



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Διατάξεις αισθητήρων θέσης βασισμένες σε μαγνητοσυστολικές
γραμμές καθυστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κορδαλής Χρήστος

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ,
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διατάξεις αισθητήρων θέσης βασισμένες σε μαγνητοσυστολικές
γραμμές καθυστέρησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Κορδαλής

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2018

.....
Ε. Χριστοφόρου
Καθηγητής

.....
Π. Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος, 2018

.....

Χρήστος Δ. Κορδαλής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Κορδαλής Χρήστος, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Οι αισθητήρες και μετατροπείς παρουσιάζουν ολοένα μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της σημασίας τους σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. Η συνεχής ανάγκη για μεγαλύτερη ευαισθησία, μικρότερη αβεβαιότητα και κόστος, οδηγούν στην ανάπτυξη νέων υλικών και αποτελεσματικότερων διατάξεων. Οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Lines - MDL) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται μέτρηση θέσης-μετατόπισης, μηχανικής τάσης ή μαγνητικού πεδίου προσφέροντας ακριβείς μετρήσεις με σχετικά χαμηλό κόστος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η απαραίτητη θεωρία των μαγνητικών υλικών, για την επεξήγηση της μαγνητοσυστολής και τη δημιουργία των ελαστικών παλμών, απαραίτητων για την τεχνική MDL.

Στη συνέχεια, αφιερώνεται ένα μέρος στα κυκλώματα διέγερσης και λήψης που κατασκευάστηκαν, ώστε να μελετηθεί στην πράξη η λειτουργία τέτοιων διατάξεων. Μελετούνται πειραματικά οι ιδιότητες των MDL στη βασική διάταξη με στόχο να καθοριστεί με ποιό τρόπο επηρεάζουν τις σχεδιαστικές επιλογές του κατασκευαστή. Τέλος, υλοποιούνται και συγκρίνονται δυο αισθητήριες διατάξεις για τον εντοπισμό της θέσης μαγνήτη και σχεδιάζονται τα διαγράμματα απόκρισής τους.

Λέξεις-κλειδιά: Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, μαγνητικοί αισθητήρες, άμορφα μαγνητικά υλικά, κυματοδηγός, εντοπισμός θέσης

Abstract

Sensors and actuators are of great interest because of their importance in many technological applications. The constant need for greater sensitivity, lower uncertainty and cost leads to the development of new materials and more effective setups. The magnetostrictive delay lines (MDL) are used in applications for measuring position-displacement, mechanical stress or magnetic field, offering relatively low cost.

In this diploma thesis the necessary theory of magnetic materials is presented, in order to explain the magnetostriction effect and the creation of elastic pulses, required in the MDL technique.

Furthermore, a substantial part is dedicated to the electronic circuitry for the excitation and detection that has been developed, so a practical study of MDL setups could be accomplished. The properties of MDL are experimented on, in order to determine in what fashion they affect the designing choices of the manufacturer. Finally, two setups measuring a magnet's position are being presented and compared based on their respective response graphs.

Keywords: Magnetostrictive delay lines, magnetic sensors, amorphous magnetic materials, waveguide, position tracking

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Χριστοφόρου για την ευκαιρία που μου έδωσε, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, που μάλιστα αποτελεί ένα από τα κύρια αντικείμενα έρευνας του. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσαραμπάρη για τις διορθώσεις του επί του κειμένου της εργασίας.

Επίσης οφείλω ευχαριστίες στον υπεύθυνο μου, υποψήφιο διδάκτορα Α.Χοτζόγλου για την άψογη συνεργασία μας, καθώς και στον υποψήφιο διδάκτορα Σ.Αγγελόπουλο για την βοήθεια του σε όλα τα τεχνικά θέματα που προέκυψαν.

Φυσικά, το μεγαλύτερο ευχαριστώ πάει στην οικογένεια μου, που έχει σταθεί δίπλα μου, προσφέροντας μου τα πάντα σε όλο το διάστημα των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους στενούς μου φίλους για την συνεχή στήριξη τους και την οικογένεια Ηλιάκη για την μεγάλη διευκόλυνση που μου έκαναν και για την οποία τους είμαι υπόχρεος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αισθητήρες και μετατροπείς - Ορισμός	1
1.2 Ταξινόμηση αισθητήρων	2
1.3 Μαγνητικοί αισθητήρες	2
1.4 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης	3
1.5 Στόχος της εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗ	5
2.1 Μαγνητοσυστολή	5
2.2 Μαγνητικές περιοχές	6
2.3 Δημιουργία μαγνητικών περιοχών	8
2.4 Μηχανισμοί των μαγνητικών περιοχών	9
2.4.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων	9
2.4.2 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών	11
2.5 Άμορφα Υλικά	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (MDL)	15
3.1 Βασική διάταξη MDL	15
3.2 Περιγραφή λειτουργίας της βασικής διάταξης	16
3.3 Μοντελοποίηση της βασικής διάταξης MDL	19
3.4 Ιδιότητες των MDL	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ MDL	25
4.1 Απαιτήσεις κυκλωμάτων διέγερσης	26
4.2 Παρουσίαση κυκλώματος διέγερσης A	26
4.3 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης A	28
4.3.1 Ταλαντωτής 555	28
4.3.2 MOSFET driver IR4426	30
4.3.3 Διακοπτικό κύκλωμα	31
4.4 Παρουσίαση κυκλώματος διέγερσης B	33
4.5 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης B	34
4.6 Κατασκευή κυκλωμάτων διέγερσης	34
4.7 Απαιτήσεις κυκλώματος ενίσχυσης	37

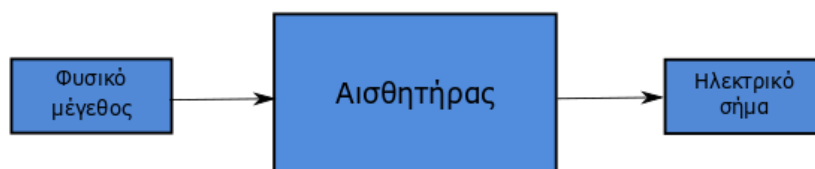
4.8 Παρουσίαση κυκλώματος ενίσχυσης.....	38
4.9 Κατασκευή κυκλώματος ενίσχυσης	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΗ ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ MDL.....	41
5.1 Κατασκευή της βασικής διάταξης	41
5.2 Λειτουργίας βασικής διάταξης MDL	42
5.3 Σχέση πρώτης παραγώγου λήψης-διέγερσης	46
5.4 Καμπύλη ομοιομορφίας.....	48
5.5 Ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού	50
5.6 Μαγνητικό πεδίο πόλωσης (Bias field effect).....	52
5.7 Χρόνος διέγερσης-μήκος του ελαστικού παλμού	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ	59
6.1 Περιγραφή διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων	59
6.2 Κατασκευή διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων	60
6.3 Μετρήσεις στη διάταξη πολλαπλών διεγέρσεων.....	62
6.4 Διάγραμμα απόκρισης διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΛΗΨΕΩΝ	71
7.1 Περιγραφή και κατασκευή διάταξης πολλαπλών λήψεων	71
7.2 Μετρήσεις στη διάταξη πολλαπλών λήψεων	72
7.3 Διάγραμμα απόκρισης διάταξης πολλαπλών λήψεων	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	81
8.1 Σύγκριση των δυο διατάξεων.....	81
8.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο, που αποτελεί και την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, θα δοθεί ένας σύντομος ορισμός των εννοιών αισθητήρας και μετατροπέας και στη συνέχεια θα γίνει ταξινόμηση τους, όπως αυτή βρίσκεται στη βιβλιογραφία. Θα εστιάσουμε κυρίως στους μαγνητικούς αισθητήρες και τα φαινόμενα που αυτοί αξιοποιούν και θα αναφερθούμε στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. Τέλος θα παρουσιαστεί ο στόχος της παρούσας εργασίας.

1.1 Αισθητήρες και μετατροπείς - Ορισμός

Ο αισθητήρας είναι μια διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους. Μετατρέπει το φυσικό μέγεθος που μετράται συνήθως σε ηλεκτρικό σήμα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Το ηλεκτρικό σήμα εξόδου ενός αισθητήρα είναι είτε τάση, είτε ρεύμα.



Σχήμα 1.1 Σχηματική διάταξη αισθητήρα

Ο μετατροπέας από την άλλη, είναι μια διάταξη που απορροφά ενέργεια από ένα σύστημα και την μετατρέπει σε ενέργεια άλλης μορφής. Στα συστήματα μετρήσεων χρησιμοποιούνται εκείνοι οι μετατροπείς, που μετατρέπουν ενέργεια άλλης μορφής σε ηλεκτρική και έτσι επιτρέπουν τη μέτρηση ενός μη ηλεκτρικού μεγέθους. Για το

λόγο αυτό, οι όροι μετατροπέας και αισθητήρας χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία έχοντας την ίδια σημασία.

Ένας αισθητήρας είναι συνήθως μετατροπέας, αλλά όλοι οι μετατροπείς δεν είναι αισθητήρες. Για παράδειγμα μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος είναι μετατροπέας διότι μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, αλλά δεν είναι αισθητήρας διότι δεν χρησιμοποιείται για κάποια μέτρηση. Αν όμως χρησιμοποιηθεί σε ένα κύκλωμα για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής ενός άξονα τότε ονομάζεται και αισθητήρας [1].

1.2 Ταξινόμηση αισθητήρων

Οι αισθητήρες, στην βιβλιογραφία [2], ταξινομούνται με διάφορους τρόπους. Μπορούν να χωριστούν με βάση το αντικείμενο της μέτρησης, σε φυσικούς και χημικούς, με βάση το φυσικό φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η αρχή λειτουργίας τους, σε αγώγιμους, ημιαγώγιμους, διηλεκτρικούς, μαγνητικούς ή υπεραγώγιμους. Ακόμα μπορούν να διαιρεθούν με βάση το πεδίο εφαρμογής τους, στη βιομηχανία, στις μεταφορές, στην αυτοκίνηση, στην ιατρική, στην περιβαλλοντολογία, στο στρατό κλπ. Τέλος μπορούν να χωριστούν σε ενεργούς και παθητικούς ανάλογα με την ανάγκη τους για διέγερση ή τροφοδοσία, ώστε να δίνουν απόκριση στην έξοδό τους.

1.3 Μαγνητικοί αισθητήρες

Επικεντρώνοντας λοιπόν στους μαγνητικούς αισθητήρες, οι οποίοι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις φυσικές μετρήσεις και βρίσκουν πολύ συχνή χρήση στη σύγχρονη τεχνολογία, αφού χρησιμοποιούνται σε όλων των ειδών τις εφαρμογές. Τα κυριότερα μαγνητικά φαινόμενα που χρησιμοποιούνται είναι αυτά της μαγνητοαντίστασης (MR), της μαγνητοεμπέδησης (MI), της μαγνητοσυστολής, της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής καθώς και του φαινομένου Hall.

Τα αισθητήρια στοιχεία σχεδιάζονται με σκοπό να εκμεταλλευτούν τους μηχανισμούς των μαγνητικών περιοχών (magnetic domains) στα μαγνητικά υλικά. Οι δυο κύριοι αυτοί μηχανισμοί είναι η διάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, καθώς και άλλα φαινόμενα εξαρτημένα από τους δύο παραπάνω, σε μικροσκοπική ή μακροσκοπική κλίμακα [3].

1.4 Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης

Όπως μαρτυρά η ονομασία του, ένας αισθητήρας βασισμένος στη τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (Magnetostrictive Delay Lines), βασίζεται στο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο και κυρίως, στο δεύτερο εκ των μηχανισμών που προαναφέρθηκαν, αυτόν της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Με βάση την παραπάνω ταξινόμηση, αποτελεί έναν φυσικό, μαγνητικό, ενεργό αισθητήρα με μεγάλο εύρος εφαρμογών κυρίως στην βιομηχανία και αυτοκίνηση. Τα φυσικά μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν με αυτή τη μέθοδο περιλαμβάνουν: τη θέση-μετατόπιση, τη μηχανική τάση και το μαγνητικό πεδίο. Τέτοιου είδους αισθητήρες, παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα σε επίπεδο ευαισθησίας και αβεβαιότητας με μικρό κόστος, πράγμα που τους καθιστά πολύ ελκυστικούς σε πληθώρα εφαρμογών.

1.5 Στόχος της εργασίας

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, γίνεται θεωρητική μελέτη των βασικών μηχανισμών των μαγνητικών περιοχών, ώστε να κατανοηθεί η φυσική αρχή πίσω από τη λειτουργία των MDL.

Υλοποιείται μια βασική διάταξη, με σκοπό, να μελετηθούν οι ιδιότητες των MDL και να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο πρακτικά αυτές οι ιδιότητες χρησιμεύουν ή περιορίζουν στην ανάπτυξη ενός αισθητήρα μέτρησης θέσης.

Τέλος με τα συμπεράσματα που προκύπτουν υλοποιούνται και συγκρίνονται δύο διατάξεις εντοπισμού μαγνήτη και πραγματοποιούνται μετρήσεις πάνω σε αυτές, ώστε να σχεδιαστούν τα διαγράμματα απόκρισης των διατάξεων αισθητήρων.

Σε αυτό σημείο πρέπει να αναφερθεί πως το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας είναι κατασκευαστικό. Συγκεκριμένα, όλα τα απαραίτητα για τις διατάξεις στοιχεία, πέραν του άμορφου πυρήνα, κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήριων του ΕΜΠ και περιλαμβάνουν την κατασκευή κυκλωμάτων διέγερσης και κυκλωμάτων λήψης, κατασκευή των μέσων διέγερσης και λήψης αλλά και κατασκευή της φυσικής διάταξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα μελετηθεί η έννοια της μαγνητοσυστολής, η οποία συνδέεται στενά με τους μηχανισμούς των μαγνητικών περιοχών μέσα στα υλικά. Ακόμα θα γίνει αναφορά στα άμορφα υλικά, που παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, κατάλληλα για εφαρμογές αισθητήρων.

2.1 Μαγνητοσυστολή

Μια απλή περιγραφή της μαγνητοσυστολής είναι η ακόλουθη: εφαρμόζοντας μαγνητικό πεδίο σε ένα μαγνητοσυστολικό υλικό, παράλληλα σε μια διεύθυνση, παρατηρείται μεταβολή στις φυσικές του διαστάσεις, συστολή ή διαστολή κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης και αντίστοιχα διαστολή ή συστολή κατά την κάθετη διεύθυνση. Αντίστροφα εφαρμόζοντας μηχανική τάση και παραμορφώνοντας ελαστικά το υλικό κατά μια διεύθυνση, προκαλείται μαγνητικό πεδίο.

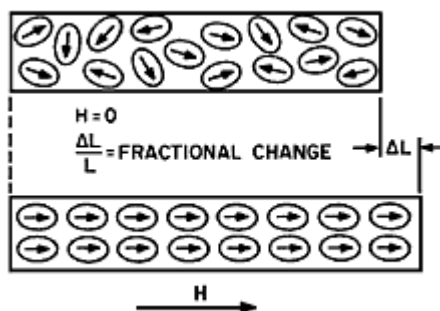
Ακολουθεί ο τυπικός ορισμός [4]: ένα μαγνητικό υλικό παρουσιάζει συστολή ή διαστολή κατά τον άξονα μαγνήτισης ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Μετριέται ως ποσοστό με τη σχέση:

$$\lambda = \frac{dl}{l_0} \quad (2.1)$$

όπου λ η μαγνητοσυστολή, dl η επιμήκυνση λόγω του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και l_0 το αρχικό μήκος του υλικού όντας απομαγνητισμένο. Το dl μπορεί να έχει θετικές τιμές για διαστολικά υλικά ή αρνητικές για συστολικά.

Η μαγνητοσυστολή όπως διατυπώθηκε είναι συνάρτηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου $\lambda(H)$ και μπορεί να παρουσιάζει υστέρηση ή όχι ανάλογα με τη διαδικασία μαγνήτισης του υλικού. Ακόμα ορίζεται ως λ_s σταθερά υλικού, η τιμή της μαγνητοσυστολής κορεσμού και H_s η σταθερά έντασης πεδίου κορεσμού που

την προκαλεί. Ο λόγος L των δυο παραπάνω ορίζεται ως λ_e μετρούμενος σε $ppm Oe^{-1}$ και αποτελεί δείκτη της ικανότητας του υλικού να δημιουργεί μαγνητοελαστικούς παλμούς, απαραίτητους στη τεχνική MDL.



Σχήμα 2.1 Επιμήκυνση του υλικού λόγω εφαρμογής πεδίου H [5]

Σε ατομικό επίπεδο, η μαγνητοσυστολή σχετίζεται με την διαδικασία μαγνήτισης και έχει αίτια παρόμοια με αυτά της ανισοτροπίας. Είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μαγνητικών ροπών μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα και του μήκους των ελαστικών δεσμών. Στη μαγνητοσυστολή εμπλέκεται ακόμα και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, ειδικά σε υψηλές συχνότητες εφαρμοζόμενου πεδίου, όπου η διάδοση τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών είναι αρκετά απίθανη.

Για την πληρέστερη επεξήγηση των αιτιών της μαγνητοσυστολής, θα πρέπει να διερευνηθούν κάποιες θεμελιώδεις έννοιες σχετικές με τα μαγνητικά υλικά και πιο συγκεκριμένα, οι μαγνητικές περιοχές, ο τρόπος δημιουργίας τους και οι μηχανισμοί συμπεριφοράς τους.

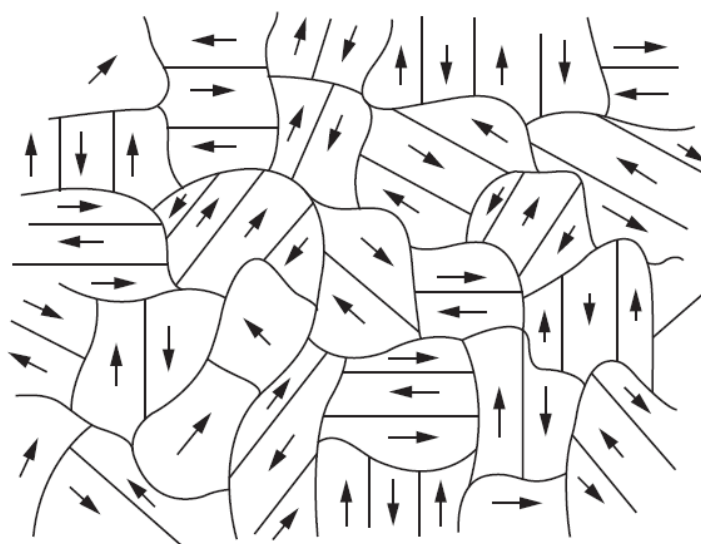
2.2 Μαγνητικές περιοχές

Οι μαγνητικές περιοχές είναι περιοχές εντός των κρυστάλλων των μαγνητικών υλικών, που εσωτερικά έχουν την ίδια μαγνητική ροπή και χωρίζονται μεταξύ τους από τοιχώματα (domain walls) [4].

Ο λόγος ύπαρξης των μαγνητικών περιοχών γίνεται κατανοητός μέσα από τα επόμενα [6]. Παρατηρώντας ένα κομμάτι σιδήρου μακριά από την επίδραση οποιουδήποτε πεδίου και προσπαθώντας να μετρηθεί η μαγνήτισή του, όπως είναι αναμενόμενο θα μετρηθεί συνολικά μηδενική τιμή. Εάν όμως ήταν δυνατό να πάρουμε ένα αρκετά μικρό κομμάτι από ένα κρύσταλλο σιδήρου θα παρατηρούσαν πως είναι πλήρως μαγνητισμένος. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι πως υπάρχουν μικρές περιοχές που είναι μαγνητισμένες σε διαφορετικές διευθύνσεις, με τέτοιο τρόπο, ώστε μακροσκοπικά η μέση τιμή μαγνήτισης να είναι μηδενική. Έτσι λοιπόν οι μαγνητικές περιοχές υπάρχουν ώστε το υλικό να διατηρεί την μαγνητοστατική του ενέργεια στο ελάχιστο.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 έχουμε ένα κομμάτι φερρομαγνητικού υλικού, αποτελούμενο από πολλούς διαφορετικούς κρυστάλλους, με κάθε κρύσταλλο να έχει διαφορετικό εύκολο άξονα μαγνήτισης και χωρίζεται σε μαγνητικές περιοχές οι οποίες είναι συνήθως παράλληλες σε αυτό τον εύκολο άξονα.

Να σημειωθεί πως ακριβώς λόγω της ύπαρξης των μαγνητικών περιοχών, σε μεγάλη κλίμακα παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στις ιδιότητες των υλικών σε σχέση με αυτές στη μικροσκοπική κλίμακα.



