



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Χαρακτηρισμός και Μελέτη Ακουστικών Αισθητήρων και Σημάτων για
Υποθαλάσσιες Εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Π. Λαζανάς

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Χαρακτηρισμός και Μελέτη Ακουστικών Αισθητήρων και Σημάτων για
Υποθαλάσσιες Εφαρμογές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Λαζανάς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Ιούλη 2022

.....
.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
.....
Ιωάννης Γκόνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αντώνιος Π. Λαζανάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αντώνιος Λαζανάς, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υδρόφωνα αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία, ως ακουστικοί αισθητήρες υδάτινου περιβάλλοντος, για πληθώρα εφαρμογών, όπως η ωκεανογραφία, η μελέτη της θαλάσσιας ζωής, η κλιματολογία, συστήματα πλοήγησης, εντοπισμού κ.α. Η σχεδίαση και η ανάπτυξη υδροφώνων διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή αλλά, σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ένα σύστημα διακρίβωσης, με το οποίο πραγματοποιείται η αρχική βαθμονόμηση του υδροφώνου αλλά και επιβεβαιώνεται η ορθότητα της λειτουργίας του στη συνέχεια.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, αρχικά, ένα αδιαβροχοποιημένο υδρόφωνο, στη βάση μιας πιεζοηλεκτρικής κάψας. Ακόμα, κατασκευάστηκε μια διάταξη διακρίβωσης, αποτελούμενη από μια δεξαμενή νερού, ένα σύστημα ανάρτησης, όργανα παραγωγής/μέτρησης σημάτων και ενισχυτικά κυκλώματα.

Στη συνέχεια, αυτή η διάταξη διακρίβωσης χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή διαγραμμάτων απόκρισης για τα κατασκευασμένα υδρόφωνα, με την τοποθέτηση δύο εξ' αυτών στη δεξαμενή και τη χρήση τους ως ζευγάρι εκπομπού-δέκτη, στέλνοντας και λαμβάνοντας, αντίστοιχα, ημιτονοειδή σήματα για τη μέτρηση της απόκρισης.

λέξεις-κλειδιά: υδρόφωνο, ηλεκτροακουστικός μετατροπέας, διακρίβωση υδροφώνου, πιεζοηλεκτρική κάψα, απόκριση συχνότητας υδροφώνου

ABSTRACT

Hydrophones are extremely useful devices, used as acoustic sensors in underwater environments for a multitude of applications, including oceanography, underwater life monitoring, climatology, navigation and location systems etc. The design and construction process of hydrophones is depended on the desired application but, in any case, a calibration system, with which the initialization of the hydrophone is performed, as well as the verification of its reliability later on, is necessary.

As part of this thesis a waterproof hydrophone, on a basis of a piezoelectric capsule, was designed and constructed. In addition, a calibration setup, consisting of a water tank, a suspension system, signal generating/analyzing instruments and amplifying circuits.

Following that, the calibration setup was used for the purpose of extracting the frequency response diagrams of the constructed hydrophones by placing two of them into the tank and using them as a pair of a projector-reciever, sending and receiving sinusoidal signals for the measurement of the response.

key words: hydrophone, electroacoustic transducer, hydrophone calibration, piezoelectric capsule, hydrophone frequency response

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και η κατασκευή υδροφώνων, καθώς και η κατασκευή μιας διάταξης διακρίβωσης. Η εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Σκοπός ήταν η κατασκευή ενός αδιαβροχοποιημένου πιεζοηλεκτρικού υδροφώνου με χαμηλό κόστος και αποτελεσματική λειτουργία.

Στο κεφάλαιο 1 αναφέρονται ιστορικά στοιχεία για την εξέλιξη της υποθαλάσσιας ακουστικής, των πιεζοηλεκτρικών υλικών και των υδροφώνων, καθώς και παραδείγματα εφαρμογών τους.

Στο κεφάλαιο 2 περιλαμβάνονται βασικές αρχές της ηλεκτροακουστικής και της ηλεκτρικής ανάλυσης μορφομετατροπών μέσω ισοδύναμων κυκλωμάτων, καθώς και οι βασικοί τύποι ηλεκτροακουστικής μετατροπής.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η θεωρητική ανάλυση των μεθόδων XRD και SEM ως μέθοδοι λήψης μικρογραφιών, στοιχειακής ανάλυσης και μελέτης κρυσταλλικής δομής.

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται οι πιο συνήθεις γεωμετρίες και χαρακτηριστικά των μορφομετατροπών υδροακουστικής φύσεως, οι βασικές τιμές των μορφομετατροπικών υλικών και οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά και τη λειτουργία μιας διάταξης μορφομετατροπείας.

Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται και αναλύονται οι διάφορες μέθοδοι διακρίβωσης υδροφώνων της βιβλιογραφίας, καθώς και μέθοδοι προσέγγισης ελεύθερου πεδίου.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται ανάλυση των πιεζοηλεκτρικών καψών που χρησιμοποιήθηκαν και των χαρακτηριστικών τους, η περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής του αδιαβροχοποιημένου υδροφώνου και η ανάλυση της πειραματικής διάταξης διακρίβωσης και των στοιχείων που την αποτελούν.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται η διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και των παραμέτρων τους και παρατείνονται τα αποτελέσματα με τη μορφή διαγραμμάτων απόκρισης συχνότητας, μαζί με τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτά. Τέλος, αναφέρονται θέματα μελλοντικής έρευνας και βελτίωσης της ακουστικής απόκρισης των υδροφώνων και της διαδικασίας διακρίβωσης.

Για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, για το ενδιαφέρον και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα την Υ.Δ. Νεφέλη Μότση για τη βοήθεια και τη συνεργασία της, καθώς και για την ανεκτίμητη συνεισφορά της σε κάθε πτυχή αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μέλος του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων Δρ. Σπύρο Αγγελόπουλο και τους Υ. Δ. Παναγιώτη Πρίφτη και Χρόνη Παττακό, για τη δική τους καθοριστική βοήθεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.2 Τα Υδρόφωνα – Ιστορική Αναδρομή..... | 1 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ..... | 7 |
| 2.1 Ηλεκτροακουστική..... | 7 |
| 2.1.1 Ηλεκτρομηχανοακουστικά Ανάλογα..... | 7 |
| 2.1.2 Ισοδύναμα Κυκλώματα Μετατροπέων..... | 8 |
| 2.1.3 Αμοιβαιότητα..... | 9 |
| 2.1.4 Ισοδύναμα Κυκλώματα..... | 10 |
| 2.2 Τύποι Ηλεκτρομηχανοακουστικής Μετατροπής..... | 13 |
| 2.2.1 Πιεζοηλεκτρισμός..... | 13 |
| 2.2.2 Μαγνητοσυστολή..... | 16 |
| 2.2.3 Ηλεκτρομαγνητισμός..... | 18 |
| 2.2.4 Ηλεκτροστατική..... | 19 |
| 2.2.5 Οπτική..... | 20 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ..... | 23 |
| 3.1 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού της Κρυσταλλικής Δομής..... | 23 |
| 3.1.1 Μέθοδος Περίθλασης Ακτίνων Χ (X-ray Diffraction)..... | 23 |
| 3.1.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope)..... | 25 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΜΟΡΦΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ..... | 29 |
| 4.1 Γεωμετρίες και Διατάξεις Μορφομετατροπέων..... | 29 |
| 4.1.1 Κυλινδρική Γεωμετρία..... | 29 |
| 4.1.2 Σφαιρική Γεωμετρία..... | 30 |
| 4.1.3 Μορφομετατροπέας Tonpitz..... | 31 |
| 4.1.4 Μορφομετατροπείς Καμπτικών Ταλαντώσεων (Flextensional)..... | 33 |
| 4.2 Βασικές Τιμές Υλικών Μορφομετατροπέων..... | 34 |
| 4.2.1 Συντελεστής παραμόρφωσης ή πιεζοηλεκτρικός συντελεστής d_{ij} | 34 |
| 4.2.2 Συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k^2 | 35 |
| 4.2.3 Συντελεστής ποιότητας μηχανικού συντονισμού Q_m | 35 |
| 4.3 Χαρακτηρισμός διατάξεων μορφομετατροπέων..... | 37 |
| 4.3.1 Σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση Z_{el} | 37 |
| 4.3.2 Συχνότητα συντονισμού f_r | 39 |
| 4.3.3 Σύνθετη ακουστική αντίσταση Z_a | 40 |

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ..... | 43 |
| 5.1 Διακρίβωση διάταξης υδροφώνων..... | 43 |
| 5.1.1 Δευτερεύουσες μέθοδοι..... | 44 |
| 5.1.2 Πρωτεύουσες (απόλυτες) μέθοδοι..... | 46 |
| 5.2 Ζητήματα και μέθοδοι προσέγγισης ελεύθερου πεδίου..... | 54 |
| 5.2.1 Χρονικά περιορισμένοι παλμοί..... | 55 |
| 5.2.2 Πεδίο διάχυσης (Diffuse field)..... | 56 |
| 5.2.3 Φασματομετρία χρονικής καθυστέρησης (TDS)..... | 56 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ..... | 59 |
| 6.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά..... | 59 |
| 6.2 Χαρακτηρισμός πιεζοηλεκτρικού υλικού..... | 61 |
| 6.2.1 Ανάλυση XRD..... | 61 |
| 6.2.2 Ανάλυση SEM..... | 62 |
| 6.3 Στεγανοποίηση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου..... | 64 |
| 6.3.1 Κατασκευή περιβλήματος με χρήση μεταλλικού δοχείου..... | 65 |
| 6.3.2 Σχεδίαση και κατασκευή περιβλήματος εκ νέου..... | 65 |
| 6.4 Η πειραματική διάταξη..... | 69 |
| 6.4.1 Η δεξαμενή/το σύστημα ανάρτησης..... | 69 |
| 6.4.2 Τα όργανα μέτρησης..... | 70 |
| 6.4.3 Το κύκλωμα ενίσχυσης..... | 71 |
| 6.4.4 Καταγραφή σήματος σε υπολογιστή..... | 75 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 77 |
| 7.1 Πειραματικές παράμετροι των μετρήσεων..... | 77 |
| 7.2 Διαγράμματα απόκρισης συχνοτήτων..... | 78 |
| 7.3 Συμπεράσματα..... | 86 |
| 7.4 Μελλοντική έρευνα..... | 87 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 89 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη εφαρμογών βασισμένων στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τον 20ό αιώνα ήταν καθοριστικός για την ανθρωπότητα και άλλαξε για πάντα τη ζωή πάνω στον πλανήτη. Το ραδιόφωνο και η τηλεόραση έδωσαν τη δυνατότητα στην πληροφορία να μεταδίδεται απ' άκρη σ' άκρη του κόσμου σε δευτερόλεπτα και έφερε την ενημέρωση στα σπίτια των ανθρώπων. Οι τηλεπικοινωνίες και το ραντάρ άλλαξαν το πρόσωπο του πολέμου, επιτρέποντας το συγχρονισμό τεράστιων δυνάμεων και το συντονισμό κολοσσιαίων στρατιωτικών επιχειρήσεων, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα του πολέμου σε ασύλληπτο, για τη μέχρι τότε εποχή, βαθμό. Από την άλλη πλευρά, επέτρεψε στον άνθρωπο να εξερευνήσει και να χαρτογραφήσει ακόμα και τα πιο δυσπρόσιτα μέρη, φτάνοντας μέχρι το διάστημα. Όλες αυτές, όμως, οι τεχνολογίες αποδείχθηκαν άχρηστες για τη θάλασσα, καθώς το υδάτινο περιβάλλον, λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητάς και μαγνητικής διαπερατότητάς του, οδηγεί σε τεράστια απόσβεση κατά τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [1]. Συνεπώς, προκειμένου να εφαρμοστούν οι αντίστοιχες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται ακουστικές μέθοδοι, αξιοποιώντας τις ακουστικές ιδιότητες του νερού (μεγάλη πυκνότητα, χαμηλές απώλειες, υψηλή ταχύτητα).

1.2 Τα Υδρόφωνα – Ιστορική Αναδρομή

Υδρόφωνο ονομάζουμε ένα μικρόφωνο, σχεδιασμένο ώστε να μετατρέπει υποβρύχιους ήχους σε ηλεκτρικά σήματα. Η λειτουργία των υδροφώνων ως ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς βασίζεται κυρίως στο φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού και του σιδηροηλεκτρισμού.

Το πρώτο υδρόφωνο ευρείας χρήσης ήταν ένα μικρόφωνο άνθρακα σε αδιάβροχο περίβλημα, τοποθετημένο στην πλώρη караβιών, με σκοπό να εντοπίζει τους ήχους από υποθαλάσσιες καμπάνες κοντινών φάρων, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα [2].

Η ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και του αντιστρόφου του από τους αδερφούς Curie και τον Lippmann σε μονοκρυστάλλα υλικά όπως ο χαλαζίας και το άλας

του Rochelle έπαιξε καθοριστικό ρόλο για την ανάπτυξη και τη χρήση των υδροφώνων τις επόμενες δεκαετίες [3].

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο Καναδός R.A. Fessenden, στον απόηχο της τραγωδίας του Τιτανικού, κατασκεύασε τον ταλαντωτή Fessenden (σχήμα 1.2.1), μία διάταξη ηχείου-μικροφώνου βασισμένη στον ηλεκτρομαγνητισμό, που επέτρεπε ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη, επιτρέποντας στα πλοία να επικοινωνούν με κώδικα Morse, αλλά και να εντοπίζουν εμπόδια μέσω της ηχούς εκπομπής. Έτσι, τέθηκε σε εφαρμογή το πρώτο σύστημα σόναρ.

Το ξέσπασμα του πρώτου παγκοσμίου πολέμου και η ανάπτυξη των υποβρυχίων έκανε επιτακτική την ανάγκη εφεύρεσης συστημάτων για τον εντοπισμό τους. Στη Γαλλία, ο Paul Langevin, μετά από αρκετά μη ικανοποιητικά πειράματα με ηλεκτροστατικούς μορφομετατροπείς και μικρόφωνα άνθρακα, στρέφεται προς τον πιεζοηλεκτρισμό και κατασκευάζει την πρώτη λειτουργική διάταξη σόναρ βασισμένη στο χαλαζία (σχήμα 1.2.2). Η διάταξή του αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα χαλαζία, πάχους 4mm, με δύο χαλύβδινες πλάκες, που λειτουργούσαν ως ηλεκτρόδια, εκατέρωθεν. Αυτά συνδέονταν με έναν ταλαντωτή για την ενεργή λειτουργία και μια ενισχυτική βαθμίδα για την παθητική, αξιοποιώντας την πρωτοποριακή (για την εποχή) λυχνία κενού Audion, ώστε να ενισχύσει το χαμηλό κέρδος και να αντισταθμίσει την υψηλή εμπέδηση εισόδου του πιεζοηλεκτρικού μορφομετατροπέα. Η διάταξή του (με συχνότητα συντονισμού στα 40kHz) είχε τη δυνατότητα να λαμβάνει ηχώ από επιφάνειες υποβρυχίων, καθώς και να εκπέμπει μετρήσιμα σήματα μέχρι και την απόσταση των 8 χιλιομέτρων [4].

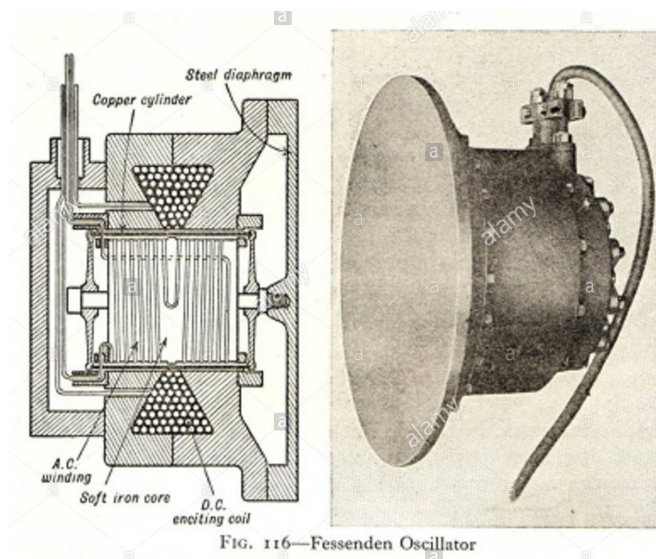
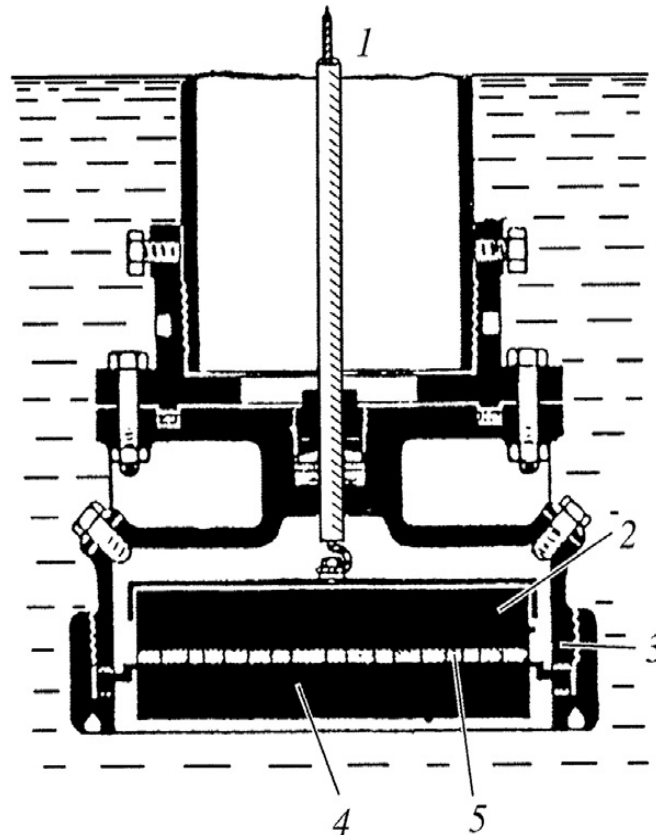


FIG. 116—Fessenden Oscillator

Σχήμα 1.2.1: Ο Ταλαντωτής Fessenden [5].

Παράλληλα, στην Αγγλία, η ομάδα των A.B. Wood, R.W. Boyle και Λόρδου Rutherford κατασκευάζουν, με τη συνεργασία του Langevin, τη δική τους διάταξη σόναρ με την ονομασία ASDIC, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες η ομάδα του H.C. Hayes κατασκευάζει την πρώτη συστοιχία υδροφώνων, με την ονομασία “the Eel”, καθώς σεργνόταν πίσω από το πλοίο (“συρόμενη διάταξη – towed array”).



Σχήμα 1.2.2: Η διάταξη του Langevin: 1. Η σύνδεση της διάταξης με τον ταλαντωτή και τον ενισχυτή 2. Το εσωτερικό ηλεκτρόδιο 3. Το στεγανοποιημένο περίβλημα 4. Το εξωτερικό ηλεκτρόδιο 5. Το στρώμα Χαλαζία [6].

Μετά το τέλος του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου η ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών οδηγεί σε μεγάλες αλλαγές στον τομέα της υδροακουστικής. Το άλας του Rochelle ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) είναι ένα κρυσταλλικό υλικό του οποίου η χαμηλή διαθεσιμότητα, παρ'ότι ήταν γνωστό ότι είχε καλύτερα πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά από το χαλαζία, δεν ευνοούσε τη χρήση του. Η ανάπτυξη συνθετικών κρυστάλλων άλατος Rochelle τη δεκαετία του '20 επιτρέπει τη χρήση του υλικού στην κατασκευή υδροφώνων, αλλά και σε πολλές εμπορικές εφαρμογές, όπως γραμμόφωνα, μικρόφωνα και ακουστικά.

Σηματοδοτεί τη στροφή από τα ορυκτά κρυσταλλικά υλικά, όπως ο χαλαζίας, σε συνθετικά, με καλύτερες ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες [7].

Στην ίδια κατεύθυνση, ιδιαίτερα καθοριστική ήταν και η ανάπτυξη των κεραμικών υλικών κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, κατά τη διάρκεια του οποίου τα υδρόφωνα αξιοποιούνται σε νέες εφαρμογές, όπως ακουστικές νάρκες, ακουστικά κατευθυνόμενες τορπίλες και ηχοσημαντήρες (αναλώσιμες σηματοδούρες εξοπλισμένες με συστήματα σόναρ και πομπούς αποστολής δεδομένων). Το 1941 ανακαλύπτεται το Τιτανικό Βάριο (BaTiO_3), ένα πολυκρυσταλλικό, κεραμικό υλικό. Η ιδιαίτερα μεγάλη διηλεκτρική σταθερά του, δέκα φορές μεγαλύτερη από τις τιμές των μέχρι τότε γνωστών κεραμικών υλικών (της τάξεως του 1000), το έκανε ιδιαίτερα επιθυμητό σε εφαρμογές πυκνωτών. Το 1945 και 1946 οι Von Hippel στις ΗΠΑ και Wul, Goldman στη Σοβιετική Ένωση αντίστοιχα συνδέουν τις ιδιαίτερες ηλεκτρικές ιδιότητες του Τιτανικού Βαρίου με την σιδηροηλεκτρική του φύση, ενώ, παράλληλα, ο R. B. Gray προτείνει μία μέθοδο μόνιμης πόλωσης πολυκρυσταλλικών υλικών, συνδυάζοντας εφαρμογή ισχυρού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε συνδυασμό με υψηλή θερμοκρασία (θερμοκρασία Curie), με αποτέλεσμα πολυκρυσταλλικά κεραμικά υλικά να αποκτούν μονοκρυσταλλική, πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά [8,9,10]. Με αυτή τη μέθοδο, το Τιτανικό Βάριο αποκτά σημαντικό ρόλο σε πολλές ακουστικές εφαρμογές, όπως τα πικ απ και τα υδρόφωνα, αλλά και σε άλλες, όπως επιταχυντόμετρα και ενδοκαρδιακοί καθετήρες, χάρη στα εξαιρετικά πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά του. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει λίγα χρόνια αργότερα, όταν, στις αρχές του 1950 κατασκευάζεται το κράμα Μολύβδου-Τιτανιούχου Ζιρκονίου (Lead Zirconate Titanate - κοινώς PZT). Το 1955 οι Iaffe, Roth, και Marzullo ανακαλύπτουν ότι οι πιεζοηλεκτρικές και ηλεκτρομηχανικές του ιδιότητες ξεπερνούν όλα τα μέχρι τότε γνωστά υλικά και, χάρη στο χαμηλό του κόστος κατασκευής, κυριαρχεί στις πιεζοηλεκτρικές και ακουστικές εφαρμογές [11].

Παράλληλα, η έλευση του Ψυχρού Πολέμου και των πυρηνικών βαλλιστικών υποβρυχίων οδηγεί σε περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη των συστημάτων σόναρ. Το 1949 αναπτύσσεται στις ΗΠΑ το πρόγραμμα SOSUS(Sound Surveillance System), μια αλυσίδα από υποθαλάσσια στατικά παθητικά σόναρ, αρχικά στις ακτές του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού, με σκοπό τον εντοπισμό σοβιετικών υποβρυχίων (σχήμα 1.2.3). Στη συνέχεια, η εξέλιξη της τεχνολογίας επέτρεψε και τη χρήση συρόμενων διατάξεων, απομακρυσμένων από τις ακτές, με τον συνδυασμό των στατικών και συρόμενων

διατάξεων να ονομάζεται IUSS. Το σύστημα βασιζόταν στη χρήση συστοιχιών υδροφώνων για την αύξηση της κατευθυντικότητας και στην παρακολούθηση του καναλιού SOFAR (ή Deep Sound Channel) που είχε πρόσφατα ανακαλυφθεί, ενός υποθαλάσσιου καναλιού που επιτρέπει την μετάδοση ακουστικών κυμάτων χαμηλών συχνοτήτων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Αξιοποίησε, επίσης, πρωτοποριακά συστήματα φασματικής ανάλυσης [12]. Στις επόμενες δεκαετίες, η συνεχής μείωση του παραγόμενου θορύβου των υποβρυχίων αντιμετωπίζεται με τη στροφή προς στα ενεργά συστήματα σόναρ, έναντι των παθητικών [13].

Πέρα από τη στρατιωτική χρήση τους, τα υδρόφωνα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε πληθώρα άλλων εφαρμογών. Στο πεδίο της ωκεανογραφίας αξιοποιούνται ακουστικά συστήματα βυθομέτρησης και χαρτογράφησης βυθού, πλοήγησης, εντοπισμού ναυαγίων ή άλλων βυθισμένων σωμάτων και, στην αλιεία, συστήματα εντοπισμού κοπαδιών. Παίζουν, επίσης, σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση υποθαλάσσιων ηφαιστειών και σεισμικής δραστηριότητας. Επίσης, σημαντική είναι η χρήση τους για τη μεγάλης κλίμακας μεταβολή της θερμοκρασίας των ωκεανών (μέσω υπολογισμού της ταχύτητας του ήχου), που είναι ένας σημαντικός δείκτης της κλιματικής αλλαγής, αλλά και περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση και ο έλεγχος του υποθαλάσσιου θορύβου και η μελέτη των θαλάσσιων θηλαστικών (φαλαινών, δελφινιών κλπ.) και ψαριών [7]. Ακόμα, αξιοποιούνται στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών μέσω ακουστικών μόντεμ, που διαμορφώνουν και εκπέμπουν ή, αντίστοιχα, λαμβάνουν και αποδιαμορφώνουν ακουστικά σήματα, επιτρέποντας την ύπαρξη καναλιών επικοινωνίας με υποβρύχια ή συσκευές [14]. Ανεκτίμητη είναι, επίσης, η συμβολή τους στον τομέα της διαγνωστικής ιατρικής (υπερηχογράφηση κλπ.).

Ένα παράδειγμα μίας διάταξης τέτοιων εφαρμογών είναι τα ARUs (Archival Marine Acoustic Recording Units), ηχοσημαντήρες (σχήματα 1.2.4 και 1.2.5) που συλλέγουν ακουστικά δεδομένα θαλάσσιων θηλαστικών και προσφέρουν πολύ σημαντικές πληροφορίες για τον εντοπισμό, τη συμπεριφορά και την προστασία τους [15].

IUSS Manning in the Mid 70s



Σχήμα 1.2.3: Το σύστημα SOSUS τη δεκαετία του '70 [16].



Σχήμα 1.2.4: Μια σύγχρονη διάταξη ηχοσημαντήρα [17].



Σχήμα 1.2.5: Ένα ARU κατά την εναπόθεσή του στη Θάλασσα [18].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

2.1 Ηλεκτροακουστική

Ηλεκτροακουστική ονομάζεται ο τομέας της ακουστικής, όπου ένα ακουστικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό/ψηφιακό και το αντίστροφο, μέσω ενός μετατροπέα. Για παράδειγμα, το σήμα φωνής που λαμβάνει ένα πυκνωτικό μικρόφωνο μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, ψηφιοποιείται και αποθηκεύεται σε ένα ψηφιακό μέσο. Στη συνέχεια το σήμα αυτό μπορεί να μετατραπεί πάλι σε αναλογικό και να αναπαραχθεί μέσω ενός κοινού ηλεκτροδυναμικού ηχείου. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στα παραδείγματα που αναφέραμε και στους πιεζοηλεκτρικούς μορφομετατροπείς που μας αφορούν, παρεμβάλλεται ένα στάδιο ηλεκτρομηχανικής ή μηχανοηλεκτρικής μετατροπής (πλην ελαχίστων εξαιρέσεων, όπως είναι, π.χ., τα ηχεία ιοντισμού).

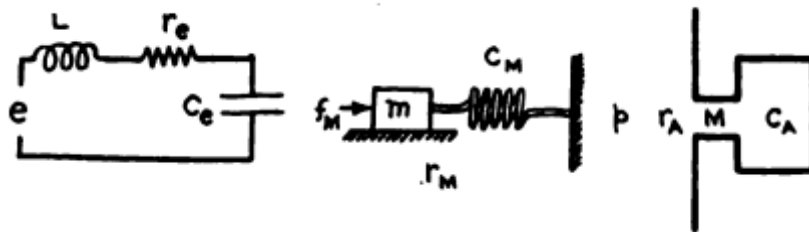
2.1.1 Ηλεκτρομηχανοακουστικά Ανάλογα

Πάνω σε αυτά τα ακουστικά συστήματα, προέκυψε η ανάγκη ανάλυσης της λειτουργίας τους. Λόγω της μεγάλης πείρας σε ανάλυση ηλεκτρικών δικτύων δακρυτών στοιχείων, αναπτύχθηκαν συστήματα ανάλυσης μηχανικών και ακουστικών κυκλωμάτων βασισμένα σε αυτά. Αυτό επιτεύχθηκε με την αντιστοιχία μηχανικών και ακουστικών μεγεθών σε ηλεκτρικά ανάλογα (σχήμα 2.1.1.1), στα οποία ισχύει, θεωρώντας τις κατάλληλες συνθήκες, η αντίστοιχη θεωρία ηλεκτρικών κυκλωμάτων (νόμοι Kirchhoff, θεωρήματα Thevenin και Norton κλπ.) [19]. Η πλήρης αντιστοίχιση παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.1.1:

Πίνακας 2.1.1.1: Ηλεκτρομηχανοακουστικές αναλογίες.

| Ηλεκτρικό Κύκλωμα | Μηχανικό Κύκλωμα | Ακουστικό Κύκλωμα |
|--|--|--|
| Τάση (V) | Μηχανική Δύναμη (f_m) | Πίεση (p) |
| Ρεύμα (I) | Ταχύτητα (u) | Ταχύτητα Όγκου (U) |
| Αντίσταση ($V = RI$) | Τριβή ($f_m = r_m u$) | Αντίσταση Ρευστού ($p = r_a U$) |
| Επαγωγή ($V = L \frac{dI}{dt}$) | Μάζα ($f_m = m \frac{du}{dt}$) | Αντίδραση ($p = M \frac{dU}{dt}$) |
| Χωρητικότητα ($I = C \frac{dV}{dt} \Rightarrow V = \frac{q}{C}$) | Ενδοτικότητα ($f_m = \frac{x}{C_m}$) | Ακουστική Χωρητικότητα ($p = \frac{X}{C_a}$) |

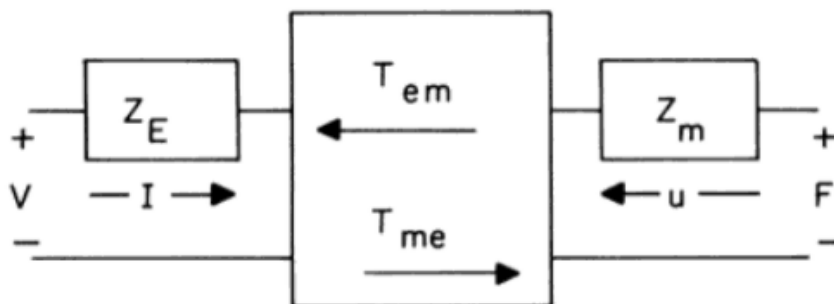
όπου η U δίνεται σε m^3/s , οι r_m, r_a σε $N \cdot s/m$ και οι m, M σε kg και kg/m^4 αντίστοιχα. Η x είναι η μετατόπιση λόγω της f_m σε m , η X η μετατόπιση όγκου σε m^3 και οι C_m, C_a δίνονται σε m/N και m^3/N αντίστοιχα. Αυτή η αντιστοιχία ονομάζεται “Αναλογία Εμπέδησης”, είναι η πιο κοινή και ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί σε μορφομετατροπείς ηλεκτρικής σύζευξης, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί και οι πυκνωτικοί (ηλεκτροστατικοί). Μια άλλη αντιστοιχία, που ονομάζεται “Αναλογία Κινητικότητας” και που αντιστοιχεί την τάση V με την ταχύτητα u και το ρεύμα I με την πίεση p , χρησιμοποιείται συνήθως σε μορφομετατροπείς μαγνητικής σύζευξης, όπως οι μαγνητοσυστολικοί και κινητού πηνίου [20].



