



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΧΟΤΖΟΓΛΟΥ

Διπλωματούχος Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

**« ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΘΕΣΗΣ-ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ
ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ »**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΧΟΤΖΟΓΛΟΥ

Διπλωματούχος Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

**« ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΘΕΣΗΣ-ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ
ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ »**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗ, ΣΧΟΛΗ ΗΜΜΥ

Ι. ΡΑΠΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ

Α.ΚΤΕΝΑ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2020

*Δεν μπορείς να αποκτήσεις εμπειρία κάνοντας πειράματα. Δεν
μπορείς να δημιουργήσεις εμπειρία. Πρέπει να την υποστείς.*

Αλμπέρ Καμύ

Η απόλυτη εξειδίκευση είναι η άπειρη γνώση του μηδενός.

Oscar Wilde

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλους του ανθρώπους που με επηρέασαν και συνεχίζουν να με επηρεάζουν, ο κάθε ένας με τον δικό του τρόπο. Συγκεκριμένα θέλω να ευχαριστήσω τους:

- κ. Ε. Χριστοφόρου, καθηγητή ΕΜΠ, για την ανάθεση και την καθοδήγηση της μεταπτυχιακής εργασίας αλλά ακόμα περισσότερο για την σχέση που αναπτύξαμε μέσα στον χρόνο η οποία με κάνει να τον αναγνωρίζω τόσο ως Μηχανικό όσο και ως Άνθρωπο και Δάσκαλο
- Ερευνητές του εργαστηρίου Μεταλλουργία της σχολής ΜΜΜ του ΕΜΠ για την μικροτόμηση φύλλων χαλκού που το έπραξαν στα πλαίσια της διαπροσωπικής μας σχέσης
- Τους συνυποψήφιους διδάκτορες της ομάδας του εργαστηρίου των Αισθητήρων, τον κ. Σπύρο Κουτρούμπα και κ. Σπύρο Αγγελόπουλο που περνάμε μαζί δημιουργικές στιγμές και που πολλές φορές λύσαμε μαζί τόσο φιλοσοφικά όσο και εντελώς πρακτικά ζητήματα που προκύπτουν
- Το σύνολο της ερευνητικής ομάδας του κ. Χριστοφόρου που αποτελείται από Καθηγητές, Ερευνητές, Υποψήφιους Διδάκτορες, Μεταπτυχιακούς και Προπτυχιακούς που η τόσο ευρεία διεπιστημονική προσέγγισή της την καθιστά και τόσο επιτυχημένη και δεν αναφέρομαι προσωπικά σε κάποιον για να μην αδικήσω τους υπόλοιπους
- Τον Δρ. Αθανάσιο Μπαταγιάννη, για την συνδρομή στην κατασκευή των 3D εξαρτημάτων, στην εταιρεία του
- Το τμήμα Μεταλλικής Φυσικής της Σλοβάκις Ακαδημίας Επιστημών για την παρασκευή ενός μέρους από τα άμορφα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποίησα
- Τον Ι. Ράπτη, καθηγητή ΕΜΠ και πρόεδρο του ΔΠΜΣ και Α. Κτενά, καθηγήτρια ΕΚΠΑ, για τις διορθώσεις επι του κειμένου και την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου στον Περισσό για τις εκτός υποχρεώσεων ανέμελες στιγμές και όλες τις διαπροσωπικές σχέσεις που εν τέλει με ολοκληρώνουν και ως Μηχανικό και ως Άνθρωπο. Μια ξεχωριστή θέση έχει η Φανή που πορευόμαστε μαζί σε όλα. Για την πολύ μεγάλη διαχρονική στήριξη ευχαριστώ την οικογένεια μου με τους τόσο σημαντικούς ανθρώπους, τα αδέρφια μου Δημήτρη και Κωνσταντίνο (από μικροί εξερευνούσαμε τον κόσμο μαζί) και το μεγαλύτερο ευχαριστώ το αποδίδω στους γονείς μου, Ευάγγελο και Γλυκερία, που μέσω της αγάπης τους συνεχίζω και πορεύομαι πλάι τους ακόμα και αν απομακρύνομαι σε χιλιομετρικές αποστάσεις πλέον.

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός διατάξεων εντοπισμού θέσης-μετατόπισης, οι οποίες λειτουργούν έχοντας ως φυσική αρχή λειτουργίας τις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. Όλα τα μέρη που αποτελούν τις τελικές εργαστηριακές διατάξεις των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν οι ιδιότητες τους και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την μέτρηση της ταχύτητας και του μήκους του παραγόμενου ελαστικού κύματος εντός των άμορφων μαγνητοσυστολικών συρμάτων. Επίσης, μετρήθηκε η εξάρτηση του πεδίου πόλωσης και τα χαρακτηριστικά του στοιχείου λήψης σε σχέση με την έξοδο των διατάξεων. Τέλος παρουσιάζεται η κατασκευή και η ανάλυση τριών τελικών εργαστηριακών διατάξεων που μπορούν να χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες θέσης-μετατόπισης, όπου στην τελευταία γίνεται χρήση δινορρευμάτων για την διέγερση του αισθητήρα, ο οποίος είναι και ο πιο πολλά υποσχόμενος.

Λέξεις κλειδιά: Άμορφα μαγνητοσυστολικά σύρματα, Μαγνητοσυστολικές Γραμμές Καθυστέρησης, Αισθητήρες θέσης, Αισθητήρας μετατόπισης, Δινορεύματα

Abstract

The thesis aims to construct and characterize position-displacement sensors that their working principle is based on the magnetostrictive delay line technology (MDLs). All parts constituting the final laboratory devices of the MDLs were constructed in the context of the present work. Their properties were then examined and experiments were performed to measure the velocity and length of the elastic wave produced within the amorphous magnetostrictive wires. Also, the bias field dependence and the characteristics of the receiving element relative to the output of the devices were measured. Finally, we present the construction and analysis of three final laboratory devices that can act as position-displacement sensors. The last sensor is a combination of eddy currents and the MDL technique and it is the most promising method.

Keywords: Magnetostrictive Delay Line (MDL), Amorphous magnetostrictive wire, Position Sensor, Distance Sensor, Eddy Currents




Αλέξανδρος Χοτζόγλου

© (2020) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 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 το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Οι αισθητήρες τις τελευταίες δεκαετίες συγκεντρώνουν ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον λόγω της σημασίας τους σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές και η παραγωγή τους θα συνεχίσει να αυξάνεται με ακόμα μεγαλύτερο ρυθμό εφόσον η βιομηχανική επανάσταση 4.0 είναι προ των πυλών. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες θέσης καταλαμβάνουν μια αξία στην αγορά που το 2015 έφτασε τα 2,5 δις\$. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζονται αισθητήρες θέσης βασισμένοι στην μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Line – MDL). Πραγματοποιήθηκε μελέτη και αποσαφήνιση της διαδικασίας παραγωγής, μετάδοσης και λήψης ελαστικών κυμάτων εντός μαγνητοσυστολικών υλικών με στόχο την κατασκευή και λειτουργία αισθητήρων θέσης-μετατόπισης. Ως πυρήνας και κυματοδηγός των αισθητήρων χρησιμοποιούνται άμορφα μεταλλικά σύρματα κάνοντας χρήση των μαλακών μαγνητικών ιδιοτήτων τους.

Συγκεκριμένα, η εργασία μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις επιμέρους ενότητες:

-  Η πρώτη ενότητα αποτελεί το Θεωρητικό μέρος της εργασίας και συμπεριλαμβάνει τα τρία πρώτα κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο είναι μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών εννοιών και ιδιοτήτων τόσο των μαγνητικών υλικών όσο και των αισθητήρων. Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εισαγωγή στις ιδιότητες και την παραγωγή μαγνητοσυστολικών συρμάτων που είναι και το υλικό του πυρήνα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των διατάξεων. Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η φυσική αρχή λειτουργίας των MDL και κάποιες σημαντικές εφαρμογές.
-  Η δεύτερη ενότητα αποτελεί το Πειραματικό μέρος, και συμπεριλαμβάνει το 4^ο, 5^ο και 6^ο κεφάλαιο. Στο 4^ο παρουσιάζεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός και η κατασκευή των διαφόρων μερών των αισθητήρων. Προχωρώντας στο 5^ο είναι συγκεντρωμένες οι μετρήσεις που είναι αναγκαίες για την κατανόηση των αισθητήρων θέσης MDL. Τέλος στο 6^ο παρουσιάζονται όλες οι διατάξεις που δρουν ως αισθητήρες θέσης-μετατόπισης, με την κατάλληλη στατιστική ανάλυση.
-  Η τρίτη ενότητα που αποτελείται από το 7^ο κεφάλαιο είναι τα συμπεράσματα και η μελλοντική δουλειά που προτείνεται από τον συγγραφέα.

Περιεχόμενα

1.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	15
1.1	Εισαγωγή.....	15
1.2	Μαγνητικό πεδίο	15
1.2.1	Κατεύθυνση μαγνητικού πεδίου.....	16
1.2.2	Ένταση μαγνητικού πεδίου	17
1.2.3	Μαγνητική επαγωγή και μαγνητική ροή	19
1.3	Βασικοί Μαγνητικοί Ορισμοί	19
1.4	Μαγνητοελαστικές Ιδιότητες	22
1.4.1	Ορισμός Μαγνητοσυστολής.....	22
1.4.2	Αυθόρμητη μαγνητοσυστολή.....	23
1.4.3	Σύνοψη γραμμικών μαγνητοσυστολικών φαινομένων.....	23
1.4.4	Πιεζομαγνητισμός	24
1.5	Άμορφα Μεταλλικά υλικά	25
1.6	Αισθητήρες.....	27
1.6.1	Ορισμός αισθητήρων και μορφομετατροπών.....	27
1.6.2	Εφαρμογές	29
2.	Εισαγωγή στα Άμορφα Σύρματα.....	31
2.1	Εισαγωγή.....	31
2.2	Παραγωγή Άμορφων Συρμάτων	31
2.3	Μηχανικές Ιδιότητες	33
2.4	Κατανομή εσωτερικών τάσεων σε χυτευμένο (as-cast) Άμορφο Σύρμα.....	34
2.5	Μαγνητικές Ιδιότητες.....	36
2.5.1	Μεγάλα άλματα Barkhausen και κίνηση τοιχωμάτων	36
2.5.2	Μαγνητικές περιοχές και πώς στρίβουν	38
3.	Ανάλυση των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL).....	41

3.1	Μετάδοση κύματος λόγω μαγνητοσυστολής και Μαγνητοελαστικές ιδιότητες	41
3.2	Ποιοτική ανάλυση της βασικής διάταξης MDL	41
3.3	Μηχανική μοντελοποίηση.....	43
3.4	Εφαρμογές μαγνητοσυστολικών αισθητήρων θέσης.....	46
3.5	Κατασκευαστές	48
4.	Πειραματική μεθοδολογία και κατασκευή	49
4.1	Εργαστήριο αισθητήρων	49
4.2	Τα μέρη της απλής μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης.....	51
4.2.1	Μαγνητοσυστολικοί πυρήνες	51
4.2.2	Μαγνήτης θέσης	51
4.2.3	Συσκευή ανίχνευσης.....	54
4.2.4	Υλικό απόσβεσης	57
4.2.5	Υλικό πακεταρίσματος	59
4.2.6	Ηλεκτρονική διάταξη	61
5.	Μετρήσεις.....	69
5.1	Πείραμα απλής διάταξης MDL.....	69
5.1.1	Αρχή λειτουργίας.....	69
5.1.2	Μέτρηση ταχύτητας ελαστικού κύματος.....	81
5.1.3	Φαινόμενο Villari και Μήκος ελαστικού κύματος.....	82
5.2	Πείραμα μεταβολής μαγνητικού πεδίου πόλωσης.....	85
5.3	Απόκριση MDL σε σχέση με τον αριθμό περιελίξεων του πηνίου λήψης	89
6.	Διαταξεις αισθητηρων θεσης-μετατοπισης	91
6.1	Πείραμα Πολλαπλών Διεγέρσεων.....	91
6.2	Πείραμα Πολλαπλών Λήψεων	99
6.3	Αισθητήρας θέσης μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων	107
7.	Συμπεράσματα.....	113

7.1	Πλεονεκτήματα	113
7.2	Μελλοντική δουλειά	115
7.2.1	Αισθητήρας θέσης μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων	115
7.2.2	Βελτιώσεις των MDL	116
7.3	Κατακλείδα	116
8.	Βιβλιογραφία	118

Πίνακας Γραφημάτων

ΓΡΑΦΗΜΑ 1:ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΣΗΜΕΙΑ: H_c ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, M_r ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ, M_s ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ H_s ΠΕΔΙΟ ΚΟΡΕΣΜΟΥ. [16].....	20
ΓΡΑΦΗΜΑ 2: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ M_s ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ. Τ c ΕΙΝΑΙ Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE [9]	22
ΓΡΑΦΗΜΑ 3: ΒΡΟΧΟΙ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΑΜΟΡΦΟΥ ΣΥΡΜΑΤΟΣ $Fe_{77}Si_{18}B_{15}$ (ΘΕΤΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ) ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΑ 60ΗΖ: ΒΡΟΧΟΣ Μ-Η ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΕΙ ΠΕΔΙΟ ΑΛΛΑΓΗΣ (ΣΥΝΕΧΗΣ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΣ Μ-Η ΥΨΗΛΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΟΥ ΠΡΟΣΕΓΓΙΖΕΙ ΤΟΝ ΚΟΡΕΣΜΟ (ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ). [42]	37
ΓΡΑΦΗΜΑ 4: Η ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ $\lambda(H)$ ΠΟΥ ΣΥΣΧΕΤΙΖΕΙ ΤΙΣ ΜΙΚΡΟΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟ ΠΕΔΙΟ. [31]	42
ΓΡΑΦΗΜΑ 5: (Α) ΠΑΡΑΓΩΓΗ, (Β) ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΑΙ (Γ) ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΙΚΡΟΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΠΑΛΜΙΚΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ [31].	45
ΓΡΑΦΗΜΑ 6: (Α) ΠΑΡΑΓΩΓΗ, (Β) ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΑΙ (Γ) ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΙΚΡΟΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΛΟΓΩ ΜΑΚΡΑΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΠΑΛΜΙΚΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ [31].	45
ΓΡΑΦΗΜΑ 7: ΛΗΨΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΩΣ ΤΑΞΗ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΛΗΨΗΣ ΜΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.....	53
ΓΡΑΦΗΜΑ 8: ΛΗΨΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.	59
ΓΡΑΦΗΜΑ 9: ΛΗΨΗ ΣΤΟΝ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ. ΜΕ ΚΙΤΡΙΝΟ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Ο ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΑΝΑΛΙ ΠΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΕΤΑΙ Η ΛΗΨΗ. ΣΤΟ ΓΡΑΦΗΜΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΧΕΙ ΠΑΡΑΛΕΙΦΘΕΙ Ο ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΑΦΟΥ ΕΙΝΑΙ Ο ΙΔΙΟΣ.....	68
ΓΡΑΦΗΜΑ 10: ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΗΨΗ ΣΕ 50CM ΑΠΟΣΤΑΣΗ.	71
ΓΡΑΦΗΜΑ 11: ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΗΨΗ ΣΕ 35CM ΑΠΟΣΤΑΣΗ.	71
ΓΡΑΦΗΜΑ 12: ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΗΨΗ ΣΕ 25CM ΑΠΟΣΤΑΣΗ.	72
ΓΡΑΦΗΜΑ 13: ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΗΨΗ ΣΕ 10CM ΑΠΟΣΤΑΣΗ.	72
ΓΡΑΦΗΜΑ 14: ΚΑΜΠΥΛΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΛΗΨΗΣ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ MDL.	73
ΓΡΑΦΗΜΑ 15: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ.....	75
ΓΡΑΦΗΜΑ 16: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ ΜΕ 95% ΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΑΣ. ΣΤΑ ΔΕΞΙΑ ΤΟΥ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΑΝΩ ΚΑΙ ΚΑΤΩ ΟΡΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ.....	76
ΓΡΑΦΗΜΑ 17: ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΗΨΗ ΣΕ 86CM ΑΠΟΣΤΑΣΗ.	77
ΓΡΑΦΗΜΑ 18: ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ.	78
ΓΡΑΦΗΜΑ 19: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ MDL ΣΥΓΚΡΙΝΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΛΗΨΗΣ-ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΗΝΙΩΝ.	79
ΓΡΑΦΗΜΑ 20: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ.	80
ΓΡΑΦΗΜΑ 21: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ) ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ MDL ΜΕ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ 95%.....	80
ΓΡΑΦΗΜΑ 22: ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΠΗΝΙΩΝ ΛΗΨΗΣ-ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.	82
ΓΡΑΦΗΜΑ 23: ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ 82MS.....	83

ΓΡΑΦΗΜΑ 24: ΜΕ ΚΙΤΡΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΔΙΕΓΕΡΣΗ (ΤΑΣΗ ΣΤΟΝ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΠΟΛΟ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ) ΚΑΙ ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ Η ΛΗΨΗ.....	84
ΓΡΑΦΗΜΑ 25: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ MDL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ ΠΟΛΩΣΗΣ. ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑ ΤΑ -22ΜΑ ΚΑΘΩΣ ΕΧΟΥΜΕ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΣΤΗΝ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ.	86
ΓΡΑΦΗΜΑ 26: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ MDL ΜΕ ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΠΟΛΩΣΗΣ (HABILITATION) [56].	87
ΓΡΑΦΗΜΑ 27: ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ ΜΕ ΑΥΞΗΣΗ ΑΡΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ ΠΟΛΩΣΗΣ ΑΠΟ -15 ΩΣ -26ΜΑ.....	88
ΓΡΑΦΗΜΑ 28: Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ MDL ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΛΗΨΗΣ.....	89
ΓΡΑΦΗΜΑ 29: ΥΠΟ ΙΔΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ, ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΟΦΩΝ ΠΗΝΙΟΥ ΛΗΨΗΣ.	90
ΓΡΑΦΗΜΑ 30: ΜΕΓΙΣΤΑ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΝΑ ΠΗΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΗ.....	98
ΓΡΑΦΗΜΑ 31: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.	99
ΓΡΑΦΗΜΑ 32: ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΠΗΝΙΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ. 1 ^ο ΠΗΝΙΟ ΣΤΑ 11CM, 2 ^ο ΣΤΑ 23CM ΚΑΙ 3 ^ο ΣΤΑ 45CM.	105
ΓΡΑΦΗΜΑ 33: ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΠΗΝΙΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ. 1 ^ο ΠΗΝΙΟ ΣΤΑ 11CM, 2 ^ο ΣΤΑ 23CM ΚΑΙ 3 ^ο ΣΤΑ 45CM.	107
ΓΡΑΦΗΜΑ 34: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ-ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΥΣΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ. Η ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΙΝΑΙ ΛΟΓΩ ΑΤΕΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΙΣΚΙΩΝ.	111
ΓΡΑΦΗΜΑ 35: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ-ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ.	112

Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΆΠΟΨΗ ΤΗΣ ΙΔΙΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.	60
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΆΠΟΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΒΡΑΧΙΟΝΕΣ ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΟΝΤΑΙ ΜΕΣΩ ΣΕΡΒΟΚΙΝΗΤΗΡΑ.	60
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ NC. (Α) Η ΠΛΑΚΕΤΑ ΜΕ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ (Β) ΤΟ ΚΟΥΤΙ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΔΡΑΖΕΤΑΙ Η ΠΛΑΚΕΤΑ.	65
ΕΙΚΟΝΑ 4: Η ΠΛΑΚΕΤΑ ΜΕ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ C.	66
ΕΙΚΟΝΑ 5: : ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ ΟΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΟΝΤΑΙ ΤΑ ΠΗΝΙΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ, ΤΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ, ΤΟ MDL, Ο ΚΙΝΗΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗΣ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕ ΕΝΑ ΚΟΜΜΑΤΙ ΑΠΟ ΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.....	93

Πίνακας Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΑ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. ΠΗΓΕΣ [18], [9], [19], [20].	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 2	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ [38].....	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Η ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (σ), Η ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (ϵ_F) ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΟ ΑΜΟΡΦΟ ΣΥΡΜΑ [40], [47].	33

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΘΕΣΗΣ	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΣ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΌΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΘΕΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ [55].	115

Πίνακας Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1: ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ. (Α) ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟΣ ΑΓΩΓΟΣ, (Β) ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΕΣ ΠΗΝΙΟ, (Γ) ΡΑΒΔΟΣ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ [14].	17
ΣΧΗΜΑ 2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΜΟΡΦΩΝ ΤΑΙΝΙΩΝ ΟΠΟΥ: 1)ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ, 2)ΦΡΕΝΟ 3)ΧΑΛΚΙΝΟ ΤΥΜΠΑΝΟ, 4)ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΡΕΝΟ, 5)ΦΡΕΝΟ ΔΙΣΚΟΥ, 6)ΑΡΓΟ, 7)ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΦΟΥΡΝΟΣ, 8)ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ, 9)ΛΙΩΜΕΝΟ ΚΡΑΜΑ, 10) ΑΚΡΟΦΥΣΙΟ, 11)ΔΕΙΓΜΑ ΑΜΟΡΦΗΣ ΤΑΙΝΙΑΣ [28].	26
ΣΧΗΜΑ 3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΒΑΦΗΣ-ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΜΟΡΦΩΝ ΣΥΡΜΑΤΩΝ. Α) ΠΡΟΣΩΠΗ. Β) ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ. [41].	32
ΣΧΗΜΑ 4: ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΑΜΟΡΦΟΥ ΣΥΡΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ [48].	35
ΣΧΗΜΑ 5: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΥΚΟΛΟΣ ΑΞΟΝΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΑΜΟΡΦΩΝ ΣΥΡΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ Fe ΚΑΙ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ Co [49].	35
ΣΧΗΜΑ 6: ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ. (Α) ΤΟΙΧΩΜΑ ΣΕ ΚΙΝΗΣΗ “ΙΣΤΙΟΥ” (BOWING). (Β) ΕΝΙΑΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ (RIGID). [31].	37
ΣΧΗΜΑ 7: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ ΠΥΡΗΝΑΣ-ΚΕΛΥΦΟΣ ΓΙΑ ΣΥΡΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ Fe($\lambda > 0$) ΚΑΙ Co($\lambda < 0$) [42], [20].	39
ΣΧΗΜΑ 8: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΣΤΡΟΦΗΣ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ. (Α) ΔΥΟ ΑΞΟΝΕΣ ΕΥΚΟΛΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΚΑΙ Η ΜΗ ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΗ ΣΤΡΟΦΗ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΕΝΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ H. (Β) ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΗ ΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΑΜΕΣΩΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΜΗ ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ [31].	40
ΣΧΗΜΑ 9: ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (MDL). (1) ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΠΗΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ, (2) MDL, (3) ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ [31].	41
ΣΧΗΜΑ 10: Η ΠΙΟ ΑΠΛΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ MDL.	44
ΣΧΗΜΑ 11: ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΣΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΣ ΕΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ [55].	48
ΣΧΗΜΑ 12: ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ΘΕΣΗΣ.	52
ΣΧΗΜΑ 13: ΜΑΓΝΗΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ C ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΗ.	54
ΣΧΗΜΑ 14: ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ.	55
ΣΧΗΜΑ 15: ΤΡΙΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.	58
ΣΧΗΜΑ 16: ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΟΨΕΙΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕ ΔΙΣΚΟΥΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΗ ΣΤΟ AUTOCAD: (Α) ΑΠΟΨΗ ΤΗΣ ΟΛΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (Β) ΠΡΟΣΩΠΗ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΜΕΓΕΘΗ (Γ) ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΕΣΟΧΗΣ.	61
ΣΧΗΜΑ 17: ΜΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗ ΣΕΙΡΙΑΚΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΟ ΣΥΡΜΑ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.	62
ΣΧΗΜΑ 18: ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ NC.	63
ΣΧΗΜΑ 19: ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ C.	64

ΣΧΗΜΑ 20: ΣΧΕΔΙΟ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ (Α) ΝC ΚΑΙ (Β) C.	65
ΣΧΗΜΑ 21: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	67
ΣΧΗΜΑ 22: ΣΧΕΔΙΟ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΛΗΨΗΣ.....	67
ΣΧΗΜΑ 23: ΜΕΤΑΚΙΝΩΝΤΑΣ ΕΙΤΕ ΤΟ ΠΗΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΕΙΤΕ ΤΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΣΤΟΝ ΧΡΟΝΙΣΜΟ ΤΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ-ΛΗΨΗΣ. (1) ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΟ ΣΥΡΜΑ, (2) ΠΗΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ, (3) ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ..	70
ΣΧΗΜΑ 24: ΑΡΧΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ MDL ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ.....	91
ΣΧΗΜΑ 25: ΑΠΟΚΡΙΣΗ MDL ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΟΝΤΑΣ ΠΛΗΣΙΟΝ ΤΟΥ ΜΕΣΑΙΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΕΝΑΣ ΜΟΝΙΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗΣ.....	92
ΣΧΗΜΑ 26: ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΗ ΟΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΚΑΙ Η ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΤΟΥ MDL.....	94
ΣΧΗΜΑ 27: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 75CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	94
ΣΧΗΜΑ 28: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 69CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	95
ΣΧΗΜΑ 29: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 63CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	95
ΣΧΗΜΑ 30: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 57CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	96
ΣΧΗΜΑ 31: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 51CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	96
ΣΧΗΜΑ 32: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 45CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	97
ΣΧΗΜΑ 33: ΈΞΟΔΟΣ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ ΓΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 39CM ΑΠΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ.	97
ΣΧΗΜΑ 34: ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΛΗΨΕΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΦΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ. (Α) ΟΤΑΝ Ο ΜΑΓΝΗΤΗΣ ΔΕΝ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΤΟ ΣΗΜΑ ΕΞΟΔΟΥ. (Β) ΟΤΑΝ Ο ΜΑΓΝΗΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΕΦΕΙ ΤΟΝ ΠΑΛΜΟ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΛΗΨΗΣ. (Γ) ΟΤΑΝ Ο ΜΑΓΝΗΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΕΦΕΙ ΤΟΝ ΠΑΛΜΟ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΛΗΨΗΣ.....	100
ΣΧΗΜΑ 35: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΥΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΗ.	101
ΣΧΗΜΑ 36: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 5CM.....	102
ΣΧΗΜΑ 37: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 11CM.....	102
ΣΧΗΜΑ 38: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 17CM.....	103
ΣΧΗΜΑ 39: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 23CM.....	103
ΣΧΗΜΑ 40: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 29CM.....	104
ΣΧΗΜΑ 41: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 35CM.....	104
ΣΧΗΜΑ 42: ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΟ MDL ΜΕ 3 ΠΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ ΜΕ ΤΟΝ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΑ 41CM.....	105
ΣΧΗΜΑ 43: ΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΘΕΣΗΣ MDL ΜΕ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΜΕΣΩ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ.(1) ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ, (2) ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟΙ ΑΓΩΓΟΙ, (3) ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΩΝ ΑΓΩΓΩΝ, (4) ΝΟΗΤΗ ΣΥΝΕΧΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ,(5) ΛΕΠΤΑ ΔΙΣΚΙΑ ΧΑΛΚΟΥ, (6) ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ, (7) ΕΝΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΩΝ ΑΓΩΓΩΝ, (8) ΕΝΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΗΝΙΟ ΛΗΨΗΣ, (9) ΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΗ ΒΑΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (ΠΑΚΕΤΑΡΙΣΜΑ), (10) ΚΙΝΗΤΟΣ ΜΟΝΙΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗΣ. ΜΕ ΚΙΤΡΙΝΑ ΒΕΛΗ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΤΟΣΟ ΣΤΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ ΟΣΟ ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΤΩΝ ΔΙΣΚΩΝ ΧΑΛΚΟΥ.	109

1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες και οι μετατροπείς παρουσιάζουν αυξανόμενο ενδιαφέρον εξαιτίας της συμβολής τους σε πλήθος τεχνολογικών εφαρμογών. Όλα τα σύγχρονα οχήματα και τα μέσα μεταφοράς χρησιμοποιούν μεγάλη ποικιλία αισθητήρων και μετατροπέων. Η λειτουργία πολλών ιατρικών οργάνων βασίζεται σε αισθητήρες και η σύγχρονη βιομηχανία απασχολεί ένα όλο και αυξανόμενο αριθμό αισθητήρων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των γραμμών παραγωγής, οδηγώντας στην αυτοματοποίησή της.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες παίζουν σημαντικό ρόλο σε μετρήσεις φυσικών μεγεθών και χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα εφαρμογών όπως αναφέρει ο [1]. Η σημερινή τεχνολογία μαγνητικών αισθητήρων κατά κύριο λόγο χρησιμοποιεί τα μαγνητικά φαινόμενα της μαγνητοαντίστασης [2], της μαγνητοεμπέδησης [3], της μαγνητοσυστολής [4], της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής [5] και το φαινόμενο Hall [6]. Η κίνηση των μαγνητικών περιοχών εντός των υλικών είναι ο κύριος μηχανισμός με τον οποίο εξηγούνται οι μαγνητικές ιδιοτήτων, που με την σειρά τους χρησιμοποιούνται ως το μέσο ανίχνευσης στις προαναφερθείσες εφαρμογές [7]. Για την κατασκευή ενός αισθητήριου στοιχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε πιθανή έκφανση αυτού του μηχανισμού. Υπάρχουν δύο ξεχωριστοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τις μαγνητικές περιοχές, ο ένας είναι η μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων (αύξηση ή μείωση μια μαγνητικής περιοχής) και ο άλλος η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών (συνολική περιστροφή μια μαγνητικής περιοχής). Αυτοί οι δύο ξεχωριστοί μηχανισμοί προκαλούν αποτελέσματα τόσο σε μικροσκοπικό όσο και σε μακροσκοπικό επίπεδο στα υλικά.

Η μαγνητοσυστολή είναι μια ιδιότητα των μαγνητικών υλικών που έχει διεξοδικώς ερευνηθεί από την άποψη της θεωρίας και μοντελοποίηση καθώς και από άποψη πειραματικών αποτελεσμάτων και εφαρμογών όπως παρουσιάζουν μια σειρά από εργασίες [8], [9], [10], [11] και [12].

1.2 Μαγνητικό πεδίο

Για να δώσουμε έναν ορισμό για το μαγνητικό πεδίο, ας επικεντρωθούμε στο ηλεκτρικό φορτίο ή ακόμα καλύτερα σε μια σειρά ηλεκτρικών φορτίων. Όταν λοιπόν ένα φορτίο είναι σταθερό στο κενό χώρο, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο που εκτείνεται προς κάθε

κατεύθυνση στο περιβάλλον μέσο. Όταν φορτία κινούνται σε ένα συνεχές επίπεδο, παράγεται φορτίο ανά μονάδα χρόνου και έτσι δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα και μαζί με αυτό ένα μαγνητικό πεδίο. Η συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού, ή πιο συγκεκριμένα, μεταξύ του ηλεκτρικού φορτίου σε κίνηση και του μαγνητικού πεδίου, καθιερώθηκε για πρώτη φορά το 1819 από τον H. C. Oersted, ο οποίος ανακάλυψε ότι όταν το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσω ενός αγωγού, παράγει ένα μαγνητικό πεδίο που δύναται να επηρεάζει τη βελόνα μιας πυξίδας.

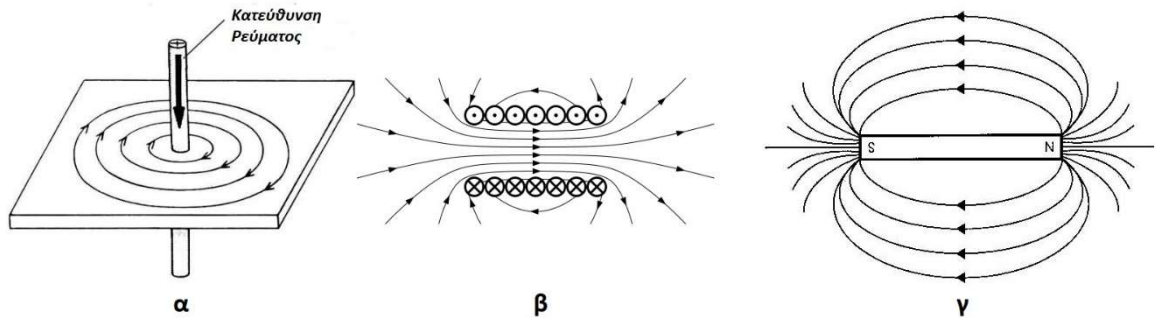
Μαγνητικά πεδία παράγονται επίσης από μόνιμους μαγνήτες [13]. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα μόνιμο μαγνήτη δεν οφείλεται σε συμβατικά ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στον μαγνήτη αλλά λόγω της δομής του υλικού, και συγκεκριμένα της μόνιμης μαγνήτισης που προκαλείται από την τροχιακή κίνηση και την περιστροφή των ηλεκτρονίων (γνωστά ως «Αμπεριανά ρεύματα»).

1.2.1 Κατεύθυνση μαγνητικού πεδίου

Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται είτε από αγωγούς ρεύματος, είτε από μόνιμους μαγνήτες μπορεί να εντοπιστεί με τη χρήση μικρών πυξίδων ή με τον διασκορπισμό μαγνητικών μεταλλικών ρινισμάτων. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η μορφή και η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν ρευματοφόρο αγωγό, ένα σωληνοειδές πηνίο και μια ράβδο μόνιμου μαγνήτη.

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν ευθύ αγωγό απεικονίζεται με κυκλικές γραμμές γύρω από τον αγωγό σε ένα επίπεδο κάθετο προς αυτό και η κατεύθυνσή τους καθορίζεται συνήθως από τον κανόνα του δεξιού χεριού [7].

Το πεδίο που παράγεται από τον μαγνητικό ράβδο βγαίνει από τον «βόρειο πόλο» (πηγή πεδίου) και καταλήγει στο «νότιο πόλο» (καταβόθρα πεδίου), δημιουργώντας ένα μοτίβο που είναι παρόμοιο με εκείνο του σωληνοειδούς πηνίου έξω από τον μαγνήτη αλλά αντίθετο μέσα στον μαγνήτη. Αυτό συμβαίνει ως αποτέλεσμα του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής που δείχνει σε διαφορετικές κατευθύνσεις μέσα στον μαγνήτη και έτσι δημιουργείται ένα πεδίο απομαγνήτισης το οποίο αντιτίθεται στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό το πεδίο απομαγνήτισης υπάρχει κάθε φορά που δημιουργούνται μαγνητικοί πόλοι [7].



Σχήμα 1: Γραμμές μαγνητικού πεδίου. (α) Ρευματοφόρος αγωγός, (β) σωληνοειδές πηνίο, (γ) ράβδος μόνιμου μαγνήτη [14].

1.2.2 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται στις απλές περιπτώσεις που απεικονίζονται παραπάνω. Ένας γενικός τρόπος υπολογισμού της έντασης πεδίου H που παράγεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα είναι με το νόμο Biot-Savart,

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} I d\vec{l} \times \hat{r} \quad (1)$$

όπου $d\vec{l}$ είναι το διαφορικό διάνυσμα μήκους του στοιχείου ρεύματος, r είναι η απόσταση από το στοιχείο ρεύματος στο σημείο υπολογισμού του πεδίου, \hat{r} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με διεύθυνση από το στοιχείο ρεύματος στο σημείο που υπολογίζεται το πεδίο και I είναι το ρεύμα, το οποίο μετριέται σε Αμπέρ. Ο νόμος των Biot-Savart είναι θεμελιώδης για τον ηλεκτρομαγνητισμό.

Ο νόμος των Biot-Savart ή ο ισοδύναμος νόμος του Ampere μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των εντάσεων μαγνητικού πεδίου που παράγονται από πηνία που λειτουργούν σε μαγνητικούς αισθητήρες ως μέρος ενός δυναμικού μαγνητικού κυκλώματος. Ωστόσο, παρά τη φαινομενική απλότητα της εξίσωσης (1), ο υπολογισμός των πεδίων που παράγονται από ένα πηνίο σε θέσεις διαφορετικές από τον άξονα του πηνίου οδηγεί σε ελλειπτικά ολοκληρώματα, χωρίς λύση κλειστής μορφής. Για αυτό το λόγο, είναι σημαντική η γεωμετρία των διατάξεων.

Εφόσον λοιπόν η γεωμετρία των διατάξεων μας το επιτρέπει, υπάρχουν λύσεις απλές και ρητές. Είναι εξαιρετικά χρήσιμο να μπορεί κανείς να υπολογίσει το πεδίο κατά μήκος του άξονα του πηνίου σε αυτές τις περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται παρακάτω είναι, από την πιο απλή στην πιο σύνθετη: ένα λεπτό και μακρύ σωληνοειδές, ένα λεπτό σωληνοειδές πεπερασμένου μήκους και τέλος ένα παχύ σωληνοειδές πεπερασμένου μήκους.

1.2.2.1 Λεπτό σωληνοειδές απείρου μήκους

Αποδεικνύεται ότι στον άξονα του σωληνοειδούς κοντά στο κέντρο του, το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι

$$H = \frac{NI}{L} = nI \quad (2)$$

όπου N ο αριθμός των περιελίξεων, L το μήκος του σωληνοειδούς και I η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές. Το πηλίκο N/L εκφράζει τον αριθμό περιελίξεων ανά μονάδα μήκους του σωληνοειδούς και συμβολίζεται με n ($n = \frac{N}{L}$).

1.2.2.2 Λεπτό σωληνοειδές πεπερασμένου μήκους

Αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο κατά μήκος του άξονα ενός λεπτού σωληνοειδούς πεπερασμένου μήκους. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται υποθέτοντας ότι το πηνίο έχει μήκος L και διάμετρο D και ότι το ρεύμα στις περιελίξεις είναι I , το πεδίο σε μια τυχαία θέση απόστασης z μέτρων από το κέντρο του σωληνοειδούς δίνεται από την έκφραση

$$H = \frac{NI}{L} \left[\frac{L + 2z}{2\sqrt{(D^2 + (L + 2z)^2)}} + \frac{L - 2z}{2\sqrt{(D^2 + (L - 2z)^2)}} \right] \quad (3)$$

Στη περίπτωση ενός σωληνοειδούς μεγάλου μήκους, $L \gg D$, η εξίσωση μετατρέπεται στην μορφή 2 όπως αναφέρθηκε.

1.2.2.3 Παχύ σωληνοειδές πεπερασμένου μήκους

Ο Montgomery [15] έχει δείξει πως γίνεται ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος ενός σωληνοειδούς μεγαλύτερης διαμέτρου. Για σωληνοειδές λοιπόν, με μήκος L , εσωτερικής διαμέτρου a_1 και εξωτερικής διαμέτρου a_2 μπορούν να οριστούν δυο συντελεστές που αποδίδουν την γεωμετρία του σωληνοειδούς:

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{L}{2a_1} \quad (5)$$

Το πεδίο κατά μήκος του άξονα του πηνίου υπολογίζεται:

$$H = \frac{Ni}{L} \left[\frac{F(\alpha, \beta)}{\alpha - 1} \right] \quad (6)$$

όπου ο συντελεστής πεδίου $F(\alpha, \beta)$ έχει την μορφή

$$F(a, \beta) = \beta[\operatorname{arsinh}(a/\beta) - \operatorname{arsinh}(1/\beta)] \quad (7)$$

1.2.3 Μαγνητική επαγωγή και μαγνητική ροή

Υπάρχει συχνά σύγχυση μεταξύ των εννοιών του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής. Το μαγνητικό πεδίο \vec{H} δημιουργείται όταν μέσα σε αγωγό υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο σε κίνηση ή λόγω ύπαρξης μόνιμου μαγνήτη. Η μαγνητική επαγωγή ή η πυκνότητα μαγνητικής ροής B είναι μια διανυσματική ποσότητα που αντιπροσωπεύει τον τρόπο με τον οποίο ένα μέσο ανταποκρίνεται σε ένα υπάρχον μαγνητικό πεδίο. Όλα τα μέσα χαρακτηρίζονται από κάποια επαγωγή και η ιδιότητα που ποσοτικοποιεί την ισχύ του B κάτω από ένα δεδομένο πεδίο είναι η διαπερατότητα του μέσου μ . Η διανυσματική έκφραση που συσχετίζει το πεδίο και την επαγωγή σε ένα δεδομένο μέσο είναι:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (8)$$

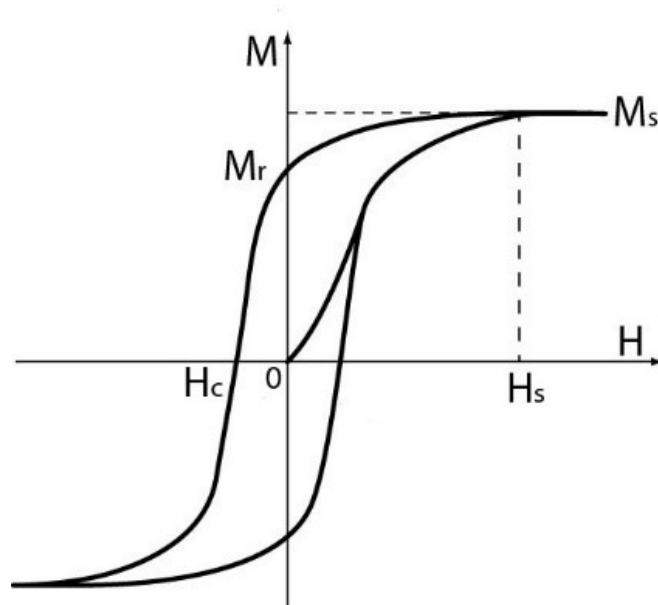
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μ δεν είναι μια σταθερά στα περισσότερα μαγνητικά μέσα, όπως είναι για παράδειγμα στα φερρομαγνητικά και φερριμαγνητικά, αλλά είναι μάλλον μια πολύ-παραγοντική ποσότητα εξαρτώμενη από την ένταση του πεδίου (καθώς και από τις εσωτερικές τάσεις και θερμοκρασία). Η διαπερατότητα εξαρτάται από την μαγνητική κατάσταση του υλικού τη δεδομένη στιγμή όσο και από το ιστορικό της μαγνητικής του κατάστασης.

1.3 Βασικοί Μαγνητικοί Ορισμοί

Βρόχος Υστέρησης: Όταν θέλουμε να χαρακτηρίσουμε μαγνητικά ένα μαγνητικό υλικό δεν υπάρχει τίποτα πιο αντιπροσωπευτικό από τον βρόχο υστέρησης. Ένας τυπικός βρόχος εμφανίζεται στο Γράφημα 1 όπου στον άξονα X έχουμε την Ένταση του μαγνητικού πεδίου H (ή μαγνητίζον πεδίο) και στον άξονα Y την Μαγνήτιση (M). Αντίστοιχα H_c καλούμε το συνεκτικό πεδίο, M_r τη παραμένουσα μαγνήτιση, M_s την μαγνήτιση κορεσμού και H_s το πεδίο κορεσμού.

Κατά τον κορεσμό όλες οι μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται στην κατεύθυνση του H και η περαιτέρω αύξηση του πεδίου H δεν επιφέρει αλλαγή στην μαγνήτιση.

Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή της μαγνητικής διέγερσης H_c για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση ονομάζεται συνεκτικό πεδίο. Το συνεκτικό πεδίο εξαρτάται από την κατάσταση του δείγματος και μπορεί να επηρεαστεί από εξωγενείς παράγοντες όπως είναι η θερμική επεξεργασία.



Γράφημα 1: Μαγνητικός Βρόχος Υστέρησης με τα αντίστοιχα σημεία: H_c συνεκτικό πεδίο, M_r παραμένουσα μαγνήτιση, M_s μαγνήτιση κορεσμού και H_s πεδίο κορεσμού. [16]

Μαγνητική επιδεκτικότητα: Για πολλά μαγνητικά υλικά, η μαγνήτιση, M , είναι ανάλογη προς το επιβαλλόμενο πεδίο, H , σύμφωνα με τη σχέση:

$$M = \chi H \quad (9)$$

όπου χ η μαγνητική επιδεκτικότητα. Εφόσον τα M και H έχουν τις ίδιες μονάδες, το χ είναι αδιάστατο μέγεθος. Ωστόσο, στην πράξη, τα μαγνητικά υλικά δεν έχουν πάντα σταθερή επιδεκτικότητα. Έτσι, ο ρυθμός μεταβολής του M προς H (dM / dH) μερικές φορές χρησιμοποιείται ως το χ , το οποίο τότε ονομάζεται διαφορική επιδεκτικότητα. Η αρχική επιδεκτικότητα, χ_0 , (στην αρχική καμπύλη) είναι η επιδεκτικότητα σε χαμηλά πεδία ($\chi_0 = dM / dH_{H \rightarrow 0}$).

Απώλειες υστέρησης: Οι απώλειες ενέργειας λόγω υστέρησης προκαλούνται από τη μαγνητισμό και την απομαγνητισμό ενός σιδηρομαγνητικού υλικού και εξηγούνται με την ύπαρξη των μαγνητικών περιοχών. Η ενέργεια που απαιτείται για τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών ονομάζεται απώλειες υστέρησης.

Η περιοχή του βρόχου υστέρησης δείχνει την ενέργεια που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένας πλήρης κύκλος μαγνητισμού και απομαγνητισμού και οι απώλειες υστέρησης σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού του βρόχου υστέρησης. Η περιοχή του βρόχου αντιπροσωπεύει την ενέργεια που χάθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας.

Μαγνητική ανισοτροπία: Ο όρος μαγνητική ανισοτροπία αναφέρεται στην εξάρτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων από την κατεύθυνση στην οποία μετρούνται. Η ανισοτροπία επηρεάζει έντονα τον τρόπο με τον οποίο μαγνητίζεται το αντίστοιχο υλικό, ιδιαίτερα την

διαδικασία περιστροφής των μαγνητικών περιοχών, και έτσι έχει σημαντική επίδραση στην μαγνητοσυστολή.

Με βάση λοιπόν την μαγνητική ανισοτροπία μπορεί να οριστεί η ενέργεια ανισοτροπίας. Αυτή είναι η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απαιτείται για την περιστροφή των μαγνητικών περιοχών στην κατεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου.

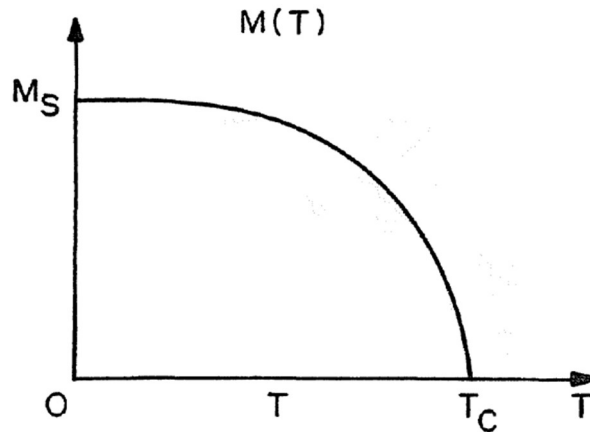
Μαγνητικές περιοχές και κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων: Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διαιρούνται αυθόρμητα σε μαγνητικές περιοχές, επειδή η αλληλεπίδραση ανταλλαγής είναι μια δύναμη μικρής εμβέλειας, έτσι σε μεγάλες αποστάσεις πολλών ατόμων επικρατεί η τάση των μαγνητικών διπόλων να μειώνουν την ενέργειά τους προσανατολιζόμενα σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αν όλα τα δίπολα σε ένα κομμάτι σιδηρομαγνητικού υλικού ευθυγραμμίζονται παράλληλα, δημιουργείται ένα μεγάλο μαγνητικό πεδίο που επεκτείνεται στον χώρο γύρω του. Αυτό περιέχει πολύ μαγνητοστατική ενέργεια. Το υλικό μπορεί να μειώσει αυτήν την ενέργεια διαιρούμενο σε πολλές περιοχές που δείχνουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις, έτσι το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται σε μικρά τοπικά πεδία στο υλικό, μειώνοντας την ένταση του πεδίου. Αυτό είναι σύμφωνο με την αρχή της ελαχίστης ενέργεια που ισχύει πάντα στην φύση.

Οι περιοχές διαχωρίζονται από λεπτά τοιχώματα περιοχής (Domain walls) έναν αριθμό από μεγάλα δίπολα, στα οποία η κατεύθυνση της μαγνήτισης των διπόλων εναλλάσσεται ομαλά από μια τη μια κατεύθυνση της μαγνητικής περιοχής σε μια άλλη.

Όταν το υλικό βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου, η μαγνήτισή του αλλάζει. Έτσι, η διαδικασία μαγνήτισης ενός υλικού μπορεί να συμβεί είτε με τη στροφή των μαγνητικών ροπών είτε με την κίνηση των τοιχωμάτων. Η κίνηση του τοιχώματος μπορεί να είναι αναστρέψιμη ή μη αναστρέψιμη. Στα κρυσταλλικά υλικά, το τοίχωμα περιοχής μετακινείται αναστρέψιμα σε πολύ μικρά εφαρμοσμένα πεδία. Δηλαδή τα τοιχώματα μετατοπίζονται λίγο όταν εφαρμόζεται το μαγνητικό πεδίο, αλλά αν αφαιρεθεί το πεδίο επιστρέφουν στο αρχικές θέσεις τους. Σε μεγαλύτερα πεδία, η κίνηση των τοιχωμάτων καθίσταται μη αναστρέψιμη. Στην περίπτωση αυτή, τα τοιχώματα περιοχής δεν επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις όταν το πεδίο αφαιρεθεί. Ο κύριος λόγος για την μη αντιστρεπτή κίνηση τοιχωμάτων περιοχής είναι ότι η ενέργεια των τοιχωμάτων δεν είναι σταθερή. Διαφέρει κατά ακανόνιστο τρόπο λόγω της διακύμανσης από τις τοπικές εσωτερικές τάσεις [17].

Θερμοκρασία Curie: Παρατηρείται ότι η αυθόρμητη μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνήτη εξαφανίζεται πάνω από μια θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie T_c (Γράφημα 2) [9]. Όλοι οι σιδηρομαγνήτες όταν θερμαίνονται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες γίνονται παραμαγνητικοί. Η θερμοκρασία μετάβασης από τη σιδηρομαγνητική σε παραμαγνητική

συμπεριφορά ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Σε αυτή τη θερμοκρασία η διαπερατότητα του υλικού πέφτει ξαφνικά και τόσο η μαγνητική αντίσταση (coercivity) όσο και ο παραμένον μαγνητισμό μηδενίζονται. Αυτό η ιδιότητα των σιδηρομαγνητών ήταν γνωστή πολύ πριν από το έργο του Curie. Στην πραγματικότητα η ύπαρξη μεταβατικής θερμοκρασίας αναφέρθηκε αρχικά από τον Gilbert ο οποίος ήταν ο συντάκτης της πρώτης πραγματείας για το μαγνητισμό [7].



Γράφημα 2: Εξάρτηση της μαγνήτισης κορεσμού M_s από τη θερμοκρασία. T_c είναι η θερμοκρασία Curie [9].

1.4 Μαγνητοελαστικές Ιδιότητες

1.4.1 Ορισμός Μαγνητοσυστολής

Ο όρος μαγνητοσυστολή αναφέρεται στην μεταβολή του μήκους που εμφανίζεται σε ένα υλικό όταν εκτίθεται σε μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1842 από τον James Prescott Joule (1818-1889), ο οποίος απέδειξε την ύπαρξή του μετρώντας τις αλλαγές στο μήκος που εμφανίζονταν σε δείγματα σιδήρου όταν υποβάλλονται σε αδύναμα μαγνητικά πεδία. Η μαγνητοσυστολή ενός δείγματος μήκους l ορίζεται:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (10)$$

όπου η μαγνητοσυστολή είναι μια γραμμική παραμόρφωση. Σε αυτή τη διπλωματική η μαγνητοσυστολή σημειώνεται ως λ για να ξεχωρίζει από την ολική (ελαστική συν μαγνητοσυστολική) παραμόρφωση ϵ .

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά υπάρχουν στην πραγματικότητα δύο τύποι μαγνητοσυστολών που πρέπει να ληφθούν υπόψη: αυθόρμητη μαγνητοσυστολή (spontaneous magnetostriction), που προκύπτει από την αυθόρμητη ευθυγράμμιση των περιοχών κατά την

ψύξη ως τη θερμοκρασία Curie και μαγνητοσυστολή επαγόμενη από πεδίο (field-induced), που προκύπτει από τον αναπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών λόγω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου.

Τιμές μαγνητοσυστολής για διάφορα υλικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ονομαστική μέγιστη σταθερά μαγνητοσυστολής διαφόρων υλικών. Πηγές [18], [9], [19], [20].

Υλικό	$\lambda(10^{-6})$
Σίδηρος	20
Νικέλιο	-40
Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅	35
Fe ₇₅ Si ₁₀ B ₁₅	32
Alfenol 13	40
NiCo	186
Terfenol-D	1640

1.4.2 Αυθόρμητη μαγνητοσυστολή

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό ψύχεται μέσω της θερμοκρασίας Curie, υφίσταται αλλαγή φάσης από μια υψηλής αταξίας παραμαγνητική κατάσταση σε μία διατεταγμένη σιδηρομαγνητική κατάσταση. Κατά την παραμαγνητική φάση, οι μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται τυχαία ενώ κατά τη μετάβαση στην σιδηρομαγνητική κατάσταση, μεγάλος αριθμός από αυτές (10^{12} - 10^{18}) ευθυγραμμίζονται. Οι όγκοι που προκύπτουν από αυτήν την ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών ονομάζονται μαγνητικές περιοχές, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 1.3.

Η μετάβαση στη σιδηρομαγνητική φάση συνοδεύεται από μια αλλαγή στο σχήμα, η οποία είναι γνωστή ως αυθόρμητη μαγνητοσυστολή. Η θερμοκρασία Curie του Terfenol-D είναι $T_c \cong 380$ °C. για το νικέλιο, $T_c \cong 358$ °C και για το FeSiB $\cong 425.9$ °C. [21] Γενικά, τα μαγνητοσυστολικά υλικά χρησιμοποιούνται στην διατεταγμένη κατάσταση τους και η μαγνητοσυστολή προκαλείται με εξωτερικά πεδία μαγνητίσεως.

1.4.3 Σύνοψη γραμμικών μαγνητοσυστολικών φαινομένων

Το αντίστροφο της μαγνητοσυστολής, όπου μια μηχανική τάση που εφαρμόζεται σε ένα μη μαγνητισμένο φερρομαγνητικό υλικό προκαλεί την αλλαγή του εύκολου άξονα μαγνήτισης και της αρχικής μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι γνωστό ως φαινόμενο Villari είναι αντίστροφη μαγνητοσυστολή.