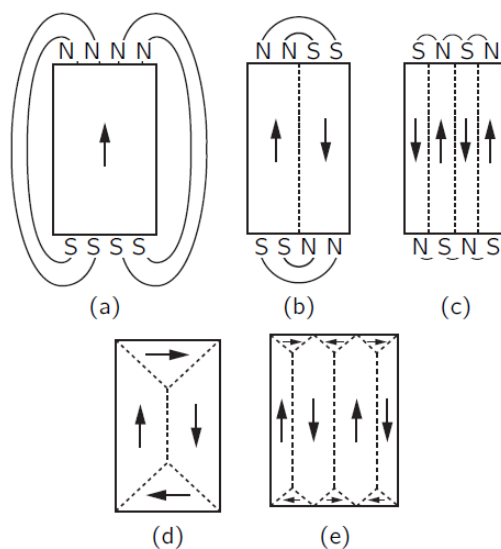
Σχήμα 2.2 Μικροσκοπική δομή, μη μαγνητισμένου φερρομαγνητικού υλικού [6]

2.3 Δημιουργία μαγνητικών περιοχών

Η διαίρεση του υλικού σε μικρότερες περιοχές, όπως προαναφέρθηκε, μειώνει την μαγνητοστατική του ενέργεια.

Έστω πως αρχικά υπάρχει ένας κρύσταλλο σιδήρου πλήρως μαγνητισμένος προς μια διεύθυνση, έστω προς τα επάνω (Σχ. 2.3.a), θα υπήρχε ένα σημαντικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, μεγάλης ενέργειας. Αυτή η ενέργεια θα μπορούσε να μειωθεί εάν μαγνητιστεί το δεξί μισό συμμετρικό κομμάτι αντίθετα, δημιουργώντας δυο μαγνητικές περιοχές, (Σχ. 2.3.b), αφού τα πεδία εκτός του υλικού θα καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο. Στη διακεκομμένη γραμμή που χωρίζει τις δύο περιοχές δημιουργήθηκε ένα τοίχωμα (γωνίας 180°) με αντίστοιχη ενέργεια τοιχώματος (wall energy) αφού τα άτομα στις δύο γειτονικές περιοχές έχουν αντίθετες περιστροφές. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μειώνοντας ακόμη περισσότερο την μαγνητοστατική ενέργεια, ωστόσο το πεδίο ακόμα εξέρχεται από το υλικό (Σχ. 2.3.c).

Υπάρχει όμως τρόπος ώστε το πεδίο να μην εξέρχεται καθόλου από το υλικό. Αυτός είναι με την δημιουργία των τριγωνικών περιοχών με μαγνήτιση κατά τον οριζόντιο άξονα και δημιουργία επιπλέον τοιχωμάτων (γωνίας 90°) (Σχ. 2.3.d και Σχ. 2.3.e).



Σχήμα 2.3 Δημιουργία μαγνητικών περιοχών [6]

Παρόλα αυτά η δημιουργία τοιχωμάτων δεν μπορεί να συνεχίσει επ' άοριστον καθώς έχει το δικό της ενεργειακό κόστος και επομένως υπάρχει ένα σημείο, πέρα από το οποίο, το κέρδος μαγνητοστατικής ενέργειας από την διαίρεση μιας περιοχής σε δυο είναι μικρότερο από το κόστος δημιουργίας τοιχώματος. Αυτό ακριβώς ορίζει και το μέγεθος των μαγνητικών περιοχών και την σταθερότητά τους [6].

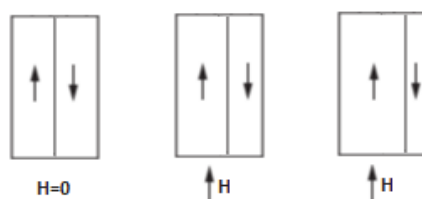
2.4 Μηχανισμοί των μαγνητικών περιοχών

Έχοντας περιγράψει τις μαγνητικές περιοχές, δύναται πλέον να ξεκινήσει η περιγραφή των μηχανισμών τους, που αξιοποιούνται κατά τη σχεδίαση μαγνητικών αισθητήρων.

Οι μηχανισμοί είναι δυο ειδών, η διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων (Domain Wall Dynamics) και η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών (Domain Rotation Dynamics). Θα μας απασχολήσει περισσότερο η περιστροφή των περιοχών αφού η δημιουργία ελαστικών παλμών εξαρτάται κυρίως από αυτό το μηχανισμό.

2.4.1 Διάδοση μαγνητικών τοιχωμάτων

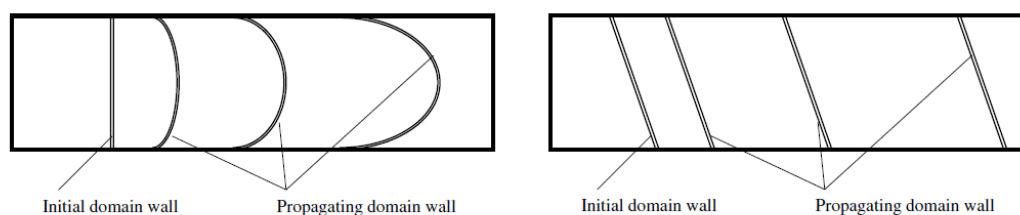
Το φαινόμενο διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων αποτελεί το πρώτο στάδιο μαγνήτισης του υλικού και έχει να κάνει με την κίνηση των τοιχωμάτων αφού αυτά είναι πολύ μικρότερα από τις μαγνητικές περιοχές. Το αποτέλεσμα είναι να έχουμε



Σχήμα 2.4 Μαγνήτιση του υλικού με διάδοση μαγνητικού τοιχώματος

αύξηση των περιοχών που είναι μαγνητισμένες κατά τον άξονα του επιβαλλόμενου πεδίου εις βάρος των άλλων, διαφορετικά προσανατολισμένων περιοχών.

Τα είδη της διάδοσης των τοιχωμάτων είναι δυο και εξαρτώνται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη μέσα σε αυτά. Χαμηλής ενέργειας τοιχώματα (μικρής γωνίας) διαδίδονται με την διαδικασία της διόγκωσης (bowing), ενώ υψηλής ενέργειας τοιχώματα διαδίδονται πιο άκαμπτα.



Σχήμα 2.5 Διάδοση με διόγκωση αριστερά και άκαμπτα δεξιά [7]

Πέρα από την ενέργεια τοιχώματος, ο πρώτος τρόπος είναι πιθανότερο να παρατηρηθεί σε μαλακά υλικά ενώ ο δεύτερος σε σκληρά.

Η αντιστρεψιμότητα της παραπάνω διαδικασίας είναι αυτή που καθορίζει την ύπαρξη υστέρησης ή όχι και σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με ελαττώματα κατά την παραγωγή που οδηγούν σε φαινόμενα αγκίστρωσης (pinning effect). Πολύ συχνά, η διάδοση τοιχώματος χρησιμοποιείται σε αισθητήρες μέτρησης χαμηλής έντασης μαγνητικών πεδίων.

Όταν σχεδιάζονται αισθητήρες βασισμένοι σε αυτό το μηχανισμό, όπου η υστέρηση είναι ανεπιθύμητη, πρέπει να επιλεγθεί μαλακό υλικό με χαμηλή μαγνητοσυστολή και κατά την κατασκευή πρέπει να επιτευχθούν όσο το δυνατόν μικρότερες εσωτερικές τάσεις και ελαττώματα [7].

2.4.2 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών

Η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών είναι το αίτιο δημιουργίας των ελαστικών παλμών και αποτελεί τον κύριο μηχανισμό τον οποίο και εκμεταλλεύεται η τεχνική MDL. Έχει να κάνει με την περιστροφή των περιοχών ώστε οι μαγνητικές ροπές τους να προσανατολίζονται με την διεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου.

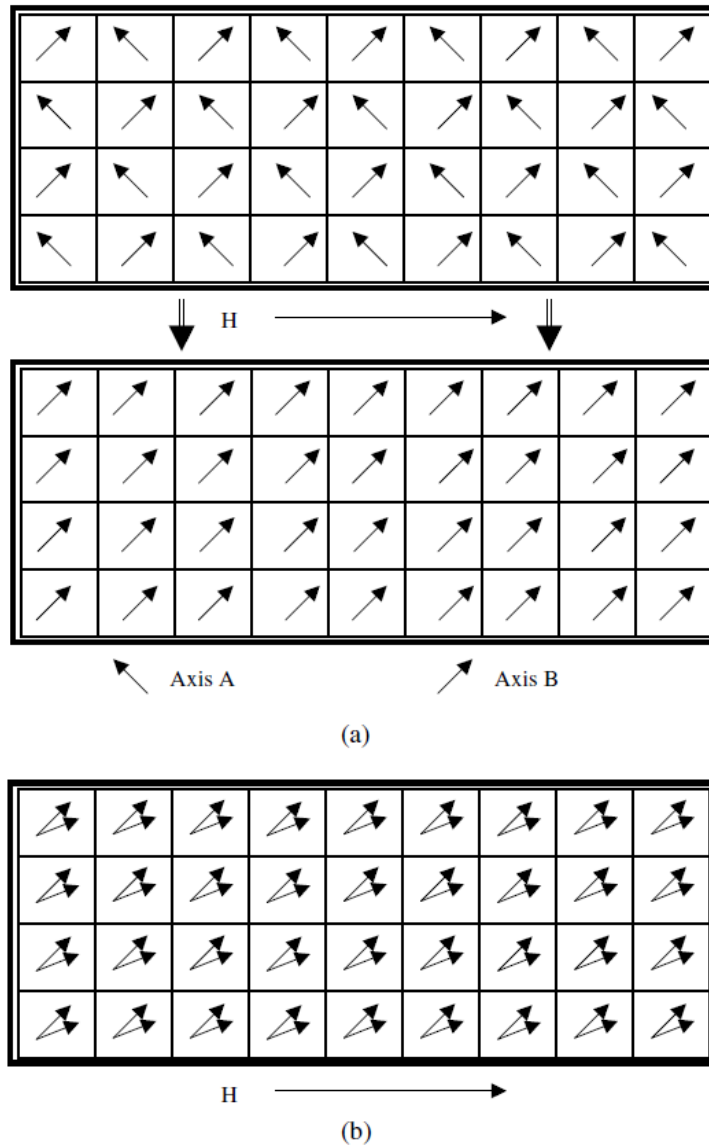
Στο σημείο αυτό πρέπει να εξηγηθεί η έννοια του εύκολου άξονα (easy axis). Λόγω της ανισοτροπίας που παρουσιάζεται στα υλικά, εξαιτίας της κρυσταλλικής δομής τους, του σχήματος των κρυστάλλων και την ατελή κατανομή των εσωτερικών τάσεων, προκύπτουν ευνοϊκότεροι άξονες μαγνήτισης, οι οποίοι αποκαλούνται «εύκολοι».

Επιστέφοντας στην περιστροφή των περιοχών, όπου υπάρχουν δυο διακριτές περιοχές λειτουργίας, η μη αντιστρέψιμη που παρουσιάζει υστέρηση και η αντιστρέψιμη, μη υστερητική περιστροφή [7].

Μη αντιστρέψιμη περιστροφή προκύπτει όταν οι μαγνητικές περιοχές που είναι προσανατολισμένες ως προς έναν εύκολο άξονα A, αναπροσανατολίζονται ως προς έναν άλλο εύκολο άξονα B, λόγω ενός επιβαλλόμενου πεδίου H, με τον άξονα B να είναι πλησιέστερος στην διεύθυνση του πεδίου H.

Αντιστρέψιμη περιστροφή προκύπτει όταν οι μαγνητικές περιοχές προσανατολισμένες πλέον ως προς τον άξονα B, ο οποίος δεν συμπίπτει ακριβώς με τον άξονα του πεδίου H, αναπροσανατολίζονται ως προς τον άξονα του πεδίου H.

Έστω πως τώρα μηδενίζεται το πεδίο H. Τότε οι περιοχές θα αναπροσανατολιστούν ως προς τον εύκολο άξονα B αλλά δεν θα επιστρέψουν, κατά κανόνα, στον αρχικό εύκολο άξονα A. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται αρχικά οι περιοχές προσανατολισμένες ως προς τους δυο εύκολους άξονες A και B. Μετά την επιβολή πεδίου H, παρατηρείται μη αντιστρέψιμη περιστροφή προς τον εύκολο άξονα B (Σχ.2.6.a) και στην συνέχεια αντιστρέψιμη περιστροφή προς τον άξονα του πεδίου H (Σχ.2.6.b).



Σχήμα 2.6 Περιστροφή μαγνητικών περιοχών [7]

Η μη αντιστρέψιμη περιστροφή των περιοχών παρουσιάζει υψηλότερο θόρυβο και ευθύνεται για την παρουσία της υστέρησης, η οποία είναι συνήθως ανεπιθύμητη όταν τα μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αισθητήρων. Η παρουσία υστέρησης αυξάνει ακόμη την αβεβαιότητα των μετρήσεων και για αυτό, το υλικό πρέπει να κατασκευάζεται αναλόγως, ώστε να αποφεύγεται η μη αντιστρέψιμη περιστροφή και να αυξάνεται το εύρος της αντιστρέψιμης. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με μεθόδους ανόπτησης, κατά την οποία οι εύκολοι άξονες προσανατολίζονται μακριά από τη διεύθυνση του πεδίου.

Οι δύο ειδών περιστροφές των περιοχών προκαλούν τη μαγνητοσυστολή, αφού το σχήμα των μαγνητικών δίπολων είναι ελλειψοειδές και όχι σφαιρικό και ο προσανατολισμός αυτών των δίπολων κατά τον άξονα μαγνήτισης προκαλεί τις αλλαγές στην γεωμετρία του υλικού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

2.5 Άμορφα Υλικά

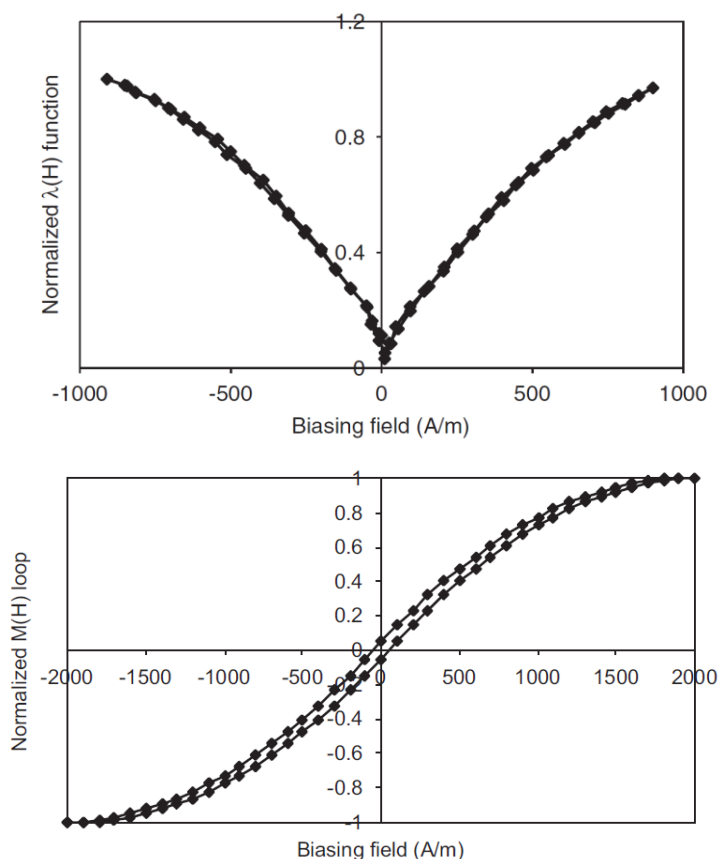
Τα άμορφα υλικά, καλούμενα και υαλώδη υλικά, είναι στην ουσία κράματα τα οποία έχουν άμορφη στερεά δομή, σε αντίθεση με τα συνήθη κρυσταλλικά μέταλλα. Παράγονται σε μορφή συρμάτων και ταινιών, με την τεχνική ταχείας ψύξης μέσω περιστροφής στο νερό.

Οι ανάγκες των σύγχρονων αισθητήριων εφαρμογών, απαιτούν συνεχώς τη βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών. Αυτές οι ανάγκες οδήγησαν στην ανάπτυξη άμορφων κραμάτων τα οποία παρουσιάζουν πολλά οφέλη συγκριτικά με τα κλασσικά κρυσταλλικά υλικά.

Όλα τα μαγνητικά υλικά είναι σε κάποιο βαθμό μαγνητοσυστολικά. Τα κλασσικά μαγνητοσυστολικά υλικά έχουν τιμές λ που ξεκινούν από λίγα μm έως λίγες δεκάδες μm . Η απόκρισή τους μπορεί να είναι υστερητική ή ανυστερητική και ελέγχεται από τη σύνθεσή τους και τη κατεργασία τους μετά την παραγωγή.

Ωστόσο για μαγνητοσυστολικούς αισθητήρες απαιτείται μη υστερητική καμπύλη $\lambda(H)$ και υψηλές τιμές μαγνητοσυστολής κορεσμού λ_s και λόγου μαγνητοσυστολής κορεσμού-πεδίου λ_e . Για αυτό το λόγο προτιμώνται άμορφα κράματα που περιέχουν σιδηρομαγνητικά υλικά Fe-Co-Ni καθώς και μεταλλοειδή Si και B. Σε αυτά τα υλικά ειδικά μετά από κατάλληλη κατεργασία, π.χ. ανόπτηση, η διάδοση του τοιχώματος των μαγνητικών περιοχών γίνεται αντιστρέψιμο, με αποτέλεσμα τη σχεδόν πλήρως ανυστερητική απόκριση $\lambda(H)$ με αρκετά υψηλές σταθερές λ_s και λ_e . Ένα τέτοιο τυπικό άμορφο υλικό είναι το $Fe_{78}Si_8B_{15}$, σε μορφή ταινίας, σύρματος ή σύρματος καλυμμένου με γυαλί που παρουσιάζει σταθερές λ_s έως $100\mu\text{m}$ και λ_e έως $100\mu\text{m} \text{ Oe}^{-1}$ αντίστοιχα [4].

Στο Σχήμα 2.7 φαίνονται η κανονικοποιημένη συνάρτηση $\lambda(H)$ και ο κανονικοποιημένος βρόχος υστέρησης άμορφων υλικών. Παρατηρούμε πως ο βρόχος υστέρησης μετά από ανόπτηση είναι ιδιαίτερα στενός. Ειδικά στις περιοχές κοντά στον κορεσμό η καμπύλη παρουσιάζει μονοτονία.



Σχήμα 2.7

Επάνω, κανονικοποιημένη συνάρτηση $\lambda(H)$ $\text{Fe}_{78}\text{Si}_7\text{B}_{15}$ σε μορφή ταινίας χωρίς επιπλέον κατεργασία.

Κάτω, κανονικοποιημένος βρόχος μαγνήτισης σύρματος $\text{Fe}_{78}\text{Si}_7\text{B}_{15}$ μετά από ανόπτηση μηχανικής τάσης-ρεύματος (stress-current annealing) [4]

Στα πλαίσια της εργασίας δοκιμάστηκαν άμορφοι πυρήνες, που διαθέτε το εργαστήριο, με βάση Fe και Co σε μορφή σύρματος και ταινίας και εξετάστηκε η ικανότητα δημιουργίας ελαστικών παλμών. Καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν χρησιμοποιώντας FeSiB σε μορφή σύρματος που αποτελεί και το βασικό πυρήνα σε όλες τις διατάξεις μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΟΛΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ (MDL)

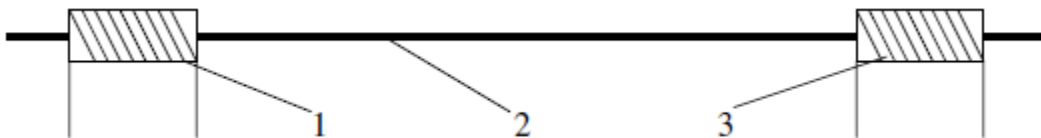
Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί ποιοτικά η αρχή λειτουργίας της βασικής διάταξης μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης. Θα επεξηγηθεί το ευθύ και αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο όπως αυτό εμφανίζεται στη διέγερση και στη λήψη διατάξεων MDL και θα δοθεί το μαθηματικό μοντέλο, που υπάρχει στη βιβλιογραφία. Τέλος θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες των γραμμών καθυστέρησης που τις χαρακτηρίζουν.

3.1 Βασική διάταξη MDL

Η τεχνική MDL βασίζεται στην δημιουργία ελαστικών παλμών πάνω στον μαγνητοσυστολικό πυρήνα από μια διέγερση, οι οποίοι διαδίδονται κατά μήκος της γραμμής και λαμβάνονται με κάποια καθυστέρηση από ένα μέσο λήψης.

