός μολύβδος (PZT) στη δεκαετία του 1950.

Από τη δεκαετία του 1950 το PZT έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό το τιτανικό βάριο λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας Curie και της υψηλότερης απόδοσης. Τα πολυκρυσταλλικά κεραμικά είναι λιγότερο ακριβά, ευκολότερα στη μηχανική επεξεργασία και κατασκευάζονται σε ένα ευρύ φάσμα σχημάτων και μεγεθών.

Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε τις ιδιότητες του τιτανικού ζirkονικού μολύβδου, το οποίο έχει γίνει η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη σύνθεση υλικού σε ηχοβολείς, επενεργητές και έξυπνες κατασκευές. Συζητούνται επίσης συνθέσεις τιτανικού μολύβδου (PT) και Νιοβικού μαγνησίου - Τιτανικού μολύβδου (PMN-PT).

2.2.1.1 Lead Zirconate Titanate (PZT)

Τα υλικά PZT είναι διαθέσιμα σε μεγάλη ποικιλία συνθέσεων που είναι βελτιστοποιημένα για διαφορετικές εφαρμογές. Το PZT είναι ένα μείγμα ζirkονικού μολύβδου και τιτανικού

μολύβδου, έχει τη δομή περοβοσκίτη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα πρόσθετα και αναλογίες Ti/Zr, για την παραγωγή υλικού που έχει μία ή περισσότερες επιθυμητές ιδιότητες. Όπως υψηλή πιεζοηλεκτρική δραστηριότητα, χαμηλή απώλεια ή σταθερότητα σε θερμοκρασία και χρόνο.

Τα κεραμικά PZT συχνά ταξινομούνται ως «σκληρά» ή «μαλακά», σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους. Οι προσμίξεις που προκαλούν σκληρυντικό αποτέλεσμα είναι δέκτες ενώ αυτές που προκαλούν μαλάκωμα είναι δότες.

Οι ανισοροπίες φόρτισης που προκαλούνται από δότες ή αποδέκτες αναπληρώνονται από τις κενές θέσεις σε τοποθεσίες Pb ή Zr-Ti, στην περίπτωση των δωρητών και στις τοποθεσίες οξυγόνου στην περίπτωση των αποδεκτών. Το υψηλό πεδίο καταναγκασμού του σκληρού PZT οφείλεται εν μέρει στην παρουσία ενός εσωτερικού πεδίου.

Το εσωτερικό πεδίο επιτρέπει τη χρήση υψηλότερου εξωτερικά εφαρμοζόμενου πλάτους ηλεκτρικού πεδίου, χωρίς απώλειες που προκαλούνται από την εκπόλωση. Σε συσκευές περιορισμένου πεδίου, όπως σόναρ υψηλής ισχύος, αυτό μπορεί να αντισταθμίσει το μειονέκτημα των χαμηλότερων πιεζοηλεκτρικών σταθερών d .

Μια νέα εσωτερικά πολωμένη σύνθεση PZT που αναπτύχθηκε έχει υψηλό εσωτερικό πεδίο πόλωσης αλλά με μικρότερη υποβάθμιση των πιεζοηλεκτρικών σταθερών d από ό,τι συμβαίνει σε άλλες σκληρές συνθέσεις PZT.

2.2.1.2 *Lead Titanate*

Οι συνθέσεις τιτανικού μολύβδου έχουν αναπτυχθεί για την επίτευξη πολύ υψηλής ανισοτροπίας στις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτές οι συνθέσεις χρησιμοποιούνται συχνότερα σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητο να εξαιρεθούν οι παρεμβολές από τις ακτινικές λειτουργίες.

Ενώ ο καθαρός τιτανικός μολύβδος έχει την υψηλότερη θερμοκρασία Curie γνωστή για τα φεροηλεκτρικά περοβοσκίτη, οι προσθήκες ακαθαρσιών που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εμπορικές συνθέσεις υψηλής ανισοτροπίας μειώνουν την θερμοκρασία μετάβασης σε τιμές συγκρίσιμες με τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά.

2.2.1.3 *Lead Magnesium Niobate – Lead Titanate (PMN-PT)*

Το PMN-PT είναι ένας χαλαρωτικός περοβοσκίτης που εμφανίζει χαμηλή υστέρηση και υψηλή τάση κοντά σε μια διάχυτη σιδηροηλεκτρική μετάβαση. Στην πιο συχνά χρησιμοποιούμενη σύνθεση, το PMN-PT, είναι ένα ηλεκτροσυστολικό υλικό που έχει εξάρτηση τετραγωνικού νόμου μεταξύ της παραμόρφωσης και του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

2.2.2 Κριτήρια Διαλογής Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε πρώτα τις κύριες διαμορφώσεις επενεργητών που μπορούν να πραγματοποιηθούν με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών, με έμφαση στις περιοχές της δύναμης και μετατόπισης που μπορούν να επιτευχθούν. Ακολουθούν οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών και του κριτηρίου επιλογής υλικού για τις συσκευές επενέργειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση καθώς και για επενέργηση, είναι πιο συνηθισμένη αυτή τη στιγμή να χρησιμοποιούνται εναλλακτικές τεχνολογίες ανίχνευσης όπως μετρητές τάσης, χωρητικοί αισθητήρες ή οπτικοί αισθητήρες σε συστήματα έξυπνων κατασκευών. Αυτό οφείλεται στη μηχανική φόρτιση, τη μη γραμμικότητα και άλλους παράγοντες που ευνοούν επί του παρόντος τις τελευταίες τεχνολογίες.

Ωστόσο, αυτή η κατάσταση μπορεί να αλλάξει στο μέλλον με την εφαρμογή τεχνικών αυτοανίχνευσης στις οποίες το σήμα αίσθησης εξάγεται από το σήμα πιεζοηλεκτρικής επενέργησης, χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μη γραμμικό μοντέλο. Αλλά για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, εστιάζουμε στο στοιχείο επενέργησης της τεχνολογίας έξυπνης κατασκευής και απλώς υποθέτουμε ότι ένα σήμα ανάδρασης, για σκοπούς ελέγχου, θα είναι διαθέσιμο με τα καταλληλότερα μέσα.

Για λειτουργία χαμηλής συχνότητας, κεραμικά με μεγάλες πιεζοηλεκτρικές σταθερές d , όπως το Navy Type VI, προτιμώνται για εφαρμογές επενεργητών σε έξυπνες κατασκευές. Ωστόσο, όταν απαιτείται επίσης σταθερότητα θερμοκρασίας, το Navy Type II, με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία Curie, είναι η καλύτερη επιλογή.

Μπορεί επίσης να εξεταστεί το ηλεκτρικό PMN-PT για εφαρμογές χαμηλής συχνότητας. Ωστόσο, αυτό το υλικό είναι ευαίσθητο στη θερμοκρασία, ακόμη περισσότερο από το Navy Type VI. Για υψηλότερες συχνότητες, η υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά των μαλακότερων κεραμικών PZT μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες.

Αυτό ισχύει επίσης για το PMN-PT, το οποίο έχει εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία διηλεκτρική σταθερά. Τα σκληρότερα κεραμικά PZT μπορούν να οδηγηθούν με υψηλότερη συχνότητα και μεγαλύτερο εύρος ηλεκτρικού πεδίου, τόσο από την άποψη των περιορισμών της παροχής ρεύματος όσο και από την άποψη της εφαπτομένης διηλεκτρικής απώλειας και της εσωτερικής θέρμανσης.

Η μικρότερη εφαπτομένη διηλεκτρική απώλεια των σκληρών κεραμικών PZT, συνδέεται με μικρότερη υστέρηση στους βρόχους πόλωσης. Αυτό με τη σειρά του αντανακλάται σε μικρότερη υστέρηση, σε βρόχους καταπόνησης έναντι πεδίου, κάτι που είναι ευεργετικό για την υψηλή ακρίβεια τοποθέτησης, τόσο υπό έλεγχο ανοιχτού βρόχου όσο και υπό έλεγχο κλειστού βρόχου.

Ωστόσο, η μοντελοποίηση υστέρησης μπορεί να ενσωματωθεί σε έναν ελεγκτή κλειστού βρόχου για να επιτευχθεί με υψηλή ακρίβεια, ακόμη για υλικά με μαλακά κεραμικά.

2.3 Δομή Των Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

Αυτό το υλικό παρουσιάζει επίσης το αντίθετο αποτέλεσμα της μηχανικής παραμόρφωσης υπό την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Τα άμεσα και αντίστροφα πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα μπορούν να εκφραστούν με συμβολισμό τανυστή ως:

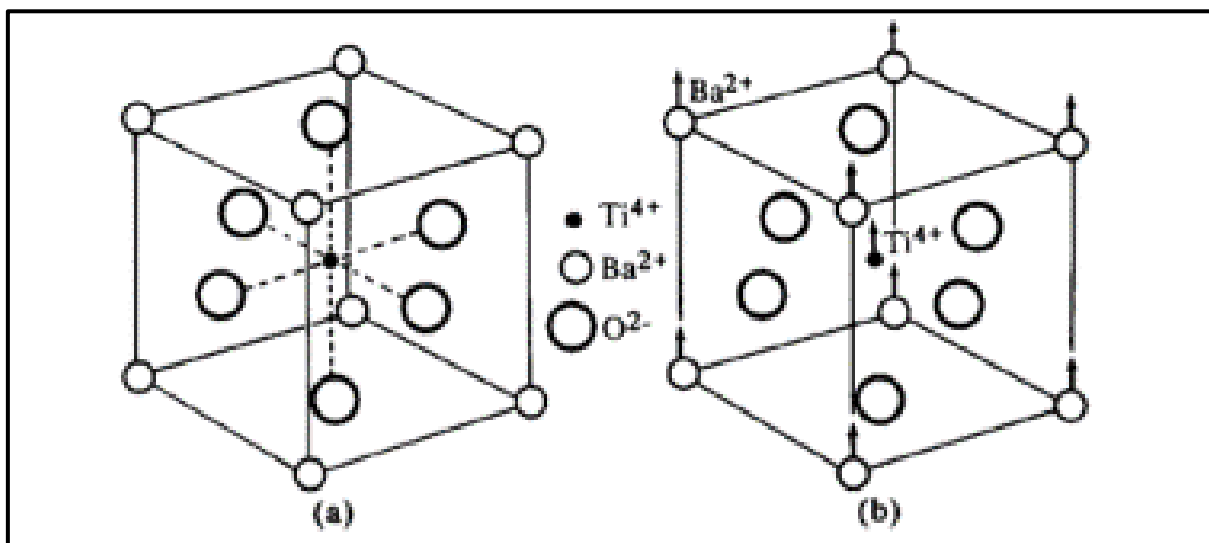
$$P_i = d_{ijk}\sigma_{jk} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_{ij} = d_{kij} E_k \tag{2.6}$$

όπου P_i είναι η πόλωση που παράγεται κατά μήκος του άξονα i ως απόκριση της εφαρμοζόμενης τάσης σ_{jk} και d_{kij} είναι ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής. Για την αντίστροφη επίδραση, ϵ_{ij} είναι η παραμόρφωση που παράγεται σε μια συγκεκριμένα προσανατολισμένη κρυστάλλινη δομή με την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου E_k κατά μήκος του άξονα k .

Η προέλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σχετίζεται με την ασυμμετρία της κυτταρικής μονάδας. Ως αποτέλεσμα, η μηχανική καταπόνηση δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δίπολο. Σύμφωνα με την κρυσταλλική δομή που περιγράφεται από το μοναδιαίο κελί Bravais των κρυστάλλων, τα χιλιάδες κρυστάλλια στη φύση μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 230 μικροσκοπικούς τύπους συμμετρίας ή ομάδες χώρου βάσει των στοιχείων συμμετρίας. Ένας κρύσταλλος που εκδηλώνει αυτόματη πόλωση μπορεί να απεικονιστεί ότι αποτελείται από αρνητικά και θετικά ιόντα.

Σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας, τα ιόντα αυτά βρίσκονται στην κατάσταση ισορροπίας τους, στην οποία η ελεύθερη ενέργεια του κρυστάλλου είναι ελάχιστη και το κέντρο του θετικού φορτίου δεν συμπίπτει με το κέντρο της αρνητικής εκφόρτισης. Στην **Εικόνα 2.5** έχει ως παράδειγμα την κρυσταλλική δομή του τιτανικού βαρίου.



Εικόνα 2.5: Κρυσταλλική δομή του περβοσκήτη βαρίου τιτανίου. (α) Πάνω από την θερμοκρασία Curie το κελί είναι τετράγωνο. (β) κάτω από την θερμοκρασία Curie η δομή του κελιού είναι τετράγωνη με τα ιόντα βαρίου και τιτανίου να αντικαθίστανται με σχετικά ιόντα διοξειδίου.

Με αυτό τον τρόπο, μπορεί κανείς να απεικονίσει κάθε ζεύγος θετικών και αρνητικών ιόντων σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο και την αυθόρμητη πόλωση σαν αποτέλεσμα της συσσώρευσης αυτών των διπόλων προς την ίδια κατεύθυνση. Εάν η τιμή της αυθόρμητης πόλωσης P_s εξαρτάται από τη θερμοκρασία, μιλάμε για το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο.

Οι θερμοηλεκτρικοί κρύσταλλοι εμφανίζουν P_s σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας. Εάν το μέγεθος και η κατεύθυνση του P_s μπορούν να αντιστραφούν από ένα εξωτερικό πεδίο, τότε αυτοί οι κρύσταλλοι ονομάζονται σιδηροηλεκτρικοί.

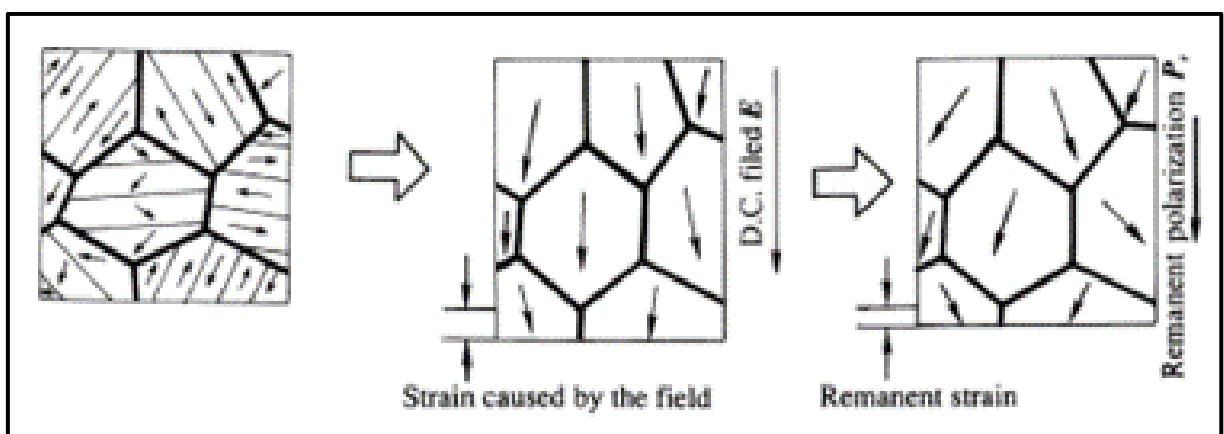
Οι σιδηροηλεκτρικοί κρύσταλλοι με ομοιόμορφες πολικές περιοχές ονομάζονται σιδηροηλεκτρικές περιοχές. Μέσα σε ένα πεδίο, όλα τα ηλεκτρικά δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα προς την ίδια κατεύθυνση. Μπορεί να υπάρχουν πολλαπλοί τομείς σε έναν κρύσταλλο που χωρίζονται από όρια που ονομάζονται τοιχώματα τομέα. Οι γειτονικές περιοχές μπορούν να έχουν τα διανύσματα πόλωσης τους σε κατευθύνσεις που είναι αντιπαράλληλες ή κάθετες μεταξύ τους.

Επομένως, το όριο μεταξύ αυτών των περιοχών ονομάζεται τοίχωμα τομέα 180° ή 90° . Ένας μεμονωμένος σιδηροηλεκτρικός κρύσταλλος, όταν αναπτύσσεται, έχει πολλαπλούς σιδηροηλεκτρικούς τομείς. Μια μεμονωμένη τομή μπορεί να προκύψει από την κίνηση ενός τοίχου τομής του πεδίου που γίνεται δυνατή με την εφαρμογή ενός επαρκώς υψηλού ηλεκτρικού πεδίου, διαδικασία που είναι γνωστή ως πόλωση. Η πόλωση είναι πολύ σημαντική για πολυκρυσταλλικές σιδηροηλεκτρικές κεραμικές εφαρμογές.

Τα σιδηροηλεκτρικά κεραμικά δεν έχουν πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των σιδηροηλεκτρικών περιοχών στο κεραμικό πριν από την πόλωση. Κατά τη διάρκεια της πόλωσης, ένα ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς ρεύματος εφαρμόζεται στο σιδηροηλεκτρικό κεραμικό δείγμα για να αναγκάσει τις περιοχές να προσανατολιστούν ή να πολωθούν.

Παρόλο που οι τομείς δεν μπορούν να ευθυγραμμιστούν τέλεια με το πεδίο εκτός εάν ο κόκκος ή ο κρύσταλλος είναι προσανατολισμένος ώστε να συμπίπτει με τον άξονα c ή a στην κατεύθυνση του πεδίου, τα διανύσματα πόλωσης τους μπορούν να ευθυγραμμιστούν για να μεγιστοποιήσουν τη συνιστώσα που αναπτύσσεται προς την κατεύθυνση του πεδίου.

Μετά την πόλωση, το ηλεκτρικό πεδίο αφαιρείται και η υπολειπόμενη πόλωση και η υπολειπόμενη τάση διατηρούνται στο δείγμα και το δείγμα παρουσιάζει πιεζοηλεκτρισμό. Μια απλή απεικόνιση της διαδικασίας πόλωσης φαίνεται στην **Εικόνα 2.6**. Αλλά ένα πολύ ισχυρό πεδίο μπορεί να οδηγήσει σε αντίστροφη πόλωση στον τομέα, γνωστή ως μετάβαση τομέα.



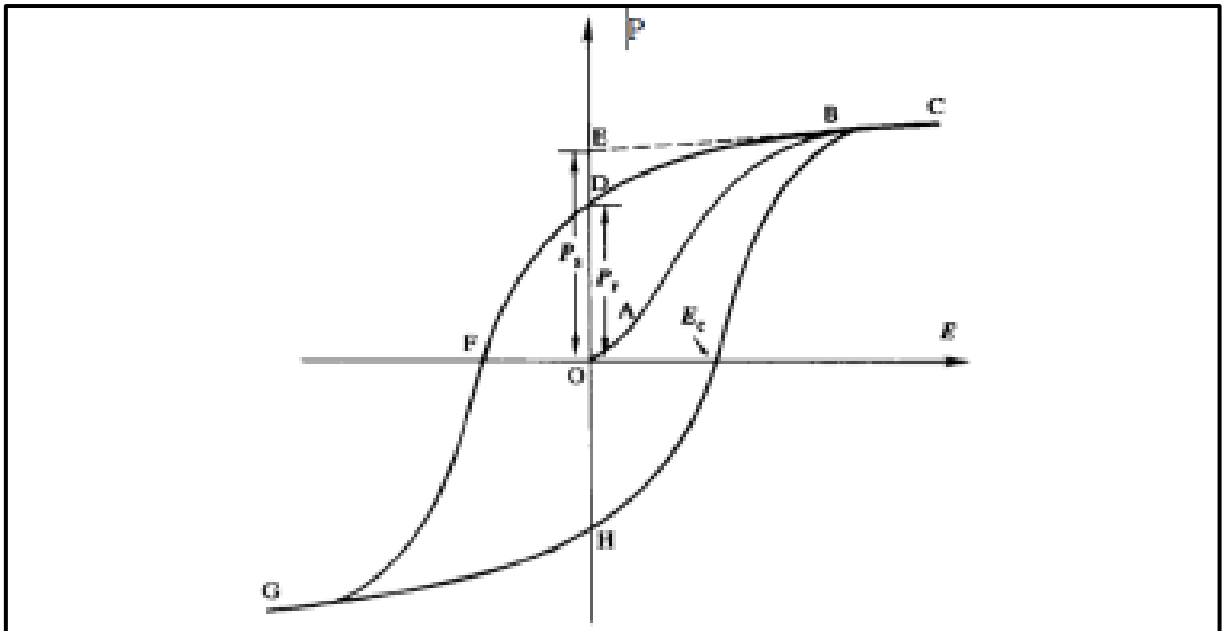
Εικόνα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της πόλωσης.

Η συνέπεια της αντίστασης που προκαλείται από την αλλαγή τομέα είναι ότι η πόλωση στο σιδηροηλεκτρικό καθυστερεί, και αυτό αποτελεί μια ακόμη σημαντική ιδιότητα των σιδηροηλεκτρικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα η πόλωση P είναι μια συνάρτηση διπλής τιμής

του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου E , και επομένως δεν μπορεί να αντιστραφεί ακριβώς με το πεδίο.

Στην **Εικόνα 2.7** παρουσιάζεται ένας βρόχος σιδηροηλεκτρικής υστέρησης. Όταν εφαρμόζεται ένα μικροηλεκτρικό πεδίο, παρατηρείται μόνο μια γραμμική σχέση μεταξύ P και E , διότι το πεδίο δεν είναι αρκετά ισχυρό για να μετατρέψει κάποιον τομέα και το κρύσταλλο θα συμπεριφερθεί σαν ένα κανονικό διηλεκτρικό υλικό.

Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί στο τμήμα OA των καμπυλών στην **Εικόνα 2.7**. Καθώς το ρεύμα αυξάνεται, ορισμένες αρνητικές περιοχές, οι οποίες είναι πολωμένες ενάντια στην κατεύθυνση του πεδίου, θα μετατοπιστούν στην θετική κατεύθυνση κατά μήκος του πεδίου και η κατεύθυνση των περιοχών αρχίζει να λαμβάνει χώρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα έντονα αυξανόμενο P με ένα αυξανόμενο πεδίο E και η πόλωση θα αυξηθεί γρήγορα (τμήμα AB) έως ότου όλοι οι τομείς να ευθυγραμμιστούν στη θετική κατεύθυνση (τμήμα BC)



Εικόνα 2.7: Μια τυπική P - E λούπα υστέρησης στα φεροηλεκτρικά.

Αυτή είναι μια κατάσταση κορεσμού όπου ο κρύσταλλος αποτελείται από ένα μόνο πεδίο. Καθώς η ένταση του πεδίου μειώνεται, η μετατόπιση συνήθως μειώνεται αλλά δεν επιστρέφει στο μηδέν (σημείο D στην **Εικόνα 2.7**). Όταν το πεδίο πέσει στο μηδέν, ορισμένοι τομείς εξακολουθούν να είναι ευθυγραμμισμένοι προς τη θετική κατεύθυνση και ο κρύσταλλος θα παρουσιάσει υπολειπόμενες μετατοπίσεις P_r .

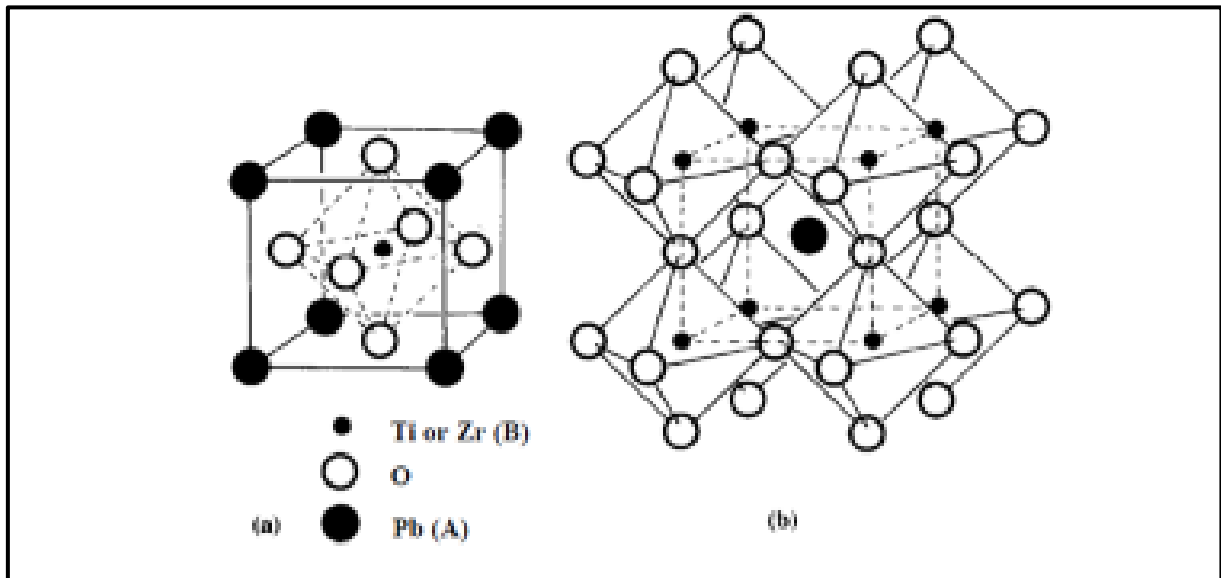
Η παρέκταση του ευθύγραμμου τμήματος BC της καμπύλης προς τον άξονα πόλωσης (στο σημείο E) αντιπροσωπεύει την τιμή της αυθόρμητης πόλωσης P_s . Η υπολειπόμενη πόλωση του P_r στον κρύσταλλο μπορεί να εξαλειφθεί μόνο όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο στην αντίθετη κατεύθυνση φτάσει σε κάποια τιμή a (στο σημείο F).

Η ισχύς του πεδίου που απαιτείται για τη μείωση της πόλωσης P στο μηδέν ονομάζεται ένταση πεδίου εξαναγκασμού E_c . Επιπρόσθετα, η αύξηση του πεδίου προς την αρνητική κατεύθυνση

θα προκαλέσει μια πλήρη ευθυγράμμιση των δίπολων προς αυτή την κατεύθυνση και ο κύκλος μπορεί να ολοκληρωθεί αντιστρέφοντας την κατεύθυνση του πεδίου για άλλη μια φορά.

2.3.1 Δομή Περοβοσκίτη

Το PZT είναι η φάση στερεού διαλύματος του δυαδικού συστήματος $x\text{PbZrO}_3-(1-x)\text{PbTiO}_3$ ($0 < x < 100$). Ο χημικός τύπος του είναι $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. Το PZT έχει δομή περοβοσκίτη με άτομα τιτανίου και ζirkονίου που καταλαμβάνουν τυχαίες θέσεις A-, και άτομα μόλυβδου που βρίσκονται στις γωνίες της μονάδας κυψέλης με άτομα οξυγόνου που βρίσκονται στα επιφανειακά κέντρα **Εικόνα 2.8**.



Εικόνα 2.8: Βασική δομή πιεζοηλεκτρικού περοβοσκίτη. Η βασική δομή της μονάδας είναι τετράγωνη.

Και τα ιόντα μόλυβδου και οξυγόνου έχουν ακτίνες περίπου 0.14 nm. Μαζί σχηματίζουν ένα προσωποκεντρικό κυβικό πλέγμα, το οποίο έχει μια παράμετρο πλέγματος κοντά στο 0.4 nm. Τα ιόντα τιτανίου ή ψευδάργυρου με οκταεδρικό συντονισμό βρίσκονται στο κέντρο της μοναδικής κυψέλης.

2.4 Χρήση των Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

2.4.1 Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές

Οι τυπικοί επενεργητές αποτελούνται από πιεζοκεραμικά, μαγνητοσυστολικά, ηλεκτροσυστολικά και κράματα μνήμης-σχήματος. Αυτά συνήθως μετατρέπουν τις ηλεκτρικές / μαγνητικές / θερμικές εισόδους σε τάση / μετατόπιση επενέργησης που μεταδίδεται στη δομή του ξενιστή, επηρεάζοντας τη μηχανική του κατάσταση. Τα πιεζοηλεκτρικά και τα ηλεκτροσυστολικά είναι διαθέσιμα ως κεραμικά, ενώ τα μαγνητοσυστολικά και τα κράματα μνήμης σχήματος είναι διαθέσιμα ως κράματα μετάλλων.

Τα πιεζοηλεκτρικά είναι επίσης διαθέσιμα σε πολυμερή μορφή ως λεπτό μαλακό φιλμ. Σημαντικές παράμετροι απόδοσης των επενεργητών περιλαμβάνουν τη μέγιστη διαδρομή, τη μέγιστη μπλοκαρισμένη δύναμη, την ακαμψία και το εύρος ζώνης. Κάπως λιγότερο σημαντικές παράμετροι περιλαμβάνουν τη γραμμικότητα, την ευαισθησία στη θερμοκρασία, την ευθραυστότητα και την αντοχή σε θραύση, επαναληψιμότητα, αξιοπιστία, παραγωγή θερμότητας, απαίτηση πεδίου και απόδοση.

Το επαγόμενο στέλεχος αντιμετωπίζεται συχνά σαν θερμική καταπόνηση. Η συνολική καταπόνηση στον επενεργητή, θεωρείται ότι είναι το άθροισμα της μηχανικής καταπόνησης που προκαλείται από την τάση, συν την επαγόμενη τάση που προκαλείται από το ηλεκτρικό πεδίο. Η καταπόνηση στη δομή του ξενιστή λαμβάνεται με τον καθορισμό της μετατόπισης, μεταξύ του υλικού ξενιστή και του επενεργητή. Σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, τα δίπολα του υλικού προσπαθούν να προσανατολιστούν κατά μήκος του πεδίου, προκαλώντας καταπόνηση στο υλικό.



Εικόνα 2.9: Διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές.

Αυτή η σχέση καταπόνησης έναντι τάσης είναι γραμμική στην πρώτη τάξη. Σε ένα ηλεκτροσυστολικό υλικό, υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου και των ηλεκτρικών διπόλων, η οποία είναι εγγενώς μη γραμμική. Η μαγνητοσυστολική απόκριση βασίζεται στη σύζευξη μαγνητικού πεδίου και μαγνητικών διπόλων στο υλικό, και πάλι είναι μη γραμμικό φαινόμενο. Τα κράματα μνήμης-σχήματος είναι αποτέλεσμα μετασχηματισμού φάσης λόγω αλλαγής θερμοκρασίας του υλικού. Ο μετασχηματισμός φάσης είναι σε μεγάλο βαθμό ένα μη γραμμικό φαινόμενο.

Το πολυβινυλιδενοφθορίδιο (PVDF) είναι ένα πολυμερές πιεζοηλεκτρικό φιλμ και το μέγιστο στέλεχος ενεργοποίησής του είναι περίπου επτακόσια μικροστελέχη. Ένα κοινό κεραμικό ηλεκτροσυστολικό υλικό είναι το νιοβικό μαγνησίου μολύβδου (PMN) και το μέγιστο στέλεχος ενεργοποίησής του είναι περίπου χίλια μικροστελέχη.

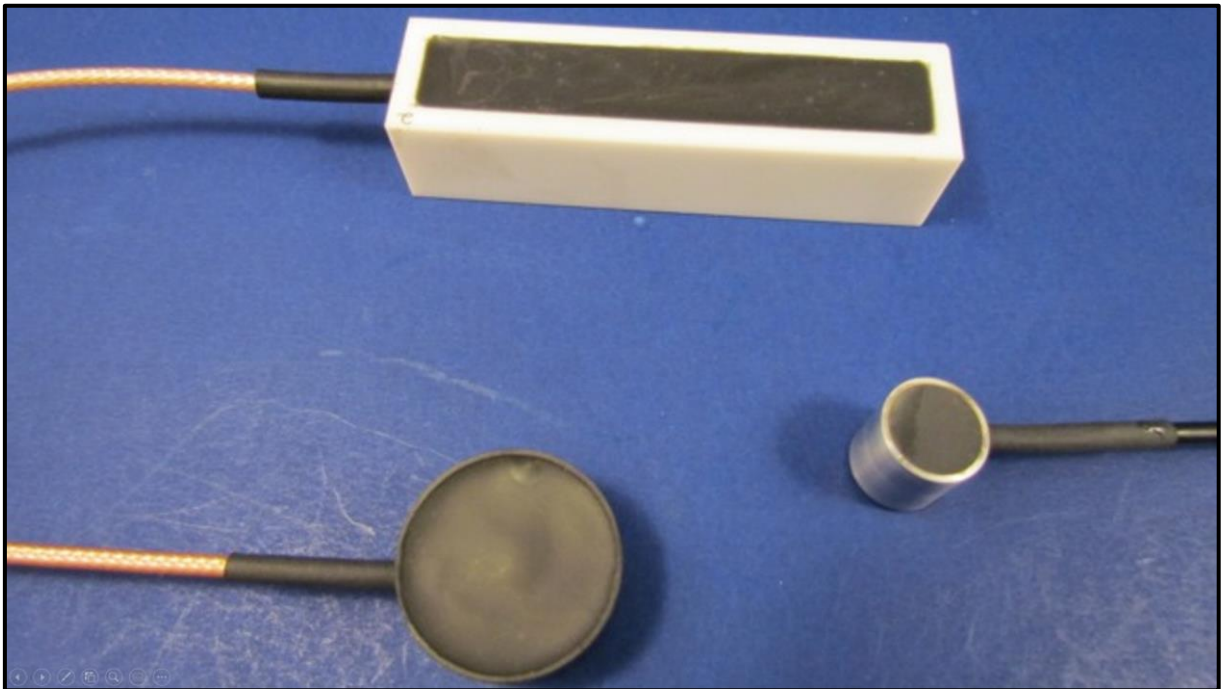
Τα PZT και PMN διατίθενται με τη μορφή λεπτών φύλλων, τα οποία μπορούν είτε να συγκολληθούν είτε να ενσωματωθούν σε μια δομή. Τα PZT απαιτούν αρχική πόλωση ενώ δεν απαιτείται τέτοια πόλωση για PMN. Η τερφενόλη, ένα υλικό σπάνιων γαιών, μπορεί να δημιουργήσει ένα μέγιστο στέλεχος επενέργησης περίπου δύο χιλιάδων μικροστελεχών.