Μια παραλλαγή της γραμμικής μαγνητοσυστολής είναι το φαινόμενο Wiedemann. Μια σιδηρομαγνητική ράβδος (ή καλώδιο) που υπόκειται σε εγκάρσιο ελικοειδές πεδίο τείνει να περιστραφεί. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η ροπή μπορεί να δημιουργηθεί από το πεδίο που παράγεται με τη διέλευση ρεύματος μέσω ενός σιδηρομαγνητικού σύρματος στο οποίο εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του άξονά του.

Το αντίστροφο του φαινομένου Wiedemann, που είναι γνωστό ως το φαινόμενο Matteucci, είναι η τροποποίηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας ενός σιδηρομαγνητικού σύρματος εφαρμόζοντας ροπή στρέψης. Τα φαινόμενα Joule και Wiedemann βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τύπους μαγνητικών ενεργοποιητών, ενώ τα Villari και Matteucci χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες. Τα γραμμικά μαγνητοσυστολικά φαινόμενα συνοψίζονται στον Πίνακα 2 [22].

Πίνακας 2

Όνομα Φαινομένου	Αποτέλεσμα Φαινομένου
Joule	Παραμόρφωση μέσω πεδίου
Villari	Ανισοτροπία μέσω παραμόρφωσης
Wiedemann	Στρέψη μέσω εγκάρσιου ελικοειδούς πεδίου
Matteucci	Ανισοτροπία μέσω στρέψης

1.4.4 Πιεζομαγνητισμός

Σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητη μια σύντομη αναφορά στο θέμα του πιεζομαγνητισμού (Piezomagnetism). Στην βιβλιογραφία των μαγνητοσυστολικών μορφομετατροπέων, ειδικά κάποιες δεκαετίες πίσω, συχνά εμφανιζόταν η λέξη «πιεζομαγνητικό», προφανώς ως συνώνυμο της λέξης "μαγνητοσυστολικό".

Ο πιεζομαγνητισμός διαφέρει από την αντίστοιχη ιδιότητα της μαγνητοσυστολής. Εάν ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο αντιστραφεί ως προς την κατεύθυνση, την ανάλογη αντιστροφή θα προκαλέσει και στην παραγόμενη τάση ως προς το πρόσημό της. Επιπλέον, μια πιεζομαγνητική ροπή μπορεί να παραχθεί από μηχανική καταπόνηση σε μηδενικό πεδίο, πράγμα που δεν ισχύει για τα μαγνητοσυστολικά υλικά [19]. Σύμφωνα με τον IEEE: «Ο πιεζομαγνητισμός είναι το γραμμικό μαγνητομηχανικό αποτέλεσμα ανάλογο με το γραμμικό ηλεκτρομηχανικό αποτέλεσμα της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας. Ομοίως, η μαγνητοσυστολή και η ηλεκτροσυστολή είναι ανάλογα φαινόμενα δευτέρου βαθμού. Αυτά τα φαινόμενα υψηλότερης τάξης μπορούν εξίσου αποτελεσματικά να ονομάζονται σαν της πρώτης τάξης εφόσον οι

παράμετροι του συστήματος που μεταβάλλονται, είναι μικρές σε σύγκριση με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων» [23]. Φυσικά ο πιεζομαγνητισμός είναι ένα ξεχωριστό κομμάτι πλέον με αρκετές εφαρμογές που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και την βιομηχανία [24] αλλά δεν είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

1.5 Άμορφα Μεταλλικά υλικά

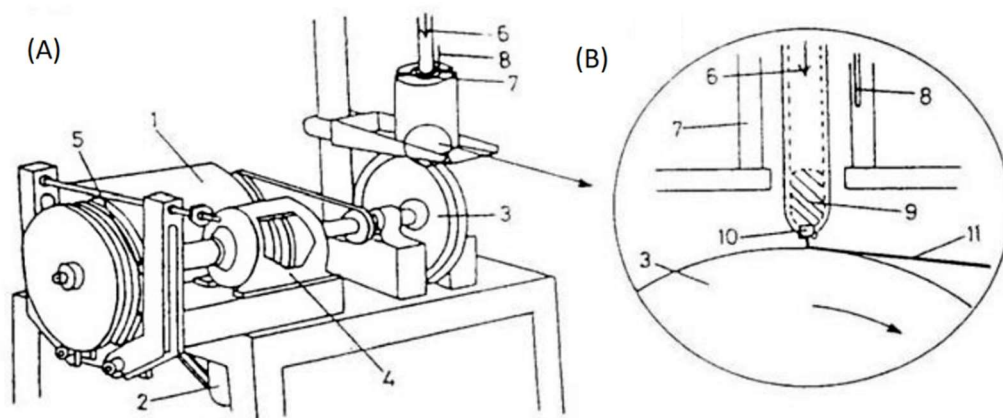
Τα μεταλλικά άμορφα υλικά ή μεταλλικά γυαλιά είναι μια μοναδική κατηγορία υλικών των οποίων οι ιδιότητες συνδυάζουν μερικές από τις ιδιότητες τόσο των μετάλλων όσο και των πολυμερών που διαφορετικά είναι ασύμβατες. Αποτελούνται από ένα συνδυασμό μετάλλων τα οποία, στη στερεά κατάσταση, παρουσιάζουν μια άμορφη ατομική δομή, σε αντίθεση με τα κοινά κράματα μετάλλων, τα οποία παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερα διατεταγμένο κρυσταλλικό μοτίβο. Αυτή η έλλειψη κρυσταλλικής τάξης στα μεταλλικά γυαλιά οδηγεί σε νέες συναρπαστικές λειτουργίες. Για παράδειγμα, η απουσία ορίων των κόκκων (η διασύνδεση μεταξύ των κρυστάλλων) εξαλείφει τη διάδοση των ρωγμών και μειώνει τη διάβρωση, καθιστώντας τα ισχυρότερα και λιγότερο εύθραυστα από πολλά άλλα μέταλλα και κράματα, τέλεια για δομικές εφαρμογές. Επιπλέον, όπως κάθε άλλο γυαλί, μαλακώνουν και ρέουν όταν θερμαίνονται, επιτρέποντας τη χρήση ανέξοδων τεχνικών επεξεργασίας που συνήθως εφαρμόζονται στα πλαστικά, όπως η χύτευση με έγχυση. Σε αντίθεση με τα πλαστικά, όμως, είναι καλοί θερμικοί και ηλεκτρικοί αγωγοί.

Τα άμορφα κράματα, παρήχθησαν για πρώτη φορά σε μορφή ταινίας το 1959 από τον Duwez. Διάφορες τεχνικές αναπτύχθηκαν για την παραγωγή άμορφων κραμάτων, όπως το κενό εξάτμισης, εμφύτευση ιόντων, cathode sputtering και ταχέως ψυχόμενο ρευστό σε περιστρεφόμενο τύμπανο. Έχει βρεθεί ότι οι ιδιότητες των άμορφων κραμάτων επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες και μεθόδους παραγωγής. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος παραγωγής είναι η τήξη μέσω περιστρεφόμενου τυμπάνου.

Πιο συγκεκριμένα η χύτευση άμορφου μεταλλικού σύρματος (ή ταινίας), απευθείας από τήγμα (rapid quenching from the melt), είναι η πλέον διαδεδομένη με δυνατότητα εφαρμογής και σε βιομηχανική κλίμακα. Η μέθοδος κατασκευής, συνίσταται στην εκτόξευση τηγμένου μεταλλικού υλικού, σε ταχέως κινούμενο μεταλλικό υπόστρωμα, συνήθως περιστρεφόμενο μεταλλικό κύλινδρο (Chill block melt spinning: CBMS). Με βάση τη μέθοδο αυτή έχουν αναπτυχθεί τεχνικές με διάφορες παραλλαγές. Ένα παράδειγμα διάταξης παραγωγής ribbon παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Οι κορδέλες που παράγονται είναι συνήθως πλάτους 1-100 mm και πάχους 25-50 μm με μήκη από μερικά μέτρα μέχρι και πολλά χιλιόμετρα σε έναν μόνο κύκλο εκτέλεση του συστήματος. [25]

Τα άμορφα κράματα παράγονται με βαφή των κραμάτων από την υγρή κατάσταση με ταχύτητες βαφής τα 10^5 - 10^6 K/s έτσι ώστε να μην προλάβουν να κρυσταλλωθούν και να παραμένει το υπέρψυκτο υγρό σε στερεή κατάσταση. Στην ουσία αποθηκεύονται τάσεις και η δομή χαρακτηρίζεται από έλλειψη ατομικής περιοδικότητας πέρα από λίγες ατομικές αποστάσεις. [26] Η έλλειψη της ατομικής περιοδικότητας σε μεγάλη απόσταση έχει επιβεβαιωθεί με τη χρήση της περίθλασης ακτινών X. [27]



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση διάταξη παραγωγής άμορφων ταινιών όπου: 1)Κινητήρας, 2)Φρένο 3)Χάλκινο τύμπανο, 4)Μαγνητικό φρένο, 5)Φρένο δίσκου, 6)Αργό, 7)Ηλεκτρικός φούρνος, 8)Θερμοζεύγος, 9)Λιωμένο κράμα, 10) Ακροφύσιο, 11)Δείγμα άμορφης ταινίας [28]

Τα άμορφα κράματα σε μορφή σύρματος έγιναν διαθέσιμα το 1982. Τα σύρματα κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά από τον Masumoto T [29] χρησιμοποιώντας τη μέθοδο περιδίνησης τήγματος σε νερό (in-rotating-water melt spinning method).

Τα άμορφα κράματα γενικά αποτελούνται από περίπου 80% μεταβατικά μέταλλα Fe, Co ή Ni και 20% μεταλλοειδή στοιχεία όπως C, B, P ή Si. Αυτός ο συνδυασμός παράγει έναν μεγάλο αριθμό κραμάτων με διαφορετικές συνθέσεις, οδηγώντας σε διάφορες τιμές των M_s , M_c , T_c , θερμοκρασία κρυστάλλωσης και μαγνητοαντίστασης [30].

Ως αποτέλεσμα της άμορφης δομής τους, τα μεταλλικά γυαλιά έχουν χαμηλό συνεκτικό πεδίο, υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα και χαμηλή ανισοτροπία. Η μέγιστη επιδεκτικότητα είναι της τάξης των 10^5 (αδιάστατο μέγεθος) και μια τυπική επαγωγή κόρου είναι περίπου 1 Tesla. Τα άμορφα κράματα είναι πολύ ισχυρά υλικά με μεγάλη αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις. Σε συνθήκες δωματίου η τυπική επιμήκυνση φτάνει μέχρι το 2% υπό τάση. Τέλος εμφανίζεται υψηλή αντοχή στη θραύση [20], [31].

1.6 Αισθητήρες

1.6.1 Ορισμός αισθητήρων και μορφομετατροπέων

Υπάρχει μια συνεχής εξέλιξη της χρήσης των λέξεων “μορφομετατροπέας” (transducer) και “αισθητήρας” (sensor) καθώς και της διαφοροποίησης μεταξύ τους. Ιδιαίτερα από τη στιγμή που καθιερώθηκε ο “έξυπνος αισθητήρας” (και όχι ο έξυπνος μορφομετατροπέας) και πλέον έχει γίνει ένας πολύ κοινός όρος. Πέρα από το προφανές, δηλαδή ότι στην Ελληνική είναι πολύ πιο εύηχη και κατανοητή πλέον η λέξη αισθητήρας από ότι ο μορφομετατροπέας, θα πρέπει να τονιστεί και η ταύτιση με την Αγγλική που είναι και η κυρίαρχη γλώσσα στην τεχνολογία.

Ορισμός του μορφομετατροπέα - *Ο μορφομετατροπέας είναι μια συσκευή που αλλάζει την ενέργεια από μία μορφή σε μια άλλη* - και βασίζεται εν μέρει στην ευρεία αποδοχή του “έξυπνου αισθητήρα”. Ειδικότερα, είναι μια συσκευή που μετατρέπει την ενέργεια εισόδου σε ενέργεια εξόδου. Τυπικά, η ενέργεια εξόδου είναι σε διαφορετική μορφή από την ενέργεια εισόδου, αλλά υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς και τη μετατροπή από μια μορφή μηχανικής ενέργειας σε μια άλλη μορφή μηχανικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα σπειροειδές λεπτό μεταλλικό διάφραγμα μετατρέπει τη μεταβολή της διαφορικής πίεσης σε γραμμική αλλαγή κίνησης με μια συγκεκριμένη δύναμη και μια διμεταλλική λωρίδα μετατρέπει μια αλλαγή θερμοκρασίας σε κίνηση με μια δύναμη. Εκτός της ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας, οι μορφές ενέργειας περιλαμβάνουν επίσης τη θερμότητα, φως, ακτινοβολία, ήχο, δόνηση και άλλες. Μερικές φορές, δεν υπάρχει επιπλέον εξωτερική εφαρμογή ενέργειας πέραν της ενέργειας εισόδου που μετατρέπεται ή αλλάζει.

Οι έξοδοι των μορφομετατροπέων είναι συχνά, αλλά όχι απαραίτητα, υπό μορφή τάσης ή ρεύματος που έχει άμεσα μετατραπεί από την ενέργεια εισόδου. Ένας μορφομετατροπέας που δεν χρειάζεται κάποια επιπλέον ενέργεια για να εξάγει το επιθυμητό αποτέλεσμα (πέρα από την ενέργεια που μετατρέπει) καλείται ενεργός μορφομετατροπέας (active transducer) [32].

Ένας μορφομετατροπέας που απαιτεί εξωτερική παροχή ενέργειας ονομάζεται παθητικός μορφομετατροπέας (passive transducer). Ένας παθητικός μορφομετατροπέας παράγει ένα σήμα εξόδου που είναι συνήθως αλλαγή μιας ηλεκτρικής παραμέτρου, όπως αντίσταση, χωρητικότητα και αυτεπαγωγή. Για παράδειγμα, ένα φωτοκύτταρο αποκρίνεται σε μια μεταβολή στο επίπεδο φωτός προκαλώντας σχετική αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση κατά μήκος δύο τερματικών (αυτό είναι διαφορετικό από ένα ηλιακό κύτταρο που παράγει μια

ηλεκτρική έξοδο από μια είσοδο φωτός). Μια εξωτερική παροχή ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή αυτής της αλλαγής αντίστασης σε αλλαγή τάσης ή ρεύματος.

Ένας αισθητήρας γενικά ορίζεται ως μια συσκευή εισόδου που παρέχει ένα χρησιμοποιήσιμο σήμα εξόδου ή πληροφορίες για μια συγκεκριμένη είσοδο ενός φυσικού μεγέθους. Η είσοδος της φυσικής ποσότητας που πρέπει να μετρηθεί ονομάζεται μετρούμενη (όπως η μετρούμενη πίεση, η θερμοκρασία ή η θέση) και επηρεάζει τον αισθητήρα με τρόπο που προκαλεί μια έξοδο που είναι ενδεικτική της ποσότητας εισόδου. Η έξοδος των πιο σύγχρονων αισθητήρων είναι ένα ηλεκτρικό σήμα αλλά, εναλλακτικά, θα μπορούσε να είναι κίνηση, πίεση, ροή ή άλλοι χρήσιμοι τύποι εξόδου. Μερικά παραδείγματα αισθητήρων περιλαμβάνουν τα εξής: ένας αισθητήρας πίεσης τυπικά μετατρέπει μία πίεση ρευστού (αερίου ή υγρού) σε ένα σήμα ηλεκτρικής εξόδου ενδεικτικό της πίεσης, ένας μαγνητοσυστολικός αισθητήρας θέσης μετατρέπει μια θέση σε ένα σήμα ηλεκτρικής εξόδου ενδεικτικό της μετρούμενης θέσης, και πολλοί άλλοι τύποι αισθητήρων βρίσκονται στη καθημερινή μας ζωή.

Ένας αισθητήρας μπορεί να ενσωματώνει αρκετούς μορφομετατροπείς [33]. Στην γενική περίπτωση, ένας αισθητήρας είναι το σύνολο των στοιχείων που απαιτείται για την ανίχνευση και την επικοινωνία ενός συγκεκριμένου γεγονότος, ενώ ένας μορφομετατροπέας μπορεί να είναι το στοιχείο εντός αυτού του συνόλου το οποίο επιτυγχάνει την ανίχνευση και / ή την ποσοτικοποίηση του συμβάντος.

Για παράδειγμα, ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από ένα μαγνητοσυστολικό σύρμα που μετατρέπει την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου (λόγω μαγνητοσυστολής του σύρματος) σε αλλαγή στην τάση του ρεύματος στα άκρα του πηνίου είναι ένας μορφομετατροπέας, αλλά ένας αισθητήρας θέσης θα περιλαμβάνει τον συγκεκριμένο μορφομετατροπέα συν για παράδειγμα όλα τα στοιχεία του ηλεκτρικού κυκλώματος που χρειάζονται για να παραχθεί ένα ηλεκτρικό σήμα κατανοητό και εύχρηστο, όπως ασ πούμε τάση εξόδου 0-5 VDC.

Σύμφωνα με αυτούς τους ορισμούς, ένας μορφομετατροπέας μερικές φορές μπορεί να είναι ένας αισθητήρας και το ανάποδο. Για παράδειγμα, ένα μικρόφωνο ή ένα θερμοστοιχείο μπορεί να ταιριάζει στην περιγραφή και ενός μορφομετατροπέα και ενός αισθητήρα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σύγχυση και έτσι χρησιμοποιείται ορολογία σε συγκεκριμένους τομείς (π.χ. ένας μηχανικός ήχου σπάνια αναφέρεται στο μικρόφωνο ως αισθητήρα, προτιμάται η ονομασία του μορφομετατροπέα (ή μετατροπέα).

1.6.2 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές των άμορφων κραμάτων, κατά κύριο λόγο, βασίζονται σε μεταβολές της επαγωγής σε ένα πηνίο που έχει ως πυρήνα ένα άμορφο κράμα. Με άλλα λόγια, η επίδραση των μαγνητικών πεδίων ή οι εφαρμοζόμενες τάσεις προσδιορίζουν της μαγνητική επιδεκτικότητα των άμορφων κραμάτων, καθιστώντας τα χρήσιμα υλικά για εφαρμογές αισθητήρων. Τέτοιες επιδράσεις σχετίζονται άμεσα με την άμορφη δομή, την μαγνητοσυστολή και την κινητικότητα των ατόμων των άμορφων κραμάτων. Αυτά επιτρέπουν τον καθορισμό της μαγνητικής ανισοτροπίας και επιτυγχάνονται μέσω θερμικές επεξεργασίες υπό την επίδραση είτε εφαρμοσμένου πεδίου είτε τάσης. Τέτοιες κατεργασίες επιτρέπουν τον καθορισμό των μαγνητομηχανικών ιδιοτήτων [34].

Οι αισθητήρες άμορφων κραμάτων μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους [31]. Εδώ κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες: α) αισθητήρες που χρησιμοποιούν χαμηλής μαγνητοσυστολής κράματα, όπως αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, αισθητήρες μετατόπισης και ρεύματος, β) αισθητήρες που χρησιμοποιούν υψηλής μαγνητοσυστολής υλικά όπως αισθητήρες δύναμης, τάσης, παραμόρφωσης, στρέψης και πίεσης. Ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων δύναμης, πεδίου, πίεσης κλπ. έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [35], [36] και [37]. Τυπικές ιδιότητες και τα πεδία εφαρμογής αισθητήρων που χρησιμοποιούν μαγνητικά υλικά παρατίθενται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Μαγνητικά φαινόμενα σε εφαρμογές αισθητήρων [38].

Ετος	Φυσική αρχή λειτουργίας	Επεξήγηση	Πρακτική χρήση
1842	Φαινόμενο Joule	Μεταβολή του σχήματος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού μέσω μαγνητοσυστολής	Σε συνδυασμό με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία για μαγνητόμετρα και ποτενσιόμετρα
1846	Φαινόμενο ΔΕ	Αλλαγή του μέτρου του Young με την μαγνήτιση	Μαγνητοσυστολικές γραμμές υστέρησης για μέτρηση μαγνητικού πεδίου
1847	Φαινόμενο Matteucci	Η στρέψη μιας σιδηρομαγνητικής ράβδου σε ένα διάμηκες πεδίο αλλάζει τη μαγνήτιση	Μαγνητοελαστικοί αισθητήρες
1856	Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση	Αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης με αλλαγή του μαγνητικού πεδίου	Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης

<i>Έτος</i>	<i>Φυσική αρχή λειτουργίας</i>	<i>Επεξήγηση</i>	<i>Πρακτική χρήση</i>
1858	Φαινόμενο Wiedemann	Προκαλείται τάση στρέψης σε ρευματοφόρο μαγνητοσυστολικό σύρμα όταν εφαρμόζεται διάμηκες πεδίο	Μετρήσεις δύναμης και ροπής
1865	Φαινόμενο Villari	Αλλαγή της μαγνήτισης λόγω δυνάμεων εφελκυσμού ή συμπίεσης	Μαγνητοελαστικοί αισθητήρες
1879	Φαινόμενο Hall	Ένας ρευματοφόρος κρύσταλλος παράγει μια εγκάρσια (ως προς την κατεύθυνση του ρεύματος) τάση όταν υποβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο κατακόρυφο στην επιφάνεια του	Αισθητήρες Hall
1903	Επιδερμικό φαινόμενο	Μετατόπιση ρεύματος από το εσωτερικό του υλικού στο επιφανειακό στρώμα εξαιτίας των δινορευμάτων	Αισθητήρες απόστασης, Αισθητήρες Εγγύτητας
1931	Φαινόμενο Sixtus-Tonks	Παλμική μαγνήτιση από μεγάλα άλματα Barkhausen	Αισθητήρες- σύρματα Wiegand
1962	Φαινόμενο Josephson	Φαινόμενο σήραγγας μεταξύ υπεραγωγών που διαχωρίζονται από ένα λεπτό φιλμ. Κβαντικό φαινόμενο	Μαγνητόμετρο SQUID
2016	Φαινόμενο Joule	Συσχέτιση της συχνότητας συντονισμού μαγνητοσυστολικών συρμάτων με το περιβάλλον Ιξώδες Υγρό.	Αισθητήρας Ιξώδους [39]

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΜΟΡΦΑ ΣΥΡΜΑΤΑ

2.1 Εισαγωγή

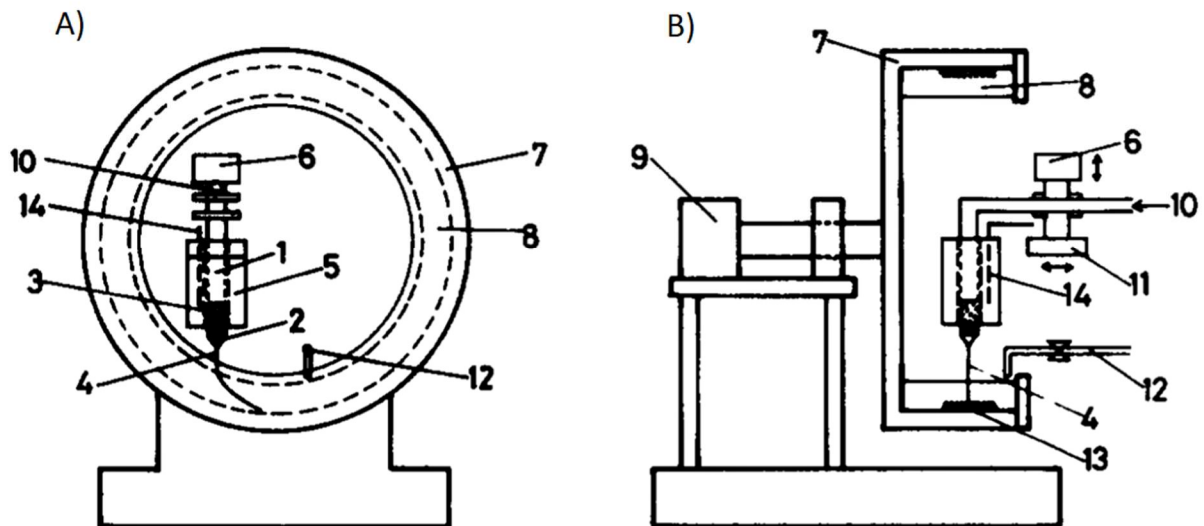
Τα άμορφα σύρματα διαφόρων κραμάτων που έχουν παραχθεί μέχρι σήμερα έχουν παρουσιάσει υψηλές μηχανικές αντοχές [40] και υψηλή αντίσταση στη διάβρωση [41], [42] οι οποίες βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με εκείνα για το υλικό ταινίας. Επιπροσθέτως, τα άμορφα καλώδια παρουσιάζουν μερικές μοναδικές μαγνητικές ιδιότητες, οι οποίες διαφέρουν από τις άμορφες ταινίες, λόγω της διαφορετικής δομής των τομέων που προκαλείται από τη διαφορετική διαδικασία στερεοποίησης και ταχύτητας βαφής [43].

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ένα σύντομο ιστορικό των άμορφων καλωδίων. Επιγραμματικά καταγράφονται οι μαγνητικές και μηχανικές ιδιότητες καθώς και η επίδραση που έχει η θερμική και μηχανική επεξεργασία στις ιδιότητες των συρμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες από τις πιο σημαντικές εφαρμογές που έχουν τα άμορφα μαγνητοσυστολικά καλώδια εν συντομία.

2.2 Παραγωγή Άμορφων Συρμάτων

Τα άμορφα κράματα παρήχθησαν, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για πρώτη φορά σε μορφή ταινία με τη μέθοδο "melt-spinning" το 1959 από τον Duwez. Τη δεκαετία 1980, η ομάδα του Masumoto [41] επέτυχαν για πρώτη φορά την παραγωγή άμορφων συρμάτων με την τεχνική "in-rotating-water melt spinning technique". Στην τεχνική αυτή, οι ρυθμοί ψύξης είναι $5 \times 10^5 - 1 \times 10^6$ K/s για σύρμα Fe-Si-B που είναι και σύρμα που χρησιμοποιήθηκε στη πειραματική διαδικασία. Το Σχήμα 3 απεικονίζει το σύστημα παραγωγής άμορφων συρμάτων. Στην διαδικασία παραγωγής, το κράμα πρώτα τήκεται σε έναν ηλεκτρικό κλίβανο πριν εκτοξευθεί, με υψηλή πίεση αργού μέσω ενός ακροφυσίου, το οποίο βρίσκεται στο τέλος του σωλήνα χαλαζία. Το λιωμένο κράμα στερεοποιείται ταχέως με ψύξη νερού το οποίο περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και δημιουργείται ένα συνεχές σύρμα. Αυτό το σύρμα συλλέγεται λόγω φυγόκεντρου δύναμης στην εσωτερική πλευρά του τυμπάνου. Τυπικά, η ποσότητα του κράματος που τήκετε σε μία εκτέλεση (ένα run) είναι περίπου 1g. Το μέγιστο μήκος του σύρματος που κατασκευάζεται μέσω αυτής της τεχνικής μπορεί να είναι μέχρι και αρκετά χιλιόμετρα. Επιπλέον, μεταβάλλοντας την εσωτερική διάμετρο του ακροφυσίου, παράγονται σύρματα με διάφορες διαμέτρους από 80 έως 250 μm [41]. Η διακύμανση της διαμέτρου του σύρματος είναι κοντά στο 10% για σύρμα με διάμετρο περίπου 150 μm και

τείνει να μειώνεται με τη μείωση της διαμέτρου [29]. Επομένως, το σύρμα που παράγεται με αυτή την τεχνική έχει καλή ομοιομορφία. Η μέγιστη διάμετρος που επιτρέπει τον σχηματισμό του άμορφου σύρματος εξαρτάται από τη σύνθεση του. Αργότερα η τεχνική χρησιμοποιήθηκε και με κάποιες αλλαγές [44], [45] όμως η φυσική αρχή λειτουργίας και ο κύριος σχεδιασμός δεν άλλαξε.



- | | | |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 1. Σωλήνας χαλαζία | 6. Έμβολο αέρα | 11. Μηχανισμός ταχείας όδευσης |
| 2. Στόμιο σωλήνα | 7. Περιστροφικό τύμπανο | 12. Παροχέας νερού |
| 3. Τετηγμένο κράμα | 8. Νερό ψύξης | 13. Σύρμα |
| 4. Πίδακας κράματος | 9. Κινητήρας | 14. Θερμοστοιχείο |
| 5. Ηλεκτρικός φούρνος | 10. Αργό αέριο | |

Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση της συσκευής βαφής-τήγματος για την παραγωγή αμόρφων συρμάτων.

A) Πρόσοψη. B) Αριστερή πλάγια όψη. [41]

Έχουν λοιπόν εδραιωθεί οι ακόλουθοί κύριοι παράμετροι βαφής που επηρεάζουν την δημιουργία του τελικού σύρματος:

- i. Η απόσταση από την επιφάνεια του νερού μέχρι το ακροφύσιο
- ii. Το μέγεθος του ακροφυσίου
- iii. Η πίεση εκτόξευσης
- iv. Η θερμοκρασία του τηγμένου κράματος
- v. Η θερμοκρασία του νερού ψύξης

vi. Ο λόγος της ταχύτητα του νερού προς την ταχύτητα του τυμπάνου.

Η διάμετρος ενός καλωδίου μπορεί να μειωθεί με ψυχρή εξέλαση ή με θερμή εξέλαση. Με τη ψυχρή κατεργασία η διάμετρος του σύρματος μπορεί να μειωθεί από 150μm σε 50μm μετά από διαδικασία πολλαπλών κύκλων. Έχει βρεθεί [43] ότι η εφαρμογή της ψυχρής εξέλασης στα σύρματα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ομοιογένειας του σχήματος, της βελτίωσης της αντοχής σε θραύση και της επιμήκυνσης του κατάγματος. Τα καλώδια είναι τόσο εύκαμπτα ώστε δεν έχουν παρατηρηθεί ρωγμές στην επιφάνεια των καλωδίων που έχουν επιβληθεί σε ψυχρή κατεργασία. Ωστόσο, παράλληλα με τα προηγούμενα, η ψυχρή κατεργασία μειώνει το μέτρο ελαστικότητας του Young [43]. Η διαδικασία οδηγεί επίσης σε αλλαγές στις μαγνητικές ιδιότητες του σύρματος λόγω των εσωτερικών τάσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της εξέλασης. Τα μειονεκτήματα που προκαλούνται από το μπορούν να μειωθούν είτε με θερμή εξέλαση είτε με ανόπτηση. Το σίγουρο είναι ότι πλέον υπάρχουν τα εργαλεία ώστε να παραμετροποιηθούν οι ιδιότητες των υλικών σε βαθμό που να τα καθιστά κατάλληλα για την εκάστοτε αισθητήρια διάταξη.

2.3 Μηχανικές Ιδιότητες

Τα άμορφα καλώδια παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και καλή ποιότητα κάμψης. Οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες για άμορφα καλώδια φαίνονται στον Πίνακας 4. Τόσο η αντοχή εφελκυσμού όσο και η επιμήκυνση αρχικά αυξάνονται με την ψυχρή έλαση· η περαιτέρω κατεργασία οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό και της επιμήκυνσης [41]. Η μέγιστη τιμή αντοχής εφελκυσμού για το καλώδιο $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ είναι περίπου 3580MPa, η οποία είναι συγκρίσιμη με τις καλύτερες χορδές πιάνου [46].

Πίνακας 4: Η αντοχή σε εφελκυσμό (σ), η ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_f) και το μέτρο ελαστικότητας σε ακατέργαστο άμορφο σύρμα [40], [47].

Κράμα	σ (MPa)	ϵ_f (%)	E (GPa)
$\text{Co}_{77.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{10}$	3580	3	-
$\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$	3450	3	123
$\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	3410	2.8	119
$\text{Fe}_{77.5}\text{P}_{12.5}\text{C}_{10}$	2790	2.7	104
$(\text{Ni}_{0.75}\text{Si}_{0.08}\text{B}_{0.17})_{99}\text{Al}_1$	1730	2.9	115

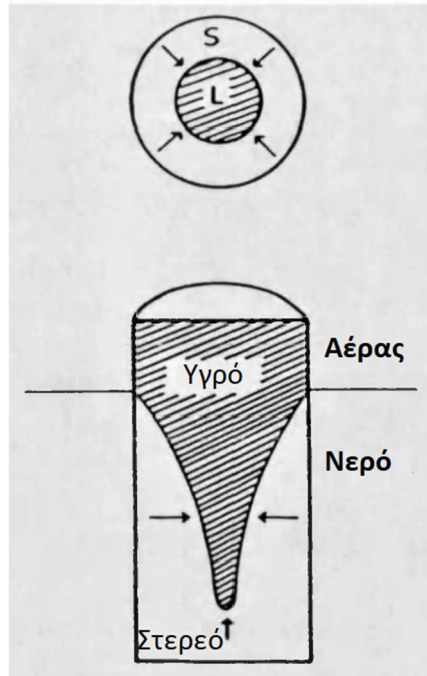
Με την αύξηση της διαμέτρου του καλωδίου Fe-Si-B από τα 80μm στα 210μm, το μέτρο ελαστικότητας κατά τον κορεσμό, E_s αυξάνει από τα 165GPa στα 175GPa και επίσης παρατηρείται αύξηση του μέτρου, E_0 , για μηδενικό πεδίο [43]. Ωστόσο, το ΔE ($\Delta E = (E_s - E_0)/E_0$) μειώνεται από τα 6% στο 1%. Έχει προταθεί ότι η αύξηση του E_s οφείλεται στην αύξηση του βαθμού της δομικής τάξης (μείωση της εντροπίας) ως αποτέλεσμα ενός βραδύτερου ρυθμού ψύξης. Στην ουσία, όσο πιο αργή είναι η ψύξη τόσο το υλικό τείνει προς την κρυσταλλική του δομή αφού υπάρχει μεγαλύτερος χρόνος για την ανάπτυξη των φύτρων (κέντρων) κρυστάλλωσης. Η μείωση του ΔE οφείλεται στη μείωση των μαγνητικών τοιχωμάτων 90° και των μαγνητικών περιοχών τύπου λαβυρίνθου. Αντίθετα η ψυχρή έλαση οδηγεί σε μία μονοτονική μείωση της τιμής E_s του σύρματος Fe-Si-B από τα 175GPa στα 165GPa. Η μείωση του E_s , σε αυτή τη περίοδο, οφείλεται στην αύξηση της δομικής αταξίας λόγω της επακόλουθης παραμόρφωσης.

2.4 Κατανομή εσωτερικών τάσεων σε χυτευμένο (as-cast) Άμορφο Σύρμα

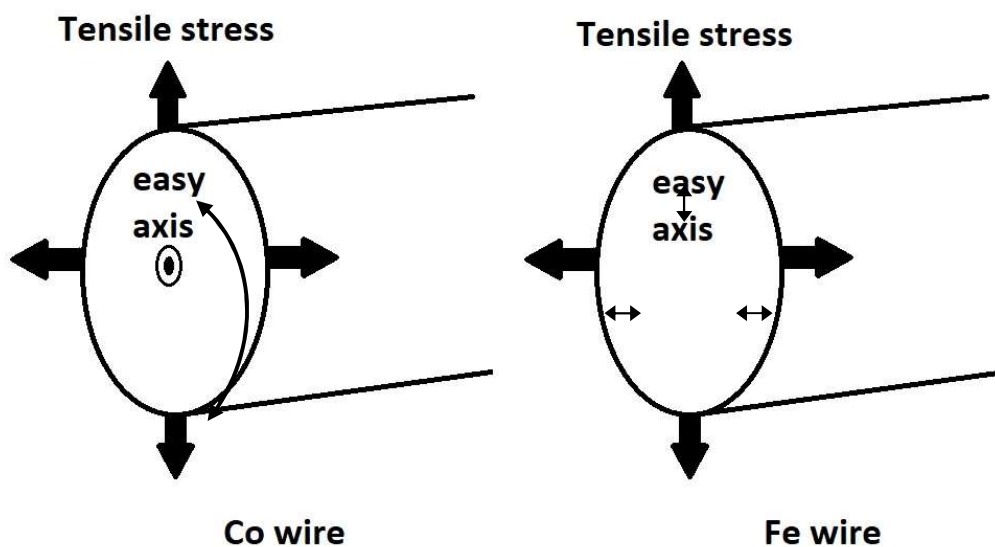
Ο όρος του “as-cast” άμορφου σύρματος αναφέρεται στο μέταλλο που δεν έχει υποστεί τελική επεξεργασία ή οποιαδήποτε κατεργασία οποιουδήποτε είδους συμπεριλαμβανομένης της θερμικής επεξεργασίας μετά τη χύτευση. Ομοίως, υπάρχει το όπως έχει εξελαθεί “as-drawn”, όπως έχει σφυρηλατηθεί “as-forged” και όπως έχει μορφοποιηθεί σε σχήμα “as-rolled”.

Οι διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες των άμορφων ταινιών και συρμάτων με την ίδια σύνθεση μπορούν να εξηγηθούν από τις διαφορετικές εσωτερικές τους κατανομές τάσεων που επάγονται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών στερεοποίησης. Στις ταινίες που παράγονται με περιστρεφόμενο τύμπανο (melt spinning όπως προαναφέρθηκε), δημιουργείται βαθμωτή αλλαγή της θερμοκρασίας από την επιφάνεια του τυμπάνου προς την εξωτερική επιφάνεια της ταινίας. Συνεπώς, οι εσωτερικές τάσεις κατανέμονται τυχαία στις εγκάρσιες και διαμήκεις διευθύνσεις της ταινίας. Αντίστοιχα στην περίπτωση των άμορφων συρμάτων που παράγονται με την τεχνική νηματοποίησης σε περιστρεφόμενο ύδωρ (in-rotating-water melt spinning technique), όταν το τετηγμένο κράμα έρχεται σε επαφή πρώτα με το νερό, το εξωτερικό κέλυφος στερεοποιείται και στη συνέχεια στερεοποιείται και συρρικνώνεται ο εσωτερικός πυρήνας. Το Σχήμα 4 απεικονίζει τις διαφορετικές φάσεις του σύρματος κατά τη στιγμή της βαφής. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ψύξης, δημιουργείται μια ακτινική τάση στο εξωτερικό κέλυφος και μια αξονική τάση εφελκυσμού στον εσωτερικό πυρήνα. Έχει προταθεί λοιπόν ότι η εσωτερική αξονική τάση που προκαλείται από την βαθμωτή αλλαγή της

θερμοκρασίας στον εσωτερικό πυρήνα είναι πολύ μικρή. Η δημιουργία εσωτερικής τάσης κατά την διεύθυνση του άξονα οφείλεται στη συρρίκνωση του όγκου του σύρματος. Οι προτεινόμενες εσωτερικές κατανομές τάσεων για άμορφα σύρματα με βάση τον Fe και το Co παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 4: Πλευρικής και εγκάρσιας διατομής του άμορφου σύρματος κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης [48].



Σχήμα 5: Κατανομή εσωτερικών τάσεων και εύκολος άξονας μαγνήτισης άμορφων συρμάτων με βάση τον Fe και με βάση το Co [49].

Ως αποτέλεσμα αυτών των κατανομών τάσεων, δημιουργείται μια αξονική ανισοτροπία στον εσωτερικό πυρήνα του θετικά μαγνητοσυστολικού σύρματος (πλούσια σε Fe) και δημιουργείται μια αξιμουθιακή ανισοτροπία σε αρνητικά μαγνητοσυστολικά σύρματα (πλούσια σε Co) [48]. Επίσης, η ακτινική τάση εφελκυσμού δημιουργεί μια ισχυρή ακτινική ανισοτροπία στο εξωτερικό κέλυφος του σύρματος με θετική μαγνητοσυστολή και μια κατανομή περιφερειακής ανισοτροπίας για ένα αρνητικά μαγνητοσυστολικό σύρμα.

Η διαδικασία στερεοποίησης λαμβάνει χώρα σύμφωνα με τις ακόλουθες συνθήκες:

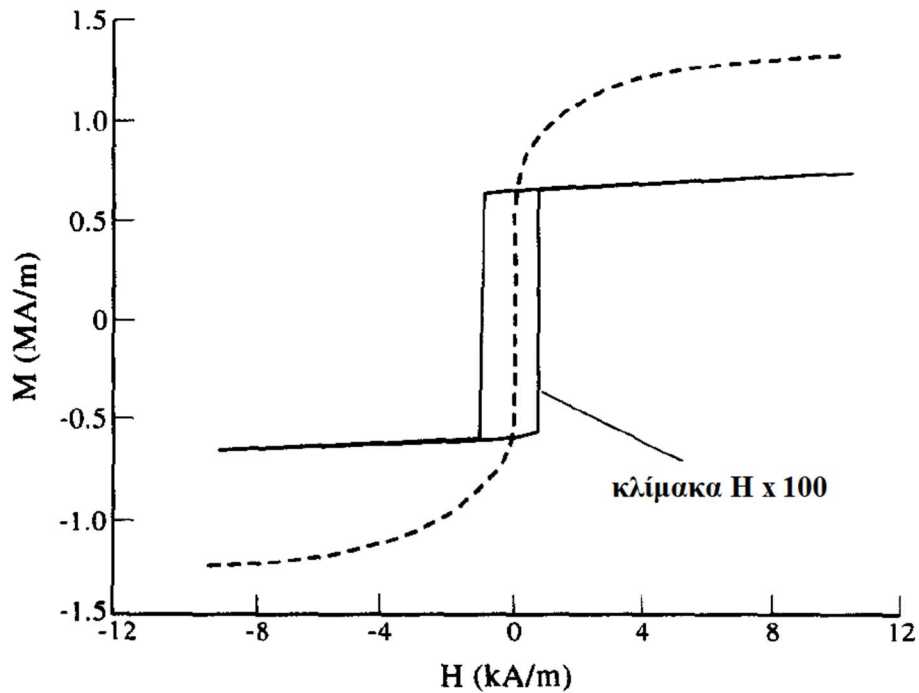
1. Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, διατηρείται το κυλινδρικό σχήμα του τετηγμένου κράματος.
2. Η μεταφορά θερμότητας από το τετηγμένο κράμα προς το νερό είναι κατά μήκος της ακτινικής κατεύθυνσης.
3. Το εξωτερικό κέλυφος στερεοποιείται πρώτα και η στερεοποίηση διαδίδεται με κυλινδρική συμμετρία προς τον εσωτερικό πυρήνα.
4. Η πηγή της εσωτερικής τάσης είναι η μη ταυτόχρονη στερεοποίηση των δύο στρωμάτων.

2.5 Μαγνητικές Ιδιότητες

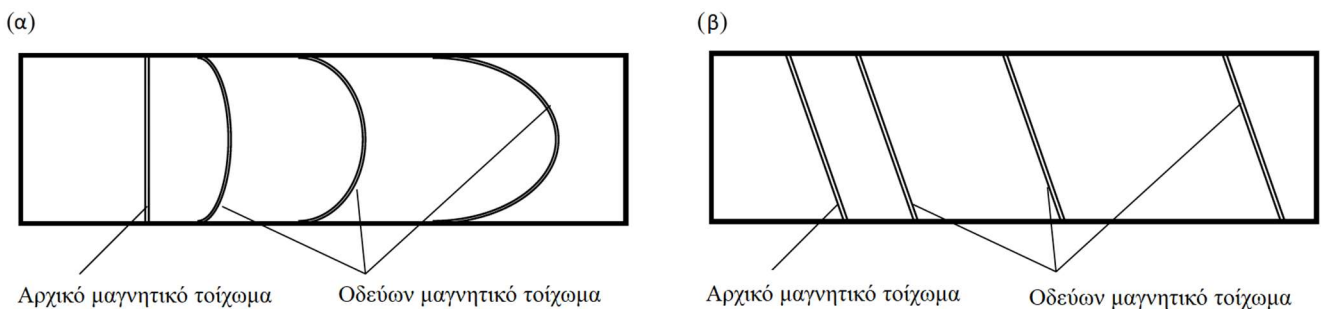
2.5.1 Μεγάλα άλματα Barkhausen και κίνηση τοιχωμάτων

Η πιο εντυπωσιακή διαφορά στις μαγνητικές ιδιότητες των άμορφων συρμάτων από εκείνες των ταινιών παρατηρείται σε χαμηλά μαγνητικά πεδία. Ένα μη μαγνητισμένο μαγνητοσυστολικό άμορφο σύρμα μαγνητίζεται μόνο όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, H_n , και η μαγνήτιση λαμβάνει χώρα μέσω του Μεγάλου Άλματος Barkhausen [Large Barkhausen Jump (LBJ)] [50]. Όταν η μέγιστη τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου είναι κάτω από ένα επίπεδο, στο σύρμα δεν λαμβάνει χώρα καμία μη αναστρέψιμη (irreversible) αλλαγή ροής. Το LBJ συμβαίνει λόγω της κίνησης ενός ενιαίου τοιχώματος σε όλο τον εσωτερικό πυρήνα του σύρματος [51]. Οι τυπικοί βρόχοι υστέρησης φαίνονται στο Γράφημα 3.

Άμορφα σύρματα με μηδενική μαγνητοσυστολή ή με πολύ μικρή μαγνητοσυστολή ($\lambda_s \leq 5 \times 10^{-6}$) δεν εμφανίζουν καθόλου το LBJ. Αυτή η συμπεριφορά θεωρείται ότι σχετίζεται με τη μείωση της ενέργειας του τοιχώματος λόγω της μείωσης του λ_s που με την σειρά του μειώνει το μαγνητικό πεδίο H_n .



Γράφημα 3: Βρόχοι υστέρησης άμορφου σύρματος $Fe_{77}Si_8B_{15}$ (θετικής μαγνητοσυστολής) μετρούμενων στα 60Hz: Βρόχος M-H χαμηλού πεδίου που δείχνει πεδίο αλλαγής (συνεχής γραμμή) και βρόγχος M-H υψηλού πεδίου που προσεγγίζει τον κορεσμό (διακεκομμένη γραμμή). [42]



Σχήμα 6: Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων. (α) Τοίχωμα σε κίνηση “ιστίου” (bowing). (β) Ενιαία κίνηση τοιχώματος (rigid). [31]

Η τιμή H_n μπορεί να παραμετροποιηθεί:

- Απομακρύνοντας τις εσωτερικές τάσεις:
 - θερμικής επεξεργασίας (ανόπτησης),
 - ανόπτησης μέσω εξαναγκασμένης μαγνήτισης κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας,
- και απομακρύνοντας το εξωτερικό στρώμα που προκαλεί τάσεις στον εσωτερικό πυρήνα του σύρματος
 - προσβολή.

Το μήκος του σύρματος διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Όταν το μήκος ενός καλωδίου Fe-Si-B διαμέτρου 125 μm είναι μικρότερο από 6 cm, το LBJ παύει να εμφανίζεται λόγω του απομαγνητισμού. Αυτός ο περιορισμός μήκους μπορεί να ξεπεραστεί με την έλαση του σύρματος εν ψυχρώ. Αλλά τα σύρματα που έχουν κατεργαστεί με ψυχρή έλαση δεν εμφανίζουν αρχικά το LBJ. Επομένως, συνήθως πραγματοποιείται θερμική ανόπτηση με την συμβολή και της τάσης εφελκυσμού και μαγνητικού πεδίου για να δημιουργηθεί ο εσωτερικός πυρήνας. Αυτό όμως δεν είναι εντάσσεται στο αντικείμενο αυτής της διπλωματικής καθώς τα σύρματα μας είναι μεγαλύτερου μήκους όπως παρουσιάζονται στο κεφάλαιο των μετρήσεων.

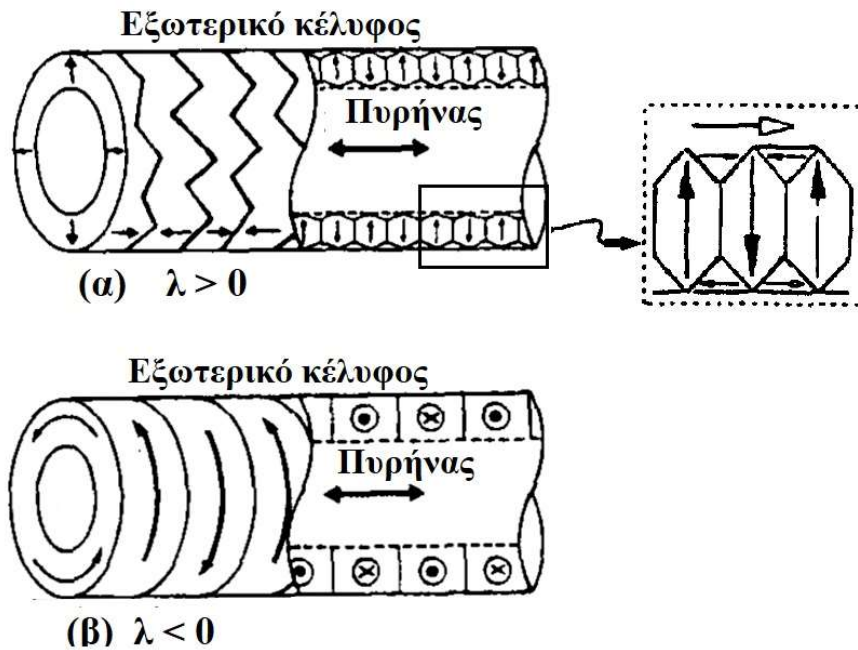
Το αν λαμβάνει χώρα το LBJ επηρεάζει τον μηχανισμό κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί διάδοσης των τοιχωμάτων στον πυρήνα του σύρματος:

- η διαδικασία κίνησης σαν ιστίο
- και η παράλληλη κίνηση των τοίχων του τομέα.

Τα τοιχώματα χαμηλής ενέργειας διαδίδονται μέσω της διαδικασίας της κίνησης “πανιού” όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 (α), ενώ τα τοιχώματα υψηλής ενέργειας διαδίδονται πιο άκαμπτα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 (β) όπου έχουμε και το φαινόμενο LBJ. Η κίνηση σαν πανί είναι πιο πιθανό να συμβεί σε μαλακά μαγνητικά υλικά, ενώ η πιο άκαμπτη κίνηση εμφανίζεται στα σκληρότερα. Η αντιστρεψιμότητα της διάδοσης των τοιχωμάτων καθορίζει την παρουσία ή όχι υστέρησης στο φαινόμενο της μαγνήτισης [31].

2.5.2 Μαγνητικές περιοχές και πώς στρίβουν

Στην βιβλιογραφία έχουν παρατηρηθεί οι μαγνητικές περιοχές των συρμάτων είτε με την μέθοδο Bitter [52] είτε με μικροσκοπία Kerr. Οι εικόνες που παρήχθησαν δίνουν πληροφορίες σχετικά με τις περιοχές στην επιφάνεια των συρμάτων και μόνο. Τα σύρματα με βάση το Co έχουν ευθύγραμμες περιοχές τύπου μπαμπού και αυτά με βάση το Fe έχουν περιοχές τύπου λαβυρίνθου. Ως εκ τούτου, προτάθηκε μια θεωρία ότι τα σύρματα τύπου Co έχουν περιοχές μαγνήτισης στην περιφερειακή κατεύθυνση του εξωτερικού κελύφους, και τα τύπου Fe ότι οι περιοχές είναι κάθετες στην επιφάνεια του σύρματος στο εξωτερικό κέλυφος. Παράλληλα επειδή αμφοτέρωθεν δεν παρουσιάζουν αλλαγές σε αυτά τα επιφανειακές περιοχές πριν και μετά από ένα LBJ, έγινε αντιληπτό ότι τα σύρματα πρέπει να έχουν επιπλέον ξεχωριστές περιοχές στον πυρήνα στην κατεύθυνση του άξονα. Ως αποτέλεσμα, προτάθηκε το μοντέλο περιοχών πυρήνας-κέλυφος όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Αναπαράσταση της δομής των μαγνητικών περιοχών με βάση την θεωρία πυρήνας-κέλυφος για σύρματα με βάση Fe($\lambda > 0$) και Co($\lambda < 0$) [42], [20].

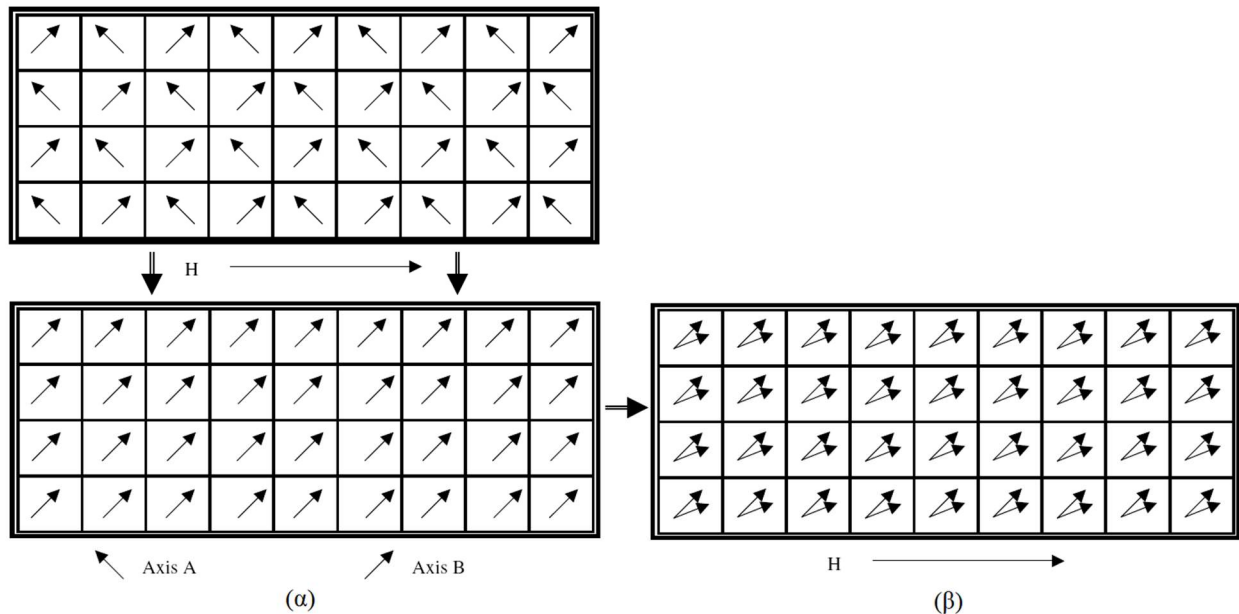
Οι προτεινόμενες περιοχές του σχήματος για το (as-cast) σύρμα δεν παρουσιάζει καμία ελικοειδή συνιστώσα, αλλά μέσω του φαινομένου Matteucci που παρατηρείται υποδεικνύει ότι πρέπει να υπάρχει ένα ελικοειδές “κομμάτι” μαγνητισμού στο σύρμα. Παρόλο που το προτεινόμενο μοντέλο τομέα μπορεί να εξηγήσει το LBJ και τις παρατηρούμενες περιοχές, απέχει από την πλήρη εξήγηση των μαγνητικών ιδιοτήτων των άμορφων μαγνητοσυστολικών συρμάτων.