Το μέσο διέγερσης μπορεί να είναι ένα πηνίο, ένας κάθετος προς την γραμμή αγωγός (cross-section) ή ένας δίσκος δινορρευμάτων [8], ενώ το μέσο λήψης μπορεί να είναι ένα πηνίο ή κάποιο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.

Η βασική διάταξη με πηνίο στη διέγερση και στη λήψη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

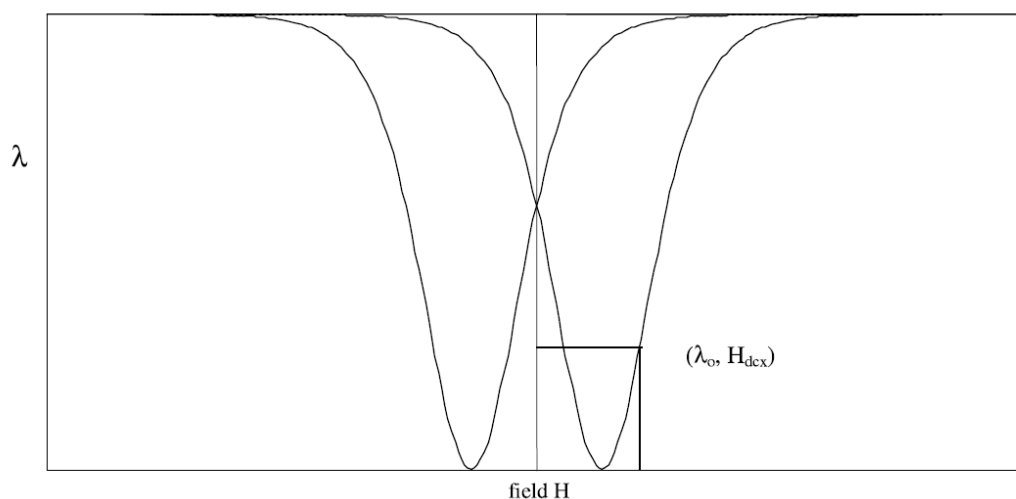


Σχήμα 3.1 Βασική διάταξη MDL 1) πηνίο λήψης, 2) MDL, 3) πηνίο διέγερσης [7]

3.2 Περιγραφή λειτουργίας της βασικής διάταξης

Δημιουργία ελαστικού παλμού – μαγνητοσυστολικό φαινόμενο

Όπως παρατηρήθηκε παραπάνω, τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών στα υλικά έχουν την τάση να προσανατολίζονται στην διεύθυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου, είτε σταθερού, είτε παλμικού. Η εφαρμογή ενός πεδίου πόλωσης ή ενός παλμικού πεδίου έχουν σαν αποτέλεσμα, αρχικά, άλματα Barkhausen, τα οποία συντελούν στη μη αντιστρέψιμη και υστερητική περιοχή της καμπύλης $\lambda(H)$ και στην συνέχεια μικρής γωνίας περιστροφή των περιοχών που αποτελεί και το μη υστερητικό μέρος της καμπύλης.



Σχήμα 3.2 Η καμπύλη $\lambda(H)$ - μαγνητοσυστολή συναρτήσει του πεδίου H [7]

Εφαρμόζοντας λοιπόν σταθερό πεδίο πόλωσης H_{DC} στο MDL παρατηρείται μια στατική επιμήκυνση του υλικού $\delta\lambda_0$ που αντιστοιχεί στο σημείο του Σχήματος 3.2 (λ_0, H_{DC}) . Εάν επιπρόσθετα εφαρμοστεί παλμικό πεδίο $H_e(t)$ στην ίδια περιοχή, θα παρατηρηθεί μια παρόμοια αλλά δυναμική επιμήκυνση του υλικού $\delta\lambda(t)$ που θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ελαστικού παλμού που διαδίδεται κατά μήκος του MDL [7]. Αυτός ο παλμός προκύπτει ως το σύνολο των μικροπαραμορφώσεων (microstrains) στο ενεργό τμήμα του μαγνητοσυστολικού υλικού.

Διάδοση – ακουστικό φαινόμενο

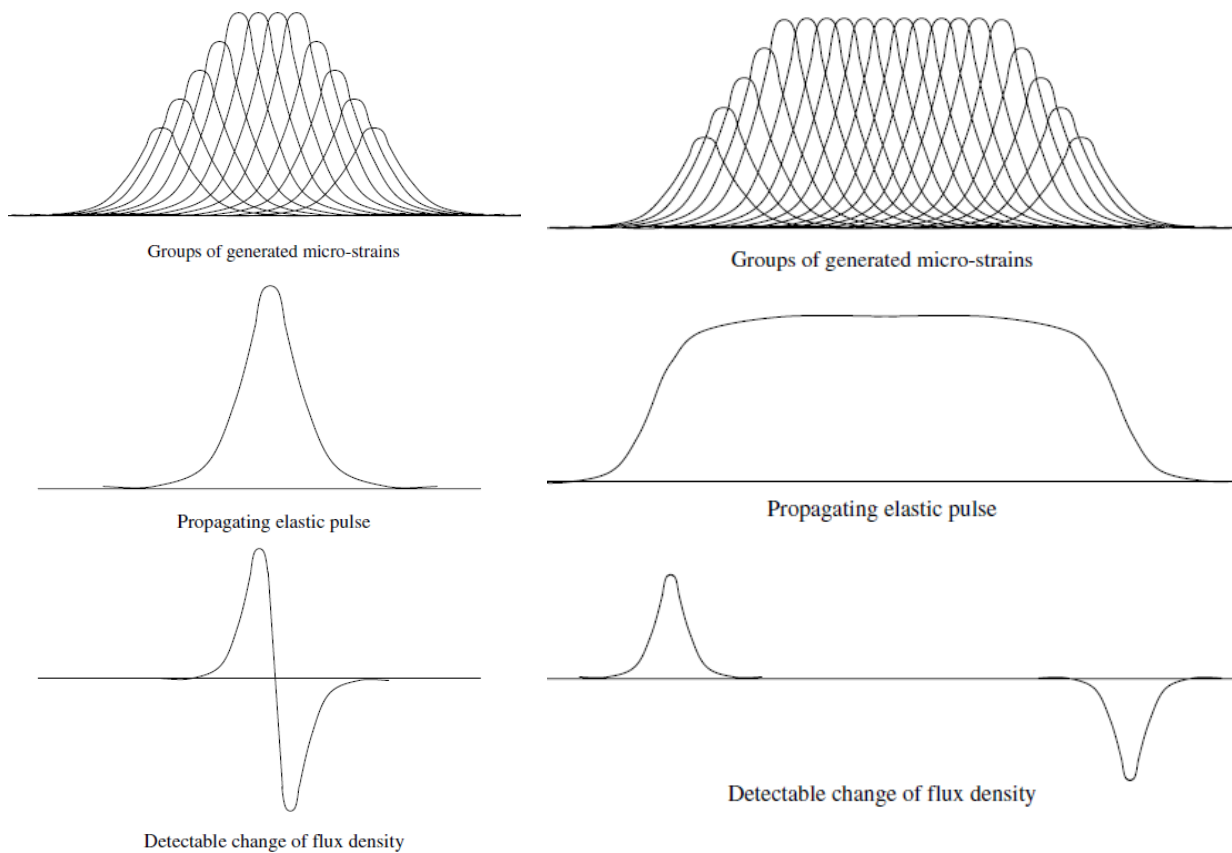
Στα κλασσικά μαγνητοσυστολικά υλικά η διάρκεια της διέγερσης είναι της τάξης των microseconds (μs) και έτσι το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ελαστικού παλμού είναι κάποια millimeters (mm). Η διάδοση γίνεται κυρίως με την μορφή διαμήκους κύματος λόγω της γεωμετρίας του ακουστικού κυματοδηγού και παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της απόστασης.

Λήψη – αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο

Ο ελαστικός παλμός, κατά την πορεία του, αλλάζει τοπικά την διεύθυνση μαγνήτισης των δίπολων του υλικού, δεδομένου πως αυτό είναι τοπικά μαγνητιζόμενο. Στην περίπτωση άμορφων πυρήνων δεν χρειάζεται να υπάρξει επιπλέον πεδίο πόλωσης καθώς το μαγνητικό πεδίο της γης επαρκεί για να προκαλέσει αρκετά ισχυρή μαγνητική ροή πόλωσης. Το στατιστικό άθροισμα των απειροελάχιστων αλλαγών του προσανατολισμού των δίπολων προκαλεί μακροσκοπική αλλαγή της μαγνητικής ροής κατά μήκος του MDL. Αυτό είναι στην πραγματικότητα το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο. Τέλος στο πηνίο λήψης επάγεται τάση ανάλογη με την πρώτη παράγωγο της μαγνητικής ροής [7].

Συνοψίζοντας λοιπόν, το σύνθετο φαινόμενο μπορεί να χωριστεί σε 3 μέρη:

- επιβολή παλμικού μαγνητικού πεδίου από το μέσο διέγερσης: τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του πεδίου και παρουσιάζουν μαγνητοσυστολή και προκαλούνται μικροπαραμορφώσεις στη γραμμή καθυστέρησης
- το άθροισμα των μικροπαραμορφώσεων συνθέτει ελαστικό παλμό (διάμηκες μηχανικό κύμα) που διαδίδεται κατά μήκος του MDL με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο υλικό και παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της απόστασης
- οι μικροπαραμορφώσεις επιβάλλονται στις γειτονικές περιοχές και προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα, ενώ αλλάζοντας την μαγνητική ροή κατά τον άξονα του MDL, επάγεται τάση στο πηνίο λήψης ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής .



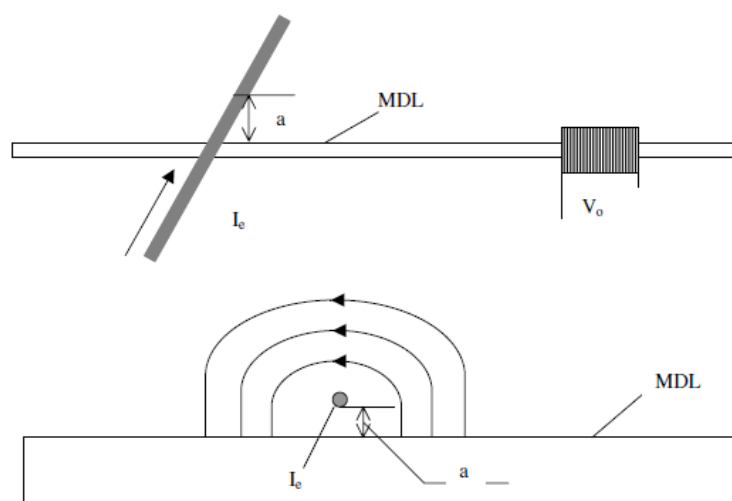
Σχήμα 3.3 Δημιουργία, διάδοση και λήψη ελαστικού παλμού
Από σύντομο παλμό διέγερσης (αριστερά) και παρατεταμένο (δεξιά)

Οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης συνήθως αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μαγνητοσυστολικό υλικό, τις περισσότερες φορές για λόγους ευκολίας. Ωστόσο αφού παρουσιάζεται μαγνητικό φαινόμενο μόνο στη περιοχή διέγερσης και λήψης, η περιοχή του κυματοδηγού μπορεί να είναι φτιαγμένη από μη μαγνητικό υλικό, για παράδειγμα γυαλί ή κάποιο κεραμικό [9].

Στη συνέχεια ακολουθεί η μοντελοποίηση της βασικής διάταξης MDL, με αυστηρότερο μαθηματικό τρόπο.

3.3 Μοντελοποίηση της βασικής διάταξης MDL

Παρατίθεται το μοντέλο της βασικής διάταξης MDL όπως αυτό βρίσκεται στη βιβλιογραφία [10]. Για την μοντελοποίηση, θεωρείται η απλούστερη μορφή διέγερσης, αυτή με κάθετο προς τη γραμμή αγωγό (cross-section).



Σχήμα 3.4 Η βασική διάταξη MDL με κάθετο αγωγό στη διέγερση

Το παλμικό πεδίο $H(x, t)$ κατά μήκος του MDL που οφείλεται στο παλμικό ρεύμα διέγερσης $I(t)$ είναι:

$$H(x, t) = f(x)I(t) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + x^2}} I(t) \quad (3.1)$$

όπου a είναι η απόσταση ανάμεσα στον αγωγό και το MDL.

Θεωρούμε παλμικό ρεύμα $I(t)$ της εξής μορφής: 0 έως I_0 με σταθερή θετική κλίση για $0 - n_1T$, I_0 σταθερό για $n_1T - n_2T$ και I_0 έως 0 με σταθερή αρνητική κλίση για $n_2T - n_3T$. Όπου T σταθερά χρόνου και n_i ακέραιος.

Στην περίπτωση ανυστερητικής συμπεριφοράς, οι μικροπαραμορφώσεις που προκαλούνται από το παλμικό πεδίο $H(x, t)$ δίνονται από τον παρακάτω πειραματικό τύπο:

$$\lambda(H) = \lambda_s(1 - e^{-cH^2}) \quad , c > 0 \quad (3.2)$$

όπου c είναι μια προσαρμοστική παράμετρος, με μονάδες πεδίου και λ_s η σταθερά μαγνητοσουστολής κορεσμού.

Για υστερητική συμπεριφορά ο τύπος γίνεται:

$$\lambda(H) = \lambda_s(1 - e^{-c(H \pm H_c)^2}), \quad c > 0 \quad (3.3)$$

Για λόγους απλότητας λαμβάνεται υπόψη μόνο η ανυστερητική απόκριση. Οι μικροτάσεις $\lambda(x, t)$ που προκαλούνται από το θετικό μέτωπο του παλμού ρεύματος αθροίζονται σε ένα σύνολο τάσεων:

$$Gr(x, t) = \sum_{n=1}^{n_1} \lambda_s \left(1 - \exp \left(-c \frac{\left(n \frac{I_0}{n_1} \right)^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 + n_1 - n)Tv)^2} \right) \right) \quad (3.4)$$

όπου v η ταχύτητα διάδοσης του MDL. Οι μικροτάσεις που προκαλούνται από το σταθερό ρεύμα του παλμού αθροίζονται:

$$Gs(x, t) = \sum_{n=n_1}^{n_2} \lambda_s \left(1 - \exp \left(-c \frac{(I_0)^2}{a^2 + (x - (n_3 + n_2 - n)Tv)^2} \right) \right) \quad (3.5)$$

Τέλος, οι μικροτάσεις από το αρνητικό μέτωπο του παλμού αθροίζονται:

$$Gf(x, t) = \sum_{n=n_2}^{n_3} \lambda_s \left(1 - \exp \left(-c \frac{\left((n - n_3) \frac{I_0}{n_3} \right)^2}{a^2 + (x - (n_3 - n)Tv)^2} \right) \right) \quad (3.6)$$

Το σύνολο αυτών των μικροπαραμορφώσεων διαδίδεται μέσα στο MDL ως ελαστικός παλμός. Ο ελαστικός παλμός προκαλεί αλλαγή της μαγνητικής ροής μέσα στο υλικό που διαδίδεται και αυτή η μεταβολή επάγει τάση σε ένα πηνίο λήψης. Στην περίπτωση που ο παλμός διέγερσης είναι σύντομος τότε η μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει δυο διαδοχικές κορυφές τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3 αριστερά. Εάν τώρα ο παλμός διέγερσης είναι παρατεταμένος, τότε η πρώτη παράγωγος του ελαστικού παλμού διαχωρίζεται σε δυο διακριτές κορυφές τάσης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα δεξιά.

Το παραπάνω μοντέλο επαληθεύεται από πειραματικά δεδομένα σε ποσοστό που φτάνει το 97%. Για παράδειγμα σε περίπτωση άμορφων ταινιών FeSiB μετά από ανόπτηση η σταθερά c υπολογίστηκε ίση με $15 A m^{-1}$.

3.4 Ιδιότητες των MDL

Ο χαρακτηρισμός των μαγνητοσυστολικών υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την κατανόηση των ιδιοτήτων, που παίζουν ρόλο σε κάθε εφαρμογή. Αυτό το απαραίτητο στάδιο, εξασφαλίζει ότι ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής, γίνεται κατάλληλη κατεργασία των υλικών κατά την παραγωγή, αλλά και μετά από αυτή. Οι ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών υλικών που είναι κρίσιμες στον σχεδιασμό διατάξεων αισθητήρων MDL, είναι οι ακόλουθες [7].

Ανομοιομορφία (Non-uniformity): Η ανομοιομορφία ορίζεται ως η διακύμανση της συνάρτησης ομοιομορφίας $V_o(x)$, δηλαδή της μέγιστης τάσης $V_p(x)$ που λαμβάνεται σε ένα πηνίο λήψης συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα στην διέγερση και τη λήψη κάτω από τις ίδιες συνθήκες μαγνητικού πεδίου πόλωσης και παλμικού πεδίου. Στη βιβλιογραφία [11], η ανομοιομορφία έχει αναλυθεί εκτενώς και συμπεραίνεται πως οι μέθοδοι ανόπτησης (stress-current annealing) και κανονικοποίησης (normalization) εξαλείφουν τις τοπικές τάσεις, που δημιουργούνται κατά την παραγωγή και διορθώνει τις διευθύνσεις των μαγνητικών περιοχών, οδηγώντας σε μείωση της ανομοιομορφίας του υλικού.

Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης (Bias field Effect): Ορίζεται ως η εξάρτηση της τάσης εξόδου που λαμβάνεται σε ένα πηνίο λήψης, από ένα επιβαλλόμενο σταθερό μαγνητικό πεδίο κατά τη διεύθυνση του MDL. Αυτή η εξάρτηση αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη ιδιότητα, καθώς ένα απρόσμενο εξωτερικό πεδίο μπορεί να επηρεάσει έντονα την απόκριση του αισθητήρα. Ακόμα ορίζει σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας τέτοιος αισθητήρας, ανάλογα με την παρουσία μαγνητικών πεδίων ή όχι. Η παραπάνω εξάρτηση έχει μελετηθεί στο παρελθόν [12] και μέθοδοι για την αποφυγή αυτού του φαινομένου περιλαμβάνουν την μαγνητική μόνωση του αισθητήρα ή τη σχεδίαση του υλικού προβλέποντας τα εξωτερικά πεδία.

Καθυστέρηση απόκρισης (Response delay): Ως καθυστέρηση απόκρισης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή διέγερσης και δημιουργίας του ελαστικού παλμού, έως τη στιγμή λήψης και αποθήκευσής του. Αυτός ο χρόνος εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα διάδοσης του παλμού μέσα στο υλικό και συσχετίζεται τόσο με τις τεχνικές κατασκευής των μαγνητοσυστολικών πυρήνων όσο και με το φαινόμενο πεδίου πόλωσης [13].

Υστέρηση: Η υστέρηση που παρουσιάζουν τα MDL είναι ένα μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο περιγράφεται ως η διαφορά της τάσης εξόδου $V_o(I_e)$ που παρατηρείται όταν αυξάνεται το παλμικό ρεύμα διέγερσης I_e έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Τα άμορφα υλικά που χρησιμοποιούνται ως γραμμές καθυστέρησης παρουσιάζουν πολύ μικρή υστέρηση κατά τη δυναμική/παλμική διέγερση. Ειδικά όταν λειτουργούν κοντά στην περιοχή κορεσμού, η υστέρηση είναι μηδενική.

Ανάλυση: Ανάλυση καλείται η μικρότερη απόσταση δυο κοντινών σημείων πάνω σε μια γραμμή καθυστέρησης, που όταν διεγερθούν μπορούν να προκαλέσουν διακριτούς παλμούς στη λήψη. Έρευνες έχουν δείξει πως σε κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά η ανάλυση φτάνει τα 80mm ενώ σε άμορφα υλικά μετά από κατάλληλη επεξεργασία με τεχνικές ανόπτησης, μπορεί να φτάσει το 1mm [9].