Σχήμα 2.1.1.1: Μηχανικό και ακουστικό ανάλογο RLC κύκλωμα ενός βαθμού ελευθερίας [19].

2.1.2 Ισοδύναμα Κυκλώματα Μετατροπέων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα υδρόφωνα, ως μορφομετατροπείς, μετατρέπουν ενέργεια μίας μορφής (ακουστική/μηχανική) σε μία άλλη μορφή (ηλεκτρική). Για να μπορέσουμε, συνεπώς, να μελετήσουμε τη λειτουργία τους, θα πρέπει να τα αναπαραστήσουμε με έναν τρόπο που θα συνδέει την ηλεκτρική με την μηχανική τους πλευρά (σύζευξη). Αυτό γίνεται, αναπαριστώντας το υδρόφωνο (ή άλλον μορφομετατροπέα) ως ένα δίθυρο δίκτυο (σχήμα 2.1.2.1):



Σχήμα 2.1.2.1: Η αναπαράσταση ενός ηλεκτρομηχανικού μορφομετατροπέα ως δίθυρο δίκτυο [21].

όπου τα ηλεκτρικά μεγέθη της αριστερής πλευράς (V,I) συνδέονται με τα μηχανικά μεγέθη της δεξιάς (F,u). Εάν θεωρήσουμε σταθερή αρμονική κατάσταση, τότε το σύστημα μπορεί να περιγραφεί μέσω των ακόλουθων σχέσεων [22]:

$$V = Z_E I + T_{em} u \quad (2.1.2.1)$$

$$F = T_{me} I + Z_m u \quad (2.1.2.2)$$

Όπου $Z_E = \left. \frac{V}{I} \right|_{u=0}$, δηλαδή είναι η ηλεκτρική αντίσταση εισόδου όταν η μηχανική ταχύτητα u είναι μηδενική (το μηχανικό μέρος αποτρέπεται από το να κινηθεί) και $Z_m = \left. \frac{F}{u} \right|_{I=0}$, δηλαδή η μηχανική αντίσταση εισόδου όταν το ηλεκτρικό ρεύμα I είναι μηδενικό (τα άκρα του ηλεκτρικού μέρους είναι ανοιχτοκυκλωμένα). Οι συντελεστές T_{em} και T_{me} ονομάζονται συντελεστές μετατροπίας και καθορίζουν την επίδραση του μηχανικού στο ηλεκτρικό μέρος και του ηλεκτρικού στο μηχανικό αντίστοιχα. Επιπλέον, ορίζονται τα εξής:

Η ελεύθερη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{IN} ως η εμπέδηση που βλέπουν τα ηλεκτρικά άκρα όταν το μηχανικό μέρος είναι απολύτως ελεύθερο να κινηθεί:

$$Z_{IN} = \left. \frac{V}{I} \right|_{F=0} = Z_E - \frac{T_{em} T_{me}}{Z_m} \quad (2.1.2.3)$$

Η μηχανική εμπέδηση βραχυκύκλωσης Z_{in} ως η εμπέδηση που βλέπουν τα μηχανικά άκρα όταν η τάση στα ηλεκτρικά άκρα είναι μηδενική (βραχυκύκλωμα):

$$Z_{in} = \left. \frac{F}{u} \right|_{V=0} = Z_m - \frac{T_{em} T_{me}}{Z_E} \quad (2.1.2.4)$$

2.1.3 Αμοιβαιότητα

Στη θεωρία ηλεκτρικών κυκλωμάτων, αμοιβαιότητα ονομάζεται το φαινόμενο που εμφανίζεται σε ένα γραμμικό στοιχείο ή σε ένα δίκτυο, κατά το οποίο μια εφαρμοζόμενη διέγερση και το αποτέλεσμα που δημιουργεί είναι αντιστρέψιμα, δηλαδή εφαρμογή διέγερσης ίσης με το αρχικό αποτέλεσμα στο σημείο που μετριέται θα οδηγήσει σε αποτέλεσμα ίσο με την αρχική διέγερση στο σημείο που εφαρμόστηκε [23]. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να επεκταθεί και στους μορφομετατροπείς και, συγκεκριμένα, στους

ηλεκτρομηχανικούς/ηλεκτροακουστικούς που μας απασχολούν, με την ονομασία "ηλεκτρομηχανική αμοιβαιότητα". Ισχύει όταν η διέγερση στο ηλεκτρικό μέρος του και το προκαλούμενο αποτέλεσμα στο μηχανικό μέρος είναι αντιστρέψιμα. Η ιδιότητα αυτή απαντάται στους πιεζοηλεκτρικούς μορφομετατροπείς, όπως αποδεικνύει και η ύπαρξη του αντιστρόφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συντελεστές σύζευξης να είναι ίσοι [22]:

$$T_{em} = T_{me} = T \quad (2.1.3.1)$$

Στους ηλεκτρομηχανικούς μορφομετατροπείς μαγνητοσυστολής ή κινητού πηνίου, ισχύει η ιδιότητα της αντι-αμοιβαιότητας, όπου οι συντελεστές σύζευξης είναι ίσοι κατ' απόλυτη τιμή, αλλά όχι αλγεβρικά:

$$T_{em} = -T_{me} \quad (2.1.3.2)$$

Εφ' όσον ισχύει η αμοιβαιότητα, οι σχέσεις που περιγράφουν το ηλεκτρομηχανικό σύστημα μπορούν να ξαναγραφούν, αντικαθιστώντας τους συντελεστές σύζευξης με τον κοινό συντελεστή T :

$$V = Z_E I + Tu \quad (2.1.3.3)$$

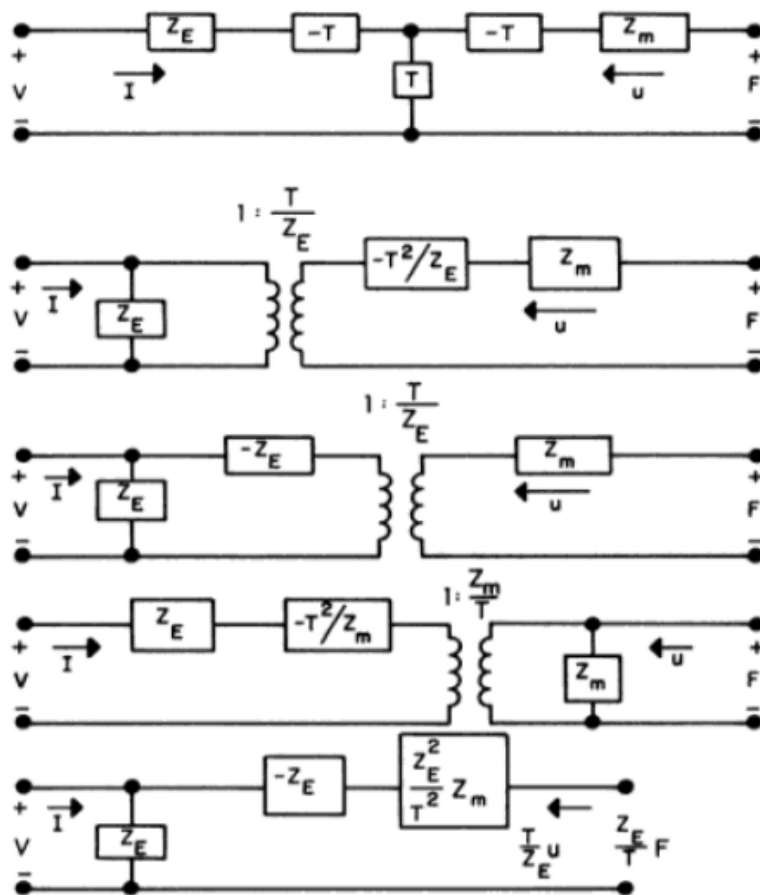
$$F = TI + Z_m u \quad (2.1.3.4)$$

2.1.4 Ισοδύναμα Κυκλώματα

Παρατηρώντας τις σχέσεις αυτές, βλέπουμε ότι το δίθυρο του μορφομετατροπέα μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα εξ' ολοκλήρου ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο θα τις επαληθεύει. Αυτό ονομάζεται ισοδύναμο κύκλωμα και επιτρέπει την ευκολότερη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του (σχήμα 2.1.4.1). Επιπλέον, ορίζεται ο συντελεστής σύζευξης k^2 ως εξής:

$$k^2 = \frac{T^2}{Z_E Z_m} \quad (2.1.4.1)$$

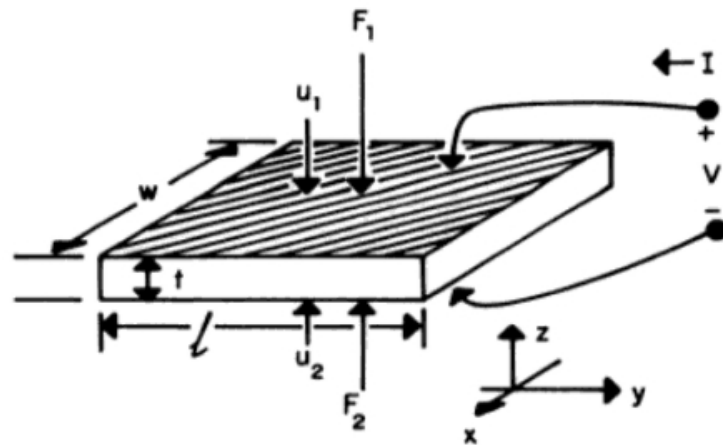
Ο συντελεστής σύζευξης είναι ο αδιάστατος δείκτης απόδοσης του μορφομετατροπέα (ποσοστό ενέργειας που μετατρέπεται από τη μία μορφή στην άλλη) και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1.



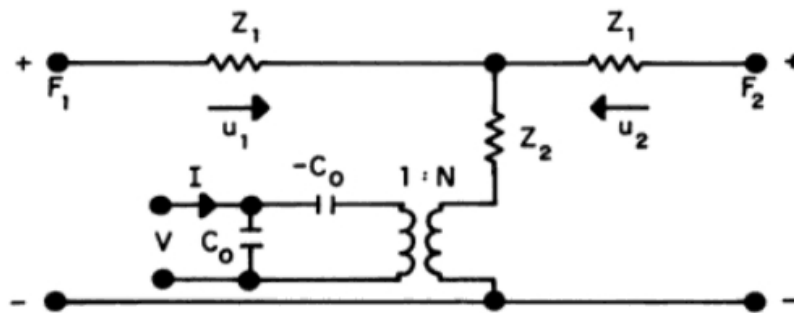
Σχήμα 2.1.4.1: Μερικά τυπικά ισοδύναμα κυκλώματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αντικατάσταση του ηλεκτρομηχανικού αμοιβαίου διθύρου [21].

Κάνοντας περαιτέρω υποθέσεις και απλοποιήσεις (μικρές διαστάσεις υδροφώνου σε σχέση με το μήκος κύματος, αγνόηση των μικρών φαινομένων απόσβεσης, μικρά σήματα, λειτουργία πολύ χαμηλότερα από τη συχνότητα συντονισμού) το ηλεκτρομηχανικό σύστημα του μετατροπέα μπορεί να απλοποιηθεί σε ακόμα πιο απλά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, που θα επιτρέπουν γρηγορότερη και ευκολότερη ανάλυση της λειτουργίας τους. Για παράδειγμα, εάν θεωρηθεί ένα πιεζοηλεκτρικό υδρόφωνο σε μορφή δίσκου (αντίστοιχο του οποίου θα αξιοποιηθεί πειραματικά και στη συνέχεια) που βρίσκεται σε λειτουργία πάχους ("thickness mode", δηλαδή η μηχανική τάση εμφανίζεται μεταξύ των επιφανειών του δίσκου) (σχήμα 2.1.4.2α), τότε μπορούμε να θεωρήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του Mason (σχήμα 2.1.4.2β) [24]:

α)

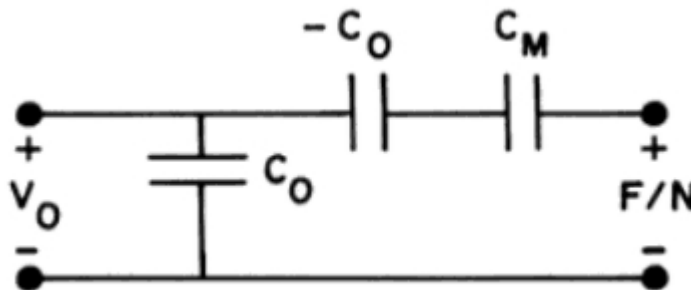


β)



Σχήμα 2.1.4.2: α) Η λειτουργία σε thickness mode β) Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πιεζοηλεκτρικού δίσκου, ελεύθερου και από τις δύο πλευρές, σε αυτή τη λειτουργία [21].

όπου οι Z_1 , Z_2 , N , C_0 (η εσωτερική χωρητικότητα του δίσκου) εξαρτιώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίσκου και από το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Θεωρώντας τις απλοποιήσεις που αναφέραμε παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε στο ακόλουθο κύκλωμα (σχήμα 2.1.4.3):



Σχήμα 2.1.4.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού δίσκου [21].

Όπου $C_M = N^2 C_m$, και C_m η μηχανική ενδοτικότητα, στην οποία έχουν απλοποιηθεί οι σύνθετες αντιστάσεις $Z_{1,2}$, ανηγμένη στην ηλεκτρική πλευρά. Φαίνεται ότι στην

ισοδύναμη αντίσταση εισόδου του υδροφώνου κυριαρχεί η χωρητικότητα. Η αρνητική χωρητικότητα $-C_0$ είναι, προφανώς, ένα μοντελοποιημένο μέγεθος και δεν έχει πραγματική υπόσταση.

2.2 Τύποι Ηλεκτρομηχανοακουστικής Μετατροπής

Στη συνέχεια, θα γίνει λόγος για τους τύπους ηλεκτρομηχανικής μετατροπής και την χρήση τους στην υδροακουστική. Εκτός από τον πιεζοηλεκτρισμό, που κυριαρχεί σε αυτές τις εφαρμογές, οι άλλοι τύποι απαντώνται μάλλον σπανιότερα και σε συγκεκριμένες συνθήκες ή πρόκειται για νεότερες τεχνολογίες, που δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί στο έπακρο.

2.2.1 Πιεζοηλεκτρισμός

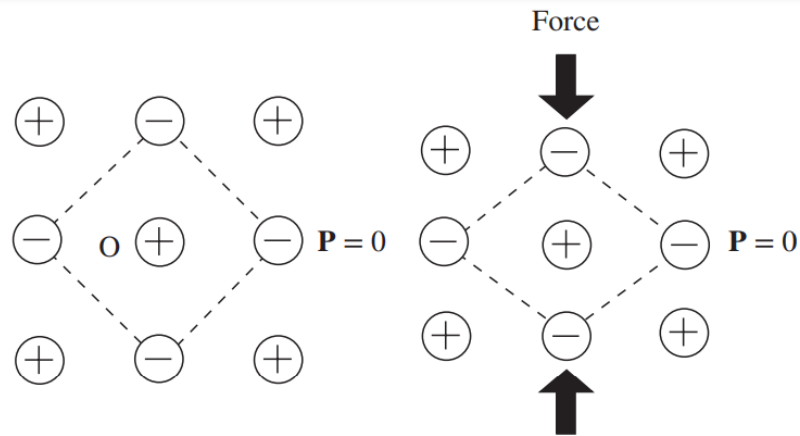
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου έγινε από τους αδερφούς Curie και, κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκε και βρήκε ιδιαίτερη εφαρμογή σε ακουστικές εφαρμογές και, ιδιαίτερα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Εν συντομία, πιεζοηλεκτρισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα κρυσταλλικό υλικό παρουσιάζει ηλεκτρική τάση στα άκρα του, όταν προκαλείται μηχανική παραμόρφωση σε αυτά. Η ύπαρξή του οδηγεί και στο αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή δηλαδή τη μηχανική παραμόρφωση που προκαλείται από την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης.

Πιεζοηλεκτρισμό παρουσιάζει μια συγκεκριμένη κατηγορία κρυσταλλικών υλικών, της οποίας η κρυσταλλική δομή δεν έχει κέντρο συμμετρίας και, άρα, η παραμόρφωση του κρυστάλλου μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μη-μηδενικής πόλωσης P [25]. Τέτοια υλικά είναι, παραδείγματος χάριν, ο χαλαζίας, η τουρμαλίνη, το τοπάζιο και το άλας του Rochelle.

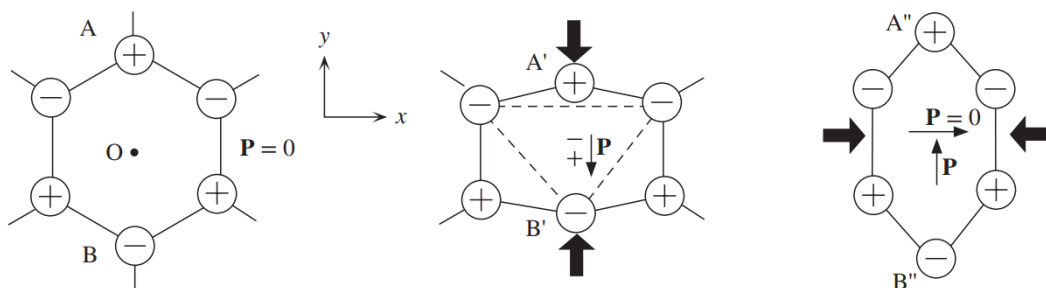
Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε και τη σύνδεση του πιεζοηλεκτρισμού με το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής, δηλαδή την ιδιότητα που έχουν όλα τα διηλεκτρικά υλικά (μονωτές) να παραμορφώνονται με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, λόγω της μετατόπισης των κρυσταλλικών ιόντων [26]. Μια κύρια διαφορά με τον πιεζοηλεκτρισμό είναι ότι είναι μη-γραμμικό φαινόμενο (ανάλογο με το τετράγωνο του πεδίου, υστέρηση), και άρα απαιτείται η εφαρμογή ενός μόνιμου στατικού πεδίου πόλωσης (bias field) για τη γραμμικοποίησή του (σχήματα 2.2.1.1 και 2.2.1.2).

Έχει ήδη γίνει αναφορά σε ορισμένα υλικά με ιδιαίτερα υψηλή διηλεκτρική σταθερά τα οποία μπορούν να πολωθούν με την προσωρινή εφαρμογή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο προσανατολίζει την πόλωση των κρυστάλλων που τα αποτελούν, και να αποκτήσουν γραμμικές πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, ξεπερνώντας μακράν σε απόδοση όλα τα εκ φύσεως πιεζοηλεκτρικά υλικά. Αυτά τα υλικά ονομάζονται "σιδηροηλεκτρικά" και μπορεί να είναι κεραμικά, όπως το τιτανικό βάριο (BaTiO_3), το PZT και το PMN, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλές εσωτερικές απώλειες, υψηλή σκληρότητα και μεγάλη αποδοτικότητα προβολής αλλά υψηλή ακουστική σύνθετη αντίσταση (της τάξεως των 20-30 Mrayl σε σύγκριση με τα 1.5 Mrayl του νερού), καθώς και τα πολυμερή PVDF και PVC, που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ακουστική σύνθετη αντίσταση (3-4 Mrayl) , μεγάλο εύρος ζώνης αλλά μεγαλύτερες χωρητικές απώλειες στις υψηλές συχνότητες [27]. Στη βιβλιογραφία συνήθως δεν γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αυτού του τεχνητού τύπου πιεζοηλεκτρισμού και του φυσικού [28].

α)

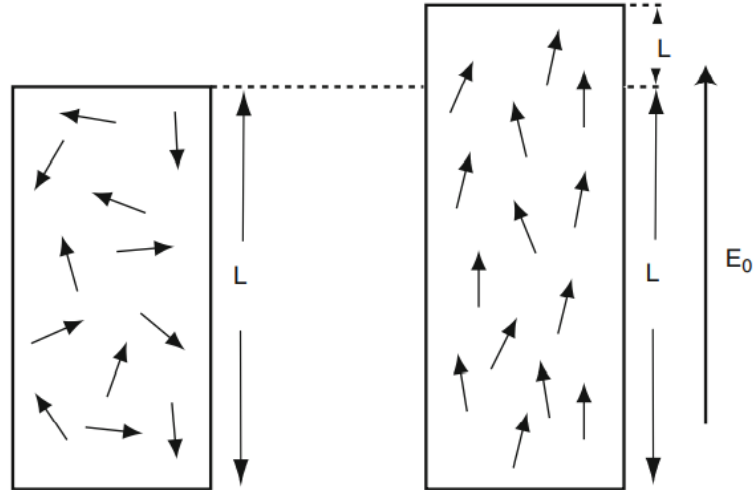


β)

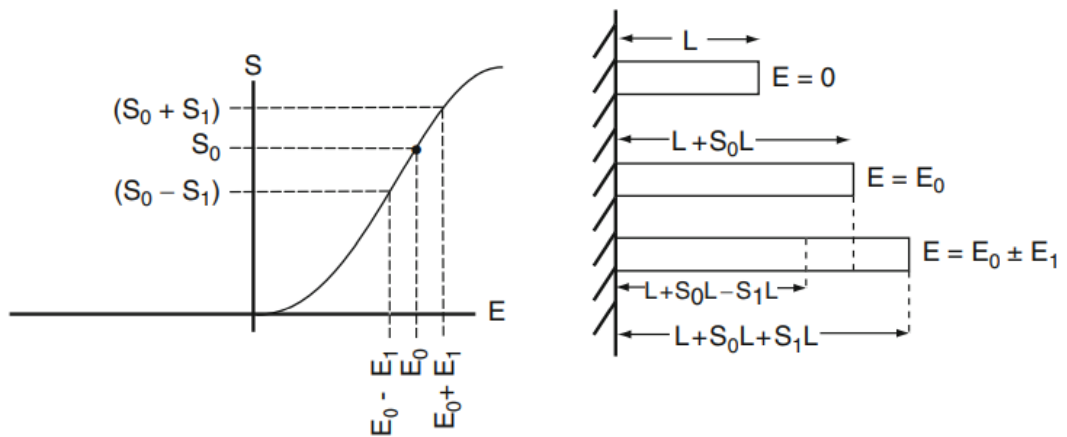


Σχήμα 2.2.1.1: α) Κρύσταλλος με συμμετρία κέντρου. Και πριν και μετά την παραμόρφωση έχει μηδενική πόλωση, λόγω της συμμετρίας. β) Κρύσταλλος χωρίς συμμετρία κέντρου. Η παραμόρφωση κατά τον άξονα y οδηγεί στην εμφάνιση πόλωσης P . Κατά τον άξονα x η παραμόρφωση δεν οδηγεί στην εμφάνιση πόλωσης, λόγω συμμετρίας ως προς τον y [25].

α)



β)



Σχήμα 2.2.1.2: α) Η προσωρινή εφαρμογή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου οδηγεί στην ευθυγράμμιση των πολώσεων των κρυστάλλων του σιδηροηλεκτρικού υλικού κατά την κατεύθυνσή του πεδίου και του προσδίδει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. β) Η γραμμικοποίηση της πιεζοηλεκτρικής απόκρισης του υλικού με την εφαρμογή ενός σταθερού πεδίου πόλωσης E_0 [7].

2.2.2 Μαγνητοσυστολή

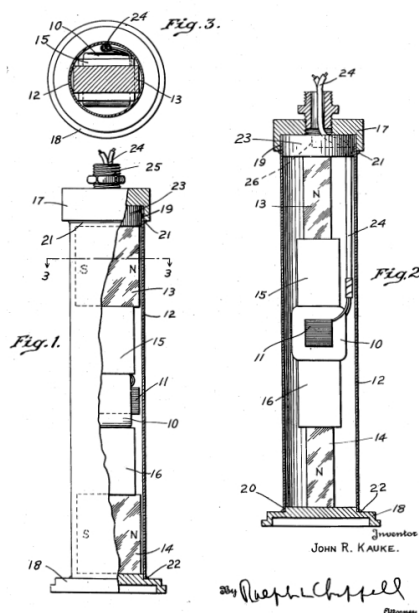
Μαγνητοσυστολή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητικό υλικό μεταβάλλει τις διαστάσεις του. Τα υλικά στα οποία παρουσιάζεται πιο έντονα είναι τα σιδηρομαγνητικά. Είναι το μαγνητικό ανάλογο της ηλεκτροσυστολής, και οι νόμοι που διέπουν αυτά τα δύο φαινόμενα είναι αρκετά παρόμοιοι. Ποσοτικά, η μαγνητοσυστολή ορίζεται ως [29]:

$$\lambda = \frac{dl}{l_0} \quad (2.2.2.1)$$

Όπου dl η μεταβολή της διάστασης του υλικού και l_0 η αρχική διάσταση.

Ανάλογα με το αν έχουμε θετική μεταβολή (διαστολή), ή αρνητική (συστολή), το λ παίρνει το ανάλογο πρόσημο. Για τη λειτουργία ενός υδροφώνου χρησιμοποιούνται τυλίγματα γύρω από το υλικό (συνήθως ραβδοειδές στη μορφή) τα οποία, σύμφωνα με το νόμο του Lenz, επάγουν ρεύματα καθώς μεταβάλλεται το μαγνητικό πεδίο του υλικού λόγω της μηχανικής του παραμόρφωσης. Γενικώς, το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής είναι μη-γραμμικό (το λ είναι ανάλογο του τετραγώνου της μαγνητικής επαγωγής B , παρουσιάζεται το φαινόμενο της υστέρησης). Συνεπώς, απαιτείται γραμμικοποίηση, η οποία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μίας στατικής μαγνητικής πόλωσης (bias), είτε μέσω τυλιγμάτων είτε μέσω μόνιμων μαγνητών [7].

Η χρήση μαγνητοσυστολικών υλικών σε υδροακουστικές εφαρμογές (σχήμα 2.2.2.1) περιορίστηκε ιδιαίτερα μετά την επικράτηση των πιεζοηλεκτρικών, κυρίως του PZT, λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς του. Νέα σιδηρομαγνητικά υλικά με καλύτερες ιδιότητες, όπως το Terfenol-D, έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον στη μαγνητοσυστολή και έχουν οδηγήσει στην εφεύρεση νέων, υβριδικού πιεζοηλεκτρικού-μαγνητοσυστολικού τύπου, μορφομετατροπείς.



Σχήμα 2.2.2.1: Το σχέδιο από την πατέντα ενός μαγνητοσυστολικού υδροφώνου [30].

2.2.3 Ηλεκτρομαγνητισμός

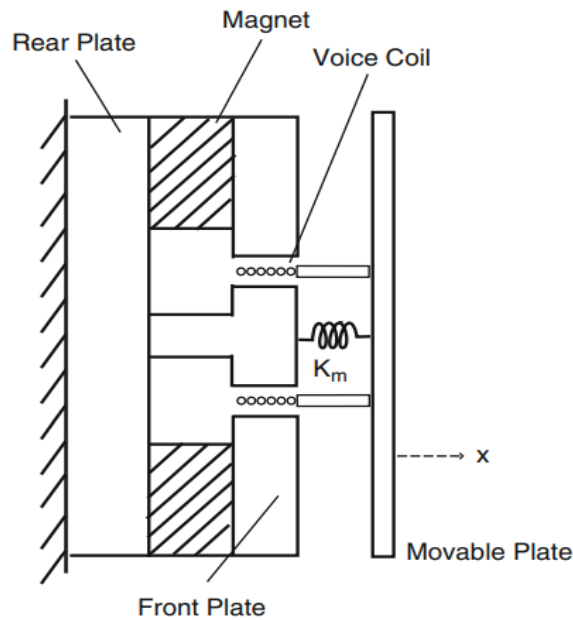
Ο ηλεκτρομαγνητικός μορφομετατροπέας σχήμα (2.2.3.1), ο οποίος αποκαλείται επίσης και ηλεκτροδυναμικός ή “κινητού πηνίου”, είναι ο πιο εμπορικά διαδεδομένος, λόγω της χρήσης του ως ηχείο στη συντριπτική πλειοψηφία των συστημάτων αναπαραγωγής φωνής και μουσικής. Αποτελείται από ένα πηνίο μέσα σε ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο [7]. Το πηνίο είναι συνδεδεμένο με ένα διάφραγμα, το οποίο πάλλεται μέσα στο ακουστικό μέσο και μεταδίδει ή λαμβάνει ηχητικά σήματα. Η λειτουργία του βασίζεται στη δύναμη Lorentz. Όταν λειτουργεί ως εκπομπός, τότε το ρεύμα I που διαπερνά το σύρμα του πηνίου προκαλεί την άσκηση της δύναμης Lorentz από το πεδίο, σύμφωνα με τον τύπο [31] :

$$F = BLI \quad (2.2.3.1)$$

όπου B η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε T και L το μήκος του σύρματος του πηνίου σε m . Έτσι το πηνίο και, συνεπώς, το διάφραγμα μετατοπίζονται και μεταδίδουν το ακουστικό σήμα. Αντιστρόφως, όταν λειτουργεί ως δέκτης, η μετατόπιση του διαφράγματος και, άρα, του πηνίου θα δημιουργήσουν μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στα άκρα του:

$$E = BLu \quad (2.2.3.2)$$

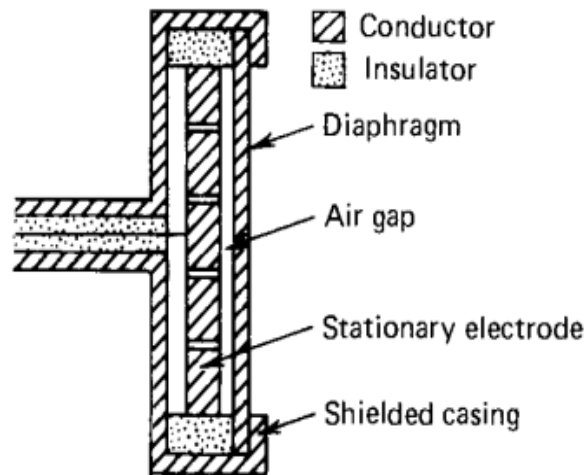
όπου u η ταχύτητα μετατόπισης του διαφράγματος σε m/s . Η χρήση του μετατροπέα αυτού σε υδροακουστικές εφαρμογές βρίσκεται κυρίως σε διατάξεις διακρίβωσης και δοκιμών, καθώς μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως πηγή χαμηλών συχνοτήτων μεγάλου εύρους.



Σχήμα 2.2.3.1: Σχεδιάγραμμα με τα βασικά στοιχεία ενός ηλεκτρομαγνητικού μετατροπέα [7].

2.2.4 Ηλεκτροστατική

Ο ηλεκτροστατικός ή πυκνωτικός μορφομετατροπέας (σχήμα 2.2.4.1) βασίζεται σε έναν πυκνωτή, του οποίου η μία πλευρά είναι προσαρτημένη σε ένα διάφραγμα. Το ακουστικό σήμα μετατοπίζει το διάφραγμα και, συνεπώς την πλάκα, αλλάζοντας την χωρητικότητα του πυκνωτή και μεταβάλλοντας την τάση στα άκρα του. Η πιο συχνή χρήση του είναι στα συμβατικά μικρόφωνα ήχου και μουσικής, καθώς η κατασκευή τους είναι αρκετά οικονομική και η απόδοσή τους ικανοποιητική. Είναι ενεργού τύπου, δηλαδή απαιτείται η εφαρμογή μιας μόνιμης DC τάσης στα άκρα του πυκνωτή, της οποίας η μεταβολή θα αποτελεί το ηλεκτρικό σήμα του μικροφώνου. Ο ηλεκτροστατικός μορφομετατροπέας δεν αξιοποιείται στην υδροακουστική, λόγω χαμηλής ηλεκτρομηχανικής του απόδοσης εξαιτίας της κακής ακουστικής σύζευξης με το νερό. Ο Langevin στις μελέτες του πειραματίστηκε ανεπιτυχώς με πυκνωτικά μικρόφωνα, προτού τα αντικαταστήσει με τον πιεζοηλεκτρικό χαλαζία [7].