Η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών λειτουργεί με δύο τρόπους: μη αναστρέψιμη περιστροφή και αναστρέψιμη περιστροφή. Η μεν μη αντιστρεπτή εμπεριέχει τον μηχανισμό υστέρησης που παρατηρείται στη διαδικασία μαγνήτισης και απομαγνήτισης ενός υλικού, η δε αναστρέψιμη λαμβάνει χώρα στην περιοχή όπου το υλικό μας λειτουργεί ανυστερητικά.

Η μη αναστρέψιμη περιστροφή (υστερητική) συμβαίνει όταν οι μαγνητικές περιοχές, όντας προσανατολισμένες σε έναν δεδομένο εύκολο άξονα A, επαναπροσανατολίζονται, λόγω της παρουσίας ενός πεδίου H, κατά μήκος ενός άλλου εύκολου άξονα B, που πλέον είναι πιο κοντά στον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8(α). Η ανυστερητική περιστροφή των περιοχών εμφανίζεται αφότου έχει ήδη επέλθει η υστερητική περιστροφή. Εφόσον ο νέος εύκολος άξονας B, γενικά, δεν είναι ο ίδιος με τον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, τα μαγνητικά δίπολα περιστρέφονται ανυστερητικά προς τον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8(β). Μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου, οι μαγνητικές

περιοχές επιστρέφουν πίσω στην κατεύθυνση του εύκολου άξονα μαγνήτισης B, κατά μήκος του οποίου είχαν αρχικά και μη αναστρέψιμα προσανατολιστεί.

Γενικά, οι μαγνητικές περιοχές δεν επιστρέφουν στον αρχικό τους εύκολο άξονα μαγνήτισης A. Και οι δύο, υστερητικές και ανυστερητικές διεργασίες σχετίζονται με την παρουσία μαγνητοσυστολής. Η υστερητική διαδικασία είναι επιπρόσθετα υπεύθυνη για μικρό ή μεγάλο άλμα Barkhausen.



Σχήμα 8: Αναπαράσταση του μηχανισμού στροφής των μαγνητικών περιοχών. (α) Δυο άξονες εύκολης μαγνήτισης και η μη αντιστρεπτή στροφή λόγω της παρουσίας ενός μαγνητικού πεδίου H. (β) Αντιστρεπτή στροφή των περιοχών αμέσως μετά την μη αντιστρεπτή διαδικασία μαγνήτισης [31].

Αν λοιπόν χρησιμοποιηθούν υλικά σε αισθητήρες με σκοπό να εκμεταλλευτούν αυτή τη μη αναστρέψιμη διαδικασία, εισάγεται μαγνητική υστέρηση καθώς και σχετικά υψηλότερα επίπεδα θορύβου σε σχέση με την ανυστερητική διαδικασία.

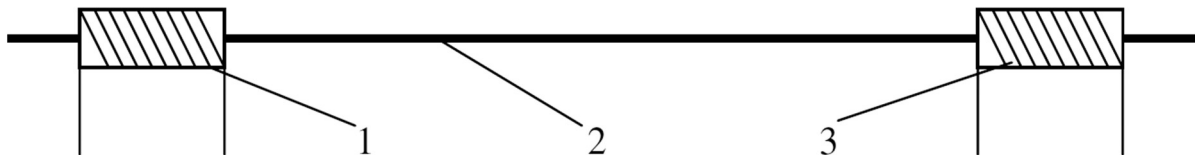
Τόσο η υστέρηση όσο και ο θόρυβος αυξάνουν την αβεβαιότητα των μετρήσεων οποιουδήποτε πιθανού αισθητήρα. Επομένως, αν ο στόχος είναι η ανάπτυξη ενός αισθητήρα, όπου η υστέρηση και ο θόρυβος θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν, μόνο ο ανυστερητικός μηχανισμός της περιστροφής θα πρέπει να είναι σε ισχύ. Αντίθετα, αν ο στόχος είναι η υψηλή υστέρηση, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο μη αναστρέψιμος μηχανισμός της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών.

Οι μηχανισμοί αυτοί λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και αυτό επιτρέπει την δημιουργία ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται κατά μήκος του μαγνητικού υλικού. Σε αυτό ακριβώς στηρίζονται οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης MDL [31]. Η αναλυτική λειτουργία του μηχανισμού των MDL παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (MDL).

3.1 Μετάδοση κύματος λόγω μαγνητοσυστολής και Μαγνητοελαστικές ιδιότητες

Εδώ παρουσιάζεται η βασική λειτουργία των MDL εστιάζοντας στην βασική διάταξη (Σχήμα 9) και στη μηχανική μοντελοποίηση. Επίσης αναλύονται οι παράμετροι και οι ρυθμίσεις που επηρεάζουν την ανταπόκριση του MDL. Η βασική διάταξη της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 9 αποτελείται από ένα κοντό πηνίο και ένα πηνίο λήψης τα οποία τοποθετούνται γύρω από κάθε ένα από τα δύο άκρα του MDL. Η γραμμή καθυστέρησης τερματίζεται με ένα υλικό απόσβεσης για την εξάλειψη των ακουστικών ανακλάσεων. Λεπτομέρειες σχετικά με τις διάφορες εκδοχές αυτών των ρυθμίσεων μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία και εδώ θα γίνει και μια αναφορά στο τι υπάρχει στην αγορά.



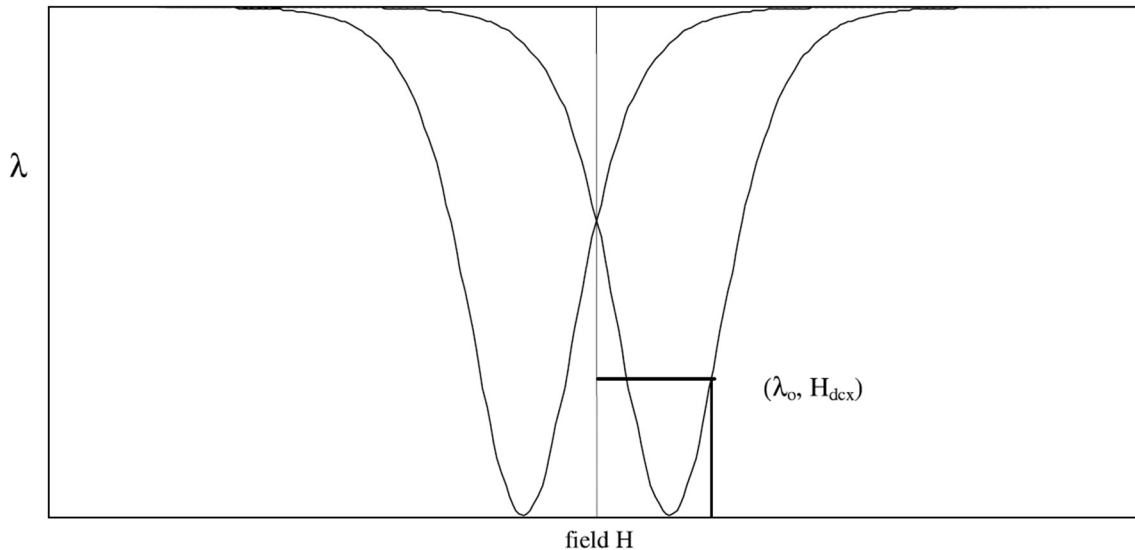
Σχήμα 9: Διάταξη μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης (MDL). (1) Κινούμενο πηνίο διέγερσης, (2) MDL, (3) Κινούμενο πηνίο λήψης [31].

3.2 Ποιοτική ανάλυση της βασικής διάταξης MDL

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα μαγνητοσυστολικά υλικά τείνουν να προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα των επιμέρους περιοχών προς την κατεύθυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου. Έτσι, η εφαρμογή ενός εξωτερικού πεδίου είτε είναι παλμικό είτε όχι, κατά μήκος του άξονα MDL προκαλεί αρχικά άλματα Barkhausen, τα οποία συμβάλλουν στο υστερητικό και μη αναστρέψιμο τμήμα της παραμόρφωσης ως προς το πεδίο $[\lambda(H)]$ και στη συνέχεια σε περιστροφή μικρής γωνίας, το οποίο είναι το ανυστερητικό και αναστρέψιμο τμήμα της εν λόγω συνάρτησης $\lambda(H)$.

Επομένως, όταν μαγνητίζεται το MDL με ένα συνεχές πεδίο H_{dex} , το υλικό επιμηκώνεται κατά δl_0 , που απεικονίζεται ως σημείο $(\delta l_0, H_{dex})$ στην συνάρτηση $\lambda(H)$, που φαίνεται στο

Γράφημα 4. Όταν ένα παλμικό πεδίο $H_e(t)$ εφαρμόζεται ταυτόχρονα στην περιοχή όπου έχει εφαρμοστεί το συνεχές πεδίο, προκύπτει μία παρόμοια αλλά πολύ πιο απότομη επιμήκυνση $\delta l(t)$, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ελαστικό κύμα κατά μήκος του MDL, για το οποίο ισχύει η κλασσική εξίσωση κύματος.



Γράφημα 4: Η συνάρτηση $\lambda(H)$ που συσχετίζει τις μικροπαραμορφώσεις με το εφαρμοζόμενο πεδίο. [31]

Στα κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά, το βέλτιστο πλάτος του παλμικού πεδίου είναι της τάξεως των μικροδευτερολέπτων. Έτσι, το οδεύον ελαστικό κύμα που προκύπτει έχει μήκος της τάξης των μερικών εκατοστών. Επομένως, στα πιο κοινά MDL, όπου η διατομή των μαγνητοσυστολικών συρμάτων είναι το ένα δέκατο (50-300 μm [42]) ενός τετραγωνικού χιλιοστού, διαδίδεται κύμα Lamb. Η χρήση υλικών με απόκριση υψηλότερης συχνότητας ή μεγαλύτερης διατομής μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την διάδοση ακουστικών κυμάτων στην επιφάνειά τους. Η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου (skin effect) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση και στην παραμετροποίηση της παραγωγής και της διάδοσης των μικροπαραμορφώσεων.

Το παλμικό πεδίο κατά μήκος του MDL, το οποίο προκαλεί στην ουσία το οδεύον ελαστικό κύμα, παρουσιάζει μια εξασθένηση που ξεκινάει από την πλήρη μαγνήτιση στο κέντρο του πηνίου και εκτείνεται μέχρι ένα όριο το οποίο καθορίζεται και είναι ανάλογο της διαμέτρου του πηνίου διέγερσης. Αυτή είναι η ενεργή περιοχή εντός του μαγνητοσυστολικού υλικού που ευθύνεται για την παραγωγή των μικροπαραμορφώσεων.

Τα ελαστικά κύματα που μεταδίδονται κατά μήκος του MDL είναι διαμήκη λόγω της αναλογίας που έχει το μήκος του υλικού ως προς τη διατομή του. Η μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος του δεν επιτρέπει την διάδοση ούτε εγκάρσιων κυμάτων, ούτε κυμάτων με εγκάρσια συνιστώσα [31].

Το οδεύον ελαστικό κύμα, καθώς ταξιδεύει, αλλάζει την τοπική συνιστώσα του μαγνητισμού κατά μήκος του άξονα του MDL, συνυπολογίζοντας ότι το MDL μαγνητίζεται τοπικά. Η συνολική μακροσκοπική μεταβολή της μαγνητικής ροής κατά μήκος του άξονα του σύρματος είναι το στατιστικό αποτέλεσμα του αθροίσματος των τοπικών απειροελάχιστων μεταβολών στον προσανατολισμό των μαγνητικών διπόλων καθώς το κύμα “περνάει” από την περιοχή τους. Έτσι, το μέγεθος που έχει το πεδίο πόλωσης καθορίζει την συμπεριφορά της τοπικής συνιστώσας της μαγνήτισης κατά μήκος του άξονα MDL. Αυτό είναι το αντίστροφο του μαγνητοσυστολικού φαινομένου. Σε ορισμένα υλικά, το πεδίο της γης δρα ως το πεδίο πόλωσης και μπορεί να προκαλέσει τέτοιο αποτέλεσμα.

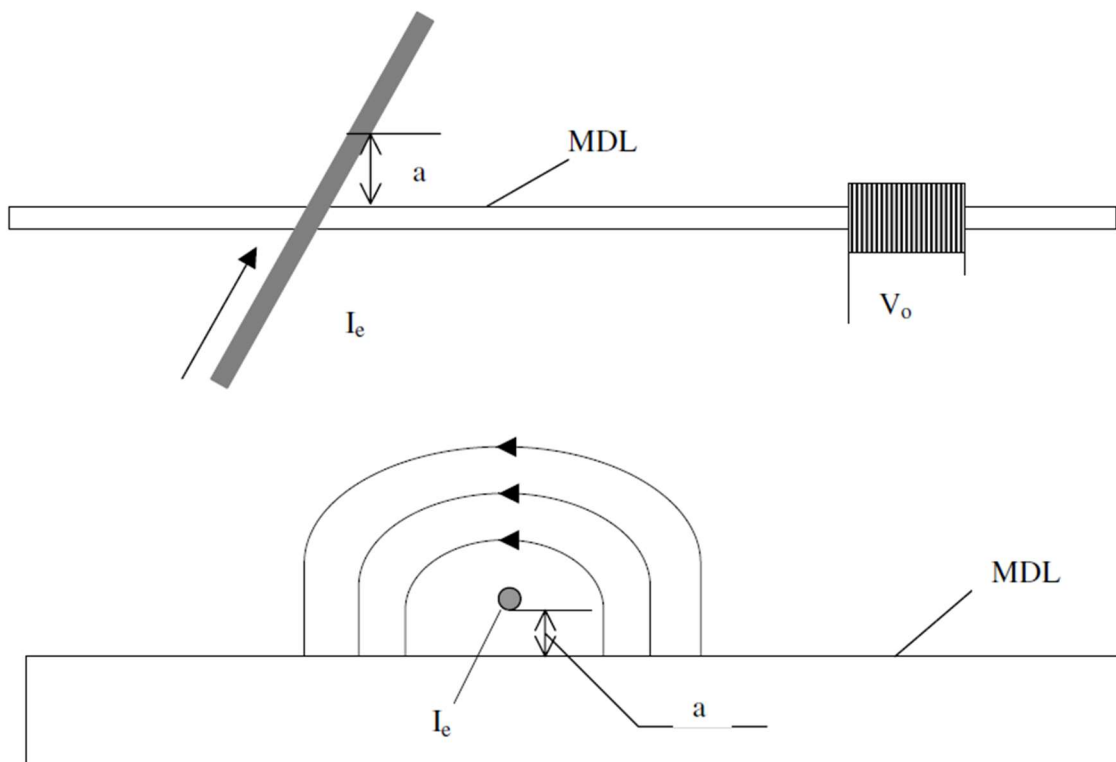
Με προϋπόθεση τα προηγούμενα, εάν μια επαγωγική συσκευή, όπως είναι ένα πηνίο λήψης, είναι τοποθετημένο γύρω από το MDL, μια παλμική τάση ανάλογη προς τη πρώτη παράγωγο της μαγνητικής ροής προκαλείται στα άκρα του πηνίου. Η απόσταση του πηνίου λήψης από το σημείο προέλευσης του ελαστικού κύματος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην όλη διάταξη. Αν είναι μεγάλη η απόσταση τότε η εξασθένιση του κύματος δεν θα επιτρέπει την ανίχνευσή του και αν είναι μικρή υπάρχει πιθανότητα ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης μεταξύ διέγερσης και λήψης.

3.3 Μηχανική μοντελοποίηση

Για την μοντελοποίηση του MDL ως διέγερση θεωρείται ένας απλός αγωγός ρεύματος. Αυτή είναι η απλούστερη δυνατή διάταξη διέγερσης αν τοποθετηθεί κάθετα ως προς το MDL όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Το παλμικό πεδίο $H(x, t)$, κατά μήκος του MDL προκαλείται από το παλμικό ρεύμα $I(t)$ και είναι:

$$H(x, t) = f(x)I(t) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}}I(t) \quad (12)$$

όπου a είναι η απόσταση μεταξύ του αγωγού ρεύματος και του MDL και x είναι η απόσταση από την προβολή του αγωγού μέχρι το συγκεκριμένο σημείο στο μαγνητοσυστολικό σύρμα. Ο παλμός ρεύματος $I(t)$ θεωρείται ότι αποτελείται από μια αύξηση ρεύματος από 0 έως I_0 για $0 < t < n_1 T$, ένα ρεύμα σταθερό ρεύμα I_0 για $n_1 T < t < n_2 T$ και μια πτώση ρεύματος από I_0 σε 0 για $n_2 T < t < n_3 T$, όπου T είναι η χρονική συνιστώσα και n_i οι ακέραιοι αριθμοί.



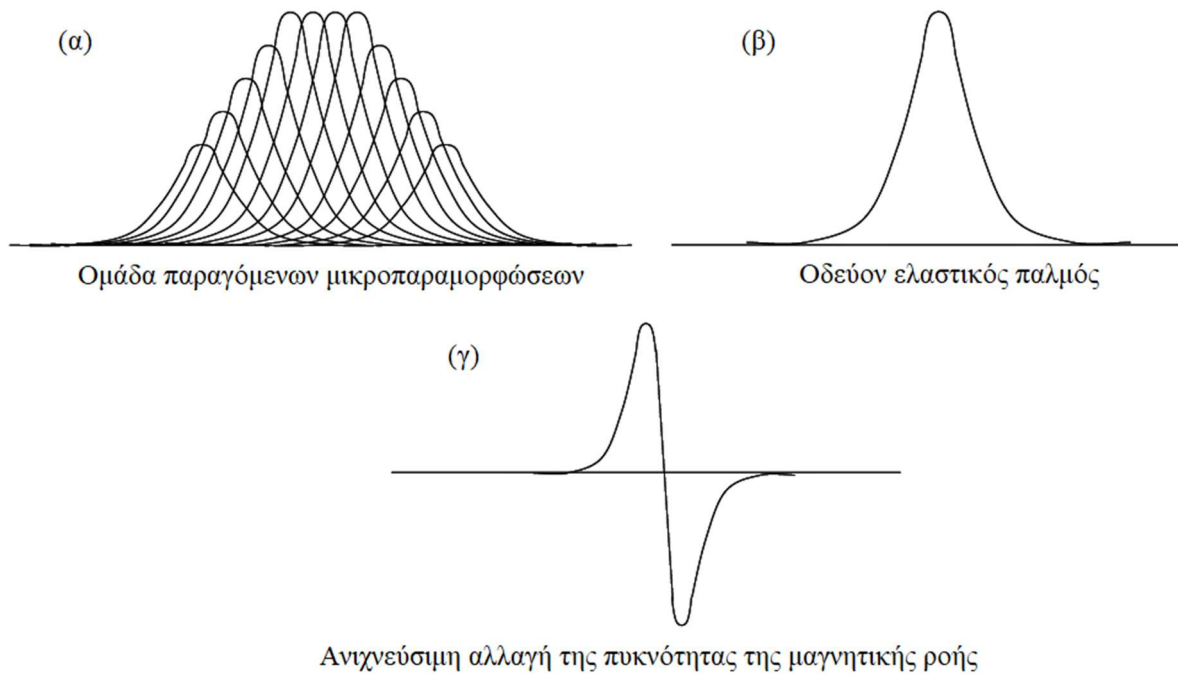
Σχήμα 10: Η πιο απλή περίπτωση της διάταξης MDL.

Στην περίπτωση της ανυστερητικής συμπεριφοράς, οι μικροπαραμορφώσεις που προκαλούνται από το παλμικό πεδίο $H(x, t)$ μπορούν να παραχθούν από το ακόλουθο μοντέλο που βασίζεται σε πειραματικές ενδείξεις [31]:

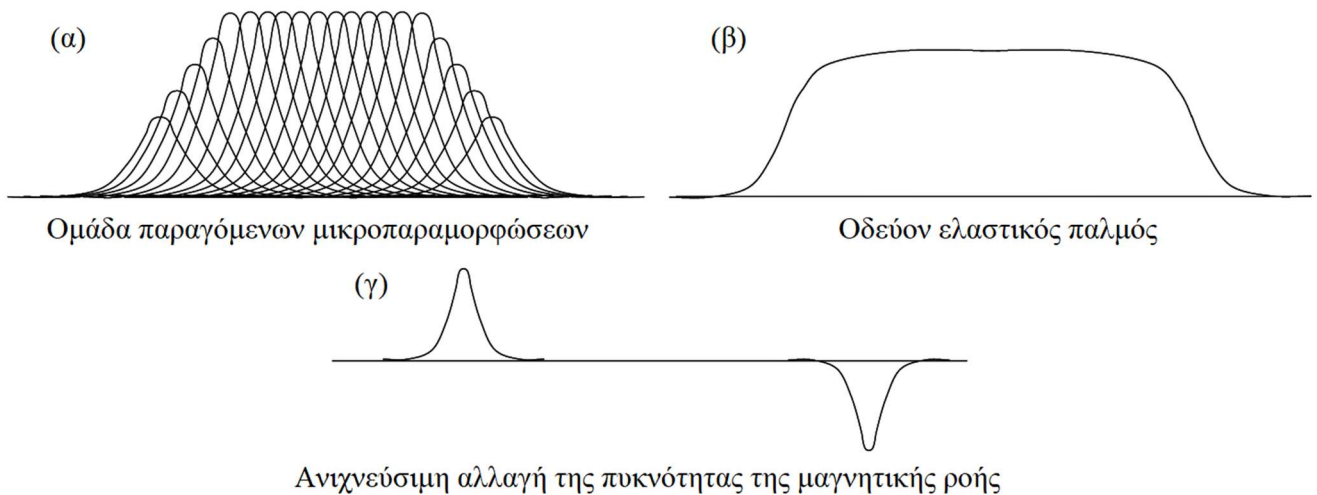
$$\lambda(H) = \lambda_s(1 - e^{-\alpha H^2}), \quad \alpha > 0 \quad (11)$$

Για λόγους απλότητας αγνοείται η υστερητική συμπεριφορά που εκ' των πραγμάτων κάθε κατασκευαστεί προσπαθεί να εξαλείψει.

Οι μικροπαραμορφώσεις $\lambda(x, t)$ που προκαλούνται από το παλμικό ρεύμα αθροίζονται ως μια ομάδα και καταλήγουν να δημιουργούν ένα ελαστικό κύμα. Αυτό το ελαστικό κύμα προκαλεί αλλαγή στην μαγνητική ροή κατά μήκος του όγκου του υλικού που διαδίδεται, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί από ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω από το υλικό σε x απόσταση. Εφόσον ο παλμός ρεύματος είναι μικρός σε διάρκεια, η αλλαγή στην μαγνητική ροή εντός του μαγνητοσυστολικού σύρματος ανιχνεύεται ως μια παλμική έξοδος όπως εμφανίζεται στο Γράφημα 5. Αν ο παλμός ρεύματος έχει μεγαλύτερη διάρκεια και διατηρείται το μέγιστο του ρεύματος για ένα μικρό αλλά υπολογίσιμο διάστημα, τότε η πρώτη παράγωγος του ελαστικού παλμού, που αντιστοιχεί στην διαφορά τάσης που παράγεται από το πηνίο, σπάει σε δύο ξεχωριστούς παλμούς. Οι παλμοί είναι αντίθετοι αφού ο πρώτος αντιστοιχεί στην άνοδο της μαγνητικής ροής και άλλος στην πτώση της, όπως εμφανίζονται στο Γράφημα 6 [31].



Γράφημα 5: (α) Παραγωγή, (β) μετάδοση και (γ) ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων λόγω μικρής διάρκειας παλμικού μαγνητικού πεδίου [31].



Γράφημα 6: (α) Παραγωγή, (β) μετάδοση και (γ) ανίχνευση μικροπαραμορφώσεων λόγω μακράς διάρκειας παλμικού μαγνητικού πεδίου [31].

Όπως προαναφέρθηκε η λήψη του παραγόμενου μαγνητοσυστολικού κύματος γίνεται σε ένα πηνίο. Η ένταση του κύματος δίνεται ως συνάρτηση της απόστασης που ταξιδεύει:

$$U = U_0 \exp(-ax) \quad (12)$$

όπου U_0 είναι η αρχική ένταση, a είναι ο συντελεστής εξασθένησης και x η απόσταση που έχει διανύσει το κύμα. Βιβλιογραφικά αναφέρεται ότι ο συντελεστής a είναι περίπου $6,7 \text{ m}^{-1}$ για $H=0$ και $1,5 \text{ m}^{-1}$ για $H=11 \text{ kA/m}$ [53]. Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, για υλικό FeSiB, έχει μετρηθεί στα 4200 m/s για $H=0$ [54]. Έχει παρατηρηθεί αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσης

του κύματος με αλλαγή στο περιβάλλον μαγνητικό πεδίο πόλωσης. Για τα “as-cast” σύρματα (που είναι και τα σύρματα τα όποια χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα της παρούσας εργασίας) η αλλαγή είναι αμελητέα [54].

3.4 Εφαρμογές μαγνητοσυστολικών αισθητήρων θέσης

Οι μαγνητοσυστολικοί αισθητήρες θέσης τοποθετούνται με πολλές παραλλαγές σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Συχνά, ο μαγνήτης θέσης είναι ξεχωριστός από το περίβλημα του στοιχείου ανίχνευσης και είναι προσαρτημένος στο μέλος που πρόκειται να μετρηθεί. Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιείται σε γενικές εφαρμογές μηχανημάτων, πρωτογενή και δευτερογενή ξυλουργικά μηχανήματα, υδραυλικούς κυλίνδρους, αμορτισέρ και πολλά άλλα. Το Σχήμα 11 δείχνει ένα παράδειγμα τυπικής διαμόρφωσης για την τοποθέτηση ενός αισθητήρα γραμμικής θέσης και τον αντίστοιχο μαγνήτη θέσης εντός ενός υδραυλικού κυλίνδρου.

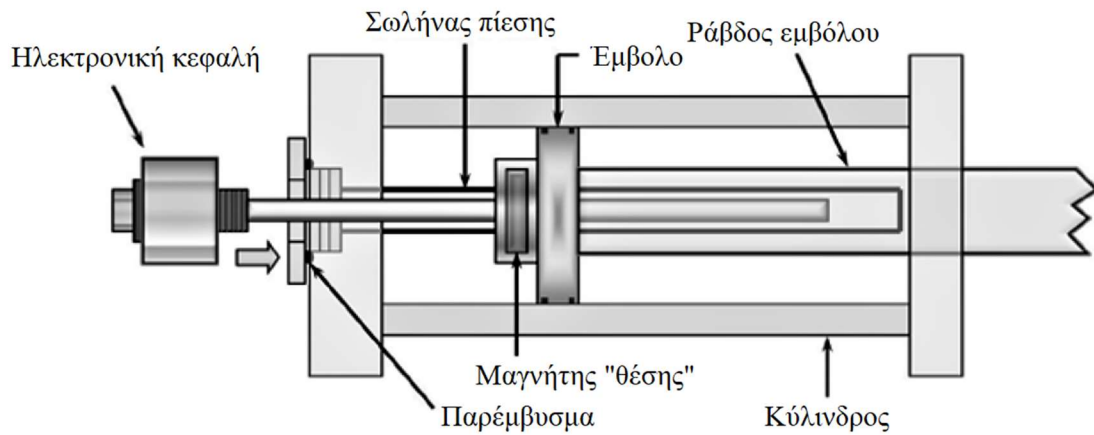
Όπως μπορεί να συναχθεί από το σχήμα, κατασκευάζεται μια οπή στο έμβολο και στη ράβδο του έτσι ώστε να μπορεί να εγκατασταθεί ένας σωλήνας πίεσης. Ο μαγνήτης θέσης παρουσιάζεται τοποθετημένος στο έμβολο. Τα υλικά που έρχονται σε επαφή και κοντά στο μαγνήτη πρέπει να είναι μη μαγνητικά, έτσι ώστε να μην παρεμβαίνουν στην λειτουργία του μαγνήτη θέσης. Τέτοια υλικά μπορεί να περιλαμβάνουν μη μαγνητικούς ανοξείδωτους χάλυβες, αλουμίνιο και διάφορα πλαστικά. Ένα τμήμα της αισθητήριας διάταξης εισάγεται μέσα στο σωλήνα πίεσης, και το περίβλημα με τα ηλεκτρονικά βιδώνεται σε μια φλάντζα στο σωλήνα πίεσης. Η φλάντζα του σωλήνα πίεσης σφραγίζεται στο άκρο του κυλίνδρου για να αποφευχθεί η διαρροή του υδραυλικού λαδιού. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει την κατασκευή του υδραυλικού κυλίνδρου ως συνήθως και στη συνέχεια ο αισθητήρας θέσης μπορεί να προστεθεί χωρίς να διαταραχθεί το λάδι του κυλίνδρου ή να μειωθεί η πίεση του λαδιού.

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η παραγωγή μεγάλου όγκου μαγνητοσυστολικών αισθητήρων άρχισε να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ο αυτόματος έλεγχος αμαξώματος των επιβατικών οχημάτων είναι μια τέτοια εφαρμογή. Για να επιτευχθεί αυτό, ένας μαγνητοσυστολικός αισθητήρας θέσης τοποθετείται μέσα σε ένα ολισθαίνον μέλος μια καμπίνας σοκ ή μια μπάρας στήριξης. Ο μαγνήτης θέσης τοποθετείται στο άλλο μέλος που ολισθαίνει. Τα δεδομένα θέσης που συγκεντρώνονται από το αμάξωμα χρησιμοποιούνται μαζί με ελεγκτή (controller) και υδραυλικό σύστημα για τη βελτίωση της οδηγικής εμπειρίας και τον χειρισμό του αμαξιού.

Λόγω της μηχανικής ανθεκτικότητας, της σταθερότητας απόκρισης με σχέση με την θερμοκρασία, της αξιοπιστίας, της υψηλής απόδοσης, των πολλαπλών μαγνητικών δυνατοτήτων και της ευρείας κλίμακας μήκους, οι μαγνητοσυστολικοί αισθητήρες θέσης χρησιμοποιούνται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Ορισμένες από αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Εφαρμογές μαγνητοσυστολικών αισθητήρων θέσης

Βιομηχανία	Εφαρμογή
Αυτοκινητοβιομηχανία	Μηχανήματα παραγωγής, ανάρτηση, σύστημα διεύθυνσης, μετάδοση
Ημιαγωγών	Χειρισμός μικροκυκλωμάτων και πλακιδίων (wafer)
Ηλεκτρικών	Ένας αισθητήρας μπορεί να μετρήσει τόσο τις γραμμικές όσο και τις
Ενεργοποιητών	περιστροφικές θέσεις
Εμβόλων	Θέση εμβόλου σε υδραυλικούς και πνευματικούς κυλίνδρους
Φαγητού	Μετρήστε την στάθμη του υγρού χρησιμοποιώντας ένα πλωτήρα με μαγνήτη εγκατεστημένο στον πλωτήρα
Στάθμης υγρών	Έλεγχος διαδικασίας, ανίχνευση διαρροών, έλεγχος απογραφής με μαγνήτη σε πλωτήρα
Ιατρική	Θέση διαγνωστικού εξοπλισμού, μέτρηση δόσης σύριγγας, ορθοπεδική
Μεταλλουργία	Μηχανές σφυρηλάτησης, πρέσες, κάμψη και αποκοπή
Κινητού εξοπλισμού	Απορριμματοφόρα φορτηγά, γεωργία, ταξινόμηση και οδοστρώματα
Χαρτιού	Μηχανές κοπής και επανατύλιξης, πρέσες
Πλαστικού	Χύτευση με έγχυση, χύτευση με εμφύσηση
Μεταλλικών υλών	Γραμμή παραγωγής δοκών και κάδος χύτευσης
Πρωτογενούς Ξυλείας	Πριονιστήρια, τόρνοι, πριόνια αποκοπής, γόνατα τοποθέτησης, πρέσες
Δευτερογενούς Ξυλείας	Μηχανήματα κατασκευής τόρμων και θέση πριονιού
Υφαντουργία	Μηχάνημα που φτιάχνει φλόκους (σε χαλιά)



Σχήμα 11: Μαγνητοσυστολικός αισθητήρας θέσης εγκατεστημένος εντός υδραυλικού εμβόλου [55].

3.5 Κατασκευαστές

Ακολουθούν κάποιοι εμπορικοί κατασκευαστές μαγνητοσυστολικών αισθητήρων θέσης.

Πίνακας 6: Κατασκευαστές μαγνητοσυστολικών αισθητήρων

Ametek	www.ametek.com
Balluff	www.balluff.com
Gefran	www.gefran.com
MTS Systems Corporation	www.mtssensors.com
Novotechnik	www.novotechnik.com
Penny and Giles (Curtiss Wright)	www.pennyandgiles.com
Revolution Sensor Company (design)	www.rev.bz
Santest	www.santest.co.jp/en

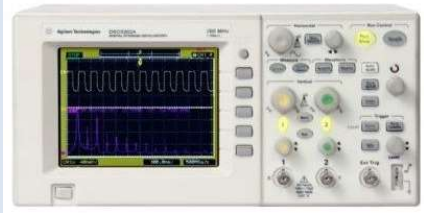


4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ




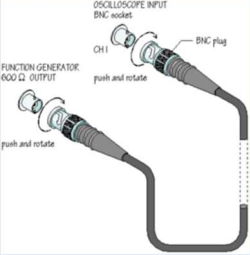


4.1 Εργαστήριο αισθητήρων

Το σύνολο των πειραμάτων έλαβε μέρος στο εργαστήριο αισθητήρων του ΕΜΠ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Το εργαστήριο έχει δυνατότητα να στεγάσει πειράματα σε συνθήκες καθαρού χώρου (επιπέδου ISO8 cleanroom) εντός 12m² που όμως για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας δεν παρέστη αναγκαίο αλλά δίνει το περιθώριο για μελλοντική διεύρυνση των πειραμάτων.

Στο πλαίσιο των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα όργανα και τα καλώδια που εμφανίζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Όργανα και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Μετρητικά όργανα - εργαλεία	Φωτογραφία
<p>1. Παλμογράφοι (Agilent Technologies 3000 Series Oscilloscopes) με το αντίστοιχο πρόγραμμα επικοινωνίας με Η/Υ.</p> <ul style="list-style-type: none">a. 100 MHz bandwidthb. 1 GSa/s maximum sample ratec. Vertical sensitivity 2 mV/div to 5 V/divd. Time base accuracy 100 ppm	
<p>2. Τροφοδοτικό</p> <ul style="list-style-type: none">a. Εύρος 0-30V, 0-5Ab. Προστασία βραχυκυκλώματοςc. Συνεχές Ρεύμα/Συνεχής Τάση	
<p>3. Διάταξη τύπωσης και εμφάνιση κυκλωμάτων σε πλακέτες PCB</p>	

<p>4. Ηλεκτρονικά Παχύμετρα:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Εύρος 0-300mm b. Ακρίβεια 0,04mm c. Ανάλυση 0.01mm 	
<p>5. Ψηφιακά πολύμετρα Keithley 2750</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Τάσης (ανάλογα με το εύρος) <ul style="list-style-type: none"> i. Ανάλυση ως 0.1μV ii. ακρίβεια ως 30ppm ένδειξης + 35ppm εύρους b. Αντίστασης (ανάλογα με το εύρος) <ul style="list-style-type: none"> i. Ανάλυση ως 1μΩ ii. ακρίβεια ως 100ppm ένδειξης + 40ppm εύρους 	
<p>6. Καλώδιο BNC – Probe (Συνδέει Παλμογράφο Κύκλωμα)</p>	
<p>7. Καλώδιο BNC – BNC</p>	
<p>8. Καλώδιο BNC – Κροκοδειλάκια</p>	
<p>9. Καλώδια Μπανάνες -Κροκοδειλάκια</p>	

4.2 Τα μέρη της απλής μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης

4.2.1 Μαγνητοσυστολικοί πυρήνες

Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά από μαγνητοσυστολικοί πυρήνες. Κατά κύριο λόγο τα μαγνητοσυστολικά σύρματα και ταινίες τα προμηθεύεται το εργαστήριο αισθητήρων από το τμήμα Μεταλλικής Φυσικής της Σλοβάκικης Ακαδημίας Επιστημών. Ένα άλλο μεγάλο μέρος βρίσκεται ως απόθεμα στο εργαστήριο από προηγούμενη έρευνα που έχει εκπονηθεί στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών υπό την επίβλεψη του κυρίου Χριστοφόρου.

Η έρευνα επικεντρώθηκε στο μαγνητοσυστολικό σύρμα $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ διαμέτρου 125 μm και σε μορφή as-cast. Το μέγιστο των συρμάτων φτάνει τα 30m και το ελάχιστο καθ' όπως κρίνεται ξεχωριστά για το αντίστοιχο πείραμα. Οι ιδιότητες του υλικού αναδεικνύονται ως οι πλέον κατάλληλες για την διερεύνηση των διατάξεων MDL σύμφωνα και με τα όσα έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

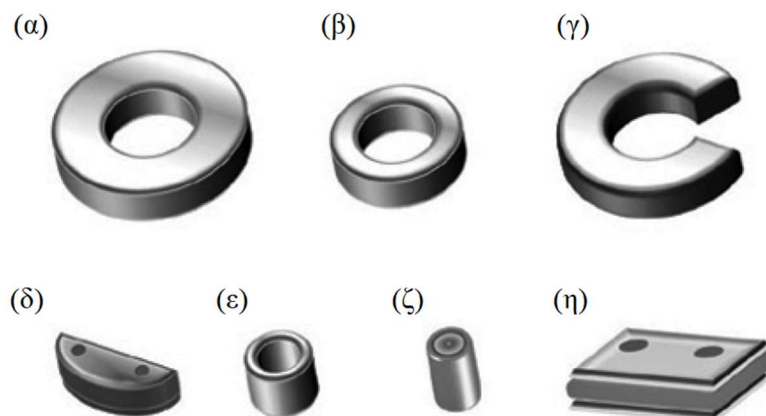
4.2.2 Μαγνήτης θέσης

Για να λαμβάνει η διάταξη ένα σημείο αναφοράς μπορεί ως μαγνήτης θέσης να χρησιμοποιηθεί ένας ηλεκτρομαγνήτης. Αυτό εάν χρειάζεται να έχει την ικανότητα να ενεργοποιείται και να σβήνει το μαγνητικό πεδίο κατά το δοκούν. Αλλά οι περισσότεροι μαγνήτες θέσης είναι οποιοδήποτε από τους τρεις τύπους μόνιμων μαγνητών: νεοδύμιο-σίδηρο-βόριο (NdFeB), σαμάριο-κοβάλτιο (SmCo) ή κεραμικό (φερρίτη). Οι μαγνήτες Alnico δεν χρησιμοποιούνται κανονικά επειδή μπορούν εύκολα να απομαγνητιστούν. Οι μαγνήτες NdFeB είναι πολύ σκληρά μαγνητικά υλικά και είναι χρήσιμοι όταν απαιτείται ένας μικρός ραβδωτός μαγνήτης. Είναι εύθραυστοι και πρέπει να είναι επινικελωμένοι για να αποφευχθεί η διάβρωση. Οι μαγνήτες SmCo είναι συνήθως σκληρά μαγνητικά υλικά, ανθεκτικά στην οξείδωση και μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερη θερμοκρασία (300°C), αλλά είναι ακριβοί. Πολλοί μαγνήτες τύπου δακτυλίου είναι κατασκευασμένοι από φερρίτη, με πίεση ή πυροσυσσωμάτωση. Είναι ισχυροί και φθηνοί. Οι μαγνήτες τύπου δακτυλίου συχνά χυτεύονται με έγχυση. Οι χυτευμένοι μαγνήτες είναι ένα σύνθετο υλικό από διάφορες μαγνητικές σκόνες και ρητίνη. Αυτά οι σύνθετοι μαγνήτες μπορούν να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος και να χυτευθούν σε οποιοδήποτε σχήμα. Δεδομένου ότι είναι ελαφρώς πιο αδύναμοι, οι χυτευμένοι μαγνήτες ενδέχεται να μην είναι κατάλληλοι για μαγνήτες τύπου δακτυλίου μεγαλύτερης διαμέτρου.

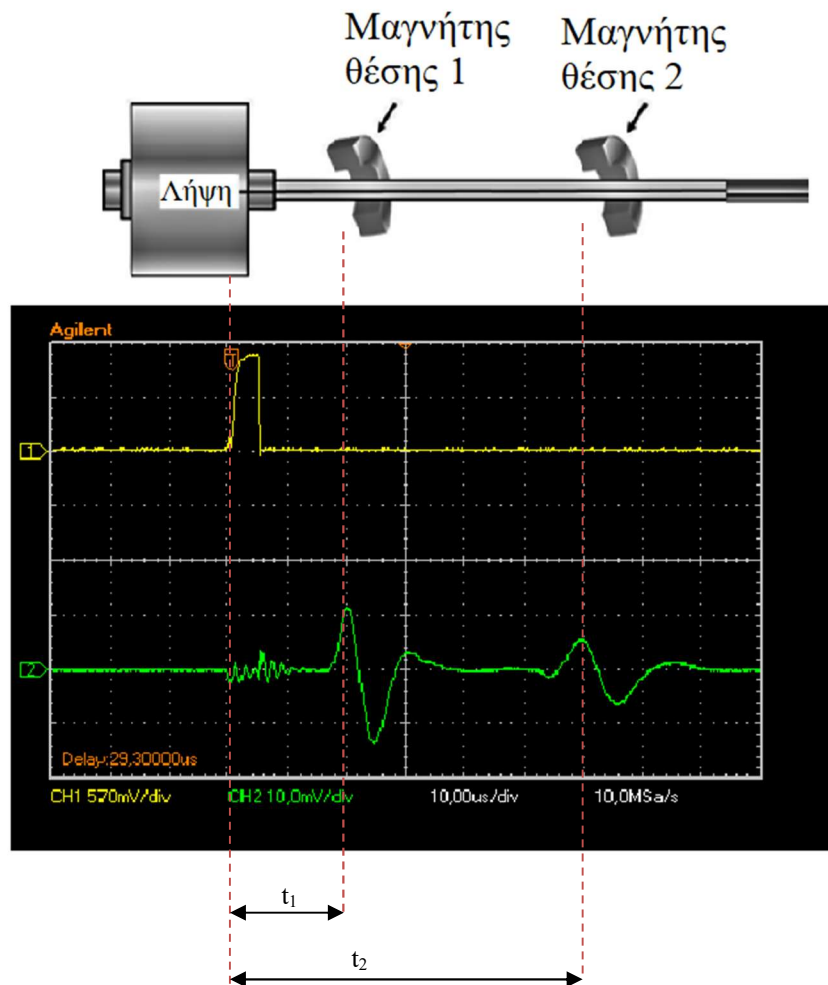
Σε έναν μαγνητοσυστολικό αισθητήρα θέσης μπορούν να εφαρμοστούν περισσότεροι από ένας μαγνήτες θέσης. Το Γράφημα 7 δείχνει δύο μαγνήτες θέσης κατά τη λειτουργία ενός εμπορικού αισθητήρα θέσης.

Ο μαγνήτης θέσης μπορεί να κατασκευαστεί σε διάφορα σχήματα για να ταιριάζει με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής (βλέπε Σχήμα 12). Το πιο δημοφιλές σχήμα στις εμπορικές εφαρμογές μέχρι σήμερα είναι ο μαγνήτης σε δακτύλιο του Σχήμα 12α. Ο δακτύλιος μπορεί να είναι χυτευμένο μαγνητικό υλικό όπως προαναφέρθηκε ή μπορεί να είναι ένας μη μαγνητικός δακτύλιος με κομμάτια μαγνητών που εισάγονται σε πλαστικό περίβλημα και στερεοποιούνται στην θέση του με εποξική ρητίνη.

Με το μαγνητοσυστολικό σύρμα μέσα σε ένα περίβλημα(πακετάρισμα αισθητήρα) να διέρχεται από το κέντρο ενός μαγνητικού δακτυλίου, η έξοδος του αισθητήρα εκ των πραγμάτων θα είναι λιγότερο ευαίσθητη στις ακτινικές μετακινήσεις του σύρματος εντός της οπής του μαγνήτη. Για παράδειγμα, εάν ο μαγνήτης δακτυλίου διατηρεί την ίδια θέση σε σχέση με το πηνίο λήψης, αλλά μετακινηθεί 1 χιλ. από το κέντρο, η έξοδος του αισθητήρα τυπικά υποδεικνύει σφάλμα μικρότερο από το 1/30 αυτής της ποσότητας. Αυτό συμβαίνει επειδή, με έναν μαγνήτη δακτυλίου, όταν το σύρμα πλησιάζει τη μία πλευρά του μαγνήτη, ταυτόχρονα απομακρύνετε από την άλλη πλευρά, προκαλώντας ελάχιστη διακύμανση της ισχύος του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 12: Διάφορα σχήματα για μαγνήτες θέσης.

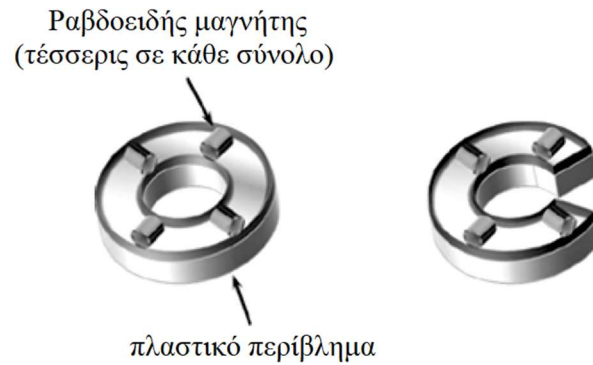


Γράφημα 7: Λήψη μαγνητοσυστολικών παλμών μετρημένων ως τάση στα άκρα του πηνίου λήψης μιας μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης.

Με τη σύμβαση (που ξεκίνησε από την Tempsonics TM / MTS στη δεκαετία του '80), οι μαγνήτες θέσης πολώνονται με τον βόρειο πόλο να αντικρίζει το μαγνητοσυστολικό. Έτσι, για έναν μαγνητικό δακτύλιο, ο βόρειος πόλος βλέπει προς την κεντρική οπή του μαγνητικού δακτυλίου. Αντίστοιχα ένας τετραγωνικός αντικρίζει το μαγνητοσυστολικό με τον βόρειο πόλο του.

Τα διάφορα σχήματα μαγνητών κατασκευάζονται για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής με τον μαγνήτη σε δακτύλιο ή σχήματος C, να είναι ο πιο κοινός, αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν οι μαγνήτες ράβδου(ζ) ή και πλάκας (η). Προτιμάται ο δακτυλιοειδής μαγνήτης, διότι αυτό παρέχει το πιο ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο όμως μια τομή στον δακτύλιο (μαγνήτης σχήματος C (γ)) επιτρέπει την προσθήκη ή τη λήψη ενός πλήθους μαγνητών θέσης στο σύρμα χωρίς να χρειάζεται πρόσβαση στο άκρο του αισθητήρα.

Ένας δακτύλιος σχήματος C μπορεί να παρέχει το ίδιο μαγνητικό πεδίο με έναν δακτυλιοειδή μαγνήτη αν σχεδιάζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Μαγνήτης σχήματος C με παρόμοια χαρακτηριστικά ενός δακτυλιοειδούς μαγνήτη.

Παρόλα τα προηγούμενα, σχεδόν σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν απλοί παραλληλόγραμμοι μαγνήτες ώστε

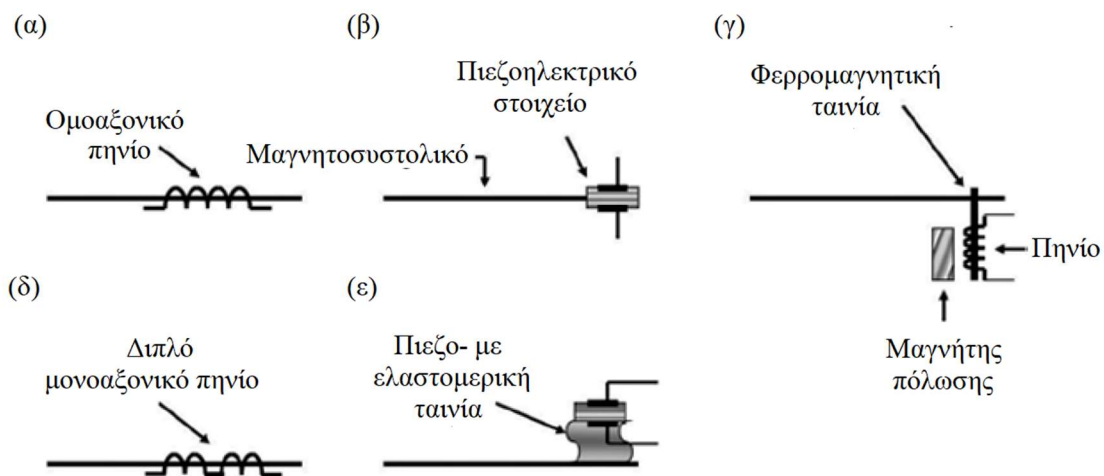
1. να μπορούν να μοντελοποιηθούν εύκολα σε μελλοντική εργασία αλλά και
2. να προσομοιάζουν (όσο το δυνατόν καλύτερα) ένα απομακρυσμένο φερρομαγνητικό σώμα που πλησιάζει τις διάφορες διατάξεις μας.

Αυτό εισάγει μια δυσκολία στα πειράματα που όμως η επαναληψιμότητά τους επιβεβαιώθηκε από αλληπάλληλες μετρήσεις. Για να εξασφαλιστεί ότι καμία μετακίνηση του μαγνήτη σε σχέση με το σύρμα δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί παρά μόνο προς τη διαμήκη κατεύθυνση, όλοι οι μαγνήτες στερεώθηκαν σε πλαστικές ή ξύλινες “ράγες”. Φυσικά μια τελική λύση θα μπορούσε να συμπεριλαμβάνει πακετάρισμα από αλουμίνιο ή άλλο μη μαγνητικό μέταλλο ώστε να αναβαθμιστεί και η δομική ακεραιότητα των πειραμάτων.

4.2.3 Συσκευή ανίχνευσης

Τουλάχιστον τρεις γενικοί τύποι συσκευών λήψης είναι ευρέως γνωστοί: ταινίας, ομοαξονικό πηνίο και πιεζοηλεκτρικό στοιχείο λήψης (βλέπε Σχήμα 14). Η κάθετη ταινία είναι η πιο δύσκολη στην κατασκευή αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι το υλικό της ταινίας μπορεί να παραμετροποιηθεί όπως απαιτείται για μια συσκευή λήψης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη αναλογία σήματος προς θόρυβο από ό,τι στους άλλους τύπους, καθώς η ταινία μπορεί να βελτιστοποιηθεί για μέγιστη απόδοση αντί για χαμηλό θερμικό συντελεστή ηχητικής ταχύτητας ή χαμηλής εξασθένησης που έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό οι άλλες διατάξεις. Η ταινία κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό κράμα που επιλέγεται και επεξεργάζεται για να επιτύχει τον υψηλότερο δυνατό συντελεστή μαγνητοσυστολής (πολύ υψηλότερος από εκείνον του σύρματος) και συγκολλάται στο περίβλημα του σύρματος σε πολύ κοντινή

απόσταση. Το υλικό της ταινίας δεν είναι κατάλληλο για χρήση ως κυματοδηγός (ως πυρήνας) λόγω του υψηλού ρυθμού εξασθένησής του, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάθετη ταινία λήψης επειδή η εξασθένηση δεν είναι σημαντική, αφού χρησιμοποιείται σε πολύ μικρά μήκη. Καθώς το ηχητικό κύμα φθάνει στην διεπιφάνεια του κυματοδηγού και της ταινίας, ένα μέρος της ενέργειας της κυματικής κίνησης μεταδίδεται στην ταινία (και ένα κομμάτι της ενέργειας συνεχίζει στο κύμα). Στην ταινία, το ηχητικό κύμα μετατρέπεται σε κύμα συμπίεσης. Λόγω του φαινομένου Villari (που ονομάζεται επίσης αντίστροφη μαγνητοσυστολή), το κύμα συμπίεσης προκαλεί την δημιουργία μιας περιοχής διαφορετικής διαπερατότητας στην ταινία σε σύγκριση με την υπόλοιπη μη επηρεασμένη περιοχή του υλικού της. Αυτή η περιοχή διαφορετικής διαπερατότητας ταξιδεύει ως κύμα κατά μήκος της ταινίας. Το ελεύθερο άκρο της ταινίας (το άκρο που δεν συγκολλάται στον κυματοδηγό) προεξέχει στο κέντρο ενός πηνίου και μαγνητίζεται από ένα μικρό μαγνήτη πόλωσης. Όταν το ηχητικό κύμα της ταινίας διέρχεται διαμέσου του πηνίου, στην ουσία διέρχεται η περιοχή διαφορετικής διαπερατότητας μέσω του πηνίου. Αυτό προκαλεί μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο τμήμα της ταινίας που έχει διαφορετική διαπερατότητα. Λόγω του φαινομένου Faraday, ένας παλμός τάσης παράγεται κατά μήκος των άκρων του πηνίου καθώς το κύμα της μεταβλητής πυκνότητας μαγνητικής ροής διέρχεται μέσω του πηνίου. Αυτός ο παλμός τάσης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της παρουσίας του αρχικού ηχητικού παλμού.



Σχήμα 14: Διάφορες συσκευές ανίχνευσης αλλαγής της μαγνητικής ροής.

Η ομοαξονική λήψη πηνίων του Σχήμα 14α είναι ο απλούστερος τύπος λήψης. Περιλαμβάνει ένα πηνίο σύρματος μέσω του οποίου διέρχεται ο κυματοδηγός. Είναι λιγότερο σύνθετη διάταξη από τους δέκτες ταινίας του Σχήμα 14 (γ) ή (ε) επειδή εξαλείφει την ανάγκη για επιπλέον εξαρτήματα όπως ταινία και μαγνήτη πόλωσης. Ο παλμός ελαστικού ηχητικού κύματος όπως έχει εξηγηθεί δημιουργεί αλλαγή τοπικά στο μαγνητικό πεδίο. Αυτό με τη σειρά

του ανιχνεύεται από το πηνίο λήψης και παράγει έναν παλμό τάσης όταν το ηχητικό κύμα περνά μέσα από το πηνίο. Καθώς το ηχητικό κύμα επί του κυματοδηγού διέρχεται μέσω του πηνίου, η περιοχή διαφορετικής διαπερατότητας διέρχεται επίσης μέσω του πηνίου. Αυτό παράγει έναν παλμό τάσης κατά μήκος των ακροδεκτών του πηνίου με τον ίδιο τρόπο όπως εξηγείται για την κάθετη ταινία.