Χρειάζεται ένα μεγάλο μαγνητικό πεδίο στην αξονική κατεύθυνση για να προκαλέσει αυτή την τάση επενέργησης.

2.4.2 Πιεζοηλεκτρικοί Αισθητήρες

Οι τυπικοί αισθητήρες αποτελούνται από μετρητές καταπόνησης, επιταχυνσιόμετρα, οπτικές ίνες, πιεζοηλεκτρικά φιλμ και πιεζοκεραμικά. Οι αισθητήρες μετατρέπουν την καταπόνηση ή τη μετατόπιση σε ηλεκτρικό πεδίο. Η αντίσταση και οι μετρητές καταπόνησης ημιαγωγών εξαρτώνται από μια αλλαγή αντίστασης λόγω της τάσης και απαιτούν ένα πεδίο διέγερσης συνεχούς ρεύματος για μέτρηση.

Τα πιεζοκεραμικά και τα πιεζοφίλμ βασίζονται στη διακύμανση του πιεζοηλεκτρικού φορτίου, που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της αλλαγής της τάσης και δεν απαιτούν εξωτερικό πεδίο. Οι μετρητές οπτικών ινών βασίζονται σε ένα φαινόμενο μηχανικής/οπτικής σύζευξης όπου η έξοδος εκφράζεται ως η υστέρηση φάσης ενός μονοχρωματικού κύματος που διέρχεται από την ίνα ως αποτέλεσμα της καταπόνησης.



Εικόνα 2.10: Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες διαφόρων μεγεθών.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες καταπόνησης είναι γενικά κατασκευασμένοι από πολυμερή υλικά όπως το PVDF και είναι πολύ εύκαμπτοι. Μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν σε πολύ λεπτά φύλλα και να κολληθούν σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Βασικοί παράγοντες για τους αισθητήρες είναι η ευαισθησία τους στην καταπόνηση ή τη μετατόπιση, το εύρος ζώνης και το μέγεθος.

Άλλοι λιγότερο σημαντικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την ευαισθησία στην θερμοκρασία, τη γραμμικότητα, την υστέρηση, την επαναληψιμότητα, την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, την ενσωμάτωση και τα ηλεκτρονικά. Συνήθως, η ευαισθησία για ένα μετρητή αντίστασης είναι περίπου 30V ανά καταπόνηση. για ένα μετρητή ημιαγωγών, είναι HP volt ανά στέλεχος, και για πιεζοκεραμικούς μετρητές, είναι 104 V ανά στέλεχος.

Η ευαισθησία των αισθητήρων οπτικών ινών ορίζεται διαφορετικά και είναι περίπου 106 μοίρες ανά στέλεχος. Τα σχετικά ηλεκτρονικά μπορεί να βαρύνουν τους αισθητήρες οπτικών ινών. Αισθητήρες διακριτού σχήματος που εφαρμόζουν στάθμιση στην έξοδο των αισθητήρων μπορούν να βοηθήσουν στην αύξηση της ευαισθησίας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να μεγεθύνει την καταπόνηση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας.

2.4.3 Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές-Αισθητήρες

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ίδια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα ως επενεργητής και ως αισθητήρας. Αυτό αναφέρεται ως ενεργοποίηση αυτοανίχνευσης και μπορεί να κατέχει μεγάλο πλεονέκτημα για εφαρμογές ενεργού ελέγχου, επειδή οι ενέργειες επενέργησης και ανίχνευσης συνενώνονται τέλεια.

Για παράδειγμα, το πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορεί να θεωρηθεί ως μετασχηματιστής μεταξύ των δομικών καταστάσεων και των ηλεκτρικών καταστάσεων. Ένας πιεζοηλεκτρικός αυτοαισθητήρας επενεργητής μπορεί να δημιουργηθεί με την ενσωμάτωση δύο πανομοιότυπων πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε ένα κύκλωμα γέφυρας. Ο στόχος είναι να εντοπιστεί η διαφορά στις συνιστώσες του φορτίου που δημιουργούνται από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο και τη μηχανική καταπόνηση.

Η δύναμη επενέργησης μπορεί να έχει τη μορφή δύναμης, ροπής ή κατανεμημένης τάσης και η αίσθηση μπορεί να έχει τη μορφή μετατόπισης, κλίσης, τάσης και των παραγώγων τους. Για παράδειγμα, η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση είναι τρία ξεχωριστά στοιχεία εξόδου. Ως εκ τούτου, μπορεί να υπάρχουν συνολικά εννέα εξοδοί του αισθητήρα και τρία εξαρτήματα εισόδου δύναμης.

Ο Gupta περιέγραψε έξι κριτήρια για τη βέλτιστη τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών επενεργητών και αισθητήρων και αυτά περιλάμβαναν:

- ❖ Μεγιστοποίηση τοπικών δυνάμεων/στιγμών
- ❖ Μεγιστοποίηση της δομής του ξενιστή
- ❖ Ελαχιστοποίηση της προσπάθειας ελέγχου
- ❖ Μεγιστοποίηση του βαθμού ελέγχου
- ❖ Μεγιστοποίηση παρατηρητικότητας
- ❖ Ελαχιστοποίηση της διαρροής

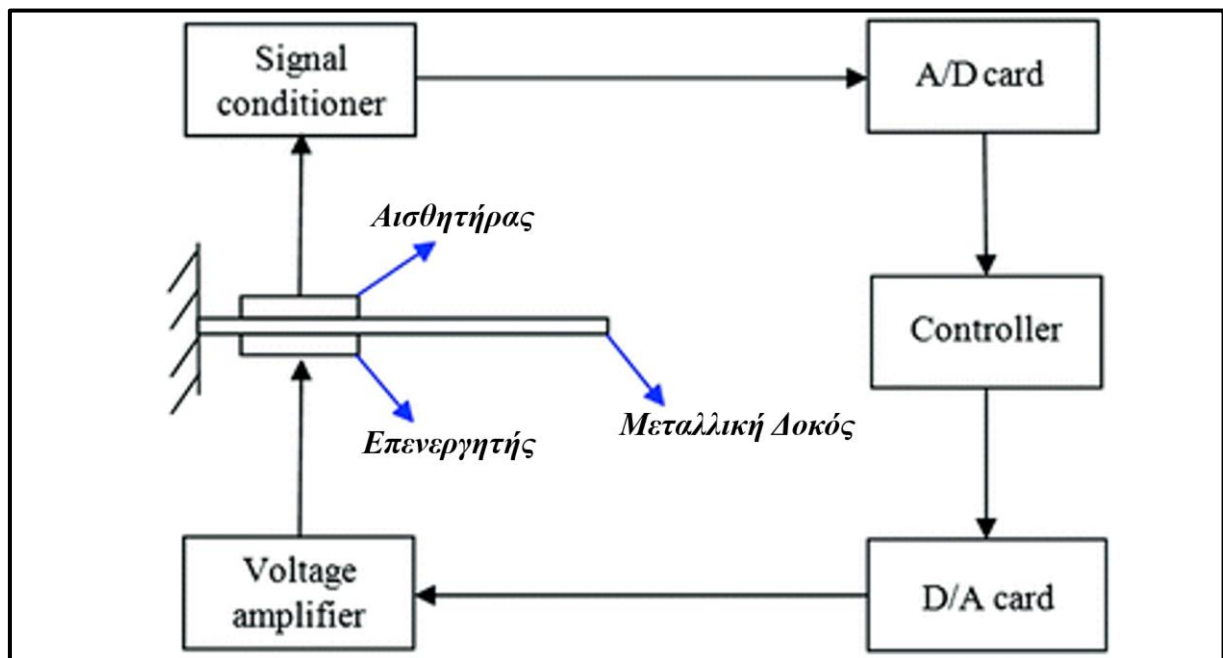
Είναι σημαντικό να τοποθετούνται οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές στην περιοχή όπου οι μέσες παραμορφώσεις είναι υψηλότερες, γεγονός που θα είχε ως αποτέλεσμα μέγιστες τοπικές δυνάμεις/ροπές.

Η τοποθέτηση επενεργητών στους κόμβους έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη απόκλιση. Συνιστάται η τοποθέτηση αισθητήρων σε σημεία όπου η παρατηρητικότητα μπορεί να μεγιστοποιηθεί. Οι οριακές συνθήκες παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη βέλτιστη τοποθέτηση επενεργητών και αισθητήρων.

2.5 Μέθοδοι Ελέγχου Πιεζοηλεκτρικών

Για τις εφαρμογές των έξυπνων υλικών, η σωστή μέθοδος ελέγχου αποτελεί το κλειδί της επιτυχίας στην ορθή λειτουργία του εκάστοτε συστήματος. Υπάρχουν τρία κύρια επίπεδα στρατηγικής ελέγχου, ο τοπικός έλεγχος, ο γενικός έλεγχος και οι υψηλές γνωστικές λειτουργίες.

- Στον τοπικό έλεγχο, οι στόχοι μπορεί να αφορούν στην αύξηση της απόσβεσης, στην απορρόφηση ενέργειας και στην μείωση των τοπικών μετατοπίσεων.
- Οι στόχοι του γενικού ελέγχου, αφορούν στην σταθεροποίηση της δομικής απόκρισης, στον έλεγχο του σχήματος και στην ελαχιστοποίηση των διαταραχών.
- Οι στόχοι των γνωστικών λειτουργιών θα μπορούσαν να είναι η ικανότητα διάγνωσης αστοχίας εξαρτημάτων και επαναδιαμόρφωσης και προσαρμογής μετά από βλάβες.



Εικόνα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση του ελέγχου κλειστού βρόχου, μια δοκού με πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές και αισθητήρες.

Στην περίπτωση ενός συστήματος με μία είσοδο και μία έξοδο, ο τοπικός έλεγχος μπορεί να δημιουργηθεί μέσω μιας λειτουργίας μεταφοράς. Η φάση και το πλάτος της επενεργήσης εισόδου προσαρμόζονται για να ελαχιστοποιηθεί η μεμονωμένη έξοδος. Ο τοπικός έλεγχος χρησιμοποιείται για την προσθήκη απόσβεσης και για έλεγχο χαμηλής ισχύος.

Για τον γενικό έλεγχο, υπάρχουν αρκετές περιοριστικές περιπτώσεις καταναμημένου ελέγχου. Ο πρώτος είναι ένας κεντρικός ελεγκτής στον οποίο η έξοδος από όλους τους αισθητήρες υποβάλλεται σε επεξεργασία από έναν κεντρικό επεξεργαστή, που παρέχει εξόδους ελέγχου στους καταναμημένους επενεργητές. Ο δεύτερος είναι ένας αποκεντρωμένος ελεγκτής στον οποίο πραγματοποιείται ο τοπικός έλεγχος με ανεξάρτητο τρόπο. Ωστόσο, είναι υπολογιστικά αναποτελεσματικό.

Αντίθετα, στον κεντρικό ελεγκτή, ο υπολογιστής πρέπει να επεξεργάζεται σήματα με ρυθμούς που αντιστοιχούν στην υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας. Για να αποφευχθούν αυτά τα ζητήματα, μπορεί κανείς να καταλήξει σε έναν συμβατικό ελεγκτή που περικλείει τις δύο προσεγγίσεις των πλήρως συγκεντρωμένων και πλήρως αποκεντρωμένων ελεγκτών. Αυτό αναφέρεται ως ιεραρχική ή πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική ελέγχου.

Αυτή η στρατηγική ελέγχου διαθέτει έναν κεντρικό ελεγκτή για τη συνολική απόδοση και έναν καταμεμημένο επεξεργαστή για τοπικό έλεγχο. Στη συνέχεια, μια μέση απόκριση σε κάθε στοιχείο μεταβιβάζεται στον γενικό επεξεργαστή.

2.6 Προβλήματα Κατασκευής Πιεζοηλεκτρικών

Υπάρχουν αρκετά προβλήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την κατασκευή πιεζοηλεκτρικών έξυπνων κατασκευών. Μερικά από αυτά είναι:

- Απαιτείται ηλεκτρική αγωγιμότητα και επαφή και από τις δύο πλευρές των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι να δημιουργηθεί μια τρύπα στην κατασκευή και να χρησιμοποιηθεί αγωγίμη εποξική ρητίνη. Ένας δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθεί ένα λεπτό φύλλο αγωγίμου υλικού μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και της κατασκευής, και φυσικά να χρησιμοποιηθεί μια αγωγίμη κόλλα για την ένωση των δύο στοιχείων.



Εικόνα 2.12: Κολημένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, (α) ειδική εποξική κόλλα για την κόλληση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων πάνω στις κατασκευές, (β) κακή τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου με αποτέλεσμα την καταστροφή του, (γ) σωστά τοποθετημένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε λεπτό πτερύγιο.

- Το πιεζοηλεκτρικό στοιχεία θα πρέπει να απομονωθεί από την κατασκευή. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση μιας μη αγωγίμης επένδυσης.
- Για την κατάλληλη μεταφορά της μηχανικής ταλάντωσης των πιεζοηλεκτρικών στην κατασκευή θα πρέπει το πάχος της κόλλας να είναι λεπτό και ομοιογενές. Για να

ξεπεραστεί αυτό θα πρέπει να εφαρμοστεί μηχανική πίεση κατά την διαδικασία της ωρίμανσης της κόλλας

Στην παραπάνω εικόνα (α) διακρίνεται η ειδική εποξική κολλά (EPO-TEK 30) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σωστή συγκράτηση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων πάνω στην απαιτούμενη επιφάνεια. Επίσης στο (β) διακρίνεται ένα λάθος τοποθετημένο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο το οποίο έχει καταστραφεί. Στο (γ) βλέπουμε μια σωστή συναρμογή πιεζοηλεκτρικών στοιχείων τοποθετημένα σε ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου.

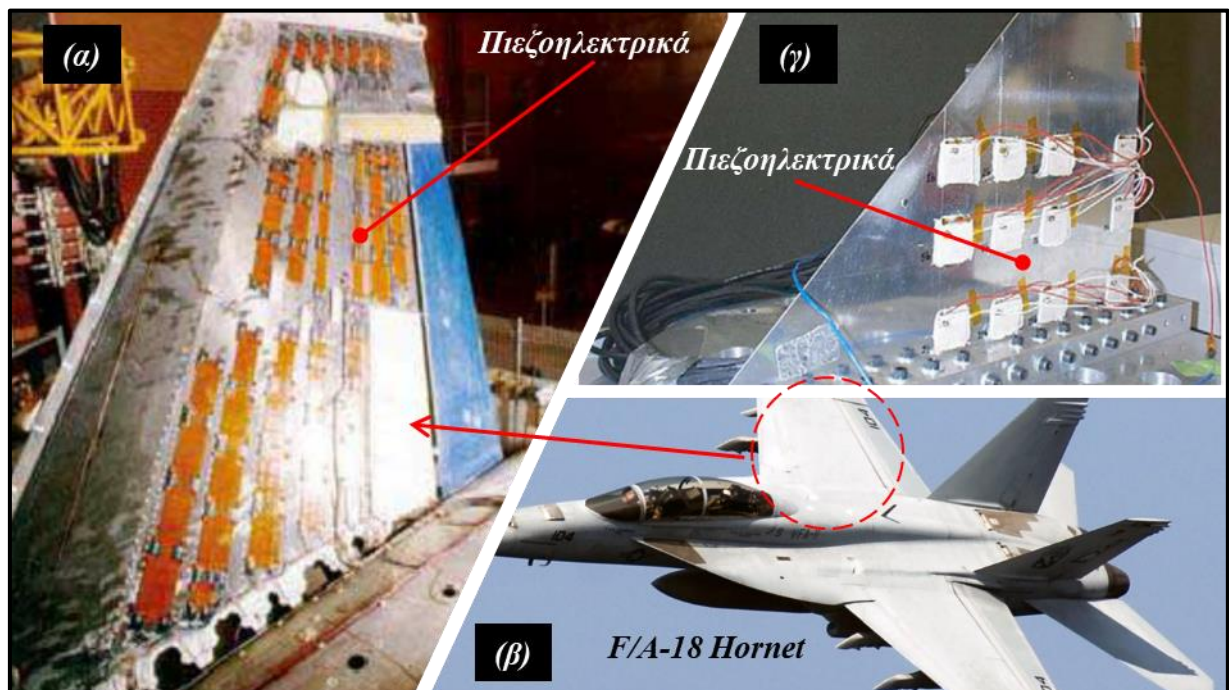
3 Εφαρμογή Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

3.1 Εφαρμογή των Πιεζοηλεκτρικών Υλικών στις Έξυπνες Κατασκευές

3.1.1 Έλεγχος Ενεργών Δονήσεων

Έξυπνες κατασκευές που χρησιμοποιούν διακριτά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, για τον έλεγχο της δόνησης λεπτών πτερυγίων, έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Η ανάπτυξη των συστημάτων πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ANSYS, καθιστούν δυνατή την πλήρη μοντελοποίηση συζευγμένων θερμομηχανικών συστημάτων ή και τη λήψη αμοιβαίων σχέσεων μεταξύ των τάσεων του πιεζοηλεκτρικού επενεργητή και της απόκρισης του συστήματος.

Με την ενσωμάτωση τέτοιων μοντέλων σε ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική στην ενεργή καταστολή κραδασμών. Στρατηγικές ελέγχου των ενεργών κραδασμών όπως ο έλεγχος Η άπειρο. Υπάρχουν πολλές μελέτες που έχουν γίνει, όπως στην παρακάτω εικόνα στο (γ), χρησιμοποιούνται πολλαπλά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία Navy Type II με διαστάσεις 25 mm x 25 mm και πάχος 0,5 mm, συνδεδεμένα με τη δομή του αλουμινένιου πτερυγίου, όπου η δόνηση θα πρέπει να ελεγχθεί.



Εικόνα 3.1: Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αφαίρεση ενεργών θορύβων, (α) πτερύγιο μαχητικού αεροσκάφους F/A-18 Hornet με την χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, (β) το μαχητικό αεροσκάφος F/A-18 Hornet, (γ) πειραματική διάταξη για τον έλεγχο ενεργών δονήσεων σε λεπτό πτερύγιο με την χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

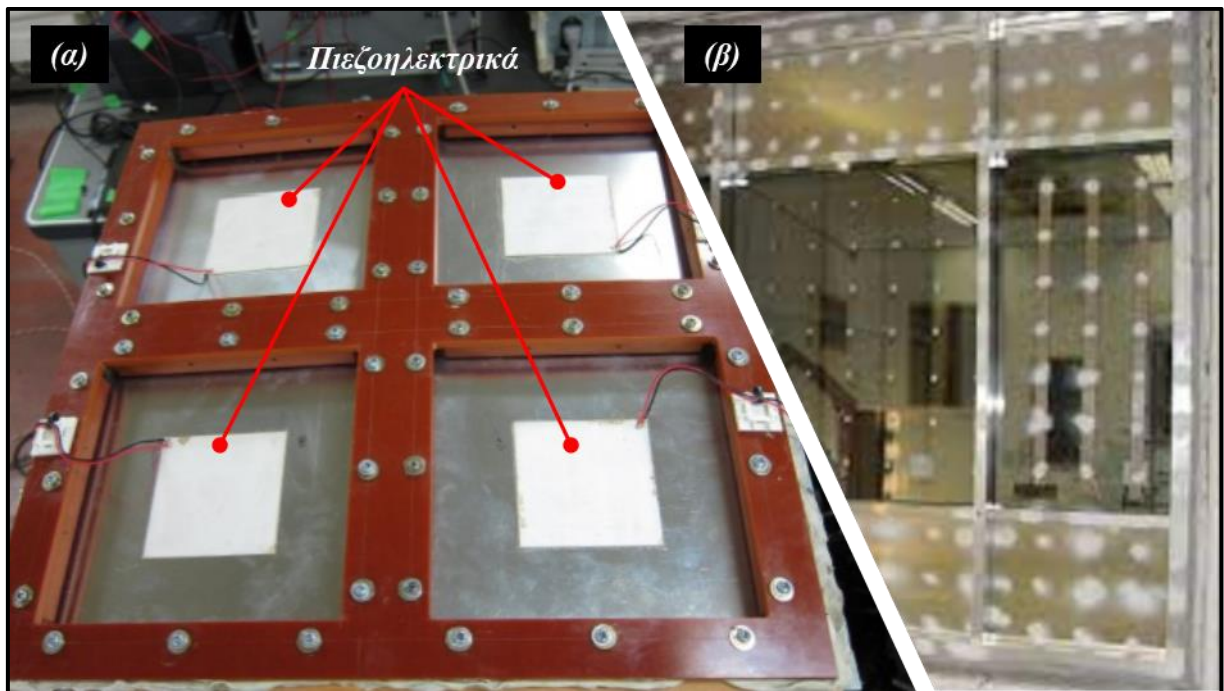
Στην περίπτωση ενός δισδιάστατου πτερυγίου, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνος ένας αισθητήρας καθώς θεωρείται ανεπαρκής. Είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθούν αρκετοί αισθητήρες-επενεργητές για την απόσβεση των δονήσεων σε δισδιάστατα πτερύγια.

Στην **Εικόνα 3.1** (γ) διακρίνεται το πτερύγιο από το μαχητικό αεροσκάφος (β) F/A-18 Hornet, όπου γίνεται χρήση πιεζοηλεκτρικών για την απόσβεση των ενεργών κραδασμών.

3.1.2 Έλεγχος Ενεργών Θορύβων

Οι πηγές θορύβου είναι πάρα πολλές. Για παράδειγμα, θόρυβος μπορεί να προέρχεται από μηχανές, συστήματα εξάτμισης, ανεμιστήρες, φυσητήρες. Ο έλεγχος ενεργού θορύβου αναπτύχθηκε ως διεξοδος στην απόσβεση ή στον εξαφανισμό μερικών διαφορετικών τύπων θορύβου.

Ο θόρυβος ορίζεται συνήθως ως ένας ήχος που οφείλεται σε ακανόνιστη δόνηση ή σε οποιοδήποτε ήχο, που μπορεί να προκαλεί ενόχληση. Η σημασία του ελέγχου ενεργού θορύβου, ειδικά στον χώρο εργασίας, κρίνεται ολοένα και πιο σημαντική. Κυρίως λόγω της απώλειας ακοής, που μπορεί να προκύψει από τη μακροχρόνια έκθεση στον θόρυβο.



Εικόνα 3.2: Έλεγχος ενεργού θορύβου, (α) δοκιμαστικά πάνελ με πιεζοηλεκτρικά για την μείωση του ενεργού θορύβου, (β) δοκιμαστική τοποθετημένη τζαμαρία με πιεζοηλεκτρικά για την ακύρωση των εξωτερικών θορύβων.

Ο έλεγχος του ενεργού ήχου είναι παρόμοιος στη φύση του με το έλεγχο ενεργού θορύβου και συχνά περιγράφεται με τους ίδιους όρους. Ο έλεγχος ενεργού θορύβου λειτουργεί με βάση τη την αρχή της καταστροφικής παρεμβολής, όπου το ανεπιθύμητο ηχητικό κύμα αντιμετωπίζεται με ένα ηχητικό κύμα ίσου πλάτους, αλλά 180 μοίρες αντίστροφης φάσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα ηχητικά κύματα αλληλοακυρώνονται και ο ανεπιθύμητος ήχος μειώνεται ή εξαλείφεται.

Αυτή η αρχή εφαρμόζεται σε έξυπνες κατασκευές (**Εικόνα 3.2**), συμπεριλαμβανομένων των ακουστικών ακύρωσης θορύβου όπου έχουν αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και την μείωση του εσωτερικού θορύβου σε αυτοκίνητα και αεροσκάφη. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν αισθητήρα, ηλεκτρονικά και έναν πομπό ήχου. Αυτό το σύστημα μπορεί να διαμορφωθεί διαφορετικά ανάλογα με τους διαφορετικούς στόχους του συστήματος.

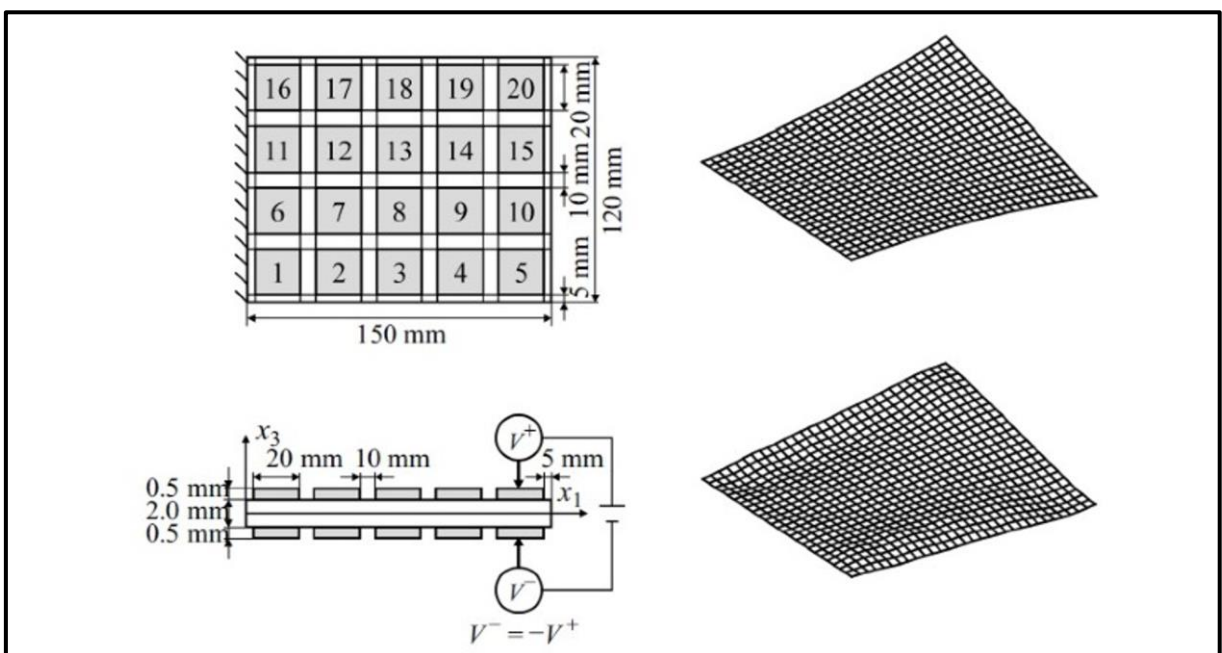
Οι στρατηγικές του συστήματος ελέγχου που εφαρμόζεται στον ενεργό έλεγχο θορύβου ή ήχου είναι παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο ενεργών κραδασμών. Η

στρατηγική ελέγχου περιλαμβάνει τη μέτρηση της πηγής θορύβου στο πρωτεύον ηχητικό πεδίο και την αντιστροφή του πριν από τη δημιουργία και τη διέλευση του ρυθμισμένου σήματος μέσω ενός πομπού. Σε αυτό το σύστημα δεν απαιτείται προηγούμενη γνώση του θορύβου.

3.1.3 Έλεγχος Σχήματος

Ο ενεργός έλεγχος σχήματος έχει σημαντικό ενδιαφέρον για ανακλαστήρες και κεραίες που πρέπει να διατηρούν ακριβείς διαστάσεις για βέλτιστη απόδοση. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για κατασκευές στο χώρο που είναι κατασκευασμένες από ελαφριά υλικά και εκτίθενται σε θερμική παραμόρφωση.

Όργανα όπως παθητικά όργανα κυμάτων χιλιοστών κυμάτων και εκείνα που λειτουργούν μέχρι το υπέρυθρο φάσμα για τη διαστημική ραδιοαστρονομία πρέπει να διατηρούν ακρίβεια μικρομέτρου, με συνολικές διαστάσεις έως και λίγα μέτρα.



Εικόνα 3.3: Πειραματική διάταξη για εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών σε μια λαμαρίνα, με σκοπό τον έλεγχο του σχήματος της.

Ωστόσο, οι θερμικές παραμορφώσεις διαστημικών δομών αυτού του μεγέθους, ακόμη και εκείνες που χρησιμοποιούν υλικά θερμικής διαστολής με χαμηλό συντελεστή, όπως πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονήματα, μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα επιφάνειας RMS της τάξης των 0,8 mm. Για αυτές τις εφαρμογές, έχουν προταθεί έξυπνες κατασκευές που περιλαμβάνουν συνδεδεμένους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές.

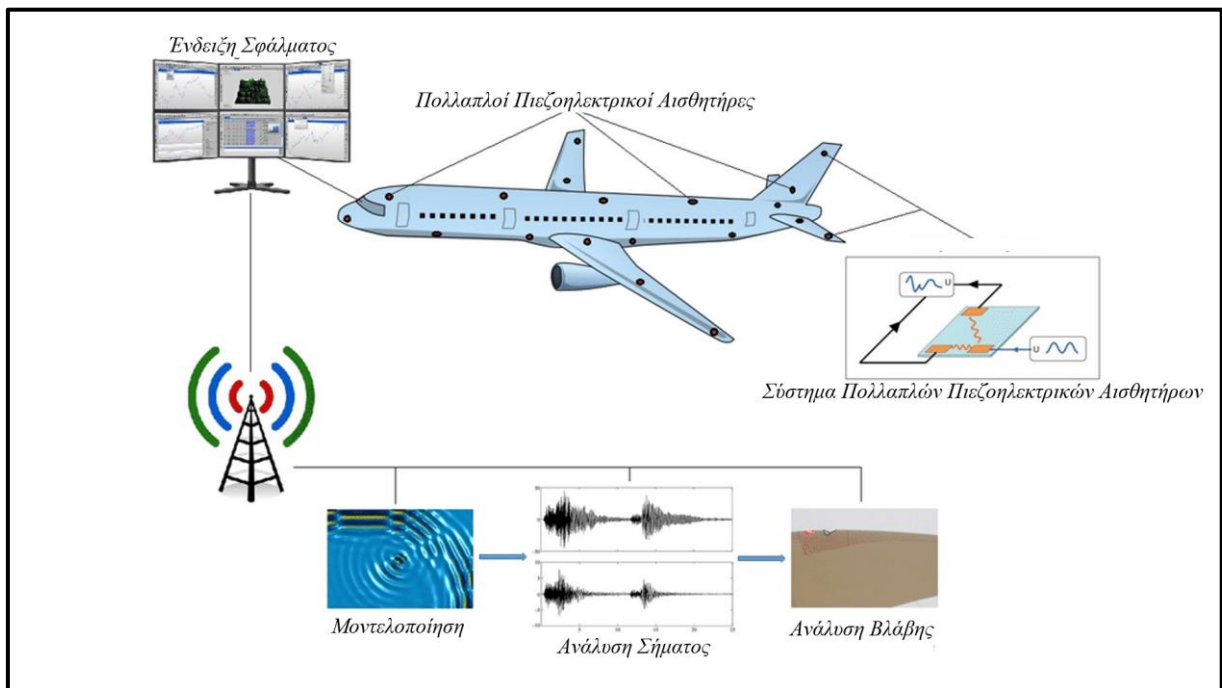
Ο ενεργός έλεγχος σχήματος έχει επίσης προταθεί για χρήση σε φίλτρα ραδιοσυχνότητας για δορυφόρους επικοινωνιών. Ένας τυπικός σχεδιασμός φίλτρου χρησιμοποιεί διαδοχικούς συντονιστές που έχουν ρυθμιζόμενους στύλους για συντονισμό συχνότητας. Οι στύλοι ρυθμίζονται πριν από την εκτόξευση, αλλά παρουσιάζουν θερμική διαστολή στο διάστημα, με αποτέλεσμα μετατοπίσεις συχνότητας.

Με την ενσωμάτωση πιεζοηλεκτρικών επενεργητών στοίβας στους στύλους και την εφαρμογή ενεργού ελέγχου, έχει αναφερθεί τριπλάσια μείωση στη μετατόπιση συχνότητας με τη θερμοκρασία.

3.1.4 Έλεγχος Υγείας Συστημάτων

Οι αστικές, βιομηχανικές και αεροδιαστημικές δομές μπορούν να επωφεληθούν από την προσέγγιση έξυπνων κατασκευών ως βάση για την ενεργό παρακολούθηση της υγείας. Τα δομικά πάνελ που ενσωματώνουν σειρές αισθητήρων και επενεργητών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αστικές, βιομηχανικές και αεροδιαστημικές κατασκευές. Αυτά τα πάνελ μπορούν να παρακολουθούν ενεργά τη δομική ακεραιότητα και να ανιχνεύουν σφάλματα σε πρώιμα στάδια, παρέχοντας έτσι ακριβείς πληροφορίες για τη δομική αστοχία και το προσδόκιμο ζωής.

Αυτό θα είναι πολύ χρήσιμο για τον αεροδιαστημικό τομέα όπου υπάρχει η έλλειψη της ενεργής παρακολούθησης της υγείας, ή τα συστήματά τους τίθενται πρόωρα εκτός λειτουργίας ή επιτρέπεται να λειτουργούν όταν είναι «μη ασφαλή», γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε απώλεια ζωών εκτός από το αεροσκάφος. Εάν η υγεία αυτών των δομών κατέχει καλή αξιοπιστία, θα μπορούσε να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση κόστους με την παράταση της ωφέλιμης ζωής αυτών των αεροσκαφών ή των συστημάτων τους.



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα χρήσης πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων για την παρακολούθηση υγείας αεροσκαφών.