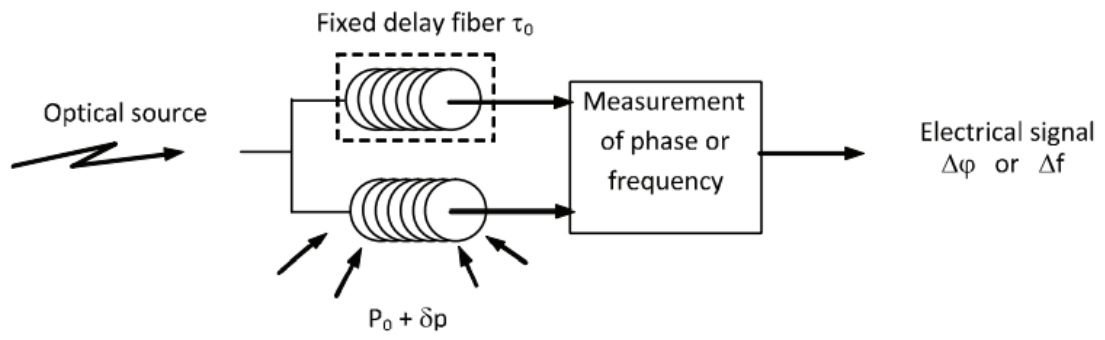
Σχήμα 2.2.4.1: Σχηματικό διάγραμμα ενός ηλεκτροστατικού μορφομετατροπέα [32].

2.2.5 Οπτική

Ένα ιδιαίτερο είδος υδροφώνου μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση της οπτικής. Η ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο υπολογίζεται ως:

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2.5.1)$$

όπου c_0 η ταχύτητα του φωτός στο κενό και n ο δείκτης διάθλασης του μέσου, ο οποίος εξαρτάται από τις μηχανικές τάσεις που δέχεται. Συνεπώς, το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα του φωτός. Εφαρμόζοντας αυτή την ιδέα μπορούμε να πάρουμε δύο κομμάτια οπτικών ινών, με το ένα να είναι συζευγμένο με το ακουστικό μέσο, να τα συνδέσουμε με μια πηγή από τη μία πλευρά και με έναν μετρητή φάσης ή συχνότητας (οπτικό συμβολόμετρο) να μετρήσουμε τη μεταβολή της πίεσης που προκαλεί το ακουστικό σήμα από τη διαφορά της φάσης ή της συχνότητας μεταξύ των σημάτων των δύο ινών (σχήμα 2.2.5.1) [31]. Προφανώς, αυτό αποτελεί ένα μονόδρομο σύστημα και δεν είναι μορφομετατροπέας, καθώς δεν μπορεί να μετατρέψει το οπτικό σήμα σε ακουστικό. Τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η χαμηλή ευαισθησία στις χαμηλές συχνότητες. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι πολύ μικρές διαστάσεις και βάρος, η ελαχιστοποίηση χρήσης ηλεκτρονικών στο αφιλόξενο θαλάσσιο περιβάλλον και η αμελητέα κατανάλωση ενέργειας [33].



Σχήμα 2.2.5.1: Μια απλή αναπαράσταση της βασικής αρχής λειτουργίας ενός οπτικού υδροφώνου [31].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

3.1 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού της Κρυσταλλικής Δομής

Η δομή ενός υλικού είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο, καθώς καθορίζει, σε μεγάλο βαθμό, τη μακροσκοπική και μικροσκοπική συμπεριφορά του. Για τον προσδιορισμό και το χαρακτηρισμό, επομένως, της δομής ενός υλικού, έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι. Δύο ιδιαίτερα συνηθισμένες από αυτές είναι η μέθοδος περίθλασης ακτίνων X και η μέθοδος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, που θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

3.1.1 Μέθοδος Περίθλασης Ακτίνων X (X-ray Diffraction)

Η μέθοδος περίθλασης ακτίνων X, ή XRD, ανακαλύφθηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα από τους William Henry Bragg και Lawrence Bragg και αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας ενός κρυσταλλικού ή μη υλικού. Η λειτουργία αυτής της μεθόδου βασίζεται στις ακτίνες X, δηλαδή σε ηλεκτρομαγνητική ιοντίζουσα ακτινοβολία πολύ υψηλής συχνότητας (με μήκος κύματος από 1nm ως 10pm) , η οποία παράγεται από την πρόσκρουση ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας σε κάποιο υλικό. Στην κρυσταλλογραφία η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσα σε ειδικές λυχνίες κενού (σε τάση της τάξεως 30-60 keV) και η πρόσκρουση γίνεται σε κάποιο είδος μετάλλου, συνήθως χαλκού ή κοβαλτίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή φωτονίων ακτίνων X συνεχούς φάσματος, τα οποία εξέρχονται από ένα παράθυρο, κατασκευασμένο από βηρύλλιο. Η ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί σε μονοχρωματική με τη χρήση λεπτών μεταλλικών φύλλων ως φίλτρα στο παράθυρο της λυχνίας.

Η περιθλαστική συμπεριφορά των ακτίνων X που προσκρούουν πάνω σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα περιγράφεται από τον νόμο του Bragg, ο οποίος, για μονοχρωματική ακτινοβολία X γνωστού μήκους κύματος μπορεί να προσδιορίσει τα διαστήματα μεταξύ των επιπέδων του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού, σύμφωνα με τη σχέση [34]:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1.1.1)$$

όπου:

$n = 1, 2, 3, \dots$ ακέραιος αριθμός

λ : το μήκος κύματος της δέσμης των ακτίνων X που είναι γνωστό και εξαρτάται από το στοιχείο της καθόδου

θ : η γωνία πρόσπτωσης ή ανάκλασης της ακτίνας X σε σχέση με τα κρυσταλλικά επίπεδα και εξαρτάται από το ρυθμό περιστροφής της πηγής ακτινοβολίας

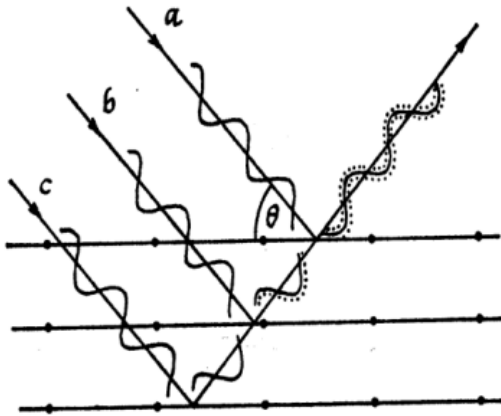
d : οι αποστάσεις των διαφορετικών ατόμων στο πλέγμα του κρυστάλλου

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου XRD βασίζεται στην εύρεση των συμφασικών γωνιών περίθλασης ή, αλλιώς, γωνιών συμβολής (σχήμα 3.1.1.1α). Στη συνέχεια, μέσω του νόμου του Bragg, μπορούν να προσδιοριστούν τα διαστήματα και, στη συνέχεια, με διαδικασία ταυτοποίησης, η κρυσταλλική δομή του δείγματος. Το όργανο με το οποίο επιτυγχάνεται αυτό ονομάζεται περιθλασιόμετρο και αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη :

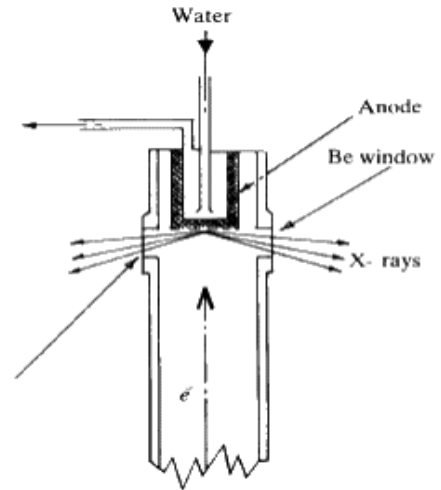
1. Ηλεκτρικό σύστημα υψηλής τάσης για την παραγωγή ακτίνων X
2. Λυχνία ακτίνων X, λεπτής γραμμικής εστίασης (σχήμα 3.1.1.1β)
3. Γωνιόμετρο δύο κύκλων θ , 2θ
4. Μετρητική διάταξη
5. Μετατροπέα σήματος A/D
6. Ψηφιακό σύστημα απεικόνισης/καταγραφής των αποτελεσμάτων

Η πλεοψηφία των περιθλασιόμετρων είναι κατασκευασμένη σύμφωνα με τη γεωμετρία Bragg-Brentano (σχήμα 3.1.1.2), που προσφέρει αποτελέσματα υψηλής ανάλυσης.

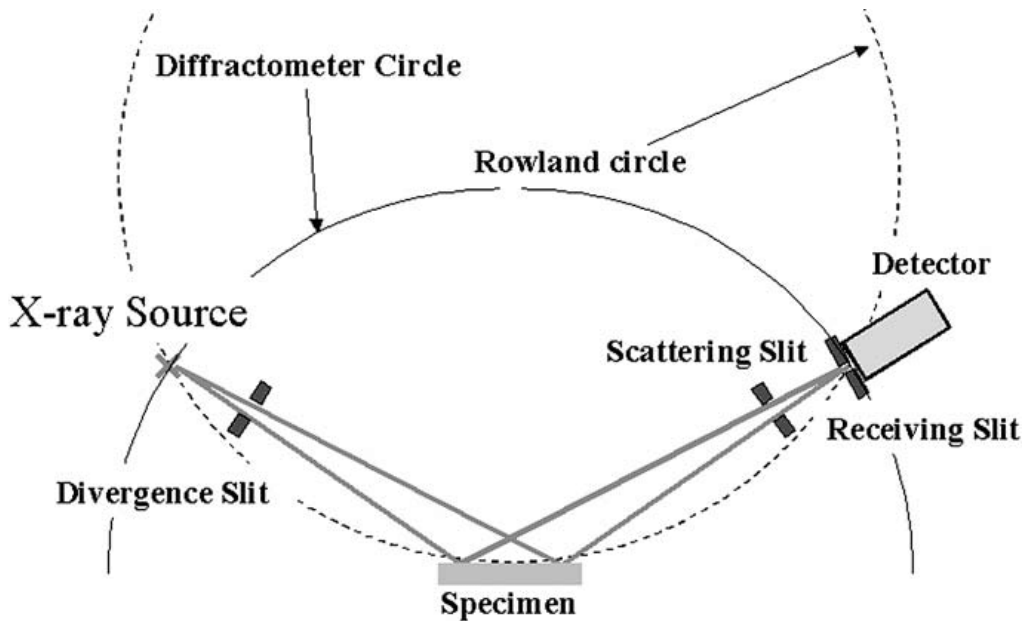
α)



β)



Σχήμα 3.1.1.1: α) Συμφασική περίθλαση ακτίνων X σε διαφορετικά κρυσταλλικά επίπεδα
β) Απλός σωλήνας παραγωγής ακτίνων X [35].



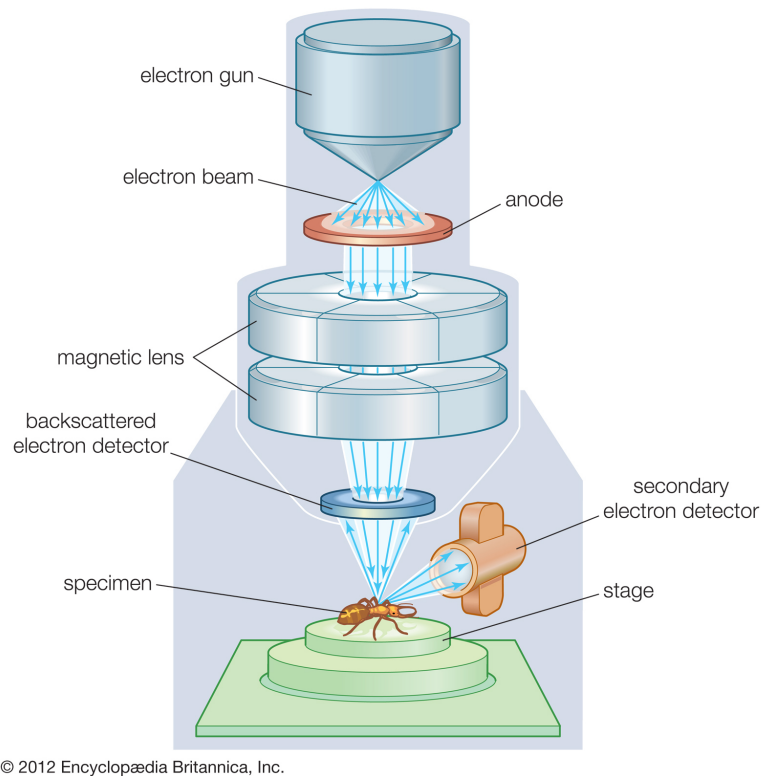
Σχήμα 3.1.1.2: Γεωμετρία Bragg-Brentano [36].

3.1.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ή SEM (σχήμα 3.1.2.1), αποτελεί ένα σύγχρονο όργανο μικροσκοπίας που ξεκίνησε να χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1950. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος. Με τη χρήση των ηλεκτρονικών εκπομπών

της επιφάνειας (δευτερεύοντα και οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια) μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για τη σύσταση και τη μορφολογία της. Ακόμα, πραγματοποιώντας ανίχνευση της διασποράς των εκπεμπόμενων από την επιφάνεια ακτίνων X (Energy Dispersive X-Ray Analysis) μπορεί να γίνει ποσοτική ή ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του δείγματος και μελέτη της μικροδομής του. Ένα μικροσκόπιο SEM αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη:

1. Πηγή ηλεκτρονίων (Electron gun)
2. Στήλη κενού
3. Ανιχνευτές ηλεκτρονίων
4. Θάλαμο δείγματος
5. Σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή και οθόνης για την καταγραφή, την ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων



Σχήμα 3.1.2.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός μικροσκοπίου SEM με όλα τα κύρια στοιχεία του [37].

Η λειτουργία του μικροσκοπίου SEM έχει ως εξής: ένα νήμα βολφραμίου, το οποίο διαρρέεται από ρεύμα (filament current) χρησιμοποιείται για την παραγωγή των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια, μια άνοδος, στην οποία εφαρμόζεται υψηλό

δυναμικό, έλκει και επιταχύνει τα ηλεκτρόνια, δημιουργώντας μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, η οποία συγκεντρώνεται και κατευθύνεται με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών φακών (ο συγκεντρωτικός φακός ελέγχει το μέγεθος της δέσμης και άρα την ανάλυση και ο αντικειμενικός φακός τη θέση της πάνω στο δείγμα). Στη συνέχεια, οι ανιχνευτές ηλεκτρονίων (ανιχνευτής οπισθοσκεδαζόμενων και ανιχνευτής δευτερογενών ηλεκτρονίων) ανιχνεύουν τα ηλεκτρόνια από την πρόσκρουση της δέσμης στο δείγμα και εξάγονται πληροφορίες σχετικά με το δείγμα όσον αφορά στη μορφολογία, τη χημική σύσταση, την κρυσταλλική δομή και τον προσανατολισμό του υλικού που μελετάται. Ακόμη παράγονται δισδιάστατες εικόνες, που αναπαριστούν περιοχές της επιφάνειας του δείγματος, διαστάσεων της τάξεως των nm. Η διείσδυση που επιτυγχάνεται από το μικροσκόπιο SEM στο δείγμα εξαρτάται από την πυκνότητα των ηλεκτρονίων της δέσμης, την ταχύτητά τους, το βαθμό εστίασης και τα ατομικά χαρακτηριστικά του δείγματος και είναι της τάξεως των μm [34].

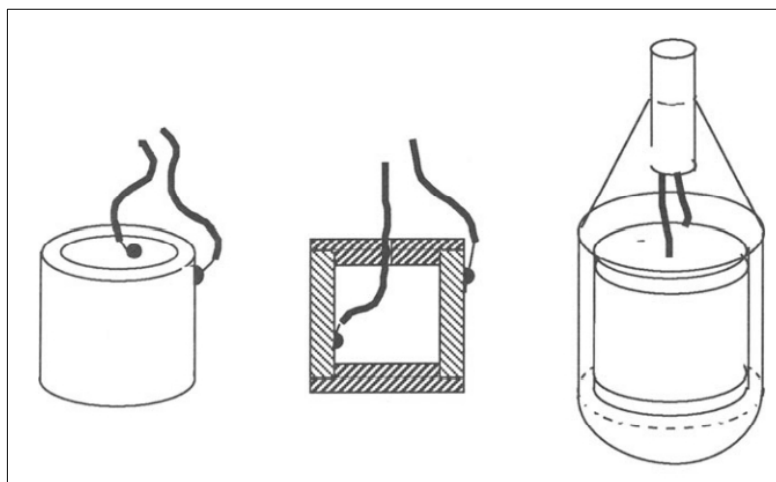
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΤΑ ΥΔΡΟΦΩΝΑ

4.1 Γεωμετρίες και Διατάξεις Μορφομετατροπέων

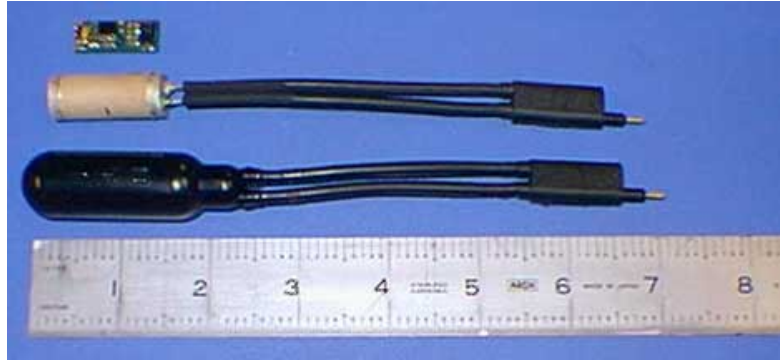
Ένα μεγάλο πλήθος από γεωμετρίες χρησιμοποιείται στην κατασκευή μορφομετατροπέων και, συνεπώς, υδροφώνων. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν μερικές από τις πιο σημαντικές.

4.1.1 Κυλινδρική Γεωμετρία

Μία από τις πιο συνηθισμένες γεωμετρίες είναι η κυλινδρική (σχήματα 4.1.1.1 και 4.1.1.2), στην οποία ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό με τη μορφή άδειου κυλίνδρου (πολωμένο κατά τον διαμετρικό του άξονα) στεγανοποιείται και λειτουργεί ως ομοιοκατευθυντικό υδρόφωνο (κατά τον x άξονα), λόγω της συμμετρίας του. Η ευαισθησία του είναι ανάλογη της διαμέτρου και το πάχος του πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, αλλιώς η λειτουργία του δεν θα είναι η επιθυμητή, λόγω αλληλοαναιρούμενων τάσεων που θα αναπτύσσονται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του [38]. Ακόμα, ο πιεζοηλεκτρικός κύλινδρος πρέπει να σφραγιστεί αεροστεγώς με δύο καπάκια εκατέρωθεν, ώστε το περιβάλλον αέρα στο εσωτερικό του να μην μεταβάλλεται.



Σχήμα 4.1.1.1: Μία απλή σχηματική αναπαράσταση ενός κυλινδρικού υδροφώνου [38].



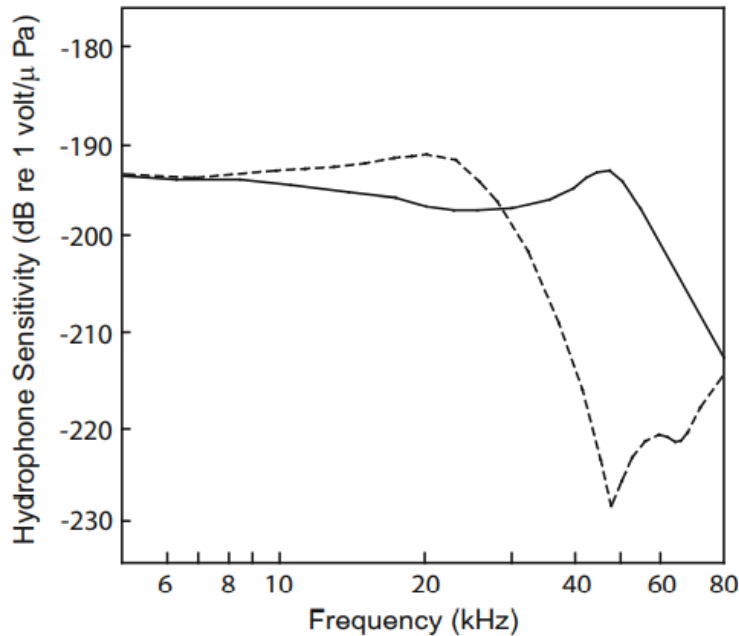
Σχήμα 4.1.1.2: Ένα απλό υδρόφωνο κυλινδρικής γεωμετρίας. Στη φωτογραφία φαίνεται το προενισχυτικό κύκλωμα, ο γυμνός πιεζοηλεκτρικός κύλινδρος και η τελική μορφή του, μετά την ενθυλάκωση με καρβαμικό αιθυλεστέρα [39].

4.1.2 Σφαιρική Γεωμετρία

Αυτή η γεωμετρία είναι αρκετά παρόμοια με την κυλινδρική, με τη διαφορά ότι αποτελείται από ένα σφαιρικό φλοιό πιεζοηλεκτρικού έναντι κυλίνδρου (σχήμα 4.1.2.1). Οι εξισώσεις που περιγράφουν ένα κυλινδρικό υδρόφωνο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περιγραφή ενός σφαιρικού εάν λάβουμε υπ'όψιν τη διαφορά της σφαιρικής γεωμετρίας, που οδηγεί σε υψηλότερη συχνότητα συντονισμού (σχήμα 4.1.2.2) [7].



Σχήμα 4.1.2.1: Ένα εμπορικό υδρόφωνο σφαιρικής κατασκευής [40].

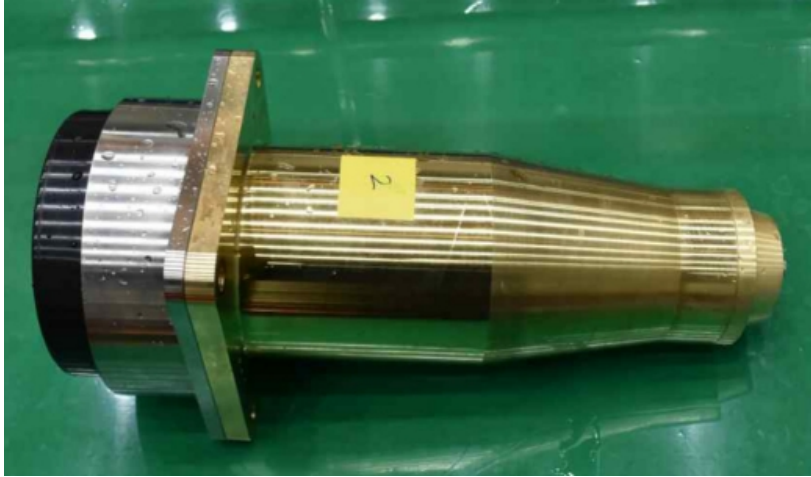


Σχήμα 4.1.2.2: Διάγραμμα σύγκρισης της απόκρισης συχνότητας ενός κυλινδρικού (διακεκομένη καμπύλη) και ενός σφαιρικού (συνεχής καμπύλη) υδροφώνου, κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό με ίδιο πάχος, όπου η διάμετρος και το ύψος του κυλίνδρου ταυτίζονται με τη διάμετρο της σφαίρας. Φαίνεται, ότι το σφαιρικό υδρόφωνο έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ταυτόχρονα χαμηλότερη ευαισθησία από το κυλινδρικό [7].

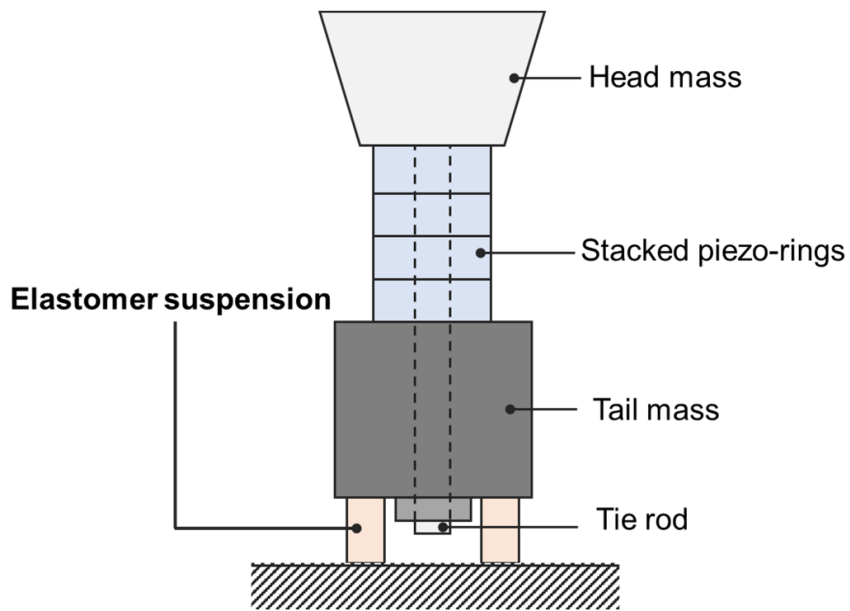
4.1.3 Μορφομετατροπέας Tonpiliz

Ο μορφομετατροπέας “Tonpiliz” (στα γερμανικά “μανιτάρι που τραγουδάει”, λόγω του σχήματός του) διαμήκων ταλαντώσεων ανήκει στους πιστονικού τύπου μετατροπείς (σχήμα 4.1.3.1). Κατασκευάζεται παίρνοντας μια στοίβα πιεζοηλεκτρικών δακτυλίων, πολωμένων κατά το διαμήκες, και προσαρμόζοντας δύο μεταλλικές μάζες στα άκρα της, ένα κυκλικό έμβολο κεφαλής (επιφάνεια ακουστικής σύζευξης) και ένα ουραίο τμήμα (βάση). Μία αλουμινένια ράβδος, στην οποία προσαρμόζονται οι μεταλλικές μάζες, αποτελεί τον κεντρικό άξονα της στοίβας και διατηρεί τα κεραμικά στοιχεία συμπιεσμένα στο βαθμό που χρειάζεται για να λειτουργήσουν (σχήμα 4.1.3.2) [33]. Η μάζα ουράς είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα εμβόλου, γι' αυτό και η πρώτη κατασκευάζεται από χάλυβα και η δεύτερη από αλουμίνιο [7]. Επιπλέον, οι τιμές των μαζών αυτών παίζουν σημαντικό ρόλο στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα. Ο Tonpiliz (όπως και άλλοι μετατροπείς) αξιοποιείται συχνά σε συστοιχίες (arrays) πολλών στοιχείων, με πολύ σημαντικά κέρδη στην κατευθυντικότητα και την ευαισθησία. Τα

βασικά μειονεκτήματά του είναι το μέγεθος και το βάρος του, καθώς και η υψηλή πολυπλοκότητα και κόστος.



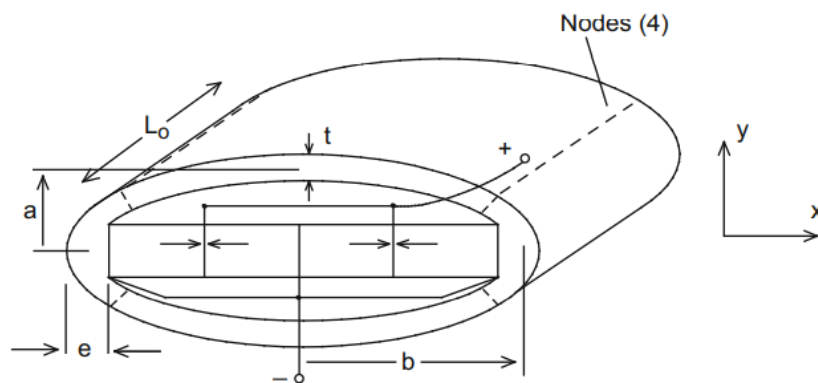
Σχήμα 4.1.3.1: Ένα πειραματικό μοντέλο ενός μετατροπέα Tonpilz [41].



Σχήμα 4.1.3.2: Το σχεδιάγραμμα ενός μετατροπέα Tonpilz [42].

4.1.4 Μορφομετατροπείς Καμπτικών Ταλαντώσεων (Flextensional)

Οι μορφομετατροπείς καμπτικών ταλαντώσεων είναι μια ειδική κατηγορία που χρησιμοποιείται, συνήθως, σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλής ισχύος εκπομπή και λήψη ακουστικών σημάτων στις μεσαίες και χαμηλές συχνότητες. Χωρίζονται σε επτά κατηγορίες (classes), ανάλογα με το περίβλημά τους και τη μέθοδο οδήγησής τους, με τις πιο διαδεδομένες να είναι οι IV και V [7]. Η class IV (σχήματα 4.1.4.1 και 4.1.4.2) αποτελείται από ένα εξωτερικό ελλειπτικό περίβλημα από αλουμίνιο ή άλλο μέταλλο και μια στρώση πιεζοκεραμικών ή σύγχρονων μαγνητοσυστολικών στοιχείων στο εσωτερικό του, διατεταγμένη κατά τον μεγαλύτερό του άξονα. Το περίβλημα λειτουργεί σαν ένα μηχανικό διάφραγμα, που οδηγείται από την πιεζοηλεκτρική στρώση στη συχνότητα συντονισμού του.

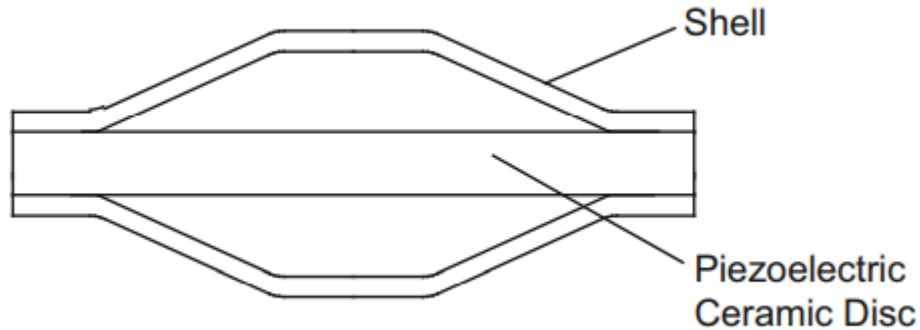


Σχήμα 4.1.4.1: Σχεδιάγραμμα ενός κοινού class IV μετατροπέα [7].



Σχήμα 4.1.4.2: Ένας μετατροπέας class IV μαγνητοσυστολικού τύπου [43].

Η class V (σχήμα 4.1.4.3), που αποκαλείται και “κύμβαλο” (“cymbal”), αναπτύχθηκε για λειτουργία σε ρηγά ύδατα και αποτελείται από έναν πιεζοηλεκτρικό δίσκο σε λειτουργία πάχους μεταξύ δύο μεταλλικών καπακίων που σχηματίζουν μια εσωτερική κοιλότητα, μετατρέποντας τις μικρές διαμήκεις ταλαντώσεις του δίσκου σε μεγαλύτερες εγκάρσιες στα καπάκια [33].



Σχήμα 4.1.4.3: Το απλοποιημένο σχέδιο ενός μετατροπέα cymbal [7].