Το μειονέκτημα αυτού του απλούστερου σχεδιασμού είναι ότι, δεδομένου ότι ο κυματοδηγός πρέπει να σχεδιαστεί για χαμηλή εξασθένηση και χαμηλή ευαισθησία στην αλλαγή της θερμοκρασίας, ο συντελεστής μαγνητοσυστολής που προκύπτει είναι σχετικά χαμηλός. Για το ίδιο υλικό σύρματος, το πηνίο ανιχνεύει ένα μικρότερο εύρος σήματος και έχει ένα σχετικά χαμηλότερο λόγο σήματος/θορύβου. Αυτό μπορεί να βελτιωθεί βελτιστοποιώντας τον αριθμό των στροφών στο πηνίο λήψης, χρησιμοποιώντας ένα σύρμα μικρής διαμέτρου για την περιέλιξη του πηνίου και ελαχιστοποιώντας την εσωτερική διάμετρο του πηνίου. Η χρήση περισσότερων στροφών στο πηνίο αυξάνει το πλάτος παλμού τάσης για μια δεδομένη διάμετρο μήκος πηνίου, επειδή περισσότερες στροφές σημαίνουν μεγαλύτερη επαγωγική ικανότητα. Μια μικρότερη διάμετρος πηνίου (με τη χρήση καλωδίου μικρότερου διαμέτρου) επιτρέπει σε μια δεδομένη αλλαγή μαγνητικού πεδίου να έχει μεγαλύτερη επίδραση σε έναν δεδομένο αριθμό περιελίξεων.

Έχει επίσης δοκιμαστεί διπλό πηνίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14δ. Ένα πηνίο είναι τυλιγμένο δεξιόστροφα, ενώ ένα άλλο περιελίσσεται αριστερόστροφα. Τα δύο πηνία μπορούν να απέχουν μεταξύ τους κατά το μισό μήκος του ηχητικού κύματος. Στα πηνία που απέχουν το μισό μήκος κύματος, δημιουργείται μεγαλύτερη τάση παλμού στη λήψη. Καθώς η κορυφή ενός ηχητικού κύματος επηρεάζει ένα πηνίο, η αντίθετη κορυφή του ίδιου κύματος επηρεάζει το άλλο πηνίο και τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να προστίθενται οι δύο τάσεις. Αλλά όταν ένα εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο επηρεάζει τα πηνία, οι έξοδοί τους αφαιρούνται και παρέχουν πολύ μικρή τάση εξόδου ως απόκριση σε αυτό το εξωτερικό πεδίο που επηρεάζει και τα δύο πηνία παρόμοια.

Μια πιεζοηλεκτρική λήψη όπως φαίνεται στο Σχήμα 14β μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ενός ηχητικού κύματος από τον κυματοδηγό χωρίς τη χρήση μαγνητικού πεδίου. Αυτό παρέχει την ελπίδα ότι θα ήταν λιγότερο ευαίσθητο στις παρεμβολές από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Στους πραγματικούς αισθητήρες όμως, έχει αποδειχθεί δύσκολο να επιτευχθεί τόσο καλή μεταφορά ενέργειας όσο μπορεί με τις μεθόδους της ταινίας ή του ομοαξονικού πηνίου. Το σχετικά χαμηλό επίπεδο σήματος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό λόγο σήματος/θορύβου, ανατρέποντας την προσπάθεια να μειωθούν οι αλλοιώσεις από εξωτερικές παρεμβολές. Ένας επιπλέον τομέας που προκαλεί αβεβαιότητά ως προς την χρήση των

πιεζοηλεκτρικών λήψεων είναι ότι είναι γενικά κατασκευασμένοι από εύθραυστα κεραμικά υλικά. Πολλά προβλήματα στο πεδίο (από άλλους αισθητήρες στους οποίους χρησιμοποιούνται) έχουν προκληθεί από θραύση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου όταν ο αισθητήρας έπεσε κατά λάθος σε μια σκληρή επιφάνεια.

Στο ε του Σχήμα 14 εμφανίζεται ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που συνδέεται με τον κυματοδηγό με μία ελαστομερή ταινία με την πρόθεση να μειώσει την ευαισθησία σε κραδασμούς. Ωστόσο, αυτό συνοδεύεται με μείωσης του σήματος, καθώς και την αύξηση του χρόνου κατασκευής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των διαφόρων τύπων συσκευών λήψης, τα περισσότερα προϊόντα αισθητήρων μαγνητοσυστολής στην αγορά χρησιμοποιούν είτε τον τύπο που φαίνεται στο Σχήμα 14 (α) είτε (γ). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μόνο ομοαξονικά πηνία λήψης διαφόρων τύπων.

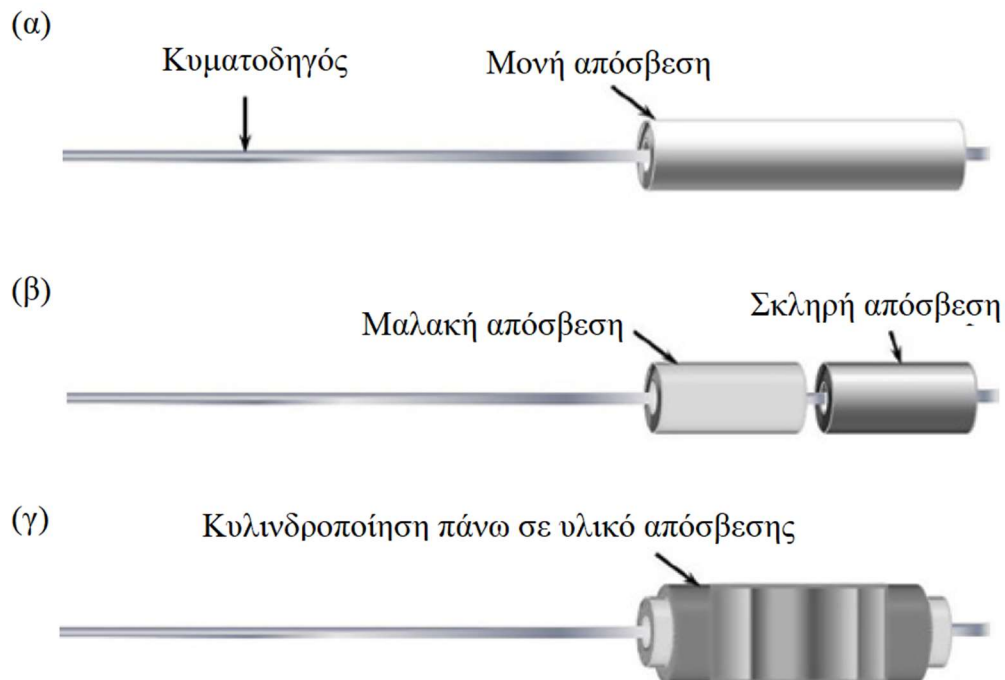
4.2.4 Υλικό απόσβεσης

Ένα στοιχείο απόσβεσης ενσωματώνεται στο άκρο του κυματοδηγού, προκειμένου να αφαιρεθούν οι ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων που λαμβάνουν χώρα στο άκρο του κυματοδηγού. Αν δεν αφαιρεθούν ή έστω μειωθούν, οι ανακλάσεις επιστρέφουν προς το σημείο λήψης, προκαλώντας παρεμβολή και αλλοίωση στον επιθυμητό παλμό σήματος. Το υλικό απόσβεσης πρέπει να έχει επαρκή ποιότητα αποσβέσεως για να εξασθενήσει την ανεπιθύμητη ηχητική ανάκλαση αλλά να μην είναι τόσο αποτελεσματικό στην απόσβεση ώστε να προκαλεί ανάκλαση απευθείας από το σημείο επαφής του με τον κυματοδηγό. Για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης χρησιμοποιούνται διάφοροι συνδυασμοί σχήματος και σκληρότητας ελαστομερών υλικών.

Στην απλή απόσβεση του Σχήμα 15α, μια στρώση από ελαστικό με βάση την σιλικόνη ολισθαίνει πάνω από τον κυματοδηγό. Η προσαρμογή θα πρέπει να είναι σφιχτή αλλά ικανή να ολισθαίνει (δηλαδή η εσωτερική διάμετρος του υλικού απόσβεσης θα πρέπει να είναι κοντά στο ίδιο μέγεθος με την εξωτερική διάμετρο του σύρματος). Αυτή η μονή απόσβεση απαιτεί μαλακό υλικό (όπως σκληρότητα 35 στη κλίμακα Shore) και μεγάλο σχετικά μήκος (όπως 65mm), σε σύγκριση με τους άλλους τύπους.

Όταν χρησιμοποιείται διπλή απόσβεση, η πρώτη (στα αριστερά του Σχήμα 15β) θα πρέπει να είναι μαλακή, έτσι ώστε να μην υπάρχει ανάκλαση από το μέτωπό της. Η δεύτερη μπορεί να είναι κάπως πιο σκληρή, για να παρέχει ισχυρότερη απόσβεση. Για παράδειγμα, η πρώτη μπορεί να είναι σκληρότητας 35A της κλίμακας Shore και μήκους 25 mm, με τη

δεύτερη στα 55A σκληρότητα και 25 mm μήκος. Η επιλογή του μεγέθους και της σκληρότητας του στοιχείου απόσβεσης απαιτεί κάποιους κύκλους δοκιμών και σφαλμάτων.



Σχήμα 15: Τρία παραδείγματα υλικών απόσβεσης.

Στο Σχήμα 15γ παρουσιάζεται μια διαφορετική απόσβεση. Συνδυάζει μια θήκη από ελαστομερές ή υαλοβάμβακα, στην οποία ασκείται πίεση ώστε να μορφοποιηθεί και να σκληρύνει στον επιθυμητό βαθμό. Η πίεση εφαρμόζεται μέσω ολίσθησης ενός μεταλλικού σωλήνα (κατασκευασμένου από ορείχαλκο) επάνω από στο υλικό και πιέζει προς το κέντρο για συμπίεση του στον επιθυμητό βαθμό. Αυτή η διαμόρφωση υλικού απόσβεσης μπορεί να είναι δύσκολο να στερεωθεί για μια γρήγορη και εύκολη κατασκευή, αλλά έχει ως αποτέλεσμα ένα στοιχείο απόσβεσης που είναι τελικά μικρότερο από τα άλλα δύο για μια δεδομένη ποσότητα απόσβεσης.

Στα πλαίσια των πειραμάτων χρησιμοποιείται μονή απόσβεση είτε από λαστιχάκι (ελαστικό με βάση την σιλίκονη) είτε λατέξ με σκληρότητα 20-30A στη κλίμακα Shore. Στο Γράφημα 8 εμφανίζεται η λήψη του αισθητήρα πριν και μετά την εφαρμογή του υλικού απόσβεσης. Εδώ παρουσιάζεται μια πολύ καλή απόκριση στην απόσβεση αλλά γενικά υπήρξε διαφορά από την εφαρμογή σε κάθε διαφορετικό σύρμα. Χωρίς να είναι κύριο αντικείμενο έρευνας για την παρούσα εργασία, τα αποτελέσματα των διάφορων αποσβέσεων δεν παρουσιάζονται αλλά μια συνολική προσέγγιση συνοψίστηκε σε αυτό το κεφάλαιο.



Γράφημα 8: Λήψη αισθητήρα πριν και μετά την εφαρμογή υλικού απόσβεσης.

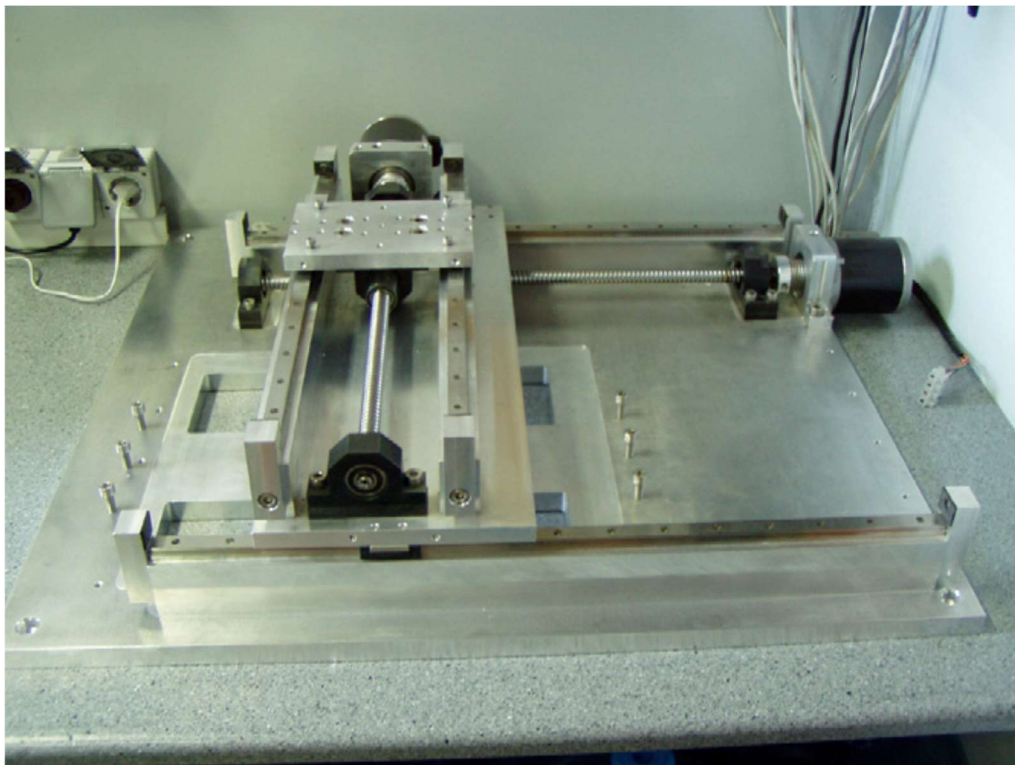
4.2.5 Υλικό πακεταρίσματος

- Απλές διατάξεις με διέγερση και λήψη επαγωγικών πηνίων.

Σε μια πληθώρα από διατάξεις που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν μη μαγνητικά υλικά όπως ξύλο, εποξική κόλλα και μονωτικές ταινίες Kynar για την υποστήριξη των μαγνητοσυστολικών συρμάτων και των κυκλωματικών στοιχείων. Μια ξύλινη επιφάνεια 100X15cm χρησιμοποιήθηκε ως βάση όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Προφανώς δεν χρησιμοποιείται υλικό για πακετάρισμα αλλά για υποστήριξη και διευκόλυνση των πειραμάτων. Σε μελλοντική εργασία δύναται να χρησιμοποιηθεί η μεταλλική διάταξη βραχιόνων με κίνηση μέσω σερβοκινητήρα όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 2 όπου θα προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια και ανάλυση στις μετρήσεις.



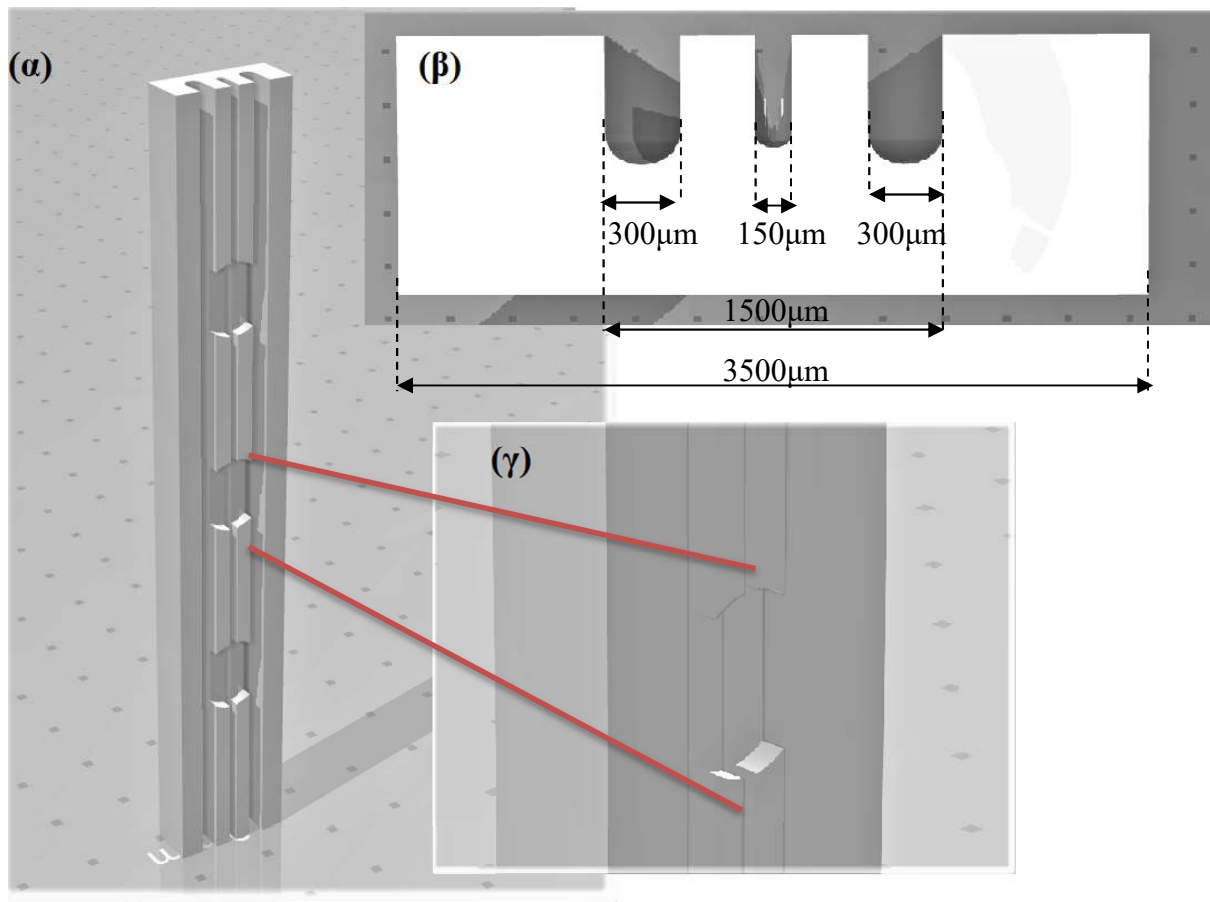
Εικόνα 1: Άποψη της ιδιοκατασκευής στο εργαστήριο αισθητήρων.



Εικόνα 2: Άποψη της διάταξης με βραχίονες που ελέγχονται μέσω σερβοκινητήρα.

- **Διάταξη MDL με διέγερση μέσω δινορευμάτων.**

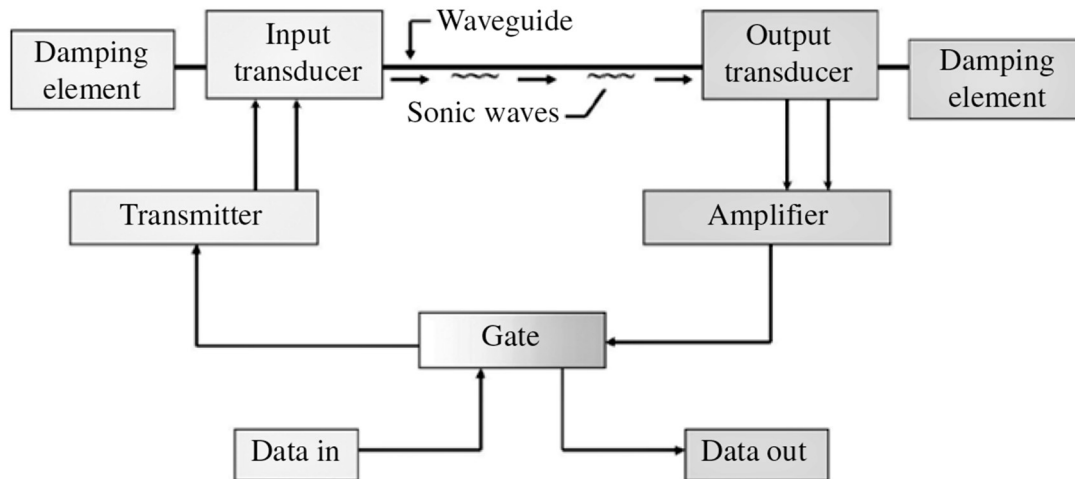
Για την διάταξη με χρήση δίσκων χαλκού διαμέτρου 300 μ m χρειάστηκε η σχεδίαση ενός οδηγού από Nylon υλικό. Η σχεδίαση έγινε στο πρόγραμμα AutoCad 2014 και παρασκευάστηκε μέσω 3D printer. Προτιμήθηκε, για να βελτιωθεί η αντοχή του υλικού, να χρησιμοποιηθεί Nylon με ίνες άνθρακα που δεν επηρεάζουν την αγωγιμότητα του υλικού.



Σχήμα 16: Διάφορες όψεις της βάσης στήριξης του αισθητήρα με δίσκους σχεδιασμένη στο AutoCad: (α) Άποψη της όλης κατασκευής (β) Πρόσοψη με τα αντίστοιχα μεγέθη (γ) Λεπτομέρεια της κυκλικής εσοχής.

4.2.6 Ηλεκτρονική διάταξη

Μια τυπική κατασκευή ενός αισθητήρα που χρησιμοποιεί ένα μαγνητοσυστολικό σύρμα εμφανίζεται στο Σχήμα 17. Το γράφημα συμπεριλαμβάνει το ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο, δημιουργεί τους παλμούς διέγερσης, δέχεται σήμα μέσω του πηνίου λήψης, τους οποίους ενισχύει, φιλτράρει και ανιχνεύει το τελικό σήμα και στη συνέχεια παρέχει την επιθυμητή αναλογική ή ψηφιακή έξοδο.



Σχήμα 17: Μια συσκευή σειριακής μνήμης που χρησιμοποιεί μαγνητοσυστολικό σύρμα καθυστέρησης.

Η διάταξη που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο αισθητήρων μπορεί να διαχωριστεί σε κύκλωμα διέγερσης που συνδέεται με την τροφοδοσία και κύκλωμα ενίσχυσης που καταλήγει στον παλμογράφο.

4.2.6.1 Κυκλώματα διέγερσης

Οι απαιτήσεις του κυκλώματος διέγερσης που καταλήγει σε ένα πηνίο με σκοπό την ενεργοποίηση ενός αισθητήρα MDL καθορίστηκαν έτσι ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία μικροπαραμορφώσεων στον μαγνητοσυστολικό πυρήνα που είναι και αρχή λειτουργίας του αισθητήρα. Οι απαιτήσεις είναι:

- ✓ Διάρκεια διέγερσης 1-5μs
- ✓ Ένταση ρεύματος >1A
- ✓ Χρόνοι Rise/Fall του παλμού της τάξης των 100ns
- ✓ Duty Cycle που μπορεί να αλλάξει ανάλογα με το υλικό του πυρήνα.

Δύο κυκλώματα διέγερσης σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν. Το πρώτο με σκοπό να είναι φορητό και να τροφοδοτείται από μπαταρία (Non-Configurable – κύκλωμα NC) και το δεύτερο να είναι εύκολα παραμετροποιήσιμο και να τροφοδοτείται από γεννήτρια (Configurable - κύκλωμα C).

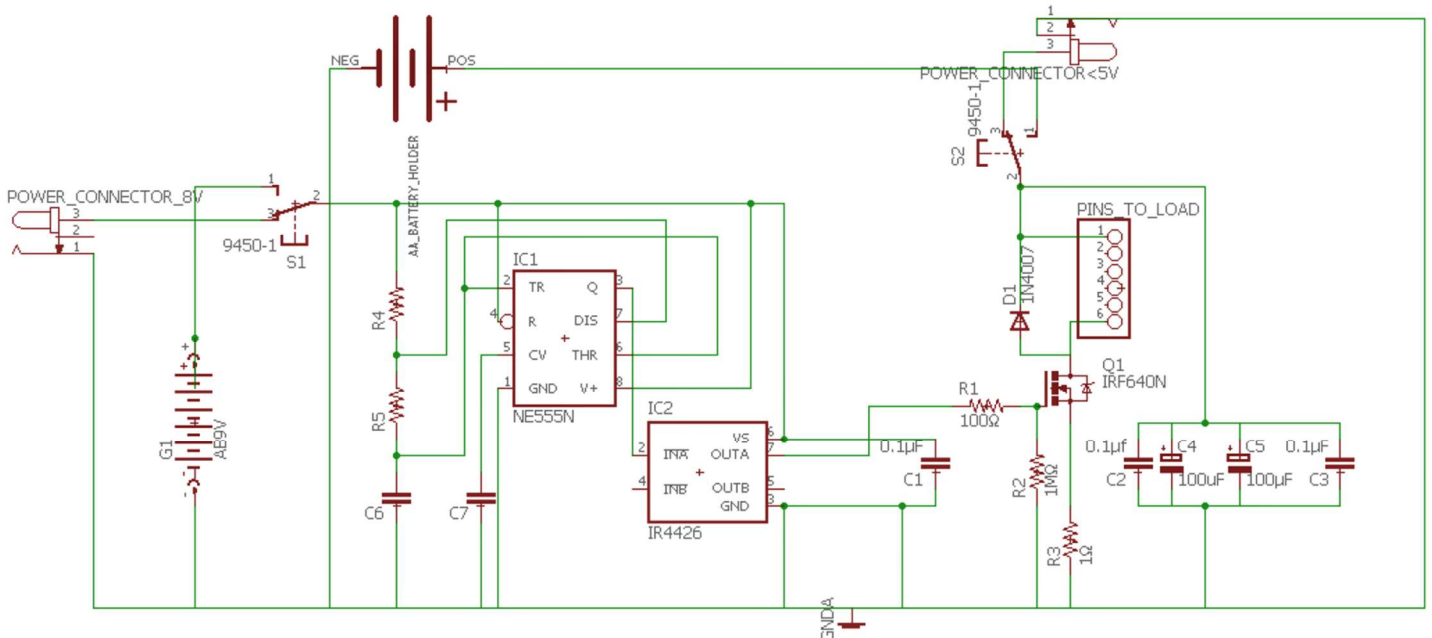
Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται το διάγραμμα του κυκλώματος NC όπως σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα σχεδίασης Autodesk Eagle 8.3.1. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το κύκλωμα ελέγχου και το διακοπτικό κύκλωμα. Ακολουθεί ο καταμερισμός των επιμέρους στοιχείων:

➤ Κύκλωμα ελέγχου

- Ολοκληρωμένο NE555 (ταλαντωτής)
- R4, R5, C6 καθορίζουν την συχνότητα του ταλαντωτή
- Η έξοδος του ταλαντωτή καταλήγει σε έναν οδηγό MOSFET (IR4426) ο οποίος και οδηγεί το ρεύμα στην πύλη του τρανζίστορ και το αντιστρέφει.

➤ Διακοπτικό κύκλωμα

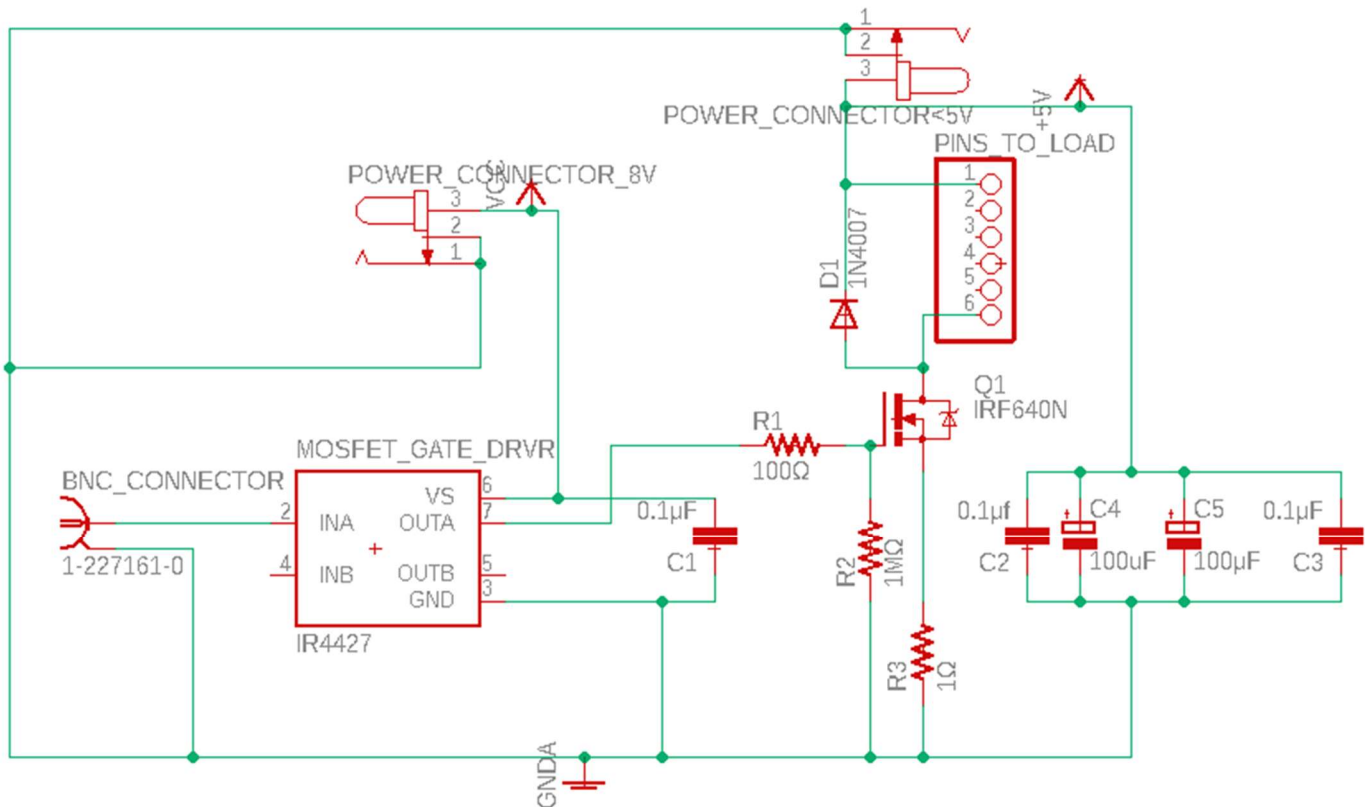
- Διακόπτης MOSFET (IRF640N) που για $V_{GS} > 8V$ το ρεύμα διαρρέει τον κλάδο.
- Δίοδος παράλληλη στο φορτίο στην είσοδο του τρανζίστορ για μηδενισμό επαγωγικών κορυφών.
- Μικρή αντίσταση R3 κάτω από το τρανζίστορ ώστε να πραγματοποιείται μέτρηση του ρεύματος από τον παλμογράφο σε πραγματικό χρόνο (ως αναφορά προς την γείωση).
- 4 πυκνωτές σταθεροποίησης, 2 mlcc και 2 ηλεκτρολυτικοί, οι οποίοι σταθεροποιούν την τάση τροφοδοσίας αφού η τροφοδοσία δεν μπορεί να ακολουθήσει την ταχύτητα μετάβασης ανοικτό/κλειστό του κυκλώματος.



Σχήμα 18: Κύκλωμα διέγερσης NC.

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται το διάγραμμα του κυκλώματος C όπως σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα σχεδίασης Autodesk Eagle 8.3.1. Το κύκλωμα C είναι όμοιο με το κύκλωμα NC

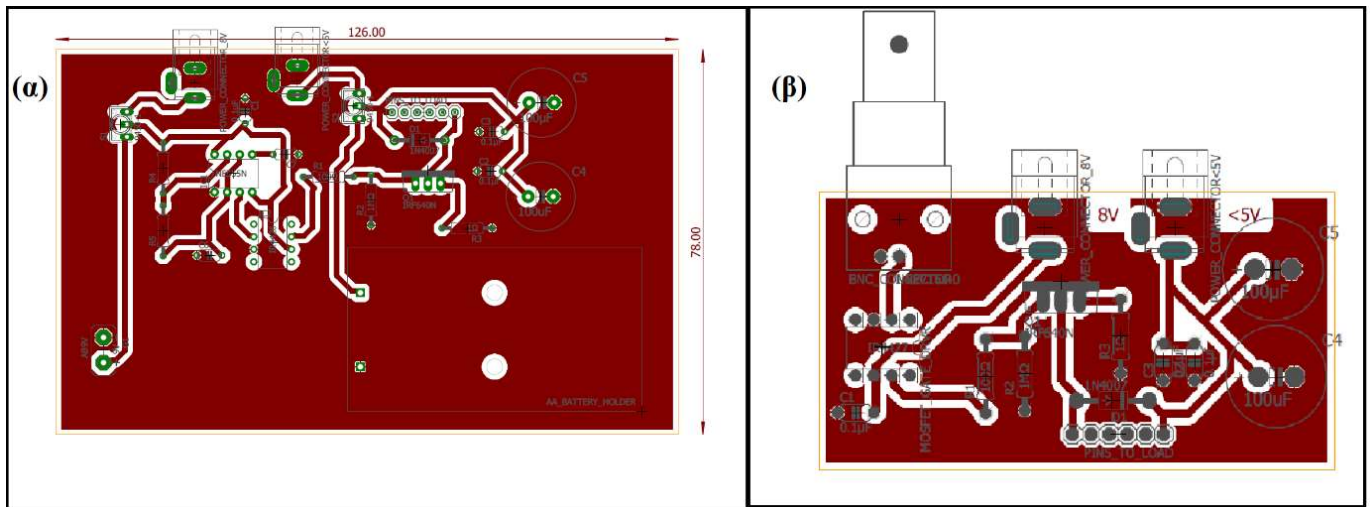
αλλά με την διαφορά ότι το σήμα ελέγχου της πύλης παράγεται από γεννήτρια. Για να γίνει αυτό αντικαθίσταται ο οδηγός MOSFET από τον IR4427 με ίδιες λειτουργίες αλλά χωρίς να έχει αντιστρέφουσες εισόδους.



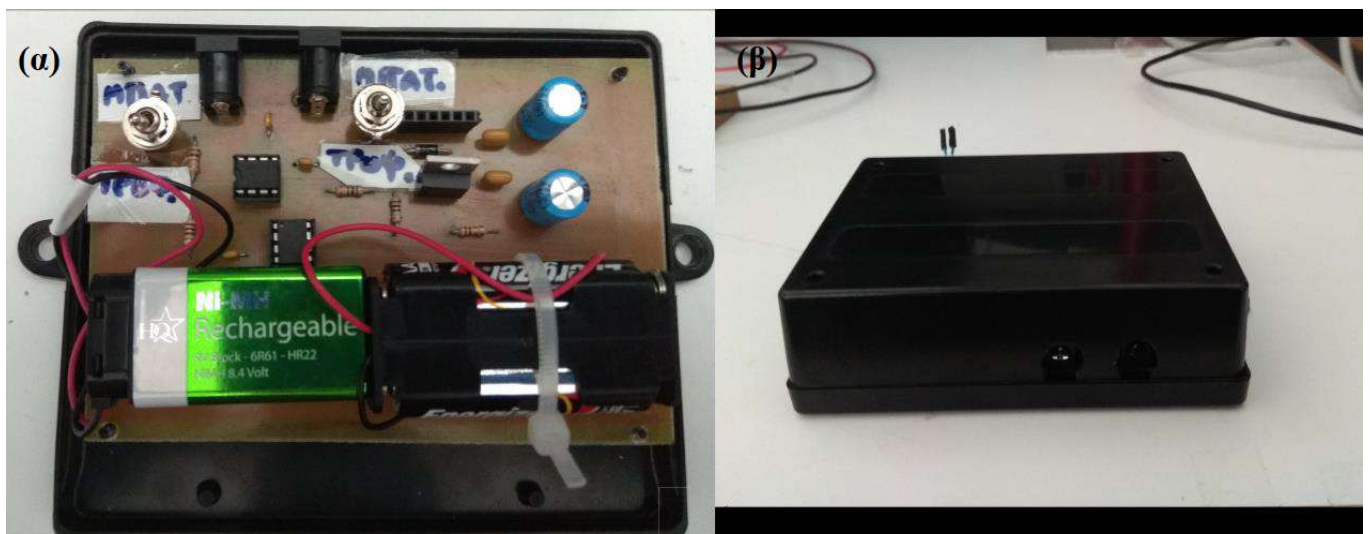
Σχήμα 19: Κύκλωμα διέγερσης C.

Για την κατασκευή των πλακετών χρησιμοποιήθηκαν διατάξεις του εργαστηρίου αισθητήρων του ΕΜΠ. Αρχικά το αρνητικό του κυκλώματος (δηλαδή αντεστραμμένο) τυπώνεται σε έναν εκτυπωτή λέιζερ με ικανή ακρίβεια. Η εκτύπωση είναι 1:1 σε διαφανή ζελατίνα. Στη συνέχεια αφαιρούμε την πλαστική επιφάνεια που προστατεύει την φωτοευαίσθητη πλακέτα και τοποθετούμε την μάσκα από ζελατίνα που έχουμε τυπώσει. Τοποθετούμε την πλακέτα σε συσκευή έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία. Ακολουθεί η αφαίρεση της μάσκας και ο καθαρισμός της πλακέτας με διάλυμα 1% NaOH με απαλές κινήσεις ώστε να αφαιρεθεί η φωτοευαίσθητη επιφάνεια που έχει εκτεθεί στο υπεριώδες. Ως τελευταίο στάδιο προχωράμε σε οξυγραφία (etching), όπου βυθίζουμε την πλακέτα σε διάλυμα FeCl₃ με συνεχή ανάδευση για περίπου 30-60 λεπτά ώστε να πραγματοποιηθεί η αποχάλκωση. Η πλακέτα καθαρίζεται από χημικά υπολείμματα και σε όλη την διάρκεια πρέπει να εξασφαλίζεται ότι χρησιμοποιούμε σωστά τον απαγωγό και τα ατομικά μέσα προστασίας του εργαστηρίου. Όλα τα στοιχεία κολλήθηκαν με τον κατάλληλο εξοπλισμό (κολλητήρι +

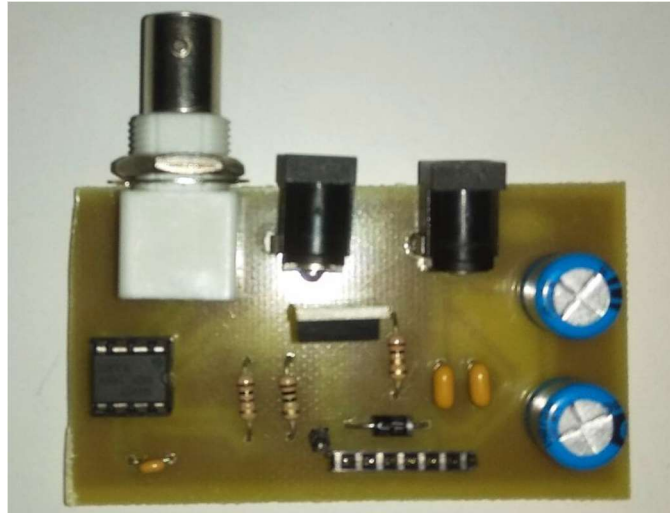
καλά) στο εργαστήριο αισθητήρων και η Εικόνα 3α και Εικόνα 4 εμφανίζουν το τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 20: Σχέδιο πλακέτας για τα κυκλώματα (α) NC και (β) C.



Εικόνα 3: Φωτογραφίες του κυκλώματος NC. (α) Η πλακέτα με τα στοιχεία του κυκλώματος και (β) το κουτί συσκευασίας μέσα στο οποίο εδράζεται η πλακέτα.



Εικόνα 4: Η πλακέτα με τα στοιχεία του κυκλώματος C.

Τα τελικά χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πηνίου διέγερσης. Για το πηνίο διέγερσης τις πλείστες των περιπτώσεων χρησιμοποιήθηκε σύρμα διαμέτρου 0.1mm με 5 περιελίξεις. Για το συγκεκριμένο πηνίο το κύκλωμα NC (που δύναται να λειτουργήσει είτε με τροφοδοτικό είτε με μπαταρίες) λειτουργεί με συχνότητα διέγερσης 1.4KHz, ένταση ρεύματος $\leq 5A$, διάρκεια παλμού 5 μs και rise/fall time = 240/180ns. Αντίστοιχα για το κύκλωμα C (που λειτουργεί με γεννήτρια συχνοτήτων) η συχνότητα διέγερσης είναι 1Hz-5KHz, η ένταση του ρεύματος $\leq 5A$, η διάρκεια του παλμού $\geq 16\mu s$ και το rise/fall time = 240/180ns. Το κύκλωμα C χρησιμοποιείται μόνο αν θέλουμε να παρατηρήσουμε μακρύτερης διάρκειας παλμούς, ενώ το NC είναι για την λειτουργία της διάταξης ως αισθητήρα θέσης.

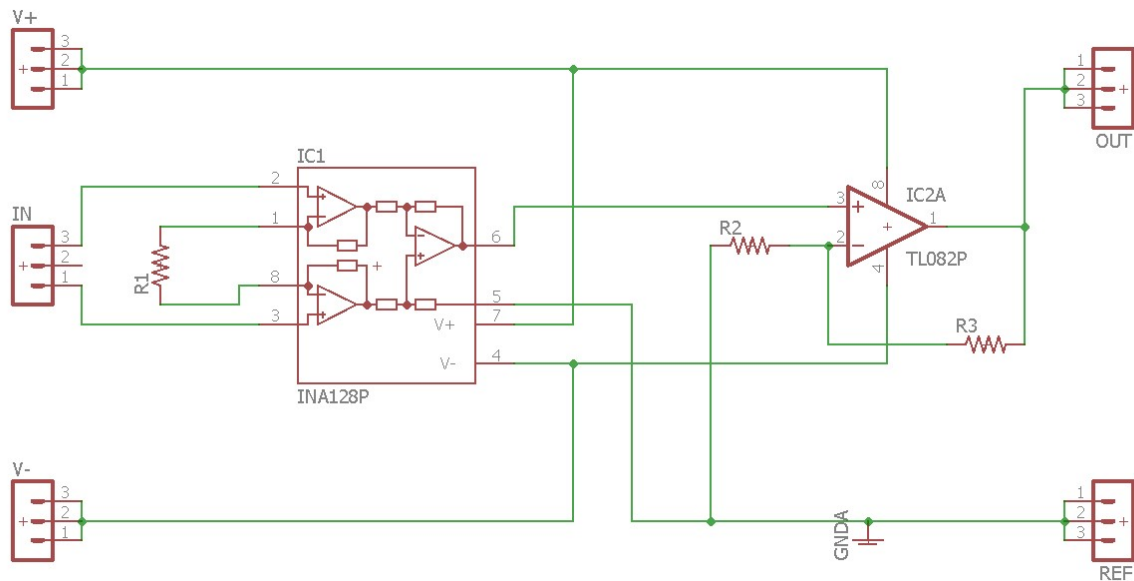
4.2.6.2 Κύκλωμα ενίσχυσης

Κατά τα πρώτα στάδια των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η τάση εξόδου ήταν της τάξης των mV όμως το σήμα ήταν αρκετά καθαρό, δηλαδή είχε μεγάλο signal/noise ration (SNR). Για να μπορεί να εφαρμοστεί τελικά και σε πεδίο η όποια αισθητήρια διάταξη σχεδιάστηκε κύκλωμα ενίσχυσης ώστε να μην απαιτούνται όργανα μεγάλης ακρίβειας για να εντοπίσουν το σήμα.

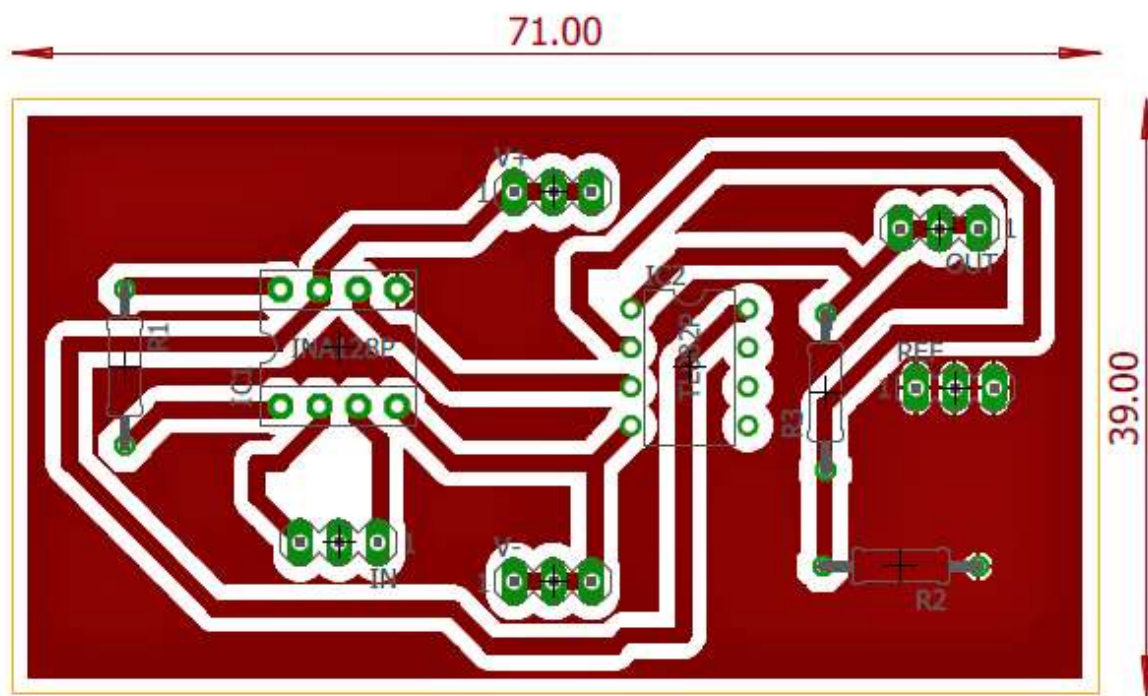
Το κύκλωμα ενίσχυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 21. Έχει επιτευχθεί κέρδος 1000 με το χρήσιμο φασματικό περιεχόμενο του σήματος να είναι στα 200KHz. Τέλος έχουμε υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος που μπορεί να προέρχεται από θόρυβο ή Η/Μ παρεμβολή.

Όπως προηγουμένως το κύκλωμα σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα σχεδίασης Autodesk Eagle 8.3.1. Χρησιμοποιείται ένας instrumentation ενισχυτής INA128 και ακολουθεί ένας τελεστικός TL082.

Η κατασκευή της πλακέτας έγινε στο εργαστήριο αισθητήρων του ΕΜΠ όπως ακριβώς και για τις πλακέτες διέγερσης και το σχέδιο της εμφανίζεται στο Σχήμα 22.



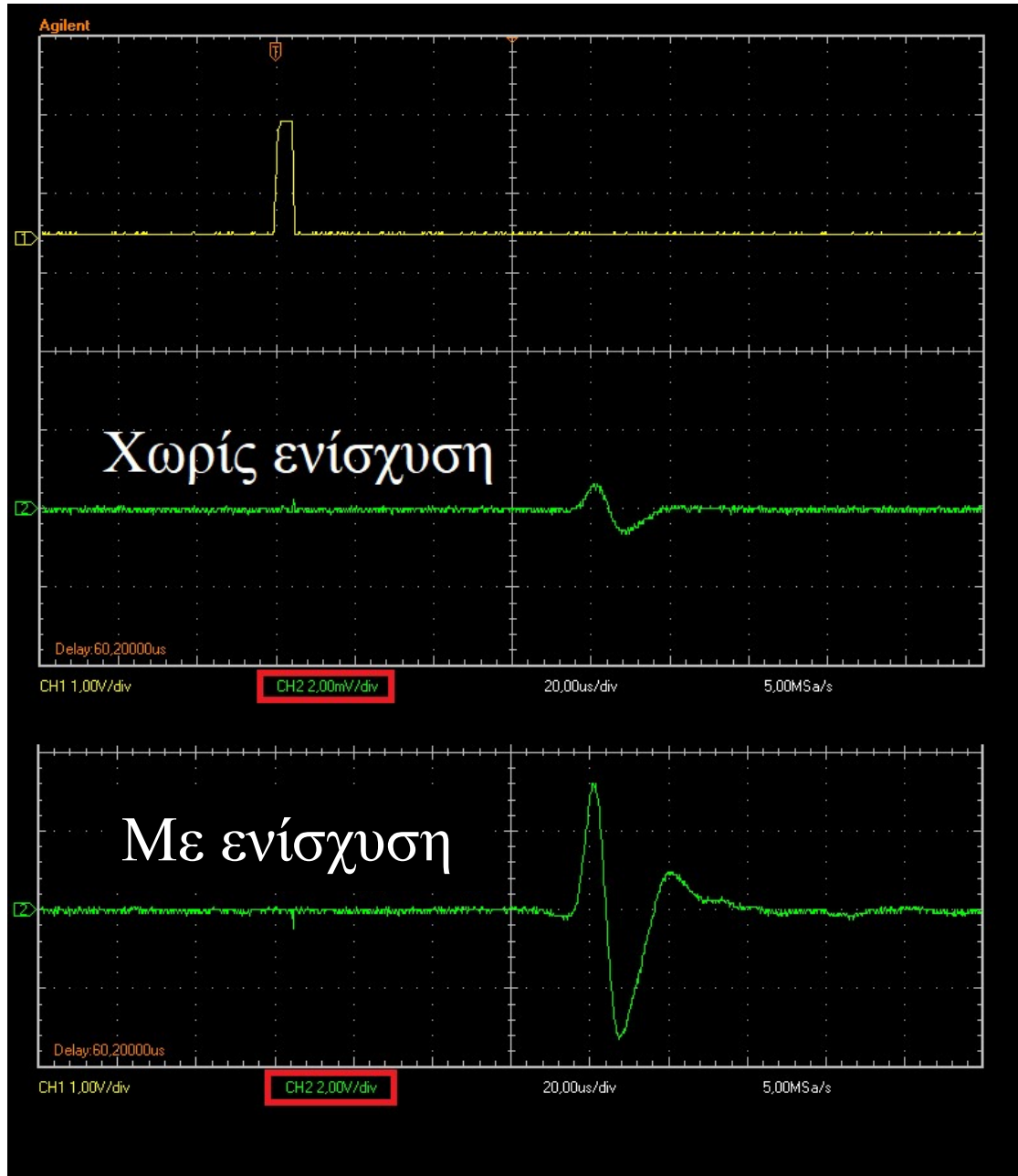
Σχήμα 21: Διάγραμμα κυκλώματος ενίσχυσης.



Σχήμα 22: Σχέδιο πλακέτας για το κύκλωμα λήψης.

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία της ενίσχυσης πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από πειράματα και το τελικό βέλτιστο αποτέλεσμα είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε και σε

όλα τα επόμενα πειράματα ως ενίσχυση του σήματος εξόδου. Στο Γράφημα 9 εμφανίζεται η λήψη στον παλμογράφο πριν και μετά την ενίσχυση. Το κύκλωμα λειτουργεί χωρίς να εισάγει παραμορφώσεις στο σήμα και με πολύ καλό signal/noise ratio.



Γράφημα 9: Λήψη στον παλμογράφο πριν και μετά την ενίσχυση του σήματος μέσω του κυκλώματος ενίσχυσης. Με κίτρινο είναι το πρώτο κανάλι που εμφανίζεται ο χρονισμός της διέγερσης και με πράσινο είναι το δεύτερο κανάλι που ανιχνεύεται η λήψη. Στο γράφημα την ενίσχυσης έχει παραλειφθεί ο χρονισμός του πρώτου καναλιού αφού είναι ο ίδιος.

5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που διεξήχθησαν για να μελετηθούν μια σειρά από διατάξεις ξεκινώντας από την βασική αρχή λειτουργίας των MDL και καταλήγοντας στην διάταξη που χρησιμοποιεί ως πηγή των ελαστικών παλμών στα μαγνητοσυστολικά υλικά τα δινορεύματα.

5.1 Πείραμα απλής διάταξης MDL

5.1.1 Αρχή λειτουργίας

Αρχικά κατασκευάστηκαν όλα τα απαραίτητα μέρη ώστε να καταστεί δυνατή η μετάδοση σήματος από ένα πηνίο σε ένα άλλο δημιουργώντας ελαστικά κύματα σε ένα μαγνητοσυστολικό σύρμα. Για τα πηνία λήψης και διέγερσης χρησιμοποιήθηκαν ιατρικά γυάλινα σωληνάρια εσωτερικής διαμέτρου 0.9mm και εξωτερικής 1mm ως βάση γύρω από τα οποία τυλίχτηκαν τα πηνία.

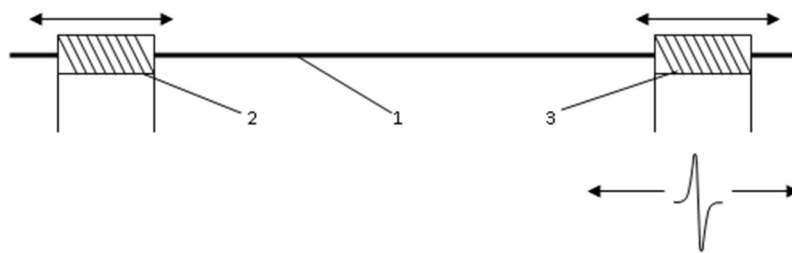
Ως πηνίο διέγερσης χρησιμοποιήθηκε σύρμα χαλκού 0.1mm των 5 περιελίξεων. Το ρεύμα διέγερσης είναι 1.5A και διάρκειας 5μs. Ως πηνίο λήψης χρησιμοποιήθηκε σύρμα χαλκού 0.1mm των 200 περιελίξεων.

Τα δύο πηνία (μαζί με τον αντίστοιχο γυάλινο σωλήνα τους) στερεώνονται πάνω σε πλαστικά πλακίδια. Τα πλακίδια έχουν την ικανότητα να ολισθαίνουν πάνω σε μια διαμήκη πλαστική ράγα κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα δυο πηνία να παραμένουν ευθυγραμμισμένα και να μπορεί να αλλαχθεί μόνο η απόσταση τους πάνω σε έναν άξονα που ορίζεται από τη ράγα.

Στην Εικόνα 1 εμφανίζεται η κατασκευή όπου μέσα από τους γυάλινους σωλήνες των πηνίων διέρχεται το μαγνητοσυστολικό σύρμα που δρα ως κυματοδηγός. Κατά μήκος της διάταξης έχει κολληθεί μιλιμετρέ χαρτί για την καταγραφή των αποστάσεων. Η διακριτική ικανότητα των μετρήσεων απόστασης με αυτό τον τρόπο είναι στο 1mm και η ακρίβεια στα $\pm 1\text{mm}$. Το εύρος μετρήσεων είναι στα 0-100cm όπου 100cm είναι και το μήκος της ξύλινης βάσης μαζί με την πλαστική ράγα. Το σύρμα έχει κοπεί στα 120cm και στις άκρες του έχει εφαρμοστεί το υλικό της απόσβεσης όπως έχει περιγραφεί παραπάνω. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων εξασφαλίζεται πάντα ότι ο πυρήνας τρέχει μέσα από τα πηνία και συνεχίζει και προς τις δυο κατευθύνσεις για τουλάχιστον άλλα 10cm.