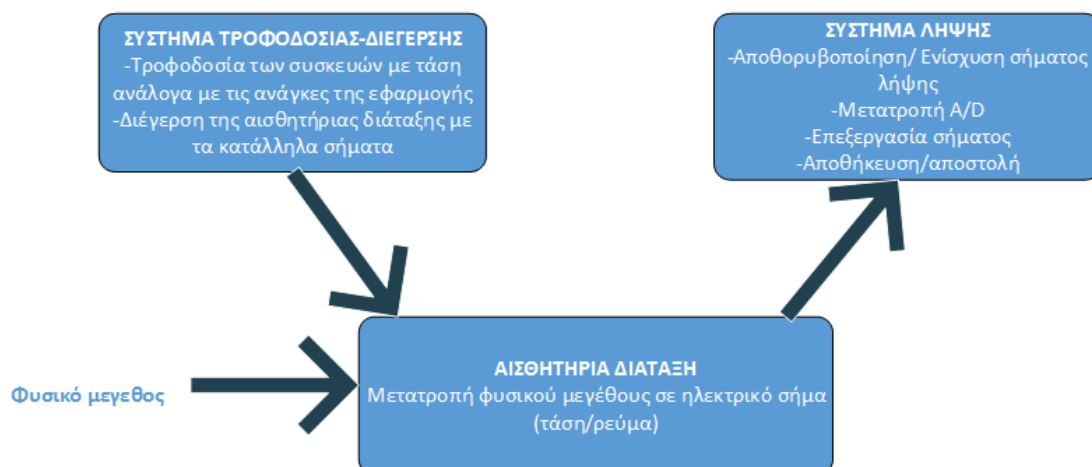
Πλάτος παλμού διέγερσης και απόκριση συχνότητας: Το πλάτος της τάσης εξόδου στη λήψη παρουσιάζει εκτός των άλλων εξάρτηση με τη διάρκεια και το εύρος ζώνης του παλμού διέγερσης. Το βέλτιστο εύρος συχνοτήτων έχει καθοριστεί από σχετικές έρευνες και έχει δειχθεί πως το εύρος συχνοτήτων μπορεί να φτάσει ακόμα και τα 10MHz μετά από κατάλληλες τεχνικές ανόπτησης [14].

Ανακλάσεις: Παρουσιάζονται ανακλάσεις όταν ο ελαστικός παλμός φτάνει στο τέλος του κυματοδηγού, πράγμα που μειώνει την ευαισθησία και την ανάλυση των γραμμών καθυστέρησης. Η εξάλειψή τους επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο τερματισμό των γραμμών και σχεδίαση της γεωμετρίας της διάταξης.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθούν διατάξεις και θα παρουσιαστούν αποτελέσματα πειραμάτων, με σκοπό τόσο να γίνουν αντιληπτές οι παραπάνω ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, όσο και για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό αισθητήρα θέσης βασισμένο σε αυτές. Πριν γίνει αυτό όμως, θα παρουσιαστούν σε ένα κεφάλαιο τα ηλεκτρονικά κυκλώματα διέγερσης και λήψης που υλοποιήθηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ MDL

Ένα σύστημα μετρήσεων πέραν από την μετατροπή ενός φυσικού μεγέθους σε ηλεκτρικό σήμα, συνήθως εκτελεί πολλές ακόμα λειτουργίες. Τέτοιες λειτουργίες έχουν να κάνουν με την τροφοδοσία και τη διέγερση συσκευών, την ανάγνωση των σημάτων λήψης, την επεξεργασία τους για μετατροπή σε χρήσιμη πληροφορία και αποθήκευση των δεδομένων. Υπό αυτήν την έννοια θα μπορούσαμε να χωρίσουμε ένα σύστημα αισθητήρα σε 3 υποσυστήματα: Σύστημα τροφοδοσίας-διέγερσης, αισθητήρια διάταξη και σύστημα λήψης.



Σχήμα 4.1 Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μέτρησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα κυκλώματα διέγερσης και λήψης που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τις αισθητήριες διατάξεις μας.

4.1 Απαιτήσεις κυκλωμάτων διέγερσης

Πριν από το σχεδιασμό οποιουδήποτε κυκλώματος είναι αναγκαία η διαδικασία καθορισμού των απαιτήσεων.

Εν προκειμένω, η τροφοδοσία αισθητήρων MDL γίνεται συνήθως με παλμούς ρεύματος μικρής διάρκειας της τάξεως των microsecond (μs). Τα μέσα διέγερσης αποτελούν μικρές επαγωγές, στις περιπτώσεις κλασσικής διέγερσης με πηνία και αγώγιμες γραμμές στις περιπτώσεις διέγερσης με κάθετους αγωγούς (crosssections) και δίσκους δινορρευμάτων. Ακόμα, από το κύκλωμα αναμένεται οδήγηση σημαντικής έντασης ρεύματος της τάξεως των A. Οι παλμοί, απαιτείται να είναι απότομοι δηλαδή να παρουσιάζουν μικρό χρόνο ανόδου (rise time) και καθόδου (fall time) της τάξεως των nanosecond (ns). Τέλος, λόγω των πειραματικών αναγκών, είναι απαραίτητος ο έλεγχος και η δυνατότητα μεταβολής του κύκλου λειτουργίας (duty cycle) και συχνότητας του παλμού διέγερσης.

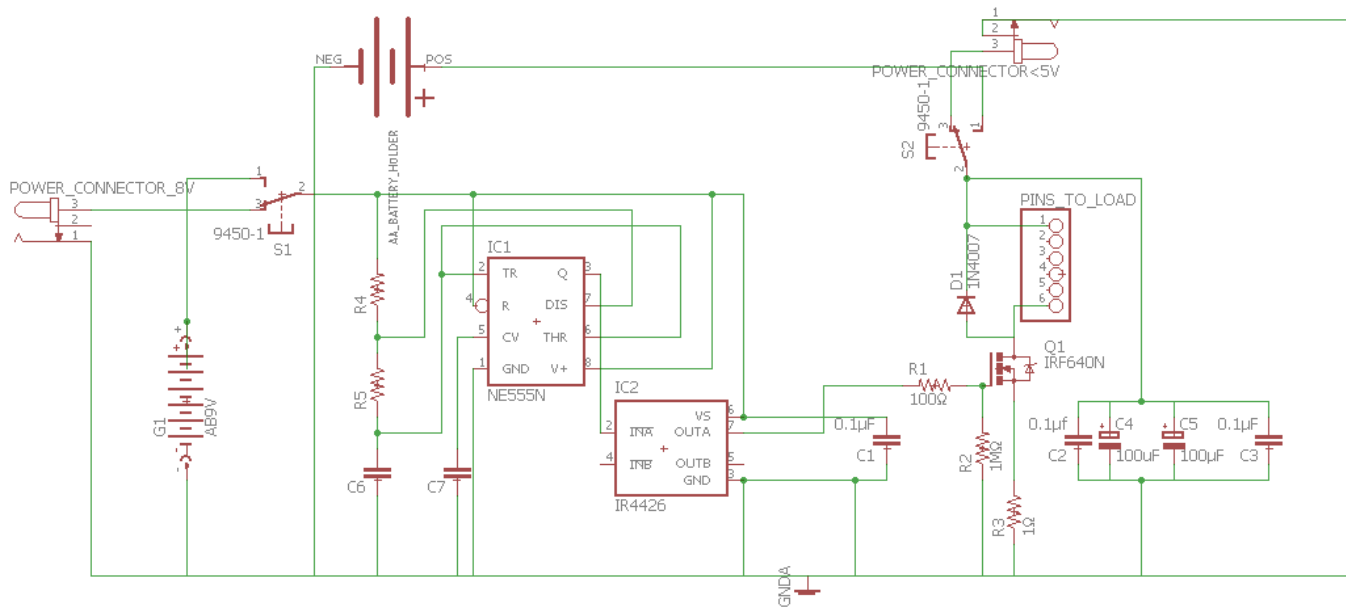
Συνοψίζοντας απαιτούνται:

- Μικρή διάρκεια διέγερσης (τάξεως μs)
- Υψηλή ένταση ρεύματος (τάξεως A)
- Ικανότητα οδήγησης ωμικοεπαγωγικών φορτίων
- Σύντομοι χρόνοι Rise/Fall time (τάξεως ns)
- Μεταβλητό Duty Cycle και συχνότητα λειτουργίας

4.2 Παρουσίαση κυκλώματος διέγερσης A

Σχεδιάστηκαν δύο κυκλώματα, το ένα φορητό (κύκλωμα A), υπό την έννοια ότι ο έλεγχος του παλμού διέγερσης (control) γίνεται από ταλαντωτή σε μορφή ολοκληρωμένου και απαιτεί μόνο DC τροφοδοσία χαμηλής τάσης $\leq 9V$ που μπορεί να γίνει και με μπαταρία. Στο δεύτερο (κύκλωμα B), ο έλεγχος του παλμού

διέγερσης γίνεται από γεννήτρια. Στη συνέχεια ακολουθεί το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος Α.



Σχήμα 4.2 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διέγερσης Α

Το κύκλωμα αποτελείται από δύο μέρη, το πρώτο μέρος είναι το κύκλωμα ελέγχου (control-circuit) και το δεύτερο είναι το διακοπτικό κύκλωμα (switching-circuit).

Ο πυρήνας του κυκλώματος ελέγχου είναι το ολοκληρωμένο NE555 που λειτουργεί ως ταλαντωτής με συγκεκριμένο duty cycle και συχνότητα που ορίζονται από τα στοιχεία R4, R5 και C6. Η έξοδος του είναι συνδεδεμένη με την είσοδο του IR4426, ενός οδηγού MOSFET χαμηλής πλευράς (low side MOSFET driver), που όπως μαρτυρά το όνομά του οδηγεί το τρανζίστορ.

Το διακοπτικό κύκλωμα αποτελείται από: το IRF640N σε λειτουργία διακόπτη, με τις αντιστάσεις πύλης του (R1, R2), το φορτίο στην πλευρά της τροφοδοσίας παράλληλο με δίοδο (επάνω), και μια αντίσταση αναφοράς (R3) προς τη γείωση (κάτω). Τέλος, παράλληλα σε όλο τον κλάδο υπάρχει μια συστοιχία πυκνωτών (C2, C3, C4, C5).

Η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος ελέγχου είναι $\leq 9V$ και η τροφοδοσία τού διακοπτικού κυκλώματος είναι $\leq 5V$.

Τέλος, στο σχέδιο υπάρχουν δυο διακόπτες οι οποίοι επιτρέπουν την επιλογή τροφοδοσίας από μπαταρία ή από εργαστηριακό τροφοδοτικό.

Σε συνέχεια αναλύεται το κυκλώματος, εξηγώντας σε βάθος τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες των ολοκληρωμένων και των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν.

4.3 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης A

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για την ενεργοποίηση-απενεργοποίηση του MOSFET απαιτείται ένα παλμικό σήμα ελέγχου στην πύλη του τρανζίστορ. Αυτό το σήμα προκύπτει από τον χρονοστή 555 σε λειτουργία ταλαντωτή ή αλλιώς ασταθούς πολυδονητή. Ανάμεσα στο παραπάνω σήμα ελέγχου και τη πύλη παρεμβάλλεται ένα στάδιο αντιστροφής με ικανότητα οδήγησης ρεύματος που υλοποιείται με τη χρήση του ολοκληρωμένου IR4426.

4.3.1 Ταλαντωτής 555

Περιγραφή ακροδεκτών και λειτουργίας:

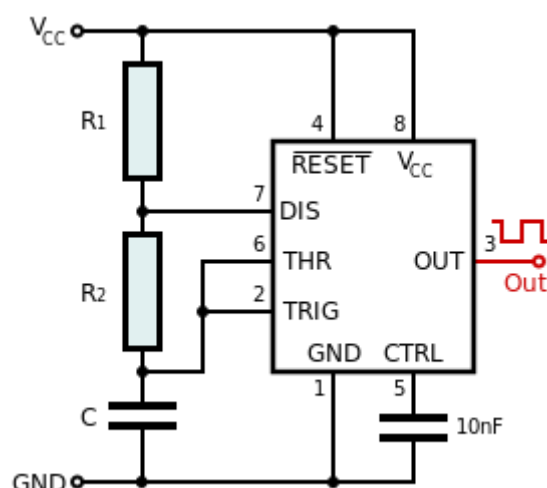
Pin 1 GND: Γείωση

Pin 2 Trigger: Θέτει την έξοδο High όταν η τάση του είναι κάτω από το $1/3$ του V_{CC}

Pin 3 Output: Έξοδος

Pin 4 Reset: Επανεκκίνηση, δεν χρησιμοποιείται στην ασταθή λειτουργία, συνδέεται στο V_{CC} .

Pin 5 Control Voltage: Ελέγχει τον εσωτερικό διαιρέτη τάσης, δεν χρησιμοποιείται, συνδέεται μέσω πυκνωτή στη γείωση.



Σχήμα 4.3

Συνδεσμολογία του 555 σε ασταθή λειτουργία

Pin 6 Threshold: Θέτει την έξοδο Low όταν η τάση του φτάσει πάνω από τα 2/3 του Vcc.

Pin 7 Discharge: Όταν η τάση εξόδου είναι Low επιτρέπει την εκφόρτιση του πυκνωτή C.

Στη συνδεσμολογία του Σχήματος 4.3 παρατηρούμε πως οι ακροδέκτες 2 και 6 (TRIG και THR) είναι συνδεδεμένοι στον πυκνωτή C. Οι μεταβάσεις δηλαδή των καταστάσεων υψηλή/χαμηλή(High/Low) και χαμηλή/υψηλή (Low/High) γίνονται με βάση την τάση που έχει στα άκρα του ο πυκνωτής. Η φόρτιση του γίνεται από το Vcc, μέσω των αντιστάσεων R1 και R2, ενώ η εκφόρτιση μόνο μέσω της R2 από τον ακροδέκτη 7.

Επομένως η συχνότητα και το duty cycle της παραγόμενης κυματομορφής εξαρτώνται από τις τιμές των αντιστάσεων R1, R2 και τη χωρητικότητα C. Οι σχέσεις που ισχύουν για αυτή τη λειτουργία είναι οι ακόλουθες:

$$T_{high} = \ln(2) \cdot C \cdot (R1 + R2) \quad (4.1)$$

$$T_{low} = \ln(2) \cdot C \cdot R2 \quad (4.2)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_{high} + T_{low}} = \frac{1}{\ln(2) \cdot C \cdot (R1 + 2R2)} \quad (4.3)$$

$$Duty\ Cycle = \frac{T_{high}}{T_{high} + T_{low}} = \frac{R1 + R2}{R1 + 2R2} \% \quad (4.4)$$

Εδώ παρουσιάζεται ένα πρόβλημα: από τη τελευταία σχέση προκύπτει, πως το Duty Cycle του 555 δεν μπορεί να είναι χαμηλότερο από 50%. Επομένως θα πρέπει να παραχθεί παλμός με πολύ μεγάλο duty cycle >99% και να ακολουθήσει ένα στάδιο αντιστροφής.

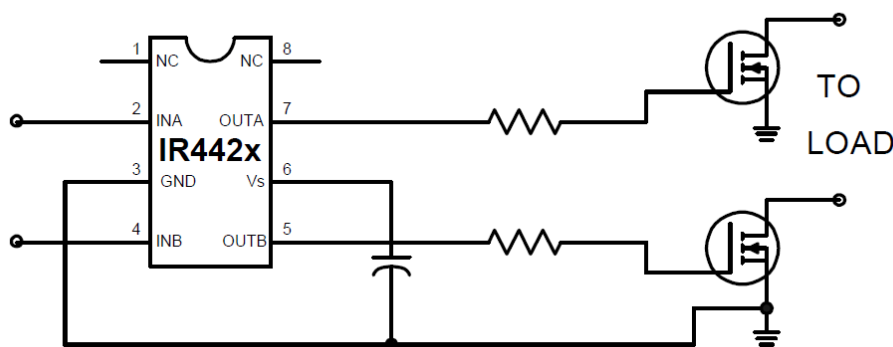
Ξεκινώντας από τις παραπάνω σχέσεις και έπειτα από πειραματισμό για συχνότητα $f = 1,4kHz$ και $T_{low} = 5\mu s$ προέκυψαν και οι τιμές των στοιχείων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν (αντίστοιχες στο σχηματικό R4, R5, C6):

$$R1=10k\Omega \quad R2=10\Omega \quad C=100nF$$

4.3.2 MOSFET driver IR4426

Σε αυτό το στάδιο έχουμε το σήμα ελέγχου το οποίο χρειάζεται αντιστροφή. Πέρα όμως από την αντιστροφή χρειάζεται και η ικανότητα οδήγησης ρεύματος το οποίο θα φορτίσει την χωρητικότητα της πύλης του MOSFET C_{ox} . Όσο πιο γρήγορα φορτίζει αυτή η χωρητικότητα, τόσο πιο γρήγορα 'ανεβαίνει' η τάση V_{GS} , η οποία ελέγχει το άνοιγμα-κλείσιμο του τρανζίστορ.

Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση MOSFET, ονομάζονται MOSFET drivers. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο που χρησιμοποιήθηκε έχει αναστρέφουσες εισόδους δηλαδή εκτελεί και τις δυο επιθυμητές λειτουργίες.



Σχήμα 4.4 Τυπική συνδεσμολογία Low side MOSFET driver από το Datasheet

Το IR4426 έχει δύο κανάλια (στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται το ένα). Όταν στην είσοδό του εφαρμόζεται χαμηλή τάση $<0.8V$ στην έξοδο του βγάζει υψηλή V_s , ενώ αντίστοιχα όταν στην είσοδο εφαρμόζεται υψηλή $>2.7V$, στην έξοδο του βγάζει $0V$.

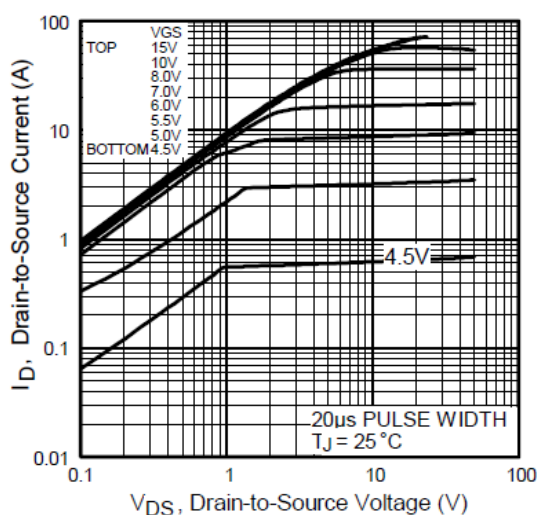
Ο όρος low side περιγράφει συνδεσμολογίες όπου το τρανζίστορ βρίσκεται στη πλευρά της γείωσης, κάτω από το φορτίο το οποίο βρίσκεται στη πλευρά της τάσης. Αντίστοιχα, στις high side συνδεσμολογίες το τρανζίστορ βρίσκεται πάνω από το φορτίο στην πλευρά της τροφοδοσίας.

Θα αναφερθεί σύντομα η λειτουργία των αντιστάσεων R1, R2 στη πύλη του MOSFET. Η πρώτη τοποθετείται προληπτικά για να εξαλείψει τη πιθανότητα παρασιτικής ταλάντωσης λόγω της χωρητικότητας της πύλης και της αυτεπαγωγής του καλωδίου σύνδεσης [15] (φαινόμενο Ringing), ενώ η δεύτερη εξασφαλίζει την εκφόρτιση της χωρητικότητας πύλης προς τη γείωση, σε κάθε περίπτωση.

4.3.3 Διακοπτικό κύκλωμα

Ο διακόπτης του κυκλώματος υλοποιείται με το MOSFET IRF640N η χαρακτηριστική καμπύλη $I_D(V_{DS})$ του οποίου, δίδεται στο διάγραμμα 4.5.

Από την χαρακτηριστική του transistor προκύπτει πως για τιμές τάσης πύλης $V_{GS}=8V$ και άνω, η συμπεριφορά της συσκευής είναι ίδια και το ρεύμα I_D εξαρτάται μόνο από τη V_{DS} δηλαδή λειτουργεί ως μια μικρή αντίσταση (της τάξεως των mΩ, λειτουργία κορεσμού).



Σχήμα 4.5 Χαρακτηριστική καμπύλη $I_D(V_{DS})$ για διάφορες V_{GS} από το Datasheet

Επομένως γι' αυτό επιλέγεται η τάση V_G άνω των 8V, με τη παραδοχή πως η V_S είναι κοντά στα 0V. Ενώ για $V_{GS} = 0V$ το ρεύμα δεν διαρρέει τον κάθετο κλάδο (αποκοπή).

Η πλευρά του φορτίου

Στην υποδοχή του τρανζίστορ βρίσκεται το φορτίο παράλληλο σε δίοδο. Η δίοδος είναι απαραίτητη για την αποφυγή επαγωγικών κορυφών (inductive spikes). Επαγωγικές κορυφές παρουσιάζονται όταν ο διακόπτης κλείνει, αλλά το επαγωγικό φορτίο συνεχίζει να αποδίδει ρεύμα, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται φορτία στην υποδοχή του τρανζίστορ όπου και εμφανίζεται ανεπιθύμητη κορυφή τάσης. Η αντι-παράλληλη δίοδος ελεύθερης διέλευσης (freewheeling/flyback diode) παρέχει μια διέξοδο σε αυτά τα φορτία και εξαλείφει [15], τις περισσότερες φορές, πλήρως αυτό το φαινόμενο.