4.2 Βασικές Τιμές Υλικών Μορφομετατροπέων

Συγκεκριμένα μετρήσιμα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στους μορφομετατροπείς μπορούν να δώσουν μια εικόνα για την ηλεκτροακουστική συμπεριφορά τους. Έτσι, αξιοποιούνται για την επιλογή του καταλληλότερου υλικού, λαμβάνοντας υπ’ όψιν τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

4.2.1 Συντελεστής παραμόρφωσης ή πιεζοηλεκτρικός συντελεστής d_{ij}

Ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής d_{ij} συνδέει την πυκνότητα του εμφανιζόμενου φορτίου με την ασκούμενη μηχανική τάση ή, αντίστροφα, τη μηχανική παραμόρφωση με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Είναι ένας τένσορας 3^{ου} βαθμού με μονάδα C/N , που εκφράζεται ως ένας πίνακας 3x6 και συνδέει αυτά τα μεγέθη με την ακόλουθη εξίσωση [44]:

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (4.2.1.1)$$

Ενώ ορίζεται ως [45]:

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right)_E = \left(\frac{\partial S_j}{\partial E_i} \right)_T \quad (4.2.1.2)$$

Όπου D η διηλεκτρική μετατόπιση σε C/m^2 , T η εφαρμοζόμενη μηχανική τάση σε N/m^2 , S η αδιάστατη μηχανική παραμόρφωση και E το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε N/C . Οι

δείκτες E , T στις μερικές παραγώγους υποδεικνύουν σταθερό ηλεκτρικό πεδίο και μηχανική τάση αντίστοιχα, ενώ οι i, j υποδεικνύουν την διεύθυνση της διηλεκτρικής μετατόπισης (φορτίο/ επιφάνεια) και της εφαρμοζόμενης τάσης, με τους άξονες x, y, z να αντιστοιχούν στους αριθμούς 1,2,3. Ο συντελεστής d_{33} , δηλαδή με ίδια διεύθυνση αιτίας-αποτελέσματος, είναι ο πιο σημαντικός.

4.2.2 Συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης k^2

Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης (electromechanical coupling coefficient) k^2 αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα της ηλεκτρομηχανικής, όπου ορίστηκε μαθηματικά, με βάση το συντελεστή αμοιβαιότητας T και τις σύνθετες αντιστάσεις, και εκφράζει το μέγιστο ποσοστό ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί, χωρίς απώλειες, σε άλλη μορφή [33]. Με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού, μπορούμε να δώσουμε έναν επί πλέον ορισμό του συντελεστή k^2 :

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2 Y_{33}^E}{\epsilon_{33}^T} \quad (4.2.2.1)$$

Όπου ϵ_{33}^T η διηλεκτρική σταθερά σε $C/(m \cdot V)$ για σταθερή ελαστική τάση και Y_{33}^E το μέτρο ελαστικότητας του Young σε N/m^2 , δηλαδή ο συντελεστής παραμόρφωσης του υλικού, για σταθερό εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο E . Η συγκεκριμένη σχέση μας δίνει τον συντελεστή k^2 για την κατεύθυνση 33.

4.2.3 Συντελεστής ποιότητας μηχανικού συντονισμού Q_m

Ο συντελεστής ποιότητας μηχανικού συντονισμού Q_m είναι ένα μέτρο, που σχετίζεται με τις απώλειες ενός μηχανικού συστήματος συντονισμού (στη δικιά μας περίπτωση, αυτές οι απώλειες βρίσκονται κυρίως με τη μορφή εσωτερικών μηχανικών τριβών στο υλικό) και είναι ένας δείκτης της απόσβεσης του συστήματος σε ελεύθερη ταλάντωση, αλλά και της απόκρισης οδήγησης γύρω από τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος (σχήμα 4.2.3.1) [46]. Μεγάλες τιμές του Q_m μεταφράζονται σε στενό και πιο απότομο παράθυρο συντονισμού, ενώ μικρές τιμές σε ευρύ και πιο ομαλό. Μορφομετατροπείς που λειτουργούν ως ακουστικοί εκπομποί (π.χ. ενεργά σόναρ, μόντεμ) και έχουν συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας επωφελούνται από μεγάλα Q_m , καθώς αυτό θα σημαίνει καλύτερο συντονισμό και μεγαλύτερη απόδοση ακουστικής ενέργειας στο υδάτινο σώμα. Αντιθέτως, αυτοί που λειτουργούν ως δέκτες (παθητικά υδρόφωνα) και χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό/καταγραφή σημάτων ευρυζωνικής φύσης

επωφελούνται από μικρά Q_m , που οδηγούν σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης δυνατής λήψης. Μπορεί να οριστεί ως εξής [7]:

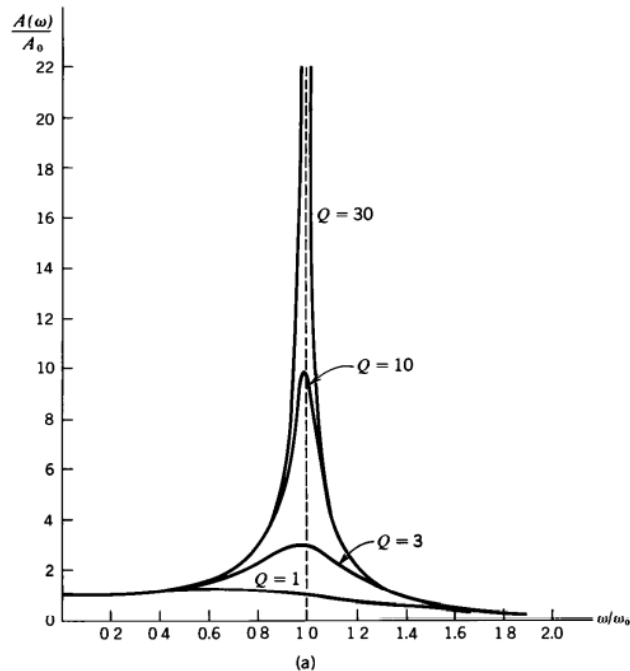
$$Q_m = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} \quad (4.2.3.1)$$

όπου ω_r η συχνότητα συντονισμού και ω_1, ω_2 οι συχνότητες ημίσεως ισχύος (-3dB) εκατέρωθεν της ω_r στο διάγραμμα απορρόφησης ισχύος ως προς τη συχνότητα.

Στον πίνακα 4.2.3.1 παρουσιάζονται κάποιες από τις προαναφερθείσες χαρακτηριστικές τιμές για μερικά βασικά πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Πίνακας 4.2.3.1: Μερικές από τις χαρακτηριστικές τιμές κάποιων βασικών πιεζοηλεκτρικών υλικών [47].

| Parameter | Quartz | BaTiO ₃ | PZT 4 | PST5H | (Pb, Sm)TiO ₃ | PVDF-TrFE |
|-----------------------------|---------|--------------------|-------|-------|--------------------------|-----------|
| d_{33} (pC/N) | 2.3 | 190 | 289 | 593 | 65 | 33 |
| g_{33} (10^{-3} V m/N) | 57.8 | 12.6 | 26.1 | 19.7 | 42 | 380 |
| k_t | 0.09 | 0.38 | 0.51 | 0.50 | 0.50 | 0.30 |
| k_p | — | 0.33 | 0.58 | 0.65 | 0.03 | — |
| ϵ_3^T/ϵ_0 | 5 | 1700 | 1300 | 3400 | 175 | 6 |
| Q_M | $>10^5$ | — | 500 | 65 | 900 | 3–10 |
| T_C (°C) | — | 120 | 328 | 193 | 355 | — |



Σχήμα 4.2.3.1: Οι αποκρίσεις ενός μηχανικού συστήματος που οδηγείται για διάφορες τιμές Q [46].

4.3 Χαρακτηρισμός διατάξεων μορφομετατροπέων

Παρακάτω παρατίθενται οι παράμετροι λειτουργίας μιας διάταξης μορφομετατροπέα, οι τιμές των οποίων χαρακτηρίζουν πλήρως τη συμπεριφορά του.

4.3.1 Σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση Z_{el}

Η σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση Z_{el} ενός μορφομετατροπέα είναι η αντίσταση που βλέπουν τα ηλεκτρικά άκρα του, καθορίζεται από τις διηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητές του και μεταβάλλεται με τη συχνότητα f . Εάν θεωρήσουμε ότι ο μορφομετατροπέας μας μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα μηχανικό σύστημα ταλάντωσης ενός βαθμού ελευθερίας (δηλαδή με μία συχνότητα συντονισμού f_r), κάτι που προσεγγιστικά είναι σωστό για έναν απλό πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα, τότε το σύστημα αυτό αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα, όπως είναι το μοντέλο Van Dyke (σχήμα 4.3.1.1) [48]. Μπορεί να μετρηθεί πειραματικά, χρησιμοποιώντας μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης V_0 σε σειρά με μία γνωστή μεγάλη αντίσταση R , ως εξής (σχήμα 4.3.1.2):

$$I = \frac{V_0}{Z_{el} + R} \quad (4.3.1.1)$$

$$V_t = IZ_{el} = \frac{V_0 Z_{el}}{R + Z_{el}} \quad (4.3.1.2)$$

και για $R \gg Z_{el}$:

$$Z_{el} \approx V_t \frac{R}{V_0} \quad (4.3.1.3)$$

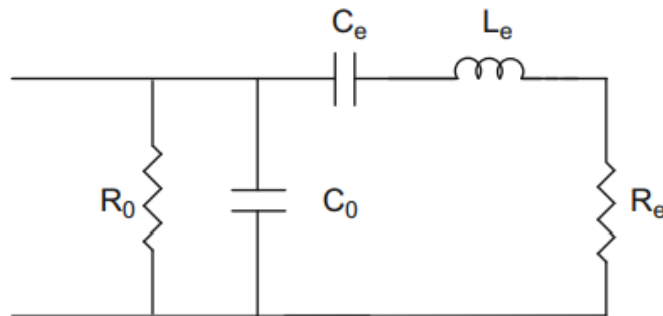
όπου V_t η τάση στα άκρα του μετατροπέα και I το ρεύμα που διατρέχει το κύκλωμα. Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να μετρηθεί και η σύνθετη ηλεκτρική αγωγιμότητα Y_{el} , επιλέγοντας για την αντίσταση R πολύ μικρή τιμή και παίρνοντας τη σχέση:

$$V_R = IR = \frac{V_0 R}{R + Z_{el}} \quad (4.3.1.4)$$

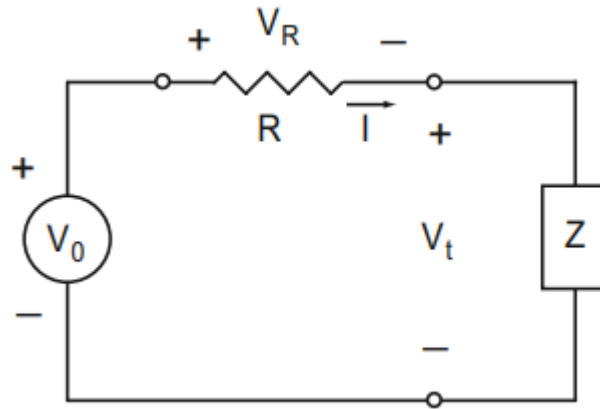
και για $R \ll Z_{el}$:

$$\frac{1}{Z_{el}} = Y_{el} = \frac{V_R}{V_0 R} \quad (4.3.1.5)$$

όπου V_R η τάση στα άκρα της αντίστασης R .



Σχήμα 4.3.1.1: Το ισοδύναμο μοντέλο Van Dyke. Τα C_e , L_e , R_e είναι μηχανικά μεγέθη ενδοτικότητας, μάζας και μηχανικής αντίστασης, ανηγμένα στην ηλεκτρική πλευρά [7].



Σχήμα 4.3.1.2: Το σύστημα μέτρησης της σύνθετης ηλεκτρικής αντίστασης Z_{el} και αγωγιμότητας Y_{el} [7].

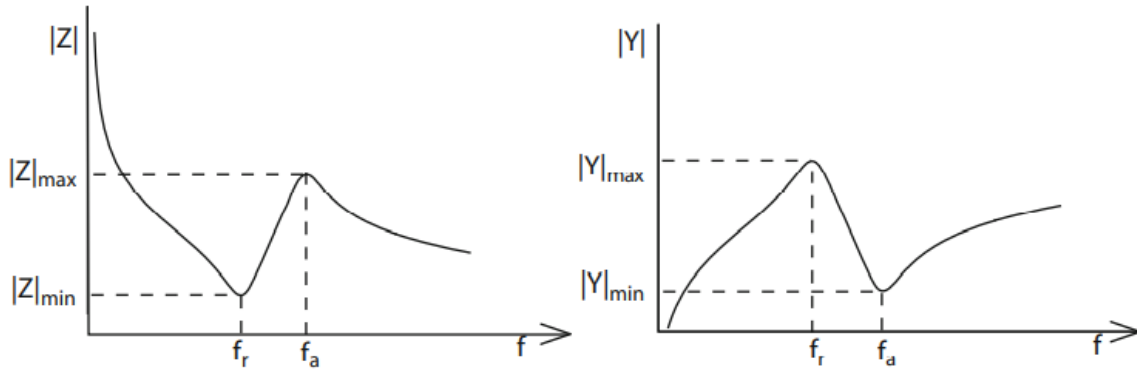
Η μέτρηση της Z_{el} γίνεται συνήθως σε περιβάλλον αέρα, όπου προσεγγίζονται συνθήκες κενού.

4.3.2 Συχνότητα συντονισμού f_r

Η συχνότητα συντονισμού f_r ενός μορφομετατροπέα είναι πολύ καθοριστική για την περιοχή λειτουργίας του. Σε έναν ακουστικό εκπομπό δίνει τη συχνότητα, στην οποία μπορεί να εκπέμψει με τη μέγιστη απόδοση, ενώ οι ευρυζωνικοί μορφομετατροπείς λειτουργούν γραμμικά σε συχνότητες χαμηλότερες από αυτή του συντονισμού [33]. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σύνθετης ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς είναι η συχνότητα, για την οποία το μέτρο της είναι το ελάχιστο (και, αντίστοιχα, το μέτρο της αγωγιμότητας μέγιστο). Επιπλέον, εμφανίζεται μια συχνότητα, υψηλότερη της συχνότητας συντονισμού, που ονομάζεται συχνότητα αντισυντονισμού f_a (σχήμα 4.3.2.1), και είναι η συχνότητα, για την οποία το μέτρο της σύνθετης αντίστασης είναι μέγιστο (και, αντίστοιχα πάλι, το μέτρο της αγωγιμότητας ελάχιστο). Με αυτές τις δυο συχνότητες, μπορούμε να ορίσουμε μια παραλλαγή του συντελεστή k^2 που ονομάζεται ενεργός συντελεστής ηλεκτροακουστικής σύζευξης k_{eff}^2 :

$$k_{eff}^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \quad (4.3.2.1)$$

που έχει τιμή μικρότερη ή ίση από το συντελεστή k^2 και εκφράζει την απόδοση επί του συνόλου της διάταξης του μορφομετατροπέα [49].



Σχήμα 4.3.2.1: Διαγράμματα για το μέτρο της σύνθετης αντίστασης και αγωγιμότητας, όπου φαίνονται οι συχνότητες συντονισμού και αντισυντονισμού [7].

4.3.3 Σύνθετη ακουστική αντίσταση Z_a

Κάθε μέσο ακουστικής μετάδοσης χαρακτηρίζεται από μια αντίσταση, που ονομάζεται ειδική ακουστική αντίσταση και ορίζεται ως ο λόγος της ακουστικής πίεσης που προκαλεί ένα ακουστικό κύμα p προς την ταχύτητα του v [32]:

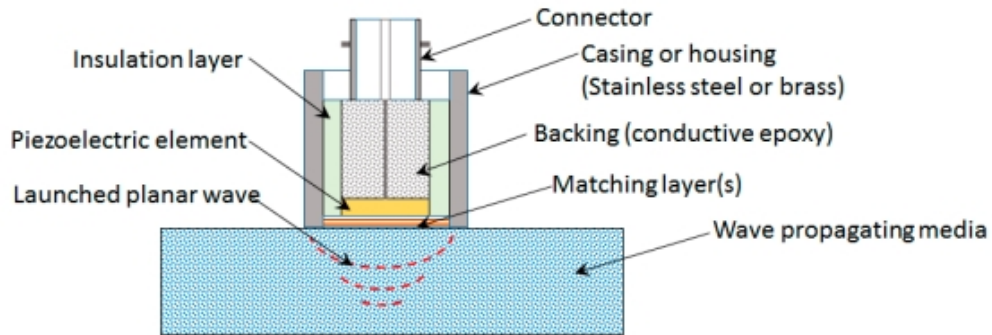
$$z = \frac{p}{v} \quad (4.3.3.1)$$

Η αντίσταση z είναι, εν γένει, σύνθετη. Στην περίπτωση, όμως, επίπεδου κύματος είναι πραγματική και ισούται με:

$$z = \rho_0 c \quad (4.3.3.2)$$

όπου ρ_0 η πυκνότητα του μέσου και c η ταχύτητα του ήχου μέσα σε αυτό. Αυτό το γινόμενο, λόγω της σημασίας του για τον χαρακτηρισμό της ακουστικής συμπεριφοράς του μέσου, ονομάζεται χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του και η μονάδα μέτρησής του είναι το $Pa \cdot s/m$ ή $Rayl$. Η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του νερού είναι περίπου 1.48 MRayl . Για τη βέλτιστη μεταφορά ή λήψη ακουστικής ισχύος και την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων, θα πρέπει το μέτρο της σύνθετης ακουστικής αντίστασης Z_a της διάταξης του μορφομετατροπέα να είναι όσο πιο κοντά γίνεται σε αυτή την τιμή [33]. Τα πιεζοκεραμικά υλικά παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη τιμή, της τάξεως των $30\text{-}36 \text{ MRayl}$, ενώ τα πιεζοπολυμερή παρουσιάζουν χαμηλότερη, με ορισμένα, όπως το PVDF-TrFE και το παριλένιο C να φτάνουν μέχρι και τα $2\text{-}5 \text{ MRayl}$. Τιμές της σύνθετης ακουστικής αντίστασης για συνηθισμένα πιεζοηλεκτρικά υλικά παρουσιάζεται στον πίνακα 4.3.3.2. Για καλύτερη μηχανοακουστική σύζευξη, στην κατασκευή μίας υδροακουστικής διάταξης, όταν η διαφορά των ακουστικών αντιστάσεων είναι μεγάλη,

παρεμβάλλουμε μεταξύ της επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού υλικού και του ακουστικού μέσου διάδοσης στρώματα (matching layers), με σκοπό να “εξομαλύνουν” τη διαφορά και να επιτύχουν καλύτερη μηχανοακουστική σύζευξη (σχήμα 4.3.3.1). Μπορούν να αποτελούνται από κάποιο έλαιο, τζελ ή και πολυμερές, όπως teflon, mylar, κάποιο πολυανθρακικό κλπ.



Σχήμα 4.3.3.1: Σχεδιάγραμμα ενός πιεζοηλεκτρικού μορφομετατροπέα υπερήχων με ενδιάμεσο στρώμα, ώστε να βελτιώσει τη μηχανοακουστική σύζευξη [49].

Πίνακας 4.3.3.1: Οι τιμές της σύνθετης ακουστικής αντίστασης για τα πιο συνηθισμένα πιεζοηλεκτρικά υλικά.

| Υλικό | Z_a (MRayl) |
|--------------------|---------------|
| PZT4 | 36,15 |
| PZT5A | 30 |
| PZT5H | 34,35 |
| PZT6B | 30 |
| PZT7A | 32 |
| BaTiO ₃ | 30 |
| LiNbO ₃ | 34 |
| PMN-PT (33% PT) | 37,15 |
| PVDF | 20 |
| P(VDF-TrFE) | 4,51 |
| Parylene-C | 2,58 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΥΔΡΟΦΩΝΩΝ

5.1 Διακρίβωση διάταξης υδροφώνων

Οι πιο βασικές παράμετροι λειτουργίας μιας διάταξης μορφομετατροπέα είναι η απόκριση λήψης και η απόκριση εκπομπής. Εάν η διάταξη λειτουργεί αποκλειστικά παθητικά, όπως στην περίπτωση των υδροφώνων, τότε μόνο η πρώτη παράμετρος έχει σημασία.

Η απόκριση ή, αλλιώς, ευαισθησία λήψης, ορίζεται ως η rms τάση ανοιχτού κυκλώματος που παράγεται στα ηλεκτρικά άκρα του μορφομετατροπέα από ένα επίπεδο κύμα πίεσης 1 μPa που προσπίπτει σε αυτόν. Η μονάδα μέτρησης της απόκρισης είναι $\text{V}/\mu\text{Pa}$ και συνήθως εκφράζεται σε dB. Θεωρητικά μπορεί, επίσης, να οριστεί και ως το rms ρεύμα βραχυκύκλωσης που προκαλείται, με μονάδα μέτρησης το $\text{A}/\mu\text{Pa}$, αλλά με μικρή πρακτική εφαρμογή [20]. Η αναπαράσταση της απόκρισης ως προς τη συχνότητα ονομάζεται “καμπύλη απόκρισης συχνότητας”, περιγράφει επακριβώς τη συμπεριφορά του μορφομετατροπέα στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων και είναι εξαιρετικά σημαντική.

Η διαδικασία μέτρησης της απόκρισης συχνότητας ονομάζεται διακρίβωση (calibration) και είναι εργαστηριακής/πειραματικής φύσεως. Για την πραγματοποίησή της απαιτείται μια ηλεκτρονική/ψηφιακή διάταξη ηλεκτροακουστικής μέτρησης και μετάδοσης, καθώς και ένας υδάτινος χώρος, στον οποίο θα γίνει η ακουστική μετάδοση. Αυτός συνήθως είναι μία δεξαμενή ή, εάν υπάρχει η δυνατότητα, τα ύδατα μιας λίμνης. Η διαδικασία της διακρίβωσης υπονοεί τη δυνατότητα μέτρησης της απόκρισης τάσης “ελεύθερου πεδίου”, δηλαδή τη λειτουργία της ακουστικής διάταξης μέσα σε ένα ομοιογενές μέσο, χωρίς ανακλάσεις και χωρίς εξωτερικές πηγές θορύβου. Στην πράξη, αυτό είναι αδύνατον να επιτευχθεί πλήρως, καθώς τα μεγέθη των δεξαμενών είναι εκ φύσεως περιορισμένα, ενώ ακόμα και το περιβάλλον μιας λίμνης μπορεί να υποφέρει από ανακλάσεις (βυθός, επιφάνεια) και πηγές θορύβου (πανίδα, ανθρώπινη δραστηριότητα κλπ.). Συνεπώς, το ελεύθερο πεδίο μπορεί μόνο να προσεγγιστεί, με μεθόδους όπως η ανηχοϊκή επένδυση δεξαμενών, η μέτρηση με παλμούς περιορισμένης χρονικής διάρκειας για την απόρριψη των ανακλάσεων, αφαίρεση της επίδρασής τους με μεθόδους επεξεργασίας δεδομένων κλπ. [50].

Η μέθοδοι διακρίβωσης χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: Τις πρωτεύουσες (απόλυτες) και τις δευτερεύουσες. Η βασική τους διαφορά είναι ότι οι πρωτεύουσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακρίβωση υδροφώνων εκ του μηδενός, ενώ οι δευτερεύουσες απαιτούν τη χρήση ενός ήδη διακριβομένου με πρωτεύουσα μέθοδο υδροφώνου ή εκπομπού. Η διακρίβωση με πρωτεύουσα μέθοδο απαιτεί πιο ακριβό εξοπλισμό και περισσότερες μετρήσεις, είναι πιο χρονοβόρα και περιέχει περισσότερες πηγές λαθών. Αντίθετα, οι δευτερεύουσες μέθοδοι είναι πιο απλές, φθηνές και γρήγορες, με μικρότερα ποσοστά λαθών (αν και η ακρίβεια των μετρήσεων δεν μπορεί να ξεπερνά αυτή της πρωτεύουσας μεθόδου που έχει χρησιμοποιηθεί). Στην πράξη, η πλεοψηφία των διακριβώσεων και επαναδιακριβώσεων υδροφώνων που απαιτούνται γίνονται με δευτερεύουσες μεθόδους σε πιστοποιημένα εργαστήρια που διαθέτουν μορφομετατροπείς διακριβομένους με πρωτεύουσα μέθοδο. Στη συνέχεια, θα αναφέρουμε μερικές από τις πιο σημαντικές.

5.1.1 Δευτερεύουσες μέθοδοι

i) Μέθοδος σύγκρισης (ή αντικατάστασης) υδροφώνων ελεύθερου πεδίου

Η μέθοδος σύγκρισης ελεύθερου πεδίου είναι η απλούστερη δυνατή μέθοδος διακρίβωσης και τα αποτελέσματά της είναι αρκετά έγκυρα. Απαιτεί ένα ήδη διακριβωμένο υδρόφωνο και έναν εκπομπό. Τα χαρακτηριστικά του εκπομπού δεν έχουν σημασία, αρκεί να μπορεί να παράγει ακουστικά σήματα αξιόπιστα στις επιθυμητές συχνότητες. Η διαδικασία γίνεται ως εξής: Στο (προσεγγιστικά) ελεύθερο πεδίο μας κατασκευάζεται η απόκριση συχνότητας του διακριβωμένου υδροφώνου με τη διέγερση του εκπομπού. Στη συνέχεια το υδρόφωνο αντικαθίσταται από αυτό που θέλουμε να διακριβώσουμε, κατασκευάζουμε πάλι την απόκριση και τη συγκρίνουμε. Για την ευαισθησία του αγνώστου υδροφώνου, ισχύει:

$$M_x = M_s \frac{V_x}{V_s} \quad (5.1.1.1)$$

όπου M_x η ευαισθησία που θέλουμε, M_s η γνωστή ευαισθησία του διακριβωμένου υδροφώνου, V_x και V_s η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα τους. Μια βασική πηγή λαθών αυτής της μεθόδου είναι οι ανακλάσεις του πεδίου. Όταν τα δυο υδρόφωνα διαφέρουν σημαντικά στη γεωμετρία ή/και την κατευθυντικότητα, τότε πιθανώς να επηρεάζονται πολύ διαφορετικά από αυτές. Μια παραλλαγή, όπου τα δυο υδρόφωνα είναι

ταυτόχρονα τοποθετημένα δεν χρησιμοποιείται συχνά, λόγω του μειονεκτήματος ότι η θέση του καθενός και η επιρροή του ενός στο άλλο μπορεί να προκαλέσει σημαντικές διαφοροποιήσεις [20].

ii) Διακρίβωση γνωστού εκπομπού

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη χρήση ενός εκπομπού γνωστής απόκρισης εκπομπής. Η ευαισθησία λήψης του υδροφώνου ορίζεται ως:

$$M_x = \frac{v_x v_x}{p_a v_s} \quad (5.1.1.2)$$

όπου v_x η τάση ανοιχτού κυκλώματος και p_a η ακουστική πίεση σε μPa στην επιφάνειά του. Όμως, για την παραγόμενη πίεση του εκπομπού σε απόσταση d ισχύει:

$$p_a = \frac{i_s S_s}{d} \quad (5.1.1.3)$$

με i_s το ρεύμα διέγερσης και S_s την απόκριση ρεύματος εκπομπής του εκπομπού σε απόσταση ενός μέτρου, σε $\mu Pa/A$. Άρα:

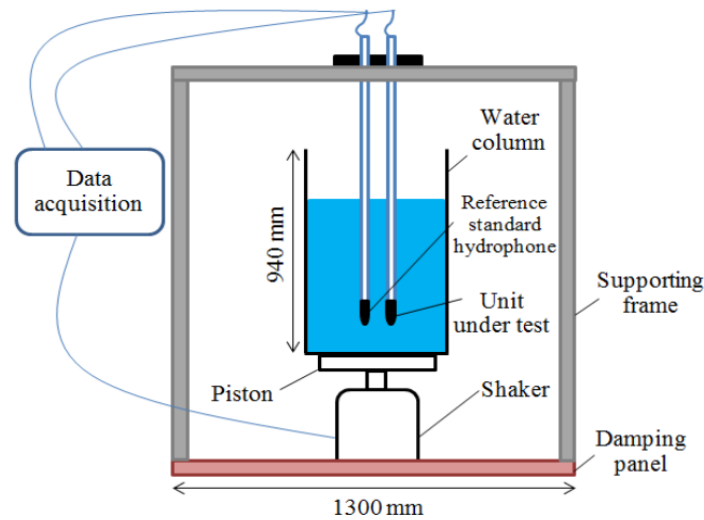
$$M_x = \frac{v_x d}{i_s S_s} \quad (5.1.1.4)$$

Αυτή η μέθοδος συνήθως δεν προτιμάται, λόγω της πολύ διαφορετικής μορφής που έχουν τα διαγράμματα απόκρισης εκπομπών με τα διαγράμματα απόκρισης λήψης υδροφώνων και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς αυτών κοντά στη συχνότητα συντονισμού [20].

iii) Μέθοδος ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (*vibrating water column*)

Η μέθοδος ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης (σχήμα 5.1.1.1) είναι μια σχετικά απλή μέθοδος διακρίβωσης, η χρήση της οποίας ενδείκνυται σε πολύ χαμηλές συχνότητες (έως 1-2kHz), όπου η προσέγγιση συνθηκών ελεύθερου πεδίου σε εργαστηριακό περιβάλλον είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί. Η λειτουργία της βασίζεται σε μια κυλινδρική δεξαμενή νερού ή (άλλου υγρού), συζευγμένη με έναν μηχανικό ταλαντωτή. Το υδρόφωνο προς διακρίβωση τοποθετείται στο εσωτερικό του δοχείου και ο ταλαντωτής θέτει το δοχείο σε κίνηση στην επιθυμητή συχνότητα, δημιουργώντας ένα ομοιογενές ακουστικό πεδίο στο εσωτερικό του νερού. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μηχανική απόκριση και οι συχνότητες συντονισμού του δοχείου, που λύνεται με τη χρήση ενός υδροφώνου αναφοράς, και η ύπαρξη εξωτερικού μηχανικού θορύβου, η επίδραση

του οποίου μπορεί να μετρηθεί με την κατάλληλη επένδυση αποσβεστικού υλικού [51,52,53].



Σχήμα 5.1.1.1: Το σχεδιάγραμμα της μεθόδου ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης [51].