Επίσης πολλά υποσχόμενες εφαρμογές της παρακολούθησης της υγείας, είναι σε εφαρμογές βαρέων μηχανημάτων, η έγκαιρη και ακριβής ανίχνευση σεισμών σε σεισμικές περιοχές και έξυπνες γέφυρες με δυνατότητα παρακολούθησης και αναπροσαρμογής της δομής της για μείωση των επιπέδων καταπόνησης στη γέφυρα.

Οι ακουστικές εκπομπές από κινήσεις εξάρθρωσης, μετασχηματισμούς φάσης, μηχανισμούς τριβής και επέκταση ρωγμών προτάθηκαν ως μέθοδος παρακολούθησης της υγείας των

κατασκευών για αρκετές δεκαετίες. Τα πιεζοηλεκτρικά είναι μακράν τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για την παρακολούθηση τέτοιων ακουστικών εκπομπών.

Ωστόσο, δεδομένου ότι αυτές οι εκπομπές είναι συνήθως επιφανειακά κύματα, πρέπει να εφαρμοστούν ειδικές τεχνικές μέτρησης. Μόλις ανιχνευτεί ένα επιφανειακό κύμα, πρέπει η δομή να επεξεργαστεί αυτές τις πληροφορίες προκειμένου να λάβει την κατάλληλη ενέργεια, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει προσγείωση ενός αεροσκάφους, πρόταση συντήρησης ή ενεργοποίηση μηχανικής ανακούφισης καταπόνησης, στο συγκεκριμένο τμήμα της κατασκευής.

Οι Sun χρησιμοποίησαν πιεζοηλεκτρικά μπαλώματα αισθητήρα/επενεργητή σε μια δομή για την παρακολούθηση της ακεραιότητας της δοκού. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά έχουν επίσης συγκολληθεί στο εξωτερικό των κατασκευών για την παρακολούθηση των αποκολλήσεων και των ζημιών σε σύνθετα υλικά. Και στις δύο περιπτώσεις, τα πιεζοηλεκτρικά παρακολουθούν τις φυσικές συχνότητες δόνησης του σύνθετου υλικού. Εάν το σύνθετο υλικό αρχίσει να αποκολλάται, η συχνότητα δόνησης του θα επηρεαστεί και ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας θα είναι σε θέση να ανιχνεύσει αυτές τις αλλαγές.

Με τη διέγερση και την παρακολούθηση της απόκρισης συχνότητας του σύνθετου υλικού και τη δυνατότητα παρακολούθησης της ακεραιότητας της δομής, θα μπορούσε να ολοκληρωθεί πιο οικονομικά και αποδοτικά η συντήρηση, πριν το δομικό στοιχείο αποτύχει κατά τη λειτουργία.

3.2 Εφαρμογή των Πιεζοηλεκτρικών Υλικών στην Μηχανολογία

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι εγγενείς μετατροπείς που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, και την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, τα υλικά έχουν πληθώρα εφαρμογών στον τομέα της μηχανικής και της ιατρικής.

Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτού του υλικού να διαθέτει ικανότητα μετατροπής ενέργειας σε δύο κατευθύνσεις, δηλαδή από μηχανική σε ηλεκτρική και από ηλεκτρική σε μηχανική, καθιστά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εξαιρετικά κατάλληλα για το σχεδιασμό έξυπνων συστημάτων. Οι μηχανικές εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα

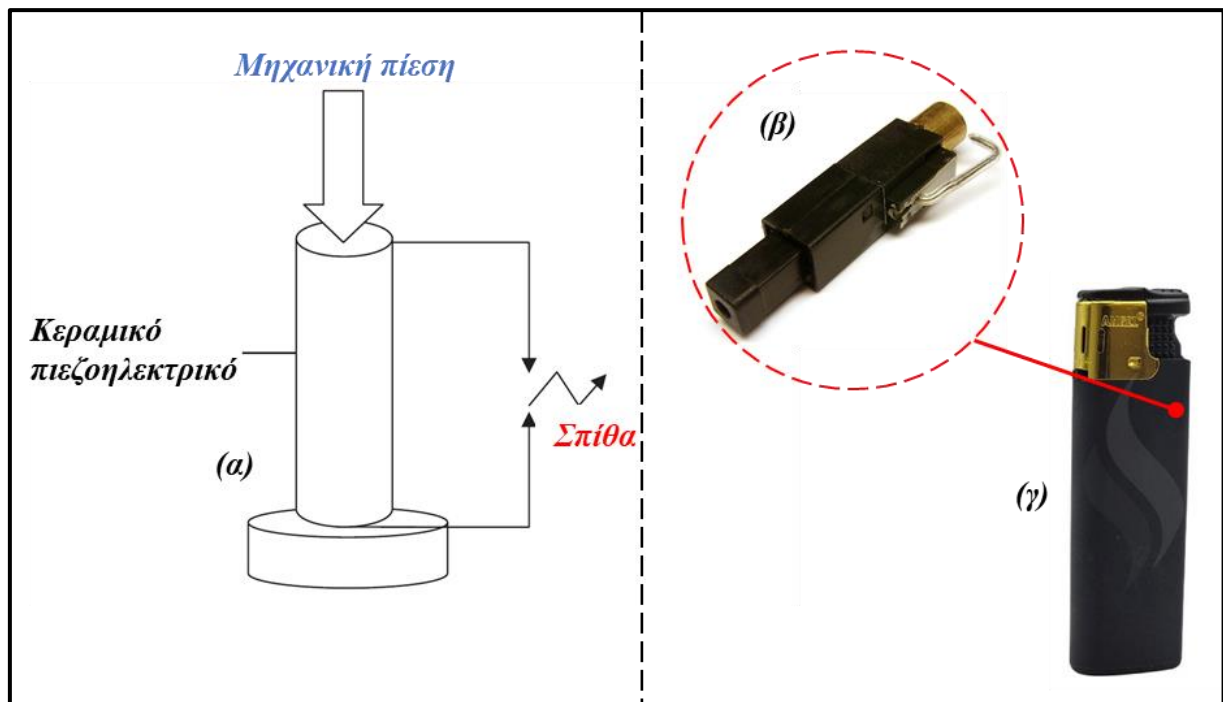
Χρήση Πιεζοηλεκτρικού Φαινομένου	Μετατροπή Ενέργειας	Εφαρμογή
Απευθείας Χρήση	Είσοδος: Μηχανική Τάση Έξοδος: Ηλεκτρική Τάση	Αναπτήρας Αισθητήρας Πίεσης Επιταχυνσιόμετρο Γυροσκόπιο Μικρόφωνο Παραγωγή Ενέργειας SONAR Αισθητήρας Αφής Ανιχνευτής Υπερήχων
Έμμεση Χρήση	Είσοδος: Ηλεκτρική Τάση	Buzzer

	Έξοδος: Μηχανική Τάση	Ηχείο υψηλής συχνότητας Επενεργητές Πιεζοηλεκτρικό Μοτέρ Πιεζοηλεκτρική Αντλία Τρυπάνι Υπερήχων Καθαριστής Υπερήχων Γεννήτρια Υπερήχων
Απευθείας και Έμμεση Χρήση	Είσοδος: Μηχανική/ Ηλεκτρική Τάση Έξοδος: Ηλεκτρική/ Μηχανική Τάση	Ταλαντωτής Χαλαζιακών Κρυστάλλων Σταθεροποιητής Χαλαζιακών Κρυστάλλων Πιεζοηλεκτρικός Μετασχηματιστής Μη Καταστροφική Μέθοδος Δοκιμής Υλικών Έξυπνες Συσκευές και Ρομποτική

Πίνακας 3.1: Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών στην μηχανολογία.

3.2.1 Αναπτήρας

Ο αναπτήρας που έχουμε όλοι στα σπίτια μας αποτελεί την πιο συνήθη πιεζοηλεκτρική συσκευή, η οποία κάνει απευθείας χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου για να δημιουργήσει στην σπίθα στον αναπτήρα. Στους αναπτήρες, χρειάζεται να δημιουργηθεί ένας παλμός υψηλής τάσης, ανάμεσα σε ένα στενό κενό ηλεκτροδίου. Ο πιεζοηλεκτρικός αναπτήρας αποτελείται από ένα PZT κύλινδρο, όπου υποβάλλεται σε μηχανική καταπόνηση, χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό ελατηρίου.



Εικόνα 3.5: Πιεζοηλεκτρικός αναπτήρας αερίου (α) σχηματικό αναπαράστασης του σπινθηριστή βασισμένο στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού, (β) ο σπινθηριστής, (γ) αναπτήρας αερίου με πιεζοηλεκτρικό σπινθηριστή.

Όταν το κουμπί του αναπτήρα πατηθεί, δημιουργείται μια μηχανική τάση στον πιεζοηλεκτρικό κύλινδρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να δημιουργείται μια υψηλή τάση, ανάμεσα σε ένα μικρό κενό αέρα σε δύο κοντινά τοποθετημένα ηλεκτρόδια. Όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η τάση που αναπτύσσεται είναι αρκετά μεγάλη ώστε να σπάσει το κενό αέρος ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, και να δημιουργηθεί η σπίθα που θα οδηγήσει στην ανάφλεξη.

Η τάση που αναπτύσσεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση. Η τάση που αναπτύσσεται στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο εξαρτάται από το μήκος l του κυλίνδρου, την σταθερά του πιεζοηλεκτρικού υλικού, και την μηχανική δύναμη F που εφαρμόζουμε στον κύλινδρο ως προς την επιφάνεια της τομής του κυλίνδρου.

$$V = lg_3 \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Αν πάρουμε την σταθερά του πιεζοηλεκτρικού υλικού ως 22×10^{-3} Vm/N, η τάση που θα αναπτυχθεί σε ένα κύλινδρο μήκους 1 cm και ακτίνας 5 mm, με μια ασκούμενη δύναμη $4,5 \times 10^3$ N, θα είναι περίπου 12,5 KV, το οποίο είναι αρκετά ψηλά ώστε να δημιουργήσει σπίθα.

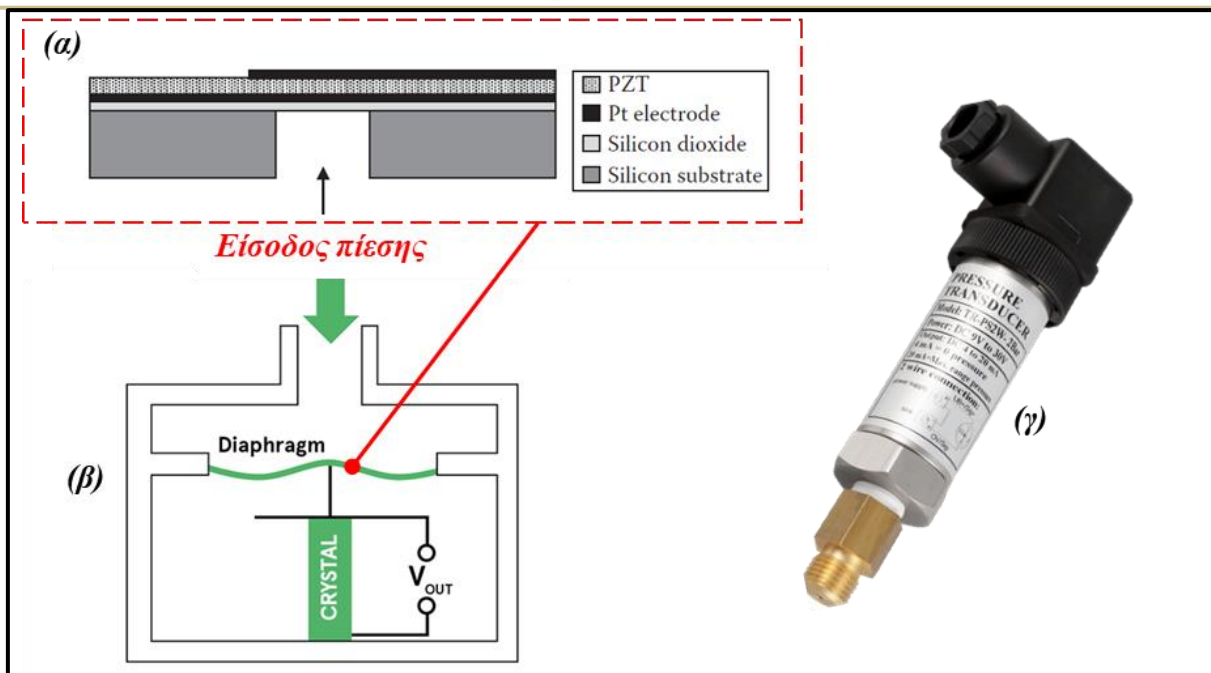
3.2.2 Αισθητήρας Πίεσης

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης χρησιμοποιούν το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η πίεση που πρέπει να μετρηθεί πέφτει σε μια πιεζοηλεκτρική μεμβράνη που παράγει ηλεκτρική τάση ανάλογη με την πίεση εισόδου. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας λεπτές μεμβράνες χαλαζία, PZT και ZnO. Οι αισθητήρες πίεσης είναι πολύ ευαίσθητοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση απόλυτων πιέσεων.

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης είναι αρκετά συνηθισμένοι και χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες για τη μέτρηση της πίεσης κυλίνδρων σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και για τη μέτρηση των μεταβολών πίεσης σε πνευματικά και υδραυλικά συστήματα. Το αισθητήριο στοιχείο στον αισθητήρα πίεσης είναι μια στοίβα από λεπτούς συνθετικούς κρυστάλλους χαλαζία. Η πίεση που πρέπει να μετρηθεί δρα σε ένα διάφραγμα που δημιουργεί συμπιεστική δύναμη στη στοίβα κρυστάλλων χαλαζία **Εικόνα 3.4 (α)**.

Μια ανάλογη αναλογική τάση δημιουργείται από τους κρυστάλλους χαλαζία. Το σήμα τάσης μετριέται χρησιμοποιώντας κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Μερικοί από τους εμπορικούς μετατροπείς πίεσης κρυστάλλων χαλαζία είναι η Intertechnology Inc, η Dytran Instruments και η PCB Piezotronics. Οι λεπτές μεμβράνες PZT έχουν χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό αισθητήρων πίεσης MEMS. Ένας τυπικός αισθητήρας πίεσης MEMS PZT αποτελείται από ένα υπόστρωμα πυριτίου, πάχους περίπου 500 μm , με επίστρωση οξειδίου του πυριτίου πάχους περίπου 100–200 nm

Τα στρώματα πλατίνας λειτουργούν ως ηλεκτρόδια και το PZT είναι το ενεργό υλικό που ανιχνεύει την πίεση. Το πάχος του φιλμ PZT είναι συνήθως στην περιοχή 0,5–5 μm . Η σχηματική δομή ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης MEMS φαίνεται στην **Εικόνα 3.4 (β)**. Αισθητήρες πίεσης που μπορούν να μετρήσουν έως και 40.000 psi έχουν σχεδιαστεί για στρατιωτικές εφαρμογές χρησιμοποιώντας λεπτές μεμβράνες PZT.



Εικόνα 3.6: Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης (α) διάγραμμα στοιχείων που χρησιμοποιούνται στους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες πίεσης, (β) διάγραμμα εσωτερικής δομής πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης, (γ) πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο πίεσης εμπορίου.

Η λεπτή μεμβράνη ZnO που σχηματίζεται σε μια λεπτή μεμβράνη πλουμιδιού συνδεδεμένη με μια γκοφρέτα τυριτίου έχει σχεδιαστεί ως διαφορικός αισθητήρας ροής υγρού πίεσης.

3.2.3 Επιταχυνσίμετρο

Τα επιταχυνσίμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των κραδασμών σε πολλές εφαρμογές που περιλαμβάνουν επίπεδα επιτάχυνσης και κρούσης, όπως οχήματα κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, κραδασμούς από διαστημικά οχήματα, δοκιμή αντοχής σε κραδασμούς συσκευασμένων προϊόντων, δονήσεις σε εξορυκτικές δραστηριότητες, σεισμικές δονήσεις κατά τη διάρκεια σεισμών κ.α.

3.2.3.1 Αρχή Λειτουργίας Επιταχυνσίμετρου

Ένα πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσίμετρο αποτελείται βασικά από έναν πιεζοηλεκτρικό δίσκο που σφίγγει μεταξύ μιας πλάκας βάσης και μιας σεισμικής μάζας M .

Όταν το σύστημα υποβάλλεται σε επιτάχυνση, η μάζα ασκεί μια δύναμη F στον πιεζοηλεκτρικό δίσκο που δίνεται από:

$$F = Ma \quad (3.2)$$

όπου a είναι η επιτάχυνση που βιώνει ο δίσκος. Η μηχανική καταπόνηση στην κατεύθυνση 3 στον πιεζοηλεκτρικό δίσκο δίνεται από:

$$X_3 = \frac{M}{A} = \frac{Ma}{A} \quad (3.3)$$

όπου A είναι το εμβαδόν του δίσκου. Η μηχανική καταπόνηση προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου E σε όλο το πάχος του δίσκου που δίνεται από:

$$E_3 = g_{33}X_3 \quad (3.4)$$

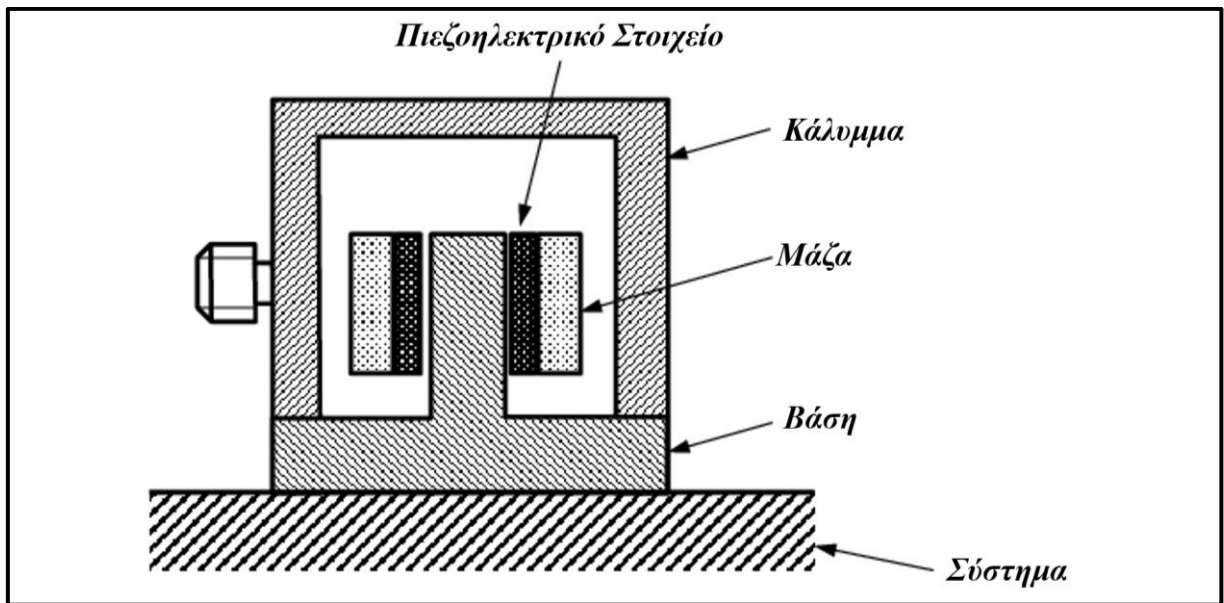
Η τάση ανοιχτού κυκλώματος στον πιεζοηλεκτρικό δίσκο πάχους t θα είναι:

$$V = E_3t = g_{33}X_3t \quad (3.5)$$

Με αντικατάσταση του X_3 από την παραπάνω εξίσωση, δίνεται:

$$V = g_{33} \frac{t}{A} Ma \quad (3.6)$$

Η τάση εξόδου είναι ανάλογη της επιτάχυνσης. Η σταθερά αναλογικότητας καθορίζεται από τη μάζα M , τον πιεζοηλεκτρικό συντελεστή g_{33} και τις διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού δίσκου. Εάν το επιταχυνσιόμετρο υποβάλλεται σε δονήσεις, μπορεί να αντιμετωπιστεί ως σύστημα μάζας-ελατηρίου και μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα.



Εικόνα 3.7: Ανάλυση μερών ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου.

Η αυτεπαγωγή L_m αντιπροσωπεύει τη σεισμική μάζα, η χωρητικότητα C_m αντιπροσωπεύει τη σταθερά ακαμψίας και το C_o είναι η ηλεκτροστατική χωρητικότητα του δίσκου PZT. Για συχνότητες πολύ κάτω από τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος, η αυτεπαγωγή L_m που αντιπροσωπεύει τη σεισμική μάζα μπορεί να αγνοηθεί. Στη συνέχεια, το επιταχυνσιόμετρο αντιπροσωπεύεται από το άθροισμα της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του πιεζοηλεκτρικού δίσκου C_o και της μηχανικής χωρητικότητας C_m :

$$C_a = C_o + C_m \quad (3.7)$$

Η έξοδος του επιταχυνσιόμετρου συνδέεται με έναν ενισχυτή. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος θα διατηρηθεί εάν η χωρητικότητα εισόδου C_E και η αντίσταση R_E του ενισχυτή ικανοποιούν τις παρακάτω συνθήκες.

$$C_E \ll C_a \quad (3.8)$$

$$R_E \gg \frac{1}{C_a} \quad (3.9)$$

Η ευαισθησία του επιταχυνσιόμετρου εκφράζεται ως η τάση εξόδου ανά μονάδα επιτάχυνσης εισόδου. Η μονάδα επιτάχυνσης λαμβάνεται ως g, η επιτάχυνση λόγω της βαρύτητας. Η ευαισθησία εκφράζεται ως millivolt ανά g επιτάχυνσης. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι τάση RMS ή τάση αιχμής.

3.2.3.2 Εύρος Συχνότητας Λειτουργίας Επιταχυνσιόμετρου

Το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας είναι το εύρος συχνοτήτων στο οποίο η ευαισθησία του μορφοτροπέα παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό το εύρος καθορίζεται από τα μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μορφοτροπέα. Ένα τυπικό χαρακτηριστικό ευαισθησίας έναντι συχνότητας ενός πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου. Η απόκριση χαμηλής συχνότητας δεν εξαρτάται από το σύστημα επιταχυνσιόμετρου αλλά εξαρτάται από την σύνθετη αντίσταση εισόδου του ενισχυτή.

Το όριο χαμηλής συχνότητας είναι συνάρτηση της χρονικής σταθεράς R_c που σχηματίζεται από το καλώδιο του επιταχυνσιόμετρου και της χωρητικότητας εισόδου και της αντίστασης του ενισχυτή. Το όριο υψηλής συχνότητας εξαρτάται από τη συχνότητα συντονισμού του επιταχυνσιόμετρου. Η ευαισθησία είναι σχεδόν σταθερή μέχρι περίπου το 1/5 της συχνότητας συντονισμού.

Για να αυξηθεί το ωφέλιμο εύρος του επιταχυνσιόμετρου, η συχνότητα συντονισμού πρέπει να μετατοπιστεί σε υψηλότερες τιμές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση της σεισμικής μάζας, αλλά η μείωση της σεισμικής μάζας μειώνει την ευαισθησία του επιταχυνσιόμετρου. Η σεισμική μάζα επιλέγεται έτσι ώστε να υπάρχει συμβιβασμός μεταξύ του εύρους συχνοτήτων και της ευαισθησίας. Στα επιταχυνσιόμετρα κρούσης, συνήθως απαιτείται το εύρος υψηλών συχνοτήτων, και έτσι χρησιμοποιείται χαμηλότερη σεισμική μάζα.

Αυτό με τη χαμηλότερη σεισμική μάζα έχει μικρότερη ευαισθησία αλλά υψηλότερο ωφέλιμο εύρος συχνοτήτων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να επηρεάσουν την ευαισθησία του επιταχυνσιόμετρου είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας μπορούν να αντισταθμιστούν με τη χρήση κατάλληλων κυκλωμάτων ελέγχου θερμοκρασίας και η επίδραση της υγρασίας μπορεί να μειωθεί με ερμητική σφράγιση της συσκευής.

3.2.3.3 Είδη Πιεζοηλεκτρικών Επιταχυνσιόμετρων

Τα επιταχυνσιόμετρα μπορεί να είναι:

- ✓ Τύπου συμπίεσης
- ✓ Τύπου διάτμησης

✓ Τύπου κάμψης

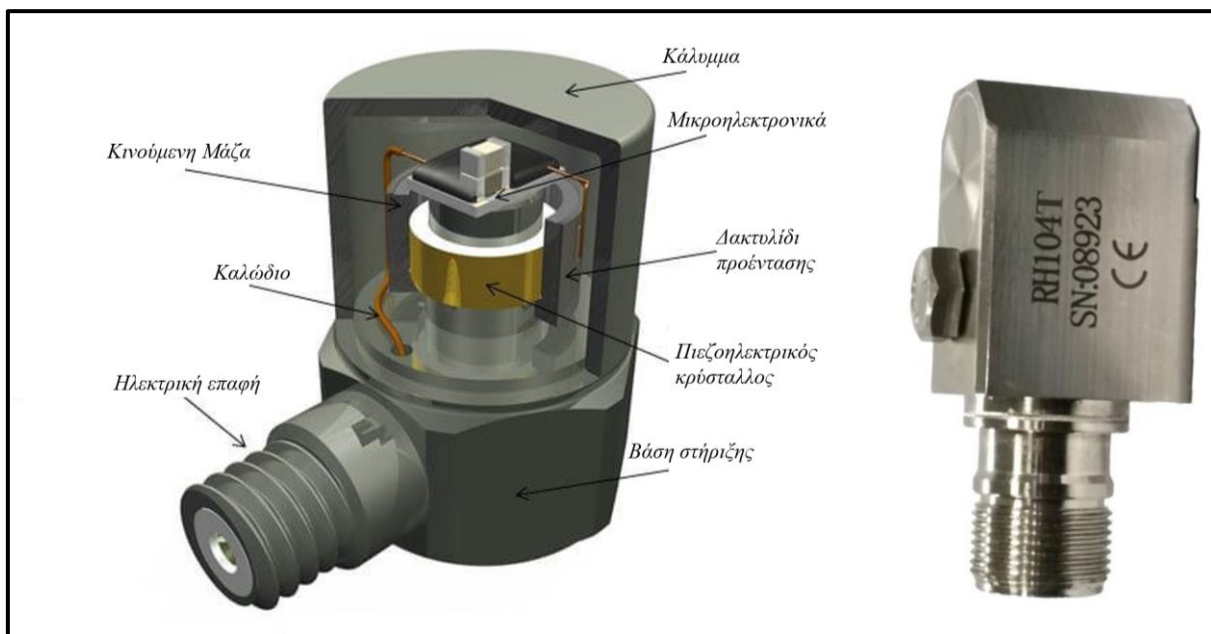
• Τύπου Συμπίεσης

Ένα επιταχυνσιόμετρο τύπου συμπίεσης αποτελείται από έναν πιεζοηλεκτρικό δίσκο με μια κεντρική οπή προσαρμοσμένη σε έναν άξονα. Ο δίσκος είναι προσαρτημένος σε μια άκαμπτη βάση και μια σεισμική μάζα τοποθετείται στην κορυφή του δίσκου. Ο δίσκος και η σεισμική μάζα είναι σταθερά συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Το σύστημα είναι τοποθετημένο σε ένα άκαμπτο πλαίσιο με ένα ελατήριο.

Η εξωτερική δύναμη λόγω των κραδασμών προκαλεί συμπιεστικές δυνάμεις που επενεργούν στον πιεζοηλεκτρικό δίσκο κατά μήκος του, με τη δύναμη να είναι ανάλογη της σεισμικής μάζας. Λόγω του διαμήκους πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, δημιουργούνται φορτία στις ηλεκτροδημένες επιφάνειες του δίσκου. Ο σχετικός πιεζοηλεκτρικός συντελεστής είναι d_{33} . Η φόρτιση μετριέται χρησιμοποιώντας μετατροπέα φορτίου σε τάση και έναν ενισχυτή. Συνήθως, το PZT χρησιμοποιείται για το πιεζοηλεκτρικό υλικό.

• Τύπου Διάτμησης

Στα επιταχυνσιόμετρα τύπου διάτμησης, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία υφίστανται μια δύναμη διάτμησης λόγω της επιτάχυνσης εισόδου. Ο σχετικός πιεζοηλεκτρικός συντελεστής είναι d_{15} . Ένας τύπος διατμητικού επιταχυνσιόμετρου αποτελείται από έναν πιεζοηλεκτρικό κυλινδρικό δακτύλιο τοποθετημένο γύρω από έναν κυλινδρικό άξονα με άκαμπτη βάση. Μια σεισμική μάζα σε σχήμα δακτυλίου είναι τοποθετημένη στην κορυφή και συνδέεται σταθερά με τον πιεζοηλεκτρικό δακτύλιο.



Εικόνα 3.8: Ανάλυση μερών ενός εμπορικού επιταχυνσιόμετρου.

Όταν το σύστημα υποβάλλεται σε εξωτερική δύναμη, μια δύναμη διάτμησης δρα στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού κυλίνδρου και μετρούνται τα φορτία που δημιουργούνται. Ένας άλλος τύπος διατμητικού επιταχυνσιόμετρου που ονομάζεται επιταχυνσιόμετρο ισοδιάτμησης αποτελείται από δύο τετράγωνες επίπεδες πιεζοηλεκτρικές πλάκες

τοποθετημένες εκατέρωθεν μιας επίπεδης μεταλλικής πλάκας χρησιμοποιώντας ένα παξιμάδι και ένα μπουλόνι.

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι προεντεταμένα. Το σύστημα είναι τοποθετημένο σε μια ισχυρή πλάκα βάσης. Όταν το επιταχυνσιόμετρο υποβάλλεται σε εξωτερικούς κραδασμούς, οι δύο πιεζοηλεκτρικές πλάκες υφίστανται διατμητική τάση και δημιουργούνται φορτία στις επιφάνειες, τα οποία μετρούνται χρησιμοποιώντας κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ευαισθησίες των επιταχυνσιομέτρων είναι στην περιοχή από 10–500 picocoulombs/g.

Το χρήσιμο εύρος συχνοτήτων είναι περίπου 3–5000 Hz. Στο επιταχυνσιόμετρο τύπου κάμψης, χρησιμοποιείται ένα πιεζοηλεκτρικό δίμορφο που κάμπτεται όταν υποβάλλεται σε εξωτερική επιτάχυνση. Ένα πιεζοηλεκτρικό δίμορφο αποτελείται από δύο λεπτές πιεζοηλεκτρικές λωρίδες συνδεδεμένες μεταξύ τους. Το σύστημα είναι συσφιγμένο στο ένα άκρο και ελεύθερο στο άλλο άκρο.

Οι δύο λωρίδες τοποθετούνται στην ίδια κατεύθυνση. Όταν το σύστημα υποβάλλεται σε κάμψη λόγω επιτάχυνσης, η επάνω λωρίδα διαστέλλεται και οι κάτω λωρίδες συστέλλονται. Ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής είναι d_{13} . Οι δύο λωρίδες αποκτούν θετικά φορτία στις εξωτερικές όψεις και αρνητικά φορτία στην κοινή όψη.

Το επιταχυνσιόμετρο τύπου κάμψης που χρησιμοποιεί το δίμορφο ως πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Αυτοί οι τύποι επιταχυνσιομέτρων κάμψης είναι αρκετά ευαίσθητοι, αλλά το μειονέκτημα τους είναι, ότι είναι πιο εύθραυστοι και το εύρος συχνοτήτων είναι μικρότερο από αυτό των άλλων τύπων.

3.2.4 Γυροσκόπιο

Τα γυροσκόπια είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας των περιστρεφόμενων αντικειμένων. Έχουν πολλές εφαρμογές μηχανικής: στα αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται για έλεγχο ευστάθειας, υποβοήθηση πλοήγησης και ανίχνευση ανατροπής, στη θαλάσσια μηχανική, χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση και ναυσιπλοΐα πλοίων και σε στρατιωτικές εφαρμογές για σταθεροποίηση και καθοδήγηση πυραύλων.

Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι γυροσκοπίων:

- Περιστρεφόμενα γυροσκόπια μάζας
- Δονητικά γυροσκόπια.

Τα δονητικά γυροσκόπια έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται κινητήρες ή ρουλεμάν. Είναι πιο τραχιά και έχουν καλύτερη διάρκεια ζωής. Τα δονητικά γυροσκόπια ταξινομούνται με βάση τους μηχανισμούς επενέργειας που χρησιμοποιούνται. Οι διαφορετικοί μηχανισμοί επενέργειας που χρησιμοποιούνται είναι ηλεκτροστατικοί, ηλεκτρομαγνητικοί και πιεζοηλεκτρικοί. Στα πιεζοηλεκτρικά δονητικά γυροσκόπια, το πιεζοηλεκτρικό υλικό χρησιμοποιείται τόσο για ενεργοποίηση όσο και για ανίχνευση.

Αυτή η ενότητα ασχολείται με πιεζοηλεκτρικά δονητικά γυροσκόπια, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της απλότητας στο σχεδιασμό και της υψηλής ευαισθησίας τους. Η αρχή που χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους γυροσκοπίων είναι το φαινόμενο Coriolis, το οποίο προκύπτει σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς.