Το πηνίο διέγερσης συνδέεται με το κύκλωμα διέγερσης και αντίστοιχα το πηνίο λήψης με το κύκλωμα ενίσχυσης και τον παλμογράφο. Το κανάλι 1 (κίτρινο) του παλμογράφου είναι συνδεδεμένο με την διέγερση και το κανάλι 2 (πράσινο) με την λήψη. Η διαφορά στον χρονοισμό των δυο καναλιών αντιστοιχεί στην απόσταση του ενός πηνίου με το άλλο.

Στο πρώτο στάδιο ο παλμός ρεύματος περνάει μέσα από το πηνίο διέγερσης όπου προκαλεί μια μεταβολή της μαγνητικής ροής στον άξονα που ορίζει το σύρμα. Αυτή η μεταβολή προκαλεί μικροπαραμορφώσεις στο μαγνητοσυστολικό σύρμα οι οποίες σχηματίζουν ελαστικό κύμα. Το κύμα διαδίδεται και στις δύο κατευθύνσεις που ορίζονται από το σύρμα. Στη μία κατεύθυνση (αριστερά όπως κοιτάμε το Σχήμα 23) το κύμα αποσβένει στο κοντινό άκρο ενώ στην άλλη κατεύθυνση το κύμα, μετά από ένα μήκος x , περνάει από την περιοχή όπου εδράζεται το πηνίο λήψης και τέλος αποσβένει στο δεξί άκρο.

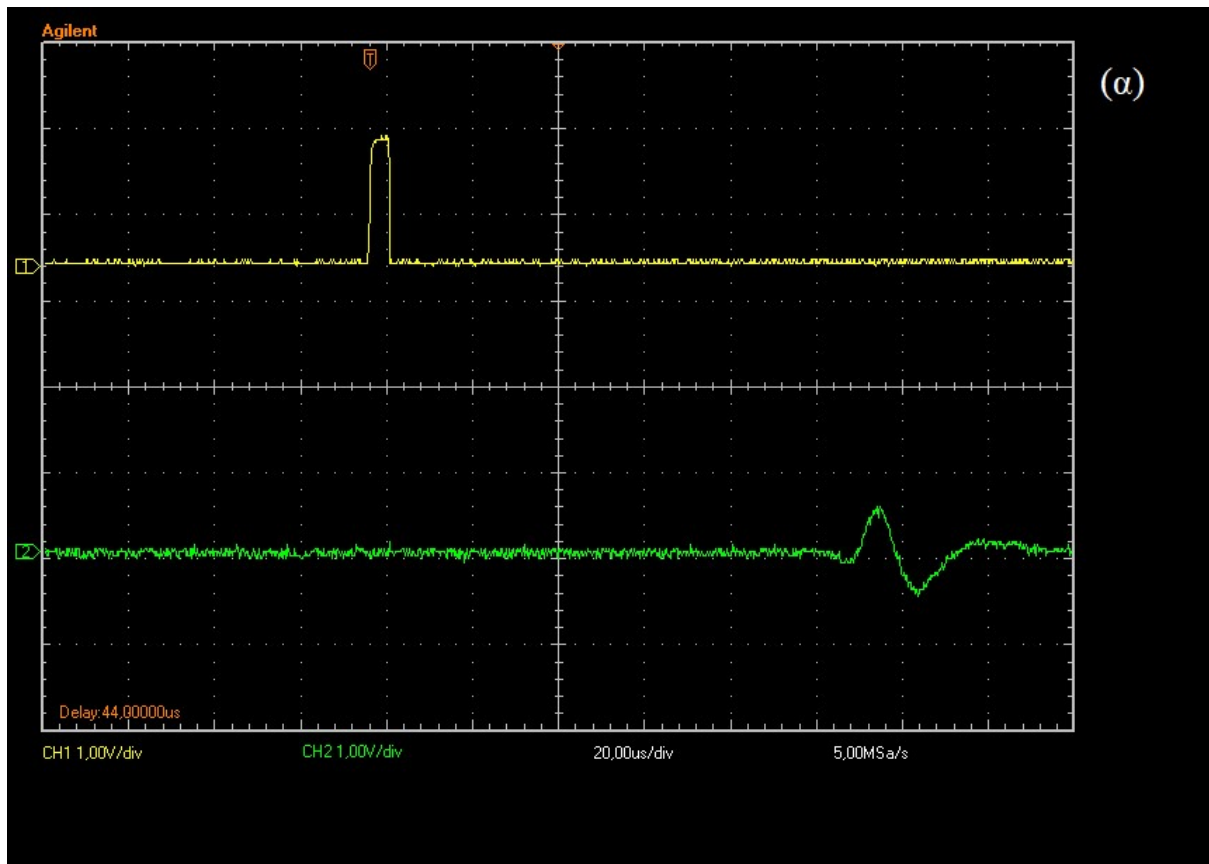


Σχήμα 23: Μετακινώντας είτε το πηνίο διέγερσης είτε το πηνίο λήψης προκαλείται αλλαγή στον χρονισμό του εντοπισμού των τάσεων διέγερσης-λήψης. (1) Μαγνητοσυστολικό σύρμα, (2) Πηνίο διέγερσης, (3) πηνίο λήψης.

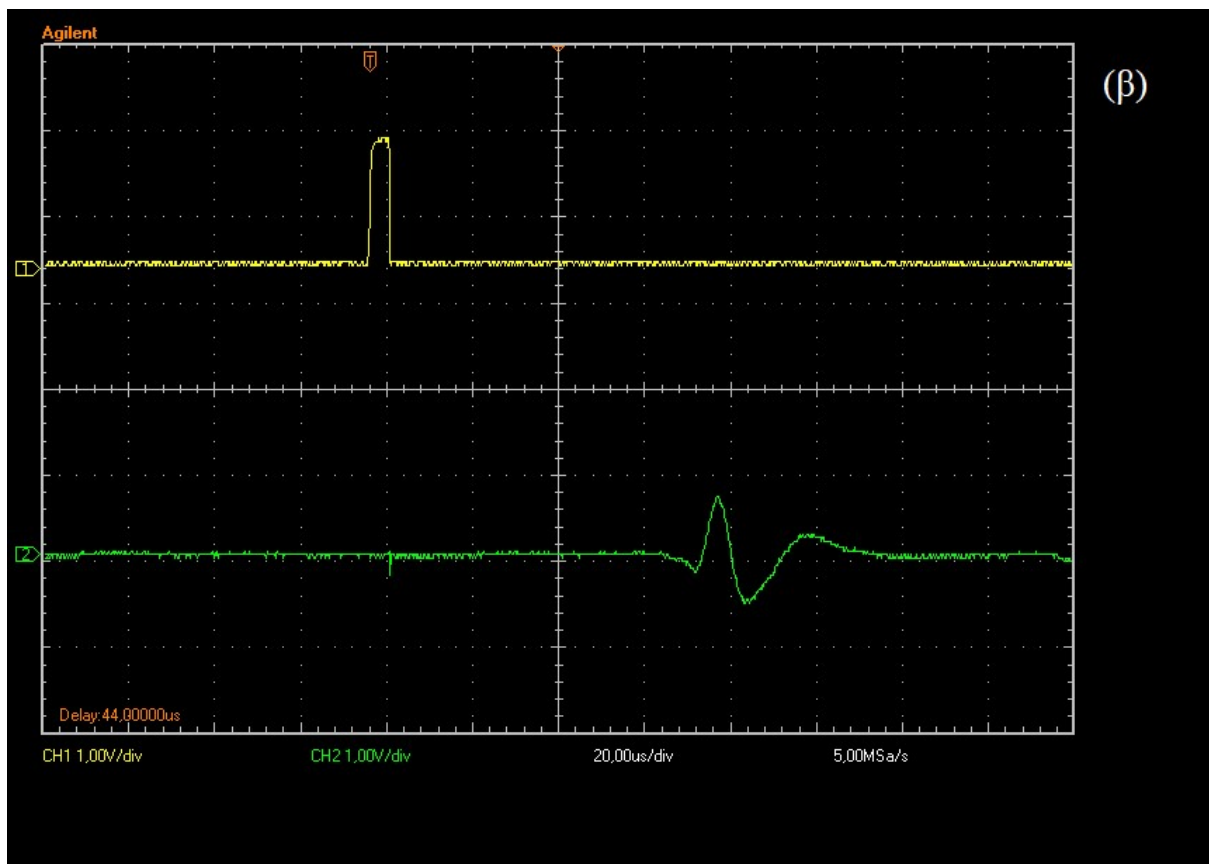
Ο χρόνος που κάνει το κύμα για να διανύσει την απόσταση μεταξύ των δυο πηνίων είναι ανάλογος της απόστασης των δυο πηνίων. Έχοντας ως κινητή την λήψη, πάρθηκαν μετρήσεις σε απόσταση από την διέγερση από 50cm ως 5cm με βήμα 0,5cm. Στα γραφήματα Γράφημα 10-Γράφημα 13 παρουσιάζεται η απόκριση του παλμογράφου για 50(α), 35(β), 25(γ) και 10cm(δ) απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων.

Τα συγκεκριμένα στιγμιότυπα είναι ενδεικτικά. Συνολικά πάρθηκαν 90 μετρήσεις. Όσο πλησιάζουν τα δύο πηνία τόσο πλησιάζουν χρονικά και οι παλμοί των δύο καναλιών. Παρατηρείται ότι στα 10cm έχει αρχίσει να αλλοιώνεται η κυματομορφή της λήψης λόγω της εγγύτητας των πηνίων. Ο λόγος αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο παρακάτω.

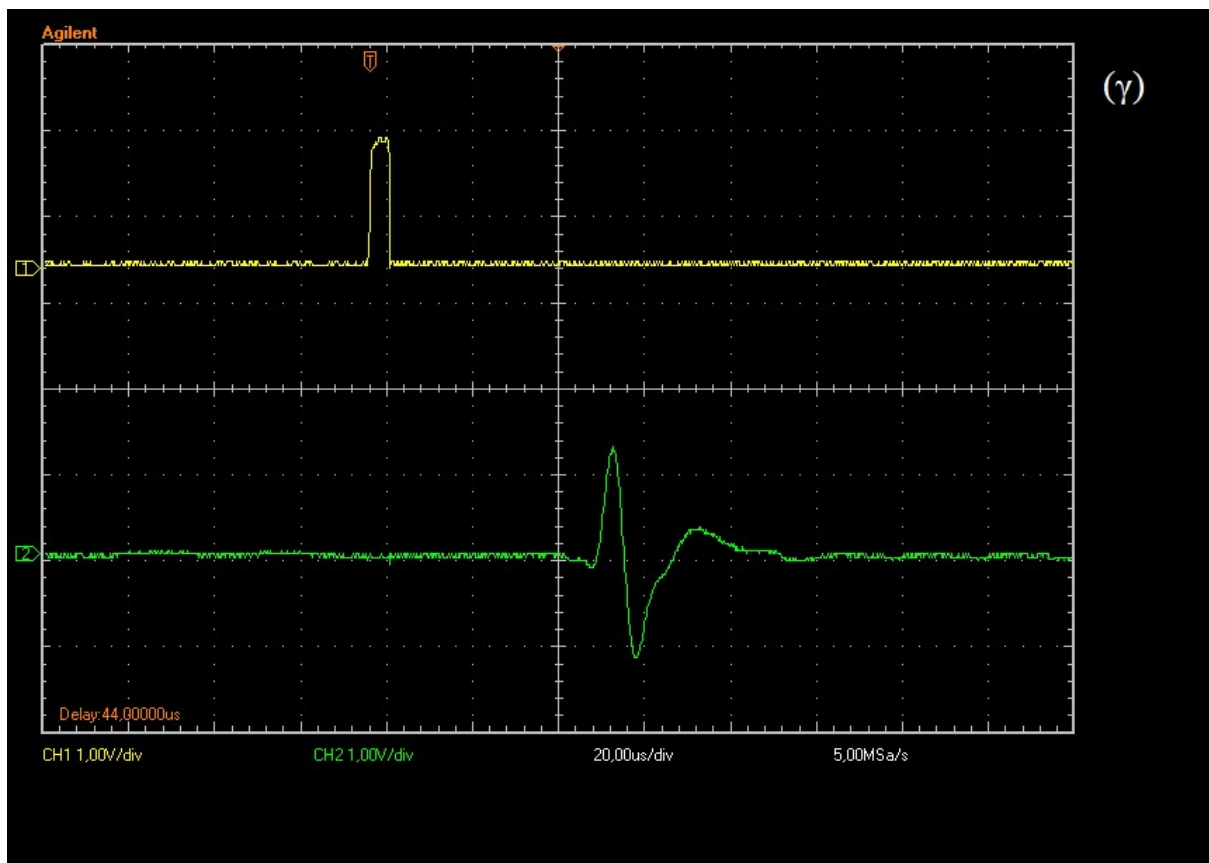
Κατασκευάζοντας λοιπόν έναν αισθητήρα αυτό που στοχεύει κανείς είναι να παράγεται μια απόκριση η οποία να είναι γραμμικά συσχετισμένη με το μετρούμενο μέγεθος. Στη προκύπτουσα περίπτωση, το ιδανικό θα ήταν η μέγιστη τάση εξόδου (λήψης) της κάθε μέτρησης να είναι γραμμικά συσχετισμένη με την απόσταση των πηνίων. Για τον σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν όλες οι μετρήσεις και κατασκευάστηκε το διάγραμμα της καμπύλης ομοιομορφία στο Γράφημα 14.



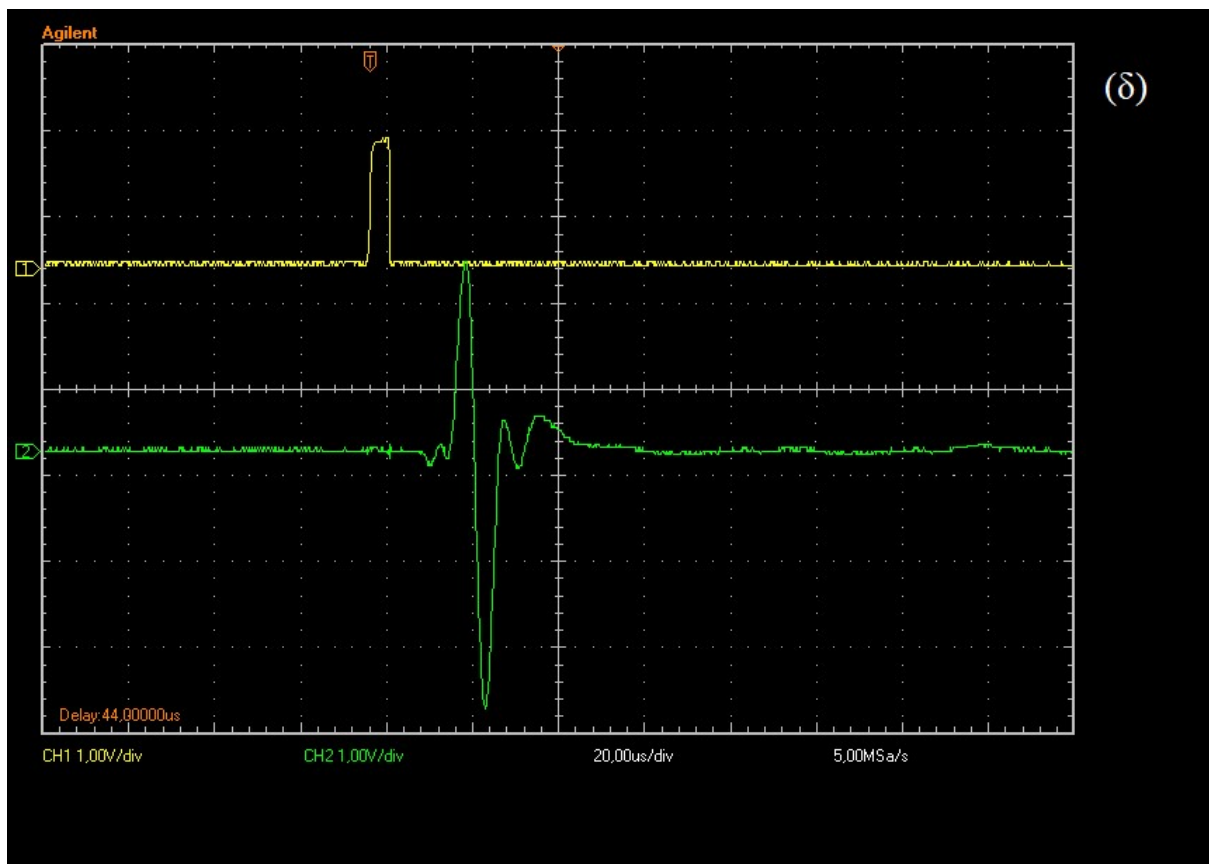
Γράφημα 10: Χρονική διαφορά της διέγερσης από την λήψη σε 50cm απόσταση.



Γράφημα 11: Χρονική διαφορά της διέγερσης από την λήψη σε 35cm απόσταση.

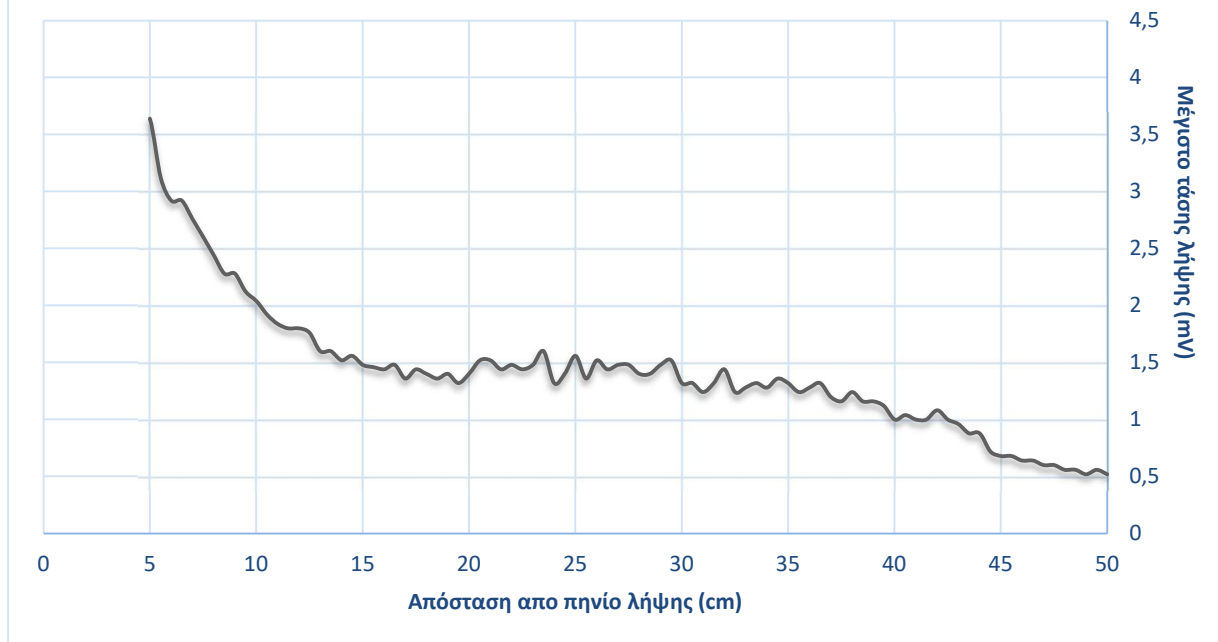


Γράφημα 12: Χρονική διαφορά της διέγερσης από την λήψη σε 25cm απόσταση.



Γράφημα 13: Χρονική διαφορά της διέγερσης από την λήψη σε 10cm απόσταση.

Καμπύλη ομοιομορφίας του MDL με σύρμα FeSiB



Γράφημα 14: Καμπύλη ομοιομορφίας της μέγιστης τάσης λήψης της βασικής διάταξης MDL.

Η καμπύλη ομοιομορφίας μας δείχνει και τον βαθμό της μη γραμμικότητας του αισθητήρα καθώς μπορεί να συγκριθεί με την ιδανική γραμμική απόκριση.

Το σύνολο των δεδομένων λήψης που λαμβάνονται από έναν θεωρητικά ιδανικό αισθητήρα γραμμικής θέσης, όταν καταμετρούνται σε όλο το προκαθορισμένο εύρος λειτουργίας του, θα πρέπει να σχηματίζει ευθεία γραμμή ξεκινώντας από τη μηδενική ανάγνωση ως την πλήρη κλίμακα μέτρησης. Σε έναν πραγματικό αισθητήρα, τα δεδομένα ενδέχεται να μην σχηματίζουν μια απόλυτα ευθεία γραμμή και τα τελικά σημεία ενδέχεται να μην είναι ακριβώς στα καθορισμένα σημεία μηδέν και πλήρους κλίμακας.

Η μέγιστη διαφορά μεταξύ της πραγματικής καμπύλης ομοιομορφίας του αισθητήρα και της ιδανικής καμπύλης σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής μέτρησης ορίζεται ως το μέγιστο σφάλμα. Το σφάλμα στη βιβλιογραφία μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί ως ποσοστό του εύρους λειτουργίας και να ονομάζεται ποσοστιαία ακρίβεια, καθώς είναι συχνά η μεγαλύτερη από τις πηγές σφάλματος. Αλλά, αντ' αυτού, η ακρίβεια θα πρέπει να περιγραφεί ως τα μεμονωμένα συστατικά που την αποτελούν. Επίσης, αντί να αναφέρεται μια ακρίβεια 0,5%, για παράδειγμα, πρέπει να αναφέρεται ως αβεβαιότητα 0,5%. (Στην περίπτωση αυτή, η ακρίβεια θα είναι πραγματικά 99,5%.)

Είναι πιο σωστό και ακριβές να προδιορίζονται ξεχωριστά τα κύρια στοιχεία που προκαλούν ανακρίβεια ή σφάλμα, καθώς ορισμένες εφαρμογές ενδέχεται να έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε μία συγκεκριμένη πηγή σφάλματος σε σύγκριση με την ευαισθησία στο

συγκεκριμένο σφάλμα μιας άλλης εφαρμογής. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι πιο σημαντικό ένας υδραυλικός κύλινδρος να επιστρέψει στο ακριβές σημείο από όπου ξεκίνησε και όχι να είναι γνωστή η ακριβής θέση του σημείου (δηλαδή, η επαναληψιμότητα μπορεί να είναι το πιο σημαντικό σφάλμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε αυτήν την περίπτωση). Σε μια άλλη εφαρμογή, μπορεί να είναι πιο σημαντικό να είναι σταθερή η γωνία περιστροφής ενός άξονα με την αλλαγή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (δηλαδή, η ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να είναι το πιο σημαντικό σφάλμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε αυτήν την περίπτωση).

Τυπικά το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό για την ακρίβεια ενός αισθητήρα θέσης είναι η μη γραμμικότητα. Μια ευθεία γραμμή σχεδιάζεται ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την καμπύλη ομοιομορφία του αισθητήρα. Η διαφορά μεταξύ της ιδεατής ευθείας γραμμής με την καμπύλη είναι η μη γραμμικότητα, η οποία συχνά καταγράφεται ως ποσοστό του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να σχεδιαστεί η βέλτιστη ευθεία γραμμή που να πλησιάζει και τις πραγματικές τιμές και να μπορεί να εξαχθεί σωστή μελλοντική πρόβλεψη μετρήσεων. Οι δύο βασικοί τρόποι είναι:

- i. Γραμμή που συνδέει τα άκρα της περιοχής τιμών
- ii. Γραμμή ελαχίστων τετραγώνων.

Για τον αισθητήρα MDL επιλέχθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων.

Η μη γραμμικότητα που βασίζεται στην συσχέτιση των ελαχίστων τετραγώνων (least-squares regression -LSR) των δεδομένων εισόδου έναντι των δεδομένων εξόδου είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος επειδή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Το μειονέκτημα είναι ότι μπορεί να είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη γραμμή, αλλά δεν είναι κατ' ανάγκη η απόλυτη βέλτιστη γραμμή, δεδομένου ότι πρόκειται για στατιστική εκτίμηση. Ο βαθμός στον οποίο η γραμμή LSR αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα την "καλύτερη" ευθεία γραμμή εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων δεδομένων που λαμβάνονται και από την ανομοιομορφία ή την ασταθή φύση των δεδομένων. Το αποτέλεσμα θα είναι λιγότερο αντιπροσωπευτικό όταν τα δεδομένα δεν ακολουθούν μια συνεχή ομαλή καμπύλη και όταν ο αριθμός των δεδομένων είναι μικρός. Ακόμα, είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος για την εύρεση της βέλτιστης γραμμής, δεδομένου ότι είναι εύκολο να εφαρμοστεί μαθηματικά.

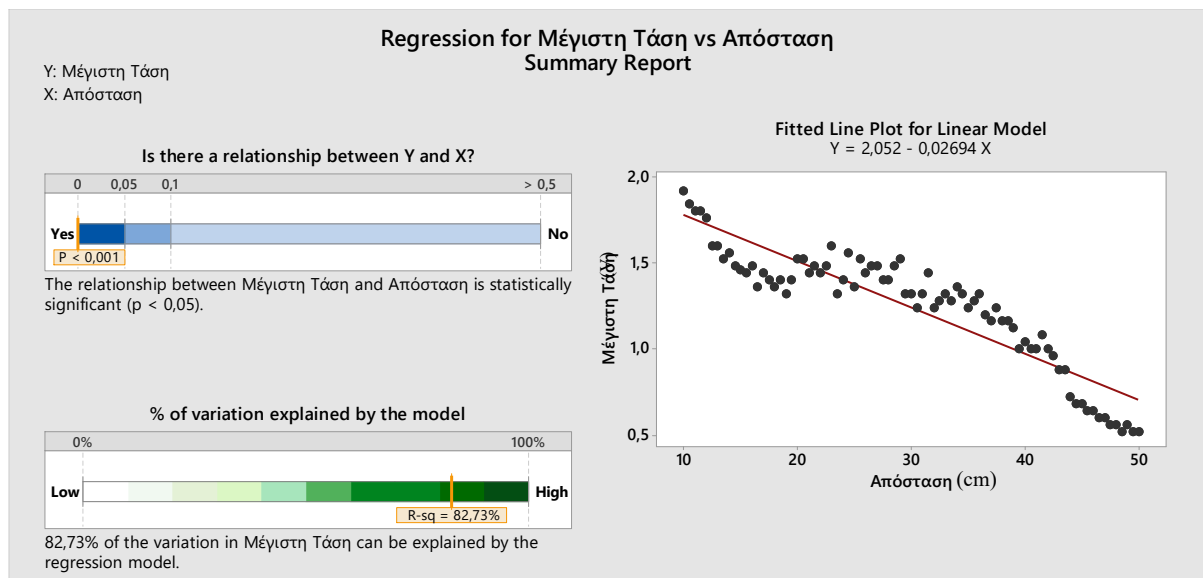
Αν η ευθεία γραμμή LSR αναπαρίσταται ως $Y = \beta_0 + \beta_1 X$, τότε η κλίση β_1 ορίζεται:

$$\beta_1 = \frac{\sum_{d=1}^n X_d Y_d}{\sum_{d=1}^n X_d^2} \quad (13)$$

όπου X_d και Y_d είναι τα δεδομένα του μετρούμενου μεγέθους (απόσταση) και της εξόδου του αισθητήρα (μέγιστη τάση παλμού) αντιστοίχως και n είναι ο αριθμός των δεδομένων. Μόλις βρεθεί η κλίση β_1 , τότε πρέπει να βρεθεί η γραμμή Y που αποδίδει τη χαμηλότερη συνολική απόκλιση. Μετά από αυτό, η μέγιστη απόκλιση ορίζεται ως η μη γραμμικότητα.

Για να βρεθεί λοιπόν η ιδανική γραμμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε υπολογιστικό πρόγραμμα, στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό εργαλείο ανάλυσης δεδομένων Minitab19.

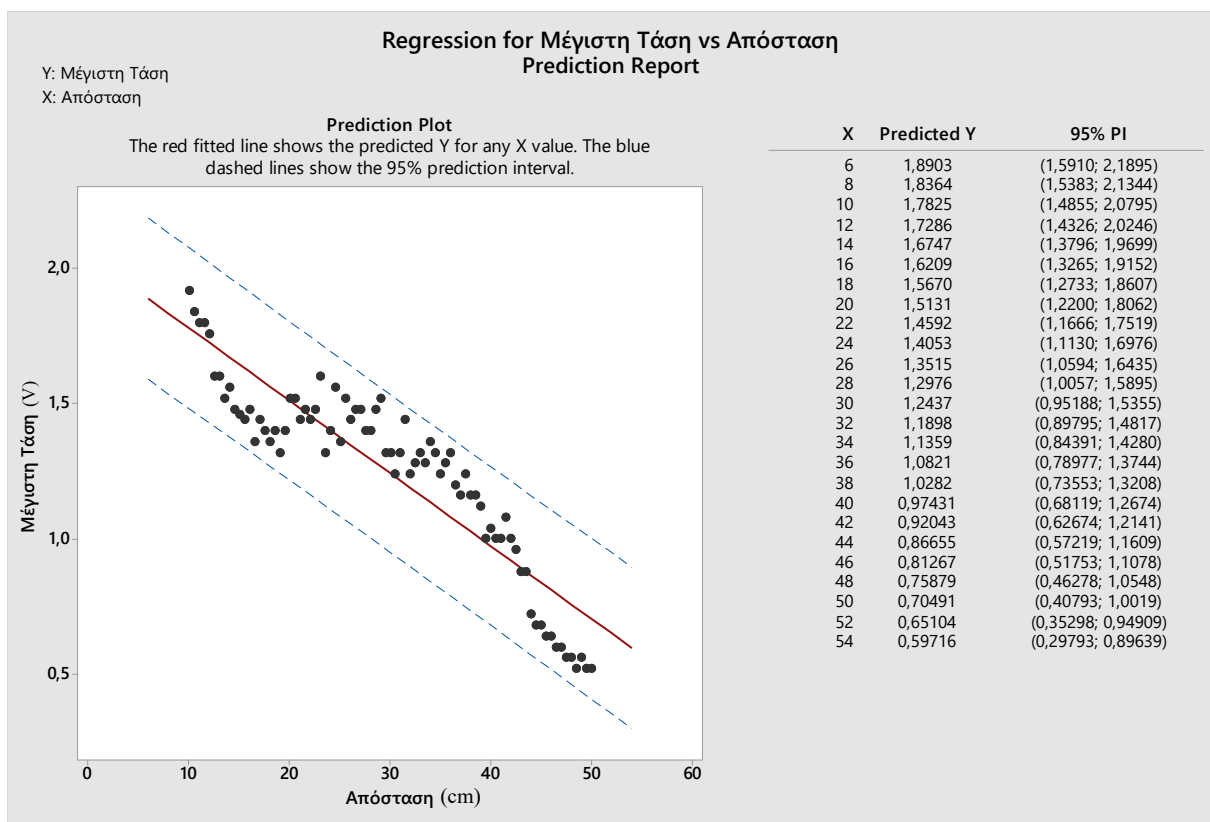
Η γραμμή συσχέτισης υπολογίστηκε ως $Y=2,052-0,02694X$ και απεικονίζεται στο Γράφημα 15. Για τον υπολογισμό αφαιρέσαμε κάποιες ακραίες τιμές που παρουσιάζονται όταν πλησιάσουν τα δυο πηνία πολύ κοντά. Η συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης τάσης εξόδου της κυματομορφής και της απόστασης είναι στατιστικά σημαντική ($P<0,001$). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πιθανότητα να είναι τυχαία η συσχέτιση είναι μικρότερη από 0.1%. Έχουμε λοιπόν μια ισχυρή συσχέτιση της τάσης εξόδου του αισθητήρα με την απόσταση που μετράει ο αισθητήρας κάτι που φυσικά ήταν αναμενόμενο. Επίσης στο Γράφημα 15 εμφανίζεται το R^2 που είναι το ποσοστό των X που εξηγούνται από το μοντέλο. Το 82,73% είναι ένα πολύ καλό ποσοστό με δεδομένο ότι είναι ένα καθαρά στατιστικό μοντέλο από μια σειρά μετρήσεων ενός και μόνο πειράματος.



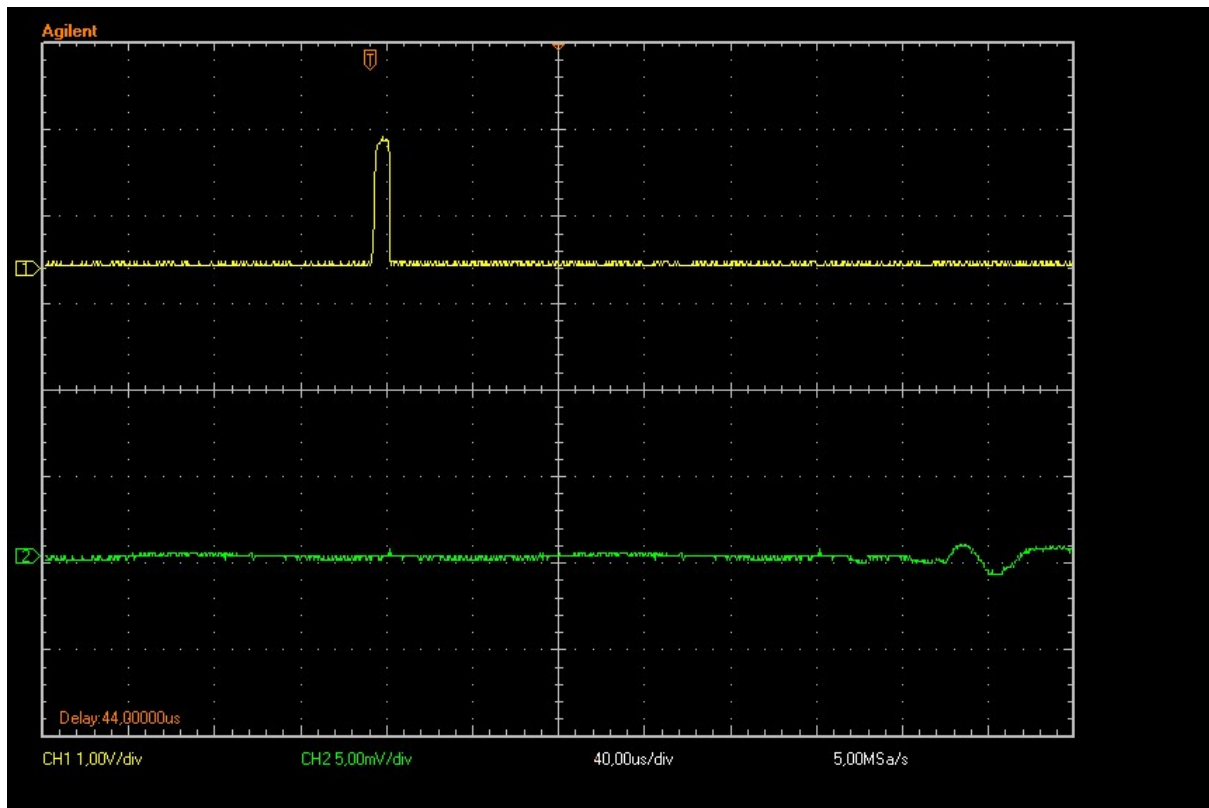
Γράφημα 15: Συσχέτιση της μέγιστης τάσης εξόδου του αισθητήρα σε σύγκριση με την μετρούμενη απόσταση.

Στο Γράφημα 16 εμφανίζεται το μοντέλο μαζί με το διάστημα εμπιστοσύνης. Το διάστημα εμπιστοσύνης καθορίζει και την πρόβλεψη τιμών με βάση την οποία το 95% των μετρήσεων θα περικλείονται εντός της. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο μπορεί να

πραγματοποιηθεί πρόβλεψη τιμών για αποστάσεις που δεν υπάρχουν ακόμα μετρήσεις. Στον πίνακα δεξιά από το γράφημα εμφανίζονται ζεύγη τιμών μαζί με το άνω και το κάτω όριο πρόβλεψης. Για παράδειγμα μπορεί να βρεθεί που μηδενίζει η μέγιστη τάση εξόδου του αισθητήρα, δηλαδή το πόσο μακριά το ελαστικό κύμα θα έχει πλήρως αποσβέσει. Λύνοντας την εξίσωση για $Y=0V$ προκύπτει ότι $X=76,16cm$. Αν συνυπολογίσουμε και το διάστημα εμπιστοσύνης το $X_{max} \approx 86cm$. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο αισθητήρας μας μπορεί να μετρήσει από 10-86cm αναμένοντας μια συμπεριφορά που ακολουθεί το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης. Αυτό στη συνέχεια επιβεβαιώθηκε παίρνοντας μια τελευταία μέτρηση στα 86cm όπου η μέγιστη τάση είναι μικρότερη από 2,5 mV και εμφανίζεται στο Γράφημα 17.

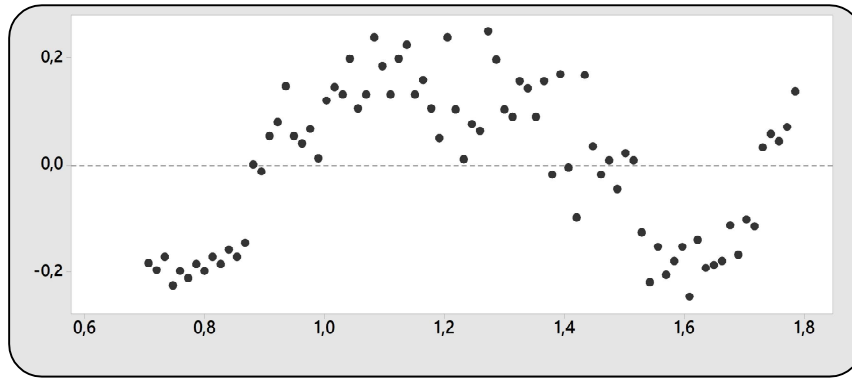


Γράφημα 16: Απεικόνιση του διαστήματος εμπιστοσύνης με 95% βεβαιότητα με βάση το μοντέλο μας. Στα δεξιά του γραφήματος εμφανίζονται οι προβλεπόμενες τιμές με τα αντίστοιχα άνω και κάτω όρια πρόβλεψης.



Γράφημα 17: Χρονική διαφορά της διέγερσης από την λήψη σε 86cm απόσταση.

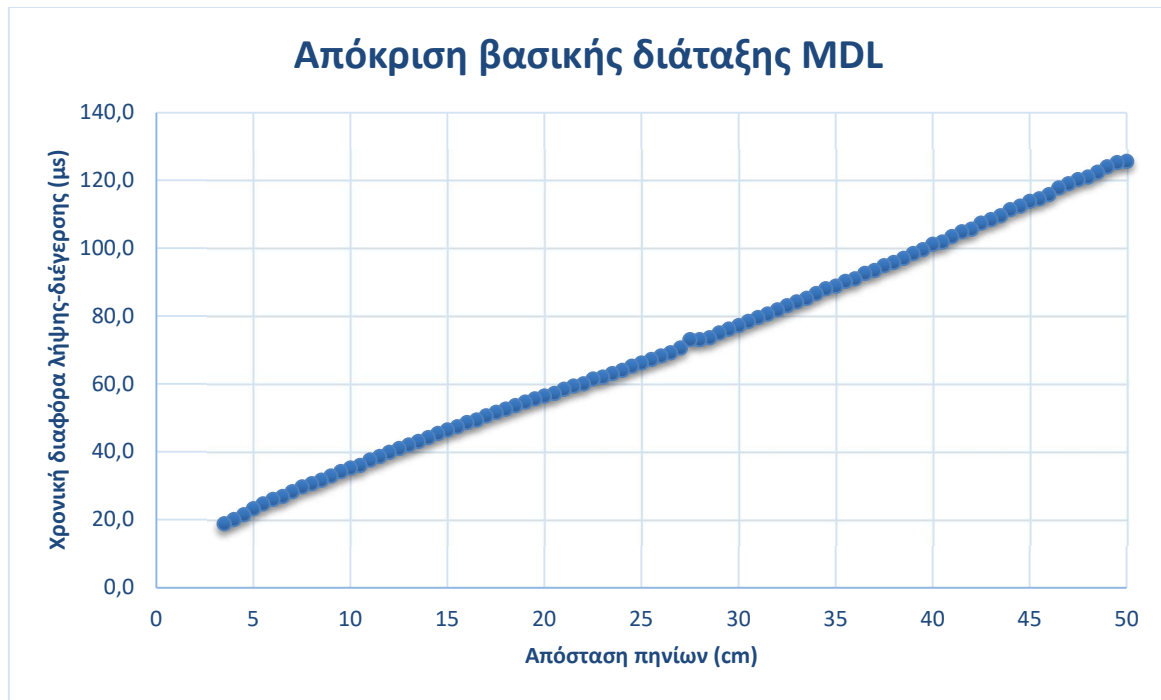
Σε αυτό το στάδιο υπολογίστηκε το μέγιστο σφάλμα μετρήσεων με την χρήση του εργαλείου εύρεσης πραγματικής απόκλισης. Η μέγιστη απόκλιση όπως εμφανίζεται στο Γράφημα 18 είναι στα 0,21V. Διαιρώντας αυτή τη μέγιστη απόκλιση με το πλήρες εύρος του αισθητήρα, δηλαδή 3,4V, και πολλαπλασιάζοντας με 100 βρίσκουμε ότι το μέγιστο σφάλμα είναι στα 6,18%. Σημαντικό είναι να επισημανθεί ότι με βάση το Γράφημα 18 γίνεται φανερό ότι τα σφάλματα είναι ως επί το πλείστον αρνητικά όταν η προσαρμοσμένη τιμή είναι μικρή, θετικά όταν η προσαρμοσμένη τιμή είναι στη μέση και αρνητικά όταν η προσαρμοσμένη τιμή είναι μεγάλη. Δηλαδή, η εξάπλωση είναι περίπου σταθερή, αλλά ο μέσος όρος δεν είναι. Άρα η γραμμή Y του μοντέλου μας δεν περιγράφει πώς συμπεριφέρεται το y όταν μεταβάλλεται το x, αφού η πραγματική συσχέτιση είναι εκθετική όπως και θα αναμέναμε, αφού η εξασθένιση του κύματος στον κυματοδηγό είναι εκθετική όπως εμφανίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο με την εξίσωση (14).



Γράφημα 18: Πραγματική απόκλιση μετρήσεων σε σχέση με τις προσαρμοσμένες τιμές.

Στην συνέχεια έγινε μια πραγματική εκτίμηση του πως δρα ως αισθητήρας η βασική διάταξη MDL. Για να πραγματοποιηθεί αυτό θα πρέπει το ηλεκτρονικό σύστημα να λαμβάνει τις μέγιστες τάσεις και να αποδίδει τις αντίστοιχες χρονικές διαφορές μεταξύ διέγερσης και λήψης. Αυτό έγινε μέσω του παλμογράφου και με την χρήση υπολογιστικού φύλλου excel. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν εμφανίζονται στο Γράφημα 19. Η γραμμικότητα του αισθητήρα είναι εξαιρετικά μεγάλη και παρατηρείται ότι παρόλο που σε κοντινές αποστάσεις η κυματομορφή παραμορφώνεται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτό δεν επηρεάζει καθόλου την συσχέτιση της θέσης με την χρονική διαφορά λήψης-διέγερσης.

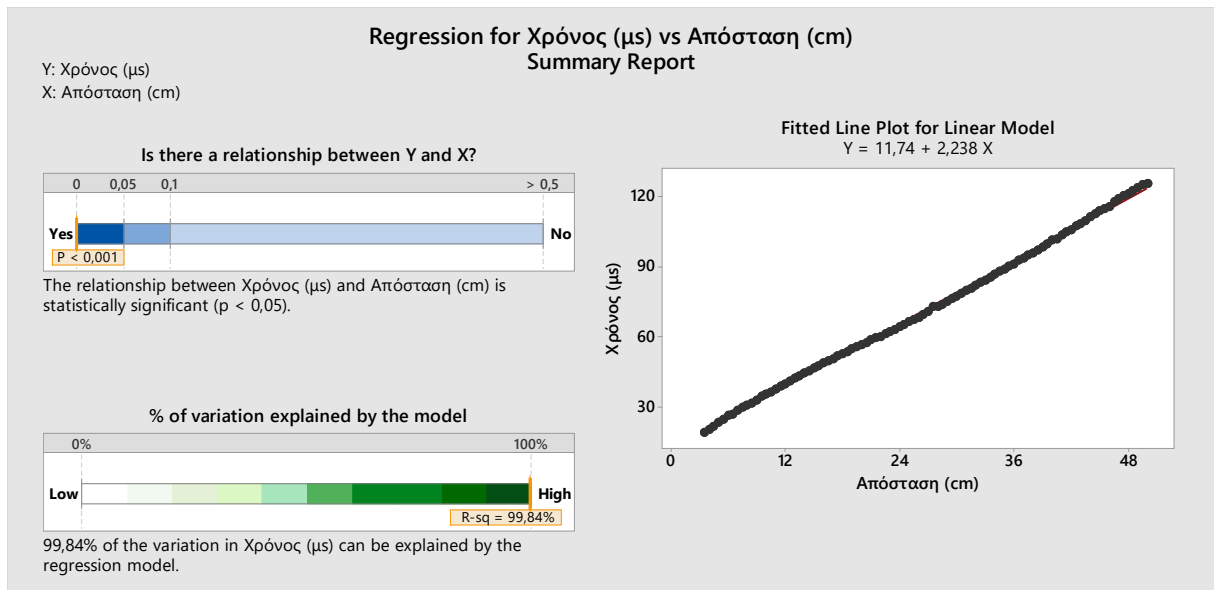
Πραγματοποιώντας μια στατιστική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων παράχθηκε το μοντέλο πρόβλεψης της απόκρισης του αισθητήρα όπως εμφανίζεται στο Γράφημα 20. Το ποσοστό των τιμών που εξηγείται από το μοντέλο είναι στο 99.84% και αυτό αποδεικνύει την γραμμική απόκριση που έχει ένας αισθητήρας θέσης MDL. Το να είναι στατιστικά τυχαίο υπολογίζεται σε λιγότερο από 0.001 πιθανότητα αφού ο αριθμός των μετρήσεων είναι μεγάλος και συνεπώς εξάγεται σαν βέβαιο συμπέρασμα ότι υπάρχει γραμμική συσχέτιση της απόστασης που μετράμε με την χρονική καθυστέρηση που έχει ως έξοδο ο αισθητήρας.



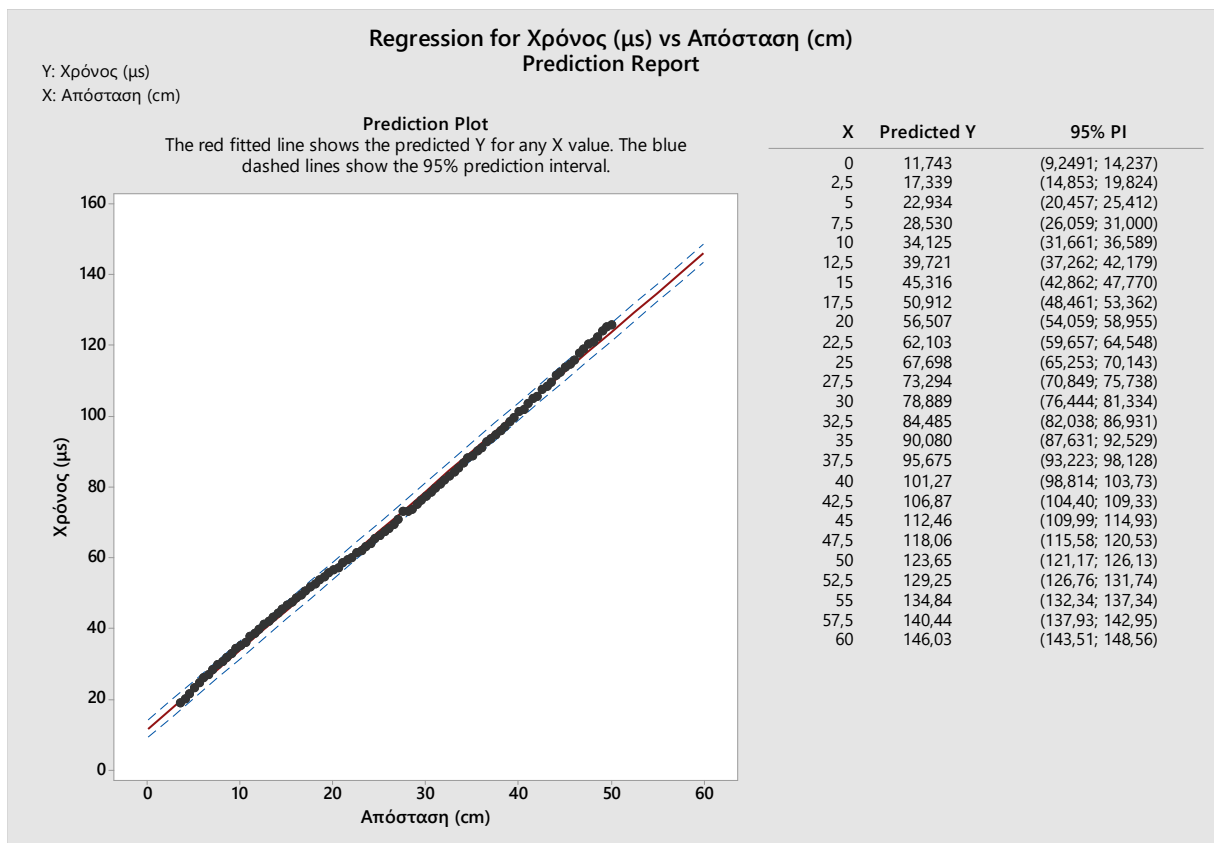
Γράφημα 19: Απόκριση βασικής διάταξης MDL συγκρίνοντας την χρονική διαφορά λήψης-διέγερσης και την απόσταση των πηνίων.

Η συνάρτηση $Y=11,74+2,238X$ είναι το μοντέλο πρόβλεψης που υπολογίστηκε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και έχει αυτή τη μορφή γιατί ακόμα και την πιο μικρή απόσταση θεωρητικά θα μπορεί να την μετρήσει με βάση την καθυστέρηση του χρόνου παρόλο που στην πραγματικότητα ο παλμός τάσης που λαμβάνεται από το πηνίο αλλοιώνεται σε κοντινές αποστάσεις. Στο Γράφημα 21 παρουσιάζονται τα άνω και κάτω όρια των προβλέψεων με διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Αν συγκριθεί με την ακρίβεια του μοντέλου που παράχθηκε για την τάση εξόδου (Γράφημα 16) παρατηρείται ότι είναι εξαιρετικά πιο ακριβές. Αυτό είναι αναμενόμενο εφόσον έχουμε μια εκθετική μείωση της μέγιστης τάσης εξόδου με την αύξηση της απόστασης που όμως δεν επηρεάζει την χρονική καθυστέρηση του σήματος.

Τα ζεύγη τιμών χρόνος-απόσταση μπορούν να είναι τα δεδομένα που χρησιμοποιεί ένας ελεγκτής για να αντιστοιχήσει την χρονική καθυστέρηση της μέγιστης εξόδου του πηνίου (μs) σε πραγματική έξοδο αισθητήρα (cm). Εφόσον η βαθμονόμηση αρχικά πραγματοποιείται για το εκάστοτε μαγνητοσυστολικό σύρμα στο εργαστήριο, όλες οι βαθμονομήσεις των αισθητήρων MDL μπορούν να πραγματοποιούνται ζωντανά στο πεδίο, χωρίς να βγαίνει εκτός λειτουργίας ο αισθητήρας.



Γράφημα 20: Συσχέτιση του χρόνου καθυστέρησης της μέγιστης τάσης εξόδου του αισθητήρα σε σύγκριση με την μετρούμενη απόσταση.



Γράφημα 21: Πρόβλεψη απόκρισης (καθυστέρηση χρόνου) αισθητήρα MDL με διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

5.1.2 Μέτρηση ταχύτητας ελαστικού κύματος

Όπως έχει γίνει αντιληπτό από την θεωρητική προσέγγιση της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, η ταχύτητα μετακίνησής του εξαρτάται από το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο πόλωσης. Σε αυτό το σημείο γίνονται υπολογισμοί στην ταχύτητα του ελαστικού κύματος με πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με περιβάλλον μαγνητικό πεδίο το πεδίο της γης ($\approx 60 \mu\text{T}$). Σε επόμενη ενότητα παρουσιάζονται πειράματα με μεταβολή του μαγνητικού πεδίου πόλωσης όπου η ταχύτητα του κύματος θεωρείται σταθερή όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία για as-cast σύρματα [54].

Συνεχίζοντας με την βασική διάταξη MDL, το μέγεθος που αντιστοιχεί στην απόσταση και μετριέται είναι η χρονική διαφορά μεταξύ της διέγερσης και της λήψης. Γνωρίζοντας λοιπόν την απόσταση των πηνίων και την χρονική διαφορά που μετριέται μέσω του παλμογράφου μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του κύματος για κάθε ξεχωριστή απόσταση. Ο λόγος που μετρήθηκε σε διαφορετικές θέσης η ταχύτητα είναι και για να εξαχθεί ο μέσος όρος αλλά και να παρατηρηθεί τυχών απόκλιση λόγω μη καθαρότητας υλικού. Η μέση ταχύτητα του κάθε παλμού για κάθε σημείο υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$V = d/t \quad (15)$$

όπου V η ταχύτητα, d η απόσταση των δυο πηνίων και t η χρονική διάρκεια μεταξύ διέγερσης-λήψης. Μέσω του προγράμματος excel υπολογίστηκαν όλες οι τιμές της ταχύτητας και σχεδιάστηκε το Γράφημα 22. Η μέση ταχύτητα υπολογίστηκε στα 4.319m/s . Παρατηρείται ότι όσο απομακρυνόμαστε από το πηνίο διέγερσης η ταχύτητα μικραίνει. Η συσσώρευση ατελειών του υλικού σε όσο μεγαλύτερες αποστάσεις γίνεται η μέτρηση είναι ένας σημαντικός παράγοντας που το επηρεάζει. Η απόκλιση της ταχύτητας είναι από 4500 ως 4250m/s . Η κατεργασία ανόπτησης θα ομαλοποιούσε της εσωτερικές τάσεις στο υλικό και πιθανά θα επέφερε μια μεγαλύτερη ομοιομορφία στην ταχύτητα.

Το πιο σημαντικό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στην ουσία εντός των μετρήσεων της ταχύτητας εμπεριέχονται όλα τα σφάλματα των μετρήσεων απόστασης και κατά συνέπεια αυτός είναι και ο πιο βασικός λόγος που δεν βρίσκουμε μια σταθερή ταχύτητα σε όλο το μήκος του υλικού. Η τελική μέση ταχύτητα στα 4319m/s θεωρείτε μια πολύ σωστή προσεγγιστική τιμή που συμφωνεί και με την βιβλιογραφία για FeSiB as-cast σύρμα [54].



Γράφημα 22: Μέση ταχύτητα κύματος σε διαφορετικές αποστάσεις πηνίων λήψης-διέγερσης.