5.1.2 Πρωτεύουσες (απόλυτες) μέθοδοι

i) Διακρίβωση αμοιβαιότητας (reciprocity)

Η διακρίβωση αμοιβαιότητας είναι μακράν η πιο συνηθισμένη μέθοδος απόλυτης διακρίβωσης, και βασίζεται στην ιδιότητα της ηλεκτρομηχανικής αμοιβαιότητας της πλειοψηφίας των μορφομετατροπέων, δηλαδή ότι ο λόγος J ($V \cdot A / Pa^2$) της ευαισθησίας λήψης M προς την ευαισθησία εκπομπής S είναι σταθερός για δεδομένη συχνότητα:

$$J(f) = \frac{M}{S} \quad (5.1.2.1)$$

Η απλή διακρίβωση αμοιβαιότητας πραγματοποιείται σε ελεύθερο πεδίο και κάνει χρήση τριών μορφομετατροπέων (σχήματα 5.1.2.1 και 5.1.2.2), εκ των οποίων ο ένας (P) λειτουργεί αποκλειστικά ως εκπομπός, ο δεύτερος (H) αποκλειστικά ως υδρόφωνο και ο τρίτος (T) εκτελεί και τις δύο λειτουργίες. Προϋπόθεση είναι η ιδιότητα της αμοιβαιότητας να ισχύει στον T [20]:

$$J_T = \frac{M_T}{S_T} \quad (5.1.2.2)$$

Η διαδικασία της διακρίβωσης είναι η αναλύεται στη συνέχεια. Αρχικά, μετράμε την τάση ελεύθερου πεδίου του H με διέγερση από τον P:

$$v_{PH} = M_H p_P \quad (5.1.2.3)$$

όπου M_H η ευαισθησία του Η και p_P η πίεση που προκαλείται από τον Ρ, η οποία, για απόσταση d_1 , ισούται με:

$$p_P = i_P S_P \frac{d_0}{d_1} \quad (5.1.2.4)$$

με i_P και S_P το ρεύμα διέγερσης και η απόκριση ρεύματος εκπομπής του Ρ και d_0 η απόσταση αναφοράς (συνήθως 1 μέτρο). Συνεπώς:

$$v_{PH} = M_H i_P S_P \frac{d_0}{d_1} \quad (5.1.2.5)$$

Στη συνέχεια, μετράμε την τάση του Τ με διέγερση από τον Ρ:

$$v_{PT} = M_T i_P S_P \frac{d_0}{d_1} \quad (5.1.2.6)$$

και την τάση του Η με διέγερση από τον Τ:

$$v_{TH} = M_H i_T S_T \frac{d_0}{d_1} \quad (5.1.2.7)$$

από αυτές τις εξισώσεις, προκύπτει:

$$\frac{v_{PH}}{v_{PT}} = \frac{M_H}{M_T} \Rightarrow M_H = M_T \frac{v_{PH}}{v_{PT}} = J S_T \frac{v_{PH}}{v_{PT}} \quad (5.1.2.8)$$

και καταλήγουμε στη σχέση που μας δίνει την ευαισθησία λήψης του υδροφώνου Η:

$$M_H = \sqrt{\frac{v_{TH} v_{PH}}{v_{PT} i_T} \frac{d_1}{d_0} J} \quad (5.1.2.9)$$

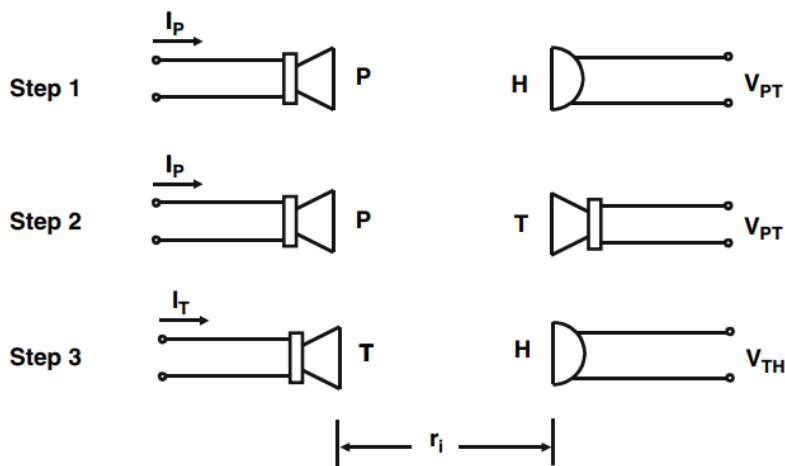
Η παράμετρος αμοιβαιότητας J ισούται με [48]:

$$J = 2 \frac{d_0}{\rho f} \quad (5.1.2.10)$$

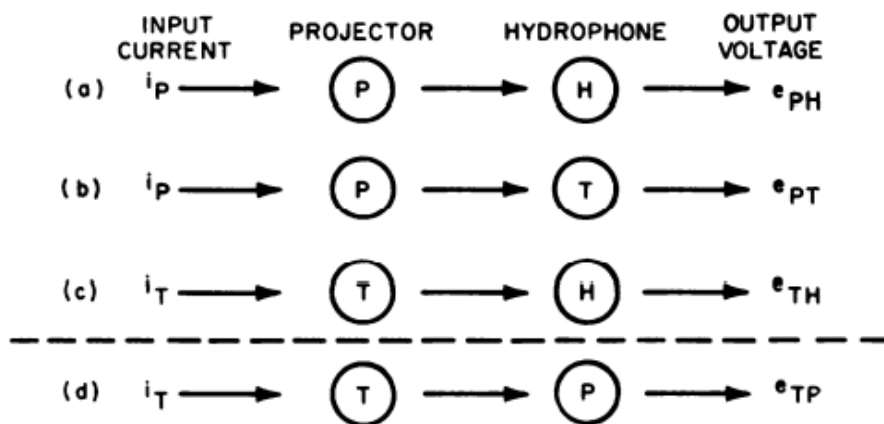
όπου ρ η πυκνότητα του νερού και f η συχνότητα του ακουστικού κύματος. Έχοντας ολοκληρώσει τη διακρίβωση του υδροφώνου, είναι πολύ απλό να διακριβώσουμε και τους άλλους δύο μορφομετατροπείς.

Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές αυτής της μεθόδου, οι οποίες βασίζονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης και αξιοποιούν κυλινδρικά, επίπεδα κύματα κλπ. Η πιο σημαντική από αυτές είναι η διακρίβωση συζεύκτη αμοιβαιότητας (coupler reciprocity) (σχήματα 5.1.2.3 και 5.1.2.4). Ο συζεύκτης είναι ένας θάλαμος νερού, πολύ

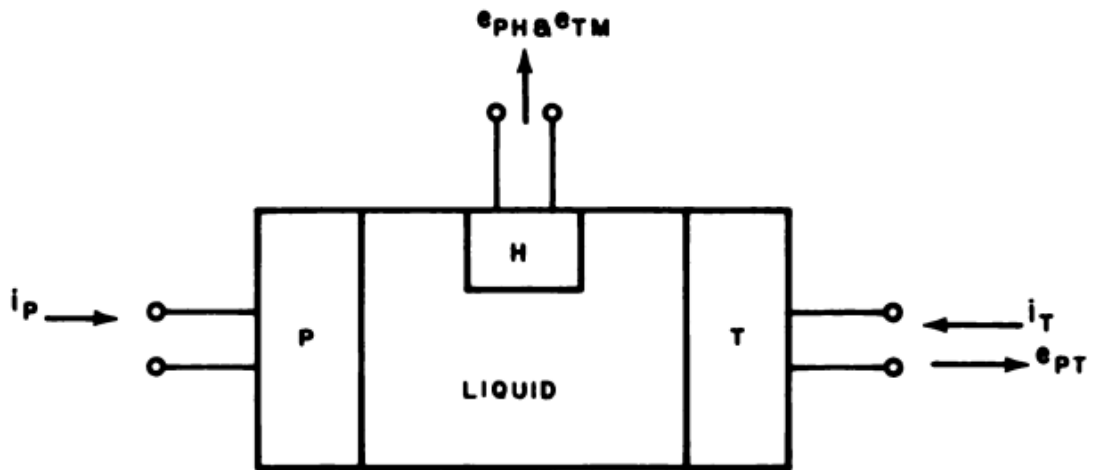
μικρών διαστάσεων, με στιβαρά τοιχώματα. Σε αυτόν προσαρτίζονται οι μορφομετατροπείς. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι, ότι λόγω των μικρών διαστάσεών του, η ακουστική πίεση στο εσωτερικό του είναι ομοιογενής και ίση με την πίεση του ακουστικού εκπομπού[20]. Συνεπώς, η χρησιμότητα αυτής της μεθόδου είναι η διακρίβωση μορφομετατροπέων σε πολύ χαμηλές συχνότητες, από δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες Hz, όπου η προσέγγιση του ελεύθερου πεδίου με άλλες διατάξεις και μεθόδους δεν είναι δυνατή. Επιπλέον, η πίεση στο εσωτερικό του είναι ελεγχόμενη, πράγμα που επιτρέπει διακρίβωση σε συνθήκες που προσομοιάζουν μεγάλα θαλάσσια βάθη. Στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται η υψηλή περιπλοκότητα και το κόστος κατασκευής, η δυσκολία πλήρους αφαίρεσης του εσωτερικού αέρα και ο περιορισμός στις διαστάσεις και το σχήμα των μορφομετατροπέων προς διακρίβωση.



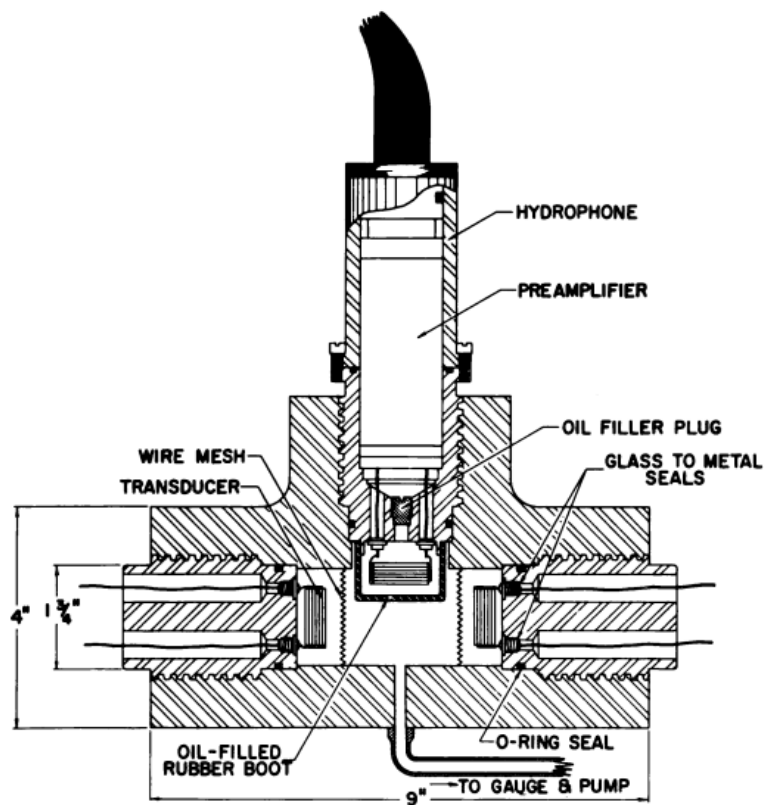
Σχήμα 5.1.2.1: Η διαδικασία της απλής διακρίβωσης αμοιβαιότητας σχηματικά [54].



Σχήμα 5.1.2.2: Η προσθήκη μίας επιπλέον μέτρησης (d) για την επιβεβαίωση της αμοιβαιότητας του T [20].



Σχήμα 5.1.2.3: Το διάγραμμα μιας διάταξης συζεύκτη αμοιβαιότητας [20].



Σχήμα 5.1.2.4: Η τομή ενός συζεύκτη αμοιβαιότητας [20].

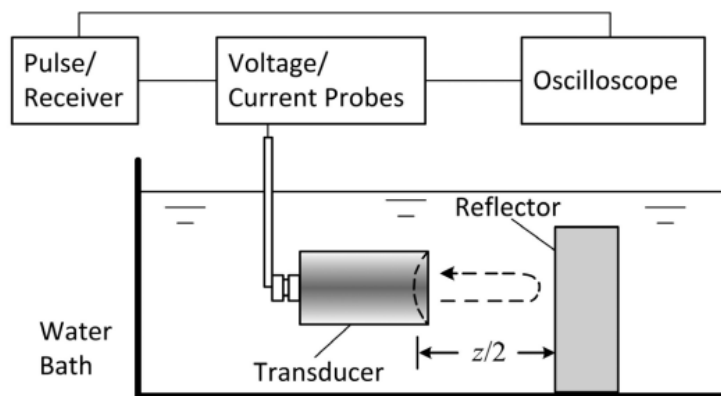
ii) Διακρίβωση αυτο-αμοιβαιότητας (self-reciprocity)

Η απλή διακρίβωση αμοιβαιότητας μπορεί θεωρητικά να γίνει απλούστερη, αν θεωρήσουμε μια παραλλαγή, όπου έχουμε δύο μορφομετατροπείς με ίδιο J . Σε αυτήν την περίπτωση, θα χρειάζονταν μόνο δυο μετρήσεις για την εύρεση των ευαισθησιών τους.

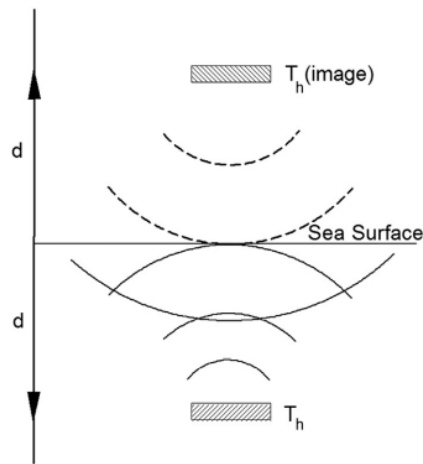
Πρακτικά, όμως, είναι αδύνατον να γνωρίζουμε εκ των προτέρων για την ισότητα των J τους, και ο τρόπος εξακρίβωσης, δηλαδή η σύγκριση με έναν τρίτο μορφομετατροπέα, απλά μας οδηγεί πάλι στην απλή διακρίβωση αμοιβαιότητας. Όμως, αν αντί για δύο χρησιμοποιήσουμε μόνο έναν, τότε είμαστε σίγουροι ότι το J είναι κοινό και έχουμε τη μέθοδο της αυτο-αμοιβαιότητας. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε, τοποθετώντας τον μορφομετατροπέα αντικριστά με μια ανακλαστική επιφάνεια (σχήματα 5.1.2.5 και 5.1.2.6). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον ως εκπομπό, στέλνουμε χρονικά περιορισμένους παλμούς, τους οποίους λαμβάνουμε από την ανάκλαση, χρησιμοποιώντας τον ως υδρόφωνο. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ειδώλων μπορούμε να θεωρήσουμε ένα ισοδύναμο σύστημα, τοποθετώντας έναν ίδιο μορφομετατροπέα συμμετρικά ως προς την ανακλαστική επιφάνεια και αφαιρώντας την τελευταία. Μπορούμε να υπολογίσουμε την ευαισθησία λήψης ως εξής [55]:

$$M_H = \sqrt{\frac{v_{TH}}{i_T} J} \quad (5.1.2.11)$$

όπου i_T είναι το ρεύμα διέγερσης και v_{TH} η τάση που προκαλεί η διέγερση του ανακλώμενου σήματος. Βασική προϋπόθεση αυτής της μεθόδου είναι να αγνοηθούν ανεπιθύμητες ανακλάσεις που, κατά πάσα πιθανότητα, θα υπάρχουν.



Σχήμα 5.1.2.5: Σχεδιάγραμμα της μεθόδου αυτο-αμοιβαιότητας [56].



Σχήμα 5.1.2.6: Η εφαρμογή της μεθόδου ειδώλων σε μια περίπτωση αυτο-αμοιβαιότητας, όπου η ανακλαστική επιφάνεια είναι η επιφάνεια της θάλασσας, λόγω της μεγάλης διαφοράς ακουστικής αντίστασης μεταξύ αέρα και νερού [48].

iii) Διακρίβωση πιστονοφώνου (pistonphone)

Μια από τις πιο κλασικές απόλυτες μεθόδους διακρίβωσης είναι η διακρίβωση πιστονοφώνου (σχήμα 5.1.2.7), η οποία αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε μικρόφωνα αέρος. Το πιστονόφωνο είναι ένας θάλαμος αέρα μικρών διαστάσεων, με ένα προσαρτισμένο πιστόνι, δυναμικού τύπου (moving coil), με ελεγχόμενη συχνότητα και γνωστό πλάτος μετατόπισης x_d σε m . Η μετατόπιση όγκου X σε m^3 δίνεται από την επιφάνεια A σε m^2 του πιστονιού και τη μετατόπιση [20]:

$$X = Ax_d \quad (5.1.2.12)$$

οπότε, χρησιμοποιώντας τα ηλεκτροακουστικά ανάλογα, έχουμε:

$$p = UZ_m \quad (5.1.2.13)$$

όπου p η πίεση στο θάλαμο, U η ταχύτητα όγκου και Z_m η σύνθετη ακουστική αντίσταση του ακουστικού μέσου. Για την ταχύτητα, ισχύει:

$$U = j\omega X \quad (5.1.2.14)$$

και για την Z_m , που προσεγγιστικά θεωρείται η καθαρή ενδοτικότητα C_m του αέρα:

$$Z_m \approx \frac{1}{j\omega C_m} \quad (5.1.2.15)$$

άρα, καταλήγουμε σε:

$$p = \frac{X}{C_m} \quad (5.1.2.16)$$

Οπότε, γνωρίζοντας την πίεση και την απόκριση τάσης λήψης μπορούμε να υπολογίσουμε την ευαισθησία. Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου, είναι ότι, λόγω της σημαντικά χαμηλότερης ακουστικής ταχύτητας του αέρα σε σχέση με το νερό, η μέθοδος αυτή ενδείκνυται μόνο για ιδιαίτερα χαμηλές συχνότητες, της τάξεως των εκατοντάδων Hz. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί μερικώς με μια παραλλαγή στη διάταξη, όπου ο θάλαμος είναι μερικώς γεμάτος με νερό και το υδρόφωνο είναι βυθισμένο, ενώ το πιστόνι εξακολουθεί να λειτουργεί στον αέρα. Παρόλ' αυτά, η ανάγκη υπολογισμού της ακουστικής αντίστασης του μέσου προσθέτει μια επιπλέον δυσκολία και αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται συχνά για διακρίβωση υδροφώνων.

iv) Μέθοδος αναίρεσης δυο εκπομπών (Two-projector null method)

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη χρήση δυο ακουστικών εκπομπών, που αποκαλούνται εκπομπός πηγής (source projector) και εκπομπός αναίρεσης (null projector), τοποθετημένους αντικριστά. Το υδρόφωνο προς διακρίβωση τοποθετείται κοντά στο διάφραγμα του εκπομπού αναίρεσης (σχήμα 5.1.2.8). Οι εκπομποί διεγείρονται με κοινό ταλαντωτή, αλλά με ελεγχόμενο πλάτος και φάση διέγερσης για τον εκπομπό αναίρεσης. Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους αυτές, ώστε το διάφραγμα του εκπομπού αναίρεσης να ακινητοποιείται. Δηλαδή, οι δύο δυνάμεις που δέχεται, η ηλεκτρομηχανική δύναμη F από το δικό του σύστημα και η δύναμη που προκαλείται από την πίεση p του εκπομπού πηγής, να είναι ίσες με αντίθετη φάση [57]. Άρα, εάν A το πλάτος του διαφράγματος, έχουμε:

$$F = pA \quad (5.1.2.17)$$

Εάν ο εκπομπός αναίρεσης είναι δυναμικού τύπου, που είναι και το πιο σύνηθες, τότε:

$$F = BLi \quad (5.1.2.18)$$

με B την πυκνότητα ροής του μαγνητικού πεδίου σε T , L το μήκος πηνίου σε m και i το ρεύμα διέγερσης σε A . Οπότε:

$$p = \frac{BLi}{A} \quad (5.1.2.19)$$

Ο λόγος BL/A είναι σταθερός και ανεξάρτητος της συχνότητας. Μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος της διαφοράς της υδροστατικής πίεσης λόγω της διέγερσης του εκπομπού αναίρεσης με ένα dc ρεύμα:

$$\frac{BL}{A} = \frac{\Delta p_{dc}}{i_{dc}} \quad (5.1.2.20)$$

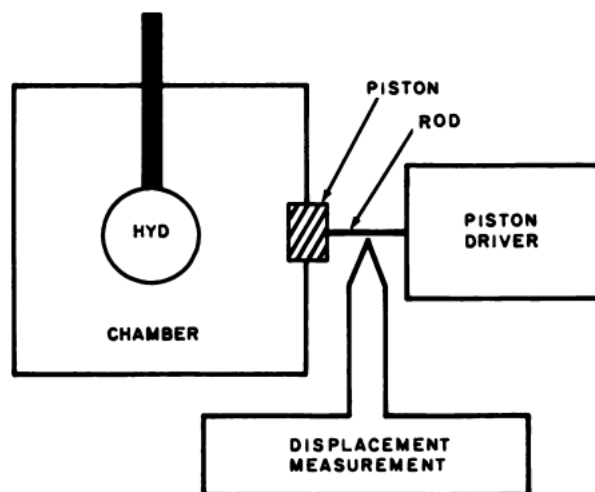
και η διαφορά πίεσης μπορεί να υπολογιστεί, μέσω της εύκολα μετρήσιμης μεταβολής της στάθμης νερού h :

$$\Delta p_{dc} = \rho gh \quad (5.1.2.21)$$

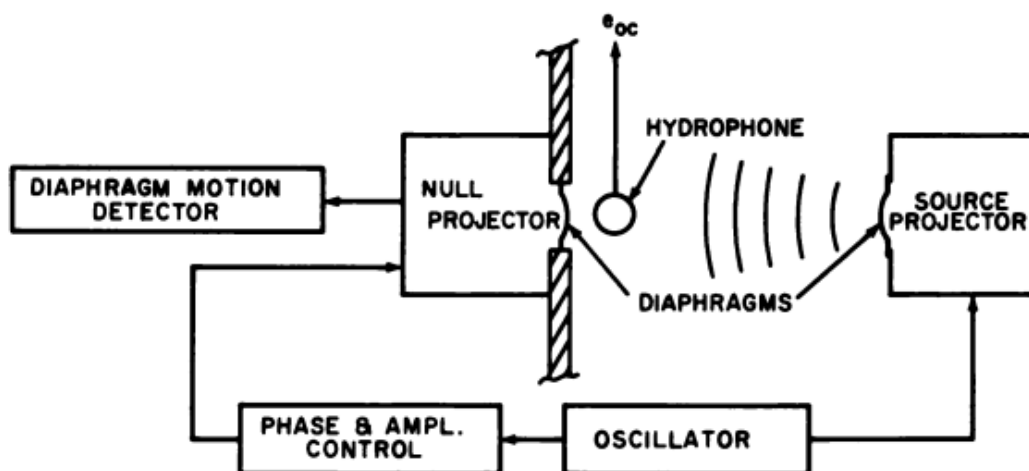
όπου ρ η πυκνότητα του νερού σε kg/m^3 και g η βαρυτική επιτάχυνση σε m/s^2 . Αφού, λοιπόν, το υδρόφωνο είναι τοποθετημένο κοντά στο διάφραγμα του εκπομπού αναίρεσης, θα δέχεται την ίδια πίεση με αυτό. Συνεπώς, για την ευαισθησία του ισχύει:

$$M = \frac{v_{oc}}{p} = \frac{v_{oc}}{\left(\frac{BLi}{A}\right)} = \frac{v_{oc}}{i} \frac{i_{dc}}{\rho gh} \quad (5.1.2.22)$$

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι κοντά σε συχνότητες συντονισμού του υδροφώνου δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Ακόμα, η πιθανή αντιστάθμιση πίεσης που μπορεί να χρειαστεί το διάφραγμα του εκπομπού αναίρεσης απαιτεί ένα περίπλοκο σύστημα αντλίας [20].



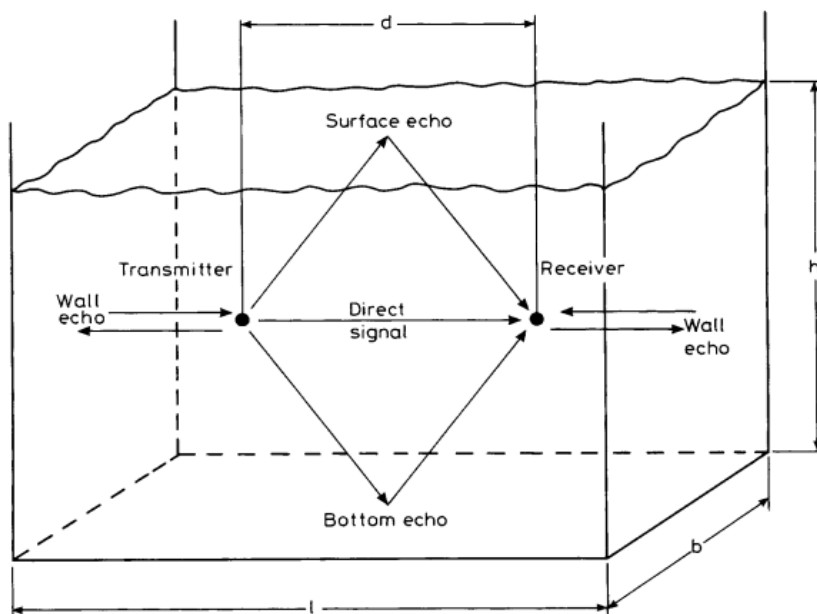
Σχήμα 5.1.2.7: Η διάταξη της διακρίβωσης πιστονοφώνου [20].



Σχήμα 5.1.2.8: Σχεδιάγραμμα της διάταξης δυο εκπομπών αναίρεσης [20].

5.2 Ζητήματα και μέθοδοι προσέγγισης ελεύθερου πεδίου

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η διαδικασία της διακρίβωσης απαιτεί, θεωρητικώς, συνθήκες ελεύθερου πεδίου, χωρίς ανακλάσεις και πηγές θορύβου. Αυτό, στην πράξη, μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μετρήσεις σε πολύ βαθιά ύδατα, πράγμα εξαιρετικά δύσκολο, με τεράστιο υλικό και χρονικό κόστος. Θα αναλύσουμε ορισμένες τεχνικές, με τις οποίες μπορούμε, ενδεχομένως, να προσεγγίσουμε τις συνθήκες ελεύθερου πεδίου, ακόμα και σε περιβάλλοντα με ισχυρές ανακλάσεις (σχήμα 5.2.1).



Σχήμα 5.2.1: Οι κύριες ανακλάσεις που προκαλούνται μέσα σε μια δεξαμενή [58].

5.2.1 Χρονικά περιορισμένοι παλμοί

Ένας σχετικά απλός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος των ανακλάσεων είναι η διέγερση και η λήψη των μορφομετατροπέων να γίνεται σε χρονικά παράθυρα ημιτονοειδών παλμών, με αρκετά μικρή διάρκεια ώστε οι ανακλάσεις να μην λαμβάνονται υπ' όψιν. Η διάρκεια αυτή μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γεωμετρία της διάταξης και τη μικρότερη απόσταση του μορφομετατροπέα λήψης από τις ανακλαστικές της επιφάνειες. Στη συνέχεια, οι παλμοί αυτοί μπορούν να επεξεργαστούν με διάφορους τρόπους, όπως πχ. φασματική ανάλυση ή εξαγωγή της rms τιμής, και να γίνει η διακρίβωση. Ένας βασικός περιορισμός αυτής της μεθόδου είναι ότι θα πρέπει, μέσα στη διάρκεια του κάθε παλμού, οι μορφομετατροπείς προβολής και λήψης να έχουν φτάσει σε ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, δηλαδή να έχει παρέλθει η μεταβατική κατάσταση της διέγερσης. Αυτό γίνεται, εάν ο μορφομετατροπέας έχει προλάβει να ταλαντωθεί περίπου τόσες φορές, όσες και η τιμή του Q_m του. Οπότε, εάν T ο χρόνος πρόσκρουσης της πρώτης ανάκλασης, θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη [58]:

$$Q_m > fT \quad (5.2.1.1)$$

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσες λιγότερες είναι οι ταλαντώσεις που επιτελεί μέσα σε χρόνο T . Εάν δεν ικανοποιείται η συνθήκη, τότε τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δεν είναι αξιόπιστα.

5.2.2 Πεδίο διάχυσης (diffusion field)

Μια κλειστή περιοχή πολλαπλών ανακλάσεων με κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως πολλές ασυμμετρίες στις επιφάνειές της, μικρές απώλειες απορρόφησης και μεγάλο χρόνο αντήχησης, όταν τοποθετηθεί μια ακουστική πηγή στο εσωτερικό της δημιουργείται ένα ομοιογενές ακουστικό πεδίο, με εξαίρεση κοντινές αποστάσεις από την πηγή και τις επιφάνειες, καθώς η τυχαιότητα των ανακλάσεων τις κατανέμει ομοιόμορφα. Ακόμα και αν η γεωμετρία του χώρου είναι συμμετρική, η χρήση ευρυζωνικών σημάτων οδηγεί στην υπέρθεση πολλών κανονικών τρόπων ταλάντωσης, με αντίστοιχο αποτέλεσμα [58]. Μπορούμε, λοιπόν, χρησιμοποιώντας ως σήμα διέγερσης λευκό γκαουσιανό ή άλλο θόρυβο, να εφαρμόσουμε τη μέθοδο αμοιβαιότητας σε ένα πεδίο διάχυσης [59]. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι ότι απαιτείται η κατευθυντικότητα των μορφομετατροπέων, που είναι δύσκολο να υπολογιστεί, και ότι, λόγω της

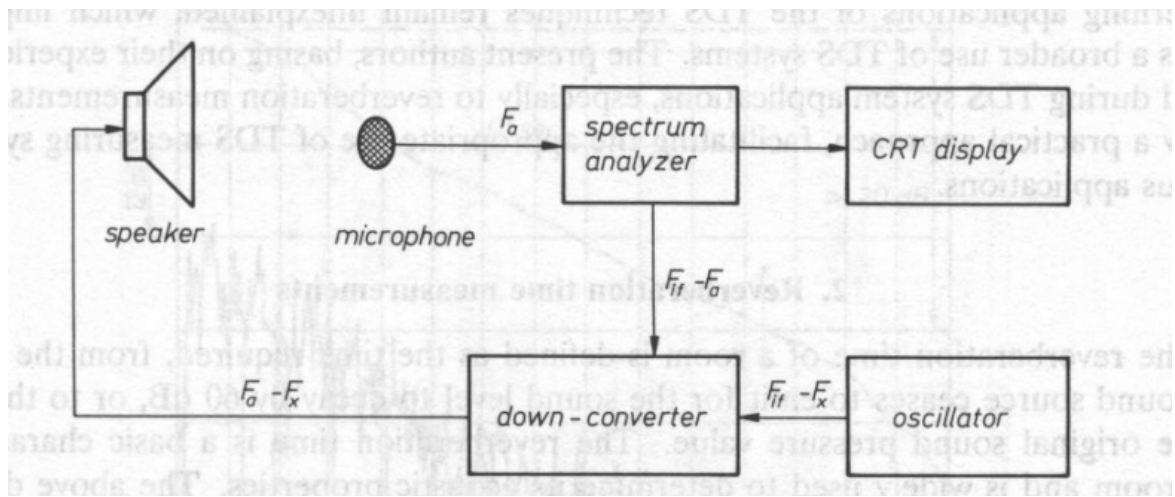
μεγαλύτερης ταχύτητας και απωλειών στις επιφάνειες σε σχέση με τον αέρα, οι δεξαμενές νερού έχουν σημαντικά χαμηλότερους χρόνους αντήχησης.