Αντίσταση αναφοράς προς τη γείωση

Η μικρή αντίσταση R_3 , που βρίσκεται κάτω από το τρανζίστορ, εξυπηρετεί σαν αναφορά ως προς τη γείωση ώστε να παρατηρείται η τάση σε σχέση με τη γείωση πάνω σε ωμικό φορτίο και να επιτρέπεται η μέτρηση του ρεύματος I_d εύκολα από τον παλμογράφο. Ένα μειονέκτημα που εισάγει αυτή η αντίσταση, είναι πως αλλάζει την τιμή της V_{gs} καθώς ο ακροδέκτης source δεν βρίσκεται πλέον γειωμένος όπως είναι σε συνδεσμολογίες παρόμοιες του Σχήματος 4.4. Ωστόσο για τάση τροφοδοσίας 3V και φορτίο μια μικρή επαγωγή 5 περιελίξεων, μετά από μετρήσεις εξήχθη το συμπέρασμα πως η τάση V_s φτάνει περίπου 1.5V. Σε αυτή την περίπτωση η τάση V_{gs} γίνεται 7.5V και η συμπεριφορά ως διακόπτης συνεχίζει να είναι ικανοποιητική.

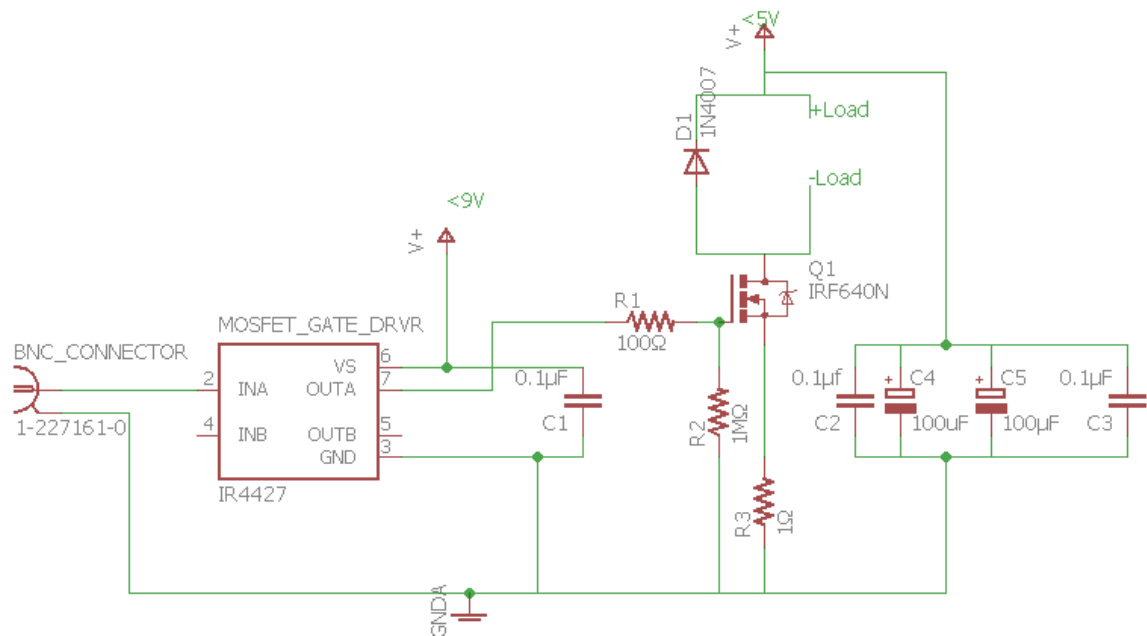
Πυκνωτές σταθεροποίησης

Οι πυκνωτές παράλληλοι στη τροφοδοσία είναι πυκνωτές σταθεροποίησης τάσης [15, 16]. Σε κάθε διακοπτικό κύκλωμα, σε μια απότομη μετάβαση off/on, απαιτείται από τη πηγή τροφοδοσίας ρεύμα. Στην περίπτωση που η πηγή δεν μπορεί να ακολουθήσει την ταχύτητα του κυκλώματος, παρατηρείται βύθιση τάσης. Αντίστοιχα σε μια μετάβαση on/off η πηγή συνεχίζει να αποδίδει ρεύμα

δημιουργώντας κορυφές τάσης. Οι πυκνωτές που έχουν τοποθετηθεί, 2 κεραμικοί πολλαπλών επιπέδων (mlccs) 0,1μF και 2 ηλεκτρολυτικοί 100μF, σταθεροποιούν την τάση τροφοδοσίας αφού παρέχουν αρχικά ρεύμα κατά την εκφόρτισή τους και απορροφούν κατά τη φόρτιση αντίστοιχα.

4.4 Παρουσίαση κυκλώματος διέγερσης B

Το δεύτερο κύκλωμα που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της εργασίας φαίνεται στο επόμενο σχηματικό.



Σχήμα 4.6 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος B

Το κύκλωμα B είναι παρόμοιο με αυτό της προηγούμενης παραγράφου, αποτελείται και αυτό δυο μέρη, κύκλωμα ελέγχου και διακοπτικό, αλλά παρουσιάζει τη διαφορά πως το σήμα ελέγχου παράγεται από γεννήτρια.

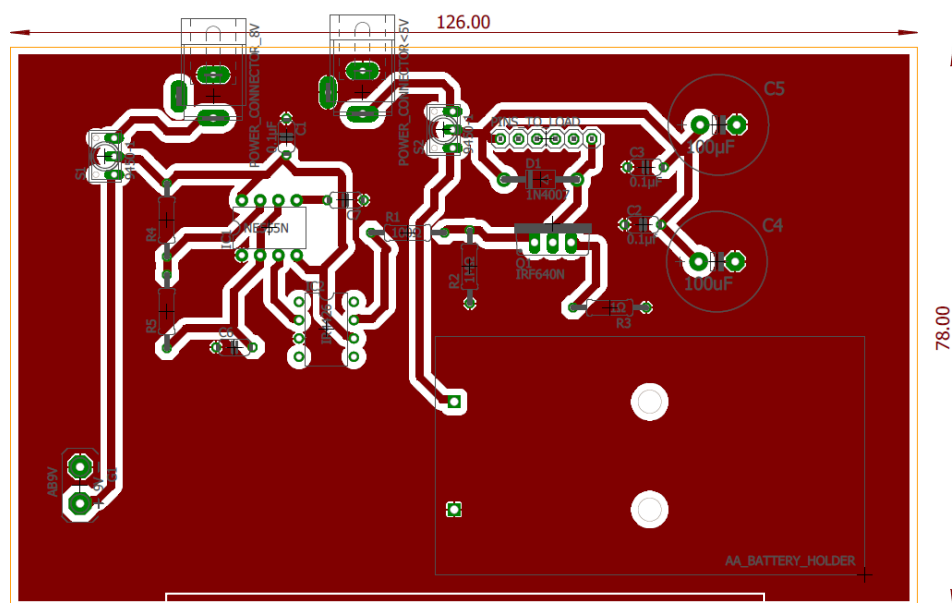
4.5 Ανάλυση κυκλώματος διέγερσης B

Μιας και οι διαφορές είναι μικρές ανάμεσα στα δύο κυκλώματα, θα γίνει αναφορά μόνο στο αντί του IR4426 low side MOSFET driver, χρησιμοποιήθηκε το IR4427 το οποίο δεν έχει αναστρέφουσες εισόδους αλλά κατά τα άλλα η λειτουργία του είναι ίδια. Η διαφορά λοιπόν είναι, ότι το σήμα ελέγχου δεν απαιτεί αντιστροφή, αφού δίνεται κατευθείαν από γεννήτρια.

Το IR4427 έχει δύο κανάλια (εμείς χρησιμοποιούμε το ένα) και όταν στην είσοδό του εφαρμόζεται χαμηλή τάση $<0.8V$ στην έξοδο του βγάζει χαμηλή τάση $0V$, ενώ αντίστοιχα όταν στην είσοδο εφαρμόζεται υψηλή $>2.7V$ στην έξοδό του βγάζει V_s .

4.6 Κατασκευή κυκλωμάτων διέγερσης

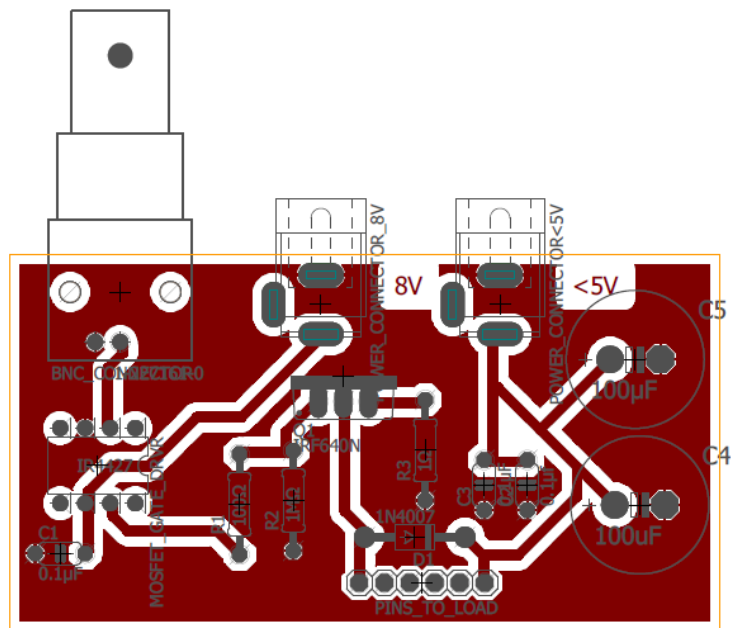
Τα κυκλώματα σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα σχεδίασης Autodesk Eagle 8.3.1, στο οποίο έγιναν τόσο τα σχηματικά διαγράμματα όσο και τα σχέδια της πλακέτας (board layout). Χρησιμοποιήθηκαν φωτοευαίσθητες πλακέτες, οι οποίες εκτέθηκαν σε υπεριώδη ακτινοβολία για την δημιουργία αγώγιμων δρόμων και κολλήθηκαν στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.



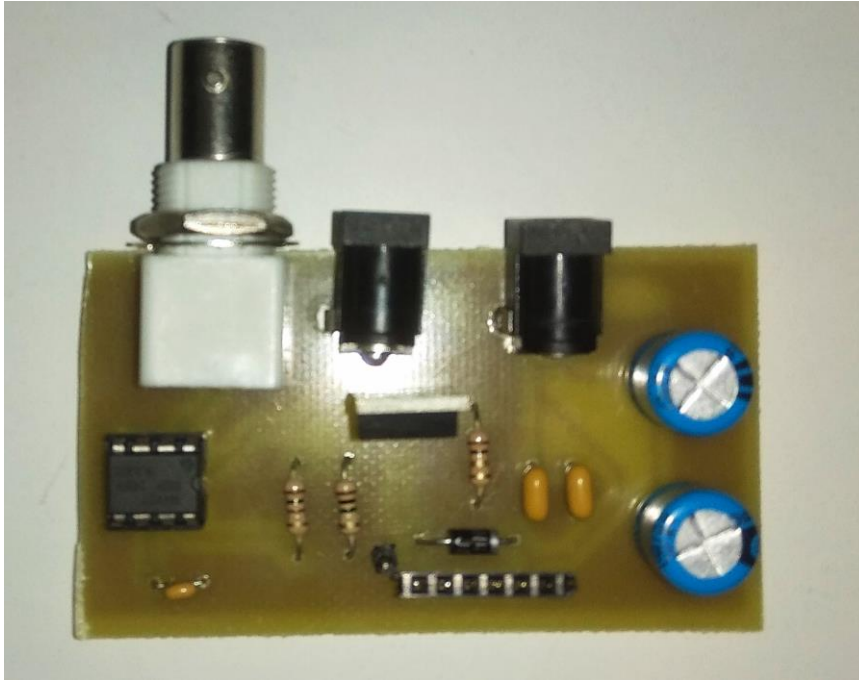
Σχήμα 4.7 Σχέδιο πλακέτας για το κύκλωμα A



Σχήμα 4.8 Η πλακέτα και η συσκευασία του κυκλώματος Α



Σχήμα 4.9 Σχέδιο πλακέτας για το κύκλωμα Β



Σχήμα 4.10 Η πλακέτα του κυκλώματος Β

Τα χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων διέγερσης που επιτεύχθηκαν έχοντας ως φορτίο μια μικρή επαγωγή 5 περιελίξεων, τυλιγμένη από σύρμα διαμέτρου 0.1mm είναι προσεγγιστικά:

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων διέγερσης

Για το κύκλωμα διέγερσης Α:

Συχνότητα διέγερσης	1.4kHz
Ένταση ρεύματος	$\leq 5A$
Διάρκεια παλμού	5 μs
Rise/Fall time	240/180ns

Για το κύκλωμα διέγερσης Β:

Συχνότητα διέγερσης	1Hz-5kHz
Ένταση ρεύματος	$\leq 5A$
Διάρκεια παλμού	$\geq 16\mu s$
Rise/Fall time	240/180ns

Η λειτουργία του κυκλώματος Α κρίνεται καλή. Με βάση το σήμα λήψης έχει επιτευχθεί η δημιουργία διακριτών, σύντομων και απότομων ελαστικών παλμών στο MDL, ακόμα και με τροφοδοσία μέσω μπαταρίας. Παρόλα αυτά η διακοπτική συμπεριφορά του κυκλώματος δεν είναι ιδανική, συγκεκριμένα παρατηρήθηκε πως οι πυκνωτές σταθεροποίησης δεν έχουν εξαλείψει πλήρως τις ανεπιθύμητες

βυθίσεις και κορυφές ενώ η δίοδος ελεύθερης διέλευσης φάνηκε πολύ αργή για την εφαρμογή μας. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση δευτερευόντων ανεπιθύμητων κορυφών στη λήψη, ωστόσο δεν παρουσιάζουν μεγάλο πρόβλημα στην πράξη (θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη παράγραφο 5.3).

Η λειτουργία του κυκλώματος Β παρότι παρουσιάζει μια σημαντική αστοχία. Κρίνεται ικανοποιητική, αφού υλοποιήσαμε παλμική διέγερση μεταβλητής διάρκειας και συχνότητας αλλά λόγω περιορισμών, συγκεκριμένα του ολοκληρωμένου IR4427, η διάρκεια διέγερσης δεν μπορεί να μειωθεί κάτω από 16μs. Παρόλα αυτά το κύκλωμα είναι χρήσιμο για τη μελέτη μακρύτερων παλμών. Τέλος, η διακοπτική του συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή του κυκλώματος Α.

4.7 Απαιτήσεις κυκλώματος ενίσχυσης

Τα σήματα εξόδου που λαμβάνονται από το πηνίο είναι πολύ ασθενή (της τάξης των mV) και για αυτό το λόγο κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή ενός κυκλώματος ενίσχυσης.

Οι απαιτήσεις που τέθηκαν για το κύκλωμα λήψης περιλαμβάνουν:

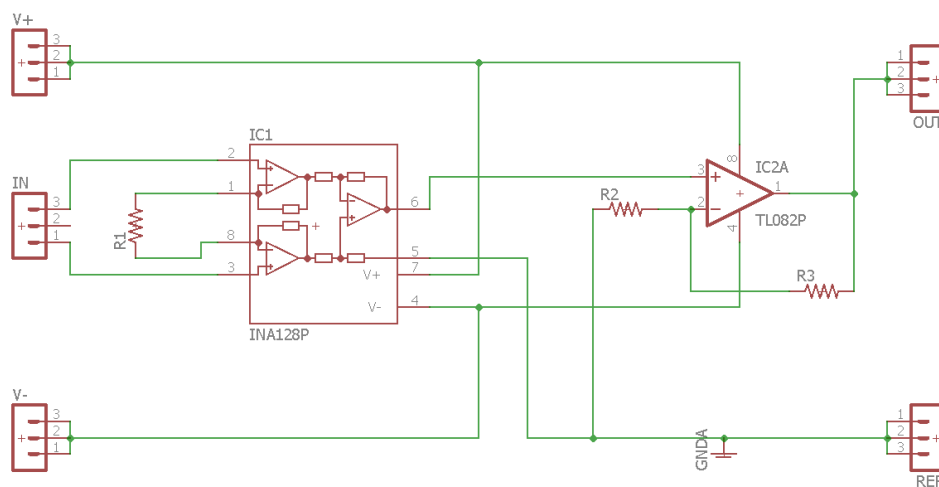
Υψηλό κέρδος: της τάξεως του $G=1000$ ώστε να έχουμε έξοδο της τάξεως των Volts

Συγκεκριμένο εύρος ζώνης: μετά από γρήγορο μετασχηματισμό Φουριέ (Fast Fourier Transform) που πραγματοποιήθηκε στο μη ενισχυμένο σήμα λήψης, βρέθηκε πως το χρήσιμο φασματικό περιεχόμενο του σήματος βρίσκεται στη περιοχή έως 200kHz, επομένως απαιτείται σταθερή ενίσχυση σε αυτό το εύρος, ώστε να μην υπάρχει παραμόρφωση του σήματος.

Υψηλός λόγος απόρριψης κοινού σήματος (CMRR): Η ενίσχυση γίνεται στο ασθενές σήμα που λαμβάνεται στους ακροδέκτες του πηνίου λήψης, είναι σημαντικό λοιπόν να αγνοούμε κοινό σήμα όπου αυτό μπορεί να προκύπτει, για παράδειγμα από η/μ παρεμβολή, θόρυβο κτλ .

4.8 Παρουσίαση κυκλώματος ενίσχυσης

Το κύκλωμα ενίσχυσης που κατασκευάστηκε, αποτελείται από 2 στάδια, το πρώτο στάδιο είναι ένας ενισχυτής οργανολογίας (instrumentation amplifier INA128), ενώ το δεύτερο ένα απλός τελεστικός ενισχυτής (TL082) συνδεδεμένος σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.



Σχήμα 4.11 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος λήψης

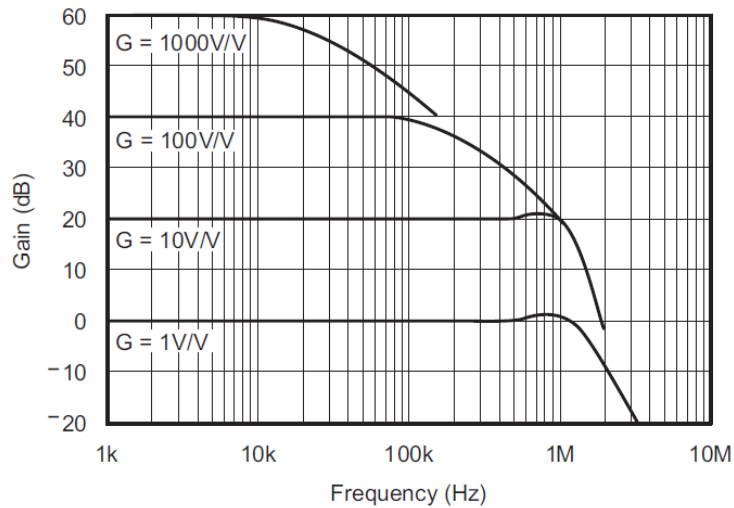
Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της ενίσχυσης και η απόρριψη του κοινού σήματος. Το κέρδος του πρώτου σταδίου προκύπτει συνδέοντας την αντίσταση $R1$ (βλέπε σχηματικό) με βάση τη παρακάτω σχέση:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R1} \quad (4.5)$$

Για κέρδος έως περίπου 100 παρατηρείται σταθερή ενίσχυση του σήματος (στο εύρος 0-200kHz) όπως φαίνεται και από το bode διάγραμμα του ολοκληρωμένου.