5.1.3 Φαινόμενο Villari και Μήκος ελαστικού κύματος

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης η παραμόρφωση προκαλεί μαγνητική ανισοτροπία και αυτό το ονομάζουμε φαινόμενο Villari. Με δεδομένο ότι έχουμε ένα ελαστικό κύμα που μεταδίδεται μέσα στον κυματοδηγό, ο οποίος είναι το μαγνητοσυστολικό σύρμα, στην ουσία έχουμε μια μεταδιδόμενη παραμόρφωση. Αυτή τη παραμόρφωση εντοπίζει το πηνίο λήψης μέσω της αλλαγής της μαγνητικής ροής κοντά στην περιοχή του. Το πηνίο λήψης εντοπίζει λοιπόν την άνοδο και την κάθοδο του κύματος αφού στην ουσία εντοπίζει την πρώτη παράγωγό του. Εντοπίζει τις μεταβολές στην παραμόρφωση οι οποίες προκαλούν μεταβολές στην μαγνητική ροή και όχι την πριν ή την μετά την παραμόρφωση κατάστασή που όντας σταθερές δεν προκαλούν μεταβολή στη μαγνητική ροή.

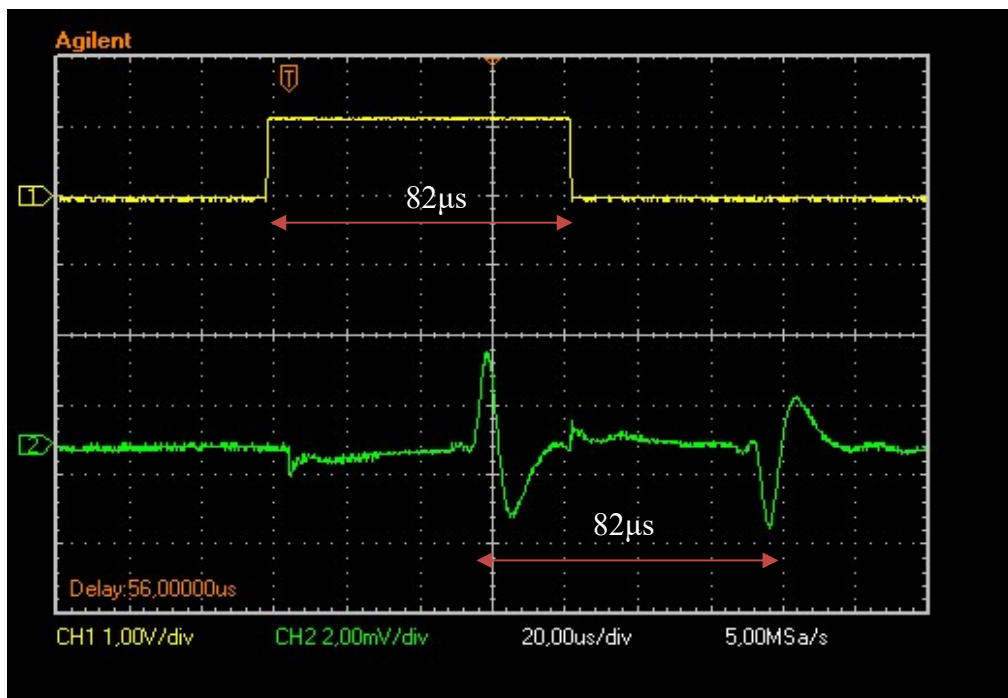
Παράλληλα λοιπόν με την εξήγηση της λειτουργίας του πηνίου λήψης παρατηρούμε και το πώς μπορούμε να επηρεάσουμε το μήκος του ελαστικού κύματος. Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση του μήκους του ελαστικού παλμού χρησιμοποιήθηκε η βασική διάταξη MDL με τον ίδιο ακριβώς τρόπο αλλά οι παλμοί διέγερσης στο πηνίο διέγερσης πραγματοποιήθηκαν μέσω του κυκλώματος C αντί του NC ώστε να μπορεί να μεγαλώσει η διάρκεια του παλμού.

Συγκεκριμένα στο Γράφημα 24 εμφανίζεται η τάση της διέγερσης μαζί με την λήψη χωρίς να παρεμβάλλεται το κύκλωμα ενίσχυσης για αποφυγή τυχόν αλλοίωσης του σήματος λήψης. Η απόσταση των 2 πηνίων είναι στα 20cm. Παρατηρείται ότι η διέγερσή δεν είναι ιδανική, αφού το κύκλωμα διέγερσης δεν είναι και αυτό ιδανικό. Παρατηρείται μια μικρή άνοδος στη τάση πριν πέσει στο 1,5V και αντίστοιχα μια μικρή πτώση πριν σταθεροποιηθεί για 40μs. Η ίδια αλλά αντίστροφη συμπεριφορά επαναλαμβάνεται στην άλλη άκρη του

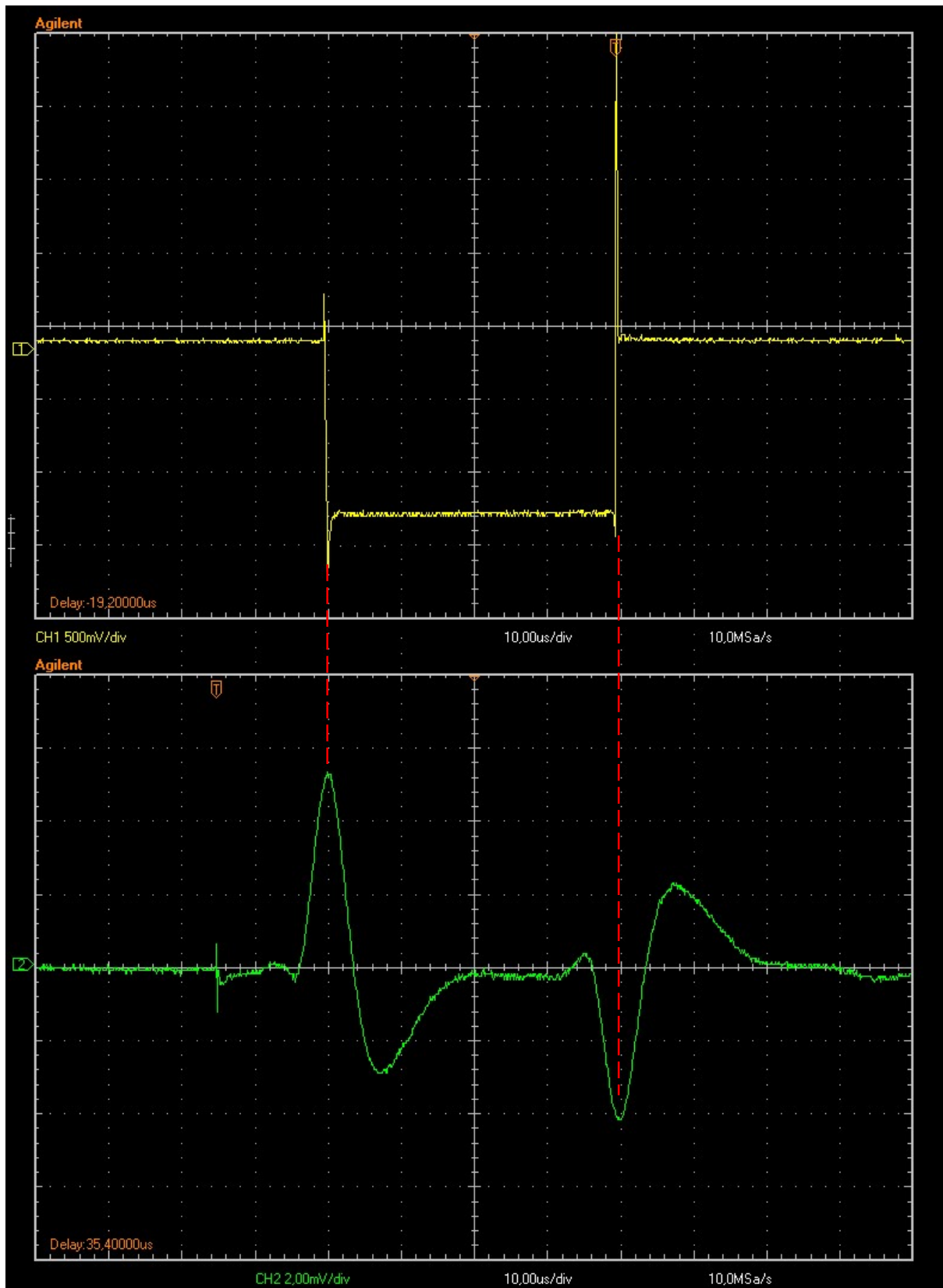
παλμού. Όλες αυτές οι διακυμάνσεις εμφανίζονται και στον παλμό λήψης που πλέον εμφανίζεται σαν ένας διπλός παλμός αφού η διέγερση διαρκεί 40 μ s και η αρχή με το τέλος του εμφανίζονται σαν δυο ξεχωριστοί παλμοί.

Με δεδομένο ότι η ταχύτητα του κύματος στο σύρμα είναι 4319m/s και ο παλμός διέγερσης διαρκεί για 40 μ s, το μήκος του παλμού υπολογίζεται 172,76mm. Αν υπολογιστεί το μήκος του παλμού για μικρότερης διάρκειας διέγερση, όπως δηλαδή λειτουργεί η βασική διάταξη MDL, τότε για διάρκεια διέγερσης 1 μ s το μήκος του ελαστικού παλμού φτάνει τα 4,32mm. Αυτό σημαίνει πως όταν η αρχή του κύματος θα έχει διανύσει 4mm το πηνίο διέγερσης θα επάγει μαγνητικό πεδίο ακόμα. Άρα αυτός είναι ο βασικός λόγος που προηγουμένως για κοντινές αποστάσεις (<9cm) παρατηρήθηκε αυξημένη μέγιστη τάση στη λήψη και γι' αυτό το λόγο ορθά οι τιμές δεν συμπεριελήφθησαν στο μοντέλο πρόβλεψης της μέγιστης τάσης εξόδου.

Τέλος στο Γράφημα 23 εμφανίζεται παλμός διέγερσης διάρκεια 82 μ s και ο αντίστοιχος παλμός λήψης. Όπως αναφέρθηκε ο παλμός πλέον έχει σπάσει στα δύο και μάλιστα η πολικότητα των δυο παλμών είναι αντίστροφη αφού ο ένα αντιστοιχεί στην διάρκεια ανόδου του παλμού ρεύματος (άρα και του μαγνητικού πεδίου) και ο άλλος στην διάρκεια καθόδου του παλμού ρεύματος. Στην ουσία υπάρχει αρκετός χρόνος ώστε να επέλθει μηχανική χαλάρωση ώστε να σπάσει ο ακουστικός παλμός στα δύο. Με σειρά πειραμάτων βρέθηκε ότι ο ιδανικός παλμός διέγερσης είναι στα 1,5 με 5 μ s.



Γράφημα 23: Διέγερση διάρκειας 82 μ s.



Γράφημα 24: Με κίτρινη γραμμή εμφανίζεται η διέγερση (τάση στον αρνητικό πόλο του φορτίου) και με πράσινη γραμμή η λήψη.

5.2 Πείραμα μεταβολής μαγνητικού πεδίου πόλωσης

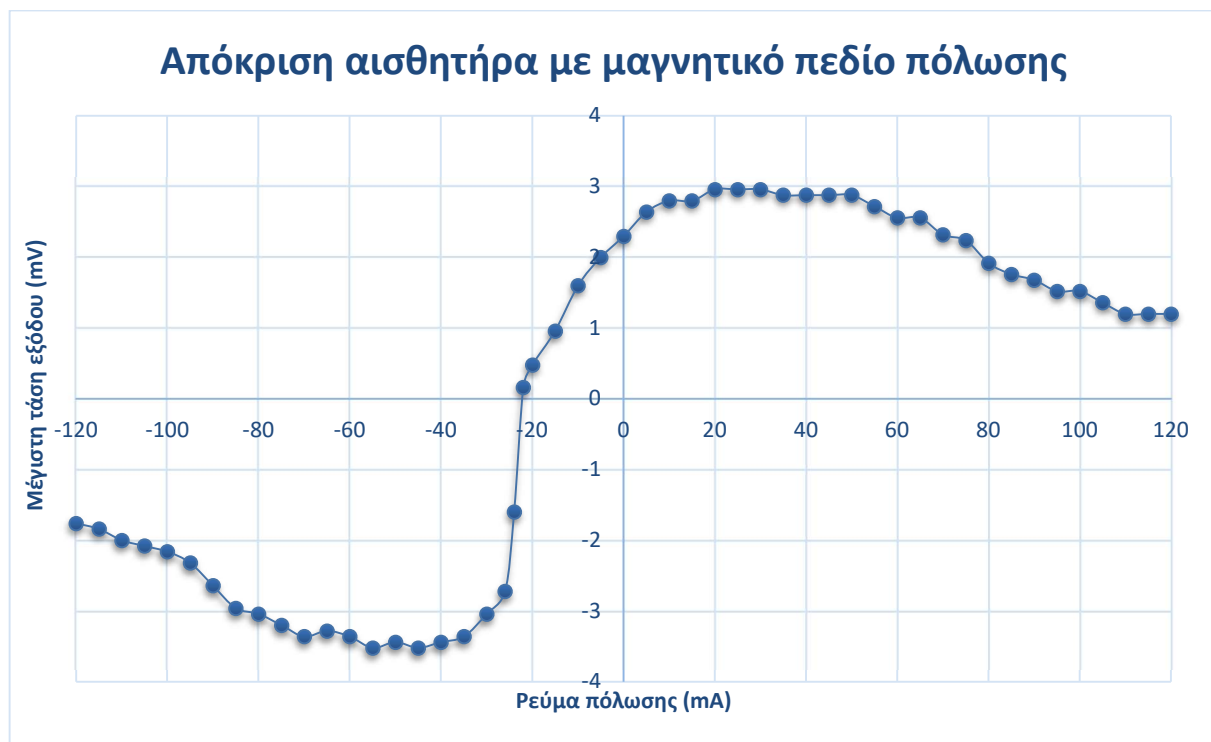
Ως την στιγμή του πειράματος μεταβολής μαγνητικού πεδίου πόλωσης όλες οι μετρήσεις στη διάταξη, με πυρήνα διάφορα μαγνητοσυστολικά υλικά που είχε στην κατοχή του το εργαστήριο, έγιναν χρησιμοποιώντας ως μαγνητικό πεδίο πόλωσης αυτό της γης. Αυτό βέβαια δεν αναδεικνύει την πραγματική πειραματική συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε. Δεν έγιναν πειράματα χωρίς να υπάρχει πρότερη γνώση της απόκρισης του μαγνητοσυστολικού υλικού σε σχέση με το πεδίο πόλωσης. Είναι εξαιρετικά σημαντικό το υλικό να πολώνεται επαρκώς από το πεδίο πόλωσης της γης ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν μικροπαραμορφώσεις στο εσωτερικό του, οι οποίες με την σειρά τους διαδίδονται σχηματίζοντας τον ελαστικό παλμό. Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 3.2 υπάρχουν υλικά στα οποία το πεδίο της γης δρα ως το πεδίο πόλωσης και μπορεί να προκαλέσει τέτοιο αποτέλεσμα. Ένα τέτοιο υλικό είναι και το σύρμα $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ και αυτό επαληθεύετε με το ακόλουθο πείραμα.

Η αρχική διάταξη με το πηνίο διέγερσης 5 περιελίξεων και το πηνίο λήψης 200 περιελίξεων με σύρμα χαλκού 0.1mm χρησιμοποιείται και εδώ. Τα κυκλώματα και η συνδεσμολογία εφαρμόζεται όπως προηγουμένως. Το παλμικό ρεύμα έχει ως μέγιστο τα 1,5A και διάρκεια τα 5μs με την πολύ καλή παλμική συμπεριφορά που εμφανίζεται σε όλα τα πειράματα.

Για την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου πόλωσης χρησιμοποιείται πηνίο 250 περιελίξεων κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού 0,1mm και εσωτερικής διαμέτρου 1.5mm. Το πηνίο πόλωσης τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα προκαλώντας σταθερό πεδίο πόλωσης στην περιοχή του πηνίου λήψης.

Η απόσταση του πηνίου διέγερσης από το πηνίο λήψης είναι στα 30cm. Το ρεύμα τροφοδοσίας του πηνίου πόλωσης ξεκινάει από τα 5mA και με βήμα 5mA φτάνει τα 120mA. Στη συνέχεια ξανά με βήμα 5mA κατεβαίνει στα -120mA. Έτσι το υλικό πραγματοποίησε έναν πλήρη κύκλο μαγνήτισης. Στην συνέχεια πάρθηκαν μετρήσεις ξεκινώντας από -120mA με βήμα 5mA μέχρι τα -20mA, συνεχίστηκαν οι μετρήσεις στα -22mA, -24mA, -26mA και με βήμα πάλι 5mA έφτασε τα 120mA.

Συνολικά λοιπόν, πάρθηκαν 51 μετρήσεις, οι οποίες απεικονίζονται στο Γράφημα 25. Ο λόγος που επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν πιο πυκνές μετρήσεις στην περιοχή των -23mA είναι γιατί εμφανίζεται αντιστροφή στην πολικότητα του κύματος εξόδου. Οι τιμές από -22mA ως -120mA έχουν σαν μέγιστη τάση αρνητική τιμή όπως εμφανίζονται στο γράφημα.



Γράφημα 25: Απόκριση της μέγιστης τάσης εξόδου του αισθητήρα MDL σε σχέση με το ρεύμα στο πηνίο πόλωσης. Οι τιμές της τάσης είναι αρνητικές μετά τα -22mA καθώς έχουμε αναστροφή στην πολικότητα του κύματος.

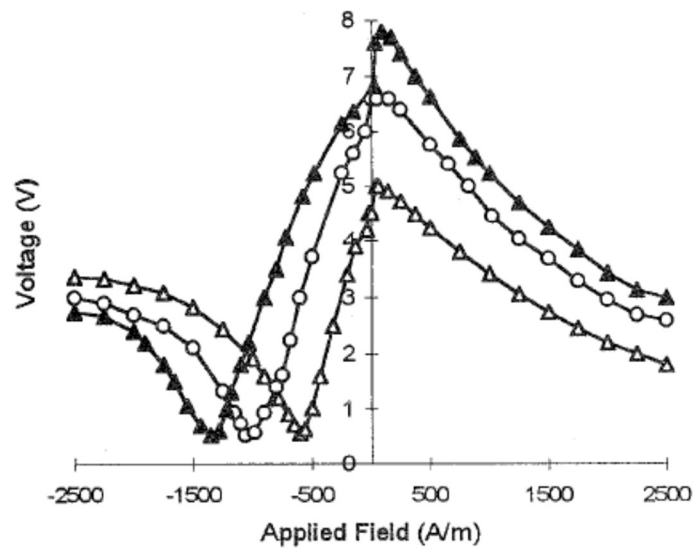
Με βάση την βιβλιογραφία, μια τυπική εξάρτηση της τάσης εξόδου από το πεδίο πόλωσης απεικονίζεται στο Γράφημα 26, που αφορά ένα άμορφο καλώδιο as-cast $\text{Fe}_{78}\text{Si}_7\text{B}_{15}$. Παρατηρείται όμοια συμπεριφορά μεταξύ των δύο αισθητήρων.

Στο Γράφημα 25 η μετατροπή του ρεύματος του πηνίου σε μαγνητικό πεδίο δεν έχει γίνει αλλά γίνεται αντιληπτό ότι προσεγγίζει την ίδια συμπεριφορά με το Γράφημα 26.

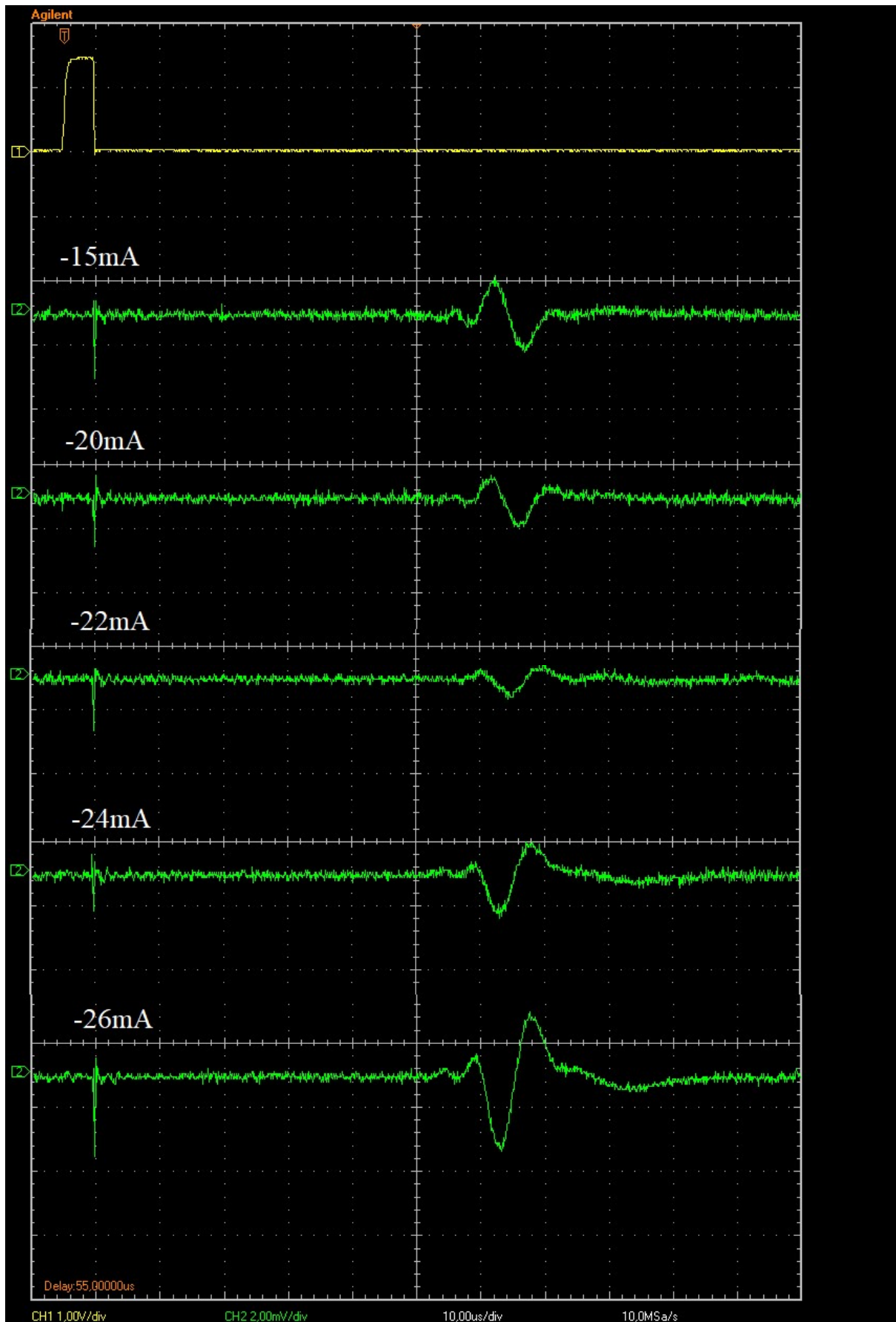
Η απόκριση του MDL στην αλλαγή του μαγνητικού πεδίου πόλωσης δεν είναι μονοτονική. Αυτό αποδίδεται στα άλματα Barkhausen των άμορφων as-cast FeSiB καλωδίων όπως αναλύθηκε σε πρότερες ενότητες. Η ύπαρξη ενός εσωτερικού ενιαίου πεδίου κατά μήκος ολόκληρου του μήκους του σύρματος έχει σαν αποτέλεσμα διπλή αλλαγή, η οποία παρατηρείται στην περιοχή διέγερσης λόγω της ασυνέχειας της συνάρτησης $\lambda(H)$.

Παρατηρείται λοιπόν ότι για μηδενικό πεδίο πόλωσης, δηλαδή για πεδία όσο το πεδίο της γης $\approx 40\text{A/m}$, η απόκριση του αισθητήρα τοπικά είναι μονοτονική και έτσι μπορούν να προκληθούν μικροπαραμορφώσεις στο σύρμα με απότομα μαγνητικά πεδία. Το πεδίο της γης πολώνει επαρκώς το σύρμα και έτσι εμφανίζεται και το φαινόμενο Joule, ώστε να μπορεί να προκληθεί διέγερση, και το αντίστροφο φαινόμενο Villari, ώστε να μπορεί να ληφθεί το σήμα. Αυξάνοντας το πεδίο πόλωσης η απόκριση στην αρχή αυξάνει μέχρι ένα σημείο και στην

συνέχεια μειώνεται. Αντίστοιχα μειώνοντας το πεδίο και ερχόμενοι σε αρνητικές τιμές, το σήμα εξόδου μειώνεται μέχρι το σημείο όπου μηδενίζει για ρεύμα -23mA . Αυτό εμφανίζεται πιο καθαρά στο συγκριτικό γράφημα από τις μετρήσεις μέσω παλμογράφου (Γράφημα 27). Στη συνέχεια όσο αυξάνεται με αρνητικό πρόσημο το πεδίο πόλωσης, η τάση εξόδου αυξάνει μέχρι ένα μέγιστο, μετά από το οποίο αρχίζει να μειώνει. Ο λόγος που στην συνέχεια μειώνεται είναι ότι πλέον τα δίπολα έχουν “παγώσει” προς έναν εύκολο άξονα μαγνήτισης και πλέον το πεδίο από το πηνίο διέγερσης δεν μπορεί να στρέψει καθόλου αυτά τα δίπολα προς μια άλλη κατεύθυνση ώστε να μπορεί να μεταδοθεί κύμα εντός του MDL. Άρα παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της απόκρισης του αισθητήρα έχει συμμετρία όπως και το διάγραμμα $\lambda(H)$.



Γράφημα 26: Εξάρτηση της τάσης εξόδου του MDL με το μαγνητικό πεδίο πόλωσης (Habilitation) [56].

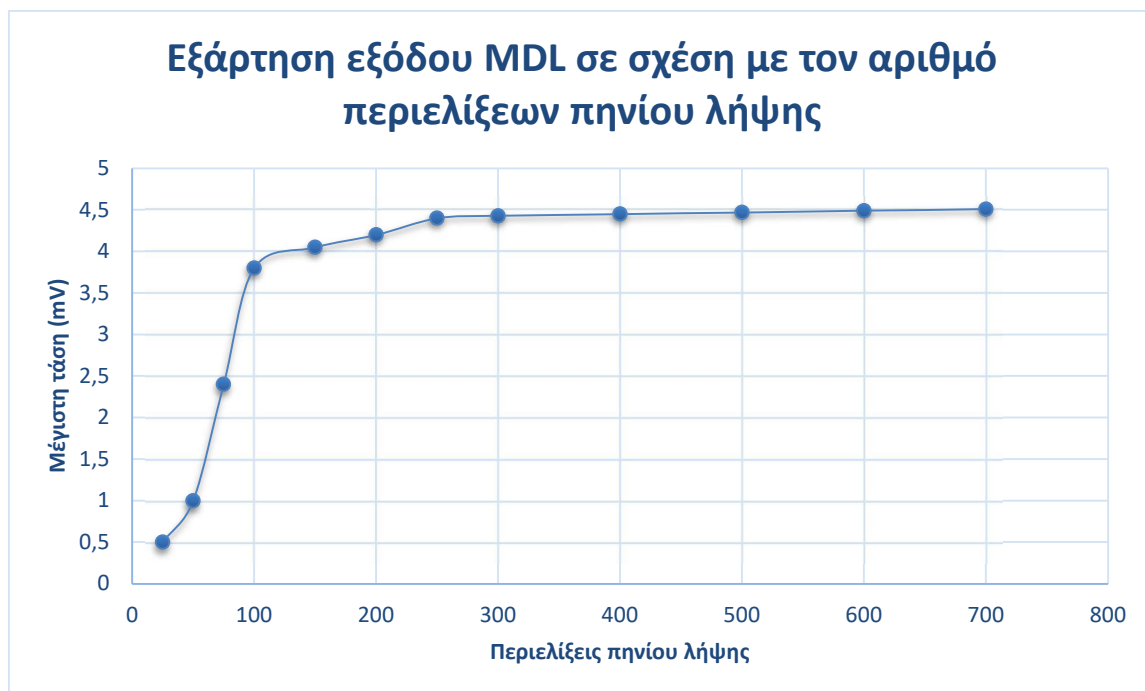


Γράφημα 27: Μηδενισμός και αντιστροφή της κυματομορφής με αύξηση αρνητικού πεδίου με το ρεύμα στο πηνίο πόλωσης από -15 ως -26mA.

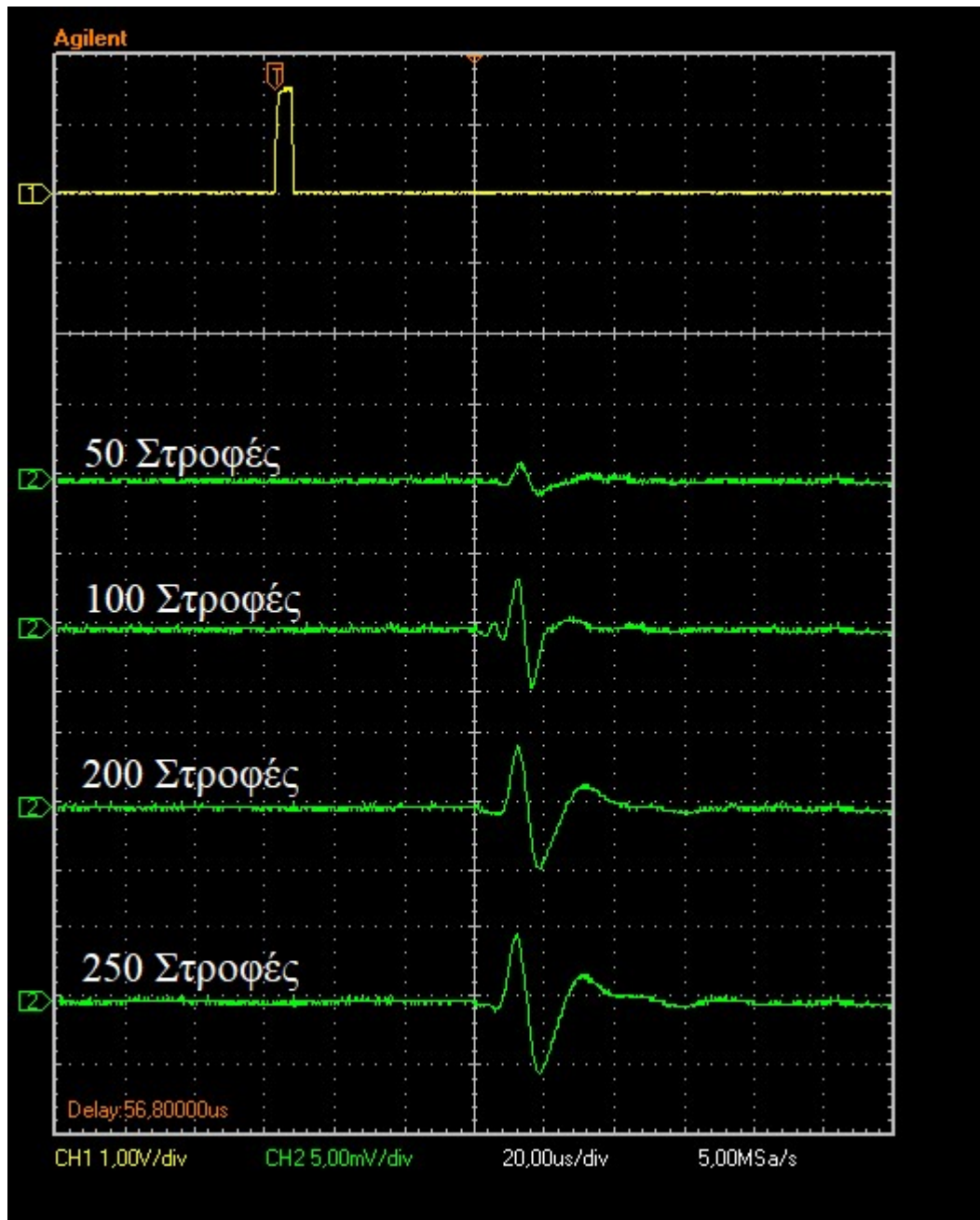
5.3 Απόκριση MDL σε σχέση με τον αριθμό περιελίξεων του πηνίου λήψης

Σε αυτό το στάδιο εξετάζεται η εξάρτηση της βασικής διάταξης MDL σε σύγκριση με τον αριθμό των περιελίξεων του πηνίου λήψης. Έγινε χρήση των ίδιων κυκλωμάτων όπως και στα προηγούμενα πειράματα. Τα πηνία διέγερσης και λήψης κατασκευάστηκαν με σύρμα χαλκού 0,1mm και εσωτερική διάμετρο 1mm. Το πηνίο διέγερσης αποτελείται από 5 περιελίξεις και τα πηνία λήψης για τα οποία καταγράφονται οι μετρήσεις αποτελούνται από 25,50,75,100,150,200,250,300,400,500,600 και 700 περιελίξεις. Η εξάρτηση εμφανίζεται στο Γράφημα 28 και κάποιες ενδεικτικές κυματομορφές όπως ελήφθησαν από τον παλμογράφο απεικονίζονται συγκριτικά στο Γράφημα 29. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται παρόμοια συμπεριφορά [56].

Παρατηρείται ότι η τάση εξόδου του αισθητήρα MDL αυξάνει όσο αυξάνουν οι περιελίξεις του πηνίου λήψης. Σημαντική άνοδος παρατηρείται ως τις 100 περιελίξεις όπου από εκείνο το σημείο και μετά η αύξηση ενώ συνεχίζεται δεν είναι αρκετά σημαντική. Στις 200 περιελίξεις που έχει επιλεχτεί ως πηνίο λήψης για τα περισσότερα πειράματα παρατηρείται μια πολύ καλή τιμή που πλησιάζει την μέγιστη τάση εξόδου χωρίς να χρειάζεται εξαιρετικά μεγάλη προσπάθεια στην κατασκευή του.



Γράφημα 28: Η εξάρτηση της τάσης εξόδου του αισθητήρα MDL από τον αριθμό των στροφών του πηνίου λήψης.



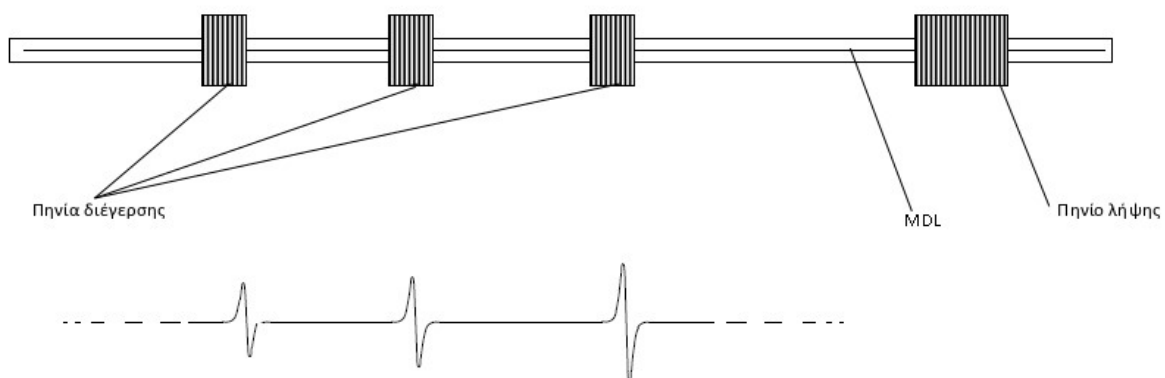
Γράφημα 29: Υπό ίδιες συνθήκες, απόκριση του αισθητήρα για διαφορετικό αριθμός στροφών πηνίου λήψης.

6. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΘΕΣΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

6.1 Πείραμα Πολλαπλών Διεγέρσεων

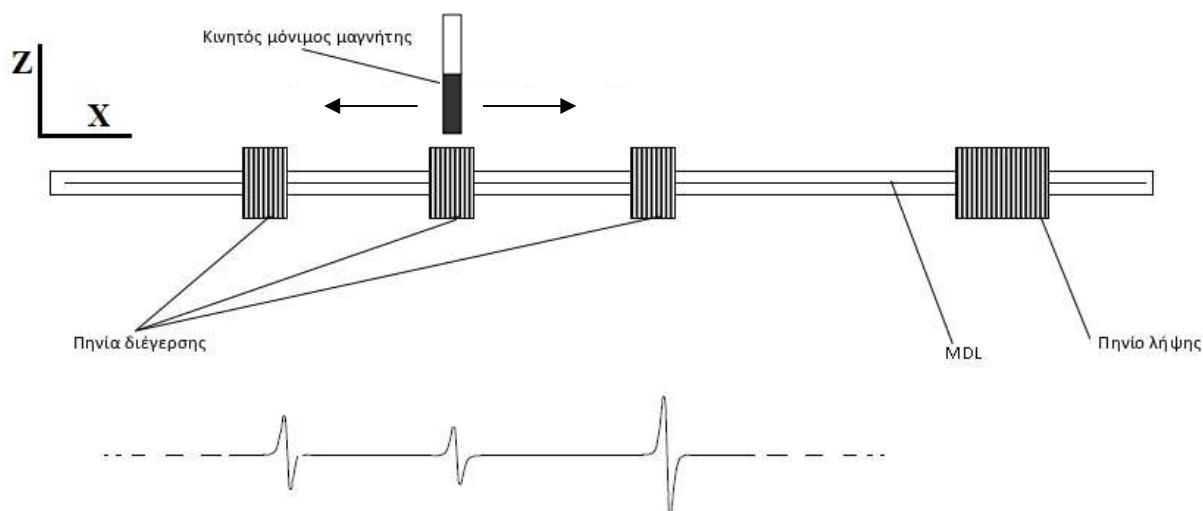
Σε αυτό το πείραμα κατασκευάστηκε μια διάταξη που μπορεί να δράσει ως αισθητήρας εύρεσης θέσης ενός μετακινούμενου μόνιμου μαγνήτη. Η βασική αρχή λειτουργία είναι η ίδια με την βασική διάταξη MDL. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι η παρουσία του μόνιμου μαγνήτη πλησίον της περιοχής του πηνίου διέγερσης μπορεί να καταστρέψει τον αναμενόμενο παλμό διέγερσης. Η πλήρης καταστροφή, όπως παρουσιάστηκε και στο πείραμα της αλλαγής του πεδίου πόλωσης, μπορεί να συμβεί εφόσον το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη είναι αρκετά ισχυρό και συγκεκριμένο. Πάντως όπως και να έχει, η παραμικρή αλλαγή θα αλλάξει το μέγιστο της τάσης στο σήμα εξόδου και αυτή η αλλαγή μπορεί να δράσει ως σήμα για τον εντοπισμό του μαγνήτη.

Η βασική διάταξη MDL τροποποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν πολλαπλές διεγέρσεις να προκαλούν διαφορετικούς παλμούς την ίδια χρονική στιγμή, οι οποίοι παλμοί να ανιχνεύονται από το πηνίο λήψης με μια διαφορά χρόνου που αντιστοιχεί στην απόστασή του εκάστοτε πηνίου διέγερσης από την λήψη. Το πρώτο στάδιο λειτουργίας της διάταξης εμφανίζεται στο Σχήμα 24.



Σχήμα 24: Αρχική λειτουργία MDL με πολλαπλές διεγέρσεις.

Στη συνέχεια αν ένας μόνιμος μαγνήτης βρεθεί στην περιοχή πλησίον ενός εκ των τριών πηνίων διέγερσης, ο παλμός που θα αντιστοιχούσε σε αυτό το πηνίο θα ήταν ασθενέστερος όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 25.



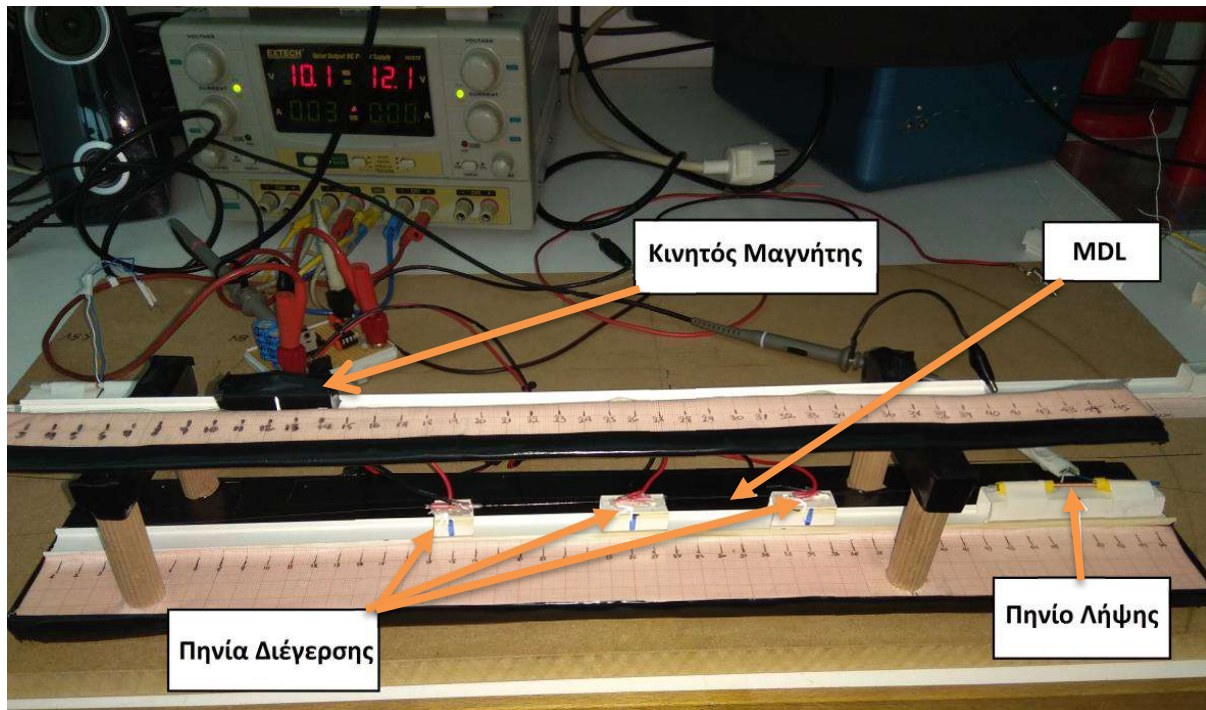
Σχήμα 25: Απόκριση MDL με πολλαπλές διεγέρσεις όντας πλησίον του μεσαίου πηνίου διέγερσης ένας μόνιμος μαγνήτης.

Η διάταξη κατασκευάστηκε ακολουθώντας την αρχή ότι κανένα υλικό με μαγνητική απόκριση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως στήριξη. Στην Εικόνα 5 εμφανίζεται ο πάγκος εργασίας στον οποίο εδράζεται η διάταξη πολλαπλών διεγέρσεων. Χρησιμοποιείται δεύτερη ξεχωριστή ράγα για τον μαγνήτη σε ύψος 5cm ώστε να μπορεί ο μαγνήτης να κινείται παράλληλα με τον άξονα του MDL. Έχει τοποθετηθεί ταινία και πλαστική θήκη έτσι ώστε ο παραλληλόγραμμος μαγνήτης νεοδυμίου 1mm X 2mm να μην μπορεί να μετακινηθεί κατά τον άξονα Z και Ψ, δηλαδή κάθετα στο MDL. Τα πηνία διέγερσης τοποθετήθηκαν σε ξεχωριστές πλαστικές θήκες ώστε να μπορούν ξεχωριστά να ολισθαίνουν κατά μήκος του MDL.

Συγκεκριμένα, τα πηνία διέγερσης είναι των 5 περιελίξεων από σύρμα χαλκού 0.1mm και κατασκευάστηκαν γύρω από ιατρικά γυάλινα σωληνάκια εσωτερικής διαμέτρου 0.9mm. Αντίστοιχα το πηνίο λήψης είναι των 200 περιελίξεων από σύρμα χαλκού 0.1mm και κατασκευάστηκε γύρω από ιατρικό γυάλινο σωληνάριο εσωτερικής διαμέτρου 0.9mm.

Στις πλαστικές θήκες τόσο των συρμάτων όσο και του μόνιμου μαγνήτη έχει σημειωθεί με μαρκαδόρο το σημείο που θεωρείται ως το κέντρο του κάθε στοιχείου. Με δεδομένο πως αν γίνει λάθος κατά την τοποθέτηση του στοιχείου και δεν συμπίπτει το κέντρο του πηνίου με το κέντρο της θήκης, αυτό θα είναι ένα στατικό σφάλμα το οποίο δεν αλλάζει με κάθε μέτρηση και άρα δεν χρειάζεται και κάποια περαιτέρω ανάλυση για την απαλοιφή αυτού του λάθους για αρχή. Άρα οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σημεία αναφοράς τα σημεία που έχουν σημειωθεί επάνω στα στοιχεία.

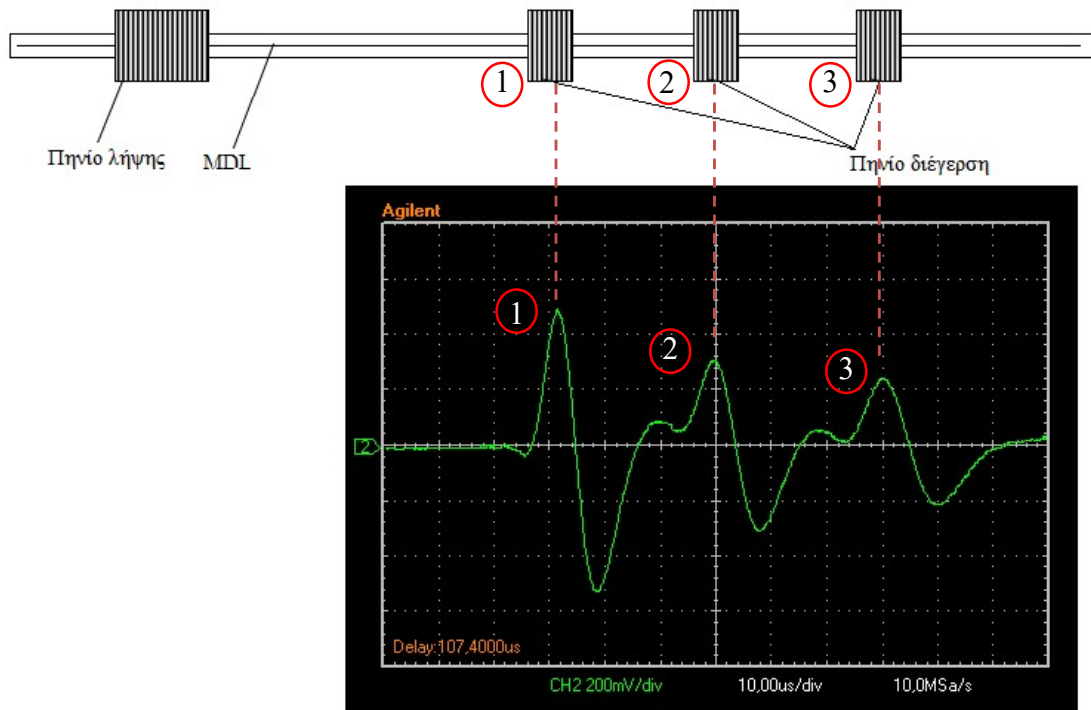
Τα πηνία διέγερσης συνδέθηκαν σε σειρά και τροφοδοτήθηκαν από το κύκλωμα διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε και στα πρότερα πειράματα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ίδιας έντασης ρεύμα διέγερσης και στα τρία πηνία.



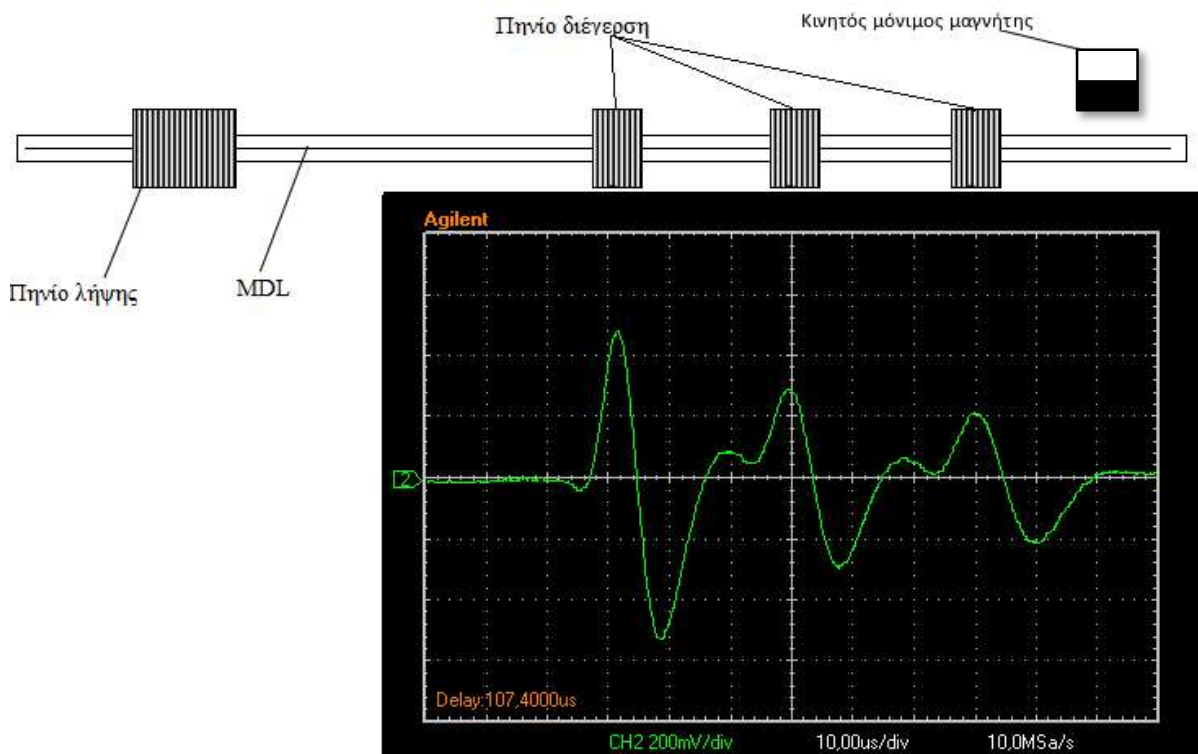
Εικόνα 5: : Φωτογραφία της διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων όπου εμφανίζονται τα πηνία διέγερσης, το πηνίο λήψης, το MDL, ο κινητός μαγνήτης καθώς και το κύκλωμα με ένα κομμάτι από τα εργαστηριακά όργανα.

Τα πηνία διέγερσης έχουν τοποθετηθεί σε αποστάσεις 45cm, 57cm και 69cm από το πηνίο λήψης. Ονομάζεται νούμερο 1 ως το πλησιέστερο 2 το αμέσως επόμενο και 3 ως το πιο απομακρυσμένο αντίστοιχα. Στο Σχήμα 26 εμφανίζεται η έξοδος της διάταξης με τους 3 ξεχωριστούς παλμούς. Τα μέγιστα της τάσης που αντιστοιχούν στη κάθε κορυφή έχουν διαφορά λόγω της εξασθένησης του σήματος σε σχέση με την απόσταση, ακριβώς όπως έχει παρουσιαστεί στο γράφημα της καμπύλης ομοιομορφίας.

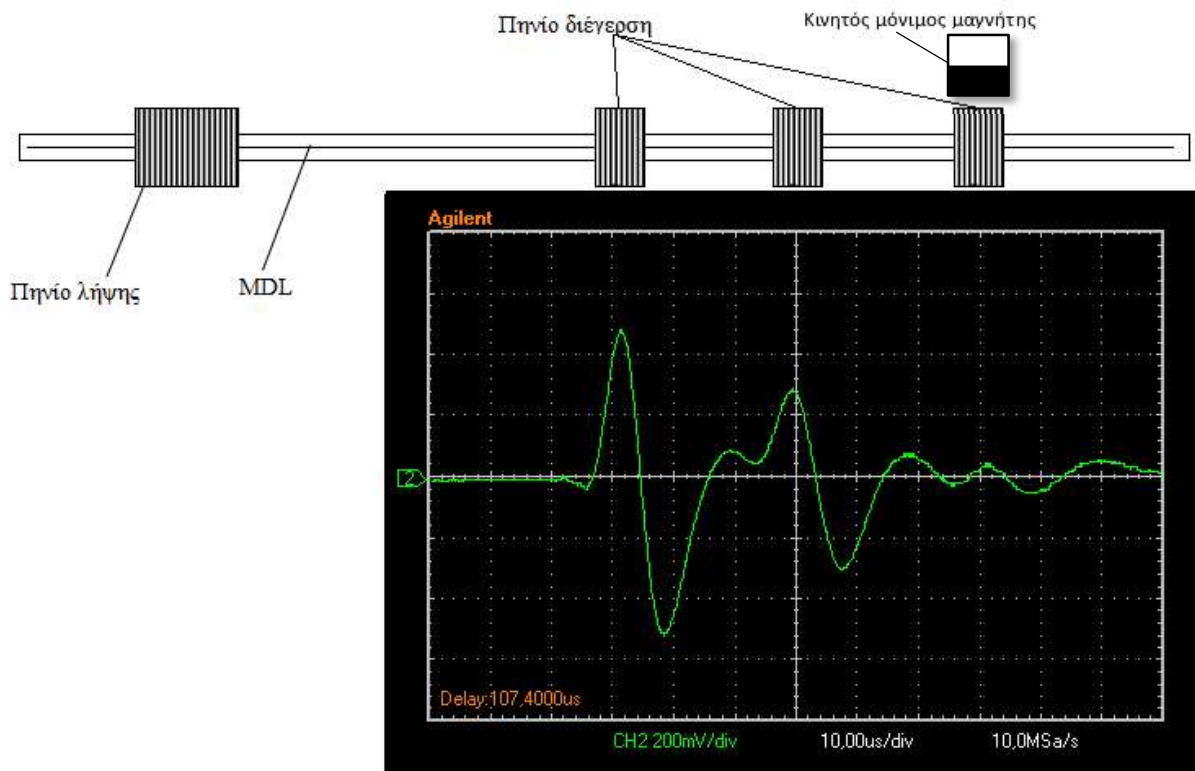
Αντίστοιχα ο μόνιμος μαγνήτης τοποθετείται σε απόσταση 81cm (κατά τον άξονα X) από το πηνίο λήψης και με βήμα 1cm φτάνει μέχρι τα 30cm. Το ύψος του επιπέδου του μαγνήτη κατά την διάρκεια των μετρήσεων παραμένει στα 5cm (κατά τον άξονα Z) από το επίπεδο των πηνίων διεγέρσεων και λήψης. Συνολικά πάρθηκαν 52 μετρήσεις με τις θέσεις των πηνίων να είναι σταθερές και ο μαγνήτης να γειτνιάζει διαδοχικά με το κάθε ένα πηνίο διέγερσης. Σήματα εξόδου όπως πάρθηκαν από τον παλμογράφο για θέσης του μαγνήτη ακριβώς πάνω από τα πηνία και στα μεσοδιαστήματα εμφανίζονται από το Σχήμα 27 ως το Σχήμα 33.