5.2.3 Φασματομετρία χρονικής καθυστέρησης (TDS)

Η φασματομετρία χρονικής καθυστέρησης (Time Delay Spectrometry ή TDS) (σχήμα 5.2.3.1) είναι μία σύγχρονη μέθοδος μέτρησης, που βασίζεται στη μαθηματική μετατροπή μετρήσεων από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου. Για την διεκπεραίωσή της απαιτείται μία πηγή με καλά ελεγχόμενη, ως προς τη συχνότητα, απόκριση εξόδου. Η πηγή αυτή εκπέμπει ένα ακουστικό ημιτονοειδές σήμα, σταθερού πλάτους και γραμμικά μεταβαλλόμενης συχνότητας (σήμα γραμμικής σάρωσης-Linear Sweep), που ονομάζεται και "FM chirp". Υποθέτοντας ότι η αρχική συχνότητα μέτρησης είναι τα 0Hz, έχει τη μορφή [60]:

$$x(t) = A \cos\left(\pi \frac{F}{T_s} t^2\right) \quad (5.2.3.1)$$

όπου A το (σταθερό) πλάτος, F η μέγιστη συχνότητα μέτρησης (που ταυτίζεται με το εύρος συχνοτήτων στην προκειμένη περίπτωση) και T_s ο χρόνος σάρωσης. Ο λόγος F/T_s είναι ο ρυθμός σάρωσης και συμβολίζεται S . Το σκεπτικό της μεθόδου είναι το εξής: οι ανακλάσεις που θα φτάσουν στο υδρόφωνο προς διακρίβωση κάποια χρονική στιγμή μετά το απευθείας σήμα θα έχουν μικρότερη συχνότητα από αυτό. Συνεπώς, η εφαρμογή ενός ζωνοπερατού φίλτρου συχνοτήτων στο λαμβανόμενο σήμα, με κεντρική συχνότητα που μεταβάλλεται με τον ρυθμό S του σήματος εκπομπής, μπορεί να απορρίψει την επίδραση των ανακλάσεων [58]. Το μήκος του παραθύρου του φίλτρου καθορίζεται από το ρυθμό σάρωσης πρέπει να είναι αρκετά στενό, ώστε να αποκλείει τις ανακλάσεις, αλλά αρκετά ευρύ, ώστε να προλαβαίνει να διεγείρεται ικανοποιητικά από τον τόνο σάρωσης και να έχει ικανοποιητικό σηματοθορυβικό λόγο (SNR-Signal to Noise Ratio). Οι δύο αυτές αντίθετες απαιτήσεις συμβιβάζονται βέλτιστα όταν το εύρος του παραθύρου λαμβάνει την τιμή \sqrt{S} [61]. Η μέθοδος TDS, αν και εν γένει δίνει καλύτερα αποτελέσματα από μετρήσεις με απλούς χρονικά περιορισμένους παλμούς, εξακολουθεί να μην είναι αξιόπιστη στις πολύ χαμηλές συχνότητες, όπου ο ρυθμός σάρωσης και το μήκος του παραθύρου του φίλτρου γίνονται πολύ μικρά σε σχέση με την περίοδο του σήματος και, άρα, η φασματική ανάλυση δεν είναι καθαρή.



Σχήμα 5.2.3.1: Το απλοποιημένο διάγραμμα εφαρμογής της μεθόδου TDS [62].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν όλα τα επιμέρους στοιχεία της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και τα στάδια της κατασκευής τους.

6.1 Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές ανάγκες της παρούσης διπλωματικής εργασίας ήταν πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι (κάψες) (σχήματα 6.1.2 , 6.1.3 και 6.1.4) της εταιρίας Mouser, που αποτελούνται από ένα δισκίο πιεζοκεραμικού υλικού (PZT), στις επιφάνειες του οποίου γίνεται εναπόθεση λεπτού στρώματος ασημιού (που λειτουργεί ως προστασία του κεραμικού και ως ηλεκτρόδιο) και τοποθετείται σε μια μπρούτζινη βάση. Στον πίνακα 6.1.1 παρατίθενται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν και τα χαρακτηριστικά τους:

Πίνακας 6.1.1: Τα μοντέλα πιεζοηλεκτρικών που χρησιμοποιήθηκαν, οι διαστάσεις και η συχνότητα συντονισμού τους.

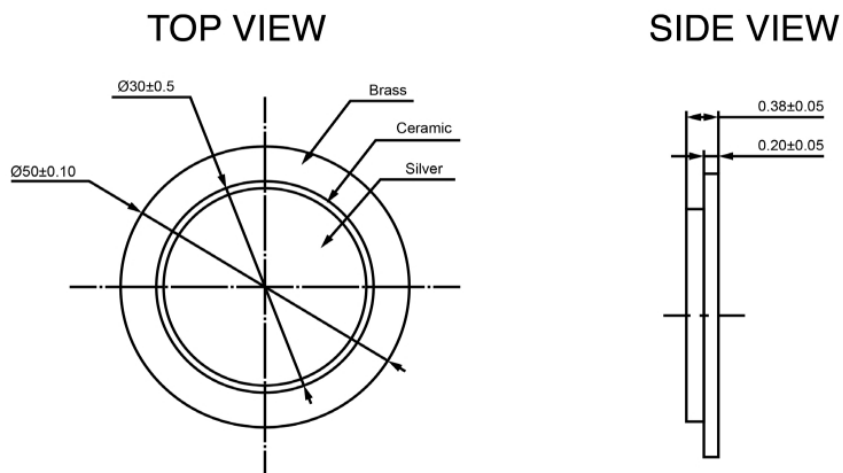
| <i>Αριθμός Μοντέλου</i> | <i>Διάμετρος (mm)</i> | <i>Συχνότητα Συντονισμού (kHz)</i> |
|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 497-P50010-1 | 50 | 1 |
| 497-P41010-1 | 41 | 1 |
| 497-P35029-1 | 35 | 2,9 |
| 497-P31480-1 | 31 | 3,7 |



Σχήμα 6.1.2: Η κάτοψη μιας πιεζοηλεκτρικής κάψας που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 6.1.3: Συγκόλληση καλωδίων στα ηλεκτρόδια της πιεζοηλεκτρικής κάψας πριν το στάδιο της αδιαβροχοποίησης.



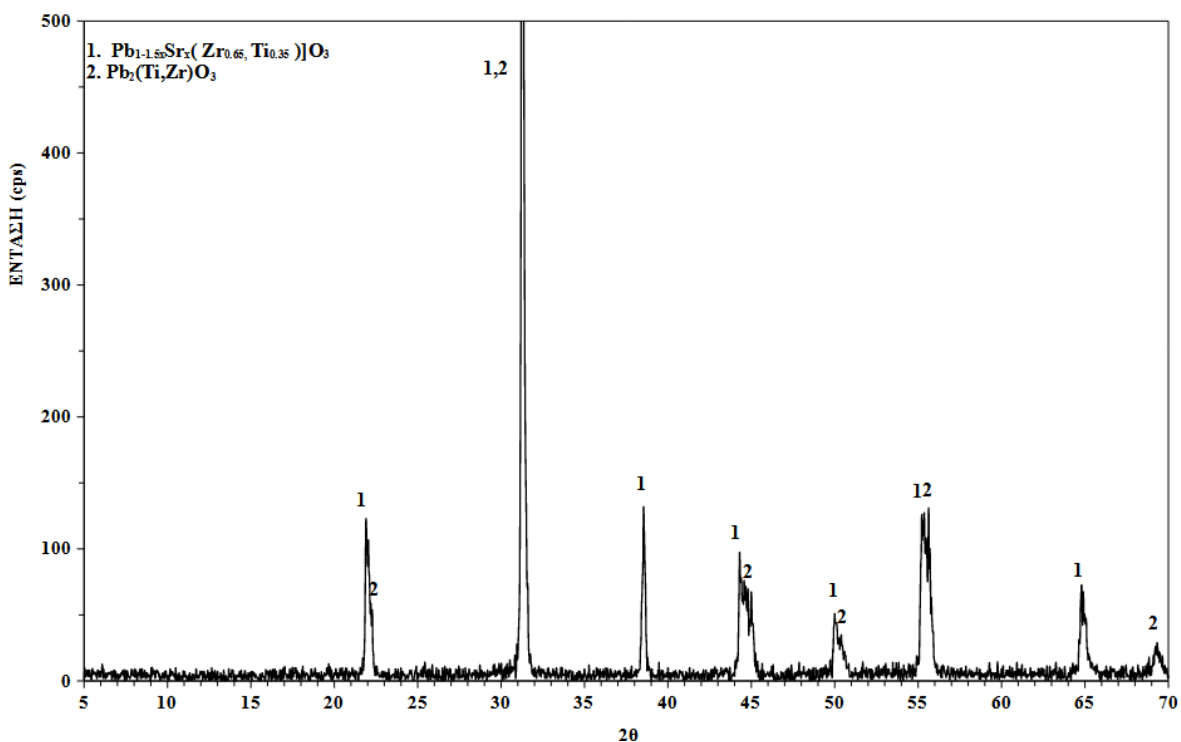
Σχήμα 6.1.4: Τα διαγράμματα πρόσοψης και πλάγιας όψης της κάψας των 50mm, μαζί με τις διαστάσεις της [63].

6.2 Χαρακτηρισμός Πιεζοηλεκτρικού Υλικού

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός, ποσοτική ανάλυση και ανάλυση κρυσταλλικής δομής του πιεζοκεραμικού υλικού των δίσκων, αφού αφαιρέθηκε το στρώμα ασημιού με νιτρικό οξύ. Χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές της κρυσταλλογραφίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction, XRD) και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM), η λειτουργία των οποίων έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

6.2.1 Ανάλυση XRD

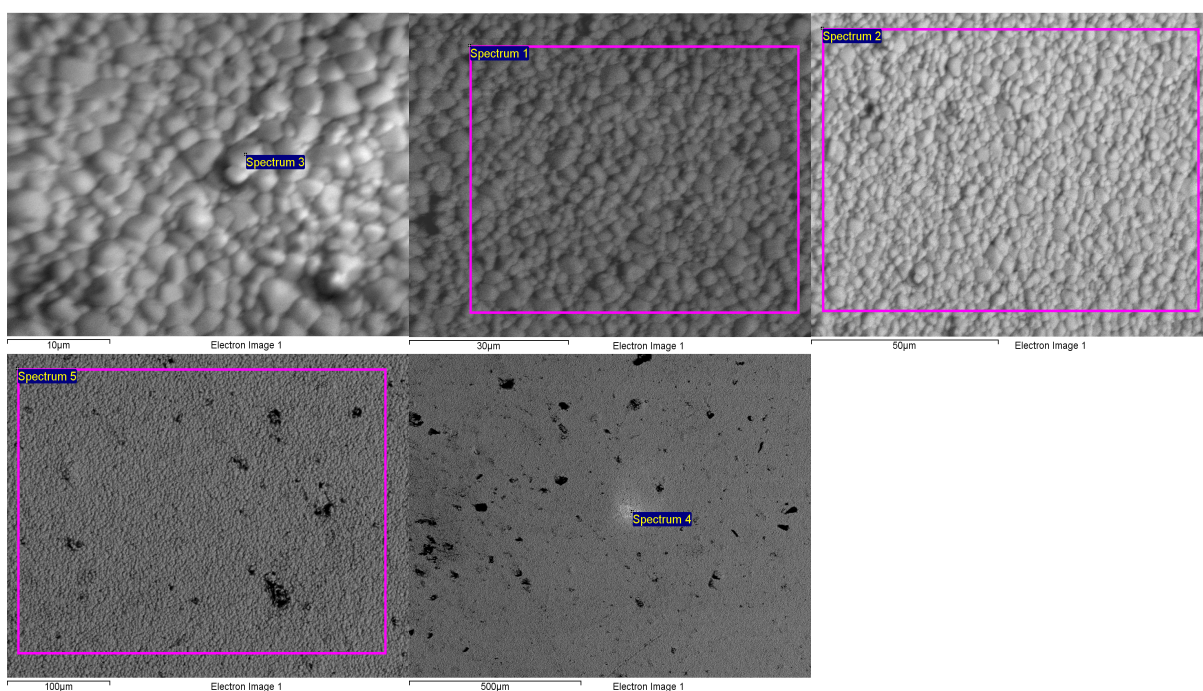
Η ανάλυση XRD που πραγματοποιήθηκε συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα έντασης/φάσης (γωνίας 2θ). Με μια πρώτη όψη, η κρυσταλλική δομή του πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι εμφανής, λόγω των απότομων κορυφών που σχηματίζονται και αντιστοιχούν στις γωνίες συμβολής Bragg. Η κυρίαρχη φάση είναι η $\text{Pb}_{1-1.5x}\text{Sr}_x(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$, που είναι ένα συνηθισμένο κράμα PZT. Παρατηρείται και μια δευτερεύουσα φάση $\text{Pb}_2(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$. Οι κορυφές που αντιστοιχούν στην κάθε φάση σημειώνονται με 1 και 2 αντίστοιχα στο διάγραμμα (σχήμα 6.2.1.1).



Σχήμα 6.2.1.1: Το διάγραμμα φάσης XRD.

6.2.2 Ανάλυση SEM

Στα πλαίσια της ανάλυσης SEM η ηλεκτρονική δέσμη του μικροσκοπίου ρυθμίστηκε σε πέντε διαφορετικές αναλύσεις (resolutions): 10 μm , 30 μm , 50 μm , 100 μm και 500 μm (σχήμα 6.2.2.1). Για κάθε διαφορετική ανάλυση παρήχθη μια απεικόνιση της επιφάνειας και μια στοιχειακή ανάλυση του δείγματος. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των άνωθι μετρήσεων. Φαίνεται, ότι η χημική σύσταση του δείγματος που προκύπτει από το SEM είναι αρκετά παρόμοια, με κάποιες διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφορετικών αναλύσεων, με τα αποτελέσματα της ανάλυσης XRD. Ένα αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι στην ανάλυση των 500 μm απουσιάζει το στοιχείο του οξυγόνου από τη χημική σύσταση, πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι η χαμηλή ανάλυση αδυνατεί να το εντοπίσει στην επιφάνεια του δείγματος.



Σχήμα 6.2.2.1: Οι μικρογραφίες της επιφάνειας του δείγματος, όπως προέκυψαν από την ανάλυση SEM, για ανάλυση 10, 30, 50, 100 και 500 μm .

Στους Πίνακες που ακολουθούν, συνοψίζεται η κατά βάρος περιεκτικότητα και η αναλογία των ατόμων (%) του δείγματος για καθεμία ανάλυση:

Πίνακας 6.2.2.1: Η κατά βάρος περιεκτικότητα και ατομική αναλογία για ανάλυση 10μm.

| Στοιχείο | Βάρος% | Ατομικό% |
|----------|--------|----------|
| O K | 14.01 | 57.37 |
| Al K | 0.16 | 0.39 |
| Ti K | 6.00 | 8.21 |
| Sr L | 4.46 | 3.34 |
| Zr L | 17.09 | 12.27 |
| Pb M | 58.26 | 18.42 |
| Σύνολο | 100.00 | |

Πίνακας 6.2.2.2: Η κατά βάρος περιεκτικότητα και ατομική αναλογία για ανάλυση 30μm.

| Στοιχείο | Βάρος% | Ατομικό% |
|----------|--------|----------|
| O K | 13.37 | 55.91 |
| Ti K | 7.17 | 10.01 |
| Sr L | 4.13 | 3.16 |
| Zr L | 16.07 | 11.79 |
| Pb M | 59.26 | 19.14 |
| Σύνολο | 100.00 | |

Πίνακας 6.2.2.3: Η κατά βάρος περιεκτικότητα και ατομική αναλογία για ανάλυση 50μm.

| Στοιχείο | Βάρος% | Ατομικό% |
|----------|--------|----------|
| O K | 10.58 | 48.17 |
| Al K | 0.50 | 1.35 |
| Ti K | 8.33 | 12.67 |
| Sr L | 3.22 | 2.68 |
| Zr L | 17.71 | 14.15 |
| Pb M | 59.66 | 20.98 |
| Σύνολο | 100.00 | |

Πίνακας 6.2.2.4: Η κατά βάρος περιεκτικότητα και ατομική αναλογία για ανάλυση 100μm.

| Στοιχείο | Βάρος% | Ατομικό% |
|----------|--------|----------|
| O K | 13.30 | 55.65 |
| Ti K | 7.78 | 10.87 |
| Sr L | 3.43 | 2.62 |
| Zr L | 15.69 | 11.52 |
| Pb M | 59.81 | 19.33 |
| Σύνολο | 100.00 | |

Πίνακας 6.2.2.5: Η κατά βάρος περιεκτικότητα και ατομική αναλογία για ανάλυση 500μm.

| Στοιχείο | Βάρος% | Ατομικό% |
|----------|--------|----------|
| Ti K | 9.41 | 25.24 |
| Sr L | 3.05 | 4.48 |
| Zr L | 20.23 | 28.51 |
| Pb M | 67.31 | 41.76 |
| Σύνολο | 100.00 | |

6.3 Στεγανοποίηση Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων

Για τη λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών καψών σε υδάτινο περιβάλλον είναι απαραίτητο να προηγηθεί η στεγανοποίησή/αδιαβροχοποίησή τους, ώστε να αποφευχθεί η βραχυκύκλωση των ηλεκτροδίων τους, η διάβρωση των υλικών και να εξασφαλιστεί η ασφάλεια τυχόν ηλεκτρονικών στοιχείων. Αρχικά, δοκιμάστηκε η επικάλυψη των γυμνών πιεζοηλεκτρικών με μια σειρά τρόπων, όπως ψέκασμα με σπρέι σιλικόνης και καουτσούκ, πέρασμα με βερνίκι νυχιών και εμφάνιση σε υγρό καουτσούκ. Αν και από αυτές τις μεθόδους η εμφάνιση στο καουτσούκ ήταν η αποτελεσματικότερη, το σχήμα των πιεζοηλεκτρικών καθιστούσε αδύνατη την αδιαβροχοποίησή τους, καθώς κανένα υλικό δεν μπορούσε να εναποτεθεί στις αιχμές τους. Ήταν, λοιπόν, αναγκαίο προηγουμένως να κατασκευαστεί ένα περίβλημα για τις πιεζοηλεκτρικές κάψες, που θα λύσει αυτό το πρόβλημα.

6.3.1 Κατασκευή περιβλήματος με χρήση μεταλλικού δοχείου

Μια πρώτη προσπάθεια κατασκευής περιβλήματος έγινε με τη χρήση ενός μεταλλικού δοχείου, λόγω του βολικού σχήματος και της εύκολης προμήθειάς του. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Αρχικά, δημιουργήθηκε μια οπή στην κάτω πλευρά του δοχείου, για την τοποθέτηση του πιεζοηλεκτρικού και μια πλαϊνή οπή για τα καλώδια. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο από την εξωτερική πλευρά του δοχείου, με την μπροστινή πλευρά προς τα μέσα, και σταθεροποιήθηκε με τη χρήση κόλλας. Στο εσωτερικό του δοχείου τοποθετήθηκαν ροδέλες, ως βαρίδια, για να μπορεί να επιτευχθεί η βύθισή του στον πυθμένα της δεξαμενής που θα λάβουν χώρα οι πειραματικές μετρήσεις. Στη συνέχεια, γεμίσαμε τον κενό χώρο του μεταλλικού δοχείου με σφραγιστική σιλικόνη, ώστε να μην παρεμβάλλεται αέρας, να διατηρεί σταθερό και συμπαγές το εσωτερικό του δοχείου και να επιτευχθεί καλύτερη ακουστική σύζευξη με το υδάτινο περιβάλλον. Τέλος, τοποθετήθηκε πίσω το καπάκι του δοχείου και εμβαπτίστηκε στο υγρό καουτσούκ δύο φορές, με περίπου ένα 24ωρο διαφορά (σχήμα 6.3.1.1). Παρ'ότι η κατασκευή αυτή παρουσίασε καλύτερη απόδοση, οι αιχμηρές γωνίες του μεταλλικού δοχείου οδήγησαν σε ασυνέχειες του καουτσούκ και, συνεπώς, σε αδυναμία επαρκούς αδιαβροχοποίησης.

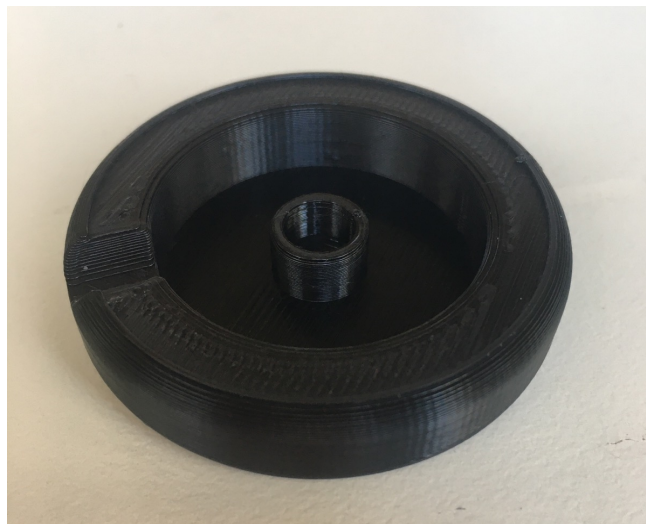
6.3.2 Σχεδίαση και κατασκευή περιβλήματος εκ νέου

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή ενός περιβλήματος με τη χρήση 3D printing, έχοντας ως στόχο την αντιμετώπιση των προβλημάτων της προηγούμενης κατασκευής, δηλαδή την αποφυγή ασυνέχειας του στεγανοποιητικού καουτσούκ και τη μεγάλη πολυπλοκότητα. Συνεπώς, σημαντική προσπάθεια καταβλήθηκε ώστε η νέα κατασκευή να πετυχαίνει τη μέγιστη απλότητα και την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων υλικών, για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους. Το τελικό σχέδιο αποτελείτο από ένα μικρό, κυλινδρικό περίβλημα, το οποίο θα προστατεύει την πιεζοηλεκτρική κάψα και ταυτόχρονα θα επιτρέπει την πλήρη στεγανοποίησή της. Τα κατασκευαστικά βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:



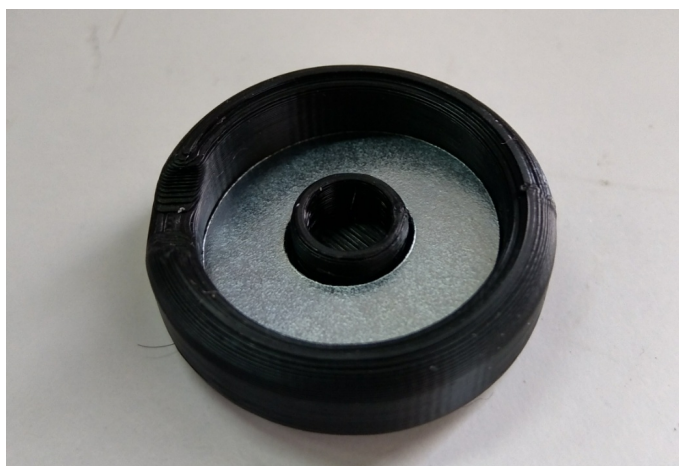
Σχήμα 6.3.1.1: Τα στάδια κατασκευής του υδροφώνου με περίβλημα μεταλλικού δοχείου: Άνοιγμα οπών, τοποθέτηση κάψας, βαριδίων και καλωδίων, σταθεροποίηση καλωδίων με χρήση κόλλας, γέμισμα του εσωτερικού με σιλικόνη, και εμφύσηση στο υγρό καουτσούκ.

1. Σχεδίαση και εκτύπωση του περιβλήματος (σχήμα 6.3.2.1).



Σχήμα 6.3.2.1: Το εκτυπωμένο περίβλημα από ρητίνη.

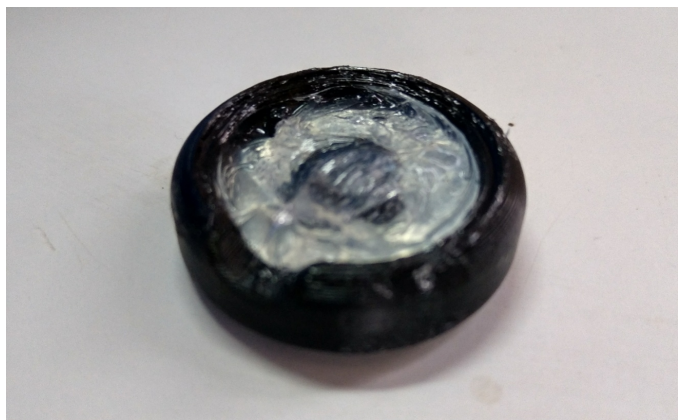
2. Τοποθέτηση μεταλλικών ροδέλων για την προσθήκη βάρους. Οι ροδέλες τοποθετούνται στο εσωτερικό τους, όπου εφαρμόζουν σε μια ειδική προεξοχή (σχήμα 6.3.2.2).



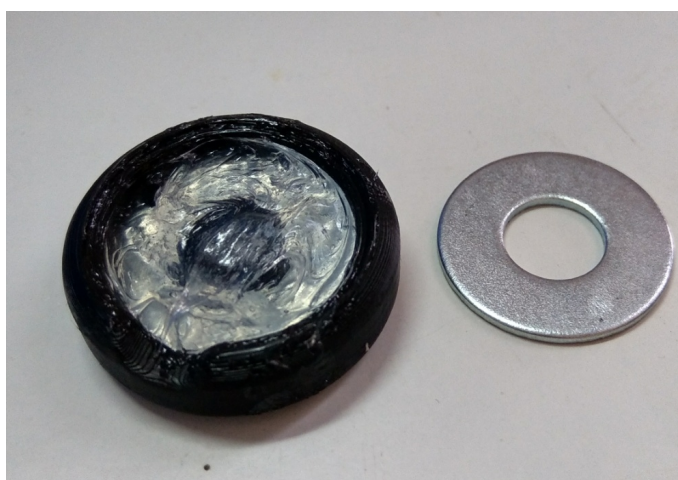
Σχήμα 6.3.2.2: Το περίβλημα μετά την τοποθέτηση ροδελών.

3. Γέμισμα του εναπομείναντος κενού με στεγανοποιητική σιλικόνη για βελτίωση της ακουστικής σύζευξης (σχήμα 6.3.2.3).

α)



β)



Σχήμα 6.3.2.3: α) Γέμισμα του περιβλήματος με σφραγιστική σιλικόνη β) Το γεμισμένο περίβλημα δίπλα σε μία ροδέλα.

4. Τοποθέτηση/Κόλληση της πιεζοηλεκτρικής κάψας. και προσθήκη επιπλέον στεγανοποιητικής σιλικόνης στην εγκοπή των καλωδίων (σχήμα 6.3.2.4).



Σχήμα 6.3.2.4: Η τοποθέτηση και κόλληση της πιεζοηλεκτρικής κάψας στο περίβλημα.

5. Εμβάπτιση της κατασκευής σε υγρό καουτσούκ δύο φορές, με τουλάχιστον ένα 24ωρο διαφορά (σχήματα 6.3.2.5 και 6.3.2.6).



Σχήμα 6.3.2.5: Η διαδικασία στερεοποίησης μετά την εμβάπτιση.



Σχήμα 6.3.2.6: Η στεγανοποιημένη κατασκευή μετά τη δοκιμή της αδιαβροχοποίησης.

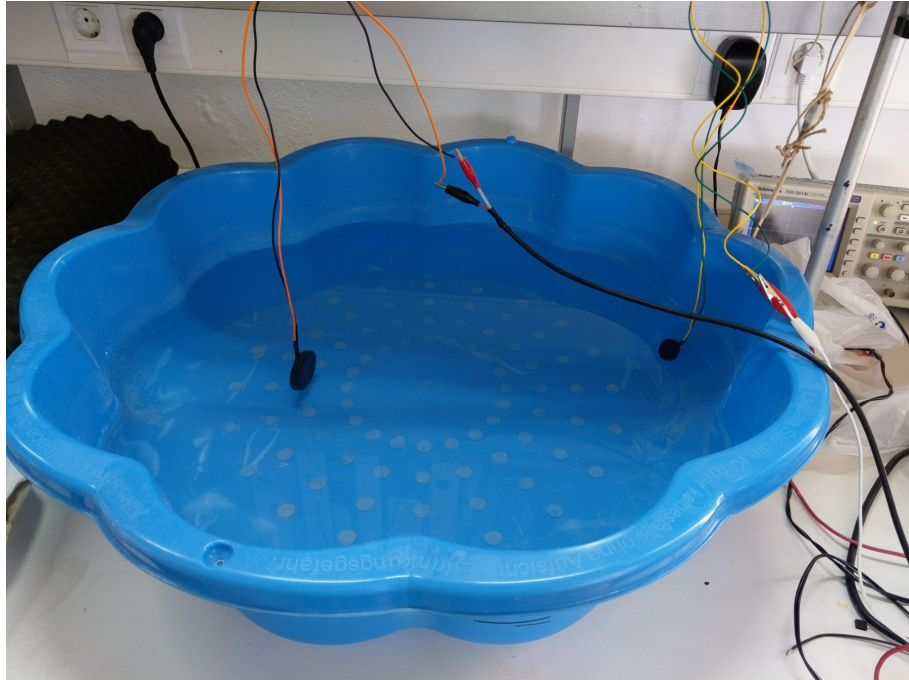
Αυτή η κατασκευή ήταν επιτυχημένη και χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος της εργασίας, στα πλαίσια της οποίας κατασκευάστηκαν τέτοια περιβλήματα για τα διαφορετικών μεγεθών πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.

6.4 Η πειραματική διάταξη

Το πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε μέσα από ένα σύνολο μετρήσεων, όπου δύο στεγανοποιημένα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα μέσα σε υδάτινο περιβάλλον, το ένα σε λειτουργία εκπομπής (ηχείο) και το άλλο σε λειτουργία λήψης (υδρόφωνο). Στη συνέχεια, θα περιγραφούν τα επιμέρους στοιχεία της διάταξης.

6.4.1 Η δεξαμενή/το σύστημα ανάρτησης

Για τις πειραματικές ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε μια κυκλική δεξαμενή διαμέτρου 64cm (σχήμα 6.4.1.1), μέσα στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα δύο υδρόφωνα. Ένα αυτοσχέδιο σύστημα ανάρτησης κρατούσε σε σταθερή θέση και απόσταση τα δύο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην ίδια ποσότητα νερού (24 λίτρα) με περιεκτικότητα 3% σε αλάτι.



Σχήμα 6.4.1.1: Η δεξαμενή και το σύστημα ανάρτησης.

6.4.2 Τα όργανα μέτρησης

1) Η γεννήτρια

Για την παραγωγή των ακουστικών σημάτων που κυμαίνονταν μεταξύ 1Hz και 200kHz, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο γεννήτριας κυματομορφών 33220A της εταιρίας Agilent, με όριο συχνότητας λειτουργίας τα 20MHz και τάσης τα 20Vpp (σχήμα 6.4.2.1).



Σχήμα 6.4.2.1: Η γεννήτρια παραγωγής σήματος.

2) Ο Παλμογράφος

Για τη μελέτη των λαμβανόμενων σημάτων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ψηφιακού παλμογράφου 4 καναλιών TDS 2014C της εταιρίας Tektronix (σχήμα 6.4.2.2). Η λειτουργία FFT (Fast Fourier Transform) που διαθέτει επιτρέπει τη μελέτη της ακουστικής απόκρισης του υδροφώνου για συγκεκριμένες συχνότητες.



Σχήμα 6.4.2.2: Ο παλμογράφος.

6.4.3 Το κύκλωμα ενίσχυσης

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι το ηλεκτρικό σήμα που στα άκρα του υδροφώνου είναι αρκετά εξασθενημένο, λόγω της χαμηλής απόδοσης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Επιπλέον, η ισοδύναμη αντίσταση του πιεζοηλεκτρικού είναι πολύ υψηλή, δημιουργώντας πρόβλημα σε ενδεχόμενη σύνδεσή του με χαμηλά φορτία. Για την αντιμετώπιση αυτών των δύο προβλημάτων, τοποθετήθηκε ένα κύκλωμα ενίσχυσης στην έξοδό του, με σκοπό την ενίσχυση του σήματος και την απομόνωση του κυκλώματος (buffer). Γι' αυτό το σκοπό δοκιμάστηκαν δύο κυκλώματα:

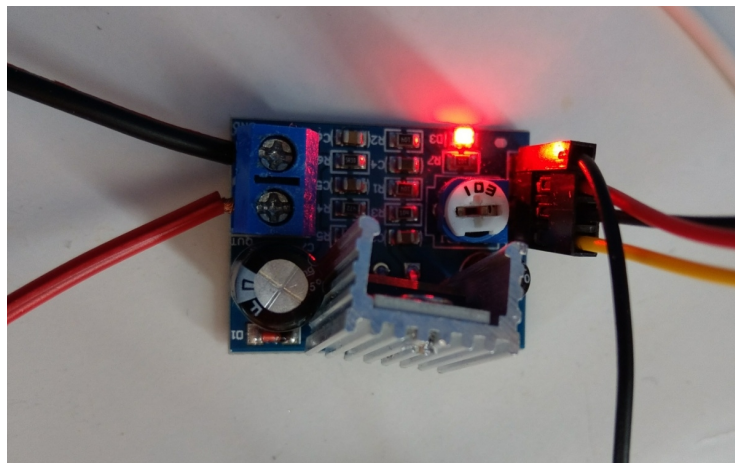
1. Το κύκλωμα MC401 της εταιρίας MXR (σχήματα 6.4.3.1 και 6.4.3.3), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στη γραμμική ενίσχυση σημάτων ηλεκτρικής κιθάρας. Τα πλεονεκτήματα αυτού του κυκλώματος είναι η στιβαρότητά του, του και το εύκολα ρυθμιζόμενο κέρδος, στο διάστημα από 0 έως 20dB.