Το φαινόμενο Coriolis μπορεί να δηλωθεί ως εξής: «Όταν ένα κινούμενο αντικείμενο υποβάλλεται σε περιστροφή γύρω από έναν άξονα κάθετο προς την κατεύθυνση της κίνησης, το αντικείμενο υφίσταται επιτάχυνση σε κατεύθυνση αμοιβαία κάθετη προς την αρχική κατεύθυνση κίνησης και τον άξονα περιστροφής.» Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο Coriolis είναι πού είναι η αρχική ταχύτητα του αντικειμένου, είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και a είναι η επιτάχυνση που αποκτάται.

$$\vec{a} = -2\vec{\Omega} \times \vec{u} \quad (3.10)$$

Σε ένα δονητικό γυροσκόπιο, ένα αντικείμενο είναι φτιαγμένο να δονείται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Εάν το αντικείμενο βιώσει μια περιστροφή σε μια κάθετη κατεύθυνση, αποκτά κίνηση δόνησης σε μια τρίτη αμοιβαία κάθετη κατεύθυνση και προκαλεί μια αλλαγή στο μοτίβο δόνησης του αντικειμένου. Αυτή η αλλαγή είναι το μέτρο του ρυθμού περιστροφής.



Εικόνα 3.9: Διάφορα πιεζοηλεκτρικά γυροσκόπια.

Τα πιεζοηλεκτρικά δονητικά γυροσκόπια χρησιμοποιούν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για διέγερση και ανίχνευση κραδασμών σε συντονιστές. Ένας πιεζοηλεκτρικός επενεργητής χρησιμοποιείται για τη διέγερση των κραδασμών και ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για την ανίχνευση. Οι δονήσεις που προκύπτουν λόγω διέγερσης ονομάζονται πρωτεύον τρόπο λειτουργίας και οι δονήσεις που προκύπτουν λόγω του φαινομένου Coriolis όταν υπάρχει περιστροφή ονομάζονται δευτερεύουσα λειτουργία.

Το πλάτος της δευτερεύουσας δόνησης είναι ανάλογο του ρυθμού περιστροφής. Το πιεζοηλεκτρικό γυροσκόπιο τοποθετείται σε κατάλληλη θέση στο αντικείμενο του οποίου ο ρυθμός περιστροφής πρόκειται να μετρηθεί. Όταν το αντικείμενο βιώνει μια περιστροφή, ο ρυθμός περιστροφής μετριέται ανιχνεύοντας τη δόνηση της δευτερεύουσας λειτουργίας.

Ο κύριος τρόπος δόνησης είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης X. Η περιστροφή του αντικειμένου είναι αριστερόστροφα με τον άξονα περιστροφής στην κατεύθυνση Z. Ο δευτερεύων τρόπος δόνησης που αποκτάται λόγω του φαινομένου Coriolis είναι στην κατεύθυνση Y όπως φαίνεται. Σε ένα πιεζοηλεκτρικό γυροσκόπιο, η κύρια λειτουργία προκαλείται χρησιμοποιώντας έναν πιεζοηλεκτρικό επενεργητή και η δευτερεύουσα λειτουργία ανιχνεύεται χρησιμοποιώντας έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα.

Οι τύποι των πιεζοηλεκτρικών γυροσκοπίων είναι:

- Πιεζοηλεκτρικό γυροσκόπιο δοκού
- Πιεζοηλεκτρικό γυροσκόπιο συντονισμού
- Πιεζοηλεκτρικό γυροσκόπιο κυλίνδρου

3.2.4.1 Πιεζοηλεκτρικό Γυροσκόπιο Δοκού

Ένα γυροσκόπιο πιεζοηλεκτρικής δοκού αποτελείται από μια χαλύβδινη δοκό διατομής: τριγωνική, ορθογώνια ή κυκλική. Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι προσαρτημένα στις όψεις των δοκών. Η δοκός υπόκειται σε περιστροφή γύρω από τον άξονα της δοκού.

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε μία από τις όψεις της δέσμης, που ονομάζεται επίπεδο κίνησης, χρησιμοποιείται για να διεγείρει την κύρια δόνηση. Η δοκός είναι τοποθετημένη έτσι ώστε η περιστροφή να είναι γύρω από τον άξονα της δοκού. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κίνησης αισθάνεται τη δευτερεύουσα δόνηση όταν η δέσμη υποβάλλεται σε περιστροφή.

Ένα άλλο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο όψη παράλληλα με την κίνηση χρησιμοποιείται ως ανάδραση στο ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης, για να διατηρείται σταθερό το πλάτος δόνησης στη συχνότητα μηχανικού συντονισμού της δέσμης.

3.2.4.2 Πιεζοηλεκτρικό Γυροσκόπιο Συντονισμού

Ένα γυροσκόπιο πιεζοηλεκτρικού συντονισμού είναι κατασκευασμένο είτε από έναν μόνο κρύσταλλο χαλαζία είτε από οποιοδήποτε άλλο υλικό, και τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται με τα δόντια του πιρουνιού για ενεργοποίηση και ανίχνευση. Το πιρουνί συντονισμού διεγείρεται με την εφαρμογή εξωτερικής τάσης στα ηλεκτρόδια. Αυτή είναι η κύρια δόνηση στην κατεύθυνση Y

Όταν το στέλεχος του συντονισμού περιστρέφεται γύρω από τον άξονα Z, δημιουργείται μια δευτερεύουσα δόνηση των δοντιών προς την κατεύθυνση X. Το πλάτος αυτής της δόνησης μετριέται ως ο ρυθμός περιστροφής. Το στέλεχος συντονισμού του επενεργητή διεγείρεται από ένα κύκλωμα ταλαντωτή στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος.

Τα στελέχη δονούνται μακριά το ένα από το άλλο στο επίπεδο του συστήματος. Όταν το σύστημα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, το φαινόμενο Coriolis δημιουργεί μια ταλαντευόμενη δύναμη σε κατεύθυνση κάθετη προς τον άξονα περιστροφής και την κατεύθυνση της δόνησης. Αυτό κάνει τα δόντια του αισθητήρα να δονούνται μέσα και έξω από το επίπεδο, παράγοντας ένα σήμα που μετριέται ως ο ρυθμός περιστροφής.

3.2.4.3 Πιεζοηλεκτρικό Κυλινδρικό Γυροσκόπιο

Υπάρχουν δύο τύποι πιεζοηλεκτρικών κυλινδρικών δονούμενων γυροσκοπίων. Ένας τύπος χρησιμοποιεί ένα κυλινδρικό κέλυφος από χάλυβα με λεπτά τοιχώματα στο οποίο συνδέονται συμμετρικά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για ενεργοποίηση και αίσθηση. Στον δεύτερο τύπο, το κυλινδρικό κέλυφος είναι κατασκευασμένο από πιεζοηλεκτρικό υλικό και κατάλληλα ηλεκτρόδια παρέχονται στα τοιχώματα του κυλίνδρου για διέγερση και αίσθηση.

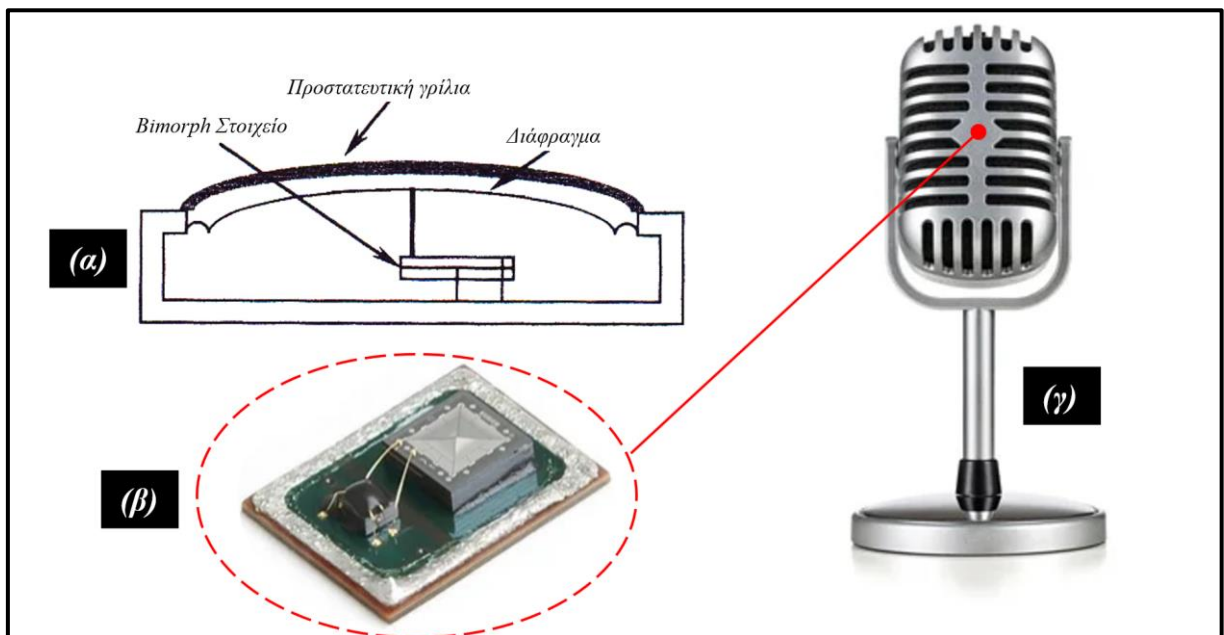
Οι δύο τρόποι δόνησης του κυλίνδρου που χρησιμοποιείται στο δονητικό γυροσκόπιο ονομάζονται πρωτεύων και δευτερεύων τρόποι. Η κύρια λειτουργία έχει αντικόμβους στις 0° ,

90°, 180° και 270°. Η δευτερεύουσα λειτουργία έχει την ίδια μορφή με την κύρια λειτουργία, αλλά περιστρέφεται κατά 45° σε σχέση με την κύρια λειτουργία.

Ο κύλινδρος είναι σφιγμένος στο ένα άκρο και το άλλο άκρο είναι ελεύθερο να δονείται. Ο κύλινδρος τοποθετείται στο περιστρεφόμενο αντικείμενο του οποίου η περιστροφή πρέπει να μετρηθεί, έτσι ώστε ο άξονας περιστροφής να είναι κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου.

3.2.5 Μικρόφωνο

Το πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο βασίζεται στο άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή στη μετατροπή των ηχητικών δονήσεων σε ηλεκτρικά σήματα. Τα μικρόφωνα είναι κατασκευασμένα από λεπτές πλάκες κρυστάλλων χαλαζία ή λεπτές μεμβράνες PZT. Οι διαστάσεις των πλακών ή των μεμβρανών επιλέγονται ώστε να έχουν ευαίσθητα σήματα εξόδου στο εύρος συχνοτήτων ακουστικού ήχου.



Εικόνα 3.10: Πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο (α) ανάλυση μερών πιεζοηλεκτρικού μικρόφωνο, (β) αισθητήρας μικροφώνου, (γ) μικρόφωνο.

Σε ένα πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο MEMS, σχηματίζονται λεπτές μεμβράνες PZT σε υπόστρωμα πυριτίου και χρησιμοποιούνται τεχνικές μικροκατεργασίας για το σχηματισμό της μεμβράνης. Ένας ενισχυτής είναι ενσωματωμένος στο σύστημα.

3.2.6 SONAR (Sound Navigation and Ranging)

Οι πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι είναι ικανοί για δονήσεις σε πολύ υψηλές συχνότητες στην περιοχή υπερήχων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία και την ανίχνευση υπερήχων, η οποία βρίσκεται στην περιοχή συχνοτήτων των 20 kHz και έως αρκετά MHz.

Η τεχνική SONAR περιλαμβάνει τη δημιουργία και τη μετάδοση υπερήχων στο νερό και τη λήψη και ανίχνευση του υπερήχου που ανακλάται από βυθισμένα αντικείμενα. Δεδομένου ότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για παραγωγή όσο και για ανίχνευση ήχου, η ίδια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως γεννήτρια υπερήχων και ως

ανιχνευτής. Στην υποβρύχια ακουστική, οι γεννήτριες ήχου ονομάζονται προβολείς και οι ανιχνευτές ήχου ονομάζονται υδρόφωνα.

Η εμβέλεια και η ανίχνευση ήχου κάτω από το νερό έχει διάφορες εφαρμογές που περιλαμβάνουν:

- Μέτρηση θορύβου, που δημιουργείται από σκάφη σε διάφορες ταχύτητες. Τα επίπεδα θορύβου απαιτείται να διατηρούνται εντός των προβλεπόμενων ορίων. Οι δοκιμές γίνονται για νέα σκάφη ή κάθε φορά που εγκαθίστανται νέος εξοπλισμός στα πλοία.
- Υποβρύχια επικοινωνία
- Ανίχνευση και βολή εχθρικών σκαφών κάτω από το νερό
- Ωκεανογραφική έρευνα, μελέτη του υποβυθού της θάλασσας από υπεράκτιες πετρελαιοβιομηχανίες
- Έρευνα θαλάσσιων θηλαστικών

Τα υδρόφωνα είναι δέκτες υπερήχων ειδικά σχεδιασμένοι για την ανίχνευση υπερήχων κάτω από το νερό. Ανιχνεύουν διακυμάνσεις πίεσης των ακουστικών σημάτων που διαδίδονται στο νερό και παράγουν τάση ανάλογη της πίεσης. Σημαντικές παράμετροι υδροφώνου είναι το εύρος συχνοτήτων, η ευαισθησία και το επίπεδο θορύβου. Λειτουργούν κάτω από τη συχνότητα συντονισμού και απαιτείται να έχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων και υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο.

Οι προβολείς είναι πομποί υπερήχων που χρησιμοποιούνται κάτω από το νερό, παράγουν υπερηχητικά κύματα υψηλής έντασης όταν εφαρμόζονται σε αυτά ημιτονοειδείς τάσεις. Τα υπερηχητικά κύματα διαδίδονται στο νερό σε μεγάλες αποστάσεις. Οι προβολείς λειτουργούν κοντά στη συχνότητα συντονισμού. Η έξοδος είναι μέγιστη στη συχνότητα συντονισμού.

3.2.6.1 Ηχοβολέας Tonpilz

Ο ηχοβολέας Tonpilz είναι ένας τυπικός ηχοβολέας υπερήχων που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές SONAR. Ο ηχοβολέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προβολέας ή ως υδρόφωνο. Ο ηχοβολέας χρησιμοποιεί είτε πιεζοηλεκτρικά υλικά είτε μαγνητοσυστολικά υλικά για επενέργηση και αίσθηση. Ένας πιεζοηλεκτρικός ηχοβολέας Tonpilz αποτελείται από μια στοίβα πιεζοηλεκτρικών κεραμικών δακτυλίων (PZT) με μάζα από χάλυβα ή ορείχαλκο και μάζα κεφαλής από ελαφρύ μέταλλο όπως αλουμίνιο ή μαγνήσιο, που συγκρατούνται όλα μαζί με ένα ατσάλινο μπουλόνι.

Οι δακτύλιοι PZT είναι προεντεταμένοι με θλιπτική τάση με τη βοήθεια ενός ατσάλινου μπουλονιού. Σε όλο το σύστημα γίνεται επίστρωση πολυμερούς, η οποία περικλείεται σε αδιάβροχη συσκευασία. Σημαντικές παράμετροι του ηχοβολέα είναι η συχνότητα συντονισμού, η απόκριση τάσης μετάδοσης, η ευαισθησία λήψης και η ηλεκτρική αντίσταση. Το μέγεθος της πιεζοηλεκτρικής κεραμικής στοίβας και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη μάζα της κεφαλής το μέγεθος και το σχήμα τους, καθορίζουν τη συχνότητα συντονισμού, το εύρος ζώνης και τις ευαισθησίες εκπομπής και λήψης.

Η μάζα κεφαλής του μορφοτροπέα πρέπει να είναι από ελαφρύ υλικό όπως αλουμίνιο ή μαγνήσιο για να αποκτήσει αυξημένο εύρος ζώνης και επίσης να ταιριάζει καλύτερα η ακουστική αντίσταση με το νερό. Ορισμένα σχέδια περιλαμβάνουν ένα κατάλληλο στρώμα μαλακού αφρού που πρέπει να προστεθεί στο άκρο της μάζας της κεφαλής για να βελτιωθεί η αντιστοίχιση της σύνθετης αντίστασης με το νερό. Οι πιεζοηλεκτρικοί δακτύλιοι ηλεκτροδοτούνται και στις δύο πλευρές και οι εναλλακτικές κοινές όψεις γειώνονται.

Ο μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πομπός και ως δέκτης. Όταν λειτουργεί ως πομπός, ο ηχοβολέας διεγείρεται στη συχνότητα συντονισμού εφαρμόζοντας μια ημιτονοειδή ή παλμική τάση σε εναλλακτικές όψεις των πιεζοηλεκτρικών δίσκων στη στοίβα.

Όταν χρησιμοποιείται ως δέκτης, λειτουργεί κάτω από τη συχνότητα συντονισμού και η τάση που παράγεται στις επιφάνειες των πιεζοηλεκτρικών δίσκων στη στοίβα μετριέται μετά από κατάλληλη ενίσχυση. Οι μετατροπείς Tonpilz είναι συνήθως σχεδιασμένοι να έχουν συχνότητες συντονισμού στην περιοχή 10–50 kHz.

3.2.6.2 Υποβρύχιος Ηχοβολέας Υψηλών Συχνοτήτων

Αν και οι ηχοβολείς Tonpilz χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές SONAR, έχουν τον περιορισμό ότι η συχνότητα λειτουργίας τους δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 50 kHz. Για λειτουργίες υψηλότερης συχνότητας, το μέγεθος της συσκευής θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερο, καθιστώντας το Tonpilz ακατάλληλο. Οι ηχοβολείς υψηλής συχνότητας είναι κατασκευασμένοι με πιεζοηλεκτρικά υλικά σε σχήμα ράβδων, παραλληλεπίπεδων, πλακών ή δακτυλίων.

Οι συχνότητες λειτουργίας των συσκευών καθορίζονται από το πάχος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Με αυτούς τους ηχοβολείς μπορούν να επιτευχθούν συχνότητες μεγαλύτερες από 100 kHz. Μια σειρά μικρών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση των διαστάσεων του μορφοτροπέα. Ένας ηχοβολέας γραμμικής διάταξης που αποτελείται από μια σειρά μικρών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

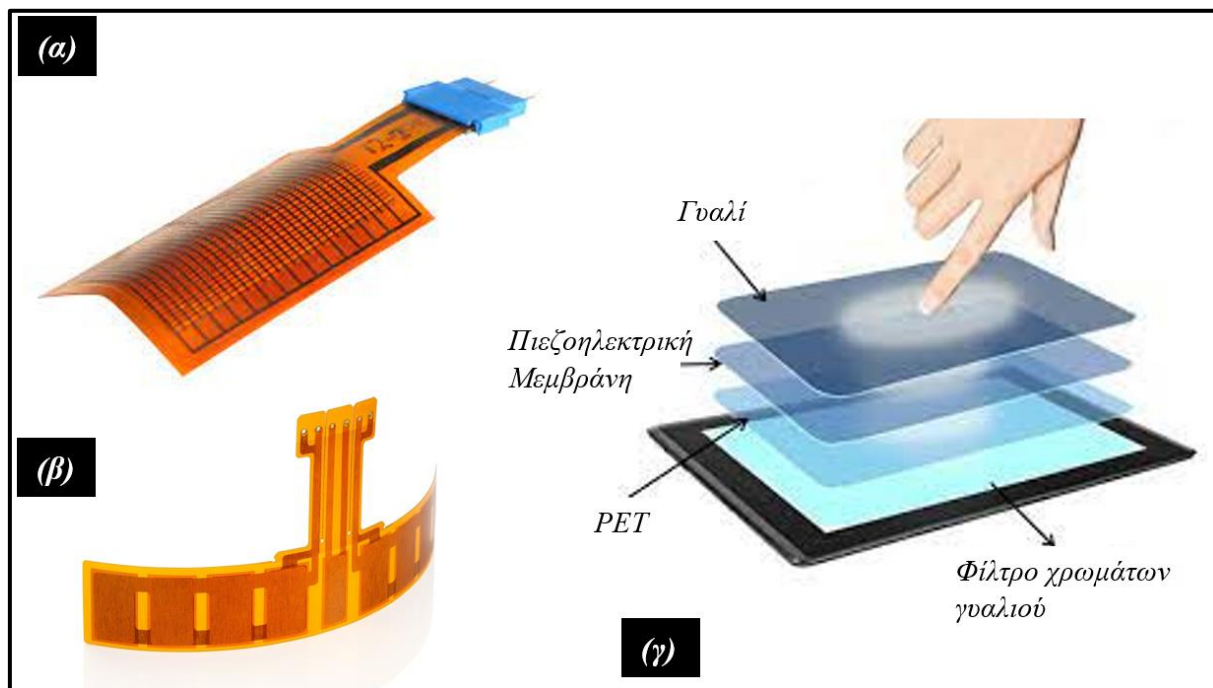
Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι τοποθετημένα σε ένα άκαμπτο υλικό υποστήριξης και ολόκληρο το συγκρότημα περικλείεται από πλαστική συσκευασία ή διαφανή θήκη γεμάτη με υγρό. Οι μετατροπείς υψηλής συχνότητας έχουν αναπτυχθεί με σύνθετα πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Στα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικά κεραμικά PZT και πολυμερή. Οι περισσότεροι από τους σύνθετους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς χρησιμοποιούνται ως υδρόφωνα. Εμπορικοί πιεζοηλεκτρικοί υποβρύχιοι μετατροπείς διαφόρων μεγεθών και σχημάτων που κατασκευάζονται από την ITT, Electronic Systems.

3.2.7 Πιεζοηλεκτρικός Αισθητήρας Αφής

Οι αισθητήρες αφής είναι συσκευές που ανιχνεύουν την επαφή ή την αφή. Οι αισθητήρες έχουν εφαρμογές στον βιομηχανικό αυτοματισμό και τη ρομποτική. Στον ιατρικό τομέα, είναι χρήσιμα στη λαπαροσκοπική χειρουργική. Ο αισθητήρας δίνει ένα σήμα εξόδου κάθε φορά που έρχεται σε επαφή με ένα αντικείμενο. Είναι ένας αισθητήρας αφής όπως το ανθρώπινο δέρμα.

Ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ρομπότ για να το κάνει να χειρίζεται ευαίσθητα αντικείμενα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του περιγράμματος των αντικειμένων. Επίσης είναι χρήσιμο στη μη επεμβατική χειρουργική στην οποία το νυστέρι και η λαβή πρέπει να χειρίζονται προσεκτικά μέσα στο ανθρώπινο σώμα.



Εικόνα 3.11: Αισθητήρες αφής (α)(β) διάφοροι αισθητήρες αφής, (γ) αισθητήρας αφής για χρήση σε οθόνη.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων αφής με βάση την αρχή που χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, ωμικοί, χωρητικοί, οπτικοί και πιεζοηλεκτρικοί. Στους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες αφής, το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται όταν μια μικρή πίεση στον αισθητήρα δημιουργεί ηλεκτρικό σήμα. Οι πιο ευαίσθητοι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αφής κάνουν χρήση της αλλαγής στη συχνότητα συντονισμού ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου όταν επενεργεί μια μικρή πίεση σε αυτό.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τον αισθητήρα αφής είναι λεπτές μεμβράνες από κεραμικό PZT ή πολυμερές PVDF. Είναι απαραίτητο ο αισθητήρας αφής να είναι εύκαμπτος, και έτσι τα πολυμερή είναι τα καλύτερα. Ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας αφής αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών αισθητήρων διατεταγμένων σε μια μήτρα.

Κάθε στοιχείο είναι ένας πιεζοηλεκτρικός πρόβολος σε υπόστρωμα πυριτίου. Τα ηλεκτρονικά που απαιτούνται είναι ενσωματωμένα στο ίδιο το τσιπ. Κάθε στοιχείο της διάταξης αποτελείται από μια αναρτημένη πιεζοηλεκτρική μεμβράνη. Το μέγεθος του αισθητήρα αφής εξαρτάται από την εφαρμογή. Το εμβαδόν του πίνακα μπορεί να κυμαίνεται από 1 cm² έως αρκετά cm² και ο αριθμός των στοιχείων του πίνακα μπορεί να είναι 10 έως 100 στοιχεία.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων, τόσο καλύτερη θα είναι η ανάλυση. Η έξοδος από κάθε στοιχείο θα μπορούσε να είναι δυαδική ή μπορεί να είναι αναλογική τάση εξόδου ανάλογη με την πίεση που ασκείται στο στοιχείο. Στον δυαδικό τύπο, η θέση επαφής μπορεί να προσδιοριστεί, και στον αναλογικό τύπο μπορεί να προσδιοριστεί τόσο η θέση όσο και η

έκταση της πίεσης. Ένας απτικός αισθητήρας στον οποίο μετριέται η αλλαγή στη συχνότητα συντονισμού του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι πιο ευαίσθητος από αυτόν στον οποίο μετριέται η τάση εξόδου.

3.2.8 Συλλογή Ενέργειας

Η συλλογή ενέργειας με χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είναι μια σχετικά νέα τεχνική χρήσης πιεζοηλεκτρικών υλικών ως πηγών ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Η τεχνική χρησιμοποιεί το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο οι μηχανικοί κραδασμοί μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα. Υπάρχουν πολλές κοινές πηγές μηχανικών δονήσεων και κινήσεων στο περιβάλλον μας. Για παράδειγμα, το περπάτημα και άλλες κινήσεις των ανθρώπων, ο θόρυβος και οι δονήσεις που εμφανίζονται σε χρησιμοποιούμενα gadget και μηχανήματα είναι οι πηγές που δημιουργούν μηχανικούς κραδασμούς στην καθημερινή μας ζωή.

Η κίνηση της κυκλοφορίας σε έναν πολυσύχναστο δρόμο είναι μια άλλη κοινή πηγή θορύβου και κραδασμών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Πολλές νέες ιδέες προτείνονται και δημοσιεύονται για αυτή τη νέα εναλλακτική πηγή ενέργειας. Ωστόσο, η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος είναι σχετικά χαμηλή, και έτσι η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί απαραίτητα απευθείας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση κανονικών μπαταριών, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία διαφόρων συσκευών χαμηλής κατανάλωσης.

Παραδείγματα ορισμένων εξαιρετικά χρήσιμων συσκευών χαμηλής κατανάλωσης που μπορούν να λειτουργήσουν με αυτήν την τεχνική είναι τα κινητά τηλέφωνα, τα ηλεκτρονικά ρολόγια, τα iPod, τα ακουστικά βαρηκοΐας και τα ιατρικά εμφυτεύματα.

Η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να βγάλει κανείς από αυτές τις πιεζοηλεκτρικές συσκευές συλλογής ενέργειας εξαρτάται από το μέγεθος και τη μάζα της συσκευής. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος και η μάζα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ισχύς εξόδου. Δεδομένου ότι το μέγεθος της πηγής ενέργειας πρέπει να είναι πολύ μικρό για τη λειτουργία μικρών συσκευών, η ισχύς εξόδου είναι περιορισμένη.

Αν και οι τεχνικές αυτού του τύπου συλλογής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί αρκετά καλά, θα γίνει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πηγή ενέργειας μόνο εάν οι απαιτήσεις ισχύος των ηλεκτρονικών συσκευών μειωθούν περαιτέρω. Το εύρος συχνοτήτων των φυσιολογικών κραδασμών στο περιβάλλον μας κυμαίνεται περίπου 50–250 Hz. Η πιεζοηλεκτρική συσκευή συλλογής ενέργειας πρέπει να έχει συχνότητα συντονισμού εντός αυτού του εύρους για να παρέχει σημαντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσο μικρότερη είναι η συσκευή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συχνότητα συντονισμού. Έτσι η συσκευή δεν μπορεί να γίνει πολύ μικρή. Η μέση ισχύς που μπορεί να συλλεχθεί από μια πιεζοηλεκτρική συσκευή που υποβάλλεται σε τυχαίους κραδασμούς έχει διερευνηθεί θεωρητικά από αρκετούς ερευνητές. Μεταξύ των διαφόρων σχεδίων, ο πιεζοηλεκτρικός δίμορφος πρόβολος έχει βρεθεί ότι είναι πιο κατάλληλος για τη συλλογή ενέργειας και έχει μελετηθεί ευρέως.

Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή ενέργειας. Το δίμορφο ή ο ηχοβολέας κύμβαλου είναι τοποθετημένος στο δονούμενο σύστημα. Η δόνηση μεταφέρεται στο δίμορφο και αναγκάζεται να δονηθεί. Λόγω του άμεσου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, το δονούμενο δίμορφο παράγει μια ηλεκτρική τάση AC.

Η ευαισθησία της συσκευής αυξάνεται όταν προστίθεται μια μάζα απόδειξης στο ελεύθερο άκρο του δίμορφου. Για να έχουμε μέγιστη απόδοση, είναι απαραίτητο αυτή η φυσική συχνότητα να υπάρχει με υψηλό πλάτος στη ζώνη συχνοτήτων του δονούμενου συστήματος.

Η τάση AC που παράγεται από το δίμορφο διορθώνεται για να ληφθεί τάση DC. Η απόδοση θα βελτιωθεί εάν η μηχανική απόσβεση του δονούμενου δίμορφου ελαχιστοποιηθεί και η σταθερά ηλεκτρομηχανικής σύζευξης του πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι υψηλή.

Το δονούμενο σύστημα θα μπορούσε να είναι οποιαδήποτε φυσικά δονούμενη δομή στο περιβάλλον μας, για παράδειγμα, μια πολυσύχναστη σκάλα σε ένα κτίριο, ένας δρόμος με πολυσύχναστη κυκλοφορία, μια πίστα σε ένα κλαμπ, μια δονούμενη μηχανή μέσα σε ένα αυτοκίνητο ή οποιοδήποτε κοινό ηλεκτρικό gadget που χρησιμοποιείται σε σπίτι όπως πλυντήριο ρούχων, μπλέντερ κουζίνας ή ψυγείο.

Ένα πιεζοηλεκτρικό δίμορφο είναι ο ηχοβολέας που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια των κραδασμών σε ηλεκτρική τάση AC. Το δίμορφο πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να έχει τη φυσική συχνότητα δόνησης που συμπίπτει με τη συχνότητα του υψηλότερου πλάτους στο φάσμα συχνοτήτων της δονούμενης δομής. Η έξοδος εναλλασσόμενου ρεύματος του δίμορφου μετατρέπεται σε σήμα DC χρησιμοποιώντας το κύκλωμα ανορθωτή. Η έξοδος DC αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή. Τα κυκλώματα σύγκρισης και ρυθμιστή περιορίζουν την τάση DC στην τάση που απαιτείται για τη λειτουργία της ηλεκτρονικής συσκευής.

Η συλλογή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τη μηχανική ενέργεια που παράγεται κατά το περπάτημα από τον άνθρωπο έχει μελετηθεί εκτενώς. Αυτό γίνεται με την ενσωμάτωση της πιεζοηλεκτρικής συσκευής μέσα στις σόλες των παπουτσιών. Το πολυμερές πιεζοηλεκτρικό υλικό PVDF, το οποίο είναι πιο εύκαμπτο και λιγότερο εύθραυστο, είναι πιο κατάλληλο από το άκαμπτο και εύθραυστο πιεζοηλεκτρικό κεραμικό (PZT) για τέτοιες εφαρμογές.

3.2.9 Πιεζοηλεκτρικό Ηλεκτρονικό Buzzer

Το Πιεζοηλεκτρικό Ηλεκτρονικό Buzzer και το Tweeter είναι και οι δύο πιεζοηλεκτρικές συσκευές που μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα AC σε μηχανικούς κραδασμούς και εκπέμπουν ήχο. Οι πιεζοηλεκτρικοί βομβητές λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες, ενώ τα tweeter είναι ηχεία που λειτουργούν σε σχετικά υψηλότερες συχνότητες. Οι βομβητές χρησιμοποιούνται ως ηχεία σε ρολόγια και πολλές ηλεκτρονικές συσκευές και tweeter που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες, συνήθως στην περιοχή 2-20 kHz, χρησιμοποιούνται ως ηχεία σε κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές και φορητά ραδιόφωνα.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών ηχείων έναντι των συμβατικών ηχείων είναι ότι μπορούν να κατασκευαστούν εξαιρετικά μικρά σε μέγεθος, δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία και χρειάζονται πολύ λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια. Η φυσική δομή των

buzzers και των tweeter είναι βασικά η ίδια. Αποτελείται από ένα λεπτό πιεζοηλεκτρικό διάφραγμα το οποίο δονείται όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό σήμα σε όλο το πάχος του.

Η διάσταση του διαφράγματος και ο τρόπος τοποθέτησης του στο συγκρότημα καθορίζουν το χρήσιμο εύρος συχνοτήτων της συσκευής. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χαλαζίας, το τιτανικό βάριο ή το PZT.

3.2.10 Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές

Το έμμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο μια ηλεκτρική είσοδος αλλάζει τις διαστάσεις ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών νέων πιεζοηλεκτρικών επενεργητών για ποικίλες εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών επενεργητών είναι ότι δεν απαιτούν πολύπλοκα σχέδια και μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικές δυνάμεις με γρήγορη απόκριση για είσοδο χαμηλής τάσης. Τα υλικά παρουσιάζουν ένα ελαφρύ φαινόμενο υστέρησης, αλλά αυτό δεν επηρεάζει πολύ τη συμπεριφορά του επενεργητή εάν προσεχθεί στο σχεδιασμό.