Το δεύτερο στάδιο ενίσχυσης έχει κέρδος περίπου 10 και μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Η σχέση κέρδους της μη αναστρέφουσας είναι γνωστή και ίση με

$$G = 1 + \frac{R3}{R2} \quad (4.6)$$

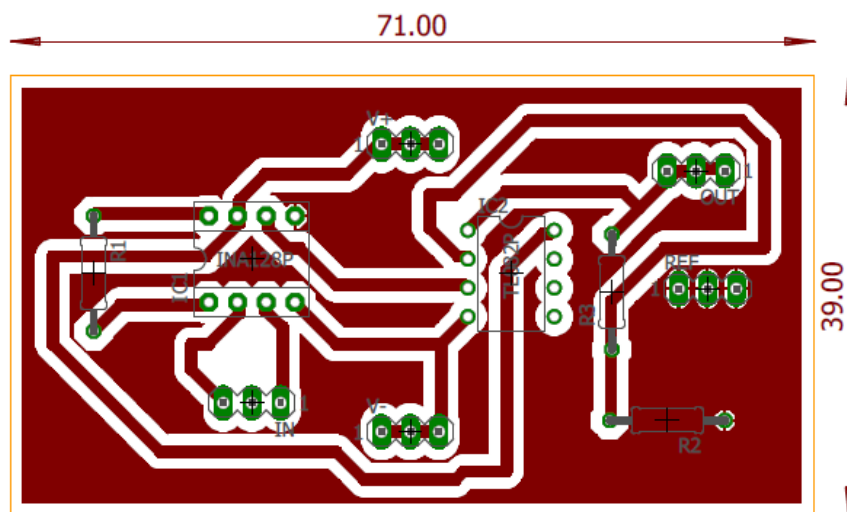


Σχήμα 4.12 Διάγραμμα Bode του INA128

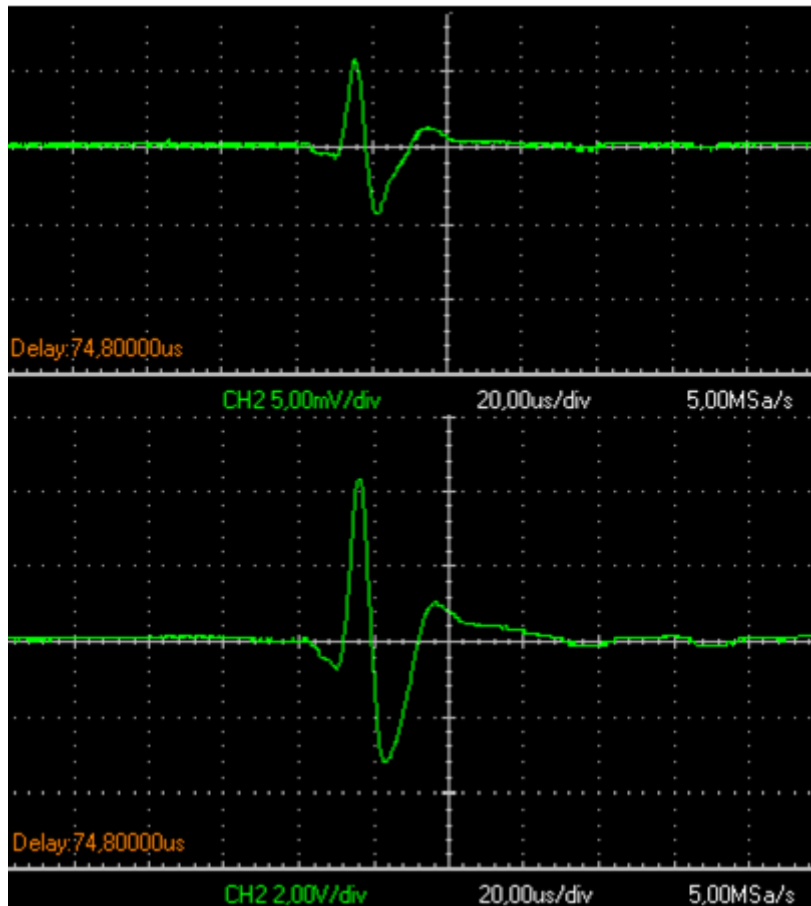
Εν προκειμένω, χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις $R3 = 1500\Omega$ και $R2 = 160\Omega$. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει συνολικό κέρδος περίπου 1000. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως η βαθυπερατή συμπεριφορά του πρώτου σταδίου εξυπηρετεί και ως φίλτρο καθώς ο τυχών υψίσυχνος θόρυβος βρίσκεται πέραν της συχνότητας αποκοπής-3dB.

4.9 Κατασκευή κυκλώματος ενίσχυσης

Η κατασκευή και αυτού του κυκλώματος έγινε όπως εξηγήθηκε και στην παράγραφο 4.6. Ακολουθούν το σχέδιο πλακέτας και ένα παράδειγμα εισόδου εξόδου.



Σχήμα 4.13 Σχέδιο πλακέτας για το κύκλωμα λήψης



Σχήμα 4.14 Σήμα στη λήψη πριν (επάνω) και μετά την ενίσχυση (κάτω)

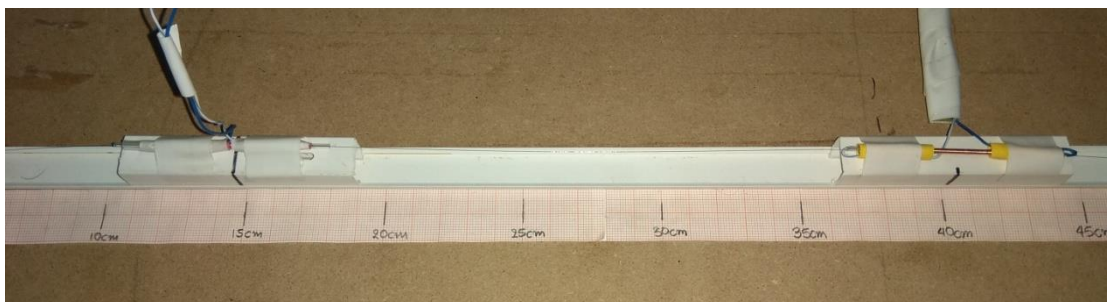
Όπως φαίνεται και στη παραπάνω εικόνα παλμογράφου το κύκλωμα ενίσχυσης λειτουργεί όπως αναμένεται χωρίς παραμόρφωση του σήματος και μάλιστα με πολύ μικρό θόρυβο στην έξοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΗ ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ MDL

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα παρουσιαστεί η απλή διάταξη MDL με πηνίο στη διέγερση και στη λήψη, όπως αυτή κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της εργασίας. Στη συνέχεια θα διερευνηθούν πειραματικά οι ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης και θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν στην πράξη το σχεδιασμό αισθητήρων.

5.1 Κατασκευή της βασικής διάταξης

Η διάταξη κατασκευάστηκε σε ξύλινη βάση, πάνω στην οποία κολλήθηκε ευθύγραμμη πλαστική ράγα που επιτρέπει την ελεύθερη μετατόπιση των δυο πηνίων πάνω σε αυτή.



Σχήμα 5.1 Φωτογραφία της βασικής διάταξης MDL

Ο πυρήνας διέρχεται μέσα από τα δυο σωληνοειδή πηνία και τερματίζεται με κολλητική ταινία. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο να μην χρησιμοποιηθούν καθόλου μεταλλικά υλικά όπως βίδες και καρφιά. Το πηνίο διέγερσης συνδέεται πάνω στο κύκλωμα διέγερσης, ενώ το πηνίο λήψης συνδέεται στον παλμογράφο.

Δίπλα στη ράγα έχει τοποθετηθεί μιλιμετρέ χαρτί και έχουν σημειωθεί οι θέσεις από 0 έως 65cm ώστε να μπορούν να μετρηθούν οι αποστάσεις ανάμεσα στα κέντρα των πηνίων.

5.2 Λειτουργίας βασικής διάταξης MDL

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της διάταξης, περιγράφοντας παράλληλα το φαινόμενο. Θα παρουσιαστούν ακόμα πραγματικά σήματα όπως λήφθηκαν από το παλμογράφο και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα.

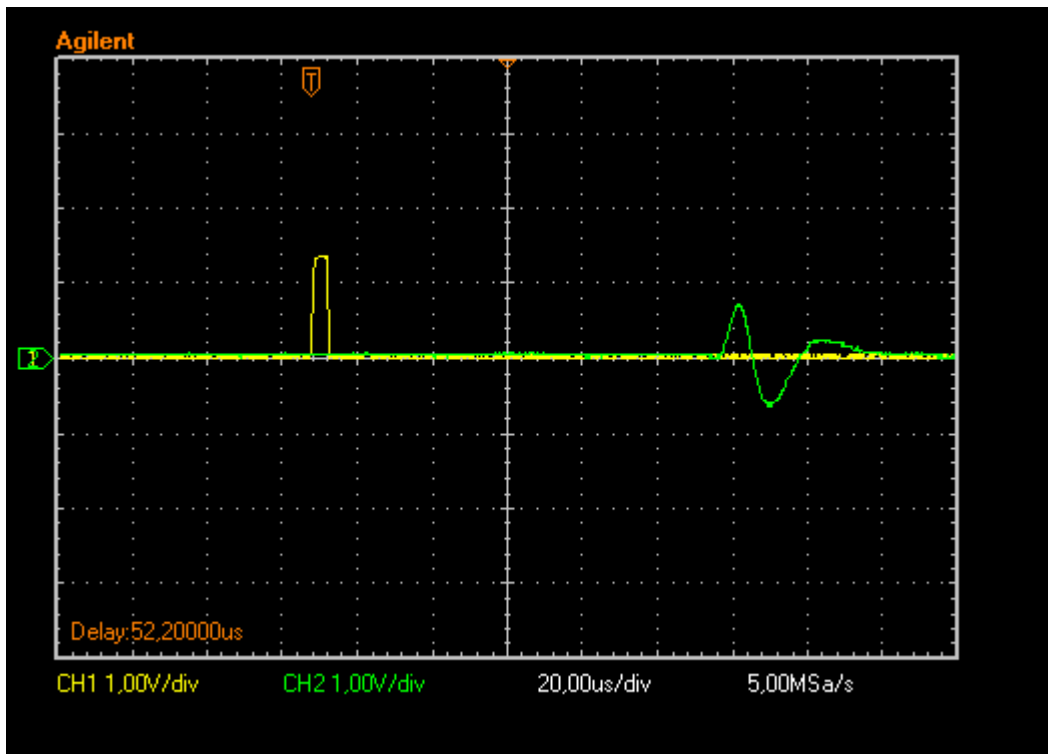
Το κινητό πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται παλμικά. Το παλμικό μαγνητικό πεδίο που παράγει το πηνίο προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής κατά τον οριζόντιο άξονα και δημιουργεί μικροπαραμορφώσεις στην περιοχή του πυρήνα μέσα στο πηνίο. Το άθροισμα αυτών των μικροπαραμορφώσεων συνθέτει ελαστικό παλμό που διαδίδεται κατά μήκος του MDL, το οποίο λειτουργεί ως κυματοδηγός. Στο ακίνητο πηνίο λήψης, επάγεται τάση καθώς οι μικροπαραμορφώσεις προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα του πυρήνα, κατά τον οριζόντιο άξονα προκαλώντας αλλαγή της μαγνητικής ροής. Το σήμα που λαμβάνουμε έχει τη μορφή πρώτης παραγώγου της διέγερσης.

Το πηνίο διέγερσης είναι 5 περιελίξεων, τυλιγμένο με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm. Το ρεύμα διέγερσης είναι περίπου 1.5 A, διάρκειας 5μs. Η τάση τροφοδοσίας του διακοπτικού κυκλώματος είναι 3V.

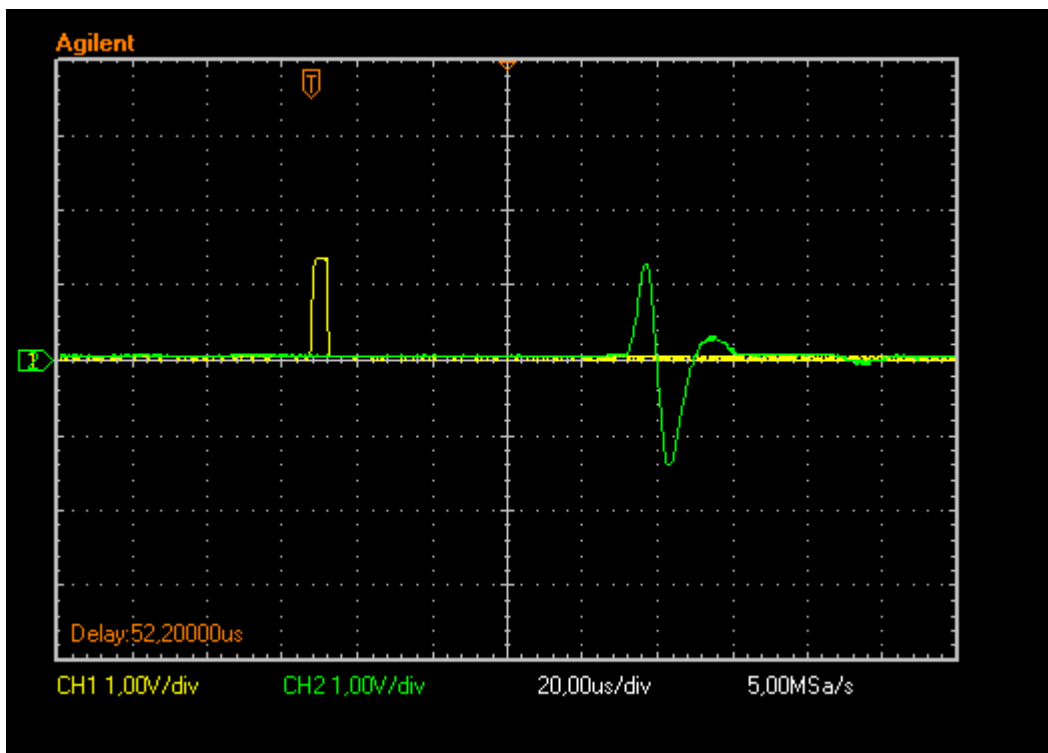
Το πηνίο λήψης είναι 200 περιελίξεων, τυλιγμένο με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm.

Στο κανάλι 1 του παλμογράφου με κίτρινο χρώμα φαίνεται ο παλμός διέγερσης μετρημένος πάνω στην αντίσταση αναφοράς προς τη γείωση του κυκλώματος διέγερσης A. Στο δεύτερο κανάλι με πράσινο χρώμα φαίνεται το ενισχυμένο σήμα του πηνίου λήψης.

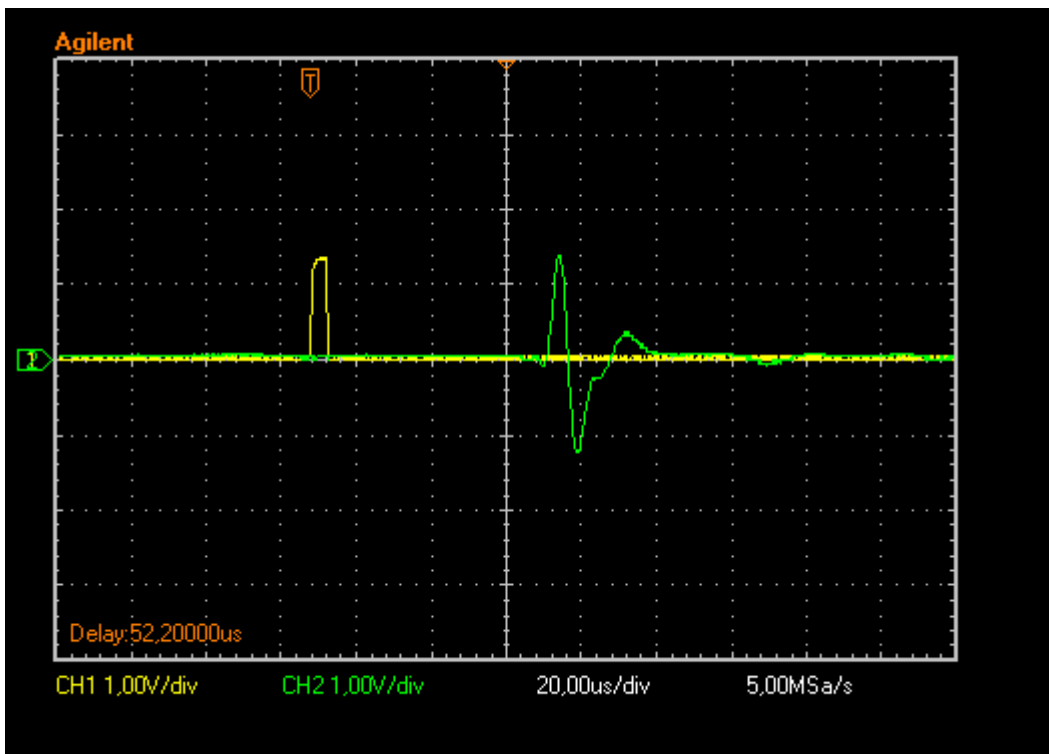
Πλησιάζουμε το πηνίο λήψης στο σταθερό πηνίο διέγερσης. Για αποστάσεις $x=50\text{cm}$, $x=40\text{cm}$, $x=30\text{cm}$, $x=20\text{cm}$ και $x=10\text{cm}$ λαμβάνουμε στον παλμογράφο τις παρακάτω κυματομορφές:



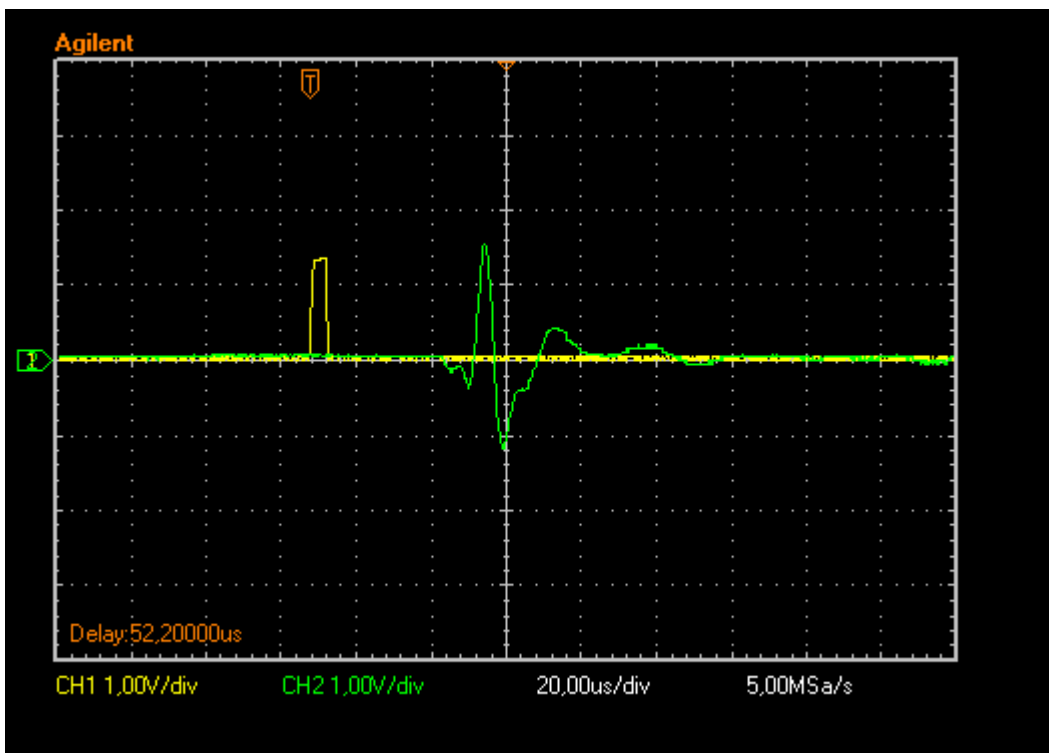
Σχήμα 5.2 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για απόσταση $x=50\text{cm}$



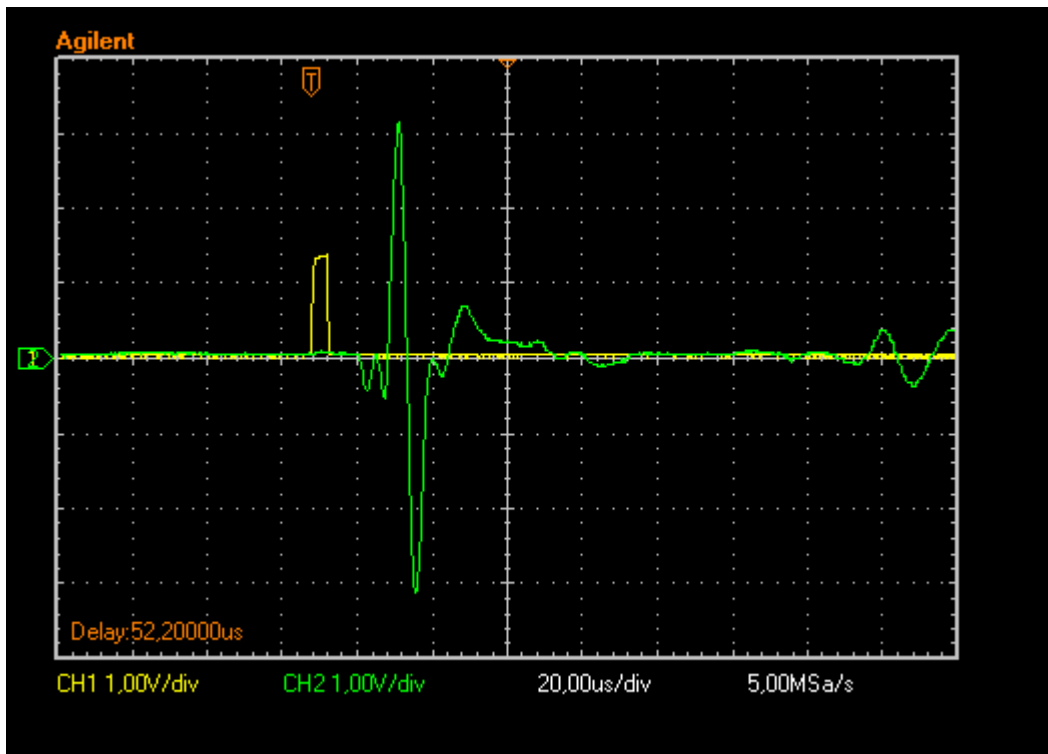
Σχήμα 5.3 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για απόσταση $x=40\text{cm}$



Σχήμα 5.4 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για απόσταση $x=30\text{cm}$



Σχήμα 5.5 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για απόσταση $x=20\text{cm}$



Σχήμα 5.6 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για απόσταση $x=10\text{cm}$

Από τις παραπάνω εικόνες παλμογράφου, φαίνεται και η συμπεριφορά της απλής διάταξης. Καθώς πλησιάζουμε την κινητή διέγερση προς τη σταθερή λήψη, από δεξιά προς τα αριστερά, λαμβάνεται ο παλμός νωρίτερα στο χρόνο αφού η απόσταση που έχει να διανύσει μειώνεται. Ακόμα παρατηρείται και η απόσβεση που υφίσταται ο παλμός και είναι ανάλογη της απόστασης. Τέλος στο Σχήμα 5.6 φαίνεται και ένας δεύτερος παλμός που προκύπτει από την ανάκλαση του πρώτου στο τέρμα της γραμμής καθυστέρησης.