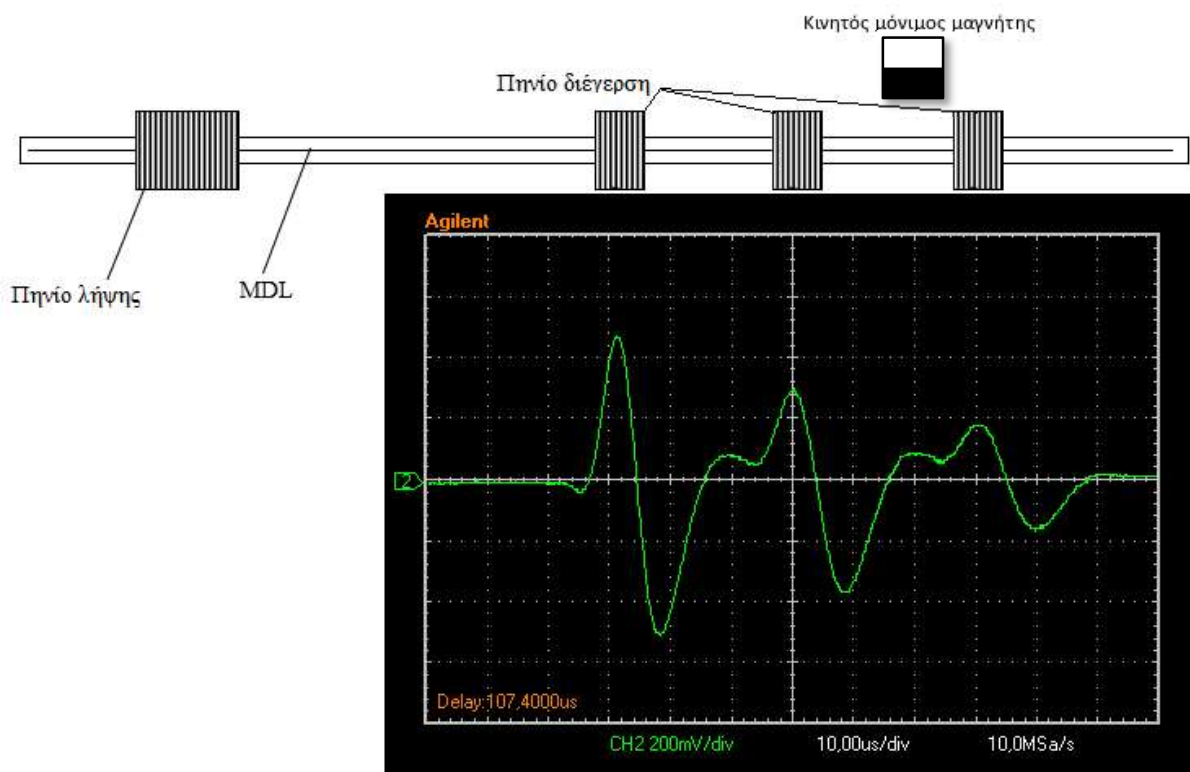
Σχήμα 26: Απόκριση της διάταξης χωρίς την παρουσία μαγνήτη όπου εμφανίζεται και η εξασθένιση του MDL.



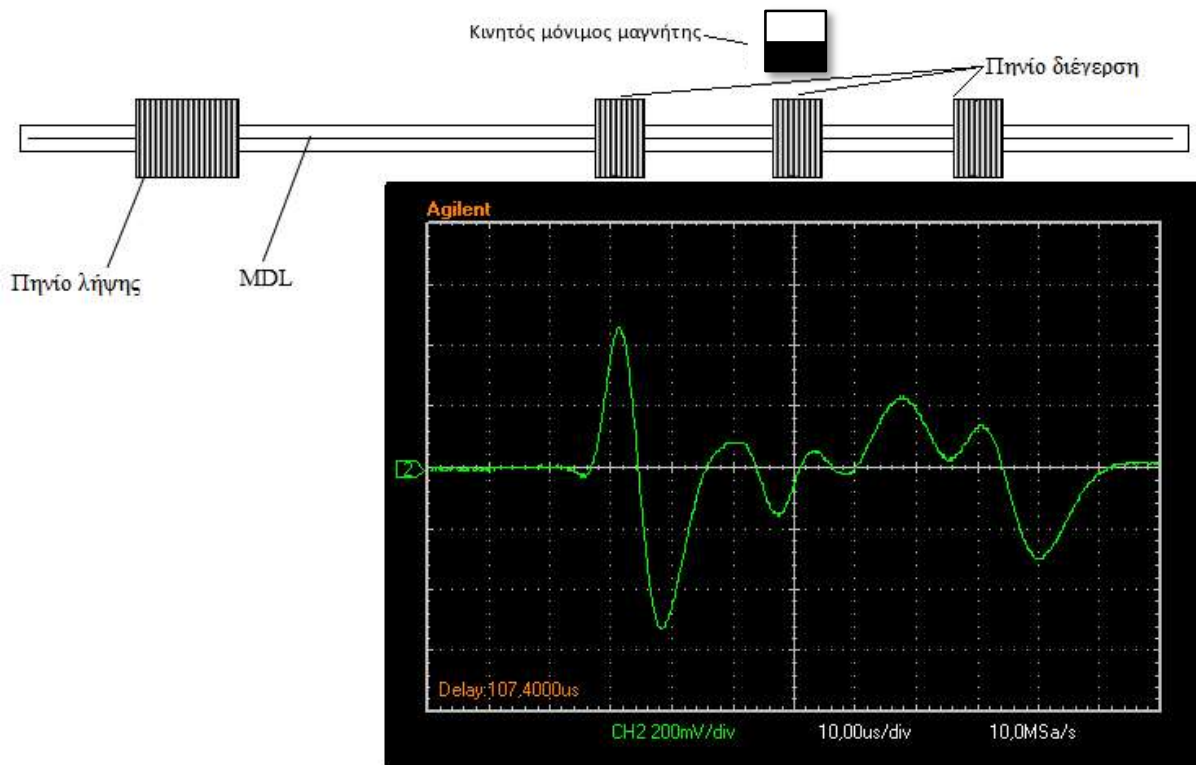
Σχήμα 27: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 75cm από πηνίο λήψης.



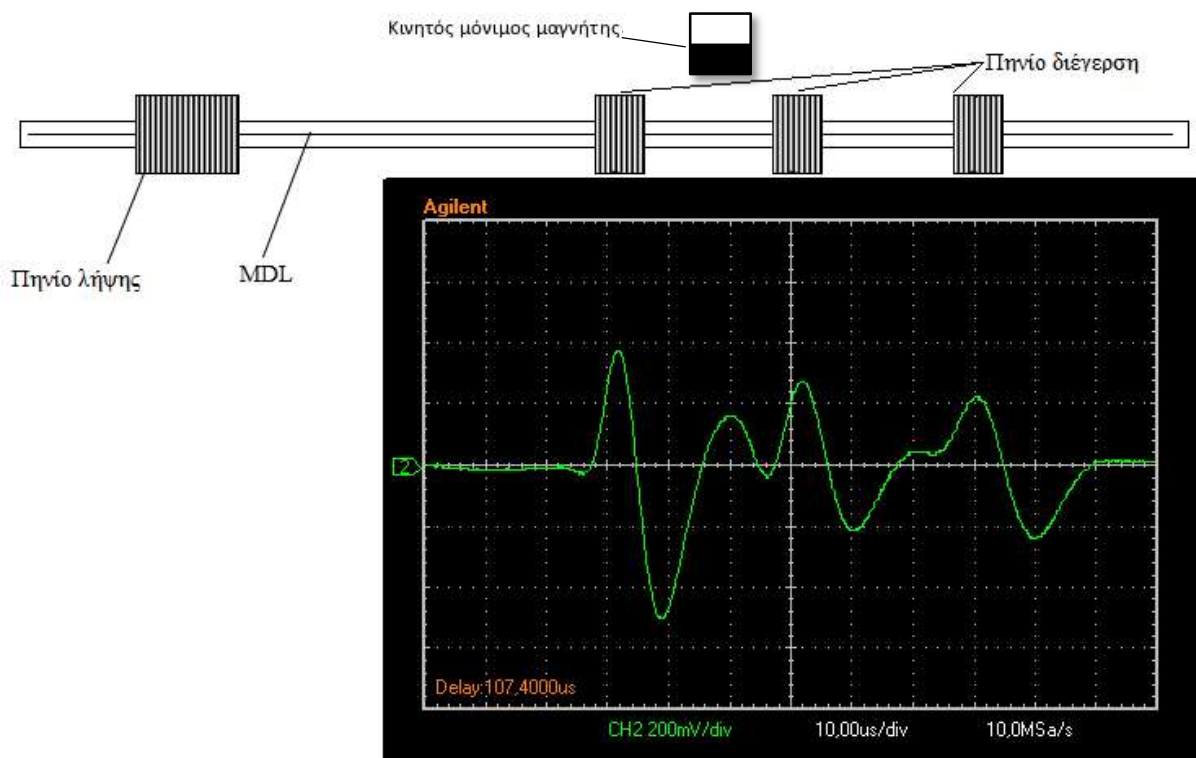
Σχήμα 28: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 69cm από πηνίο λήψης.



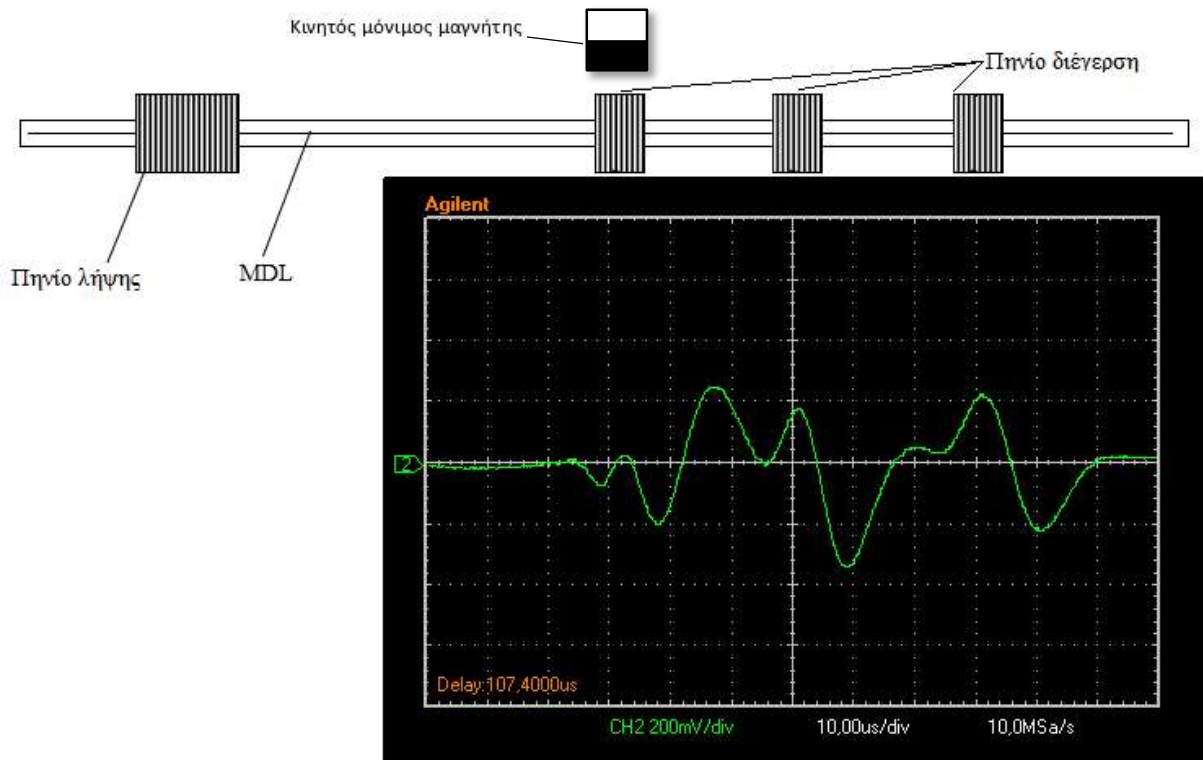
Σχήμα 29: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 63cm από πηνίο λήψης.



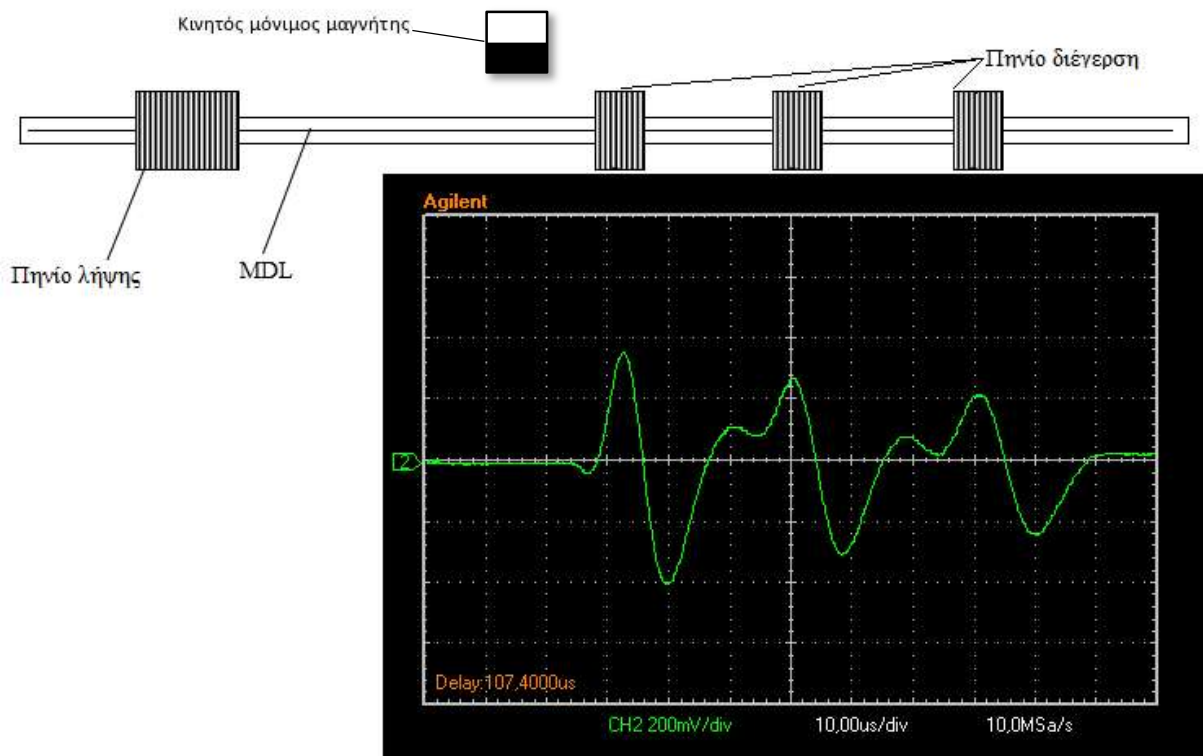
Σχήμα 30: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 57cm από πηνίο λήψης.



Σχήμα 31: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 51cm από πηνίο λήψης.

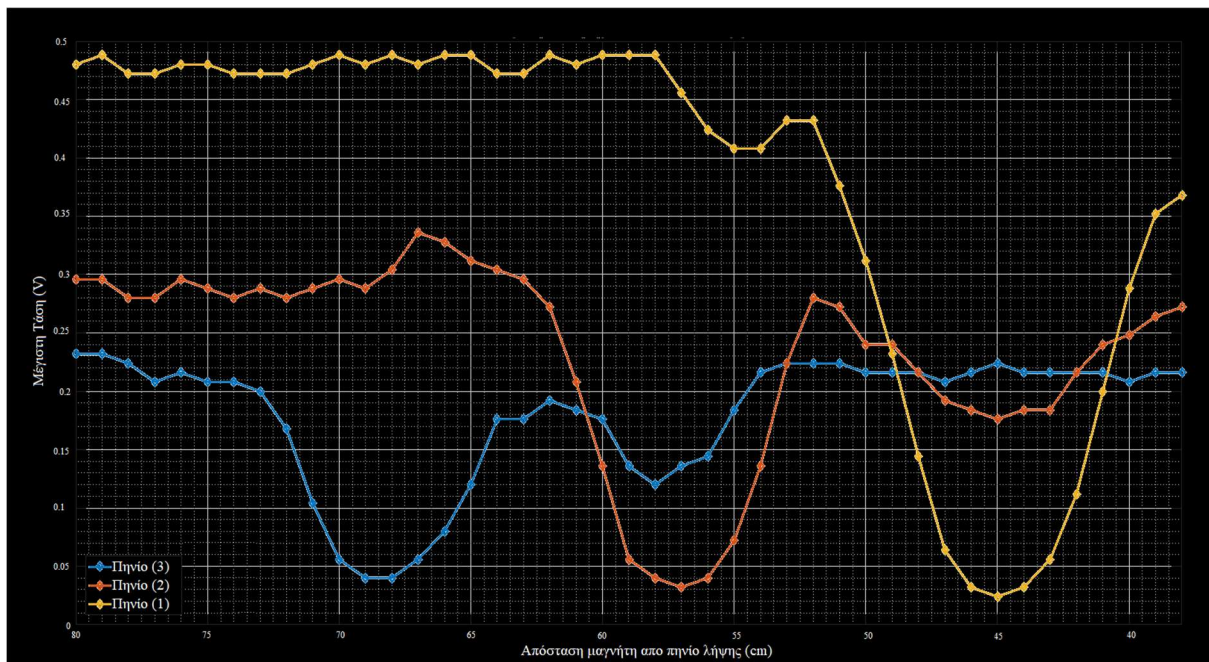


Σχήμα 32: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 45cm από πηνίο λήψης.



Σχήμα 33: Έξοδος παλμογράφου για απόσταση μαγνήτη στα 39cm από πηνίο λήψης.

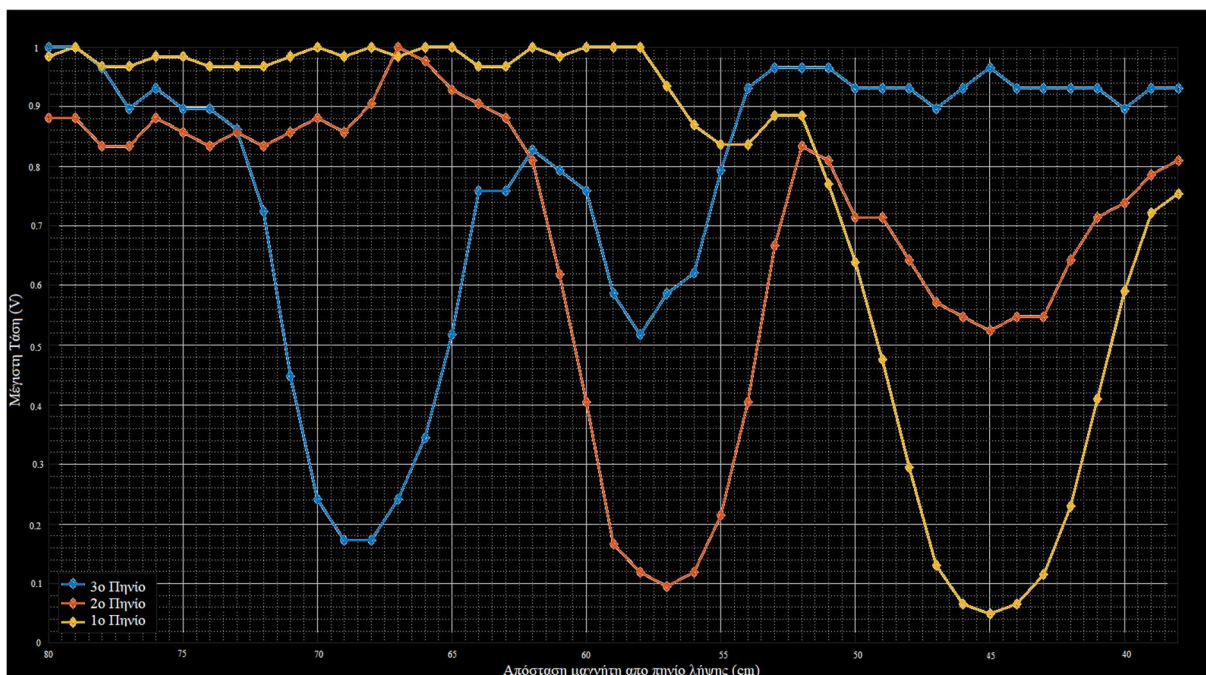
Αυτή η διαδοχική καταστροφή των λήψεων δύναται, μέσω ενός μικροελεγκτή, να χρησιμοποιηθεί ως το ανιχνεύσιμο μοτίβο που αποκαλύπτει την θέση του μόνιμου μαγνήτη. Στο Γράφημα 30 εμφανίζονται τα μέγιστα των τάσεων εξόδου που αντιστοιχούν στις κυματομορφές του κάθε ξεχωριστού πηνίου. Είναι εμφανές ότι όσο ο μαγνήτης πλησιάζει προς το κέντρο του εκάστοτε πηνίου τόσο μικραίνει και η τάση εξόδου. Παρατηρείται ότι καθώς προσεγγίζει τα πηνία ο μαγνήτης υπάρχει μια μικρή άνοδος στην τάση πριν αρχίσει να μειώνεται. Ο λόγος είναι ότι καθώς πλησιάζει την περιοχή του μαγνητοσυστολικού καλωδίου που βρίσκεται εντός του πηνίου, υπάρχει μια σημαντική ποσότητα μαγνητικών γραμμών που δύναται να προσανατολίζονται στον διαμήκη άξονα του σύρματος και να προκαλούν, όπως είδαμε στην ανάλυση του πεδίου πόλωσης, μια αύξηση της τάσης εξόδου. Όταν όμως η πλειοψηφία των μαγνητικών γραμμών αρχίσουν να προσανατολίζονται στον άξονα Z, δηλαδή ο μαγνήτης πλησιάζει ακόμα περισσότερο το πηνίο, η τάση εξόδου αρχίζει να μειώνεται. Εμφανίζονται ξεκάθαρα ελάχιστα στο διάγραμμα που αντιστοιχούν στο κάθε πηνίο και συμπίπτουν με την τοποθεσία του μόνιμου μαγνήτη. Στην ουσία το διάγραμμα αποτελείται από τρία ίδια διαγράμματα των 3 πηνίων διεγερσης μετατοπισμένα το ένα από το άλλο κατά την πραγματική απόστασή τους. Οι όποιες διαφορές μεταξύ των τριών καμπύλων οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες.



Γράφημα 30: Μέγιστα τάσης εξόδου για κάθε ένα πηνίο διεγερσης σε διαφορετικές θέσης μαγνήτη

Αυτή η απόκριση της διάταξης την καθιστά ικανή να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με έναν υπολογιστικό ελεγκτή ως μια πλήρης αισθητήρια διάταξη θέσης. Για να βελτιωθεί όμως η απόκριση και κατά συνέπεια η όποια διαδικασία βαθμονόμησης, στο επόμενο βήμα

εξαλείφθηκε ο παράγοντας εξασθένησης του σήματος. Έτσι, δημιουργήθηκε το Γράφημα 31 το οποίο είναι κανονικοποιημένο ως προς την τάση εξόδου, δηλαδή πολλαπλασιάστηκαν οι τιμές της καμπύλης του κάθε πηνίου με τον αντίστοιχο συντελεστή. Αυτή ως πιο απλή απόκριση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και την βαθμονόμηση της διάταξης με δεδομένο ότι οι θέσεις των πηνίων μένουν σταθερές. Λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς ο χρόνος που λαμβάνεται το μέγιστο της κάθε καμπύλης εν τη απουσία μαγνήτη, στην συνέχεια όποια αλλαγή γίνεται συγκρίνεται με αυτή την αρχική κατάσταση. Η καταγραφή αυτής της αλλαγής και για τις 3 καμπύλες ταυτόχρονα αναδεικνύουν το σημείο πάνω στον άξονα X όπου ευρίσκεται το μαγνητικό σώμα.



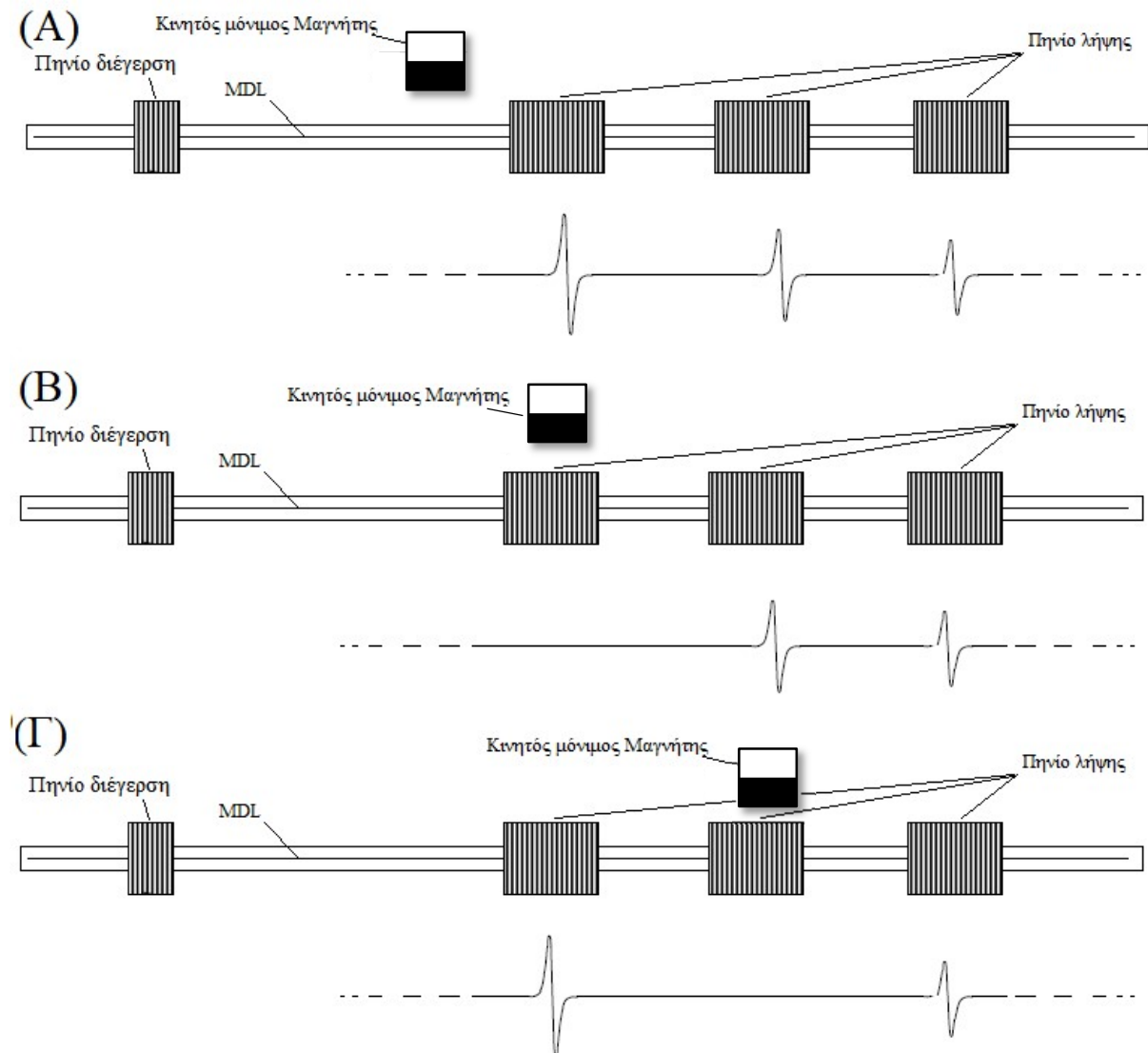
Γράφημα 31: Κανονικοποιημένο διάγραμμα τάσης εξόδου του MDL με 3 πηνία διέγερσης.

6.2 Πείραμα Πολλαπλών Λήψεων

Σε αυτό το πείραμα, όπως και στο προηγούμενο κατασκευάστηκε μια διάταξη που μπορεί να δράσει ως αισθητήρας εύρεσης θέσης ενός μετακινούμενου μόνιμου μαγνήτη. Η βασική αρχή λειτουργία είναι η ίδια με την βασική διάταξη MDL. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι η παρουσία του μόνιμου μαγνήτη πλησίον της περιοχής του πηνίου λήψης μπορεί να καταστρέψει τον αναμενόμενο παλμό εξόδου.

Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη της προηγούμενης ενότητας με όλες τις κατασκευές για την στήριξη πηνίων και μαγνήτη να μένουν ίδιες. Η διάταξη αποτελείται από τρία πηνία λήψης των 200 περιελίξεων από σύρμα χαλκού 0.1mm με εσωτερική διάμετρο 0.9mm. Και ένα πηνίο

διέγερσης των 5 περιελίξεων με τα ίδια χαρακτηριστικά. Οι διάφορες φάσεις λειτουργίας της διάταξης εμφανίζονται στο Σχήμα 34.

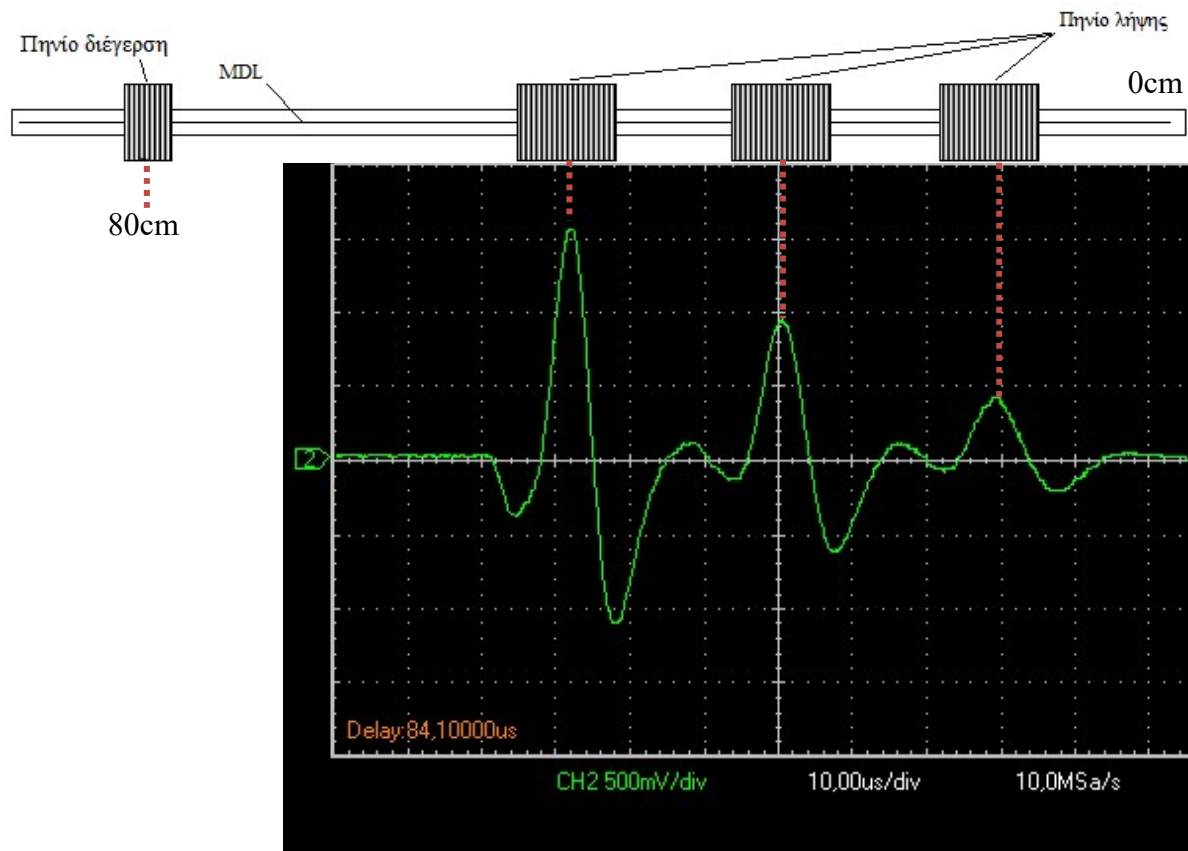


Σχήμα 34: Διάταξη πολλαπλών λήψεων σε διάφορες φάσεις λειτουργίας. (Α) όταν ο μαγνήτης δεν επηρεάζει το σήμα εξόδου. (Β) όταν ο μαγνήτης καταστρέφει τον παλμό του πρώτου πηνίου λήψης. (Γ) όταν ο μαγνήτης καταστρέφει τον παλμό του δεύτερου πηνίου λήψης.

Ως σημείο αναφοράς για τις διάφορες θέσεις των στοιχείων ορίζεται το άκρο προς την πλευρά των λήψεων (δεξιά όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 35). Τα 3 πηνία λήψεως τοποθετήθηκαν κατά φθίνουσα σειρά 11,23,35cm και ονομάστηκαν 3^ο, 2^ο, 1^ο. Το πηνίο διέγερσης τοποθετήθηκε στο 80cm.

Στο Σχήμα 35 εμφανίζεται η απόκριση του παλμογράφου κατά την απουσία του μόνιμου μαγνήτη με τις αντίστοιχες θέσεις των πηνίων από την αρχή του MDL. Ο λόγος που ο 1^{ος} παλμός είναι μεγαλύτερος και υπάρχει σταδιακή μείωση στο μέγιστο της τάσης εξόδου στον

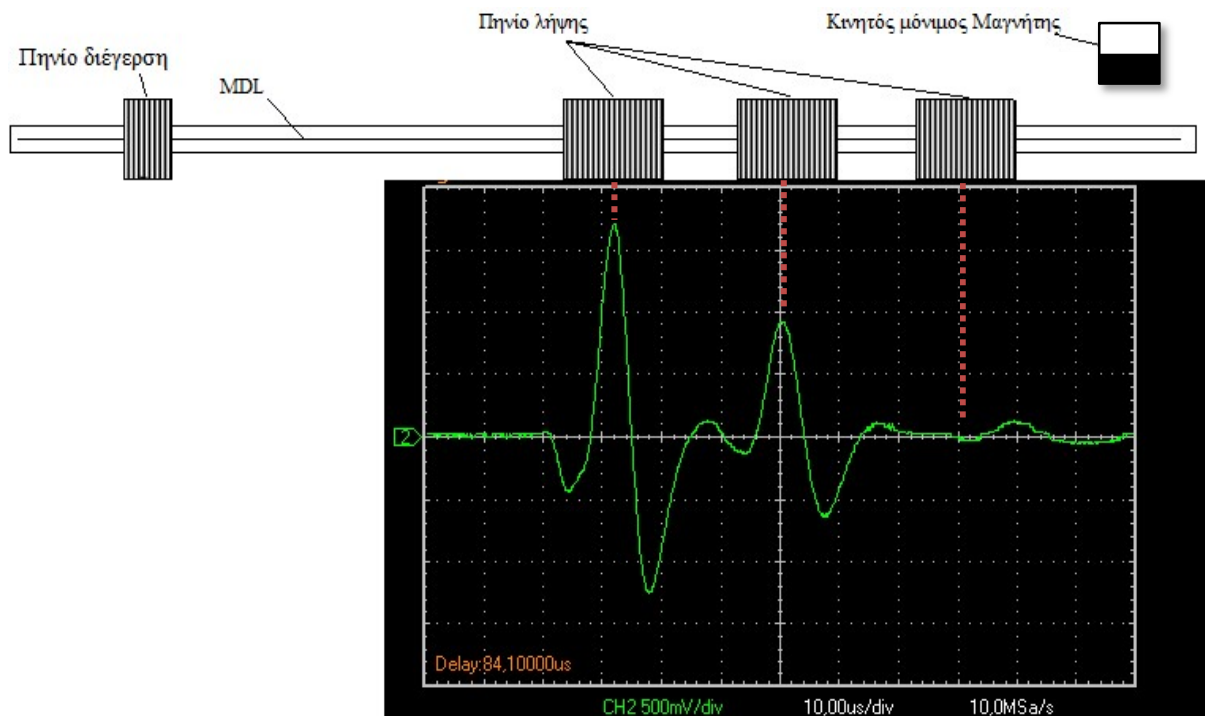
2^ο και 3^ο παλμό οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος λόγω απόστασης ακριβώς όπως εξηγήθηκε μέσω της καμπύλης ομοιομορφίας του MDL.



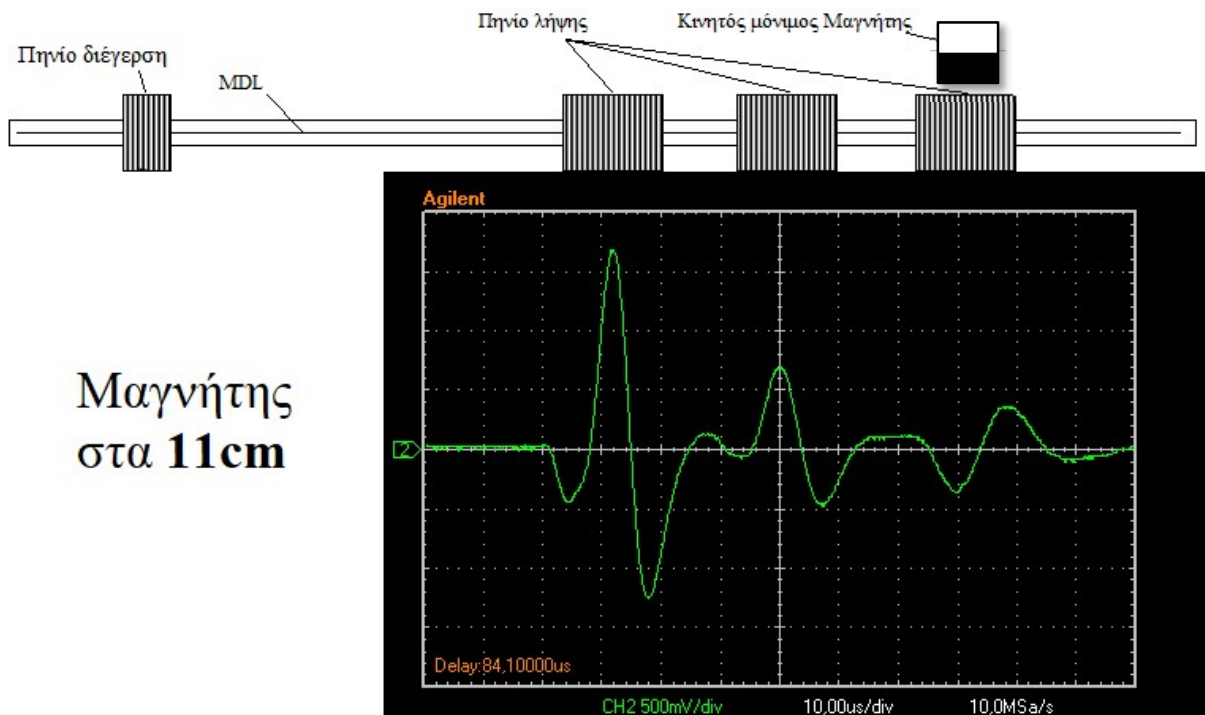
Σχήμα 35: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως κατά την απουσία μαγνήτη.

Για τις ανάγκες των μετρήσεων ο μαγνήτης τοποθετείται στην θέση 0 και με βήμα 1cm φτάνει μέχρι τα 42cm. Ακολουθούν τα σήματα εξόδου όπως λήφθηκαν από τον παλμογράφο για διαφορετικές θέσεις του μαγνήτη, είτε ακριβώς πάνω από πηνίο λήψης είτε ακριβώς στο μεσοδιάστημα δύο πηνίων.

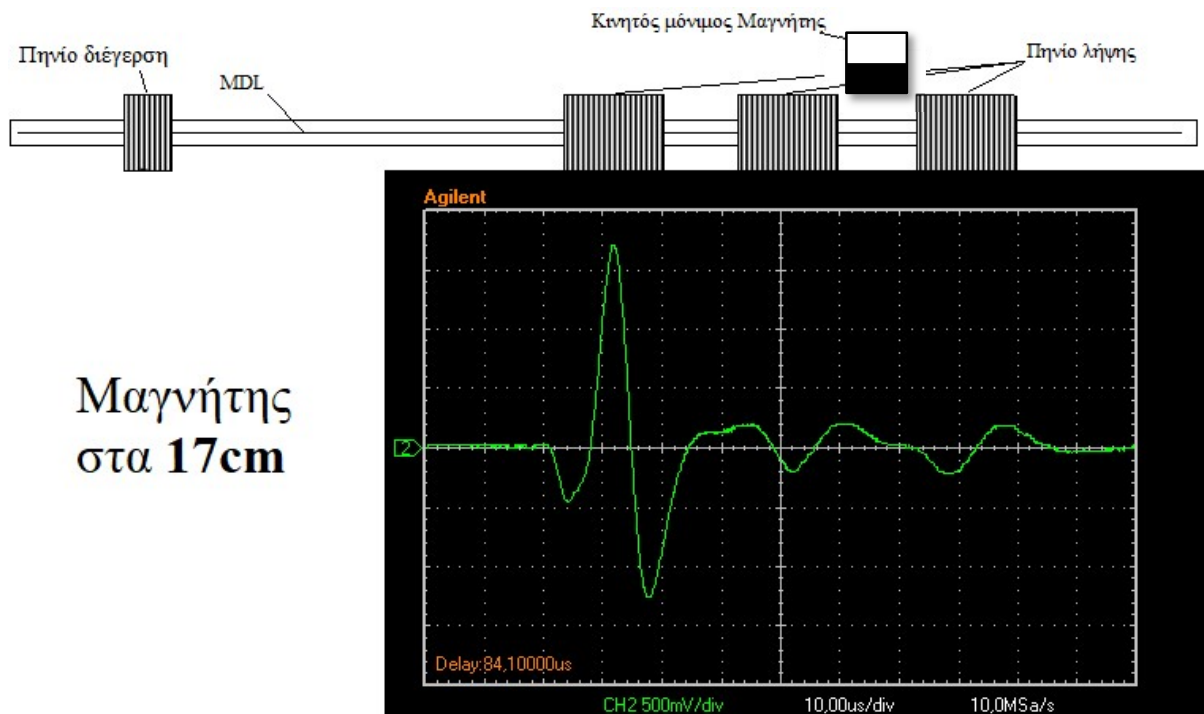
Ξεκινώντας από το Σχήμα 36, παρατηρείται ότι είδη ο παλμός του 3^{ου} πηνίου έχει πλήρως καταστραφεί. Η συμπεριφορά συμπίπτει με αυτή του MDL κατά την αλλαγή του πεδίου πόλωσης. Η διαφορά έγκειται στο ότι το πηνίο των 200 περιελίξεων που είναι το πηνίο λήψης είναι εξαιρετικά πιο ευαίσθητο στις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου γύρω του. Παρόλο λοιπόν που είναι ο ίδιος ακριβώς μαγνήτης με το πείραμα των πολλαπλών διεγέρσεων, παρατηρούμε ότι μηδενίζει πολύ νωρίτερα το σήμα εξόδου. Στην συνέχεια παρατηρείται το ίδιο και στο Σχήμα 38 για το δεύτερο πηνίο αλλά και πλήρη αντιστροφή στο Σχήμα 40 για το 3^ο πηνίο. Καθώς ο μαγνήτης τοποθετείται διαδοχικά ακριβώς άνωθεν του εκάστοτε πηνίου παρατηρείται και η πλήρης αντιστροφή του σήματος, το οποίο είναι επίσης αναμενόμενο αν ακολουθήσουμε την καμπύλη του πεδίου πόλωσης.



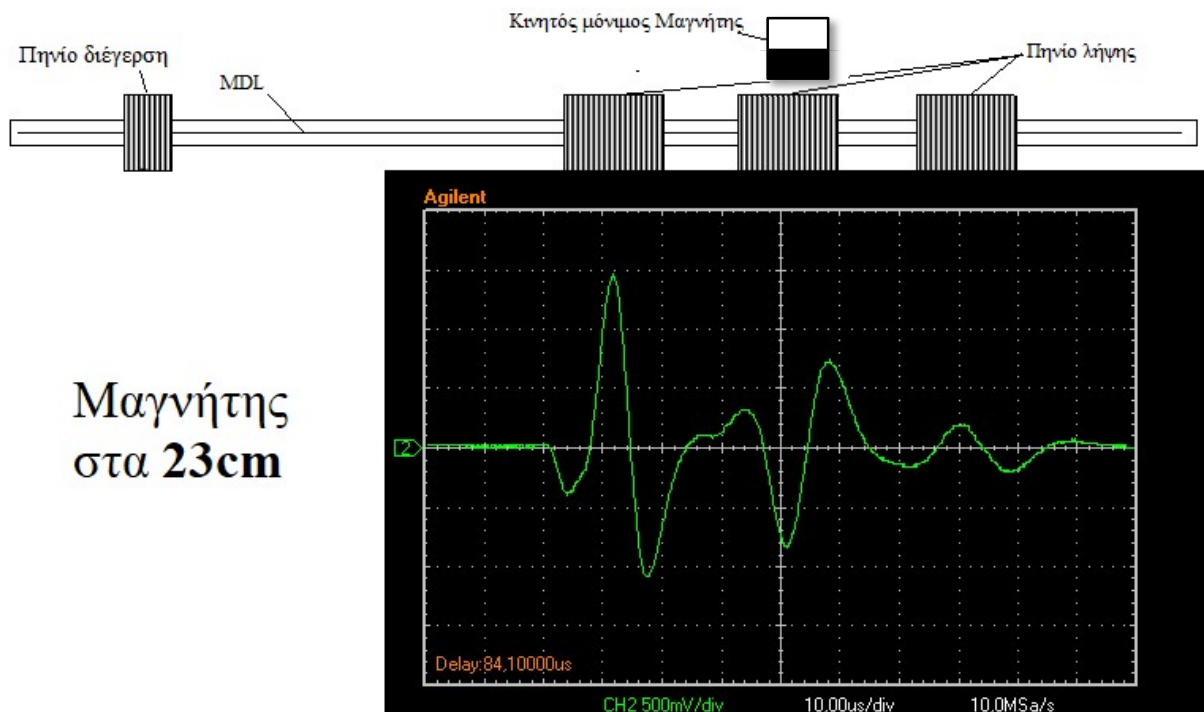
Σχήμα 36: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 5cm.



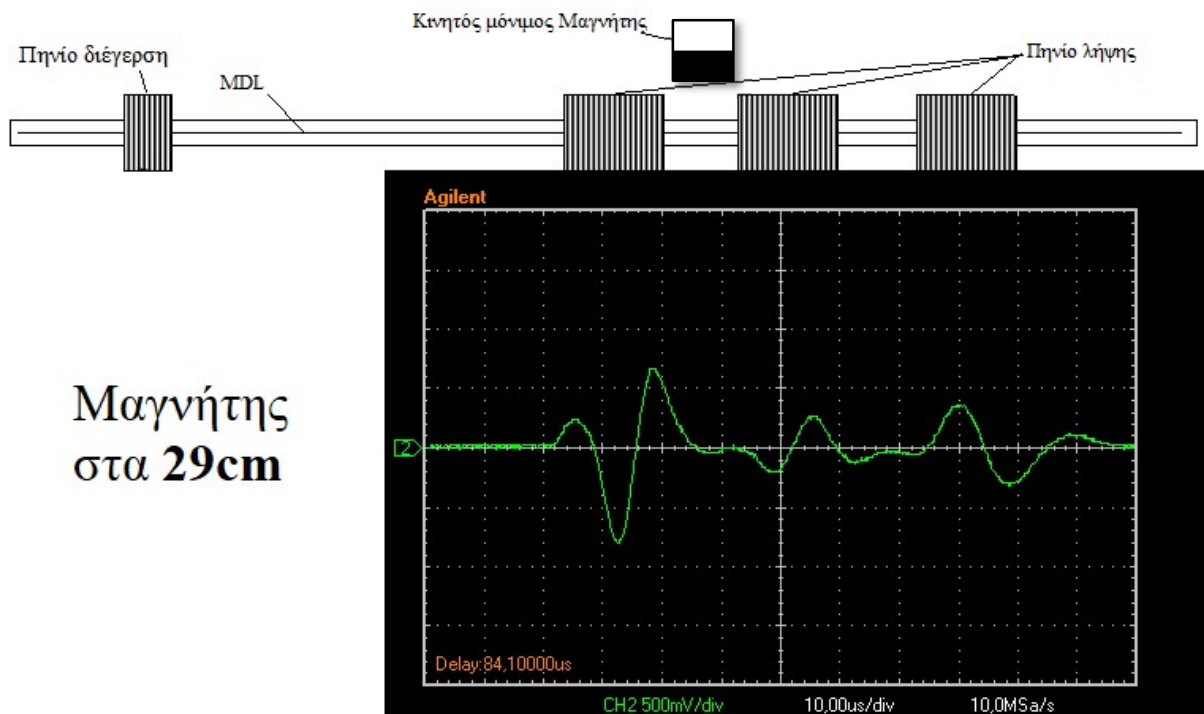
Σχήμα 37: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 11cm.



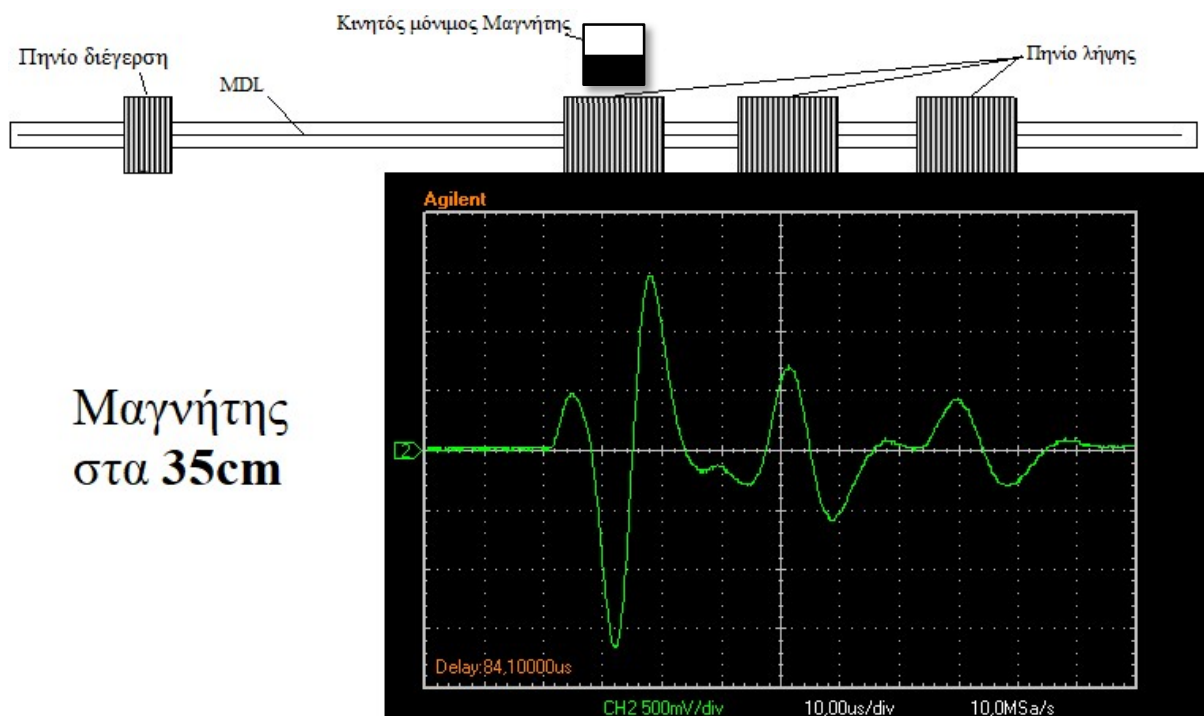
Σχήμα 38: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 17cm.



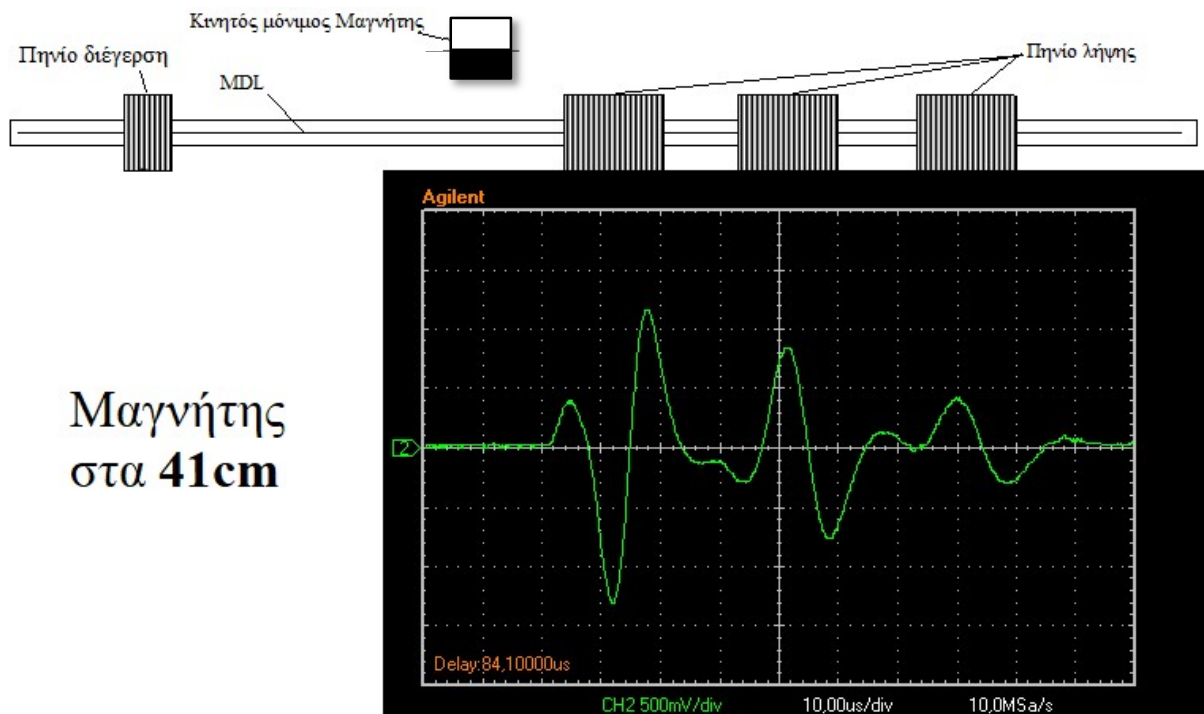
Σχήμα 39: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 23cm.



Σχήμα 40: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 29cm.