Τρεις τύποι πιεζοηλεκτρικών επενεργητών που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

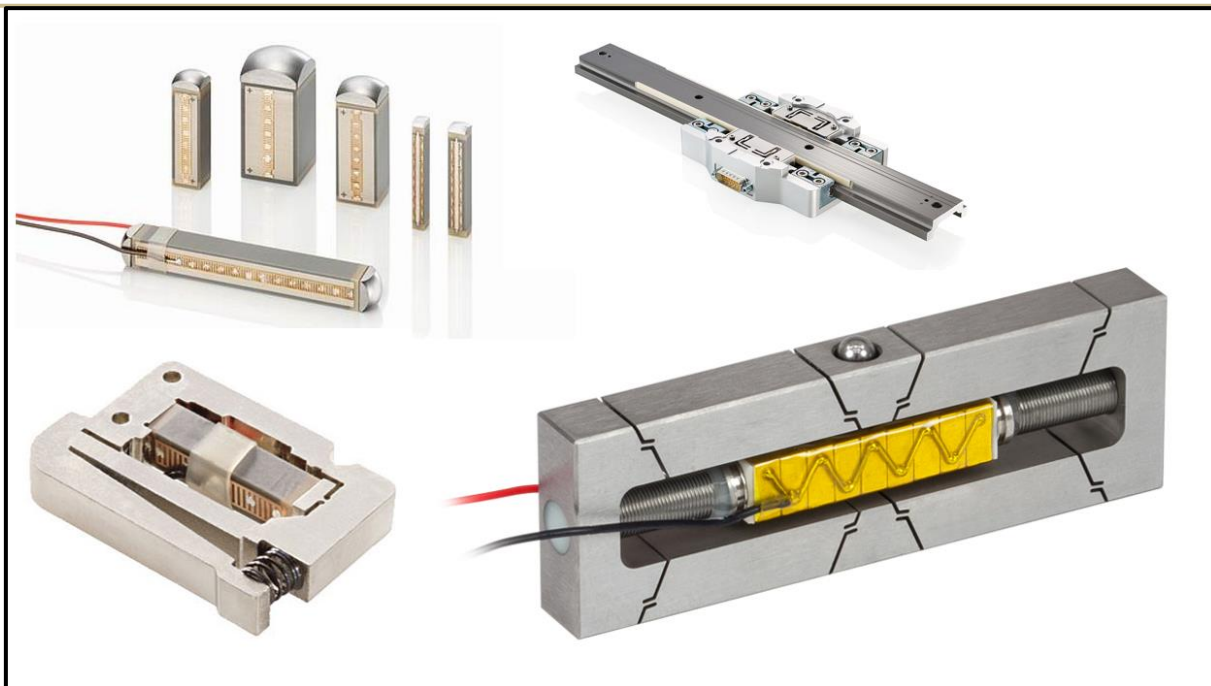
- Πιεζοηλεκτρικός επενεργητής στοίβας
- Πιεζοηλεκτρικός επενεργητής κάμψης
- Πιεζοηλεκτρικός επενεργητής κυμβάλου

3.2.10.1 Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές στοίβας

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παρουσιάζουν καταπόνηση περίπου 0,1% έως 0,2% ακόμη και για σχετικά υψηλές τάσεις. Μία από τις μεθόδους για την αποτελεσματική χρήση του υλικού ως ευαίσθητου επενεργητή είναι η χρήση πολλών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε μια στοίβα. Αυτό ενισχύει την καταπόνηση για μια δεδομένη ηλεκτρική τάση. Ένας πιεζοηλεκτρικός επενεργητής στοίβας αποτελείται από αρκετούς λεπτούς πιεζοηλεκτρικούς δίσκους ή δακτυλίους στοιβαγμένους ο ένας πάνω από τον άλλο.

Οι γειτονικοί δίσκοι είναι πολωμένοι σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι επιφάνειες συνδέονται ηλεκτρικά και εφαρμόζεται τάση στα ηλεκτρόδια όπως. Η αλλαγή στη διάσταση καθενός από τα στοιχεία αθροίζεται. Εάν υπάρχει N αριθμός στοιχείων στη στοίβα και κάθε στοιχείο αλλάξει τη διάστασή του κατά Δl , η συνολική αλλαγή στη διάσταση της στοίβας θα είναι $N\Delta l$. Για τις περισσότερες εφαρμογές, το μέγεθος του επενεργητή δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλο και οι διαστάσεις θα πρέπει να είναι μέσα σε λίγα εκατοστά.

Ο αριθμός των στοιχείων στη στοίβα πρέπει να είναι περιορισμένος και το μέγεθος κάθε στοιχείου πρέπει επίσης να είναι μικρό. Για μια στοίβα μεγέθους μήκους περίπου 10 mm, η μέγιστη διαδρομή που θα μπορούσε να επιτευχθεί είναι περίπου ένα κλάσμα του μικρομέτρου. Για τη βελτίωση της διαδρομής, η μετατόπιση του επενεργητή μεγεθύνεται χρησιμοποιώντας μηχανικά μέρη. Ο πιεζοηλεκτρικός επενεργητής αποτελείται από ορθογώνια πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Η στοίβα είναι τοποθετημένη κατά μήκος του άξονα ενός ελλειπτικού κελύφους από ανοξείδωτο χάλυβα.



Εικόνα 3.12: Διάφοροι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές.

Η στοιβία διαστέλλεται ή συστέλλεται κατά μήκος του άξονα όταν εφαρμόζεται εξωτερική τάση στα ηλεκτρόδια. Αυτή η αλλαγή στη διάσταση δημιουργεί μια μεγεθυμένη πλευρική μετατόπιση του ελλειπτικού κελύφους κατά μήκος του δευτερεύοντος άξονα. Η μετατόπιση χρησιμοποιείται ως διαδρομή του επενεργητή. Οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές στοιβίας έχουν εφαρμογές όπως βαλβίδες, διακόπτες, ρελέ, συσκευή μικροτοποθέτησης, κλείστρα και συσκευές οπτικής ευθυγράμμισης. Χρησιμοποιούνται σε έξυπνες κατασκευές, ρομπότ κ.λπ.

3.2.10.2 Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές Κάμψης

Δύο τύποι πιεζοηλεκτρικών επενεργητών κάμψης είναι ο πιεζοηλεκτρικός bimorph και ο πιεζοηλεκτρικός unimorph.

• Πιεζοηλεκτρικό Bimorph

Το πιεζοηλεκτρικό bimorph αποτελείται από δύο λεπτές λωρίδες πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους. Το bimorph μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύο διαμορφώσεις, σε σειρά και παράλληλα. Το bimorph σφίγγεται στο ένα άκρο και το άλλο άκρο είναι ελεύθερο.

Σε μια διάταξη σειράς, οι δύο λωρίδες συνδέονται έτσι ώστε οι δύο να είναι πολωμένα σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι εξωτερικές όψεις των λωρίδων υποβάλλονται σε ηλεκτρόδιο και εφαρμόζεται τάση στις δύο επιφάνειες ηλεκτροδίων όπως φαίνεται. Η μεροληψία σε κάθε μία από τις λωρίδες είναι στην ίδια κατεύθυνση, αλλά και οι δύο πολώνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Έτσι, η επάνω λωρίδα διαστέλλεται και η κάτω λωρίδα συστέλλεται λόγω του εγκάρσιου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Αυτό κάνει το bimorph να κάμπτεται προς τα κάτω.

Σε παράλληλη διαμόρφωση, η κοινή όψη των λωρίδων και οι δύο εξωτερικές όψεις είναι καλωδιωμένα. Η κοινή όψη είναι γειωμένη και μια θετική τάση εφαρμόζεται στα δύο εξωτερικά ηλεκτρόδια. Η επάνω λωρίδα διαστέλλεται και οι κάτω λωρίδες συστέλλονται, με αποτέλεσμα να κάμπτεται το bimorph. Το πιεζοηλεκτρικό bimorph είναι ικανό να παράγει

σχετικά υψηλές μετατοπίσεις. Οι εφαρμογές των δίμορφων είναι σε τοποθέτηση ακριβείας, βαλβίδες, διακόπτες κ.λπ.

- Πιεζοηλεκτρικό Unimorph

Το πιεζοηλεκτρικό unimorph είναι ένας πρόβολος που αποτελείται από μια ενιαία λωρίδα πιεζοηλεκτρικού υλικού σφισμένη στο ένα άκρο και ελεύθερη στο άλλο άκρο. Η κάμψη του πρόβολου κατά την εφαρμογή τάσης χρησιμοποιείται για επενέργηση. Το unimorph αποτελείται από ένα λεπτό φιλμ πιεζοηλεκτρικού υλικού που σχηματίζεται σε μη πιεζοηλεκτρικό υλικό υποστρώματος.

Το σύστημα συσφίγγεται στο ένα άκρο και εφαρμόζεται τάση στο πιεζοηλεκτρικό φιλμ. Λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, το πιεζοηλεκτρικό φιλμ καταπονείται. Το υπόστρωμα, το οποίο δεν είναι πιεζοηλεκτρικό, αντιστέκεται στην καταπόνηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κάμψη του unimorph. Το unimorph μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύο διαμορφώσεις: λειτουργία d_{33} και λειτουργία d_{31} .

Στη λειτουργία d_{33} , το πιεζοηλεκτρικό στρώμα πολώνεται σε κατεύθυνση παράλληλη προς το επίπεδο. Λόγω του διαμήκους πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, η μεμβράνη διαστέλλεται προς την ίδια κατεύθυνση, με αποτέλεσμα την κάμψη του unimorph. Στη λειτουργία d_{31} , το πιεζοηλεκτρικό στρώμα πολώνεται σε κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο. Λόγω του εγκάρσιου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, το πιεζοηλεκτρικό φιλμ διαστέλλεται κατά την εγκάρσια κατεύθυνση, που είναι η κατεύθυνση 1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κάμψη του unimorph.

Χρησιμοποιώντας τεχνικές μικροκατεργασίας MEMS, έχουν κατασκευαστεί πιεζοηλεκτρικοί unimorph επενεργητές μεγέθους micron. Οι πιεζοηλεκτρικές μεμβράνες εναποτίθενται σε υποστρώματα οξειδίου του πυριτίου ή νιτριδίου του πυριτίου. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι PZT, ZnO και πολυμερές PVDF. Η τεχνική επιφανειακής μικροκατεργασίας χρησιμοποιείται για την κατασκευή της κατασκευής πρόβολου. Το πιεζοηλεκτρικό bimorph και το unimorph χρησιμοποιούνται ως διακόπτες, άκρες ατομικού μικροσκοπίου, ρελέ κ.λπ.

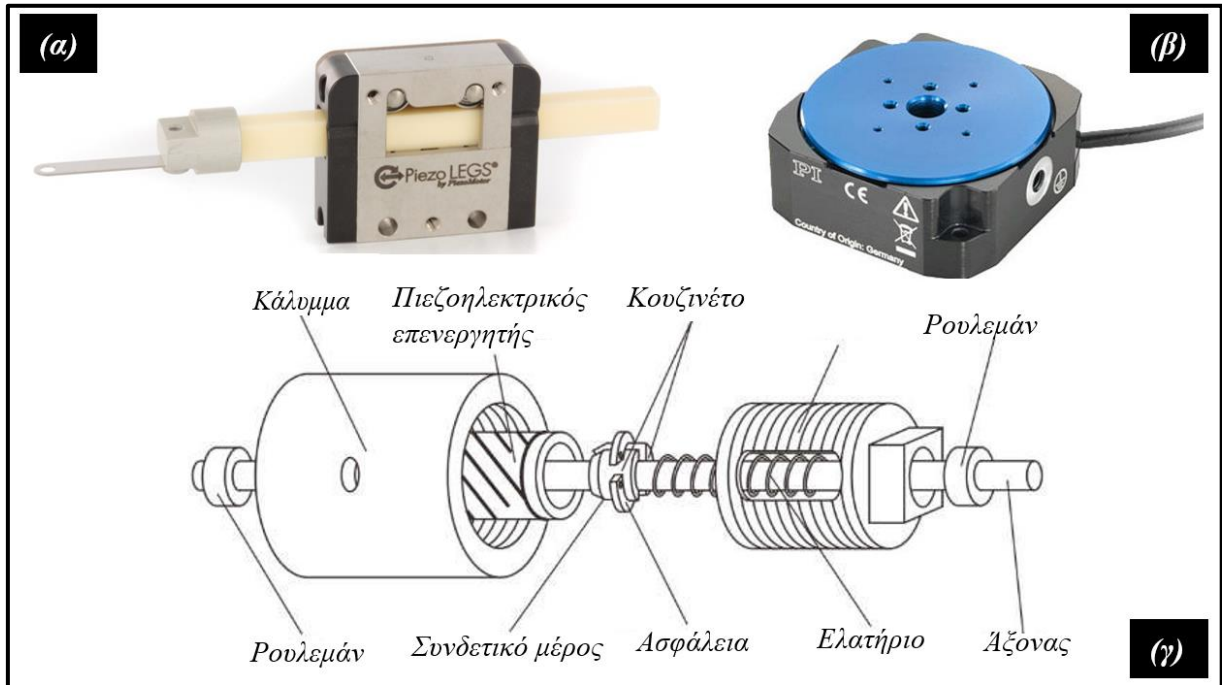
3.2.11 Πιεζοηλεκτρικά Μοτέρ

Ένας κινητήρας είναι μια συσκευή που παράγει συνεχή γραμμική ή περιστροφική κίνηση. Οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούν το έμμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για να παράγουν κίνηση, έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτρομαγνητικούς κινητήρες.

Δεν χρειάζονται ισχυρά μαγνητικά πεδία όπως οι συμβατικοί ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες. Άλλα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών κινητήρων, είναι ότι μπορούν να μικρύνουν σε μέγεθος, επίσης μπορούν να λειτουργήσουν με πολύ χαμηλότερη ισχύ και είναι πιο αξιόπιστοι.

Οι μικροκινητήρες ικανοποιούν τις απαιτήσεις εφαρμογών ακριβούς τοποθέτησης, όπως ευθυγράμμιση στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ευθυγράμμιση οπτικών ινών, τοποθέτηση ιατρικού καθετήρα, αυτόματη εστίαση, οπτικό ζουμ σε κάμερες κινητών τηλεφώνων, χειρισμός φαρμακευτικών προϊόντων κ.λπ.

Μπορούν να μικρύνουν σε μέγεθος μικρότερο από 4 mm και μπορούν να παρέχουν ακρίβεια θέσης έως 0,1 μικρόμετρα ή καλύτερη. Έχουν πολλές άλλες εφαρμογές τόσο στον τομέα της μηχανικής όσο και στον ιατρικό τομέα όπου απαιτούνται κινήσεις ακριβείας και όπου πρέπει να αποφευχθεί ένα μαγνητικό πεδίο στη γύρω περιοχή.



Εικόνα 3.13: Πιεζοηλεκτρικά μοτέρ (α) γραμμικό πιεζοηλεκτρικό μοτέρ, (β) περιστροφικό πιεζοηλεκτρικό μοτέρ, (γ) ανάλυση μερών ενός περιστροφικού πιεζοηλεκτρικού μοτέρ.

Υπάρχουν δύο τύποι πιεζοηλεκτρικών κινητήρων, ο γραμμικός κινητήρας και ο περιστροφικός κινητήρας. Σε αυτούς τους κινητήρες, η μικρή μετατόπιση ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού λόγω του έμμεσου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου μετατρέπεται σε συνεχή μεταφορική κίνηση ή σε περιστροφική κίνηση.

3.2.11.1 Γραμμικοί Πιεζοηλεκτρικοί Κινητήρες

Οι γραμμικοί πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες είναι δύο τύπων: ένας τύπος λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες και ο άλλος σε συχνότητες υπερήχων. Ένας τύπος γραμμικού πιεζοηλεκτρικού κινητήρα χαμηλής συχνότητας είναι ο τύπος σύσφιξης, ο οποίος παράγει γραμμική κίνηση ενός ολισθητήρα ακριβώς όπως η κίνηση ενός σκουληκιού. Αυτός ο τύπος πιεζοκινητήρα, που ονομάζεται κινητήρας "inch worm", σχεδιάστηκε για πρώτη φορά και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από την Burleigh Instruments Inc.

Ο κινητήρας τύπου ατέρμονα αποτελείται από τρία σετ πιεζοηλεκτρικών επενεργητών: δύο είναι επενεργητές σύσφιξης και ο ένας είναι ο κινητήριος επενεργητής. Οι επενεργητές λειτουργούν με τη σειρά για να επιτευχθεί η κίνηση του ολισθητήρα, ο οποίος πρόκειται να μετακινηθεί. Οι δύο επενεργητές 1 και 2 είναι οι επενεργητές σφικτήρα, οι οποίοι συγκρατούν τον ολισθητήρα εναλλάξ. Ο επενεργητής 3 είναι ο επενεργητής μετάδοσης κίνησης, ο οποίος εκτείνεται ή συστέλλεται προς την κατεύθυνση της κίνησης του ολισθητήρα.

Αρχικά, όλοι οι επενεργητές αποσυνδέονται από το ρυθμιστικό. Όταν ένας από τους επενεργητές σφικτήρα συμπλέκει το ρυθμιστικό, ο άλλος επενεργητής σφικτήρα

αποσυνδέεται. Εναλλακτικά, ένας από τους επενεργητές του σφιγκτήρα συμπλέκει το ολισθητήρα. Ο επενεργητής μετάδοσης κίνησης εκτείνεται ή συστέλλεται πλευρικά προς την κατεύθυνση της κίνησης του ολισθητήρα.

3.2.11.2 Πιεζοηλεκτρικοί Περιστροφικοί Κινητήρες Υπερήχων

Οι πιεζοηλεκτρικοί περιστροφικοί κινητήρες υπερήχων είναι δύο τύπων:

- ✓ Τύπος στάσιμου κύματος
- ✓ Τύπος κινούμενου κύματος

- Τύπος στάσιμου κύματος

Ο πιεζοηλεκτρικός κινητήρας τύπου στάσιμου κύματος λειτουργεί με βάση την αρχή της δημιουργίας στάσιμου κύματος σε έναν πιεζοηλεκτρικό δακτύλιο που λειτουργεί ως στάτορας. Σε ένα από τα συστήματα, ένας πιεζοηλεκτρικός δακτύλιος που δονείται ακτινικά στη συχνότητα συντονισμού του μεταφέρει τους κραδασμούς σε ένα σετ ωθητικών ελατηρίων που είναι προσαρτημένα στον ρότορα. Οι ωθητές είναι διατεταγμένοι έτσι ώστε η ακτινική δόνηση του δακτυλίου να προκαλεί κάθετη δόνηση των ωθητικών λόγω της μετατόπισης φάσης. Αυτό κάνει τους ωθητές να κινούνται σε ελλειπτική διαδρομή.

- Τύπος κινούμενου κύματος.

Η κίνηση μεταφέρεται μέσω της τριβής στον ρότορα προκαλώντας περιστροφή του ρότορα. Ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει σε συνεχή ή βηματική λειτουργία. Η συχνότητα συντονισμού του δακτυλίου είναι στην περιοχή υπερήχων (50–80 kHz). Για συνεχή λειτουργία, η ημιτονοειδής τάση της απαιτούμενης συχνότητας εφαρμόζεται στον δακτύλιο.

Ο πιεζοηλεκτρικός κινητήρας τύπου κινούμενου κύματος αποτελείται από έναν πιεζοηλεκτρικό δακτύλιο που δονείται στη φυσική του συχνότητα. Ο στάτορας, ο οποίος είναι ένας λεπτός δακτυλιοειδής μεταλλικός δακτύλιος, είναι προσαρτημένος στον πιεζοηλεκτρικό δακτύλιο. Ο ρότορας συνδέεται με άξονα με τον στάτορας. Ο στάτορας και ο ρότορας έχουν έναν κοινό άξονα με ένα ρουλεμάν στο κέντρο.

Ο πιεζοηλεκτρικός δακτύλιος διεγείρεται στη φυσική του συχνότητα (30–50 kHz) για να δημιουργήσει ένα κινούμενο κύμα. Για τη δημιουργία του κινούμενου κύματος, ο πιεζοηλεκτρικός δακτύλιος χωρίζεται σε n τμήματα και κάθε τμήμα πολώνεται έτσι ώστε τα εναλλακτικά τμήματα να πολώνονται στην ίδια κατεύθυνση και τα γειτονικά τμήματα να πολώνονται προς την αντίθετη κατεύθυνση.

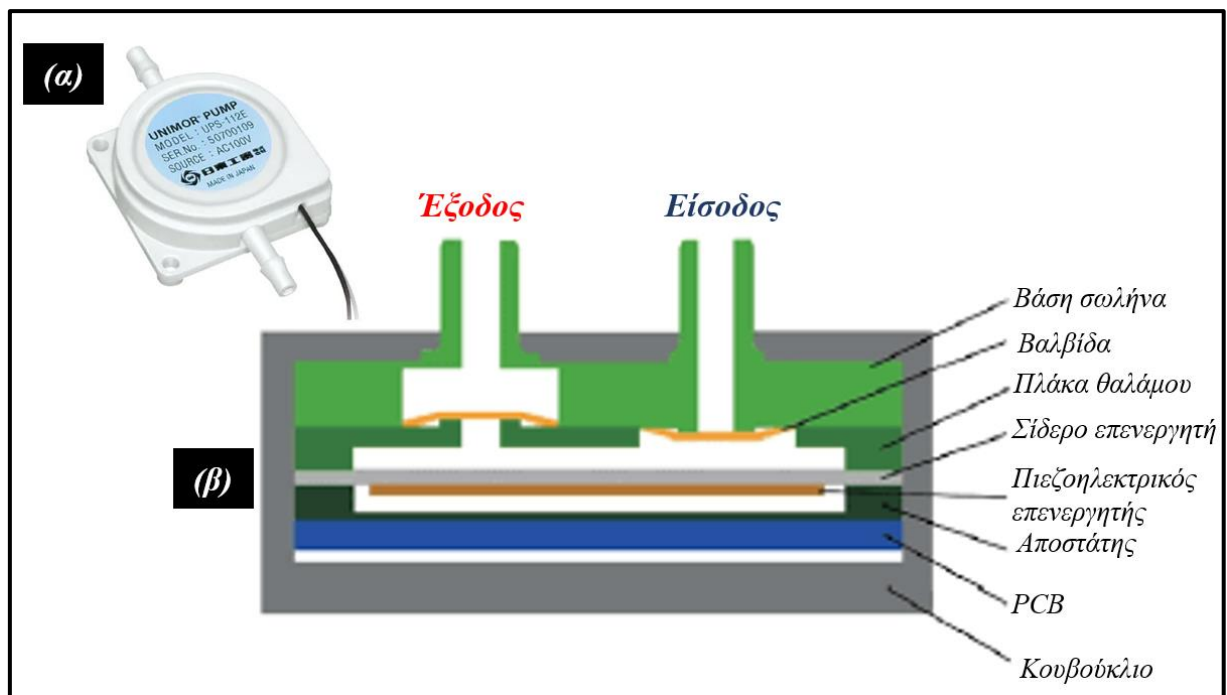
Ημιτονοειδής τάσεις εφαρμόζονται στις δύο ομάδες έτσι ώστε να βγάζουν τάσεις 90° εκτός φάσης. Έτσι δημιουργείται ένα κινούμενο κύμα στον πιεζοηλεκτρικό δακτύλιο και ο στάτορας ακολουθεί τις δονήσεις του πιεζοηλεκτρικού δακτυλίου. Ο ρότορας σε επαφή με τον στάτορα αποκτά περιστροφική κίνηση μέσω της τριβής. Η συχνότητα συντονισμού καθορίζεται από το μέγεθος του κινητήρα.

Οι κινητήρες μπορούν να διαμορφωθούν με διαστάσεις 20–60 mm. Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες διαφόρων σχεδίων έχουν σχεδιαστεί και κατοχυρωθεί με διπλώματα ευρεσιτεχνίας από

πολλούς ερευνητές. Εξαιρετικά μικροί πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες μεγέθους λίγων χιλιοστών έχουν κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τεχνικές μικροκατασκευής (MEMS).

3.2.12 Πιεζοηλεκτρική Αντλία

Οι μικροαντλίες είναι βασικά συστατικά των ρευστοποιημένων συστημάτων, στα οποία απαιτούνται εξαιρετικά μικροί όγκοι ρευστών για να μεταφερθούν ελεγχόμενα. Παραδείγματα ρευστοποιητικών συστημάτων περιλαμβάνουν εκτυπωτές inkjet, συστήματα έγχυσης καυσίμου, αισθητήρες αερίων, βιοχημικές αναλύσεις, σύστημα γενετικής ανάλυσης, συστήματα χορήγησης φαρμάκων, κ.λπ. Διάφοροι μηχανισμοί επενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό μικροαντλιών.



Εικόνα 3.14: Πιεζοηλεκτρική αντλία (α) μικρή πιεζοηλεκτρική αντλία, (β) επεξήγηση μερών πιεζοηλεκτρικής αντλίας.

Οι πιεζοηλεκτρικές μικροαντλίες χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές για τη δημιουργία της κινητήριας δύναμης. Μια πιεζοηλεκτρική παλινδρομική αντλία μετατόπισης αποτελείται βασικά από έναν θάλαμο αντλίας με ένα διάφραγμα, δύο βαλβίδες και έναν επενεργητή για την κίνηση του διαφράγματος της αντλίας. Στις μικροαντλίες που βασίζονται σε MEMS, ο θάλαμος διαμορφώνεται σε ένα υπόστρωμα πυριτίου που βρίσκεται ανάμεσα σε γυάλινες πλάκες χρησιμοποιώντας τεχνικές μικροκατεργασίας.

Ο θάλαμος είναι εφοδιασμένος με δύο βαλβίδες μονής κατεύθυνσης για είσοδο και έξοδο. Μια παραμορφώσιμη πλάκα από πυρίτιο, γυαλί ή πλαστικό που λειτουργεί ως διάφραγμα στη μία πλευρά του θαλάμου. Ένας πιεζοηλεκτρικός επενεργητής χρησιμοποιείται για την επενέργεια του διαφράγματος. Στην πράξη, για το σχεδιασμό της μικροαντλίας χρησιμοποιούνται πολλά στρώματα υλικών.

Ο πιεζοηλεκτρικός επενεργητής οδηγεί το διάφραγμα για να αυξάνει και να μειώνει εναλλάξ τον όγκο του θαλάμου της αντλίας. Στη διαδρομή αναρρόφησης, ο όγκος του θαλάμου αυξάνεται. Το υγρό από τη δεξαμενή αναρροφάται στον θάλαμο μέσω της βαλβίδας εισαγωγής.

Στη διαδρομή εκκένωσης, ο όγκος του θαλάμου μειώνεται. Το υγρό στο θάλαμο εκκενώνεται μέσω της βαλβίδας εξόδου.

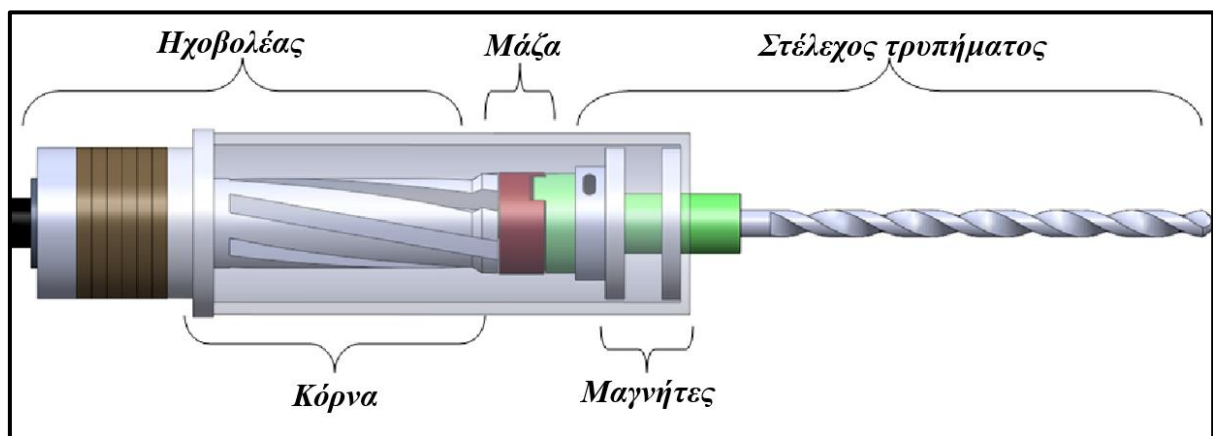
Έχουν σχεδιαστεί παλινδρομικές αντλίες εκτόπισης με περισσότερους από έναν θαλάμους και με αντίστοιχους επενεργητές. Οι επενεργητές λειτουργούν διαδοχικά για να κάνουν το ρευστό να ρέει από την είσοδο στην έξοδο. Μια πιεζοηλεκτρική μικροαντλία βασισμένη σε MEMS με τρεις θαλάμους αναφέρεται από τον J. G. Smits. Η μικροαντλία λειτουργεί σε συχνότητα 15 Hz και είναι ικανή για ρυθμό άντλησης 0,008 ml/min. Οι συχνότητες λειτουργίας των διαφόρων αντλιών είναι στην περιοχή από 15–150 Hz. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την επενέργιση είναι PZT ή πολυμερικά πιεζοηλεκτρικά PVDF.

Οι παλινδρομικές αντλίες εκτόπισης είναι χρήσιμες όπου απαιτείται συνεχής ροή ελεγχόμενων ποσοτήτων ρευστού. Ένας άλλος τύπος πιεζοηλεκτρικής μικροαντλίας είναι ο τύπος drop-on-demand, ο οποίος χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές ink-jet. Η αντλία χρησιμοποιεί έναν πιεζοηλεκτρικό επενεργητή για να τραβήξει μια μικρή ποσότητα μελανιού από τη δεξαμενή και να την εξαναγκάσει να βγει από το ακροφύσιο με τη μορφή μικρών σταγονιδίων.

Οι παλμοί της τάσης εισόδου στον επενεργητή μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να λαμβάνουν μια επακριβώς ελεγχόμενη ποσότητα μελανιού από το ακροφύσιο τον απαιτούμενο χρόνο.

3.2.13 Πιεζοηλεκτρικό Τρυπάνι Υπερήχων

Το έμμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για το σχεδιασμό ενός πιεζοηλεκτρικού τρυπανιού. Η δόνηση του πιεζοηλεκτρικού υλικού σε υψηλές συχνότητες υπερήχων χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει την άκρη του τρυπανιού. Οι δονήσεις υψηλής συχνότητας του άκρου μπορούν να ανοίξουν τρύπες ακριβείας μέσα από σκληρά υλικά.



Εικόνα 3.15: Επεξήγηση μερών ενός πιεζοηλεκτρικού τρυπανιού.

Η διάνοιξη βαθιάς οπής εξαιρετικά μικρών διαμέτρων της τάξης του 1 mm ή μικρότερη έχει επιτευχθεί με πιεζοηλεκτρικά τρυπάνια. Άλλα πλεονεκτήματα ενός πιεζοηλεκτρικού τρυπανιού υπερήχων είναι η υψηλή ποιότητα επιφάνειας, η δυνατότητα δημιουργίας οπών διαφορετικού σχήματος και η ικανότητα διάνοιξης οπών σε κεραμικά υλικά. Το πιεζοηλεκτρικό τρυπάνι αποτελείται από μια στοίβα πιεζοηλεκτρικών κεραμικών δακτυλίων (PZT) που υπόκειται σε δονήσεις σε συχνότητες υπερήχων (20–50 kHz) διεγείροντας με τάση AC.

Η διαμήκης δόνηση του πιεζοηλεκτρικού υλικού μεταφέρεται στο τρυπάνι, το οποίο είναι κατάλληλα στερεωμένο στην κεραμική στοιβία. Το πιεζοηλεκτρικό τρυπάνι είναι ειδικά κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτούνται μικρά, ελαφριά, φορητά τρυπάνια. Παραδείγματα είναι στην οδοντιατρική χειρουργική, στην ορθοπεδική χειρουργική και στην εξερεύνηση του διαστήματος.

Ο Δρ. Yoseph Bar-Cohen και η ομάδα του έχουν πραγματοποιήσει την κατασκευή ενός πιεζοηλεκτρικού τρυπανιού που χρησιμοποιείται για την εξερεύνηση εξωγήινων σωμάτων της NASA. Το τρυπάνι έχει χρησιμοποιηθεί στην εξερεύνηση του Άρη για τη διάνοιξη δειγμάτων πυρήνα πετρωμάτων στον Άρη για τη δοκιμή των συστατικών του.

3.2.14 Καθαριστής Υπερήχων

Τα καθαριστικά υπερήχων χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικές ή ηλεκτροσυστολικές γεννήτριες υπερήχων για την παραγωγή υπερηχητικών πεδίων. Τα περισσότερα από τα εμπορικά διαθέσιμα καθαριστικά υπερήχων χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες. Η συχνότητα λειτουργίας των καθαριστικών υπερήχων είναι στην περιοχή 20–40 kHz.

Σε ένα καθαριστικό υπερήχων, ένα υπερηχητικό πεδίο παράγει κύματα πίεσης υψηλής συχνότητας σε κατάλληλο υγρό μέσο. Τα προς καθαρισμό αντικείμενα διατηρούνται βυθισμένα στο υγρό. Τα κύματα πίεσης υψηλής συχνότητας δημιουργούν εκατομμύρια φυσαλίδες κενού μεγέθους μm στο υγρό, οι οποίες συνεχώς καταρρέουν και επανεμφανίζονται.



Εικόνα 3.16: Καθαριστής υπερήχων με την χρήση πιεζοηλεκτρικού ηχοβολέα (β).

Το φαινόμενο του σχηματισμού και της κατάρρευσης μικροφυσαλίδων λόγω κυμάτων πίεσης υψηλής συχνότητας ονομάζεται σπηλαιώση. Όταν τα κύματα πίεσης υψηλής συχνότητας ταξιδεύουν στο υγρό μέσο, δημιουργούνται μικροσκοπικές φυσαλίδες στις θέσεις της

αραίωσης. το μέγεθος αυτών των φυσαλίδων ταλαντώνεται λόγω της περιοδικής διακύμανσης της πίεσης και όταν τελικά μεγαλώσουν σε ασταθές μέγεθος, καταρρέουν βίαια, με αποτέλεσμα εκρήξεις.