Αυτή η διάταξη λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο λειτουργούν και ευρείας χρήσης εμπορικοί αισθητήρες. Όλοι αυτοί οι αισθητήρες, βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου (καθυστέρηση) μεταξύ δυο σημάτων, ενός σήματος αναφοράς σταθερού ως προς τη θέση και ενός άλλου εξαρτημένου από τη θέση.

Η ευαισθησία και η αβεβαιότητα σε αυτές τις διατάξεις έχει να κάνει κυρίως με την ταχύτητα διάδοσης και την ομοιομορφία της ταχύτητας που παρουσιάζει ο πυρήνας καθώς και από την σταθερότητα του κινητού πηνίου.

Θα συνεχίσουμε δείχνοντας την σχέση πρώτης παραγώγου που παρουσιάζει το σήμα λήψης σε σχέση με τη διέγερση.

5.3 Σχέση πρώτης παραγώγου λήψης-διέγερσης

Το σχήμα του παλμού λήψης για συγκεκριμένο πυρήνα, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες: από την μορφή του παλμού ρεύματος διέγερσης, από το προφίλ της περιοχής διέγερσης και λήψης (ανομοιομορφία), από την εξάρτηση με το πεδίο πόλωσης και γενικότερα από τις ιδιότητες των MDL. Σε αυτή την ενότητα θα ασχοληθούμε με τον πρώτο παράγοντα, πραγματοποιώντας το εξής πείραμα:

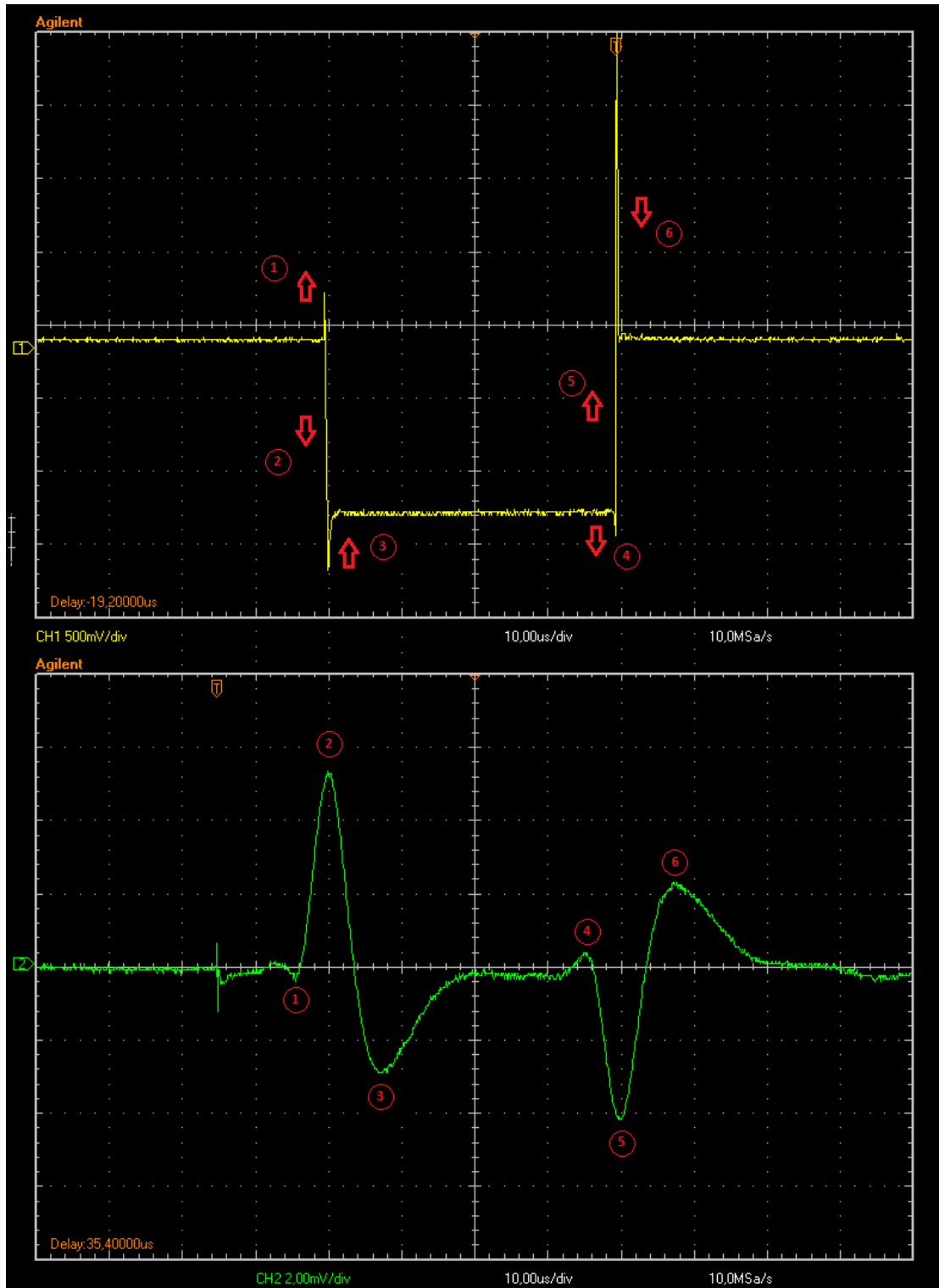
Το πηνίο διέγερσης (5 περιελίξεων, κατασκευασμένο με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) τροφοδοτείται με παλμικό ρεύμα, μεγάλης σχετικά διάρκειας, 40μs. Το πηνίο λήψης (200 περιελίξεων, κατασκευασμένο με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) βρίσκεται σε κοντινή απόσταση, <15cm από τη διέγερση.

Στα Σχήματα 5.7 με κίτρινο φαίνεται η τάση στην υποδοχή του MOSFET, δηλαδή στον αρνητικό ακροδέκτη του φορτίου (LOAD-). Η στάθμη αναφοράς της διέγερσης είναι 2.5V. Η τάση τροφοδοσίας παραμένει σχεδόν σταθερή στο θετικό ακροδέκτη του φορτίου (LOAD+) και είναι ίση με 2.5V, επομένως η εικόνα του παλμογράφου μας δίνει την μορφή που παρουσιάζει η πτώση τάσης πάνω στο φορτίο και είναι ανάλογη του ρεύματος τροφοδοσίας.

Με πράσινο φαίνεται το σήμα του ελαστικού παλμού στο πηνίο λήψης.

Στην παρακάτω εικόνα έχουν σημειωθεί 6 ορατές μεταβολές που παρουσιάζει το ρεύμα διέγερσης που αντιστοιχούν σε 6 διαφορετικές κορυφές στην επαγόμενη τάση. Ένας ιδανικός παλμός τροφοδοσίας θα παρουσίαζε μόνο τις κλίσεις 2 και 5 και η επαγόμενη τάση μόνο τις αντίστοιχες κορυφές. Ωστόσο καθώς η διέγερσή μας δεν είναι τέλεια, παρουσιάζονται κάποιες επιπλέον κλίσεις, που προκαλούν κάποια επιπλέον μεταβολή της μαγνητικής ροής, στο άξονα της γραμμής καθυστέρησης και μεταφράζονται ως επιπλέον κορυφές στο σήμα λήψης. Τέλος παρατηρείται πως το σήμα λήψης έχει διαχωριστεί σε δυο σήματα, αφού στο χρόνο ανάμεσα στη κορυφή

3 και 4 δεν υπάρχει μεταβολή της μαγνητικής ροής και άρα επαγωγική τάσης στο πηνίο.



Σχήμα 5.7 Τάση στον αρνητικό ακροδέκτη του φορτίου (επάνω) και σήμα λήψης (κάτω)

5.4 Καμπύλη ομοιομορφίας

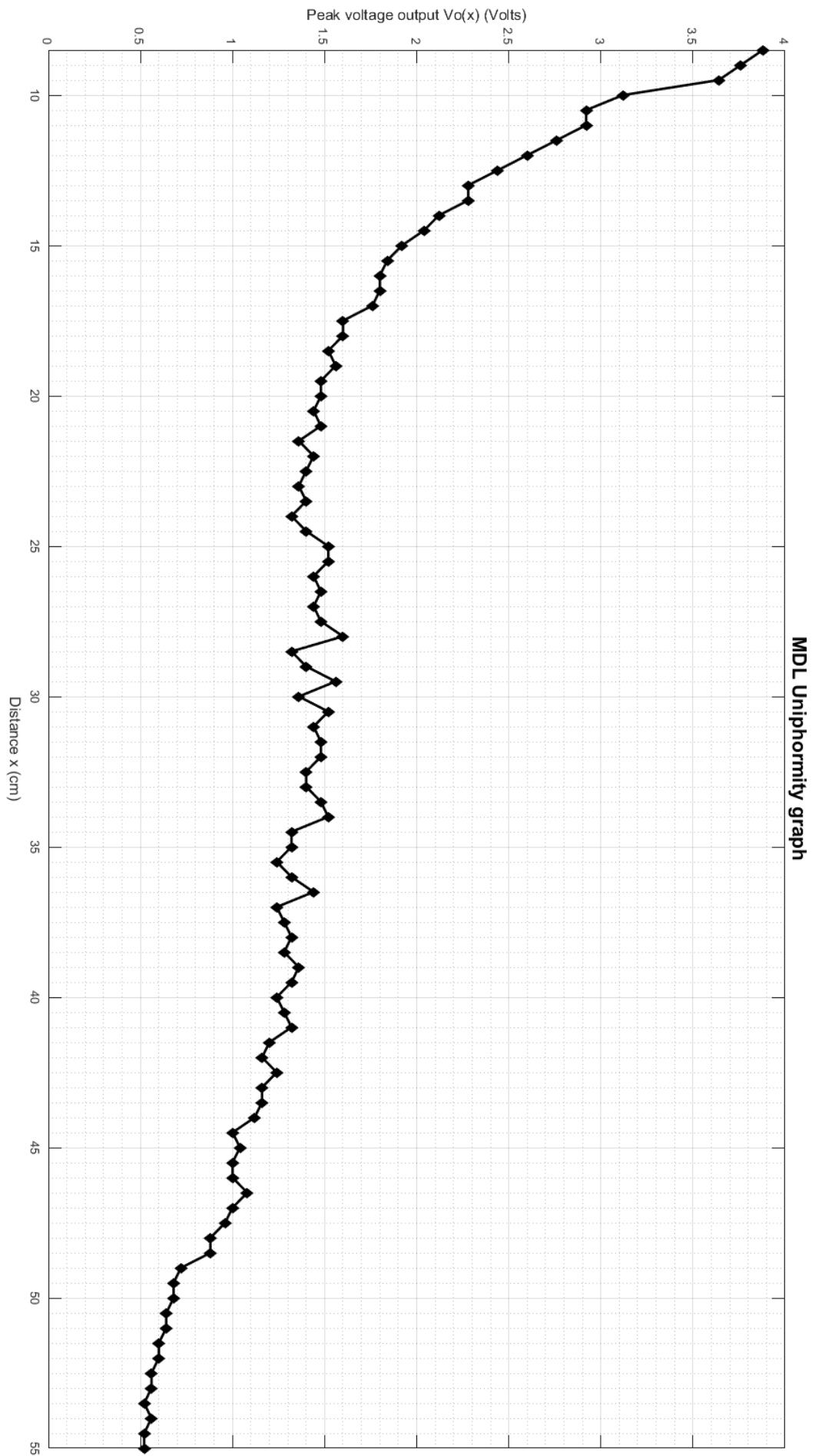
Η καμπύλη ομοιομορφίας, όπως ορίστηκε και στο κεφάλαιο 3, είναι η μέγιστη τάση $V_p(x)$ που λαμβάνεται σε ένα πηνίο λήψης συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα στη διέγερση και τη λήψη κάτω από τις ίδιες συνθήκες μαγνητικού πεδίου πόλωσης και παλμικού πεδίου.

Προκειμένου να χαραχθεί η καμπύλη ομοιομορφίας του υλικού, πραγματοποιήθηκε το παρακάτω πείραμα: Το πηνίο λήψης (200 περιελίξεων, κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) παραμένει σταθερό στη θέση $x=65\text{cm}$. Το πηνίο διέγερσης (5 περιελίξεων, κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού διαμέτρου 0,1mm) τροφοδοτείται με ρεύμα περίπου 1.5A διάρκειας 5 μs (τάση τροφοδοσίας διακοπτικού κυκλώματος 3V). Τοποθετείται αρχικά στη θέση $x=10\text{cm}$ και μετατοπίζεται έως τη θέση $x=56.5\text{cm}$ με βήμα 0.5cm. Λαμβάνουμε συνολικά 94 μετρήσεις.

Λίγα λόγια για την επεξεργασία των μετρήσεων: από το πρόγραμμα του παλμογράφου λάβαμε σε υπολογιστικό φύλλο Excel τον πίνακα με 2 στήλες, την τάση και το χρόνο του κάθε δείγματος, 1200 δείγματα για κάθε μέτρηση. Στη συνέχεια γράφτηκε κώδικας στο Matlab που διαβάζει τα δείγματα και βρίσκει τη μέγιστη τιμή $V_p(x)$ για κάθε μέτρηση και τέλος τυπώνει το διάγραμμα.

Στο Σχήμα 5.8 που προέκυψε, φαίνεται η απόσβεση που παρουσιάζει ο ελαστικός παλμός καθώς αυξάνεται η απόσταση από πηνίο σε πηνίο. Ακόμα παρατηρείται πως ορισμένες περιοχές ξεφεύγουν από τις αναμενόμενες τιμές που θα λαμβάνονταν έχοντας συνυπολογίσει τον παράγοντα της απόσβεσης. Η περιοχή της λήψης επηρεάζει όλες τις μετρήσεις με τον ίδιο τρόπο επομένως η διασπορά που παρατηρείται οφείλεται αποκλειστικά στην ανομοιομορφία της περιοχής διέγερσης.

Προκύπτει το συμπέρασμα λοιπόν πως ορισμένες περιοχές του υλικού προκαλούν, εντονότερα ή ασθενέστερα το μαγνητοσυστολικό φαινόμενο, δηλαδή οι μαγνητικές περιοχές τους κατά την περιστροφή τους, παράγουν μεγαλύτερη ή μικρότερη μαγνητική ροή και επάγουν αντίστοιχη τάση στο πηνίο λήψης.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ομοιομορφίας άμορφου πυρήνα FeSiB σε μορφή σύρματος

Όσο αφορά τα σφάλματα στις μετρήσεις μας, προκύπτουν από την αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού των κέντρων των δυο πηνίων και από την πιθανή εισαγωγή μηχανικών τάσεων κατά τη μετακίνηση του πηνίου λήψης.

Πρακτικά όμως όσο αφορά την εφαρμογή μας σε αισθητήρες θέσης το συγκεκριμένο διάγραμμα μας δείχνει πως ο πυρήνας παρουσιάζει καλή συμπεριφορά. Λαμβάνεται σήμα σε όλη την περιοχή που μελετήθηκε και η ανομοιομορφία δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα της διάταξης.

Τέλος, αναφέρεται πως το ίδιο πείραμα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με σταθερή διέγερση και κινητή λήψη ώστε να εξεταστεί η ανομοιομορφία της περιοχής λήψης.

5.5 Ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού

Στη συνέχεια καθορίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ελαστικού παλμού μέσα στο υλικό και της συμπεριφοράς του ως κυματοδηγός.

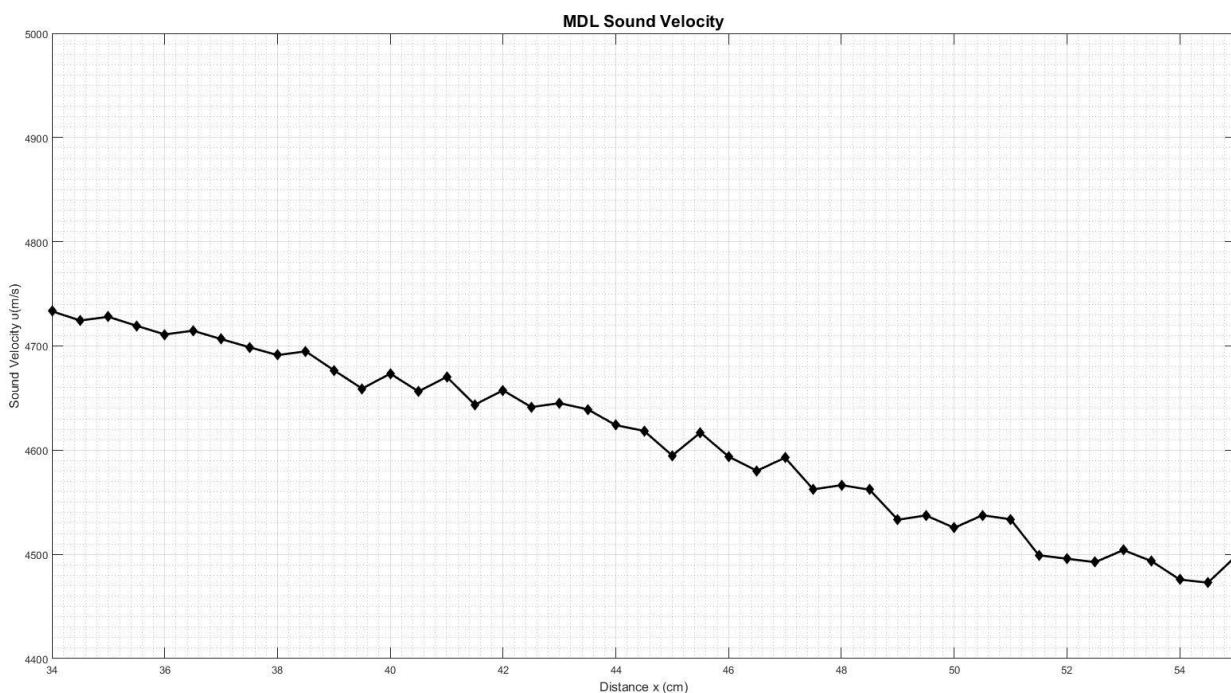
Από τις μετρήσεις που έγιναν στην παράγραφο 5.4, θα υπολογίσουμε το χρόνο από τη στιγμή της διέγερσης-δημιουργίας του ελαστικού παλμού έως τη στιγμή λήψης της πρώτης κορυφής. Γνωρίζοντας την απόσταση από τα κέντρα των δυο πηνίων είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ταχύτητα διάδοσης με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$v = \frac{L}{t} \quad (5.1)$$

Υπολογίστηκε η ταχύτητα για τις 94 μετρήσεις για αποστάσεις από 8.5 έως 55cm και χαράχτηκε το Σχήμα 5.9 (μέσω υπολογιστικών φύλλων από την εφαρμογή του παλμογράφου και το πρόγραμμα Matlab). Παρατηρείται μείωση της ταχύτητας διάδοσης του ελαστικού παλμού, κάτι που σχετίζεται πιθανά με την εξάρτηση της ταχύτητας από το μαγνητικό πεδίο. Η περιοχή της διέγερσης βρίσκεται υπό την επιρροή μεγαλύτερου πεδίου, της πόλωσης και του παλμικού ενώ η υπόλοιπη γραμμή υπό την επιρροή μόνο του πεδίου πόλωσης. Αυτό σημαίνει πως στην

περιοχή διέγερσης ο παλμός έχει μεγαλύτερη ταχύτητα εξαρτώμενη από το πεδίο, ενώ στην υπόλοιπη μικρότερη και σχετικά σταθερή. Αυτό σημαίνει πως οι κοντινότερες μετρήσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέση ταχύτητα, καθώς όμως απομακρυνόμαστε η ταχύτητα τείνει να σταθεροποιηθεί κοντά στα 4.500 m/s, τιμή που συμφωνεί με άλλα πειραματικά δεδομένα πάνω σε σύρματα FeSiB [9].