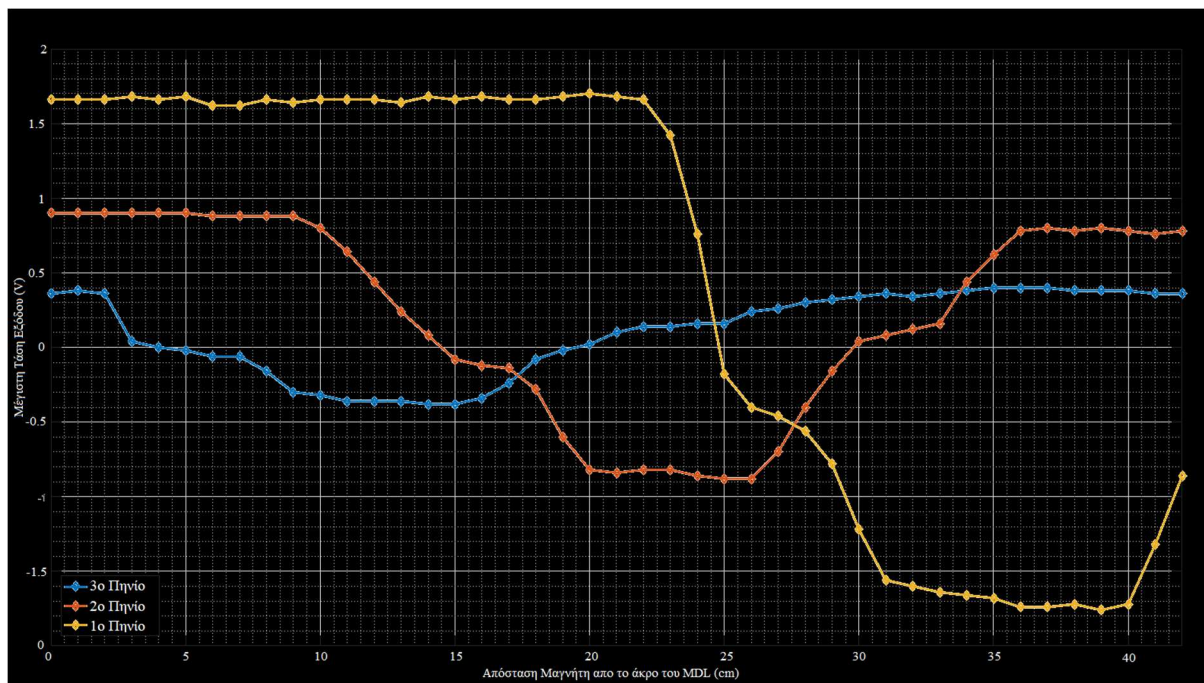


Σχήμα 41: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 35cm.



Σχήμα 42: Τάση εξόδου στο MDL με 3 πηνία λήψεως με τον μαγνήτη στα 41cm.

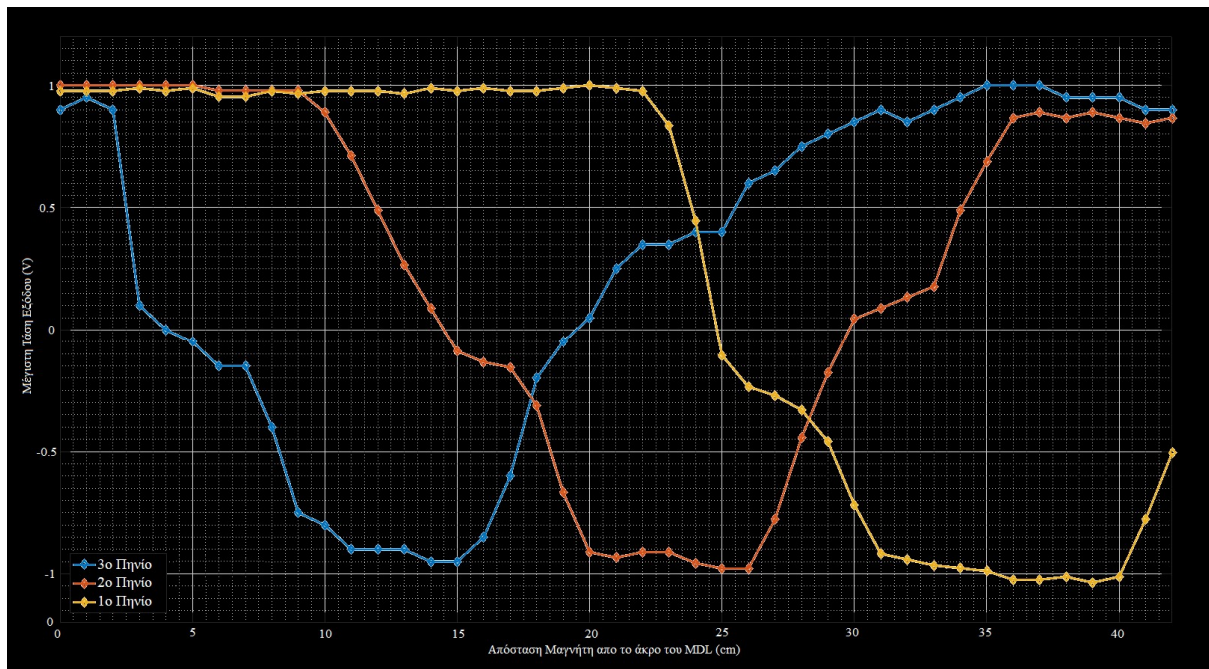
Για την αξιολόγηση της διάταξης παράχθηκε το Γράφημα 32 στο οποίο εμφανίζονται όλες οι μέγιστες τάσεις εξόδου του κάθε πηνίου για κάθε διαφορετική θέση του μόνιμου μαγνήτη.



Γράφημα 32: Μέγιστη τάση εξόδου του κάθε πηνίου για τις διαφορετικές θέσεις του μόνιμου μαγνήτη. 1^ο πηνίο στα 11cm, 2^ο στα 23cm και 3^ο στα 45cm.

Αντίστοιχα με την διάταξη πολλαπλών διεγέρσεων, για την εξάλειψη του παράγοντα εξασθένησης πολλαπλασιαστική η καμπύλη του πηνίου 1 και 3 με έναν κατάλληλο συντελεστή ώστε να εμφανίζονται με ίδια ελάχιστη και μέγιστη τάση εξόδου κοντά στην συμπεριφορά της καμπύλης του πηνίου 2. Από αυτή τη διαδικασία παράχθηκε το Γράφημα 33 το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο για μελλοντική βαθμονόμηση της διάταξης με την προϋπόθεση ότι τα πηνία παραμένουν στην ίδια θέση.

Ως ελάχιστα στο γράφημα εμφανίζονται οι αρνητικές τιμές αφού όπως αναφέρθηκε δημιουργείται πλήρης αντιστροφή του σήματος εξόδου όταν ο μαγνήτης βρίσκεται ακριβώς πάνω από το αντίστοιχο πηνίο. Ο λόγος που τα ελάχιστα είναι ένα σύνολο τιμών και όχι μια οξεία κορυφή είναι ότι πλέον βρισκόμαστε στην περιοχή του γραφήματος του πεδίου πόλωσης του MDL (Γράφημα 25) που θα αντιστοιχούσε σε τιμές κάτω των 40mA. Δηλαδή οι περιοχές έχουν πολωθεί πλήρως προς έναν εύκολο άξονα μαγνήτισης (κάθετο στην διεύθυνση που επιβάλλεται από το πηνίο διέγερσης) και με την επιβολή μεγαλύτερου πεδίου δεν αλλάζει η ένταση του σήματός μας. Αν όμως τοποθετούνταν μεγαλύτερος μαγνήτης (ακόμα μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο) θα υπήρχε ένα σημείο πέρα από το οποίο ενώ θα πλησίαζε ο μαγνήτης θα μίκραινε η τάση εξόδου. Αυτό θα οφειλόταν στο ότι πλέον θα “πάγωνε” εντελώς τα δίπολα προς τον κάθετο άξονα μαγνήτισης χωρίς την δυνατότητα το μαγνητικό πεδίο του πηνίου διέγερσης να μπορεί να τα στρέψει προς μία άλλη κατεύθυνση. Για ένα λοιπόν επεξεργαστή σήματος, αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να λαμβάνει πληροφορία και από τα 2 γειτονικά πηνία για να εξάγει συμπέρασμα για την θέση του μαγνήτη και γι’ αυτό επιλέγονται τα πηνία να είναι όσο πιο κοντά το ένα με το άλλο.



Γράφημα 33: Ανηγμένη μέγιστη τάση εξόδου του κάθε πηνίου για τις διαφορετικές θέσεις του μόνιμου μαγνήτη. 1^ο πηνίο στα 11cm, 2^ο στα 23cm και 3^ο στα 45cm.

6.3 Αισθητήρας θέσης μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων

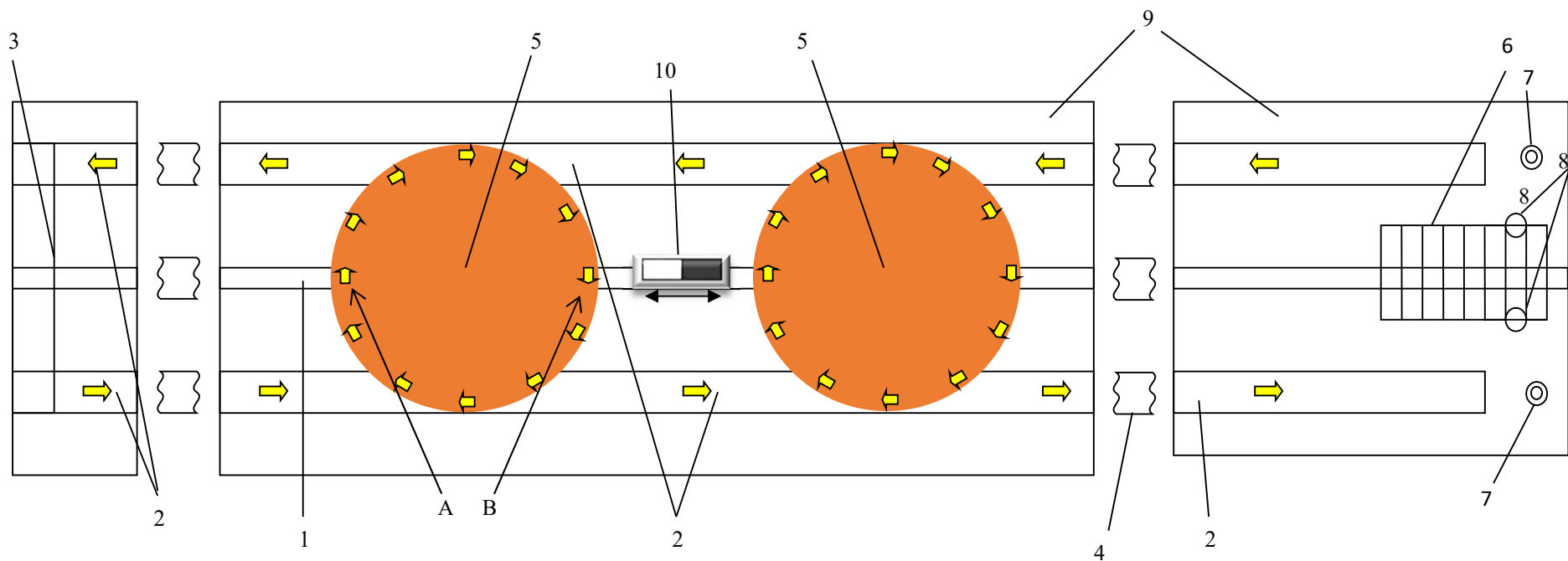
Σαν τελική πειραματική διάταξη κατασκευάστηκε ένας αισθητήρας που χρησιμοποιεί τόσο την φυσική αρχή λειτουργίας του MDL όσο και την επαγωγή δινορευμάτων σε λεπτά δισκία χαλκού.

Πιο συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία εμφανίζεται ένας αισθητήρας θέσης [57] ο οποίος κατασκευάζεται στοχεύοντας στη μείωση του κόστους, στην εύκαμπτη και εύκολη χρήση του, καθώς και στη διατήρηση ή ακόμα και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του κλασσικού MDL. Δηλαδή βελτίωση της ευαισθησίας, της ανάλυσης και της αβεβαιότητας μικρότερης από 0,2 mm σε θερμοκρασίες από -50 ° C έως 100 ° C με γραμμική και μη-υστερητική απόκριση.

Ο αισθητήρας θέσης με μικροπαρεμβάσεις απεικονίζεται στο Σχήμα 43 και βασίζεται στην αρχή της βασικής διάταξης MDL. Η διάταξη περιλαμβάνει ένα μαγνητοσυστολικό σύρμα FeSiB (1), όπου παίζει τον ρόλο του οδηγού ακουστικού κύματος. Αυτό το σύρμα ενεργεί ως μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης (MDL). Ένα ζεύγος παράλληλων αγωγών (2) τοποθετείται παράλληλα με το MDL κατά τρόπο ώστε να σχηματίζεται ένα επίπεδο όπου περιλαμβάνει το MDL στο μεσοδιάστημά τους. Αυτοί οι αγωγοί χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση παλμικού ρεύματος και ως εκ τούτου ονομάζονται αγωγοί παλμικού ρεύματος. Τα δύο καλώδια παλμικού ρεύματος και το MDL τοποθετούνται σε 3D εκτυπωμένο πλαστικό (9) και σχηματίζουν μία επίπεδη στάθμη, πάνω στην οποία τοποθετούνται δίσκοι χαλκού (5),

παράλληλη με τη διάταξη του μαγνητοσυστολικού υλικού και των παράλληλων αγωγών, ώστε να ενεργεί ως γεννήτρια δινορευμάτων. Ο πυρήνας ανίχνευσης μπορεί να είναι ένας μόνιμος μαγνήτης ο οποίος κινείται παράλληλα με τη διάταξη των αγωγών ρεύματος παλμού και το MDL(10) όπως ακριβώς και στις προηγούμενες διατάξεις. Στο Σχήμα 16 παρουσιάστηκαν οι όψεις του υλικού πακεταρίσματος του αισθητήρα. Το MDL (1) περιβάλλεται από Nylon με ίνες άνθρακα (9) που κρατά το MDL στη θέση του χωρίς να εξασθενεί το οδεύον ελαστικό κύμα. Το πλαστικό μεταξύ των δύο αγωγών παλμού ρεύματος και του MDL δρα ως στήριξη των υπολοίπων υλικών και διαθέτει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες αφού έχει την δυνατότητα να κάμπτεται. Το Nylon έχει κατασκευαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργεί εγκοπώσεις (θήκες) στα οποία να μπορούν να στερεωθούν τα δισκία χαλκού. Ο κινητός μόνιμος μαγνήτης (10) είναι έξω από την εγκάρσια τομή της διάταξης ανίχνευσης, ελεύθερο να μετακινηθεί κατά μήκος του μήκους του MDL. Τέλος χρησιμοποιείται ένα αγωγίμο μέσο για την ηλεκτρική σύνδεση των πλευρικών άκρων των δύο αγωγών παλμού ρεύματος καθώς και του πηνίου λήψης σήματος.

Τα δισκία χαλκού κατασκευάστηκαν από φύλλα χαλκού πάχους 0,12mm στον μικροτόμο του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Διερχόμενης Δέσμης Ηλεκτρονίων - TEM (Jeol 2100 HR, 200kV, TEM) της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών. Η διάμετρός του είναι στα 1,5mm και με βάση αυτό σχεδιάστηκε και το πακετάρισμα στο AutoCAD. Η απόσταση του ενός δίσκου με τον άλλο είναι στα 1,5cm Το πλάτος της διάταξης είναι στα 3,5mm το οποίο την καθιστά αρκετά εύθραυστη για το μήκος των 10cm.



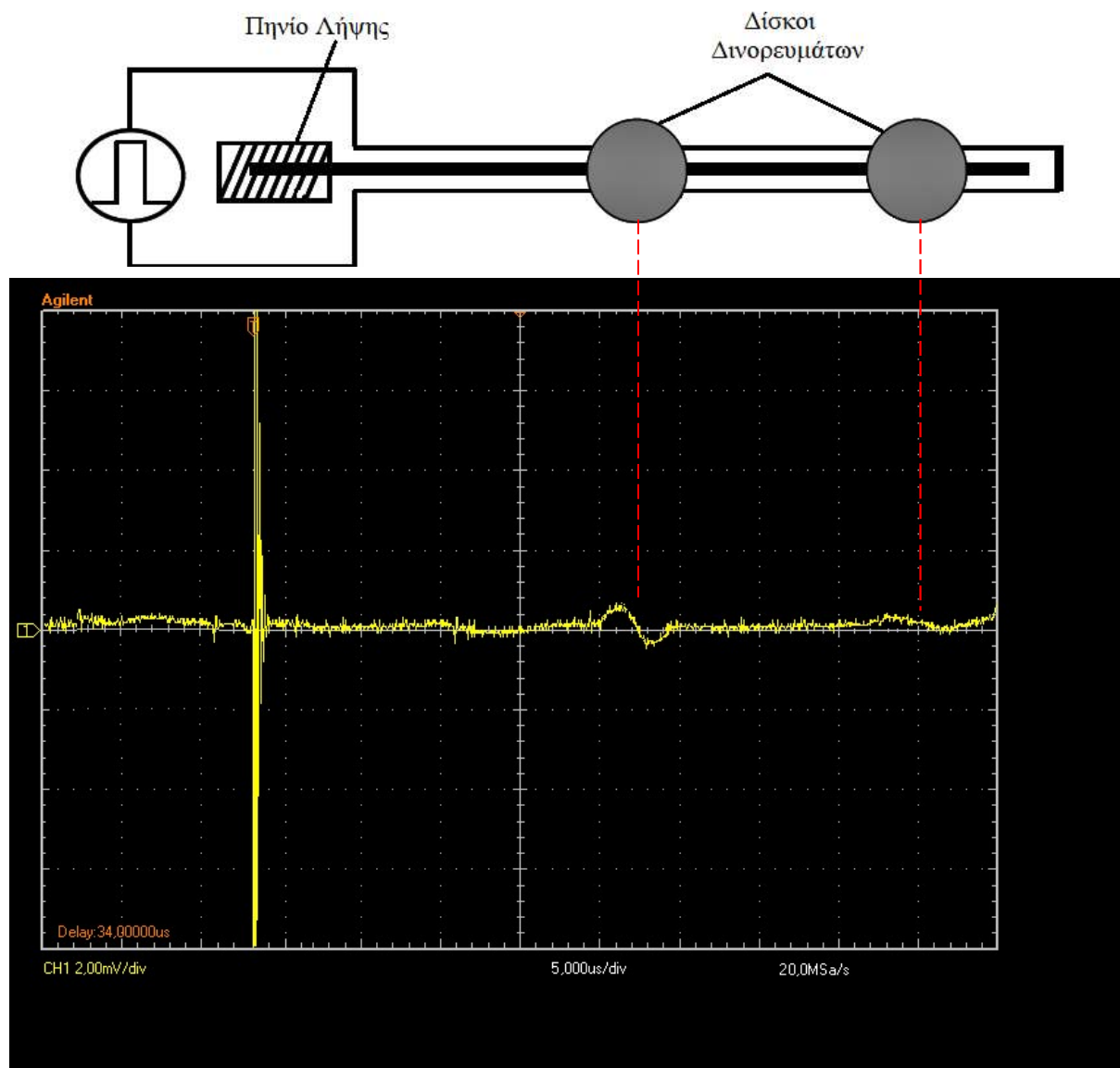
Σχήμα 43: Σχέδιο του αισθητήρα θέσης MDL με διέγερση μέσω δινορευμάτων.(1) Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης, (2) Ρευματοφόροι αγωγοί, (3) Σύνδεση των ρευματοφόρων αγωγών, (4) Νοητή συνέχιση της διάταξης,(5) Λεπτά δισκία χαλκού, (6) Πηνίο λήψης σήματος, (7) Ενώσεις για την τροφοδοσία των ρευματοφόρων αγωγών, (8) Ενώσεις για την μετάδοση του σήματος από το πηνίο λήψης, (9) Μη μαγνητική εκτυπωμένη βάση αισθητήρα (πακετάρισμα), (10) Κινητός μόνιμος μαγνήτης. Με κίτρινα βέλη εμφανίζεται η κατεύθυνση του ρεύματος τόσο στους ρευματοφόρους αγωγούς όσο και των δινορευμάτων που προκαλούνται στην περιφέρεια των δίσκων χαλκού.

Το στοιχείο ανίχνευσης λειτουργεί ως εξής: Το παλμικό ρεύμα μεταδίδεται στον αγωγό παλμικού ρεύματος, προκαλώντας ένα εγκάρσιο παλμικό μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του μαγνητοσυστολικού στοιχείου. Ένα τέτοιο εγκάρσιο παλμικό μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να δημιουργήσει έναν ελαστικό παλμό στο μαγνητοσυστολικό σύρμα. Εντούτοις, το παλλόμενο ρεύμα προκαλεί ρεύμα στους δίσκους χαλκού που “προσπαθεί” να αντισταχθεί στο αίτιό του, δημιουργώντας αυτό το περιφερειακό ρεύμα που εμφανίζεται και στο σχήμα. Απουσία του κινούμενου μόνιμου μαγνήτη, λόγω συμμετρίας το ρεύμα κατανέμεται εξίσου στην περιφέρεια του δίσκου, με την προϋπόθεση ότι ο δίσκος είναι ηλεκτρικά και μαγνητικά ομοιόμορφος. Αυτά τα ρεύματα παράγουν ένα μικρό μαγνητικό πεδίο του αντίστοιχου πλάτους το οποίο αλληλοακυρώνεται κατά μήκος του σύρματος αλλά όχι στα σημεία Α και Β (Σχήμα 43). Εκεί το μαγνητικό πεδίο θα είναι κάθετο ως προς την κατεύθυνση του αντίστοιχου πεδίου που προκαλείται από τους αγωγούς ρεύματος. Συνεπώς, δύο μικροί ελαστικοί παλμοί διαδίδονται κατά μήκος του MDL και λαμβάνονται από το πηνίο λήψης ως δύο διακριτοί παλμοί, ορίζοντας τα δύο άκρα των δίσκων χαλκού.

Με την παρουσία του κινούμενου μόνιμου μαγνήτη, μια ποσότητα μαγνητικής ροής επάγεται σε έναν δεδομένο όγκο του δίσκου. Μία τέτοια μαγνητική ροή αλλάζει τη μαγνητική διαπερατότητα και ως εκ τούτου αλλάζει το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων σε αυτόν τον δεδομένο όγκο, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα ένα διαφορετικού μεγέθους δινορεύμα σε αυτή την περιοχή του δίσκου σε σχέση με το υπόλοιπο σώμα του χαλκού. Η διαφορά αυτή σπάει την συμμετρία του δίσκου και καταστρέφει πλήρως τα δινορεύματα ή τα εξασθενεί σε τέτοιο βαθμό ώστε πλέον δεν μπορεί να παραχθεί παλλόμενο μαγνητικό πεδίο κάθετο στο μήκος του MDL. Έτσι εκεί που αναμενόταν μια παλμική τάση σε καθορισμένο χρόνο καθυστέρησης ανάλογο προς την απόσταση μεταξύ του δίσκου και του πηνίου λήψης, δεν λαμβάνεται κανένας παλμός. Η μετακίνηση της θέσης του μόνιμου μαγνήτη έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του αντίστοιχου δίσκου που αντιστοιχεί και σε αντίστοιχη παλμική έξοδος. Έτσι, από το ποιος παλμός ποια δίσκου καταστρέφεται, εντοπίζεται και ο μόνιμος μαγνήτης. Η απόσταση μεταξύ των δίσκων παίζει καθοριστική σημασία αφού επηρεάζει ευθέως την ακρίβεια με την οποία μπορεί να γίνει ο εντοπισμός. Εφόσον δεν καταστραφεί πλήρως το δινορεύμα και κατ’ επέκταση το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, το πλάτος της ανιχνευόμενης παλμικής τάσης μπορεί επίσης να ενημερώνει για την εγγύτητα του μόνιμου μαγνήτη με το MDL, υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστός ο μόνιμος μαγνήτης και η εξωτερική του κατανομή του πεδίου.

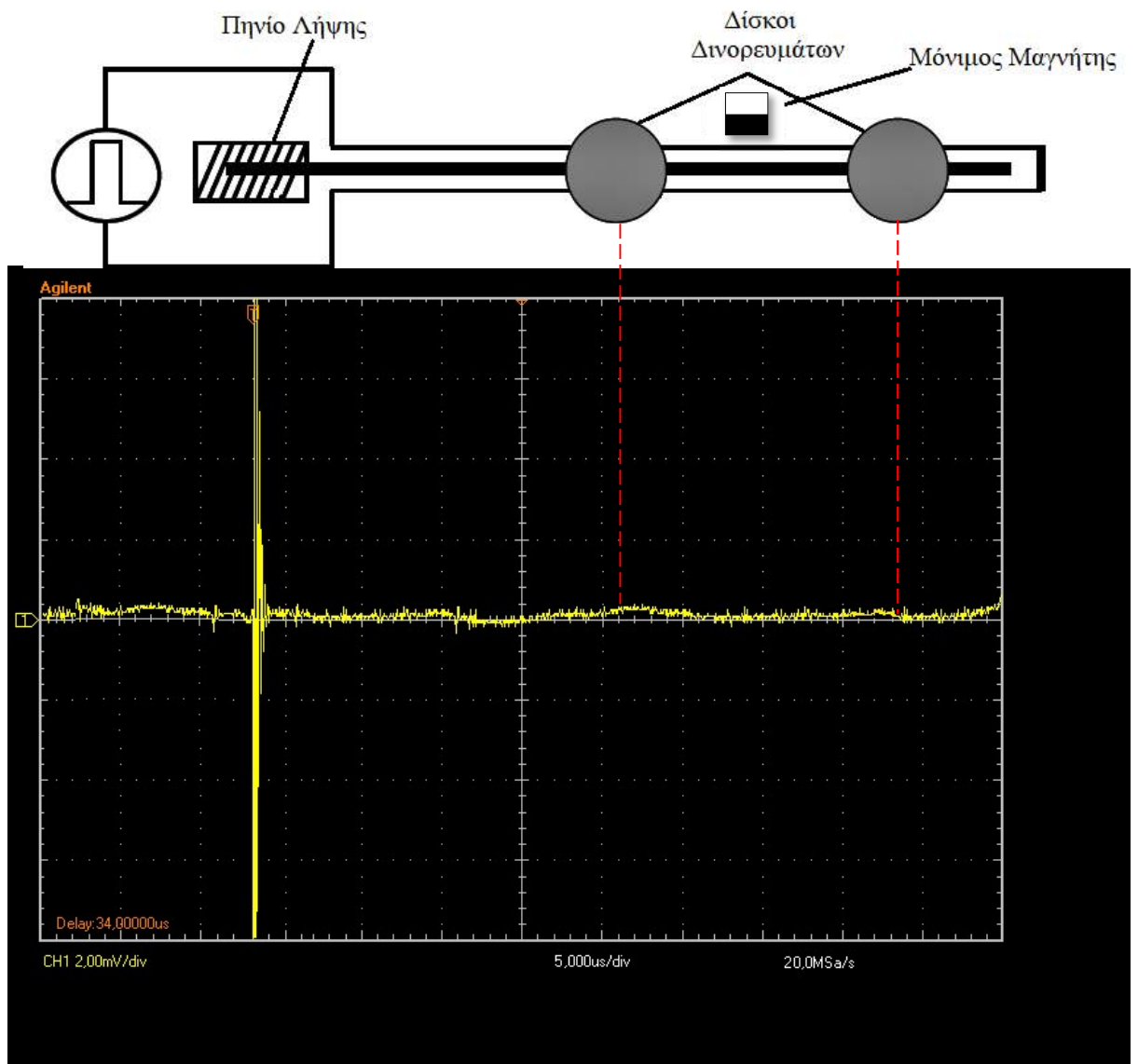
Στο Γράφημα 34 εμφανίζεται η τάση εξόδου από την διάταξη. Ο χρονισμός έχει γίνει στο ίδιο κανάλι με την τροφοδοσία καθώς λόγω του ασθενούς σήματος δεν ήταν εύκολος ο

εντοπισμός του. Παρατηρείται ότι λόγω της εξασθένησης ο δεύτερος παλμός μόλις που διακρίνεται και γι' αυτό επιλέχθηκε να μην παρουσιαστεί ο 3^{ος} ή ο 4^{ος} δίσκος.



Γράφημα 34: Απόκριση της διάταξης αισθητήρα θέσης μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων κατά την απουσία μόνιμου μαγνήτη. Η παραμόρφωση είναι λόγω ατέλειας στην κατασκευή των δισκίων.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε ο μαγνήτης χειροκίνητα στο ενδιάμεσο των δίσκων ώστε να επαληθευτεί η φυσική αρχή λειτουργίας. Η έξοδος του παλμογράφου εμφανίζεται στο Γράφημα 35. Εδώ εμφανίζεται ως πλήρως καταστραμμένο το σήμα εξόδου και έτσι γίνεται αντιληπτή η παρουσία του μόνιμου μαγνήτη. Ποιοτικά η απόδειξη πραγματοποιείται από αυτά τα αποτελέσματα παρόλο που χρειάζεται μια περαιτέρω ανάπτυξη της διάταξης ώστε να μπορούν να παρθούν μια σειρά μετρήσεων ακριβώς όπως στις προηγούμενες διατάξεις.



Γράφημα 35: Απόκριση της διάταξης αισθητήρα θέσης μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων κατά την παρουσία μόνιμου μαγνήτη.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Πλεονεκτήματα

Οι αισθητήρες θέσης που βασίζονται στα μαγνητοσυστολικά υλικά

- έχουν μέρη που δεν καταπονούνται λόγω επαφής,
- η ανάγνωση τους είναι απόλυτη και όχι διαφορική και
- έχουν εξαιρετικά υψηλή διακριτική ικανότητα.

Τα μήκη των αισθητήρων που αυτή τη στιγμή παράγονται για εμπορική χρήση(2019), περιλαμβάνουν ένα εύρος εισόδου που ξεκινά από τα 10 mm μέχρι και άνω των 20 m.

Υπάρχουν διαθέσιμες αναλογικές και ψηφιακές έξοδοι για την ένδειξη της θέσης, της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Οι ανταγωνιστικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν LVDT, επαγωγικούς αισθητήρες, κατανεμημένης εμπέδησης, υπερηχητικούς αισθητήρες και ποτενσιόμετρα.

Η μηδενική μηχανική καταπόνησης λόγω μη επαφής που παρέχει η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων θέσης μαγνητοσυστολής, δίνει τη δυνατότητα στον αισθητήρα να μην φθείρετε με την χρήση. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα έναντι των αισθητήρων τύπου επαφής, όπως είναι το ποτενσιόμετρο. Παραδείγματος χάριν, αν και ορισμένα ποτενσιόμετρα εμφανίζουν μια ζωή λειτουργίας άνω των 50 εκατομμυρίων κύκλων, αυτό μπορεί να ξεπεραστεί σε λίγους μόνο μήνες όταν το σύστημα ευρίσκεται υπό μια συνεχή δόνηση (λόγω της φύσης της εφαρμογής) ή από έναν συνεχή έλεγχο που πραγματοποιεί το σύστημα ελέγχου (dithering). Με συχνότητα δόνησης ή dithering μόνο στα 10 Hz, βρίσκει κανείς:

$$\frac{10\text{κύκλοι}}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{ώρα}} \times 24 \frac{\text{ώρες}}{\text{μέρα}} \times 30 \frac{\text{μέρες}}{\text{μήνα}} = 25 \frac{\text{εκατομμύρια κύκλοι}}{\text{μήνα}} \quad (16)$$

Τυπικά, ένα σύστημα ελέγχου κίνησης θα έχει μερικά σημεία στην ενεργή περιοχή λειτουργίας που χρησιμοποιούνται συχνότερα. Έτσι, σε λίγους μήνες, αυτά τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σημεία μπορούν να διασχίζονται αρκετές φορές και εν τέλει να υπερβαίνουν την ονομαστική διάρκεια ζωής ακόμα πιο σύντομα. Όταν ένα σημείο είναι φθαρμένο σε ένα στοιχείο ποτενσιόμετρου, το αποτέλεσμα είναι να προκύπτει μια περιοχή ασταθών ή ανακριβών ενδείξεων.

Με δεδομένο ότι οι μαγνητοσυστολικοί αισθητήρες θέσης διαβάζουν την θέση ενός μαγνήτη, η απόδοση δεν επηρεάζεται όταν μη μαγνητικά υλικά τοποθετούνται μεταξύ του μαγνήτη θέσης και του κυματοδηγού. Αυτό οδηγεί σε εφαρμογές που τοποθετούν το μαγνήτη

θέσης να βρίσκεται στο εξωτερικό ενός περιβλήματος ή άλλου λειτουργικού μέλους και του κυματοδηγού στο εσωτερικό (όπως σε ένα υδραυλικό έμβολο). Για παράδειγμα, τα μη μαγνητικά υλικά μπορεί να είναι αλουμίνιο, πλαστικό, μερικοί ανοξείδωτοι χάλυβες και άλλοι. Φυσικά δείξαμε ότι μπορούμε μέσω του αισθητήρα μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων αυτό να το επεκτείνουμε και να το εκμεταλλευτούμε με ακόμα πιο έντονο τρόπο αφού σαν μελλοντικό στόχο η διατάξεις αυτές έχουν να χρησιμοποιηθούν χωρίς καν έναν μαγνήτη θέσης αλλά με την παρουσία του ίδιου του μαγνητικού υλικού που θέλουμε να εντοπίσουμε.

Η απόλυτη μέτρηση που παρέχουν οι αισθητήρες θέσης με βάση τη μαγνητοσυστολή προσφέρει ένα πλεονέκτημα έναντι των μετρήσεων της σχετικής ή διαφορικής μετατόπισης μαγνητικών ή οπτικών γραμμικών αισθητήρων, κωδικοποιητών κλπ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας απόλυτος αισθητήρας θέσης μετρά την απόσταση μεταξύ ενός σταθερού στοιχείου και του σημείου ενδιαφέροντος, ενώ ένας αισθητήρας μετατόπισης μετρά την απόσταση μεταξύ ενός προηγούμενου σημείου μέτρησης και του τρέχοντος σημείου ενδιαφέροντος. Ένας αισθητήρας σχετικής μετατόπισης (όπως ένας incremental encoder) μετρά τον αριθμό των μετατοπίσεων που έχουν συσσωρευτεί από την τελευταία επαναφορά του μετρητή. Το μέγεθος της μετατόπισης καθορίζει την ανάλυση της μέτρησης. Εάν η προηγούμενη θέση ή η μέτρηση έχει ξεχαστεί (π.χ. λόγω διακοπής ρεύματος ή μηχανικής ή ηλεκτρικής βλάβης), τότε ο αισθητήρας μετατόπισης πρέπει να επαναφέρεται στο μηδέν ή σε μια γνωστή θέση.

Δεδομένου ότι η πραγματική μέτρηση ενός μαγνητοσυστολικού αισθητήρα θέσης παρουσιάζεται ως η μεταβολή στην χρονική περίοδο που κάνει ο παλμός να φτάσει, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ψηφιακά κυκλώματα για όλες τις ηλεκτρονικές λειτουργίες μετά την ανίχνευση του παλμού λήψης. Η ηχητική ταχύτητα του κύματος στον κυματοδηγό δεν μεταβάλλεται αισθητά με τη θερμοκρασία ή με το χρόνο. έτσι η έξοδος σε σχέση με την θέση να είναι εξαιρετικά σταθερή.

Η χρονική περίοδος που αντιπροσωπεύει και τη μετρούμενη θέση είναι αναλογικό μέγεθος με άπειρη ανάλυση παρόλο που εν τέλει χρησιμοποιείται ο χρονοσκόπος των ψηφιακών παλμών για να την υποδείξει. Άρα η ανάλυση της εξόδου σήματος εξαρτάται ουσιαστικά μόνο από την ανάλυση του κυκλώματος χρονοσκόπου και από την ικανότητά του να εντοπίζει το σήμα εξαλείφοντας κάθε θόρυβο που μπορεί να προκύπτει. Ορισμένοι βιομηχανικοί αισθητήρες έχουν διακριτική ικανότητα που φτάνει το 1μm. Ο Πίνακας 8 συγκρίνει με ποιοτική προσέγγιση ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των μαγνητοσυστολικών αισθητήρων θέσης με άλλες τεχνολογίες.

Πίνακας 8: Σύγκριση Μαγνητοσυστολικών αισθητήρων θέσης με άλλες τεχνολογίες αισθητήρων θέσης βασισμένο σε πειραματικές παρατηρήσεις και [55].

Τεχνολογία	Διακριτική Ικανότητα	Μη Γραμμικότητα	Εύρος	Στιβαρότητα	Κόστος
Αντίστασης	Μέση	Μέση	10mm-0,5m	Μέση	Χαμηλό
Επέκτασης καλωδίου (CET)	Χαμηλή	Υψηλή	50mm-45m	Μέση	Χαμηλό
Χωρητικότητας	Χαμηλή-Υψηλή	Μέση-Υψηλή	1-50mm	Μέση	Μέσο
Επαγωγής	Μέση	Μέση	2mm-0.5m	Υψηλή	Μέσο
LVDT	Υψηλή	Μέση	2mm-0.2m	Υψηλή	Υψηλό
Hall	Μέση	Μέση-Υψηλή	1-50mm	Μέση-Υψηλή	Χαμηλό
Τριγωνομέτρηση με υπέρυθρες	Χαμηλή	Χαμηλή	1-50mm	Μέση	Μέσο
MDL	Υψηλή	Χαμηλή	10mm-20m	Μέση	Μέσο

7.2 Μελλοντική δουλειά

7.2.1 Αισθητήρας θέσης μαγνητοσυστολής-δινορευμάτων

Ο αισθητήρας θέσης με βάση τον συνδυασμό MDL με δινορεύματα, ο οποίος έχει αναπτυχθεί παλιότερα από τον κ. Χριστοφόρου και πλέον ως τεχνογνωσία υπάρχει στο εργαστήριο Αισθητήρων της σχολής HMMY, έχει αποδειχθεί ότι φτάνει στα 25μm αβεβαιότητα με υλικό πυρήνα FeSiB.

Η βελτίωση της διάταξης στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στον σχεδιασμό της κατασκευής του υλικού πακεταρίσματος αλλά και της επαναληψιμότητας της διέγερσης μέσω του κυκλώματος διέγερσης.

Μελλοντικές δυνατότητες:

- Να καλυφθεί η πακεταρισμένη διάταξη με μια πλαστική επιφάνεια (1μm) που στην άκρη του θα προσαρτιέται με εποξική ρητίνη ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις πεδίου. Αυτό θα προσφέρει ένα ανάλογο του πιθανού τελικού αισθητήρα αλλά σε εργαστηριακό πρωτότυπο. Η τελική βιομηχανική παραγωγή έχει εξηγηθεί και σε δημοσιεύσεις και θα πρέπει να παραχθεί με PCB και Pick&Place μηχανήματα [56].

- Να γίνει χρήση της οπτικής τράπεζας και της διάταξης Οπτικής Συμβολομετρίας για μέτρηση αποστάσεων με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει τα 100 nm. Με αυτό το τρόπο θα καθοριστεί πλήρως η ευαισθησία των διατάξεων MDL και θα μπορούν να βαθμονομούνται από μια σταθερή διάταξη πριν βγουν στο πεδίο .
- Για την μετακίνηση του στοιχείου θέσης δύναται να χρησιμοποιηθεί σερβοκινητήρας (δηλαδή encoder) ή βηματικό μοτέρ με ακρίβεια που φτάνει τα 100μm.
- Εφαρμογή ανοπτημένων άμορφων συρμάτων επικαλυμμένων με γυαλί. Αφαιρώντας το γυαλί και με κατάλληλη επεξεργασία μειώνεται σημαντικά ο συντελεστής εξασθένησης του κύματος και δρα το σύρμα ως κυματοδηγός για πολλά μέτρα [31] ώστε να εφαρμοστεί η διάταξη για μεγάλες αποστάσεις.

7.2.2 Βελτιώσεις των MDL

Επιπλέον τεχνικές μπορούν να δοκιμαστούν για την βελτίωση τόσο των μηχανικών ιδιοτήτων όσο και των πρακτικών συνθηκών για την παραγωγή αισθητήρων σε βιομηχανική κλίμακα.

Μια προτεινόμενη λύση για το υλικό πακεταρίσματος ενός οποιουδήποτε MDL είναι οι οπτικές ίνες. Με την βοήθεια λιπαντικού και την επιλογή οπτικής ίνας εσωτερικής διαμέτρου 125μm, δύναται να εισχωρήσει ένα μαγνητοσυστολικό σύρμα αντίστοιχης διαμέτρου και μάλιστα χωρίς την εισαγωγή παραμορφώσεων στη κάθετη διεύθυνση του. Επιπλέον οποιοδήποτε πηνίο (είτε λήψης είτε διέγερσης) μπορεί να στερεωθεί στην περίμετρο της οπτικής ίνας. Αυτό θα προσφέρει μια έτοιμη λύση για το πακετάρισμα των MDL και θα ξεπεράσει την πολύ φθηνή και γρήγορη παραγωγή υλικού πακεταρίσματος μέσω μητρών ή την εξώθηση πλαστικών.

7.3 Κατακλείδα

Οι αισθητήρες θέσης-μετατόπισης καταλαμβάνουν για το 2019 πάνω από 2,7 δις\$ στην παγκόσμια αγορά χωρίς φυσικά να καταμετράται το πόσο επηρεάζουν την συνολική ανάπτυξη της τεχνολογίας. Όμως η εφαρμογή των μαγνητοσυστολικών υλικών είναι ευρεία με ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες εφαρμογής σε μια πληθώρα αισθητήρων, από την ιατρική (αισθητήρες αίματος) ως τον μη καταστροφικό έλεγχο κατασκευών. Μέσω της παρούσας εργασίας συμπεραίνεται ότι τα MDL είναι μια κατηγορία αισθητήρων που μπορούν να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις μετρήσεις φυσικών μεγεθών εφόσον τα πειράματα

σχεδιάστηκαν εξ ολοκλήρου στο εργαστήριο αισθητήρων του ΕΜΠ χωρίς την χρήση βιομηχανικών ή άλλων εργαστηριακών αισθητήρων και εξαρτημάτων. Η επιλογή της χρήσης των μαγνητοσυστολικών συρμάτων για μαζική παραγωγή αισθητήρων ενισχύεται από την εντελώς φθηνή μέθοδο παρασκευής τους και την πλήρη κατανόησή τους από την επιστημονική κοινότητα. Οι αισθητήρες που προκύπτουν είναι εξαιρετικής τεχνολογίας. Αποδεικνύεται ότι πλέον υπάρχει η τεχνογνωσία για ακόμα πιο φθηνή και εξίσου μεγάλης ακρίβειας κατασκευή αισθητήρων που χρησιμοποιούν την φυσική αρχή λειτουργίας της μαγνητοσυστολής. Η αύξηση της ανάγκης για ακόμα περισσότερους αισθητήρες, τόσο σε ποικιλία εφαρμογών όσο και σε ποσότητα αναδεικνύουν τα MDL ως μια πιθανή μελλοντικά κυρίαρχη τεχνολογία.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*, 2002.
- [2] Daughton, «GMR applications,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 334-342, 15 February 1999.
- [3] K. Mohri, K. Bushida, M. Noda, H. Yoshida, L. Panina και T. Uchiyama, «Magneto-Impedance Element,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 31, αρ. 4, pp. 2455-2460, July 1995.
- [4] E. D. T. d. Lacheisserie, *Magnetostriction: Theory and Applications of Magnetoelasticity*, Boca Raton : CRC Press, 1993.
- [5] J. J. D, *Electricity and Magnetism*, New York: Wiley, 1965.
- [6] J. Lenz και A. Edelstein, «Magnetic sensors and their applications,» *IEEE Sensors Journal*, τόμ. 6, αρ. 3, pp. 631-649, June 2006.
- [7] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, London: Chapman and Hall, 1991.
- [8] A.P.Thomas, M.R.J.Gibbs, J.H.Vincent και S.J.Ritchie, «Technical magnetostriction parameters for application of metallic glasses,» *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, τόμ. 27, pp. 5247-5249 , 1991.
- [9] O. R. C, *Modern Magnetic Materials*, New York: Wiley, 1999.
- [10] J. Hayes, L. Stone, H. Snelling, A. Jenner και R. Greenough, «Magnetic and magnetoelastic properties of thin films by pulsed laser deposition,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 33, αρ. 5, pp. 3613-3615, 1997.
- [11] A. Bieńkowski, «Magnetoelastic Villari effect in Mn-Zn ferrites,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 215, αρ. 2, pp. 231-233, 2000.
- [12] T. König, T. Greiner, A. Zern, Z. Kántor, A. Szabó και A. Hetznecker, «Using Eddy Currents Within Magnetostrictive Position Sensors for Velocity Estimation,» *IEEE SENSORS JOURNAL*, τόμ. 19, αρ. 15, pp. 6325-6334, 1 August 2019.
- [13] L. R. Moskowitz, *Permanent magnet design and application handbook*, Malabar, FL: Krieger Publishing, 1986.
- [14] R. Hoadley, «Magnet Man,» 26 February 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.coolmagnetman.com/maggallery.htm>. [Πρόσβαση 28 November 2019].

- [15] M. B, Solenoid magnet design, New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [16] A. Arora, Optical and electric field control of magnetism, Berlin: Helmholtz-Zentrum Berlin, January 2018.
- [17] J. J.P., Magnetism and Magnetic Materials, London: The Institute of Metals, 1987.
- [18] T.-A. O. S.-G. M. a. V. N. Horia Chiriac, «Magnetic Anisotropy in FeSiB Amorphous Glass-Covered Wires,» *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, τόμ. 32, αρ. 5, pp. 4755-4757, 1996.
- [19] B. D. Cullity, «FUNDAMENTALS OF MAGNETOSTRICTION,» *JOURNAL OF METALS*, pp. 35-41, 1971.
- [20] k. Mohri, F. Humphrey, K. Kawashima, K. Kimura και M. Mizutani, «LARGE BARKHAUSEN AND MATTEUCCI EFFECTS IN FeCoSiB, FeCrSiB, AND FeNiSiB,» *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, τόμ. 26, αρ. 5, pp. 1789-1791, SEPTEMBER 1990.
- [21] S. Atalay, Magnetoelastic properties of iron-based amorphous wires, University of Bath, 1992.
- [22] J. M. D. COEY, Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [23] I. S. Board, «IEEE Standard on Magnetostrictive Materials: Piezomagnetic Nomenclature,» *IEEE Standard*, 1991.
- [24] J. Ryu, S. Priya, K. Uchino και H.-E. Kim, «Magnetolectric effect in composites of magnetostrictive and piezoelectric materials,» *Journal of Electroceramics*, τόμ. 8, αρ. 2, pp. 107-119, 2002.
- [25] K. Overshott, «Rapidly cooled materials,» *Institute of Physics Conference Series*, τόμ. 89, αρ. 6, p. 189, 1987.
- [26] R. C. O'Handley, «Physics of ferromagnetic amorphous alloys,» *Journal of Applied Physics*, τόμ. 62, pp. R15-R49, 1987.
- [27] J. Graczyk, «Structure of agron sputtered Gd-Co and Gd-Co-Mo amorphous thin films,» *Journal of Applied Physics*, 1978.
- [28] I. Mat'ko, E. Illeková, P. Švec και P. Duhaj, «Crystallization characteristics in the Fe-Si-B glassy ribbon system,» *Materials Science and Engineering A*, τόμ. 225, αρ. 1-2, pp. 145-152, 1997.

- [29] A. Inoue, H. Tomioka, M. Higawara και T. Masumoto, «FABRICATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF NONEQUILIBRIUM ORDERED AUSTENITE WIRES OF Fe EN DASH Mn EN DASH Al EN DASH C SYSTEM BY IN-ROTATING-WATER SPINNING METHOD.,» *Transactions of the Japan Institute of Metals*, τόμ. 23, αρ. 6, pp. 341-348, 1982.
- [30] J. Gonzalez, M. Vazquez, J. Barandiaran και A. Hernando, «Effects of current annealing on the hysteresis loop of amorphous alloys,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988.
- [31] E. Hristoforou, «Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications,» *Measurement Science and Technology*, τόμ. 14, αρ. 2, pp. R15-R47, February 2003.
- [32] E. Herceg, Handbook of Measurement and Control, Schaevitz Engineering, 1976.
- [33] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors, New York: Springer-Verlag, 2010.
- [34] F. Luborsky, J. Becker και R. McCary, «Magnetic Annealing of Amorphous Alloys,» *IEEE Transactions on Magnetics*, τόμ. 11, αρ. 6, pp. 1644-1649, 1975.
- [35] J. Gonzalez, M. Vazquez , J. Barandiaran και A. Hernado, «Effects of current annealing on the hysteresis loop of amorphous alloys,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, τόμ. 21, 1988.
- [36] K. Mohri, «REVIEW ON RECENT ADVANCES IN THE FIELD OF AMORPHOUS-METAL SENSORS AND TRANSDUCERS.,» *IEEE Transactions on Magnetics*, Τόμ. 1 από 2MAG-20, αρ. 5, 1984.
- [37] M. Gibbs και P. Squire, «Applications,» *Sensors, A Comprehensive Survey, Magnetic Sensors*, τόμ. 5, pp. 447-476, 27 December 1989.
- [38] R. Boll, «Introduction,» *Sensors, A Comprehensive Survey*, τόμ. 5, p. 3, 1989.
- [39] S. Atalay, V. Kolat, N. Bayri και T. Izgli, «Magnetoelastic Sensor Studies on Amorphous Magnetic FeSiB Wire and the Application in Viscosity Measurement,» *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2016.
- [40] M. Hagiwara, A. Inoue και T. Masumoto, «Mechanical properties of Fe-Si-B amorphous wires produced by in-rotating-water spinning method,» *Metallurgical Transactions A*, τόμ. 13, αρ. 3, pp. 373-382, 1982.

- [41] A. Inoue, M. Hagiwara και T. Masumoto, «Production of Fe-P-C amorphous wires by in-rotating-water spinning method and mechanical properties of the wires,» *Journal of Materials Science*, τόμ. 17, pp. 580-588, 1982.
- [42] H. Chiriac και T. Óvári, «Amorphous glass-covered magnetic wires: Preparation, properties, applications,» *Progress in Materials Science*, τόμ. 40, αρ. 5, pp. 333-407, 1996.
- [43] H. Chen, R. Sherwood, s. Jin, G. Chi, A. Inoue, T. Masumoto και H. Hagiwara, «Mechanical properties and magnetic behaviour of deformed metal glass wires,» *Journal of Applied Physics*, τόμ. 55, 1984.
- [44] P. Ochin, A. Dezellus, P. Plaindoux, J. Pons, P. Vermaut, R. Portier και E. Cesari, «Shape memory thin round wires produced by the in rotating water melt-spinning technique,» *Acta Materialia*, τόμ. 54, αρ. 7, pp. 1877-1885, 2006.
- [45] A. Chiba, N. Nomura και Y. Ono, «Microstructure and mechanical properties of biomedical Co-29Cr-8Mo alloy wire fabricated by a modified melt-spinning process,» *Acta Materialia*, τόμ. 55, αρ. 6, pp. 2119-2128, 2007.
- [46] N. Giordano, «Evolution of music wire and its Impact on the development of the piano,» σε *161st Meeting Acoustical Society of America 2011*, Seattle, WA; United States, 2011.
- [47] A. Inoue, T. Masumoto, A. Katsuya και K. Amiya, «Preparation of Amorphous Fe-Si-B and Co-Si-B Alloy Wires by a Melt Extraction Method and Their Mechanical and Magnetic Properties,» *Materials Transactions, JIM*, τόμ. 36, αρ. 7, pp. 802-809, 1995.
- [48] A. Mitra και M. Vázquez, «Comparative study of stress-dependent magnetic properties of ribbon and wire-shaped amorphous Fe₈₁B_{13.5}Si_{3.5}C₂ alloy,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 87, αρ. 1-2, pp. 130-134, 1990.
- [49] J. Yamasaki, «Magnetic properties of Fe-Co based amorphous wires,» σε *Satellite Symposium on Amorphous Magnetic Wires*, London, 1990.
- [50] A. Mitra, K. Mandal και S. Ghatak, «DC magnetic properties of as-quenched and flash-annealed amorphous Fe-Si-B wires,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 110, αρ. 1-2, pp. 135-138, 1992.
- [51] Y. Yamasaki, F. Humphrey, K. Mohri, H. Kawamura, H. Takamura και R. Mälmhäll, «Large Barkhausen discontinuities in Co-based amorphous wires with negative magnetostriction,» *Journal of Applied Physics*, τόμ. 63, αρ. 8, pp. 3949-3951, 1988.

- [52] M. Wun-Fogle, H. Savage και M. Spano, «Enhancement of magnetostrictive effects for sensor applications,» *Journal of Materials Engineering*, τόμ. 11, αρ. 1, pp. 103-107, 1989.
- [53] K. Kakuno, T. Itabashi και T. Yamada, «Generation and Propagation of Magnetoelastic Wave in Amorphous Wire,» *IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan*, τόμ. 2, αρ. 8, pp. 759-760, 1987.
- [54] H. Chiriac, E. Hristoforou, M. Neagu, I. Darie και A. Eugenia Moga, «Sound velocity in Fe-rich glass covered amorphous wires,» *Journal of Non-Crystalline Solids*, τόμ. 287, αρ. 1-3, pp. 413-416, 2001.
- [55] M. S. Corporation, «Magnetostrictive Linear-Position Sensors». USA Ευρεσιτεχνία 5,545,984, 2006.
- [56] E. Hristoforou, *Magnetostrictive Delay Lines: Arrangements, Properties, Materials & Sensing Applications*, Athens, 2006.
- [57] E. Hristoforou, «New Moving Magnet Position Sensor». Greek/European Patent Ευρεσιτεχνία 1005178, 2005.
- [58] K. Hashimoto και T. Masumoto, «Corrosion properties of amorphous alloys,» σε *Glassy Metals: Magnetic, Chemical and Structural Properties*, Morristown, New Jersey: CRC Press, 2018, pp. 235-262.
- [59] A. Mitra, A. Hernando, G. Rivero και M. Vazquez, «SUSCEPTIBILITY AND COERCIVITY OF AMORPHOUS WIRES,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 83, pp. 339-340, 1990.
- [60] P. Corte-Leon, V. Zhukova, M. Ipatov, J. Blanco, J. Gonzales, M. Churyukanova, J. Baraibar, S. Taskaev και A. Zhukov, «Stress dependence of the magnetic properties of glass-coated amorphous microwires,» *Journal of Alloys and Compounds*, τόμ. 789, pp. 201-208, 2019.
- [61] NIST, «National Institute of Standards and Technology,» National Institute of Standards and Technology, 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.nist.gov/system/files/documents/pml/electromagnetics/magnetics/magnetic_units.pdf.