Αυτό προκαλεί τη δημιουργία υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης στις τοποθεσίες. Ένας μεγάλος αριθμός φυσαλίδων που συνεχώς αναπτύσσονται και καταρρέουν στο υγρό μέσο βοηθά στην μετατόπιση των ρύπων από την επιφάνεια και άλλες μικρές κοιλότητες στο αντικείμενο που πρόκειται να καθαριστεί. Το υγρό που χρησιμοποιείται στο καθαριστικό πρέπει να είναι ένα κατάλληλο διάλυμα που μπορεί να διαλύσει τους ρύπους που πετάγονται έξω από το αντικείμενο. Ο καθαρισμός με υπερήχους επιτρέπει τον καθαρισμό εσωτερικών επιφανειών σύνθετων εξαρτημάτων μηχανών με υψηλό βαθμό καθαρισμού.

Χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό αντικειμένων όπως υποστρώματα για επίστρωση λεπτής μεμβράνης, μικρά πολύπλοκα μέρη βιομηχανικού εξοπλισμού, χειρουργικά εργαλεία, κοσμήματα κ.λπ. Ένα πιεζοηλεκτρικό καθαριστικό υπερήχων αποτελείται από μια στοίβα πιεζοηλεκτρικών δίσκων με χαλύβδινη μάζα πίσω και ένα μπροστινό αλουμίνιο, μάζα ζεύξης συναρμολογημένη κάτω από τον πυθμένα μιας ισχυρής χαλύβδινης δεξαμενής.

Το διάλυμα καθαριστικού υγρού γεμίζεται στη δεξαμενή και τα προς καθαρισμό αντικείμενα διατηρούνται βυθισμένα στο υγρό. Ένας κοχλίας συμπίεσης χρησιμοποιείται για τη συμπίεση της στοίβας μεταξύ μιας χαλύβδινης μάζας. Μια χαλύβδινη πλάκα στερεωμένη στην κορυφή της μπροστινής μάζας είναι προσαρτημένη στο κάτω μέρος της χαλύβδινης δεξαμενής, η οποία περιέχει το υγρό καθαρισμού.

Το καθαριστικό υγρό είναι συνήθως ένα υδατικό διάλυμα κατάλληλου απορρυπαντικού που μπορεί να απομακρύνει αποτελεσματικά τους ρύπους. Η λύση πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με τον τύπο των ρύπων που θα αφαιρεθούν από το αντικείμενο. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στην επιλογή της λύσης είναι ότι πρέπει να έχει υψηλή τάση ατμών και χαμηλή επιφανειακή τάση για να λειτουργήσει αποτελεσματικότερα.

Η θερμοκρασία του υγρού κανονικά διατηρείται στην περιοχή 50°–60°C. Τα καθαριστικά υπερήχων κατασκευάζονται σε διαφορετικά μεγέθη που κυμαίνονται από επιτραπέζιους τύπους που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό μικρών αντικειμένων όπως κοσμήματα, υποστρώματα λεπτής μεμβράνης, μικρά εξαρτήματα μηχανημάτων, χειρουργικά εργαλεία κ.λπ., έως μονάδες πολύ μεγάλου μεγέθους για τον καθαρισμό μεγάλων εξαρτημάτων βιομηχανικού εξοπλισμού.

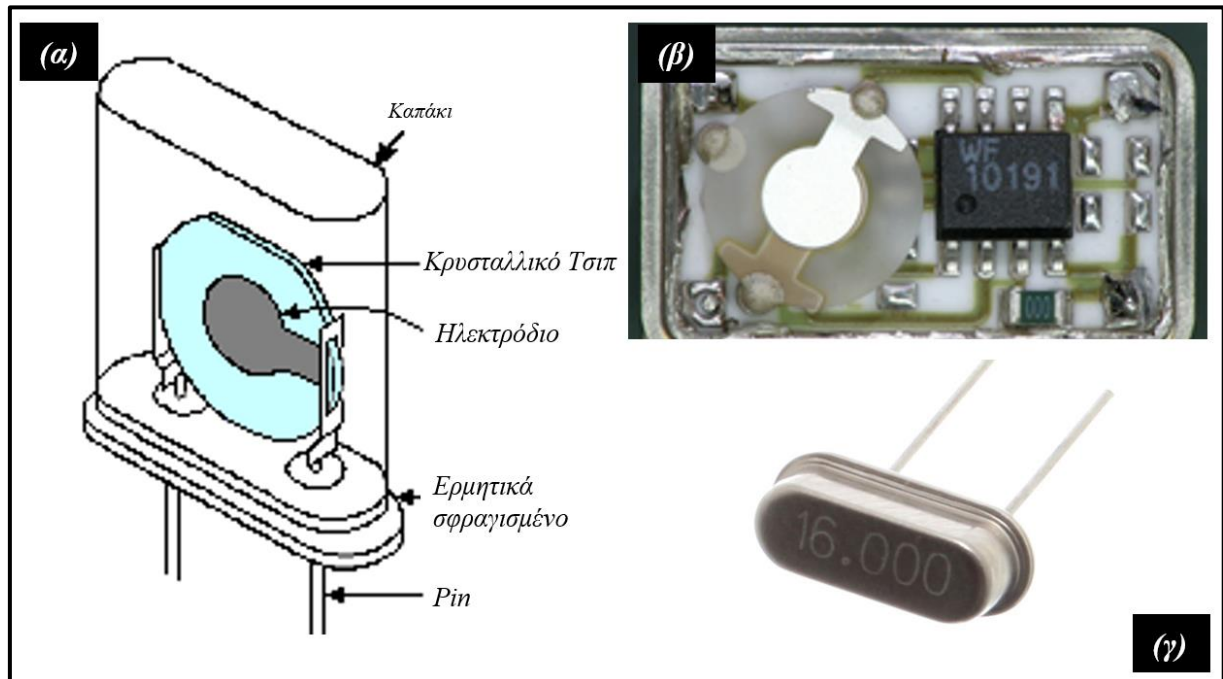
3.2.15 Ταλαντωτής Χαλαζιακών Κρυστάλλων

Ένας ταλαντωτής κρυστάλλων χαλαζία είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί τόσο άμεσες όσο και έμμεσες πιεζοηλεκτρικές επιδράσεις. Ο λεπτός κρύσταλλος κοπής AT σε μορφή λεπτής πλάκας ή με τη μορφή πιρουνιού συντονισμού χρησιμοποιείται για τον κρυσταλλικό ταλαντωτή. Η συσκευή χρησιμοποιείται ως εξάρτημα σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ταλάντωσης. Το ηλεκτρικό σήμα εξόδου τροφοδοτείται πίσω στον κρύσταλλο με τον οποίο μπορεί να διατηρηθεί η ταλάντωση.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σταθερό σήμα συχνότητας. Οι ταλαντωτές σταθερής συχνότητας έχουν πολλές εφαρμογές, για παράδειγμα, σε πομπούς και δέκτες για επικοινωνία, σε

υπολογιστές και άλλες συσκευές, που ελέγχονται από υπολογιστές για ακριβή σήματα και για τη διατήρηση ακριβούς χρόνου σε ρολόγια.

Ο ταλαντωτής είναι συντονισμένος στη φυσική συχνότητα του κρυστάλλου χαλαζία. Η μικρή ποσότητα ενέργειας που τροφοδοτείται πίσω στον κρύσταλλο τον αναγκάζει να δονείται στη φυσική του συχνότητα. Οι δονήσεις παράγουν ηλεκτρικό σήμα στην ίδια συχνότητα, το οποίο ανατροφοδοτείται για να διατηρήσει τη δόνηση στη σταθεροποιημένη συχνότητα. Η συχνότητα συντονισμού του κρυστάλλου χαλαζία που χρησιμοποιείται στα ρολόγια και τα ρολόγια επιλέγεται ως 32,768 kHz.



Εικόνα 3.17: Κρυσταλλικός ταλαντωτής χαλαζία (α) ανάλυση των επιμέρους κομματιών, (β) τομή ενός "ρολογιού", (γ) κρυσταλλικός ταλαντωτής χαλαζία για ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Αυτή η συχνότητα ικανοποιεί τις απαιτήσεις κατάλληλου μεγέθους κρυστάλλου, διάρκειας ζωής μπαταρίας και σταθερότητας. Το σήμα από τον ταλαντωτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικούς παλμούς της απαιτούμενης συχνότητας χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ηλεκτρικοί παλμοί χρησιμοποιούνται για την κίνηση βηματικών κινητήρων ή για την λειτουργία συσκευών οθόνης επτά τμημάτων.

Σε εφαρμογές όπως ρολόγια υπολογιστών, πομποί και δέκτες επικοινωνίας, χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι πολύ υψηλότερων συχνοτήτων συντονισμού, της τάξης πολλών megahertz και υψηλότερων.

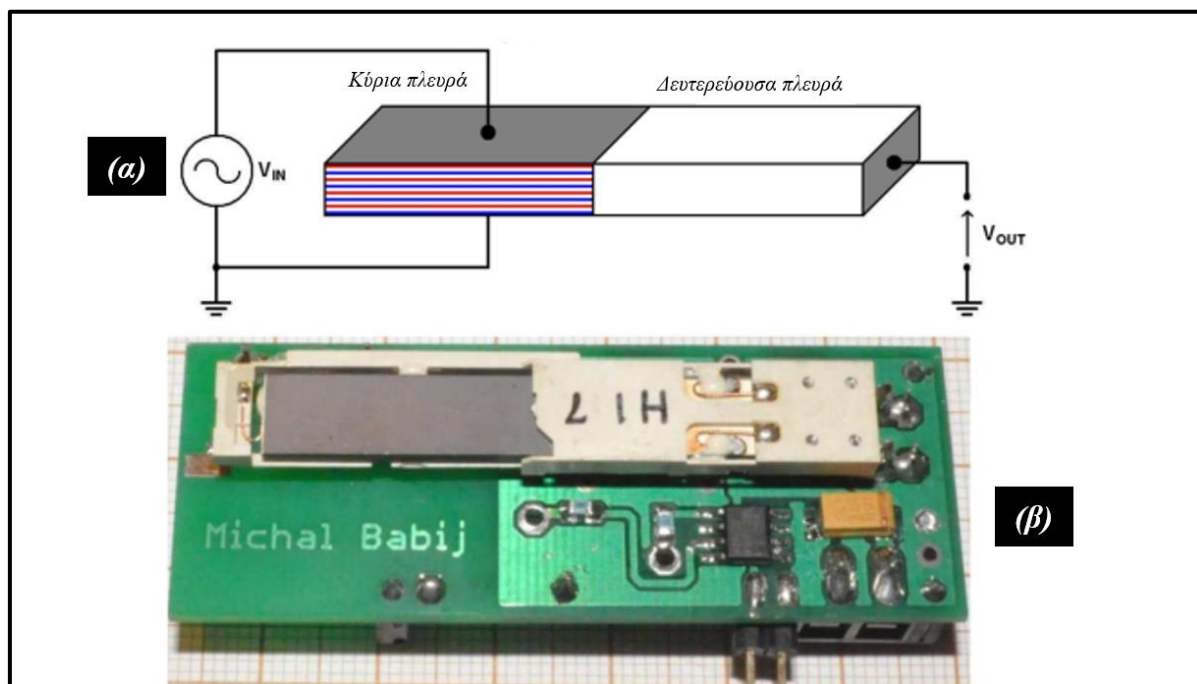
3.2.16 Σταθεροποιητής Χαλαζιακών Κρυστάλλων

Ο σταθεροποιητής χαλαζιακού κρυστάλλου, βασίζεται στην αρχή ότι η συχνότητα ενός δονούμενου κρυστάλλου χαλαζία μετατοπίζεται όταν μια μικρή μάζα προστίθεται στα ηλεκτρόδια της ταλαντούμενης κρυσταλλικής πλάκας. Δεδομένου ότι μια πολύ μικρή μετατόπιση συχνότητας μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κυκλώματα, η ευαισθησία της ισορροπίας κρυστάλλων χαλαζία είναι εγγενώς πολύ υψηλή. Με τη ζυγαριά μπορούν να μετρηθούν βάρη της τάξης των νανογραμμαρίων.

Οι κρύσταλλοι χαλαζία γίνεται να ταλαντώνονται σε λειτουργία διάτμησης στη συχνότητα συντονισμού εφαρμόζοντας τάση AC. Η συχνότητα είναι συνήθως στην περιοχή πολλών megahertz. Τα πιρούνια συντονισμού κρυστάλλων χαλαζία έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε μικροζυγαριές. Κανονικά, η ζυγαριά χρησιμοποιείται σε κενό ή σε αέρια περιβάλλοντα. Εφαρμογές τέτοιων ευαίσθητων ζυγαριών συναντιόνται στις βιοϊατρικές επιστήμες, την ηλεκτροχημεία και την τριβολογία.

3.2.17 Πιεζοηλεκτρικός Μετασχηματιστής

Ένας πιεζοηλεκτρικός μετασχηματιστής είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την αύξηση ή τη μείωση της τάσης εισόδου. Στον μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται τόσο άμεσα όσο και έμμεσα πιεζοηλεκτρικά φαινόμενα. Τα πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών μετασχηματιστών έναντι των συμβατικών ηλεκτρομαγνητικών μετασχηματιστών είναι ότι μπορούν να κατασκευαστούν πολύ μικροί σε μέγεθος, έχουν μικρό βάρος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα υψηλών τάσεων.



Εικόνα 3.18: Πιεζοηλεκτρικός μετασχηματιστής (α) ανάλυση λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού μετασχηματιστή (β) πιεζοηλεκτρικός μετασχηματιστής σε συσκευή.

Έχουν εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή τάση και περιορισμό στο χώρο. Οι εφαρμογές των ανοδικών μετασχηματιστών περιλαμβάνουν τροφοδοσία για λαμπτήρες φθορισμού ψυχρής καθόδου για λειτουργία LCD σε φορητούς υπολογιστές, φορητούς υπολογιστές, τηλεοράσεις επίπεδης οθόνης και άλλες συσκευές.

Τρεις τύποι πιεζοηλεκτρικών μετασχηματιστών είναι:

- Πιεζοηλεκτρικός μετασχηματιστής Rosen
- Μετασχηματιστής διαμήκους δόνησης
- Μετασχηματιστής ακτινικής δόνησης

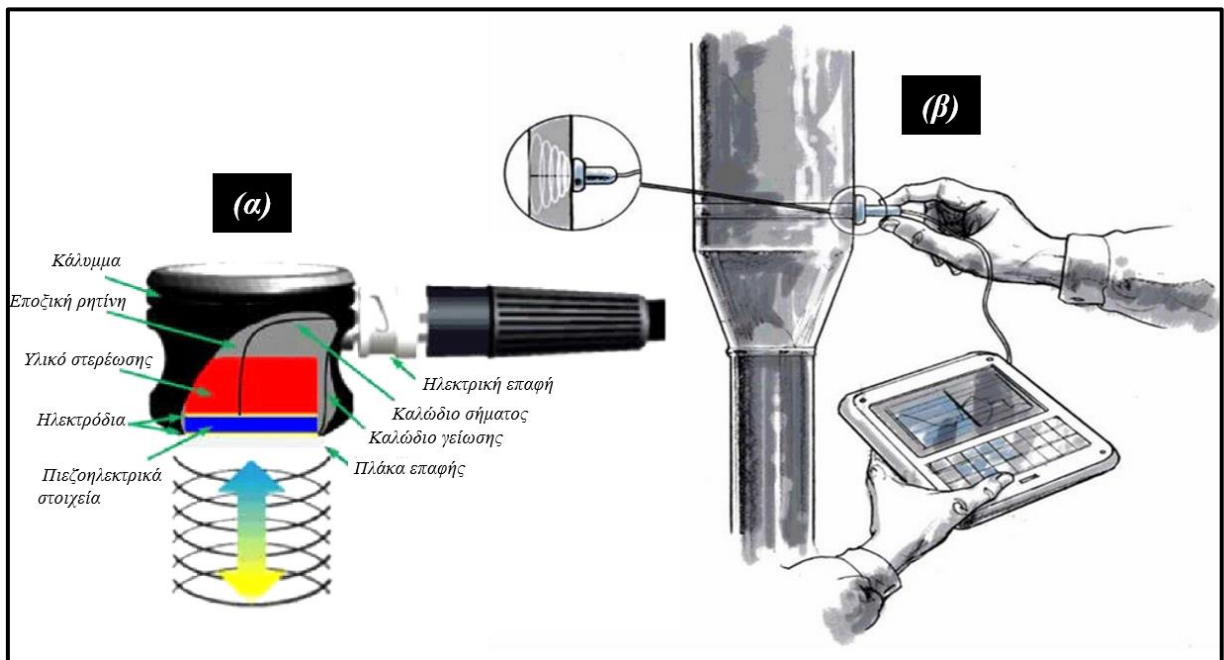
Οι δύο πρώτοι τύποι έχουν μελετηθεί ευρύτερα και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές.

3.2.18 Μη Καταστροφική Μέθοδος Δοκιμής Υλικών (NDT)

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την ανίχνευση ελαττωμάτων και τη μέτρηση του πάχους των υλικών είναι η τεχνική Ultrasonic NDT. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται συχνότερα για αυτή την τεχνική.

Η αρχή της δοκιμής υπερήχων είναι η μετάδοση ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας μέσω του υλικού και η μελέτη της διάδοσης της δέσμης στο υλικό μέσω μετάδοσης, ανάκλασης και εξασθένησης. Η μελέτη βοηθά στον εντοπισμό ελαττωμάτων όπως ρωγμές διάβρωση και ακαθαρσίες στο υλικό. Η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του πάχους του υλικού δοκιμής.

Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία υπερηχητικών κυμάτων. Όταν μια δέσμη υπερήχων προσπίπτει σε ένα στερεό υλικό, τόσο τα διαμήκη όσο και τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται στο υλικό. Τα διαμήκη κύματα είναι εκείνα στα οποία τα σωματίδια στο μέσο δονούνται παράλληλα με την κατεύθυνση της δόνησης. Εγκάρσια κύματα είναι εκείνα στα οποία η δόνηση των σωματιδίων στο μέσο είναι κάθετη προς την κατεύθυνση διάδοσης. Τα διαμήκη κύματα έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με τα εγκάρσια κύματα.



Εικόνα 3.19: Συσσκευή υπερήχων για μη καταστροφική μέθοδο ελέγχου υλικών.

Δύο τύποι τεχνικών που χρησιμοποιούνται στο NDT είναι η τεχνική ευθείας δέσμης και η τεχνική γωνιακής δέσμης. Στην τεχνική της ευθείας δέσμης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μόνο ηχοβολέας ή δύο ηχοβολείς. Στη μέθοδο του απλού μορφοτροπέα, ο ίδιος ηχοβολέας χρησιμοποιείται τόσο ως γεννήτρια όσο και ως ανιχνευτής υπερηχητικών κυμάτων. Τα υπερηχητικά κύματα με τη μορφή παλμών δημιουργούνται στον μορφοτροπέα και αφήνονται να διαδοθούν μέσω του υλικού δοκιμής. Η διαμήκης δέσμη υπερήχων διέρχεται κατευθείαν

μέσα από το υλικό και όταν φτάσει στην ακραία όψη του αντικειμένου δοκιμής, ανακλάται πίσω.

Ο ανακλώμενος παλμός ανιχνεύεται από τον ίδιο μορφοτροπέα. Τόσο ο παλμός εισόδου όσο και ο ανακλώμενος παλμός εμφανίζονται σε μια οθόνη CRT. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο παλμών δίνει πληροφορίες για το πάχος του δείγματος. Εάν το υλικό έχει ελαττώματα όπως ρωγμές, τρύπες ή ακαθαρσίες στη διαδρομή της δέσμης υπερήχων, παρατηρούνται πρόσθετοι παλμοί μεταξύ των δύο παλμών επειδή τα κύματα αντανακλώνται στις θέσεις των ελαττωμάτων. Οι ανακλώμενοι παλμοί είναι μικρότερου πλάτους λόγω της απορρόφησης στο υλικό.

Μετρώντας με ακρίβεια το χρονικό διάστημα μεταξύ των παλμών, μπορεί να προσδιοριστεί το πάχος του δείγματος και η θέση του ελαττώματος. Στην τεχνική της ευθείας δέσμης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μετατροπείς, ο ένας για τη δημιουργία της δέσμης υπερήχων και ο άλλος για την ανίχνευση της δέσμης. Η δέσμη υπερήχων που παράγεται από τη γεννήτρια αφήνεται να περάσει μέσα από το υλικό και η εκπεμπόμενη δέσμη ανιχνεύεται στο άλλο άκρο από τον ανιχνευτή.

Οι δύο παλμοί, δηλαδή ο προσπίπτων παλμός και ο εκπεμπόμενος παλμός, εμφανίζονται στην οθόνη CRT, από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί το πάχος του υλικού ή η παρουσία ελαττωμάτων στη διαδρομή της δέσμης. Στην τεχνική της γωνιακής δέσμης χρησιμοποιούνται δύο μορφοτροπείς. Η δέσμη υπερήχων προσπίπτει στο υλικό υπό γωνία χρησιμοποιώντας ένα πλαστικό υλικό σε σχήμα σφήνας στην κεφαλή του μορφοτροπέα.

Τα προσπίπτοντα εγκάρσια κύματα μέσω του υλικού δοκιμής αντανακλώνται στα ελαττώματα ή στο άλλο άκρο του υλικού και φτάνουν στον ανιχνευτή τοποθετημένο σε κατάλληλη θέση υπό γωνία. Οι γωνίες ανίχνευσης των μορφοτροπέων επιλέγονται έτσι ώστε να λαμβάνεται η ανακλώμενη δέσμη από τις θέσεις όπου υπάρχει υποψία ελαττώματος. Οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς υπερήχων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μετρητές πάχους ή ανιχνευτές ελαττωμάτων για σχεδόν οποιοδήποτε υλικό: μέταλλα, πλαστικά ή κεραμικά.

Στα μέταλλα και τα κεραμικά, η εξασθένηση δεν είναι μεγάλη, ενώ στα πλαστικά υπάρχει υπερβολική εξασθένηση λόγω απορρόφησης. Επομένως, το εύρος πάχους των πλαστικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτήν την τεχνική είναι περιορισμένο.

3.2.19 Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές και Αισθητήρες στην Ρομποτική

Ένα έξυπνο σύστημα, είναι αυτό που μπορεί να εκτελέσει συνδυαστικά τις λειτουργίες τόσο της αίσθησης όσο και της επεργασίας πάνω στο σύστημα, όπως κάνουν τα ζώοντα όντα. Τα βιομηχανικά και ιατρικά ρομπότ αποτελούν παραδείγματα έξυπνων συστημάτων. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και επενεργητές.

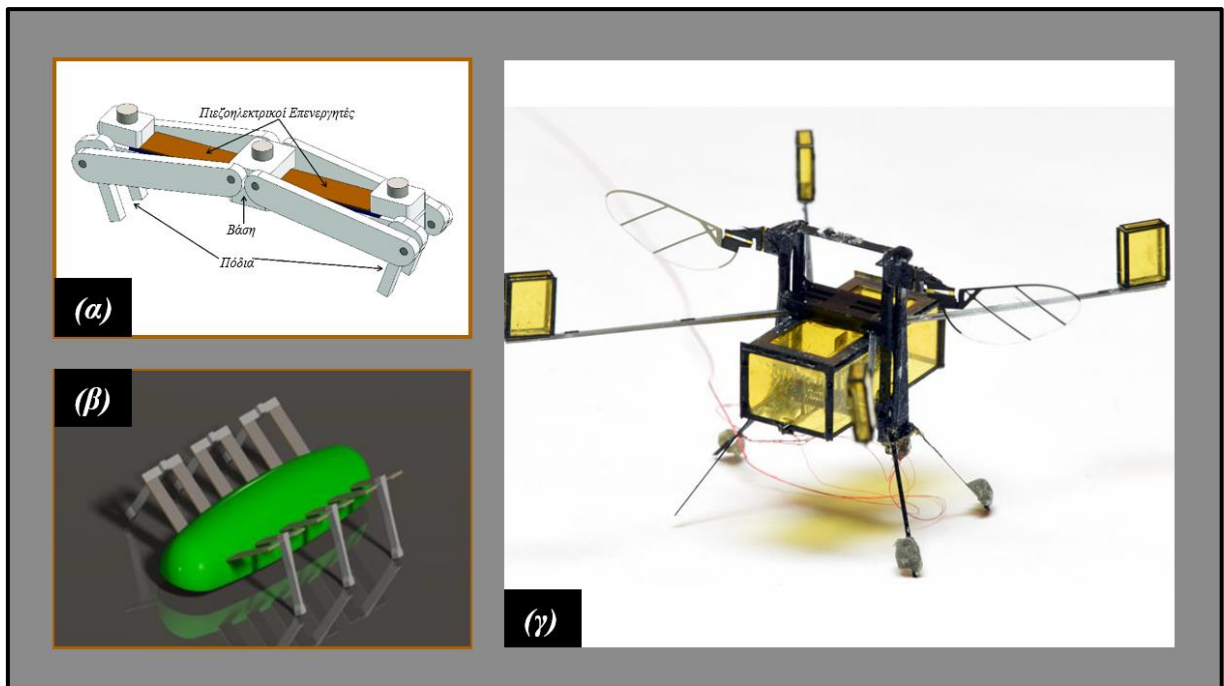
Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε έξυπνα συστήματα και ρομπότ είναι:

- Αισθητήρες αφής
- Αισθητήρες κραδασμών
- Ανιχνευτές υπερήχων

Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές που χρησιμοποιούνται σε έξυπνα συστήματα και ρομπότ είναι:

- Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες
- Πιεζοηλεκτρικοί δονητές
- Γεννήτριες υπερήχων

Οι αισθητήρες αφής παρέχουν στο ρομπότ τη δυνατότητα να ανιχνεύει ένα αντικείμενο στην περιοχή με την αφή, και να αντιδρά με τον κατάλληλο τρόπο. Οι ανιχνευτές υπερήχων ανιχνεύουν τον υπέρηχο που αντανακλάται από κοντινά αντικείμενα, και έτσι αντιλαμβάνεται το βάθος των αντικειμένων.



Εικόνα 3.20: Χρήση πιεζοηλεκτρικών επενεργητών στην Ρομποτική.

Οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες, χρησιμοποιούνται για την κίνηση των ρομπότ. Για έξυπνη κίνηση των ρομπότ, πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες υπερήχων και ανιχνευτές, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση εμποδίων στην διαδρομή των ρομπότ, και την προσαρμογή των κινήσεών τους ανάλογα, για την αποφυγή συγκρούσεων.

Οι ενσωματωμένοι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και επενεργητές χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τον έλεγχο των κινήσεων. Οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές, όπως και οι ρυθμιστές θέσης ακριβείας, χρησιμοποιούνται μαζί με αισθητήρες αφής για να αλληλοεπιδρούν μαλακά με τα ως προς χειρισμό αντικείμενα.

4 Πιεζοηλεκτρικοί Επενεργητές

Ένας επενεργητής μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα οποία θεωρούνται έξυπνα υλικά, επειδή έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν τη διάστασή τους όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο πάνω τους.

Ως εκ τούτου, σε αντίθεση με τους ηλεκτρομαγνητικούς επενεργητές που παράγουν δυνάμεις από απόσταση σε ένα μηχανικό φορτίο, οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές εκμεταλλεύονται τις τάσεις που δημιουργούνται στο εσωτερικό της ύλης από το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Σε ορισμένες εφαρμογές, μπορούν να οδηγήσουν το μηχανικό φορτίο απευθείας χωρίς γρανάζια, να αποκτήσουν πολύ λεπτές και ακριβείς μετατοπίσεις ή να μετακινήσουν ένα φορτίο με μεγάλη δύναμη. Ως εκ τούτου, βρίσκουμε έναν πιεζοηλεκτρικό επενεργητή σε ένα μικροσκόπιο ατομικής δύναμης για να κρατά τη βελόνα κοντά στο δείγμα ή σε ορισμένους κινητήρες ντίτζελ για να ανοίγει και να κλείνει τις βαλβίδες έγχυσης.

Μερικοί κρύσταλλοι μπορεί να είναι πιεζοηλεκτρικοί. Συγκεκριμένα, το πλέγμα τους δεν πρέπει να έχει κέντρο συμμετρίας. Για αυτό τον λόγο, τα υλικά αυτά, που είναι επίσης διηλεκτρικά, εμφανίζουν φορτία στην επιφάνειά τους όταν πιέζονται, λόγω ιοντικής πόλωσης που προκύπτει από μια σχετική μετατόπιση μεταξύ θετικών και αρνητικών ιόντων στο πλέγμα του κρυστάλλου. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις εφαρμογές που περιγράφονται χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά κεραμικά που παρουσιάζουν μεγαλύτερες καταπονήσεις και τάσεις. Αυτά τα υλικά είναι σιδηροηλεκτρικά.

Στις βιομηχανικές διεργασίες, για να δημιουργηθεί ένας στοιχειώδης επενεργητής που αποτελείται από ένα χύμα κομμάτι υλικού, μπορεί κανείς να θερμάνει ένα μείγμα από σκόνες, επαρκώς επιλεγμένων υλικών, σε θερμοκρασία αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει στους κόκκους σκόνης να συγχωνεύονται μεταξύ τους, αλλά αρκετά χαμηλή ώστε να μην λιώνει με το μείγμα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται πυροσυσσωμάτωση και η συνταγή του μείγματος καθώς και το προφίλ θερμοκρασίας είναι μυστικά που φυλάσσονται με ζήλο από τους κατασκευαστές.

Το λεγόμενο κεραμικό PZT, για παράδειγμα, είναι πολύ δημοφιλές και αποτελείται από σκόνες μολύβδου, ζιργκόν και κράματα τιτανίου. Μπορούν να προστεθούν ορισμένα πρόσθετα υλικά, όπως βάριο, λανθάνιο, νιόβιο, προκειμένου να συντονιστούν με ακρίβεια οι ιδιότητες του τελικού κεραμικού. Το υλικό μπορεί να είναι ένα σκληρό πιεζοηλεκτρικό, που δείχνει μια ευρεία γραμμική περιοχή μετάδοσης κίνησης, αλλά με μικρό μέγεθος παραμόρφωσης, ή ένα μαλακό πιεζοηλεκτρικό που έχει μια παραμόρφωση που προκαλείται από υψηλό πεδίο με μια σχετικά μεγάλη υστέρηση.

Δύο ηλεκτρόδια που αποτελούνται από ασημένια επιφάνεια απλώνονται στη συνέχεια σε δύο όψεις του τεμαχίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μεταξοτυπίας. Σε αυτό το σημείο το υλικό δεν είναι πιεζοηλεκτρικό. Πράγματι, το θέμα είναι οργανωμένο σε τομείς, καθένας από τους

οποίους έχει μια τυχαία κατανομημένη κατεύθυνση πόλων. Για την ευθυγράμμισή τους, εφαρμόζεται υψηλή ηλεκτρική τάση (μεγαλύτερη από 3 kV/mm) στα δύο ηλεκτρόδια. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η οποία ονομάζεται ηλεκτρική πόλωση, το δείγμα τοποθετείται σε ένα ζεστό λουτρό λαδιού, η περιστροφή της περιοχής διευκολύνεται από την αύξηση της θερμοκρασίας και το λάδι έχει καλή διηλεκτρική αντοχή.

Μετά την ψύξη και τον καθαρισμό, το δείγμα είναι έτοιμο για χρήση. Όταν εφαρμόζεται τάση V στα δύο ηλεκτρόδια, το μήκος του επενεργητή αυξάνεται, και ιδανικά, η σχέση μεταξύ διαδρομής και τάσης είναι γραμμική. Στην πράξη, ωστόσο, εμφανίζεται υστέρηση (η διαδρομή εξαρτάται από την τάση και το ιστορικό), η μετατόπιση μηδενικής τάσης (υπάρχει υπολειπόμενη τάση χωρίς τάση) και ο ερπυσμός (η τάση αλλάζει αργά ενώ η τάση διατηρείται σταθερή λόγω της απόθεσης).

Στην πραγματικότητα, ο επενεργητής όχι μόνο διαστέλλεται σε μήκος, αλλά συρρικνώνεται και στις πλευρικές κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου, η παραμόρφωση του χύδην τεμαχίου συμβαίνει στις τρεις διαστάσεις του. Ανάλογα με τη γεωμετρία του δείγματος, οι πλευρικές μετατοπίσεις μπορεί να είναι αμελητέες ή κυρίαρχες.

Με τη διαμήκη και εγκάρσια λειτουργία, η τάση εφαρμόζεται προς την κατεύθυνση της παραμένουσας πόλωσης. Υπάρχει μια τρίτη λειτουργία σύζευξης. Η λειτουργία διάτμησης παράγει μια περιστροφή δύο όψεων του υλικού, χωρίς να αλλάζει το μήκος προς τις άλλες κατευθύνσεις. Ο τρόπος διάτμησης επιτυγχάνεται όταν η κατεύθυνση πόλωσης γίνεται στο μήκος του υλικού, ενώ η τάση εφαρμόζεται κάθετα στην παραμένουσα πόλωση.

Ως αποτέλεσμα, ένα πρώτο σετ ηλεκτροδίων βάφεται σε δύο πλευρικές όψεις του επενεργητή για τη διαδικασία πόλωσης και στη συνέχεια αφαιρείται. Στη συνέχεια, δύο άλλα ηλεκτρόδια βάφονται για την ηλεκτρική τάση που θα εφαρμοστεί.