2. Ένα κύκλωμα βασισμένο στον TDA2030 (σχήματα 6.4.3.2 και 6.4.3.4), έναν ολοκληρωμένο ενισχυτή ήχου. Τα πλεονεκτήματά του κυκλώματος αυτού είναι η απλότητα, το μεγάλο κέρδος και το χαμηλό κόστος.

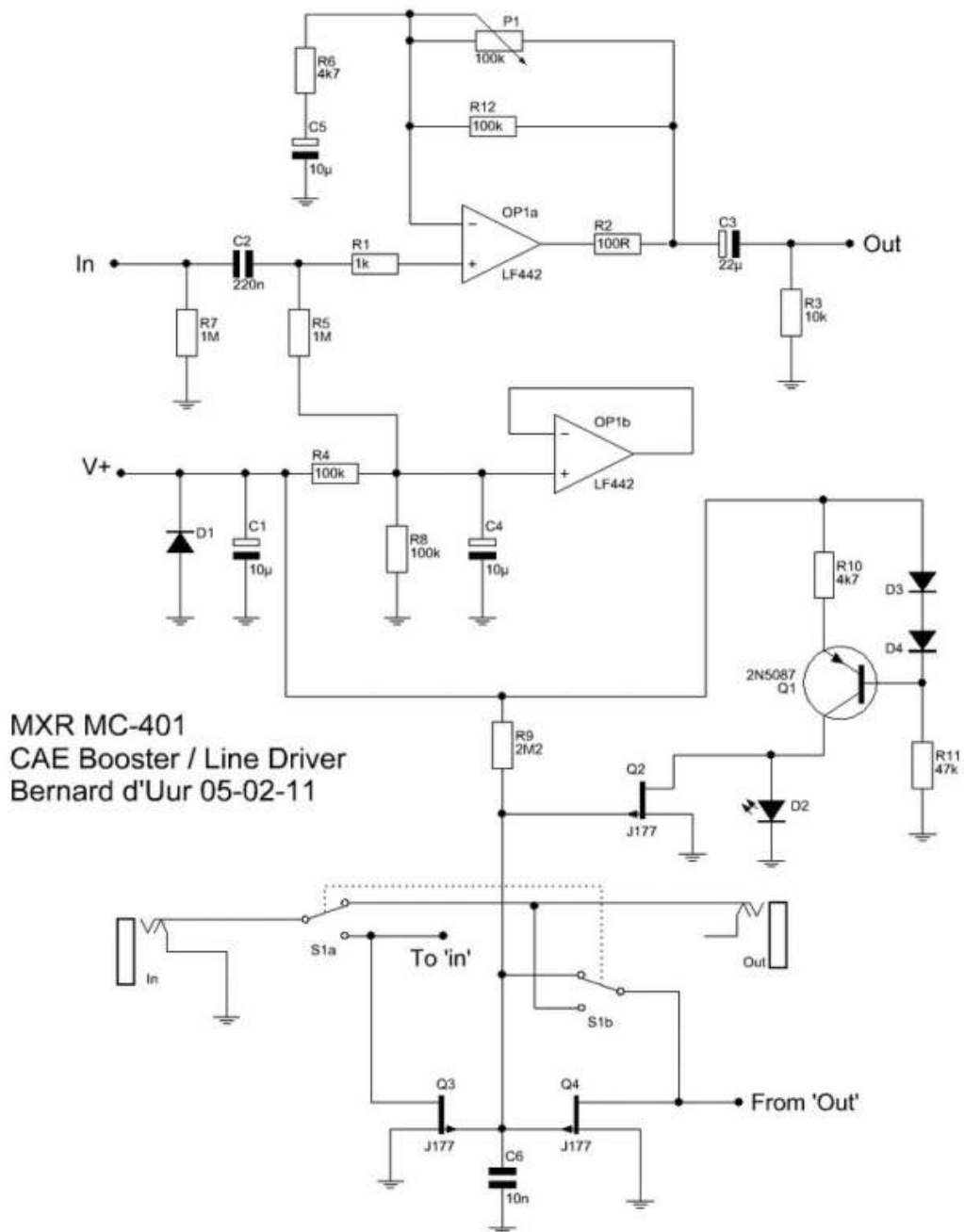
Τελικώς επιλέχθηκε το κύκλωμα MC401 για τις μετρήσεις, λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης του (σχήματα 6.4.3.5 και 6.4.3.6).



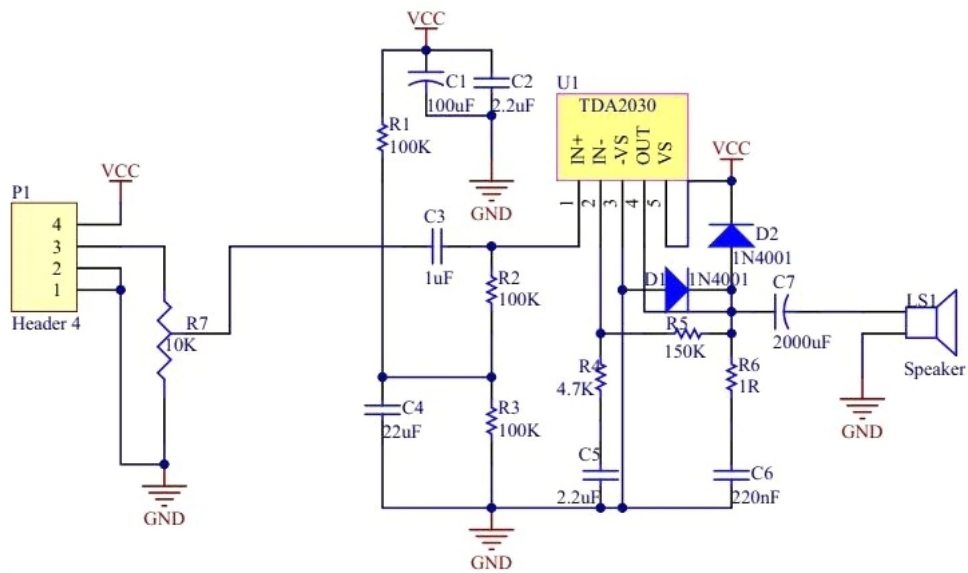
Σχήμα 6.4.3.1: Η συσκευασία του κυκλώματος MC401.



Σχήμα 6.4.3.2: Το κύκλωμα του ενισχυτή TDA2030.



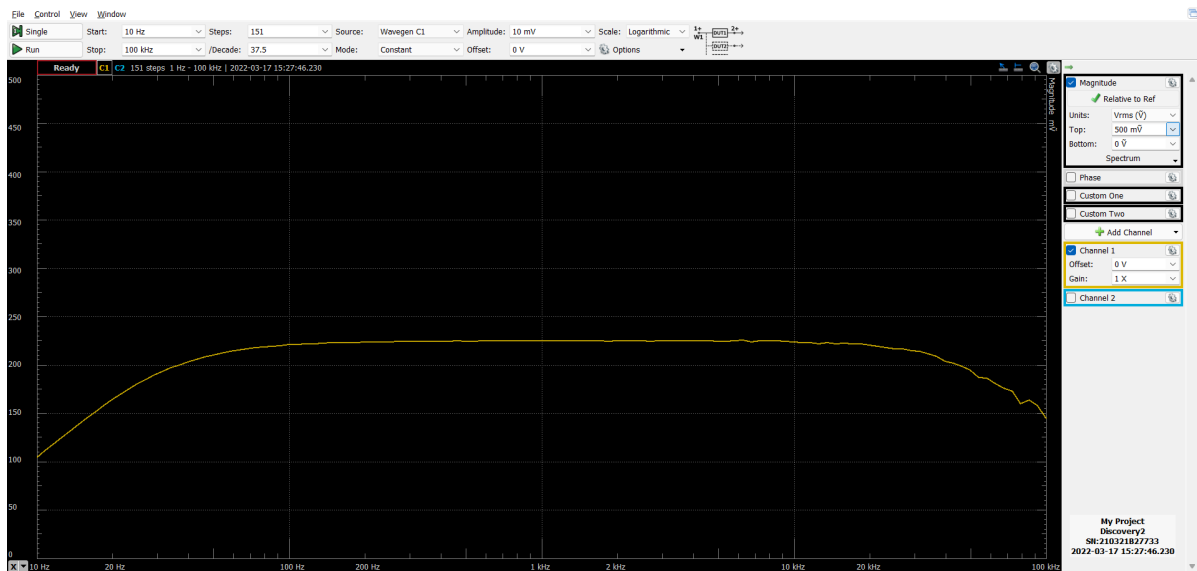
Σχήμα 6.4.3.3: Το διάγραμμα του κυκλώματος MC401 [64].



Σχήμα 6.4.3.4: Το διάγραμμα του κύκλωματος ενισχυτή TDA2030 [65].



Σχήμα 6.4.3.5: Η απόκριση του κυκλώματος MC401 στο εύρος 10Hz-20kHz.



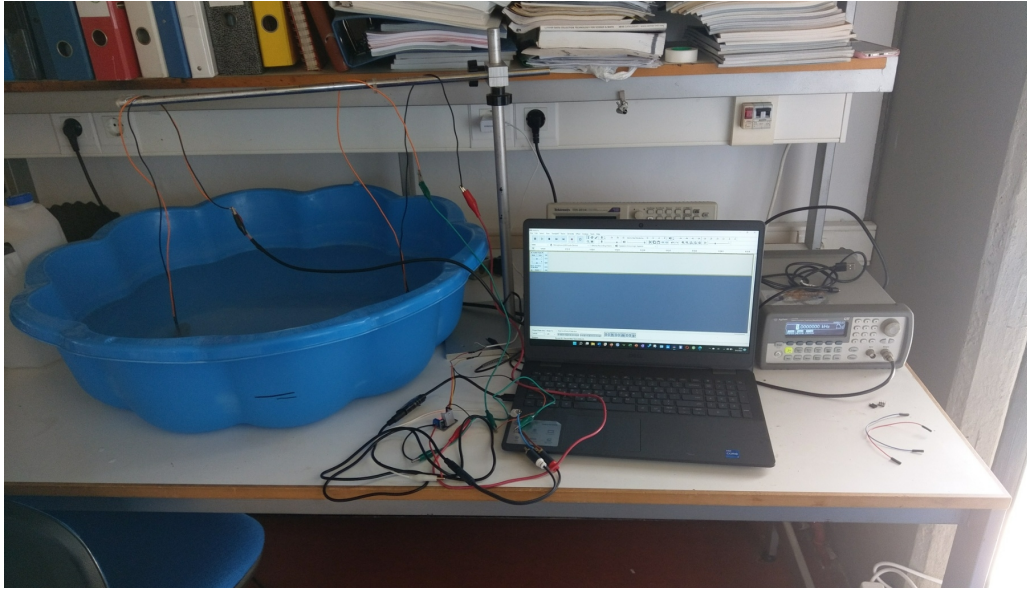
Σχήμα 6.4.3.6: Η απόκριση του κυκλώματος TDA2030 στο εύρος 10Hz-20kHz.

6.4.4 Καταγραφή σήματος σε σύστημα υπολογιστή

Η ψηφιοποίηση και η αποθήκευση του σήματος είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επεξεργασία, τη μελέτη των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε μια πρώτη προσπάθεια για την καταγραφή του σήματος εξόδου του υδροφώνου σε σύστημα υπολογιστή μέσω μιας κάρτας ήχου jack-to-USB (σχήμα 6.4.4.1), που μετατρέπει το αναλογικό σήμα της εξόδου του υδροφώνου σε ψηφιακό. Η καταγραφή του σήματος έγινε με το ανοιχτού λογισμικού πρόγραμμα επεξεργασίας ήχου Audacity (σχήμα 6.4.4.2).



Σχήμα 6.4.4.1: Η κάρτα ήχου.



Σχήμα 6.4.4.2: Η διάταξη καταγραφής του σήματος σε υπολογιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το 7ο κεφάλαιο της εργασίας αφορά στο πειραματικό μέρος της και, συγκεκριμένα, στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση της πειραματικής διάταξης και τα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτές, καθώς και μελλοντικούς στόχους.

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ως εξής: Δύο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, τοποθετημένα στη δεξαμενή, συνδέονται με τη γεννήτρια και με τον παλμογράφο (μέσω του κυκλώματος ενίσχυσης). Το συνδεδεμένο με τη γεννήτρια στοιχείο χρησιμοποιείται ως εκπομπέας ημιτονοειδών ακουστικών σημάτων μεταβλητής συχνότητας, ενώ το συνδεδεμένο με την παλμογράφο ως δέκτης (υδρόφωνο) αυτών. Με την καταγραφή των αποτελεσμάτων παράγεται ένα διάγραμμα απόκρισης συχνότητας, ιδιαίτερα σημαντικό για την εκτίμηση της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων ως υδρόφωνα.

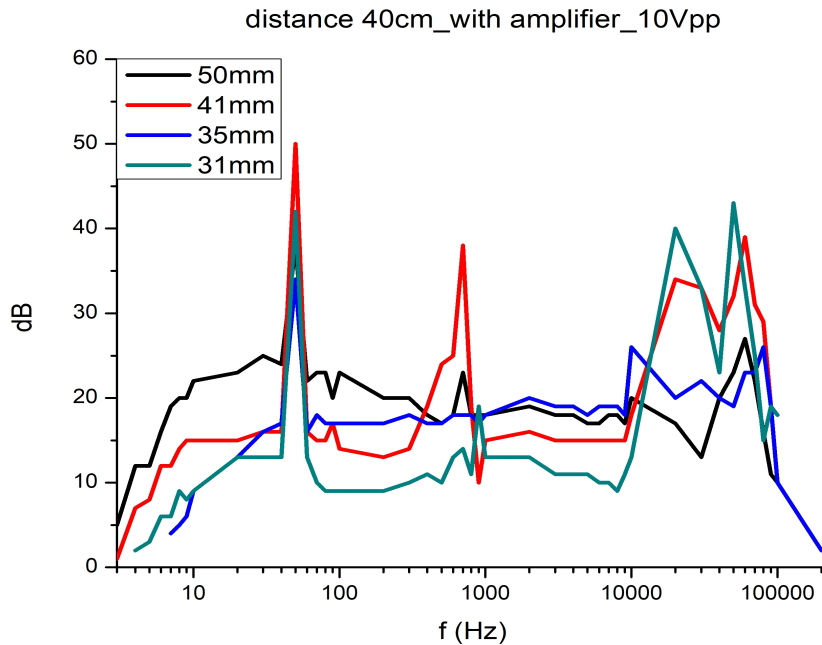
7.1 Πειραματικές παράμετροι των μετρήσεων

Στα πλαίσια της εργασίας, παράχθηκαν διαγράμματα απόκρισης συχνότητας στο εύρος 1Hz - 200kHz (με βηματικές μετρήσεις σε λογαριθμική κλίμακα), με τις εξής παραμέτρους:

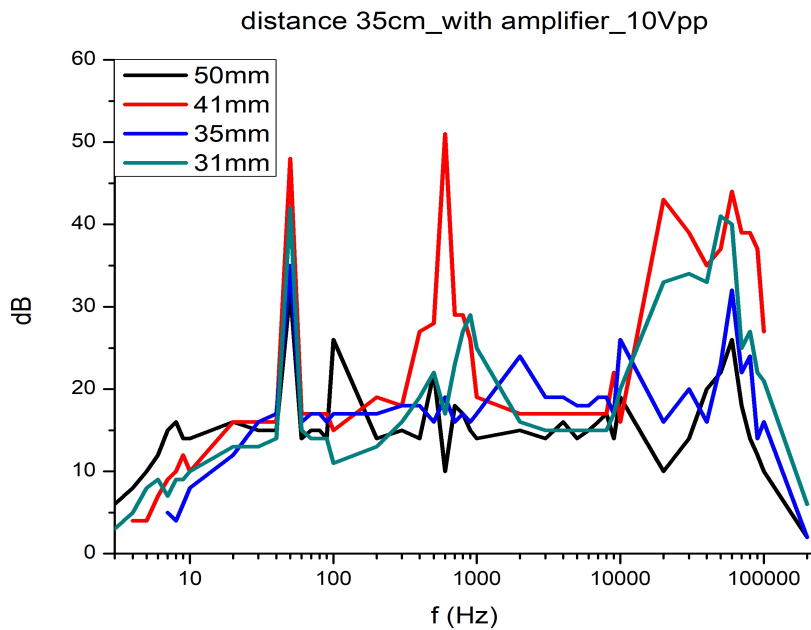
1. Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων: Όπως αναφέρθηκε, για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικές κάψες με διαμέτρους 50, 41, 35 και 31mm. Για κάθε διάσταση κατασκευάστηκε ένα υδρόφωνο και από μια κάψα των 50mm κατασκευάστηκε ένα δεύτερο, το οποίο λειτούργησε ως εκπομπός (ηχείο) για την παραγωγή των διαγραμμάτων απόκρισης συχνότητας.
2. Απόσταση εκπομπού-δέκτη: Για τη μελέτη της επίδρασης της απόστασης στα διαγράμματα απόκρισης, το κάθε ζευγάρι πιεζοηλεκτρικών τοποθετήθηκε σε απόσταση από 40 έως 5cm, με βήματα των 5cm και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για κάθε απόσταση.
3. Πλάτος σήματος γεννήτριας: Δύο πανομοιότυπα σετ μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικά πλάτη σήματος εισόδου από τη γεννήτρια, στα 10 και 20V_{pp} αντίστοιχα.

7.2 Διαγράμματα απόκρισης συχνοτήτων

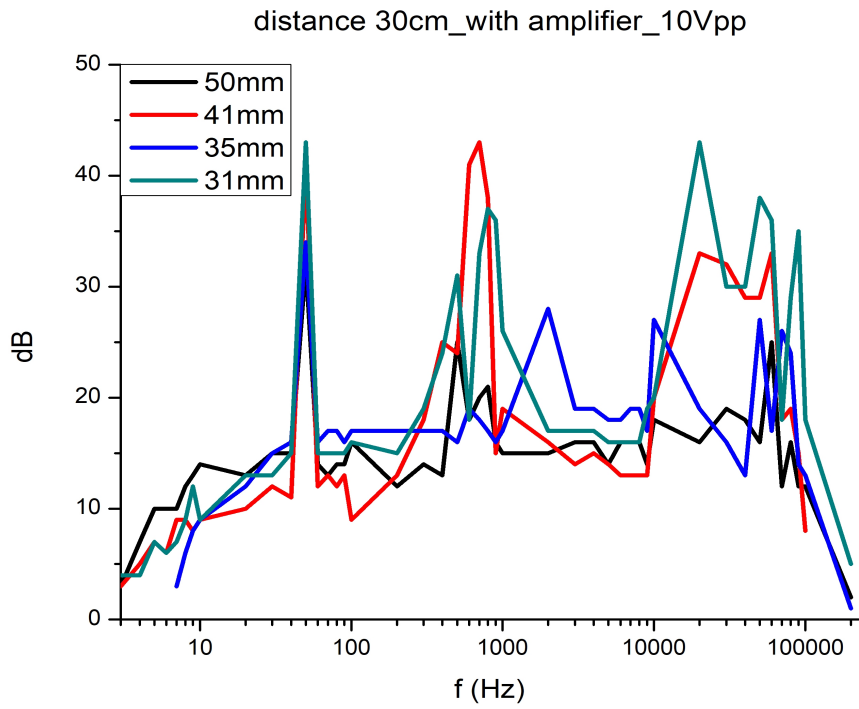
Στη συνέχεια παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων, όπου σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται η συχνοτική απόκριση για κάθε μέγεθος κάψας και συγκεκριμένη απόσταση, σε κλίμακα dB (με τιμή αναφοράς το 1μV). Για πλάτος σήματος εισόδου 10Vpp:



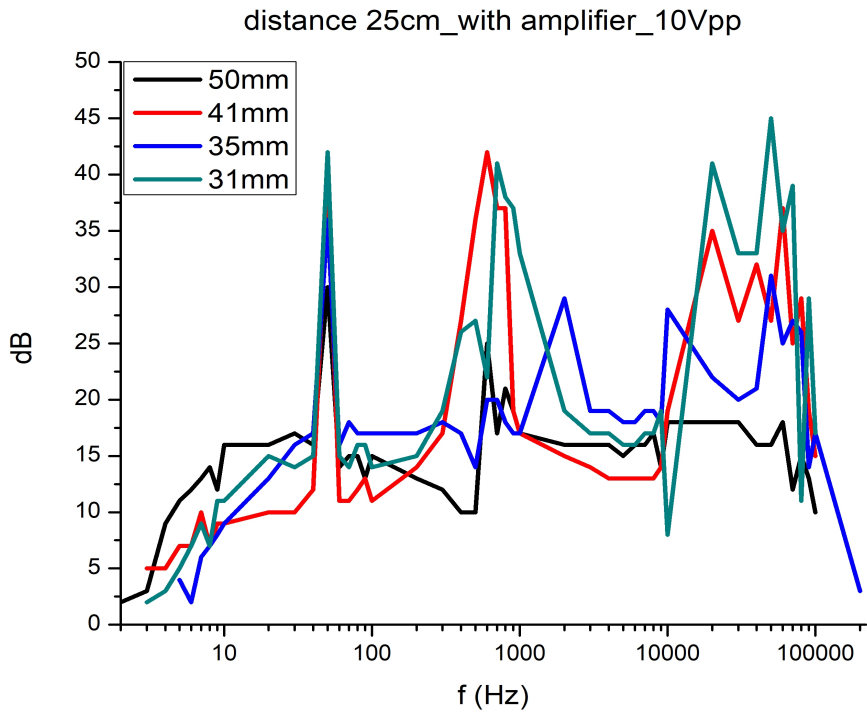
Σχήμα 7.2.1: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 40cm στα 10Vpp.



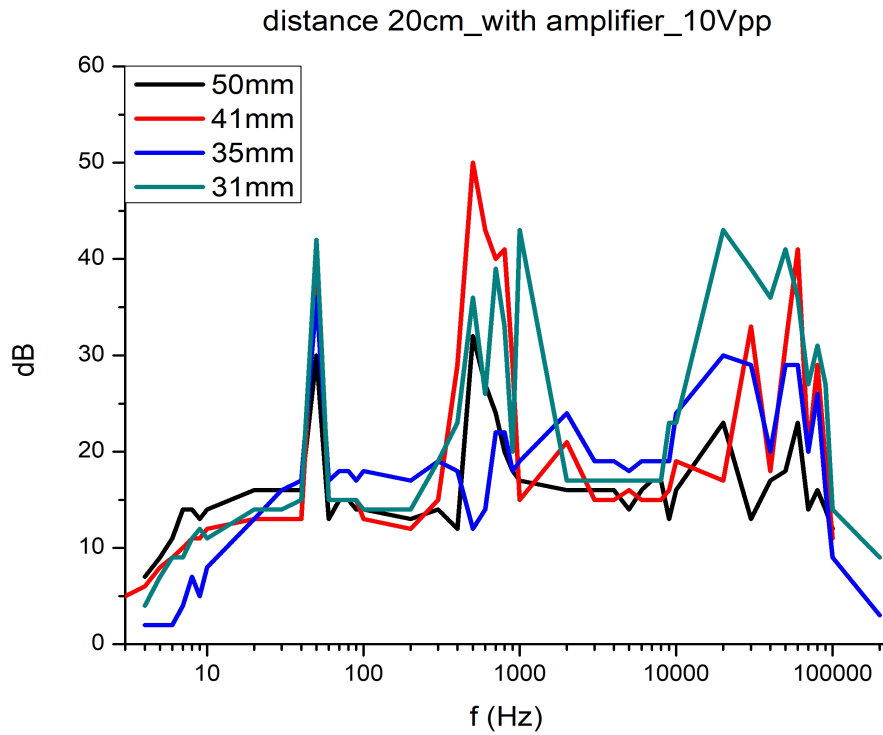
Σχήμα 7.2.2: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 35cm στα 10Vpp.



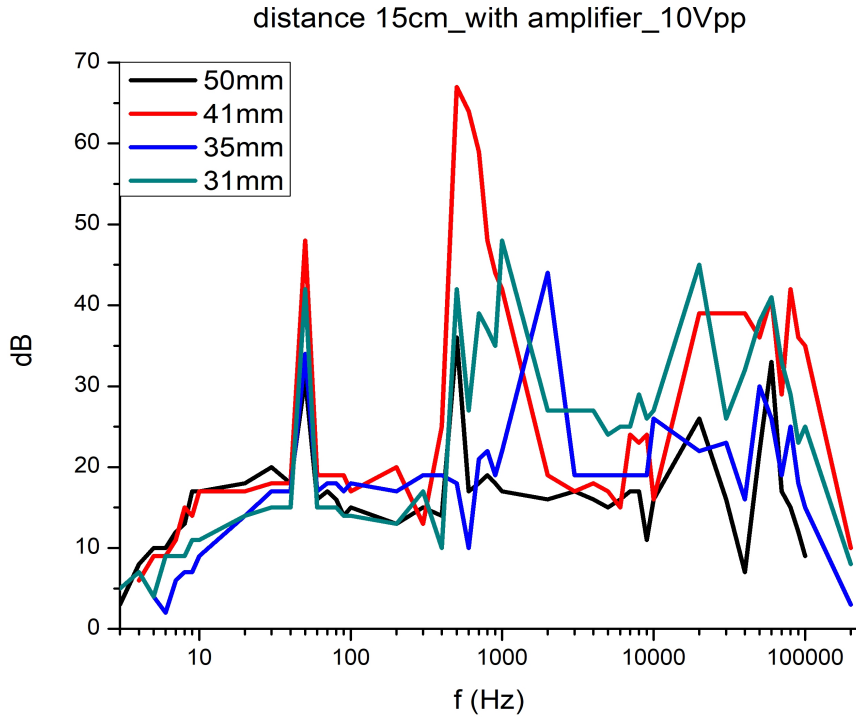
Σχήμα 7.2.3: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 30cm στα 10Vpp.



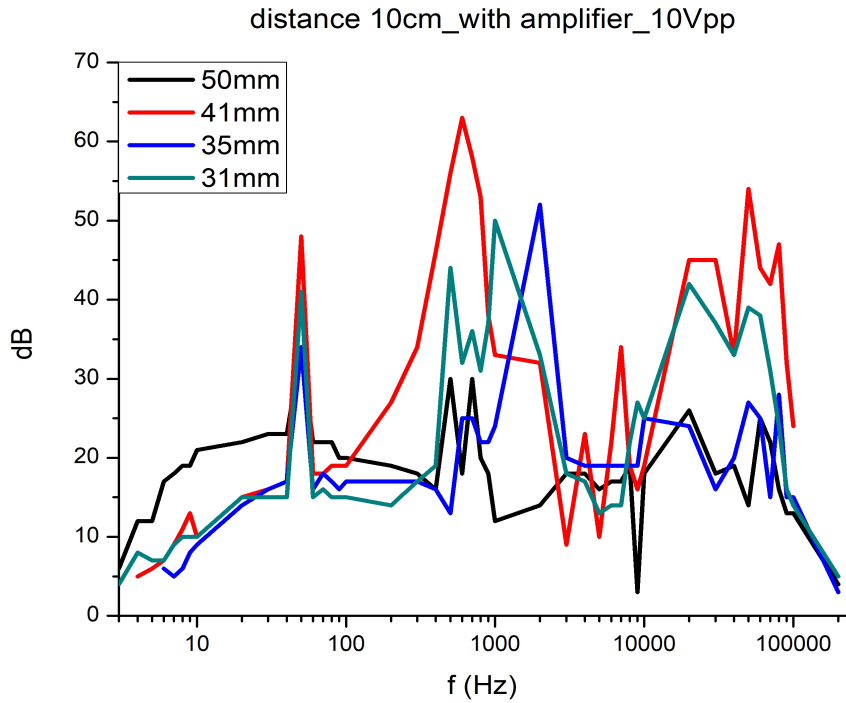
Σχήμα 7.2.4: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 25cm στα 10Vpp.



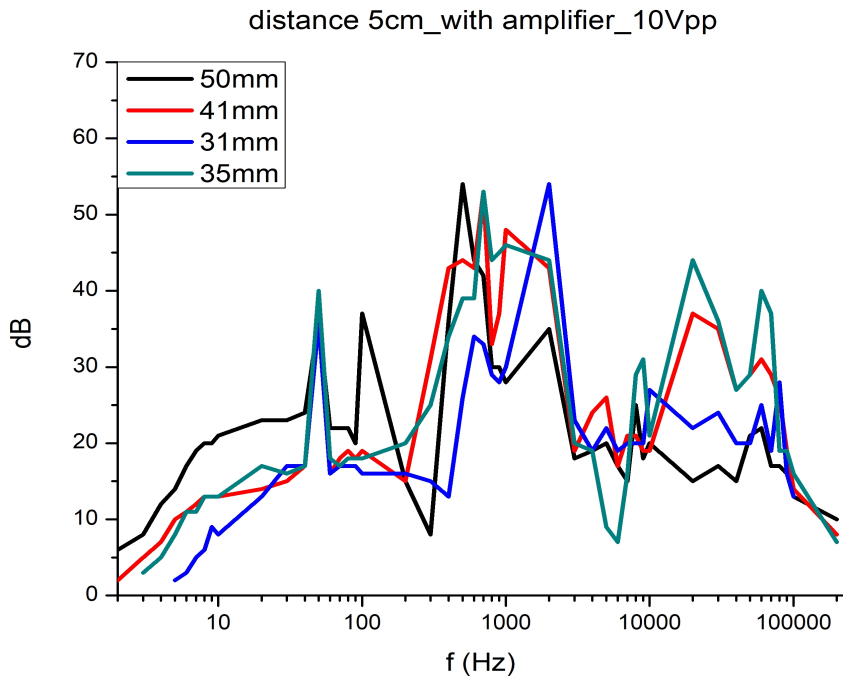
Σχήμα 7.2.5: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 20cm στα 10Vpp.



Σχήμα 7.2.6: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 15cm στα 10Vpp.

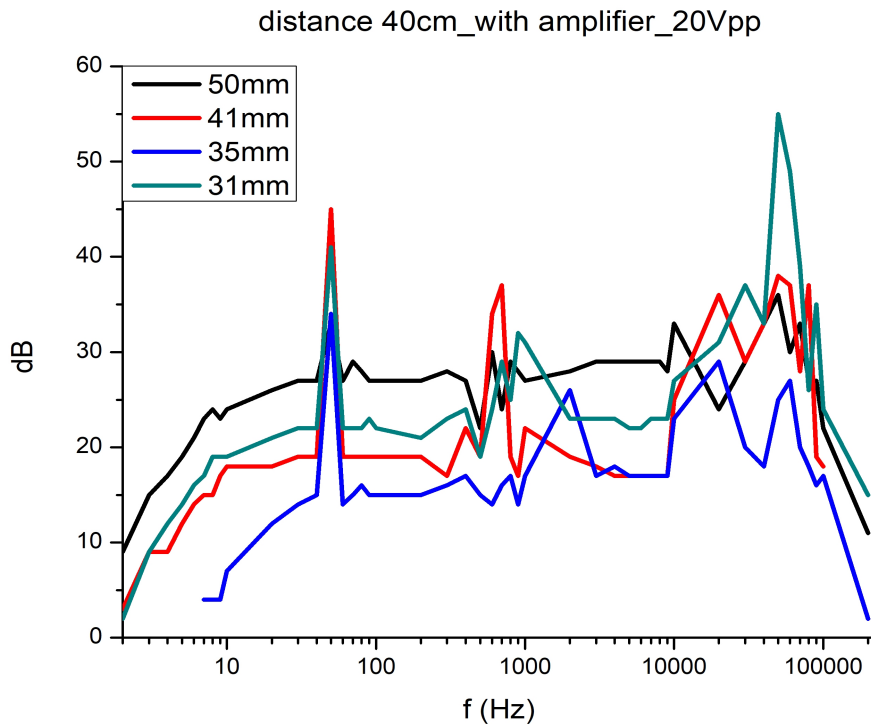


Σχήμα 7.2.7: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 10cm στα 10Vpp.