Για όλους τους τρόπους σύζευξης, οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές χαρακτηρίζονται από τις πολύ μικρές μετατοπίσεις που παράγουν. Συνήθως, ένα κομμάτι υλικού $1 \times 1 \times 1,5 \text{ cm}^3$ που παρέχεται με τάση 1 kV διαστέλλεται κατά μερικές εκατοντάδες Νανόμετρα. Από την άλλη, μπορούν να επεκταθούν ενώ πιέζουν με μεγάλη δύναμη. Για παράδειγμα, το ίδιο δείγμα πιεζοηλεκτρικού υλικού μπορεί να σηκώσει φορτίο 200 kg. Ως εκ τούτου, ταξινομούνται ως επενεργητές υψηλής δύναμης-χαμηλής ταχύτητας. Από ηλεκτρική άποψη, οι πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές είναι χωρητικοί.

Ο πιεζοηλεκτρικός επενεργητής μπορεί στη συνέχεια να συγκριθεί με έναν ηλεκτρομαγνητικό. Φαίνεται ότι στο ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλεκτρομαγνητικού επενεργητή, ο επαγωγέας μπορεί να αντικατασταθεί από έναν πυκνωτή, η πηγή τάσης μπορεί να αντικατασταθεί από μια πηγή ρεύματος και η γενική οργάνωση μπορεί να αλλάξει από σειριακή σε παράλληλη, προκειμένου να ληφθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός πιεζοηλεκτρικού επενεργητή. Ως εκ τούτου, μπορούν να θεωρηθούν ως διπλά μεταξύ τους.

4.1 Στρατηγικές Ελέγχου Πιεζοηλεκτρικών Επενεργητών

Γενικά, ένας αυτόματος ελεγκτής συγκρίνει την πραγματική έξοδο της εγκατάστασης με την είσοδο αναφοράς (επιθυμητή τιμή) και ως εκ τούτου παράγει ένα σήμα ελέγχου που θα μειώσει

την απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της επιθυμητής τιμής σε μηδέν ή σε μικρή τιμή. Η **Εικόνα 4.1** παρουσιάζει ένα μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος ελέγχου που είναι ενσωματωμένο με πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Ο ελεγκτής ανιχνεύει το σήμα σφάλματος ενεργοποίησης που είναι συνήθως σε πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος και το ενισχύει σε αρκετά υψηλό επίπεδο μέσω του ενισχυτή τάσης (ή ρεύματος) για τους επενεργητές.

Ο επενεργητής είναι μια συσκευή ισχύος που παράγει την είσοδο στη συσκευή εφαρμογής σύμφωνα με το σήμα ελέγχου. Στο ενεργό σύστημα ελέγχου χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές. Η ενέργεια ελέγχου δεν μπορεί μόνο να αφαιρεθεί, αλλά και να εισαχθεί στην εγκατάσταση με τον ενεργό τύπο επενεργητή

Οι περισσότεροι από τους επί του παρόντος διαθέσιμους αισθητήρες, όπως το επιταχυνσιόμετρο, μπορούν να προσαρμοστούν για τη μέτρηση των δυναμικών αποκρίσεων του συστήματος ελέγχου που σχετίζεται με τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Σε αυτό το κεφάλαιο, εισάγονται ορισμένες μεθοδολογίες ελέγχου που είναι πολύ αποτελεσματικές στον έλεγχο του συστήματος που διαθέτει πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές.

4.1.1 Έλεγχος PID

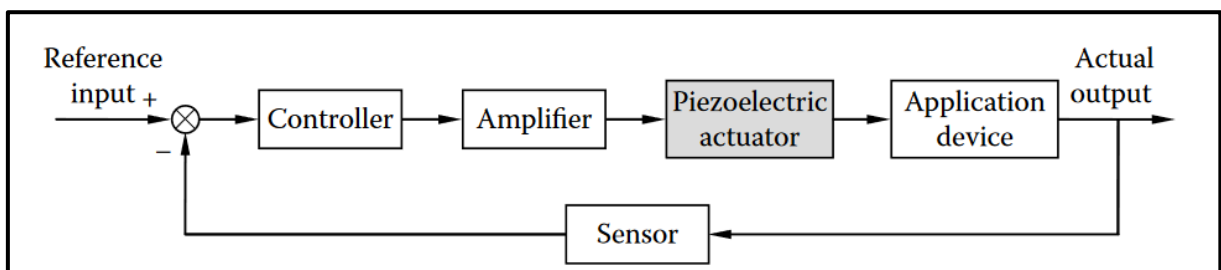
Ένας ελκυστικός ελεγκτής για την επίτευξη μιας επιθυμητής θέσης δύναμης χρησιμοποιώντας το πιεζοηλεκτρικό σύστημα ελέγχου είναι ο ελεγκτής αναλογικής-ολοκληρωμένης παραγώγου (PID). Όπως είναι γνωστό, ο ελεγκτής PID είναι εύκολο να εφαρμοστεί στην πράξη, αλλά πολύ αποτελεσματικός με ανθεκτικότητα στις αβεβαιότητες του συστήματος. Η δράση ελέγχου κάθε P, I και D φαίνεται στις εξισώσεις 2.2. Από το μπλοκ διάγραμμα, η είσοδος εκφράζεται με

$$u(s) = k_p E(s), \text{ για την αναλογική (P) δράση} \tag{4.1}$$

$$u(s) = \frac{k_s}{s} E(s), \text{ για την ολοκληρωτική (I) δράση} \tag{4.2}$$

$$u(s) = k_d s E(s), \text{ για την διαφορική δράση (D) δράση} \tag{4.3}$$

όπου s είναι η μεταβλητή Laplace K_p , K_i , και K_D είναι κέρδη ελέγχου για τα στοιχεία P, I και D, αντίστοιχα $E(s)$ είναι το σήμα σφάλματος ανάδρασης μεταξύ της επιθυμητής τιμής και της πραγματικής τιμής εξόδου.

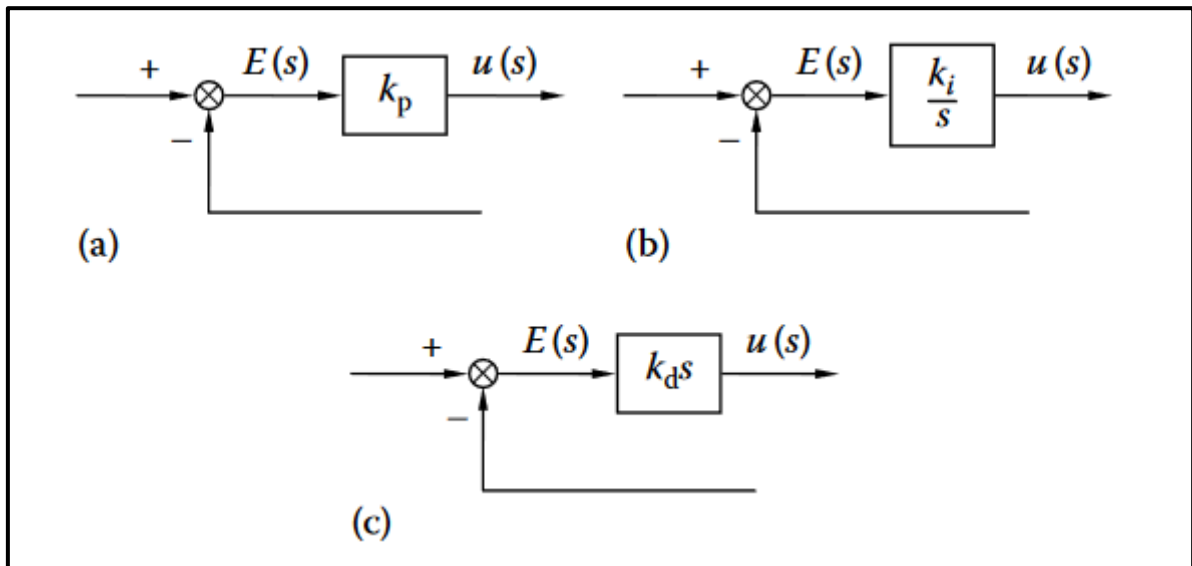


Εικόνα 4.1: Μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος ελέγχου που διαθέτει πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές.

Κατά συνέπεια, η μορφή του ελεγκτή PID δίνεται από τη σχέση:

$$u(s) = k_p E(s) + \frac{k_s}{s} E(s) + k_d s E(s) \tag{4.4}$$

Ο ελεγκτής P είναι ουσιαστικά ένας ενισχυτής με ρυθμιζόμενο κέρδος K_p . Εάν το K_p αυξηθεί, ο χρόνος απόκρισης του συστήματος ελέγχου γίνεται ταχύτερος. Αλλά η αστάθεια του συστήματος ελέγχου μπορεί να συμβεί χρησιμοποιώντας πολύ υψηλά κέρδη ανάδρασης K_p . Η τιμή του ελέγχου $u(t)$ αλλάζει με ρυθμό ανάλογο με το σήμα σφάλματος ενεργοποίησης $e(t)$ χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή I.



Εικόνα 4.2: Δράση ελέγχου των συστατικών P, I και D. (a) P δράση, (b) I δράση, και (c) D δράση.

Για μηδενικό σφάλμα ενεργοποίησης, η τιμή του $u(t)$ παραμένει ακίνητη. Χρησιμοποιώντας τη δράση του ελεγκτή I, το σφάλμα σταθερής κατάστασης του συστήματος ελέγχου μπορεί να μετριαστεί ή να εξαλειφθεί αποτελεσματικά. Αυτός είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο πρόβλημα ελέγχου παρακολούθησης. Γενικά, μπορούμε να αυξήσουμε τη σταθερότητα του συστήματος χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή D. Ωστόσο, η ενέργεια ελέγχου D μπορεί να ενισχύσει τα σήματα θορύβου και να προκαλέσει ένα φαινόμενο κορεσμού στον πιεζοηλεκτρικό επενεργητή.

Σημειώνεται επίσης ότι η δράση ελέγχου D δεν μπορεί ποτέ να εφαρμοστεί μόνη της, επειδή η δράση ελέγχου είναι αποτελεσματική μόνο σε μεταβατικές περιόδους. Ένας κατάλληλος προσδιορισμός των κερδών ελέγχου K_p , K_i , και K_D για την επίτευξη ανώτερης απόδοσης ελέγχου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους: τη μέθοδο Ziegler–Nichols, την προσαρμοστική μέθοδο και τη βέλτιστη μέθοδο.

4.1.2 Έλεγχος LQ

Ο γραμμικός τετραγωνικός έλεγχος (LQ) είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές ελέγχου που μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά συστήματα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος ελέγχου που βασίζεται σε πιεζοηλεκτρικό επενεργητή. Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου, η εγκατάσταση θεωρείται ότι είναι ένα γραμμικό σύστημα στη μορφή του χώρου κατάστασης και ο δείκτης απόδοσης είναι μια τετραγωνική συνάρτηση των καταστάσεων της εγκατάστασης και των εισροών ελέγχου.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου LQ είναι ότι οδηγεί σε γραμμικούς νόμους ελέγχου που είναι εύκολο να εφαρμοστούν και να αναλυθούν. Για τον βέλτιστο έλεγχο τύπου γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή (LQR), λαμβάνεται υπόψη η ακόλουθη εξίσωση κατάστασης:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.5)$$

Όπου:

x: είναι το διάνυσμα κατάστασης

u: είναι το διάνυσμα εισόδου

A: είναι η μήτρα του συστήματος

B: είναι ο πίνακας εισόδου

Το επικείμενο πρόβλημα είναι να καθοριστεί το βέλτιστο διάνυσμα ελέγχου:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4.6)$$

ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο δείκτης απόδοσης:

$$J = \int_0^{\infty} (Qx + u^T Ru) dt \quad (4.7)$$

Όπου:

Q: είναι ο πίνακας στάθμισης κατάστασης (θετικό-ημιορισμένο)

R: είναι ο πίνακας στάθμισης εισόδου (θετικό-ορισμένο)

Οι πίνακες Q και R καθορίζουν τη σχετική σημασία του σφάλματος και τη δαπάνη της ενέργειας ελέγχου. Εάν το (A, B) είναι ελεγχόμενο, το κέρδος ελέγχου ανάδρασης λαμβάνεται από:

$$K = R^{-1}B^T P \quad (4.8)$$

Όπου:

P: είναι η λύση της ακόλουθης αλγεβρικής εξίσωσης Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.9)$$

Εάν ο δείκτης απόδοσης δίνεται ως προς το διάνυσμα εξόδου αντί για το διάνυσμα κατάστασης, δηλαδή,

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Qy + u^T Ru) dt \quad (4.10)$$

τότε ο δείκτης μπορεί να τροποποιηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση εξόδου:

$$y = Cx \quad (4.11)$$

Σε:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T C^T Q C x + u^T R u) dt \quad (4.12)$$

Το βήμα σχεδιασμού για τη λήψη του κέρδους ανάδρασης K που ελαχιστοποιεί τον δείκτη στην παραπάνω εξίσωση είναι το ίδιο με το βήμα για το κέρδος ανάδρασης K που ελαχιστοποιεί τον δείκτη στην εξίσωση:

$$J = \int_0^{\infty} (Qx + u^T R u) dt \quad (4.13)$$

Ο βέλτιστος έλεγχος LQ μπορεί εύκολα να επεκταθεί στο πρόβλημα του γραμμικού τετραγωνικού Gaussian (LQG) εάν το σύστημα ελέγχου και ο δείκτης απόδοσης συσχετίζονται με λευκό Gaussian θόρυβο ως εξής:

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma w \quad (4.14)$$

$$y = Cx + v \quad (4.15)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E \left\{ \int_{-T}^T (x^T Q x + u^T R u) dt \right\} \quad (4.16)$$

Όπου:

W: σημαίνει τυχαία διαταραχή θορύβου

V: αντιπροσωπεύει θόρυβο τυχαίας μέτρησης (αισθητήρας).

Τόσο το w όσο και το v είναι λευκές μηδενικές στάσιμες διεργασίες Gaussian. Σημειώνεται ότι επειδή οι καταστάσεις και ο έλεγχος είναι και τα δύο τυχαία, ο δείκτης απόδοσης θα είναι τυχαίος. Έτσι, το πρόβλημα είναι να βρεθεί ο βέλτιστος έλεγχος που θα ελαχιστοποιεί το μέσο κόστος. Χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία όπως και για το πρόβλημα LQR, η λύση επιτυγχάνεται ως εξής:

1. Ελεγκτής:

$$u = -K\tilde{x} \quad (4.17)$$

$$K = R^{-1}B^T P \quad (4.18)$$

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + q = 0 \quad (4.19)$$

2. Estimator:

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \quad (4.20)$$

$$K_e = P_1 C^T R^{-1} \quad (4.21)$$

$$AP_1 + P_1 A^T - P_1 C^T R^{-1} C P_1 + \Gamma W \Gamma^T = 0 \quad (4.22)$$

Όπου:

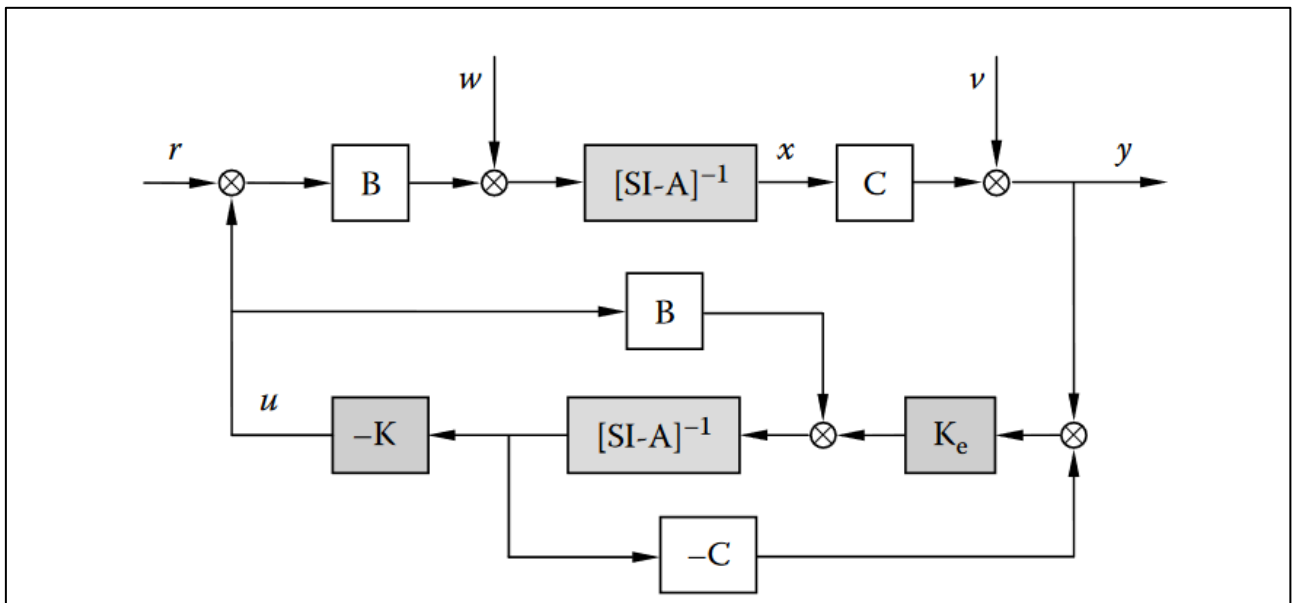
X : δηλώνει την εκτιμώμενη κατάσταση

K και το K_e : είναι ο πίνακας απολαβής του ελεγκτή και ο πίνακας κέρδους του φίλτρου Kalman, αντίστοιχα

P και P_1 : είναι οι θετικές-ορισμένες λύσεις των εξισώσεων Riccati

W και R_1 : είναι πίνακες συν διακύμανσης διαταραχής και θορύβου, αντίστοιχα

Σημειώνεται ότι το πρόβλημα μπορεί να λυθεί σε δύο ξεχωριστά στάδια. κέρδος ελεγκτή K και κέρδος εκτιμητή K_e . Η **Εικόνα 4.3** δείχνει το αντίστοιχο μπλοκ διάγραμμα ελέγχου:



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα μπλοκ ελέγχου του LQG.

4.1.3 Έλεγχος Sliding Mode

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα των συστημάτων ελέγχου ανάδρασης, υπάρχουν ορισμένες διαταραχές του συστήματος (αβεβαιότητες) που σχετίζονται με τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Για παράδειγμα, υπάρχει μη γραμμική υστέρηση στη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών. Επομένως, προκειμένου να διασφαλιστεί η ευρωστία ελέγχου του συστήματος ελέγχου που διαθέτει πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές, πρέπει να εφαρμοστεί ένας ισχυρός ελεγκτής για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες του συστήματος.

Ένας ελεγκτής συρόμενης λειτουργίας (SMC), που ονομάζεται επίσης ελεγκτής μεταβλητής δομής, είναι ευρέως γνωστός ως ένας από τους πιο ελκυστικούς υποψηφίους που αναλαμβάνει

την ευρωστία ελέγχου έναντι αβεβαιοτήτων του συστήματος και εξωτερικών διαταραχών. Το SMC έχει τις ρίζες του στη λογοτεχνία της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Σήμερα, σε όλο τον κόσμο, η έρευνα και η ανάπτυξη του SMC συνεχίζει να το εφαρμόζει σε μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων μηχανικής.

Οι τρόποι ολίσθησης που μπορούν να ληφθούν με κατάλληλους νόμους ασυνεχούς ελέγχου είναι οι κύριοι τρόποι λειτουργίας στα συστήματα μεταβλητής δομής. Τα συστήματα έχουν ιδιότητες αμετάβλητης στις διακυμάνσεις των παραμέτρων και εξωτερικές διαταραχές υπό την κίνηση ολίσθησης. Για να δείξετε την ιδιότητα αμετάβλητης στην κίνηση ολίσθησης, εξετάστε το ακόλουθο σύστημα δεύτερης τάξης:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.23)$$

$$\dot{x}_2 = cx_2 - kx_1, \quad c > 0, \quad k > 0 \quad \text{ή} \quad k < 0 \quad (4.24)$$

Όταν $k < 0$, οι ιδιοτιμές του συστήματος γίνονται:

$$\lambda_{1,2} = \left(\frac{c}{2}\right) \pm \sqrt{(c^2/4) - k}. \quad (4.25)$$

Επομένως το προφίλ της φάσης του συστήματος κρατάει τα ηνία που δείχνει ασταθή κίνηση εκτός από τη σταθερή ιδιοτιμή γραμμική.

Όταν $k > 0$, οι ιδιοτιμές γίνονται:

$$\lambda_{1,2} = \left(\frac{c}{2}\right) \pm \sqrt{(c^2/4) - k}. \quad (4.26)$$

Έτσι, το προφίλ της φάσης του συστήματος είναι μια σπειροειδής πηγή που δείχνει ασταθή κίνηση. Εάν η εναλλαγή συμβαίνει στη γραμμή $sg = cx_1 + x_2 = 0$ και στη $x = 0$ με την ακόλουθη λογική μεταγωγής,

$$k = \begin{cases} \text{θετικό,} & x_1 s_g < 0 \\ \text{αρνητικό,} & x_1 s_g > 0 \end{cases} \quad (4.27)$$

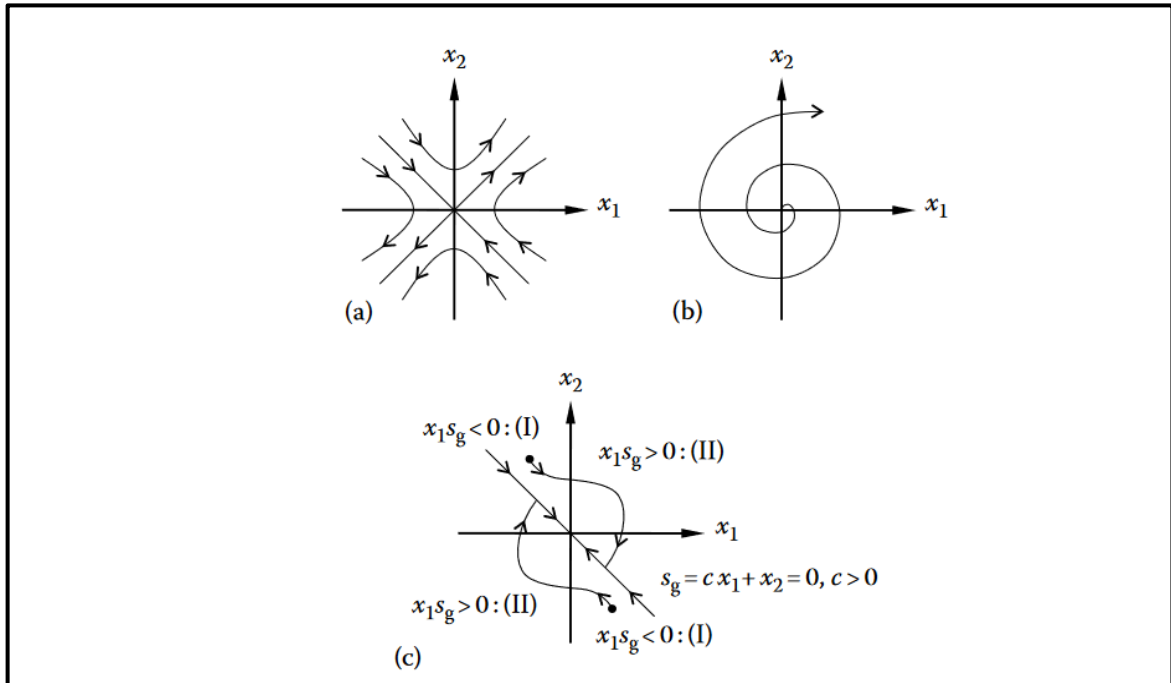
τότε το σύστημα γίνεται ασυμπτωτικά σταθερό για τυχόν αυθαίρετες αρχικές συνθήκες όπως φαίνεται στη εικόνα 39. Δύο υποσυστήματα συγκλίνουν σε μια γραμμή sg (ονομάζεται γραμμή μεταγωγής [επιφάνεια] ή ολισθαίνουσα γραμμή [επιφάνεια]). Μόλις χτυπήσετε τη γραμμή ολίσθησης, το σύστημα μπορεί να περιγραφεί με:

$$s_g = cx_1 + x_2 = 0 \quad (4.28)$$

Αυτό σημαίνει ότι η αρχική απόκριση του συστήματος είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του συστήματος στη γραμμή ολίσθησης (κίνηση ολίσθησης). Αυτό εγγυάται την ανθεκτικότητα του συστήματος σε αβεβαιότητες συστήματος και εξωτερικές διαταραχές.

Γενικά, η κίνηση ολίσθησης μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιώντας την ακόλουθη λεγόμενη συνθήκη ολίσθησης:

$$s_g \dot{s}_g < 0 \tag{4.29}$$



Εικόνα 4.4: Αμετάβλητη ιδιότητα του SMC. (α) Σέλα, (β) σπειροειδής πηγή και (γ) με λογική εναλλαγής

Η παραπάνω συνθήκη μπορεί να ερμηνευθεί ως η προϋπόθεση για τη σταθερότητα του Lyapunov. Για να παρέχονται βήματα σχεδιασμού για το SMC, εξετάζεται το ακόλουθο σύστημα ελέγχου που υπόκειται στην εξωτερική διαταραχή:

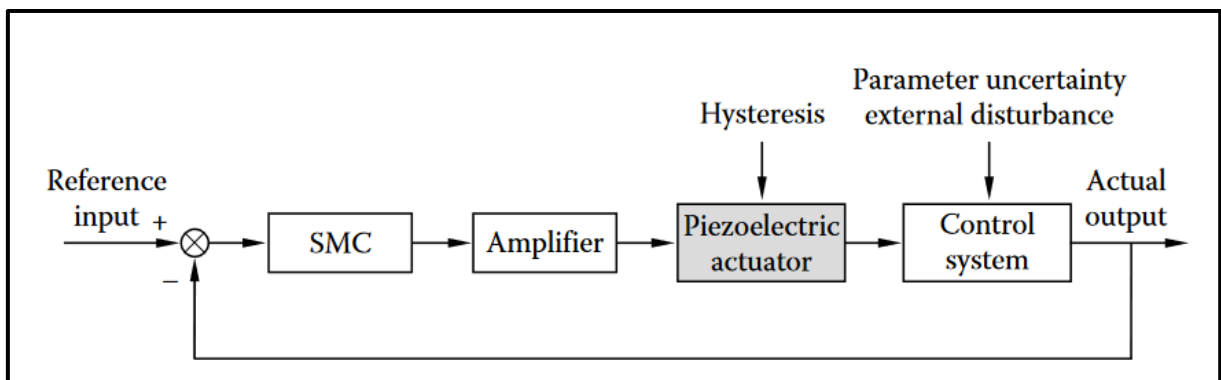
$$\dot{x}_1 = x_2 \tag{4.30}$$

$$\dot{x}_2 = ax_1 + x_2 + u + d \tag{4.31}$$

Όπου:

D:είναι εξωτερική διαταραχή

A:είναι παραλλαγή παραμέτρων



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα μπλοκ ελέγχου του SMC.

Αυτά οροθετούνται από:

$$|d| \leq \varepsilon \quad \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2 \quad (4.32)$$

Ως πρώτο βήμα, επιλέγουμε μια σταθερή συρόμενη γραμμή ως εξής:

$$s_g = cx_1 + x_2 = 0, \quad c > 0 \quad (4.33)$$

Στη συνέχεια, η δυναμική της ολίσθησης γίνεται:

$$\dot{s}_g = cx_2 + ax_1 + x_2 + u + d \quad (4.34)$$

Έτσι, αν σχεδιάσουμε το SMC, u, με

$$u = -cx_2 - x_2 - a_0x_1s_g - (k + |a_m||x_1|)sgn(s_g) \quad (4.35)$$

$$k > \varepsilon, \quad a_0 = \frac{(a_1 + a_2)}{2}, \quad a_m = a_2 - a_0 \quad (4.36)$$

Η συνθήκη ολίσθησης μπορεί να ικανοποιηθεί ως εξής:

$$s_g \dot{s}_g = (a - a_0)x_1s_g - (k + |a_m||x_1|)|s_g| < 0 \quad (4.37)$$

Το k είναι το ασυνεχές κέρδος ελέγχου και η $sgn(\cdot)$ είναι μια συνάρτηση προσήμου. Αυτό το στάδιο σχεδιασμού μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε συστήματα ελέγχου υψηλότερης τάξης. Το σχήμα, στην εικόνα 40, αντιπροσωπεύει το μπλοκ διάγραμμα του SMC για ένα σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιεί πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές.

4.1.4 Έλεγχος Η άπειρο

Ο ελεγκτής H_∞ είναι μια ισχυρή τεχνική ελέγχου που μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα ελέγχου που βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές. Σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου, όλες οι πληροφορίες για το σύστημα εκφράζονται σε πλαίσιο γραμμικού κλασματικού μετασχηματισμού (LFT) ως εξής:

$$\begin{bmatrix} Z \\ y \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} W \\ u \end{bmatrix}, \quad u = Ky \quad (4.38)$$

Όπου:

P: είναι το επαυξημένο φυτό

K: είναι ο ελεγκτής

W: είναι ένα διανυσματικό σήμα που περιλαμβάνει θορύβους, διαταραχές και σήματα αναφοράς

Z: είναι ένα διανυσματικό σήμα που περιλαμβάνει όλα τα ελεγχόμενα σήματα και τα σφάλματα παρακολούθησης

U: είναι το σήμα ελέγχου

Y: είναι το μετρούμενο σήμα

Η απόρριψη της διαταραχής ή η εντολή μετά την απόδοση θα εξαρτηθεί από το μέγεθος της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου από το w στο z , το οποίο συμβολίζεται ως T_{zw} . Έτσι, σε αυτό το πλαίσιο, συντίθενται ελεγκτές H_∞ για την ελαχιστοποίηση του κανόνα H_∞ . Ο κανόνας H_∞ του T_{zw} , που συμβολίζεται ως $|T_{zw}|_\infty$, ορίζεται ως:

$$|T_{zw}|_\infty = \sup \sigma_{\max}[c(j\omega)] = \sup \frac{|z_2|}{|w_2|} \quad (4.39)$$

Σε αυτόν τον ορισμό, το "sup" υποδηλώνει το υπέρτατο ή το ελάχιστο άνω όριο. Το σ_{\max} είναι μια μέγιστη μοναδική τιμή που αντιστοιχεί στο κέρδος συστήματος του συστήματος MIMO (πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων). Οι νόρμες H_∞ έχουν επίσης μια φυσική ερμηνεία που είναι η μεγαλύτερη δυνατή ενίσχυση σε όλες τις συχνότητες μιας μονάδας ημιτονοειδούς εισόδου. Δηλαδή, ταξινομεί τη μεγαλύτερη αύξηση της ενέργειας που μπορεί να συμβεί μεταξύ της εισόδου και της εξόδου ενός δεδομένου συστήματος. Το πρόβλημα ελέγχου H_∞ είναι να βρείτε όλους τους αποδεκτούς ελεγκτές K έτσι ώστε:

$$\text{Find } \|T_{zw}\| \leq \gamma \quad (4.40)$$

Η υλοποίηση του επαυξημένου πίνακα P θεωρείται ότι είναι της μορφής:

$$\begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & 0 & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

1. $(A, B1)$ είναι ελεγχόμενο και $(\Gamma1, A)$ είναι παρατηρήσιμο
2. $(A, B2)$ είναι σταθεροποιήσιμο και $(C2, A)$ είναι ανιχνεύσιμο
3. $D_{12} \begin{bmatrix} C_{12} & D_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix}$
4. $\begin{bmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{bmatrix} D_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$

Τότε ένας αποδεκτός ελεγκτής τέτοιος ώστε $\|T_{zw}\| < \gamma$ είναι:

$$K_\infty(s) = \begin{bmatrix} \widehat{K}_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ F_\infty & 0 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$\widehat{A}_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 \dot{B}_1 X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2 \quad (4.43)$$

$$F_\infty = -B_2 \dot{X}_\infty \quad (4.44)$$

$$L_\infty = -Y_\infty \dot{C}_2 \quad (4.45)$$

$$Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1} \quad (4.46)$$

Όπου:

X_∞ και Y_∞ είναι οι λύσεις της ακόλουθης γενικευμένης αλγεβρικής εξίσωσης Riccati ελέγχου (GCARE) και της γενικευμένης αλγεβρικής εξίσωσης Riccati φίλτρου (GFARE):

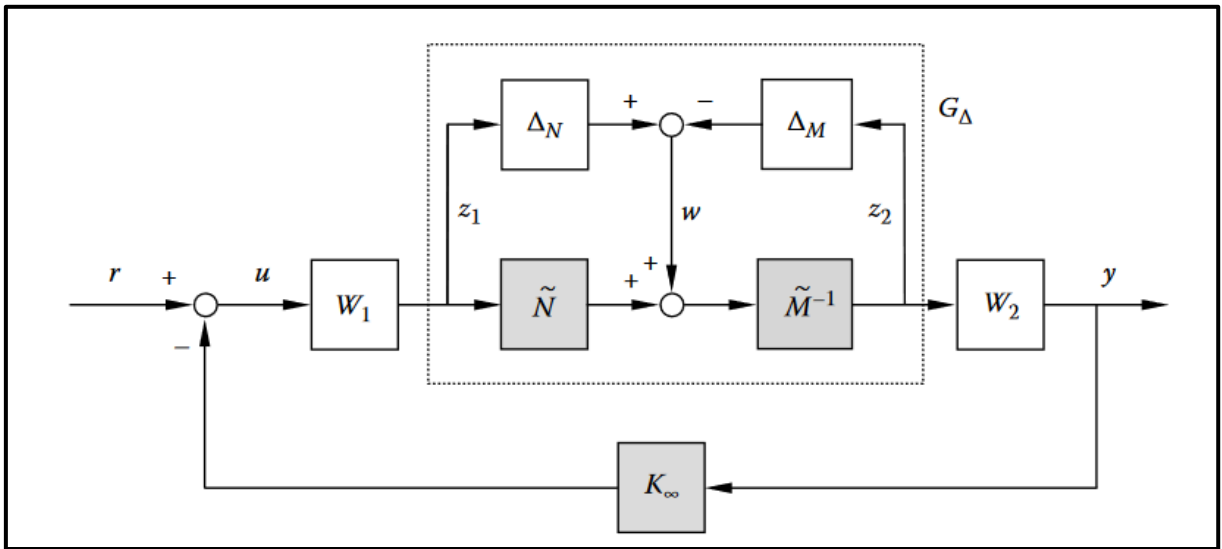
$$\dot{A}X_\infty + A + X_\infty(\gamma^{-2}B_1\dot{B}_1 - B_2\dot{B}_2)X_\infty + \dot{C}_1C_1 = 0 \quad (4.47)$$

$$AY_\infty + Y_\infty A + Y_\infty(\gamma^{-2}\dot{C}_1C_1 - \dot{C}_2C_2)Y_\infty + B_1\dot{B}_1 = 0 \quad (4.48)$$

Η εικόνα 41 δείχνει μια διαδικασία σχεδίασης διαμόρφωσης βρόχου (LSDP) χρησιμοποιώντας σύνθεση H_∞ για ένα διαταραγμένο αριστερού συνυπάρχοντος παράγοντα που δίνεται από

$$G(s) = \tilde{M}^{-1}\tilde{N} \quad (4.49)$$

$$G(s) = \tilde{M}^{-1}\tilde{N} \quad (4.50)$$



Εικόνα 4.6: Διαμόρφωση LSDP με χρήση σύνθεσης H_∞ .

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση διαμόρφωσης, W , οι μοναδικές τιμές του συστήματος διαμορφώνονται για να δώσουν ένα επιθυμητό σχήμα ανοιχτού βρόχου ως εξής:

$$Gs = W_2GW_1 = \tilde{M}s^{-1}\tilde{N}s = \begin{bmatrix} A & B \\ C & B \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Στη συνέχεια, το σύστημα μπορεί να τεθεί σε μορφή LFT με το επαυξημένο σύστημα να εκφράζεται με:

$$P = \begin{bmatrix} A & -LZ^{-1} & B \\ \begin{bmatrix} 0 \\ C \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ Z^{-1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} I \\ D \end{bmatrix} \\ C & Z^{-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Όπου:

$Z = (I + DD^*)^{-1/2}$. Το L είναι ένας πίνακας τέτοιος ώστε το $A + LC$ να είναι σταθερό. Από τις παραπάνω εξισώσεις, μπορεί κανείς να συνθέσει έναν σταθεροποιητικό ελεγκτή K_∞ , ο οποίος ικανοποιεί:

$$\|T_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{bmatrix} K_\infty \\ I \end{bmatrix} (I + GsK_\infty)^{-1} \tilde{M}s^{-1} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (4.53)$$

Ο τελικός ελεγκτής ανάδρασης K κατασκευάζεται στη συνέχεια από τον ελεγκτή K_∞ με τις συναρτήσεις διαμόρφωσης έτσι ώστε:

$$K = W_1 K_\infty W_2 \quad (4.54)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η ελάχιστη τιμή του γ μπορεί να ληφθεί με μια μη επαναλαμβανόμενη μέθοδο από τον κανόνα Henkel, και δίνεται από:

$$\gamma_{min} = (1 - \|\tilde{M}s, \tilde{N}s\|_H^2)^{1/2} \quad (4.55)$$

4.1.5 Έλεγχος QFT

Η μέθοδος της ποσοτικής θεωρίας ανάδρασης (QFT) είναι μια τεχνική σχεδίασης που βασίζεται σε τομέα συχνοτήτων, η οποία προσεγγίζει άμεσα το πρόβλημα σύνθεσης ισχυρού ελέγχου. Η προσέγγιση QFT είναι πιθανώς η μόνη μέθοδος που επιτρέπει σε έναν ελεγκτή να σχεδιαστεί ώστε να ικανοποιεί μια δεδομένη προδιαγραφή με διαφανή και ποσοτικό τρόπο.

Το κύριο πλεονέκτημα του QFT είναι ότι οι αντισταθμίσεις μεταξύ των απαιτήσεων σχεδιασμού είναι ξεκάθαρα εμφανείς σε όλα τα στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού, παρά μετά τον υπολογισμό του ελεγκτή (όπως με τα βέλτιστα σχέδια ελέγχου H_∞ ή LQ). Η μέθοδος QFT επεκτείνει τις εξαιρετικά εύχρηστες κλασικές έννοιες διαμόρφωσης βρόχου τομέα συχνοτήτων για να αντιμετωπίσει τις αβεβαιότητες και τις ταυτόχρονες απαιτήσεις σχετικά με τις προδιαγραφές απόδοσης.

Το βασικό εργαλείο του QFT είναι το διάγραμμα Nichols (NC). Το NC περιλαμβάνει ένα διάγραμμα απόκρισης συχνότητας της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου με άξονες φάσης και μεγέθους. Το NC έχει κατακόρυφους και οριζόντιους άξονες που περιλαμβάνουν το λογαριθμικό μέγεθος της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου $G(j\omega)$ σε dB και τη φάση, αντίστοιχα. Έστω ότι το $M(j\omega)$ αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου, ή τον λόγο ελέγχου, ενός συστήματος συνεχούς χρόνου ανάδρασης μονάδας:

$$M(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (4.56)$$

Το NC περιλαμβάνει περιγράμματα σταθερού λογαριθμικού μεγέθους $M(Lm(M(j\omega)))$ και σταθερής φάσης ($\alpha(j\omega)$). Από ένα διάγραμμα της απόκρισης συχνότητας ανοιχτού βρόχου $G(j\omega)$, μπορούν να βρεθούν οι τιμές $Lm(M(j\omega))$ και φάσης $\alpha(j\omega)$. Δηλαδή, το πλάτος και η φάση της απόκρισης συχνότητας κλειστού βρόχου μπορούν να προσδιοριστούν για κάθε συχνότητα και επομένως μπορεί να προσδιοριστεί η μέγιστη τιμή του πλάτους απόκρισης συχνότητας κλειστού βρόχου Mm .

Το NC είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη συσχέτιση της απόκρισης συχνότητας ανοιχτού βρόχου, που χρειάζεται διαμόρφωση, με την επιθυμητή απόκριση κλειστού βρόχου. Για να επιτευχθεί ένα δεδομένο μέγεθος κορυφής, M_m , το διάγραμμα απόκρισης συχνότητας ανοιχτού βρόχου θα πρέπει να μετακινηθεί κατακόρυφα πάνω και κάτω αλλάζοντας έναν πολλαπλασιαστική βαθμωτών απολαβών έτσι ώστε $kG(j\omega)$, μέχρι να αγγίξουμε το περίγραμμα της σταθεράς M_m .

Σε μια σταθερή συχνότητα, η διακύμανση στην απόκριση συχνότητας της εγκατάστασης περιγράφει ένα σύνολο μιγαδικών αριθμητικών σημείων που αναφέρονται ως πρότυπο. Μόλις καθοριστούν τα πρότυπα, για κάθε συχνότητα ενδιαφέροντος, η απόκριση συχνότητας εγκατάστασης είναι γνωστό ότι βρίσκεται σε μια ζώνη, η οποία καλύπτει οποιοδήποτε από τα σημεία εντός των προτύπων ή στα όρια τους. Είναι απαραίτητο να εισαχθούν όρια στο επιτρεπόμενο εύρος της μεταβολής του κέρδους της ονομαστικής συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου.

Σε επιλεγμένες συχνότητες, αυτό επιτρέπει την ικανοποίηση περιορισμών μεγέθους στη συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου που ενδιαφέρει. Κανονικά, η σύνθεση QFT εκτελείται με μετάδοση βρόχου ως εξής:

$$L(s) = P(s)K(s) \quad (4.57)$$

Η προδιαγραφή σχεδιασμού για ένα σύστημα συνήθως περιλαμβάνει έναν συνδυασμό απαιτήσεων τομέα χρόνου και τομέα συχνότητας. Η προσέγγιση QFT είναι μια μέθοδος που βασίζεται στον τομέα συχνότητας, η οποία καλύπτει τις απαιτήσεις σε τομέα χρόνου έμμεσα. Εάν δίνονται προδιαγραφές τομέα χρόνου, πρέπει να μετατραπούν στον τομέα συχνότητας. Τα κριτήρια του τομέα χρόνου, όπως η υπέρβαση και ο χρόνος διευθέτησης, σχετίζονται στη συνέχεια με τις απαιτήσεις του τομέα συχνότητας.

Οι προδιαγραφές απόδοσης αποτελούνται από περιορισμούς στο μέγεθος των αποκρίσεων συχνότητας κλειστού βρόχου. Παρουσιάζεται ένα ισχυρό πρόβλημα απόδοσης, οι προδιαγραφές απόδοσης πρέπει να πληρούνται για όλες τις λειτουργίες μεταφοράς που μπορεί να προκύψουν σε ένα αβέβαιο σύστημα. Σε αυτήν την περίπτωση, η προδιαγραφή απόδοσης πρέπει να ικανοποιείται για όλες τις πιθανές παραλλαγές του αβέβαιου συστήματος.

Τα μοντέλα δομημένης αβεβαιότητας χρησιμοποιούνται συνήθως για την αναπαράσταση της αβεβαιότητας στο εύρος χαμηλής έως μεσαίας συχνότητας και της μη δομημένης αβεβαιότητας στην περιοχή υψηλής συχνότητας. Η αβεβαιότητα μπορεί να αναπαρασταθεί με πρότυπα στο διάγραμμα Nichols, που δείχνουν τις διακυμάνσεις της απόκρισης συχνότητας του συστήματος, σε ολόκληρο το εύρος των παραμέτρων, για μια δεδομένη συχνότητα.

Ο στόχος είναι να συντεθεί ένας ελεγκτής για να πληροί όλες τις προδιαγραφές, συμπεριλαμβανομένου του προβλήματος ισχυρής απόδοσης ως εξής:

1. Προδιαγραφή στιβαρής σταθερότητας

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq M_L \text{ dB για } P, \quad \omega \geq 0 \quad (4.58)$$

2. Προδιαγραφές παρακολούθησης

$$|T_L(j\omega)| \leq \left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq |T_U(j\omega)| \quad \text{για } P, \omega \in [0, \omega_h] \quad (4.59)$$

3. Προδιαγραφή απόρριψης διαταραχής

$$\left| \frac{Y(j\omega)}{D(j\omega)} \right| \leq a_m \quad \text{για } P, \omega \in [0, \omega_h] \quad (4.60)$$

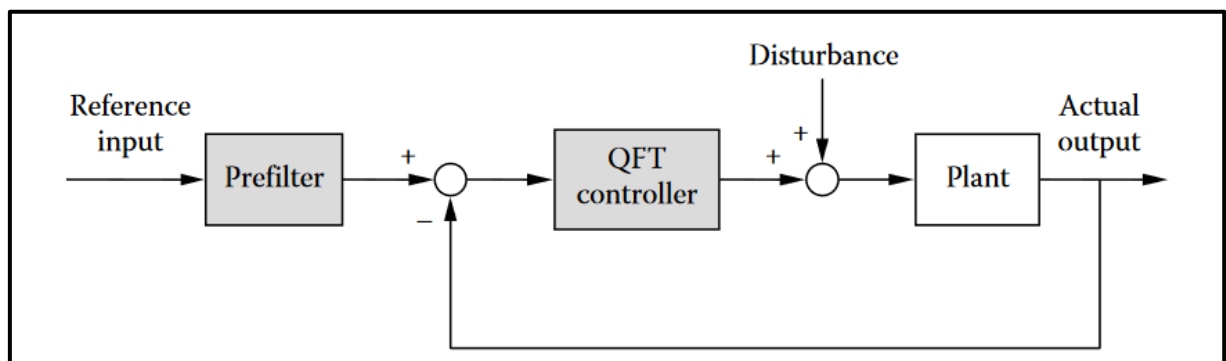
Όπου:

ML: είναι ένα μέγιστο επιτρεπόμενο περίγραμμα M που ονομάζεται περιθώριο σταθερότητας

TL και το TU: έχει κατώτερα και ανώτερα όρια απόδοσης για να ανταποκρίνεται στις επιθυμητές προδιαγραφές του τομέα χρόνου, όπως ο χρόνος καθίζησης, ο χρόνος ανόδου κ.λπ. ω_h : είναι η μέγιστη συχνότητα που λαμβάνεται υπόψη στο σύστημα

a_m : είναι μια σταθερά που περιορίζει την έξοδο για τη διαταραχή εισόδου της μονάδας βήματος.

Αυτές οι προδιαγραφές δημιουργούν ισχυρά όρια σε επιλεγμένες συχνότητες και τα όρια απεικονίζονται στο NC. Το συντιθέμενο L πρέπει να βρίσκεται πάνω ή ακριβώς πάνω από το όριο σε κάθε συχνότητα για να ικανοποιεί τα όρια απόδοσης. Το σχήμα 2.7 δείχνει το διάγραμμα μπλοκ ελέγχου του QFT. Το προφίλτρο δεν απαιτείται στο πρόβλημα απόρριψης διαταραχής, αλλά μπορεί να υιοθετηθεί για να διασφαλιστεί η ισχυρή απόδοση στο πρόβλημα παρακολούθησης.



Εικόνα 4.7: Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου του QFT.

4.1.6 Έλεγχος Αντίστροφου Μοντέλου

Μια δημοφιλής στρατηγική ελέγχου που είναι πολύ αποτελεσματική για τη μη γραμμικότητα της υστέρησης είναι μέσω ενός ελέγχου αντίστροφου μοντέλου που χρησιμοποιεί το μοντέλο Preisach ως στρατηγική αντιστάθμισης ανοιχτού βρόχου. Το μοντέλο υστέρησης Preisach έχει χρησιμοποιηθεί συνήθως για τη μοντελοποίηση υστέρησης και εφαρμόζεται στην αντιστάθμιση υστέρησης των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών.

Αρχικά, το μοντέλο Preisach αναπτύχθηκε για να αντιπροσωπεύει την υστέρηση σε μαγνητικά υλικά που χαρακτηρίζεται από δύο σημαντικές ιδιότητες: την ιδιότητα δευτερεύοντος βρόχου και την ιδιότητα εξάλειψης. Η ιδιότητα δευτερεύοντος βρόχου καθορίζει ότι δύο συγκρίσιμοι δευτερεύοντες βρόχοι που δημιουργούνται από δύο ίδια ζεύγη εισόδου, το μέγιστο και το ελάχιστο, πρέπει να είναι ίσοι εάν ο ένας επικαλύπτει ακριβώς τον άλλον μετά από κάποια μετατόπιση της παραμέτρου εξόδου.

Η ιδιότητα wiping-out καθορίζει ποιες τιμές της προηγούμενης τροχιάς εισόδου επηρεάζουν την έξοδο του ρεύματος, δηλαδή ποιο κυρίαρχο μέγιστο και ελάχιστο μπορούν να εξαλείψουν τα αποτελέσματα των προηγούμενων μικρότερων. Το μοντέλο Preisach για την περιγραφή της συμπεριφοράς υστέρησης των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$y(t) = \iint \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u(t)] d\alpha d\beta \quad (4.61)$$

Όπου:

P: είναι το επίπεδο Preisach

$\gamma_{\alpha\beta}[\cdot]$: είναι ο ηλεκτρονόμος υστέρησης

u(t) και y(t): είναι η είσοδος και η έξοδος, αντίστοιχα

$\mu(\alpha, \beta)$: είναι μια συνάρτηση στάθμισης που περιγράφει τη σχετική συμβολή κάθε ηλεκτρονόμου στη συνολική υστέρηση

Κάθε ρελέ χαρακτηρίζεται από το ζεύγος τιμών μεταγωγής (α, β) με $\alpha \geq \beta$.

Καθώς η είσοδος ποικίλλει με το χρόνο, κάθε μεμονωμένο ρελέ προσαρμόζει την έξοδό του σύμφωνα με την τιμή εισόδου του ηλεκτρικού πεδίου και το σταθμισμένο άθροισμα όλων των εξόδων ρελέ παρέχει τη συνολική έξοδο του συστήματος.

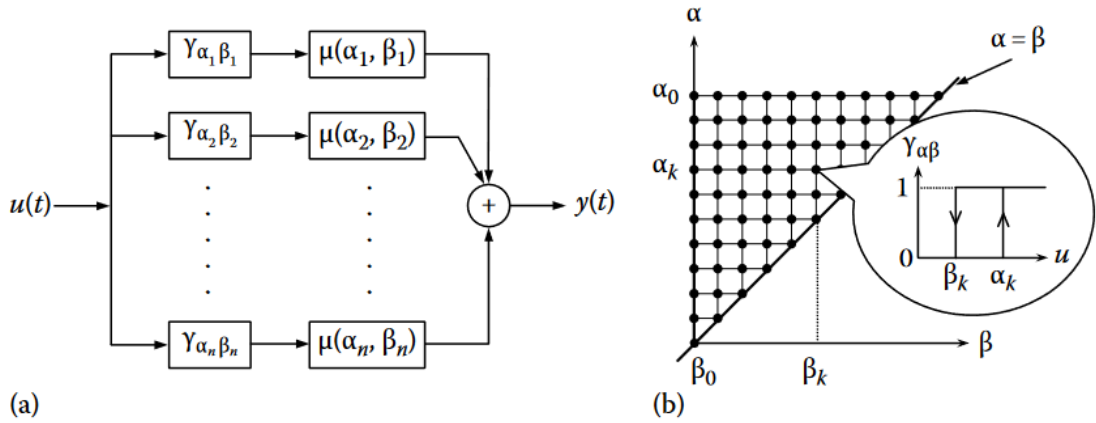
Ο απλούστερος δυνατός ηλεκτρονόμος υστέρησης για πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές είναι μια τροποποίηση ενός κλασικού ηλεκτρονόμου που έχει δύο καταστάσεις, -1 και 1 , που αντιστοιχούν στις αντίθετες πολώσεις των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Η έξοδος του εγκεκριμένου ρελέ για τους πιεζοηλεκτρικούς επενεργητές είναι είτε 0 είτε 1. Στην περίπτωση αυτή, ο βρόχος υστέρησης βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο του επιπέδου εισόδου-εξόδου. Το επίπεδο Preisach, P, μπορεί να ερμηνευθεί γεωμετρικά ως αντιστοίχιση ένα προς ένα μεταξύ των ρελέ και των τιμών μεταγωγής των (α, β).

Το επίπεδο Preisach παρέχει την κατάσταση ενός μεμονωμένου ρελέ, και έτσι το επίπεδο χωρίζεται σε δύο χρονικά μεταβαλλόμενες περιοχές ως εξής:

$$P_- = \{(\alpha, \beta) \in P \mid \text{output of } \gamma_{\alpha\beta} \text{ is } 0\} \quad (4.62)$$

$$P_+ = \{(\alpha, \beta) \in P \mid \text{output of } \gamma_{\alpha\beta} \text{ is } 1\} \quad (4.63)$$



Εικόνα 4.8: Διαμόρφωση του μοντέλου Preisach. (α) Μπλοκ διάγραμμα και (β) ρελέ υστέρησης στο επίπεδο Preisach.

Οι δύο περιοχές αντιπροσωπεύουν ότι οι ηλεκτρονόμοι βρίσκονται στις θέσεις 0 και 1, αντίστοιχα. Επομένως, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να αναχθεί σε:

$$y = \iint \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \tag{4.64}$$

Η χρήση μιας αριθμητικής τεχνικής για την αναγνώριση του μοντέλου Preisach έχει συνήθως αποδειχθεί ως ένας αποτελεσματικός τρόπος για έξυπνα υλικά. Θεωρήστε μία από τις τιμές πλέγματος (α_1, β_1) .

Η φθίνουσα καμπύλη πρώτης τάξης (FOD) είναι ένα σύνολο μετρούμενων τιμών $(y^{\alpha_1}, y^{\alpha_1 \beta_1})$ με μονοτονική αύξηση σε τιμή α_1 , στη συνέχεια μονοτονική μείωση σε β_1 . Αφού η είσοδος κορυφωθεί στο α_1 , η μείωση σαρώνει την περιοχή Ω , δημιουργώντας τον φθίνοντα κλάδο μέσα στον κύριο βρόχο. Τότε μια συνάρτηση $T(\alpha_1, \beta_1)$ μπορεί να οριστεί ως η αλλαγή εξόδου κατά μήκος του φθίνοντος κλάδου ως εξής:

$$T(\alpha_1, \beta_1) = \iint \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = y^{\alpha_1} - y^{\alpha_1 \beta_1} \tag{4.65}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, ένας σαφής τύπος για την έξοδο της υστέρησης ως προς τα πειραματικά δεδομένα μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$\tau_y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} \iint \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \sum_{k=1}^{n(t)} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] \tag{4.66}$$

Κατά συνέπεια, για αυξανόμενες και φθίνουσες περιπτώσεις εισόδου, η έξοδος του μοντέλου Preisach εκφράζεται με πειραματικά καθορισμένο $T(\alpha_k, \beta_k)$:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] + T(u(t), \beta_{n(t)-1}) \text{ για αύξηση} \tag{4.67}$$

$$y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] + [T(\alpha_{n(t)}, \beta_{n(t)-1}) - T(\alpha_{n(t)}, \theta(\tau))] \quad (4.68)$$

Για μείωση

Μια απλή στρατηγική ελέγχου ανοιχτού βρόχου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αναστροφής του μοντέλου Preisach, η οποία είναι μια αντιστάθμιση της μη γραμμικότητας υστέρησης βάσει μοντέλου. Εάν δοθεί η είσοδος, η έξοδος μπορεί να προβλεφθεί από το μοντέλο Preisach. Σε αντίθεση, η είσοδος για τη δημιουργία μιας επιθυμητής εξόδου μπορεί να υπολογιστεί από το αντίστροφο μοντέλο της.

Σε αυτή την απλή στρατηγική ανοιχτού βρόχου, η απόδοση του ελέγχου επηρεάζεται σημαντικά από την ακρίβεια του διαμορφωμένου μοντέλου. Αφού καθορίσετε ένα σύνολο επιθυμητών εξόδων $y_d(k)$, η αντίστοιχη επιθυμητή είσοδος $u_d(k)$ υπολογίζεται από την ονομαστική σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου ($y = f(u)$). Στη συνέχεια, η k th προβλεπόμενη έξοδος υπολογίζεται από την k th επιθυμητή είσοδο ως το πρώτο βήμα πρόβλεψης.

Στο βήμα γραμμικοποίησης, η προβλεπόμενη έξοδος $y_r(k)$ συγκρίνεται με την επιθυμητή έξοδο $y_d(k)$ και στη συνέχεια ο αλγόριθμος ενημερώνει επανειλημμένα την πραγματική είσοδο ελέγχου έως ότου το σφάλμα του είναι αρκετά μικρό. Επομένως, η τελική k th είσοδος ελέγχου $u_{ff}(k)$ μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$u_{ff}(k) = u_d(k) + \Delta u \quad (4.69)$$

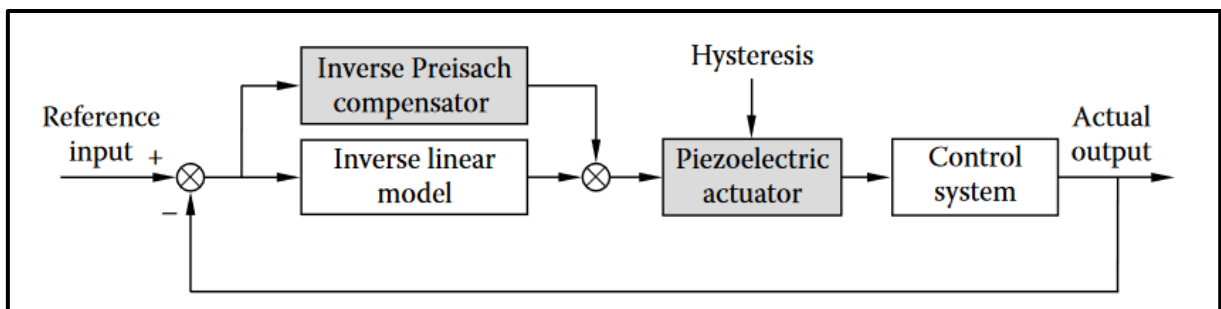
$$\Delta u = \sum_{i=1}^m (f^{-1}(y_d(k) - y_r(k))), \quad \text{αυξάνεται το } i \text{ μέχρι } |y_d(k) - y_r(k)| < \varepsilon \quad (4.70)$$

Όπου:

ε : είναι δεσμευμένο σφάλμα

m : είναι ο αριθμός των φορών ενημέρωσης

Αφού ληφθεί μια k th είσοδο ελέγχου, εισάγεται η επόμενη ($k + 1$) η επιθυμητή έξοδος και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ολόκληρο το επιθυμητό σύνολο εξόδου. Το παρακάτω σχήμα αντιπροσωπεύει την αντίστροφη αντιστάθμιση Preisach.



Εικόνα 4.9: Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου της αντίστροφης αντιστάθμισης Preisach.

5 Συμπεράσματα-Επίλογος

Παρατηρούμε ότι τα έξυπνα υλικά, και ιδιαίτερα τα πιεζοηλεκτρικά υλικά περιτριβίζουν τον κόσμο που ζούμε, από τις πιο μικρές κατασκευές έως τις πιο μεγάλες και απαιτητικές κατασκευές. Βλέπουμε ότι η κύρια χρήση τους είναι κυρίως ως αισθητήρες και ως επενεργητές. Είναι αξιοσημείωτο να τονίσουμε ότι τα ίδια τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε εάν θέλουμε να επενεργήσουμε κάπου είτε εάν θέλουμε να λάβουμε δεδομένα από κάπου.

Με άλλα λόγια τα πιεζοηλεκτρικά μπορούν να παράξουν έργο από ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και το αντίθετο, από έργο να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς την χρήση επιπλέον κυκλωμάτων. Η χρήση τους μπορεί να φτάσει από ένα απλό χαλαζιακό ταλαντωτή που χρησιμοποιούν όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα σαν ρολόι, έως την απόσβεση ταλαντώσεων στα φτερά μαχητικών αεροσκαφών.

Το κύριο συμπέρασμα που παρατηρείται είναι ότι αν και η τεχνολογία των πιεζοηλεκτρικών υλικών υπάρχει εδώ και μερικές δεκαετίες, η τεχνικές ελέγχου δεν έχουν εξελιχθεί τόσο πολύ ώστε να είναι σε θέση να χρησιμοποιούνται σε απαιτητικές μηχανολογικές κατασκευές. Οι νέες στρατηγικές ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί για τον έλεγχο των πιεζοηλεκτρικών επενεργητών είναι αρκετά περίπλοκες, οπότε για αυτό τον λόγο είναι ακόμα δύσκολο να εφαρμοστούν σε ευρεία κλίμακα.

6 Βιβλιογραφία

1. Wang, J., Wu, D., Liu, J., & Lu, W. (2019). *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. John Wiley & Sons.
2. Liu, H., & Zhang, Q. (2018). *Advances in Piezoelectric Materials: Materials Science, Technology, and Applications*. CRC Press.
3. Ounaies, Z., Park, C., & Wise, K. E. (Eds.). (2013). *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. Springer.
4. Safari, A., Sabuzima, A. P., & Chaudhary, G. (2019). *Piezoelectric materials: advances in science, technology, and applications*. Springer.
5. Bharti, C., & Bera, J. (Eds.). (2017). *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. Springer.
6. Kim, J., & Luo, J. (2016). *Piezoelectric Energy Harvesting*. Springer.
7. Wang, F., Luo, H., & Hu, Y. (Eds.). (2019). *Smart Materials for Advanced Environmental Applications*. Springer.
8. Sahu, R., Sahu, P. K., & Badugu, S. (2018). *Recent Advances in Smart Self-Healing Polymers and Composites*. Woodhead Publishing.
9. Oh, I. K., Park, J. M., & Kim, J. S. (Eds.). (2017). *Smart Composite Coatings and Membranes: Transport, Structural, Environmental and Energy Applications*. Woodhead Publishing.
10. Han, M., & Kim, J. (2016). *Smart Composite Coatings and Membranes: Transport, Structural, Environmental and Energy Applications*. CRC Press.
11. Palumbo, G., & Hagedorn-Hansen, D. (Eds.). (2017). *Advances in Smart Coatings and Thin Films for Future Industrial and Biomedical Engineering Applications*. Woodhead Publishing.
12. Wang, Q., Ou, J., & Zhang, J. (Eds.). (2019). *Smart Construction Materials and Systems*. Springer.
13. Behera, R. K., & Patnaik, A. (2017). *Smart Materials: Proceedings of the International Conference on Smart Materials, Structures and Systems (ICSMS 2017)*. Springer.
14. Raghavan, S., Singh, N., & Sridhar, S. (Eds.). (2018). *Smart Structures: Innovations and Challenges*. CRC Press.

15. Bhalla, A. S., & Gupta, V. (2019). *Piezoelectric Materials: Structure, Properties and Applications*. Springer.
16. Zhang, Y., & Wang, F. (2019). *Piezoelectric Materials: Applications in SHM, Energy Harvesting and Biomechanics*. Springer.
17. Rajapakse, R. K. N. D., & Rajapakse, M. K. G. (2018). *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*. Springer.
18. Panda, S. K., & Nayak, J. (2019). *Advances in Smart Materials for Analysis and Design of Structural Systems*. Springer.
19. Madenci, E., & Oterkus, E. (2014). *Piezoelectric-Based Vibration Control: From Macro to Micro/Nano Scale Systems*. John Wiley & Sons.
20. Wang, F., & Chen, Y. (2018). *Piezoelectric-Based Vibration Control: From Macro to Micro/Nano Scale Systems*. Springer.
21. Saravanakumar, R., & Navaneethkrishnan, P. (Eds.). (2018). *Piezoelectric Materials and Devices: Practice and Applications*. CRC Press.
22. Jaffe, B., Cook, W. R., & Jaffe, H. (1971). *Piezoelectric Ceramics*. Academic Press.
23. Rinaldi, M., & Tadigadapa, S. (Eds.). (2019). *Integrated Ferroelectrics: Materials, Applications and Devices*. Taylor & Francis.
24. Park, S. E., & Shrout, T. R. (1997). Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals. *Journal of Applied Physics*, 82(4), 1804-1811.
25. Damjanovic, D. (1998). Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. *Reports on Progress in Physics*, 61(9), 1267-1324.
26. Saito, Y., Takao, H., Tani, T., Nonoyama, T., Takatori, K., Homma, T., ... & Kamei, S. (2004). Lead-free piezoceramics. *Nature*, 432(7013), 84-87.
27. Bhattacharya, K., Priya, S., & Woo, T. (2015). Lead-free piezoelectrics: Current status and perspectives. *MRS Bulletin*, 40(05), 397-402.
28. Xu, Z., Zhang, Y., & Yang, H. (2019). Flexoelectricity in solids: From theory to applications. *Advanced Materials*, 31(40), 1903263.
29. Wu, J., Chen, H., & Wang, Z. L. (2014). Piezotronics and piezo-phototronics for adaptive electronics and optoelectronics. *Nature Reviews Materials*, 1(2), 16031.
30. Ma, X., Liu, J., Lu, W., & Wang, J. (2016). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanostructures. *Nano Energy*, 22, 428-448.

31. Zhou, Y., Dai, J., Wang, Z. L., & Jiang, C. (2020). Self-powered flexible electronic skin based on piezoelectric nanogenerators. *Matter*, 2(5), 1208-1231.
32. Yuan, F., Zhu, Y., & Wang, Z. L. (2019). Recent advances in flexible and stretchable bio-electronics based on nanomaterials. *Advanced Materials*, 31(21), 1807-1836.
33. Bowen, C. R., Kim, H. A., Weaver, P. M., & Dunn, S. (Eds.). (2013). *Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications*. Springer.
34. Alper, S. E., & Newnham, R. E. (1990). Materials selection for piezoelectric transducers. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(5), 1217-1231.
35. Bai, Y., Wang, F., & Zhao, X. (Eds.). (2017). *Self-powered wearable devices and systems: From theory to applications*. Springer.
36. Zhu, Y., Yang, W., Yang, Y., & Wang, Z. L. (2015). Muscle-driven in vivo nanogenerator. *Advanced Materials*, 27(10), 1648-1654.
37. Wu, C., Zhang, Y., Yuan, X., & Wang, Z. L. (2019). Self-powered systems and applications based on nanogenerators. *Advanced Materials*, 31(40), 1902307.
38. Kim, D. H., Lu, N., Ma, R., Kim, Y. S., Kim, R. H., Wang, S., ... & Rogers, J. A. (2011). Epidermal electronics. *Science*, 333(6044), 838-843.
39. Chen, X., Xu, S., Yao, N., Shi, Y., & Shi, J. (2015). A review on mechanochemistry-assisted synthesis and applications. *Nanoscale*, 7(6), 2643-2661.
40. Lee, J., Wu, J., Deng, J., Liu, Z., Zhu, G., Yang, R., & Wang, Z. L. (2012). A mechanically driven form of Kirigami as a route to 3D mesostructures in micro/nanomembranes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(20), 7650-7654.