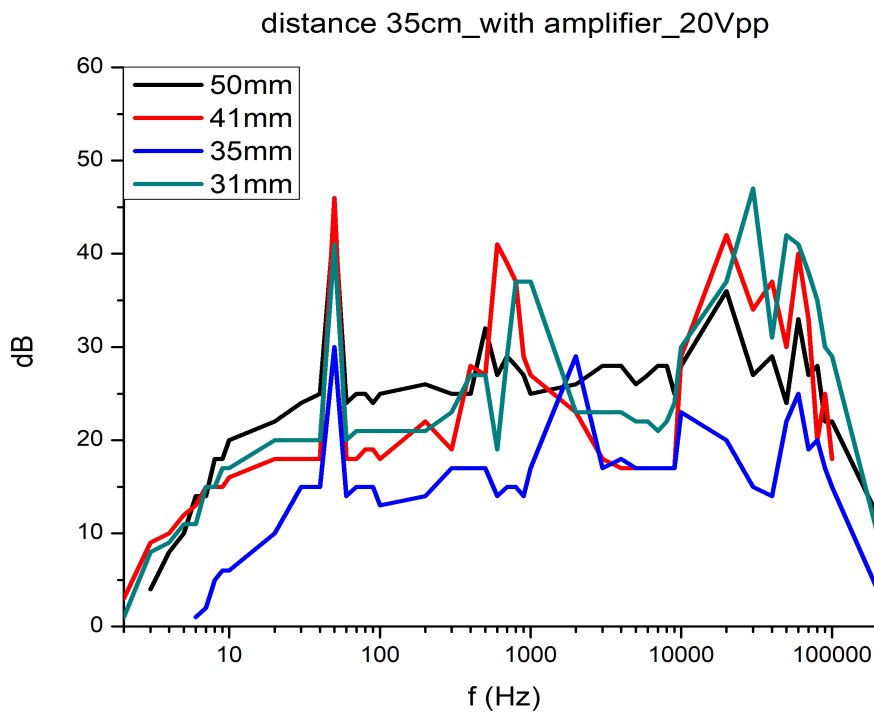


Σχήμα 7.2.8: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 5cm στα 10Vpp.

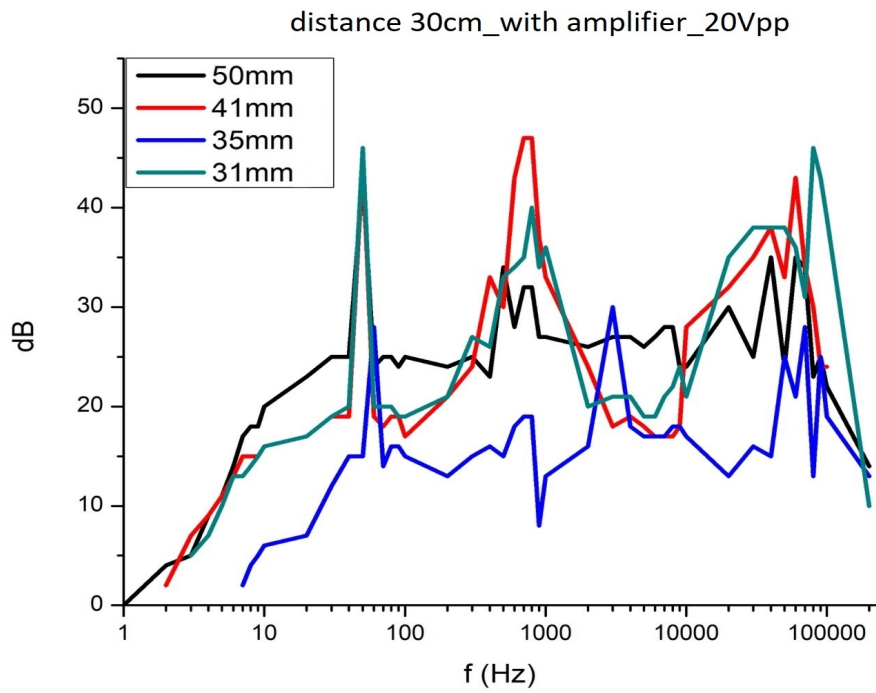
Για 20Vpp:



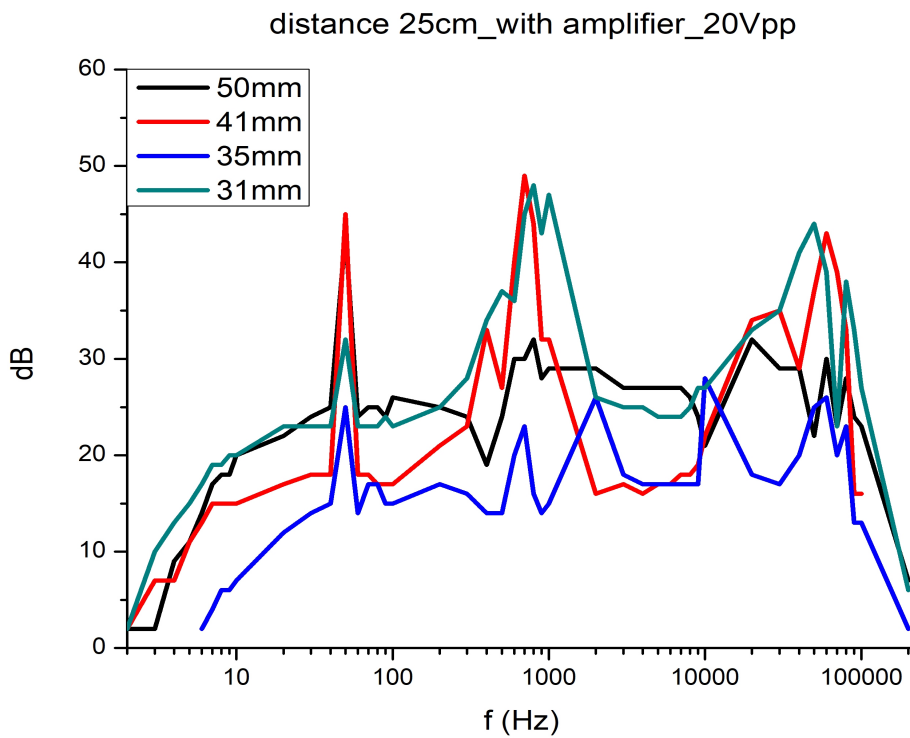
Σχήμα 7.2.9: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 40cm στα 20Vpp.



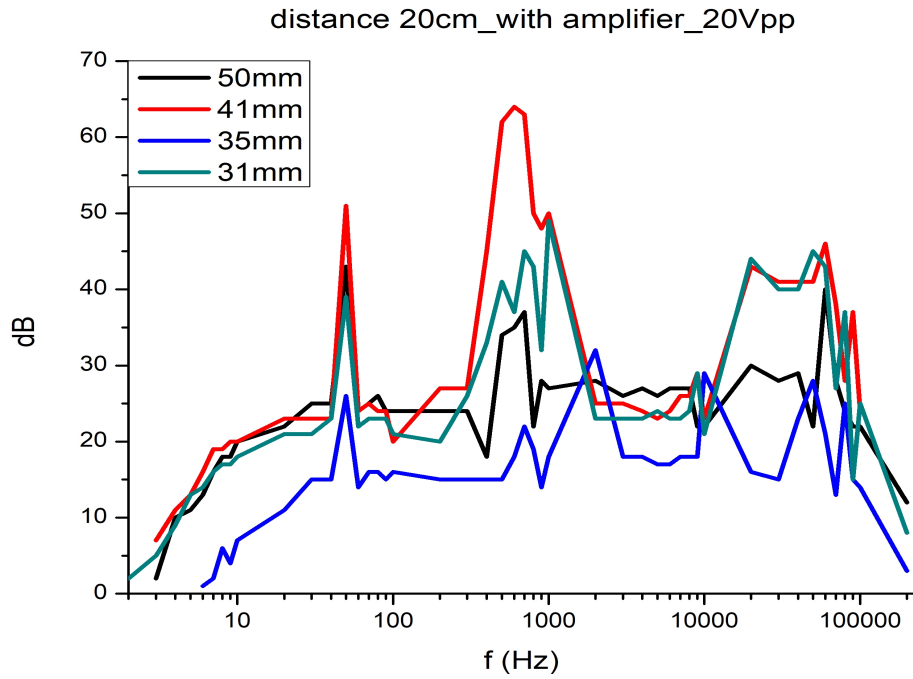
Σχήμα 7.2.10: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 35cm στα 20Vpp.



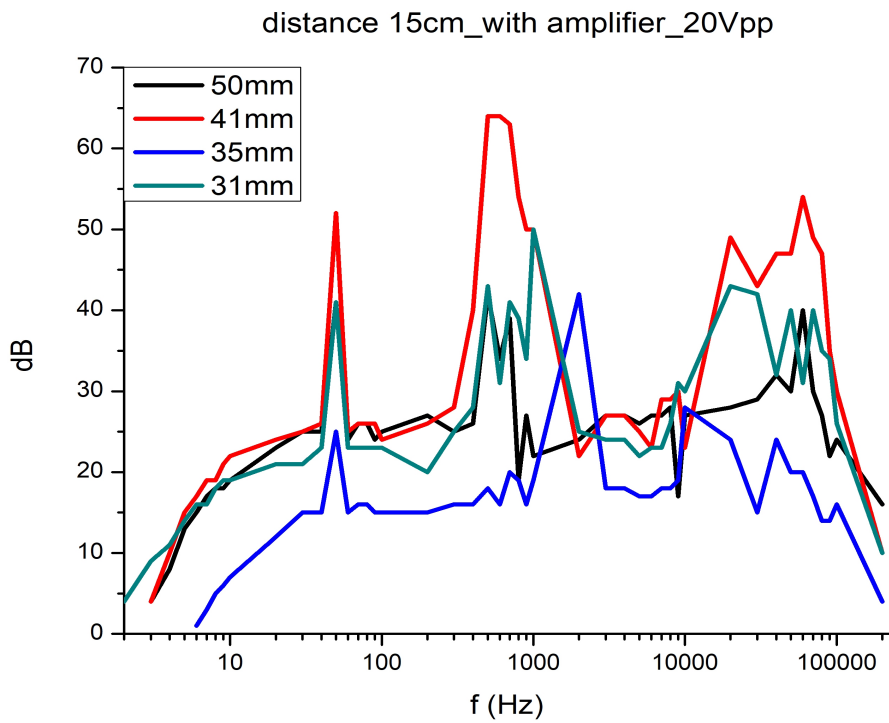
Σχήμα 7.2.11: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 30cm στα 20Vpp.



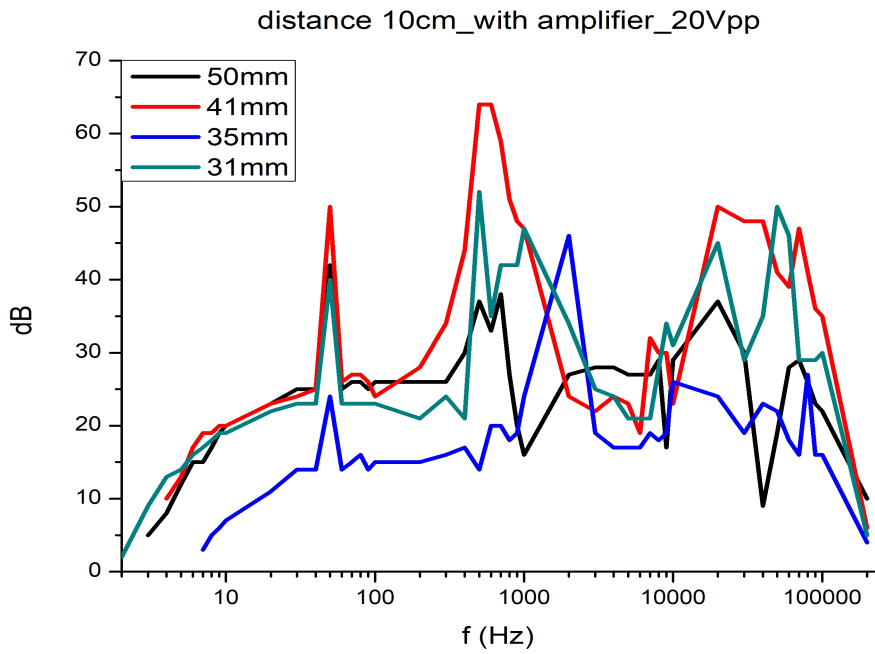
Σχήμα 7.2.12: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 25cm στα 20Vpp.



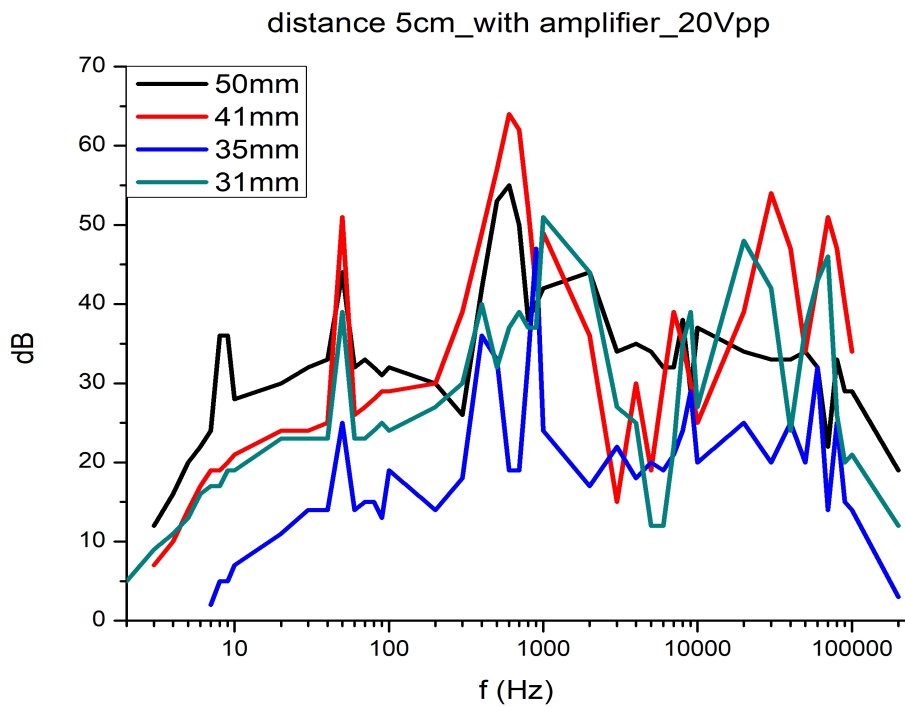
Σχήμα 7.2.13: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 20cm στα 20Vpp.



Σχήμα 7.2.14: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 15cm στα 20Vpp.



Σχήμα 7.2.15: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 10cm στα 20Vpp.



Σχήμα 7.2.16: Το διάγραμμα απόκρισης για απόσταση 5cm στα 20Vpp.

7.3 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή υδροφώνων στη βάση μιας πιεζοηλεκτρικής κάψας και η μελέτη της ακουστικής του απόκρισης εντός μίας δεξαμενής.

Από τα άνωθι διαγράμματα συμπεραίνεται, πως η απόσταση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων δεν επηρεάζει γραμμικά το πλάτος της απόκρισης, όπως θα ήταν αναμενόμενο, ούτε φαίνεται η αυξομείωσή της να έχει αντίστοιχα αποτελέσματα σε αυτό. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι το γεγονός ότι οι μετρήσεις δεν γίνονται σε συνθήκες προσεγγιστικά ελεύθερου πεδίου, αλλά σε συνθήκες πολλαπλών ανακλάσεων, που δημιουργούνται από τα τοιχώματα της μικρών, σχετικά, διαστάσεων δεξαμενής. Έτσι, η υπέρθεση των ανακλάσεων δημιουργεί ένα περιβάλλον στάσιμων κυμάτων. Ως αποτέλεσμα αυτού, η μεταβολή της απόστασης επηρεάζει την απόκριση μόνο ως προς το γεγονός ότι η μετατόπιση των στοιχείων αλλάζει τη θέση τους σε σχέση με τα σημεία δεσμού/κοιλίας των στάσιμων κυμάτων.

Κάτι ακόμα που είναι άξιο παρατήρησης είναι ότι, μεταξύ των διεγέρσεων 10 και 20Vpp παρουσιάζεται στα διαγράμματα, σε γενικές γραμμές, μια διαφορά της τάξεως των 5-10 dB. Αποκλίσεις από την αύξηση των 6dB που θα περιμέναμε πιθανώς οφείλονται σε μη-γραμμικότητες του πιεζοηλεκτρικού υλικού και σε διαφοροποιήσεις που έχουν να κάνουν με τη θέση του υδροφώνου και της πηγής.

Επίσης, στη συχνότητα των 50Hz παρατηρείται, πανομοιότυπα σε όλα τα διαγράμματα μια ισχυρή κορυφή, της τάξεως των 50dB, η οποία οφείλεται σε ηλεκτρική παρεμβολή της εναλλασσόμενης παροχής ρεύματος. Αξίζει να σημειωθεί πως οι πιεζοηλεκτρικές κάψες διαμέτρου 50 και 41mm φαίνεται να εμφανίζουν συντονισμό στις συχνότητες 800-1000Hz, ενώ οι διαμέτρου 35 και 31mm στις συχνότητες 1000-3000Hz. Παρουσιάζουν, δηλαδή, μια απόκλιση προς τα κάτω από τις θεωρητικές τιμές τους. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο μη ιδανικό ανακλαστικό περιβάλλον της διάταξης, το οποίο διαθέτει τις δικές του συχνότητες συντονισμού και πιθανώς να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ένας ακόμα συντονισμός παρατηρείται σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες, μεταξύ 70-100kHz, και στη συνέχεια η απόκριση μειώνεται απότομα, όπως ήταν και θεωρητικά αναμενόμενο. Οι επιπλέον συντονισμοί και αντισυντονισμοί που παρατηρούνται μπορεί, και πάλι, να οφείλονται στο μη ιδανικό περιβάλλον. Το φαινόμενο

αυτό, παρατηρείται σε όλα τα δείγματα, ανεξαρτήτως διαστάσεων των αισθητηρίων υλικών και των ηλεκτροακουστικών τους ιδιοτήτων. Επιπροσθέτως, παρατηρείται πως η πιεζοηλεκτρική κάψα διαμέτρου 50mm παρουσιάζει μία πιο γραμμική συμπεριφορά συγκριτικά με τις κάψες μικρότερων διαμέτρων όσον αφορά τη συχνοτική της απόκριση, με εξαίρεση τις πολύ κοντινές αποστάσεις, γεγονός που ήταν αναμενόμενο βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

Αναλύοντας τα δεδομένα που προέκυψαν από τις τεχνικές χαρακτηρισμού SEM και XRD επιβεβαιώνεται η κρυσταλλική δομή του πιεζοηλεκτρικού υλικού και ταυτοποιείται σε συγκεκριμένο κράμα PZT.

Τέλος, η μέθοδος εμβάπτισης των κατασκευαζόμενων υδροφώνων σε υγρό καουτσούκ αποτελεί την πλέον αποτελεσματική μέθοδο χαμηλής πολυπλοκότητας για αδιαβροχοποίηση. Η απλότητά της την καθιστά, επίσης, εύκολα χρησιμοποιήσιμη σε πληθώρα παραλλαγών και διαφορετικών κατασκευών.

7.4 Μελλοντική έρευνα

Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε στα πλαίσια μελλοντικής έρευνας η πλήρης αντικατάσταση της τροφοδοσίας των ηλεκτρονικών οργάνων και των ενισχυτών με συνεχές ρεύμα μπαταρίας και η απομάκρυνση από περιβάλλον ηλεκτρικού δικτύου, με στόχο την εξομάλυνση του ακουστικού σήματος και τη δυνατότητα λήψης συχνότητας των 50Hz χωρίς την παρουσία παρεμβολών. Εναλλακτικά, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές επεξεργασίας σήματος (π.χ. μετασχηματισμός κυματιδίων) και μηχανικής μάθησης (π.χ. αλγόριθμος LMS) για το φιλτράρισμα και την αφαίρεση των ανεπιθύμητων παρεμβολών.

Επίσης, θα μπορούσαν να λάβουν χώρα πειραματικές δοκιμές με διαφορετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως BaTiO_3 , ή BST(BaTiO_3 ενισχυμένο με Sr) για ενδεχόμενη βελτίωση των ηλεκτροακουστικών ιδιοτήτων και της απόκρισης τους.

Επιπροσθέτως, χρήσιμη θα ήταν η κατασκευή και η αξιοποίηση πιο ειδικών ενισχυτικών κυκλωμάτων, η οποία θα βοηθούσε στην ενίσχυση του σήματος και τη μείωση του θορύβου. Η εφαρμογή τεχνικών προσέγγισης ελεύθερου πεδίου, επίσης, θα προσδώσει στη διαδικασία διακρίβωσης σημαντική αξιοπιστία. Τέλος, η κατασκευή μετατροπέα A/D και ο προγραμματισμός μικροελεγκτή για την ψηφιοποίηση, την

αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων σε υπολογιστικό σύστημα, θα καθιστούσαν πιο εύκολη τη χρήση τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hydro International, "Technology in Focus: Underwater Electromagnetic Propagation", <https://www.hydro-international.com/content/article/underwater-electromagnetic-propagation>
- [2] W. Van der Kloot, *Great Scientists wage the Great War*, Stroud: Fonthill, 2014.
- [3] G. Lippmann, "Principe de conservation de l'électricité". *Ann. Chim. Phys.* vol. 24 no. 5, pp. 145–178, 1881.
- [4] L.Bjørnø and M.J. Buckingham, "General Characteristics of the Underwater Environment," in *Applied Underwater Acoustics*, T. H. Neighbors and D. Bradley, Eds., Elsevier, 2017, pp. 1-84.
- [5] History and Art Collection / Alamy
- [6] M. Lasky, "Review of Undersea Acoustics to 1950," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 61, no. 2, pp. 283-297, 1977.
- [7] J. L. Butler and C. H. Sherman, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Springer-Verlang, 2007.
- [8] C.A. Randall, R.E. Newnham and L.E. Cross, "History of the First Ferroelectric Oxide, BaTiO₃".
- [9] A. Von Hippel, R. G. Breckenridge, F. G. Chesley and L. Tisza, "High dielectric constant ceramics," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 38, no. 11, pp. 1097–1109, 1946.
- [10] R. B. Gray, "Transducer and Method of Making the Same," U.S. patent 72,486,560, 1st Nov., 1949.
- [11] B. Iaffe, R. S. Roth and S. Marzullo, "Properties of Piezoelectric Ceramics in the Solid-Solution Series Lead Titanate-Lead Zirconate-Lead Oxide: Tin Oxide and Lead Titanate-Lead Hafnate 1", *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 55, no. 5, pp. 239-254, November 1955.
- [12] SUBPAC, "Origins of SOSUS", <https://www.csp.navy.mil/cus/About-IUSS/Origins-of-SOSUS/>
- [13] G. Tyler Jr., "The Emergence of Low-frequency Active Acoustics as a Critical Antisubmarine Warfare Technology", *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 13, no. 1, pp. 145-159, 1992.

- [14] DOSITS, "Acoustic Modem", <https://dosits.org/galleries/technology-gallery/communications-technology/acoustic-modem/>
- [15] DOSITS, "Archival Marine Acoustic Recording Units (ARUs)", <https://dosits.org/galleries/technology-gallery/observing-and-monitoring-marine-animals/archival-marine-acoustic-recording-units-arus/>
- [16] IUSS-CAESAR Alumni Association, <https://www.iusscaa.org>
- [17] Peter Ellis / CC-BY-SA-3.0
- [18] Denise Risch, NEFSC/NOAA
- [19] H. F. Olson and F. Massa, *Applied Acoustics*, 2nd. Ed., York: P. Blackiston's Son & Co., 1939.
- [20] R. J. Bobber, *Electroacoustic Measurements*, Naval Research Laboratory, 1970.
- [21] O. B. Wilson, *An Introduction to the Theory and Design of Sonar Transducers*, Naval Sea Systems Command, 1985.
- [22] F. V. Hunt, *Electroacoustics; the analysis of transduction, and its historical background*, Cambridge: Harvard University Press, 1954.
- [23] U. Marschner, G. Pfeifer and E. Starke, "Reciprocity of linear systems with smart materials utilized for precise measurement techniques," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.vol. 27, no. 14, p. 1989-2000, 2016.
- [24] W. P. Mason, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, New York: D. Van Nostrand Company, 1942.
- [25] S. O. Kasap, *Principles of Electronic Materials and Devices*, 4th. Ed., New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [26] H. Föll, "Electronic Materials. Piezo Electricity and Related Effects", October 2019, https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_3/backbone/r3_6_1.html
- [27] H. Saheban and Z. Kordrostami, "Hydrophones, fundamental features, design considerations, and various structures: A review," Elsevier, 2021.
- [28] J. Blauert and N. Xiang, *Acoustics for Engineers: Troy Lectures*, 3rd. Ed., Berlin:Springer-Verlag, 2021.
- [29] K. Χρήστος, "Διατάξεις Αισθητήρων Θέσης Βασισμένες σε Μαγνητοσυστολικές Γραμμές Καθυστέρησης," 2018.

- [30] J. R. Kauke, "Magnetostriction Hydrophone", US Patent 2,484,036, <https://patents.google.com/patent/US2484036A/en>. 11 Oct., 1949.
- [31] Jean-Paul Marage and Y. Mori, *Sonar and Underwater Acoustics*, John Wiley & Sons, 2010.
- [32] L. E. Kinsler, A. R. Fey, I. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 4th Ed., John Wiley & Sons, 2000.
- [33] Γ. Σάγος, *Εισαγωγή στην Υδροακουστική και στην Τεχνολογία Σόναρ*, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2019.
- [34] Ν. Μότση, "Ανάπτυξη Λεπτών Υμενίων Μικτών Συστημάτων Χαλκογενών του Καδμίου και του Ψευδαργύρου," 2019.
- [35] Στεργιούδης, Γ. Βραδής, Α. "Προσδιορισμός Κρυσταλλικής Δομής με τη Μέθοδο Σκεδασης Ακτινών Χ (XRD, X rays diffraction)".
- [36] T. Taguchi, R. Matsuo, T. Mitsunaga, C. Broennimann and E. F. Eikenberry, . "Novel pixel detector for in-house XRD applications," *Acta Crystallographica Section A, Foundations of Crystallography*, vol. 21, no. 2, pp. 97-101, 2006.
- [37] Encyclopædia Britannica, Inc., <https://www.britannica.com/technology/scanning-electron-microscope#/media/1/526571/110970>
- [38] R. F. W. Coates, *Underwater Acoustic Systems*, Mcmillan Publishers, 1990.
- [39] Adrienne Spychalski, High Tech, Inc., <http://hightechincusa.com/>.
- [40] https://www.bhphotovideo.com/c/product/759598-REG/Ambient_Recording_TC4042_TC4042_Low_Noise_Spherical_Hydrophone.html
- [41] S. Pyo, M. S. Afzal, Y. Lim, S. Lee and Y. Roh, "Design of a Wideband Tonpizl Transducer Comprising Non-Uniform Piezoceramic Stacks with Equivalent Circuits," *Sensors*, 2021.
- [42] J. Kim and Y. Roh, "Modeling and Design of a Rear-Mounted Underwater Projector Using Equivalent Circuits," *Sensors*, 2020.
- [43] Active Signal Technologies, Inc. <http://www.activesignaltech.com/Terfenol1.html>.
- [44] R. Carter, R. Kensley, "Introduction to Piezoelectric Transducers". <https://blog.piezo.com/hubfs/Manuals/Introduction-to-Piezoelectric-Transducers-Carter-Kensley.pdf>.
- [45] Jing-Feng Li, *Lead-Free Piezoelectric Materials*, John Wiley & Sons, 2021.
- [46] A. P. French, *Vibrations and Waves*, W.W. Norton & Company, 1966.

- [47] K. Uchino, "Piezoelectric Ceramics," in *Handbook of Advanced Ceramics*, S. Sōmiya, F. Aldinger, N. Claussen, R. M. Spriggs, K. Uchino, K. Koumoto and M. Kaneno, Eds., Academic Press, 2003, pp. 107-159.
- [48] L. Bjørnø, "Sonar Systems," in *Applied Underwater Acoustics*, T. H. Neighbors and D. Bradley, Eds., Elsevier, 2017, pp. 587-742.
- [49] V. T. Rathod, "A Review of Acoustic Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors and Transducers," *Sensors*, 2020.
- [50] G. Hayman, G. Wells, P. Boys and C. Chambers, *Free-field calibration of hydrophones at frequencies from 250 Hz to 1 kHz*, NPL Report DQL-AC 019, 2007.
- [51] S. Cui and D. Khoo, "Underwater Calibration of Hydrophones at Very Low Frequencies from 30 Hz to 2 kHz," *Journal of Physics: Conference Series*, 2018.
- [52] K. Listewnik, "A Design of an Acoustic Coupler for Calibration of Hydrophones at Low Frequencies," *Vibrations in Physical Systems*, 2019.
- [53] M. Amirthalingam, G. Latha, Peddinti S S R Sridhar and N. Bøgholm, "Design Considerations and Establishment of a Low Frequency Hydrophone Calibration Setup using the Principle of Vibrating Water Column," *The International Journal of Acoustics and Vibration*, 2018.
- [54] W. W. L. Au and M. C. Hastings, *Principles of Marine Bioacoustics*, Springer, 2008.
- [55] E. L. Carstensen, "Self-Reciprocity Calibration of Electroacoustic Transducers," *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 702, 1947.
- [56] S. Zhang, C. Kube, Y. Song and X. Li, "A self-reciprocity calibration method for broadband focused transducers," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016.
- [57] W. J. Trott and E. N. Lide, "Two-Projector Null Method for Calibration of Hydrophones at Low Audio and Infrasonic Frequencies," *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 951-955, 1955.
- [58] S. P. Robinson, "Review of methods for low frequency transducer calibration in reverberant tanks," NPL, 1999.
- [59] H. G. Diestel, "Reciprocity Calibration of Microphones in a Diffuse Sound Field," *The Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 514-518, 1961.

- [60] H. Biering, O. Z. Pedersen, "System Analysis and Time Delay Spectrometry (Part II)," Technical Review 2-1983, Bruel&Kjaer, 1983.
- [61] Παπανικολάου, Γ. "Ηλεκτροακουστικές Μετρήσεις". 2008. University Studio Press: Θεσσαλονίκη. σ. 199.
- [62] Papanikolaou G., Psaroudakis V., Nistikakis M. Measurement of Reverberation Time Using Time Delay Spectrometry (TDS). (1993). Archives of Acoustics, 18, 1, pp. 33-45.
- [63] Mouser Electronics, Inc. <https://gr.mouser.com/datasheet/2/683/P50010-1-359345.pdf>
- [64] https://www.tdpri.com/attachments/mxr_cae-line-driver-mc401-jpg.715258/
- [65] <https://rhoelect.gr/product/tda2030-audio-amplifier>