Οι διασπορά της ταχύτητας διάδοσης που παρατηρείται οφείλεται σε ατέλειες του υλικού αλλά και σε σφάλματα μέτρησης. Το τυχαίο σφάλμα στις μετρήσεις προκύπτει από την αδυναμία προσδιορισμού με ακρίβεια της θέσης του κινητού πηνίου αλλά και της πιθανής εισαγωγής τάσεων στο MDL. Ακόμα συστηματικό σφάλμα προκύπτει από την αδυναμία προσδιορισμού με ακρίβεια της θέση του σταθερού πηνίου αλλά και από την επιλογή του αρχικού χρόνου μέτρησης στο σήμα αναφοράς.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης ελαστικού παλμού σε άμορφο σύρμα FeSiB

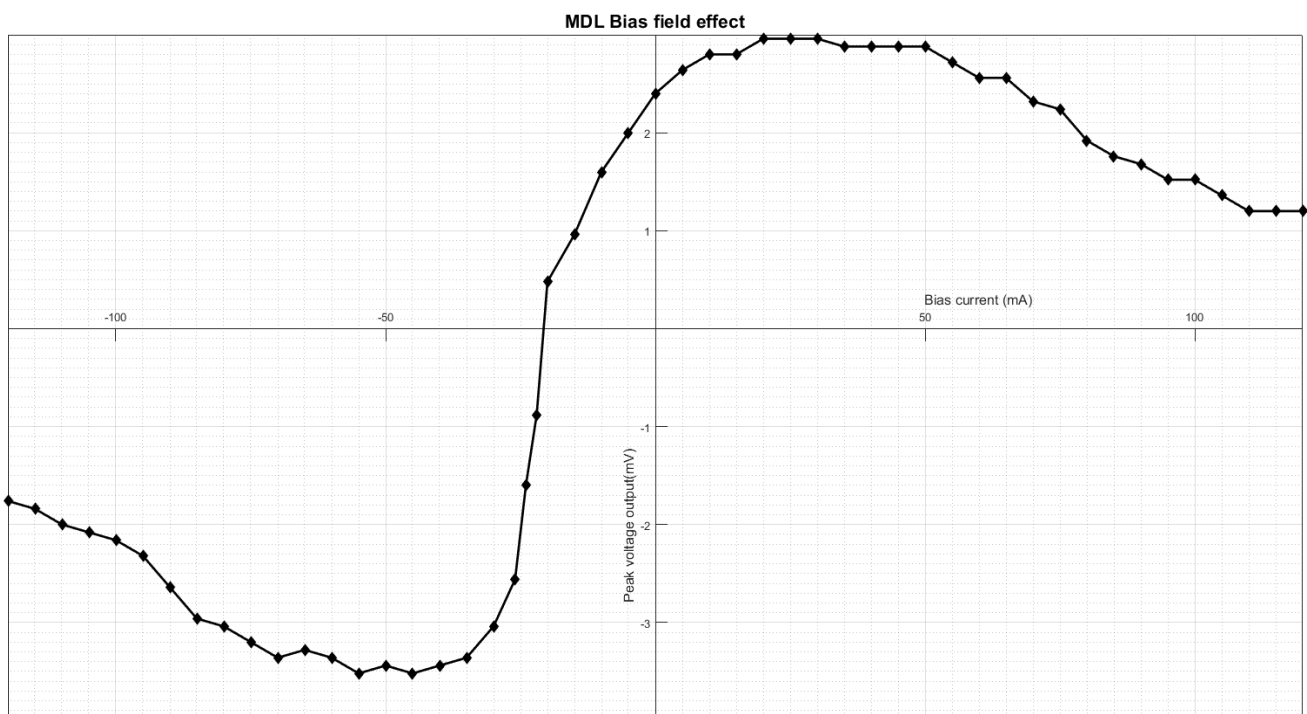
5.6 Μαγνητικό πεδίο πόλωσης (Bias field effect)

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί πειραματικά η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των γραμμών καθυστέρησης: αυτή της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου πόλωσης.

Τα παραπάνω πειράματα πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες πόλωσης μόνο υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της γης. Ωστόσο παρουσιάζει ενδιαφέρον η μελέτη της διαφοράς στην απόκριση πολώνοντας επιπλέον, με σταθερό πεδίο, μια περιοχή της γραμμής καθυστέρησης.

Η βασική διάταξη, παρόμοια με αυτή των προηγούμενων πειραμάτων:

πηνίο διέγερσης (5 περιελίξεων, κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού διαμέτρου 0,1mm) τροφοδοτούμενο παλμικά με ρεύμα περίπου 1.5 A διάρκειας 5μs (τάση τροφοδοσίας διακοπτικού κυκλώματος 3V) και πηνίο λήψης (200 περιελίξεων, κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm).



Σχήμα 5.10 Τάση εξόδου συναρτήσει του ρεύματος πόλωσης

Πέραν της βασικής διάταξης, έχει τοποθετηθεί ένα πηνίο (250 περιελίξεων κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) που περιβάλλει το πηνίο

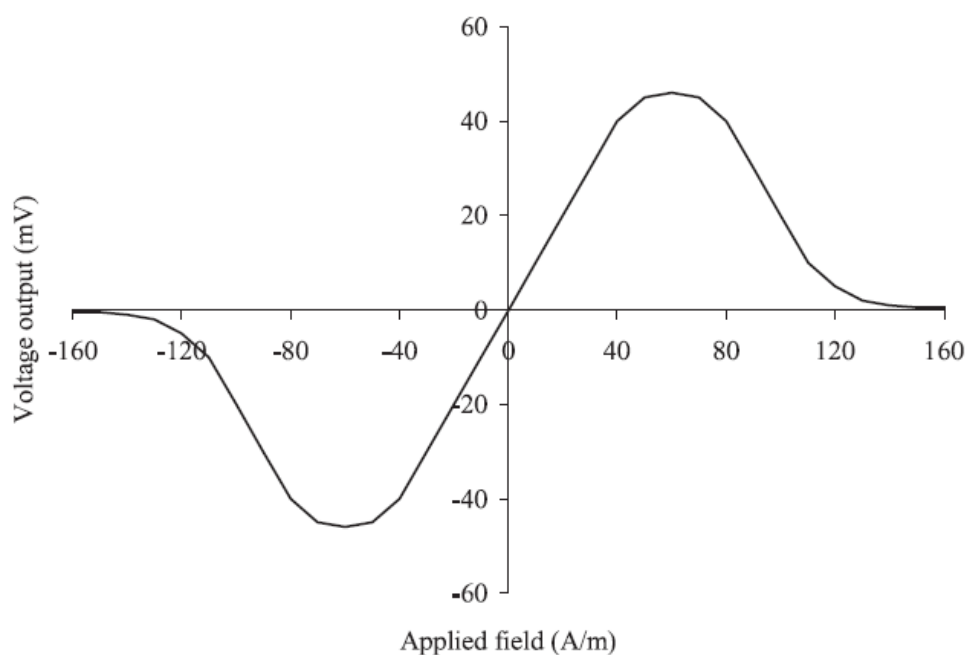
λήψης και τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα, ώστε να επιβληθεί ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή.

Το πηνίο διέγερσης τοποθετείται στη θέση $x=15\text{cm}$ και το πηνίο λήψης στην περιοχή $x=45\text{cm}$. Το σταθερό ρεύμα τροφοδοσίας λαμβάνει τιμές από -120mA έως 120mA με βήμα 5mA (στο εύρος -20 με -26mA έγιναν 3 μικρότερα βήματα των 2mA). Συνολικά λάβαμε 57 μετρήσεις.

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις, δηλαδή με εισαγωγή των υπολογιστικών φύλλων του παλμογράφου στο Matlab.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται:

- Το πεδίο πόλωσης της γης (ρεύμα πόλωσης=0) πολώνει επαρκώς της γραμμή καθυστέρησης, δηλαδή εμφανίζεται έντονα τόσο το ευθύ όσο και το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο.
- Κινούμενοι προς τα δεξιά και αυξάνοντας το πεδίο πόλωσης, αυξάνει και η απόκριση έως ένα σημείο πέρα από το οποίο αρχίζει μείωση.
- Κινούμενοι προς τα αριστερά, μειώνοντας το πεδίο, παρατηρείται μείωση της απόκρισης, μηδενισμός και στη συνέχεια αντιστροφή πολικότητας στο σήμα εξόδου.



Σχήμα 5.11 Τυπική εξάρτηση της τάσεως εξόδου από το πεδίο πόλωσης

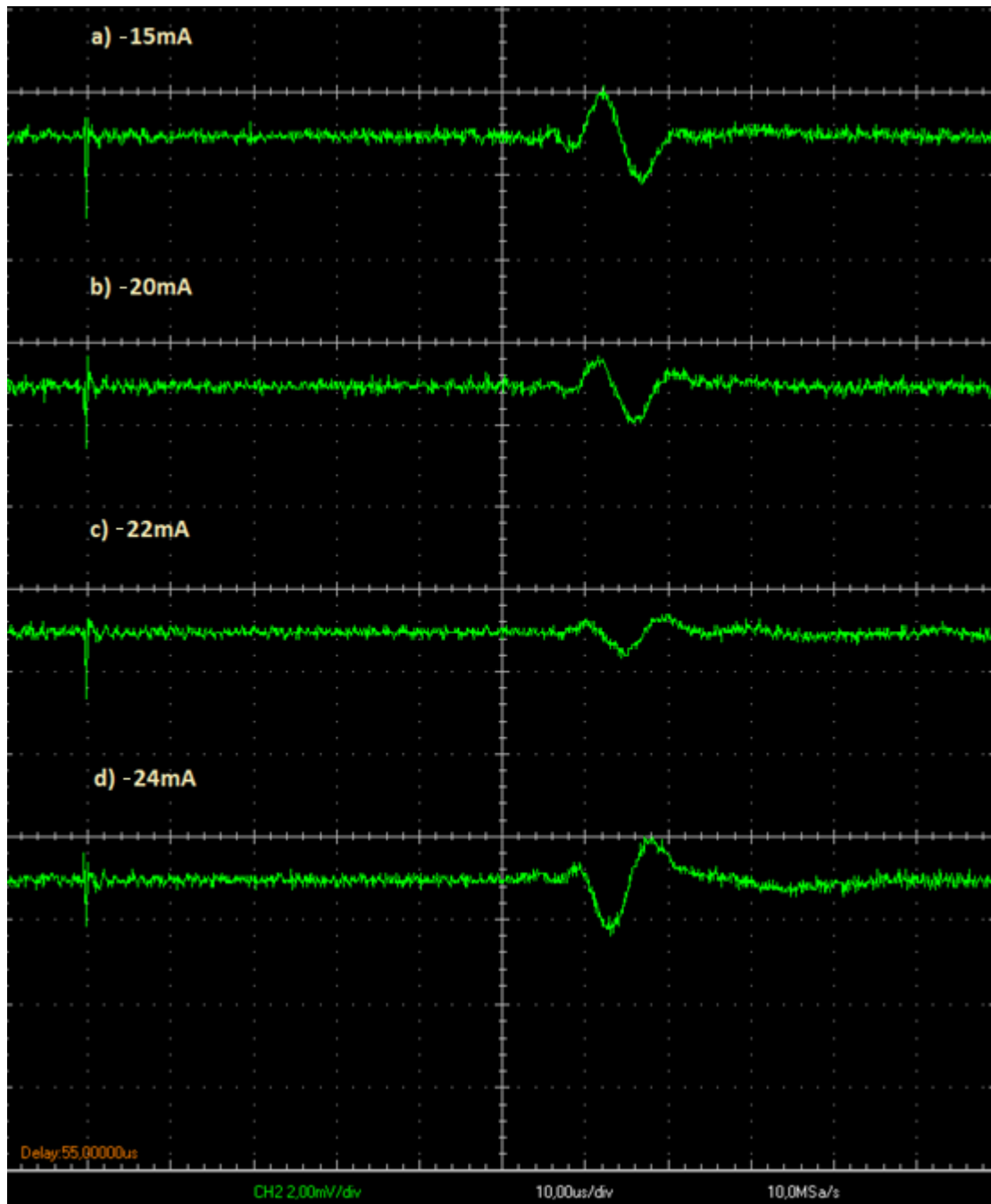
Η πρώτη παρατήρηση, δηλαδή ότι το πεδίο πόλωσης της γης είναι ικανό να πολώσει επαρκώς το MDL, είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού σημαίνει πως αισθητήρες που βασίζονται στη τεχνική MDL, μετά από κατάλληλη προετοιμασία του πυρήνα, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς επιπλέον ανάγκη πόλωσης. Συγκεκριμένα από το Σχήμα 5.10 βλέπουμε πως λαμβάνουμε 82% της μέγιστης τιμής στο σήμα εξόδου, δηλαδή το πεδίο της γης είναι πολύ κοντά στο πεδίο κορεσμού του άμορφου υλικού.

Για τιμές ρεύματος μικρότερες του 0 και έως περίπου -22mA και αντίστοιχο πεδίο πόλωσης, η καμπύλη είναι φθίνουσα. Αυτό είναι επίσης πολύ σημαντικό, καθώς είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί αυτή η περιοχή της καμπύλης για αισθητήρες εφαρμογές. Στην προκειμένη περίπτωση είναι δηλαδή δυνατόν, μέσω αυτής της εξάρτησης, να εντοπίζουμε μαγνήτες, που η πολικότητα τους αντιτίθεται σε αυτή του πεδίου πόλωσης της γης, όταν πλησιάζουν κοντά σε περιοχές λήψης. Όταν συμβαίνει αυτό θα παρατηρείται μείωση του σήματος στην έξοδο. Αυτήν την ιδιότητα θα αξιοποιηθεί στα επόμενα κεφάλαια, όπου θα παρουσιαστούν διατάξεις εντοπισμού μαγνήτη.

Αντίστοιχα για τιμές ρεύματος μεγαλύτερες του 0 και έως περίπου 20mA και αντίστοιχο πεδίο πόλωσης, η καμπύλη είναι αύξουσα. Είναι δυνατός λοιπόν ο εντοπισμός μαγνήτη του οποίου η πολικότητα είναι στην διεύθυνση του πεδίου πόλωσης της γης.

Τέλος, τιμές ρεύματος μικρότερες των -22mA και αντίστοιχο πεδίο πόλωσης οδηγούν σε μηδενισμό της απόκρισης και στη συνέχεια αντιστροφή της πολικότητας των κορυφών του σήματος λήψης. Η θετική κορυφή τάσης γίνεται αρνητική και η αρνητική θετική. Αυτό συμβαίνει καθώς όταν το σταθερό πεδίο πόλωσης ακυρώσει πλήρως το μαγνητικό πεδίο της γης $H_{oλ} = 0$, η γραμμή καθυστέρησης χάνει τοπικά την ικανότητα εμφάνισης του αντίστροφου μαγνητοσυστολικού φαινομένου, όπως ορίζει η εξάρτηση της απόκρισης MDL από το πεδίο πόλωσης. Πέραν αυτής της τιμής αντιστρέφεται η πολικότητα του συνολικού πεδίου και οι μαγνητικές περιοχές προσανατολίζονται στην αντίθετη διεύθυνση του ισοδύναμου εύκολου

άξονά τους. Αντίστοιχα αλλάζει και η διεύθυνση της μαγνητικής ροής και επομένως η πολικότητα της επαγόμενης τάσης πάνω στο πηνίο.

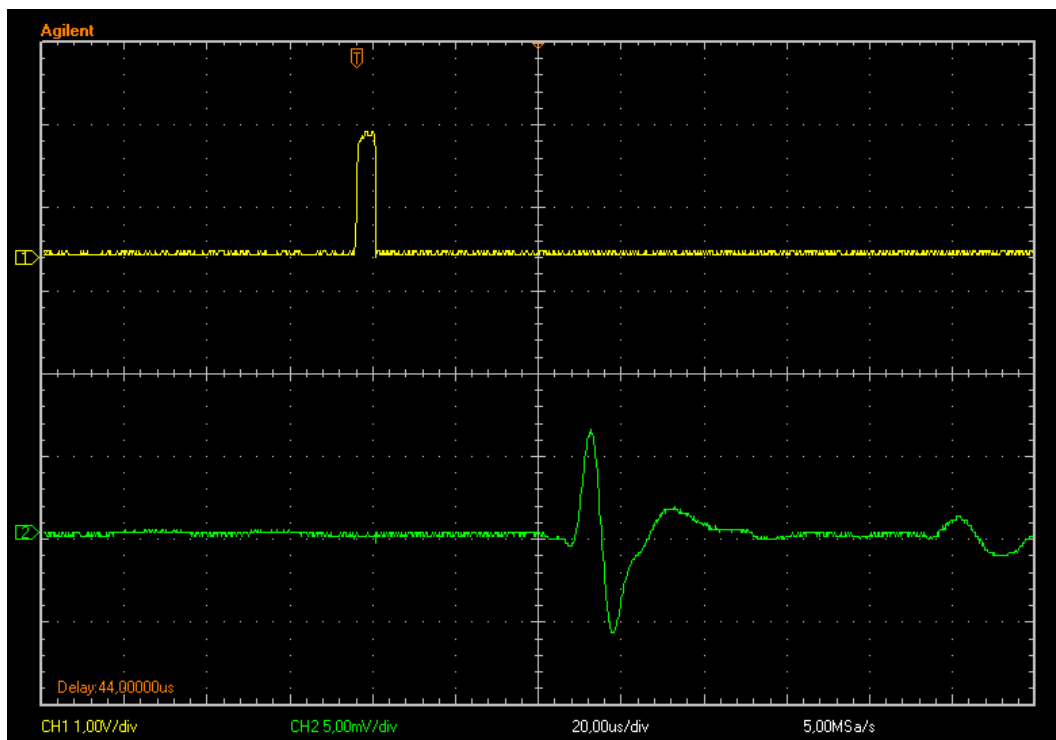


Σχήμα 5.12 Η αντιστροφή πολικότητας της επαγόμενης τάσης στη λήψη

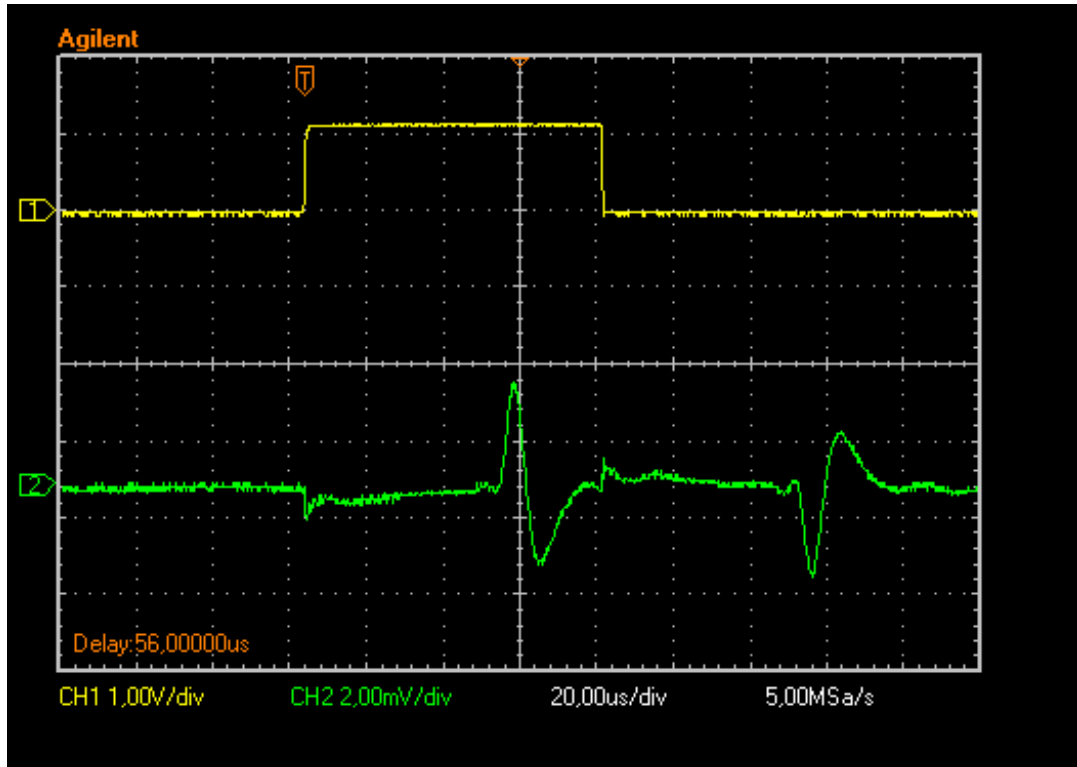
5.7 Χρόνος διέγερσης-μήκος του ελαστικού παλμού

Το φυσικό μέγεθος, δηλαδή το μήκος του ελαστικού παλμού εξαρτάται κυρίως από το χρόνο διέγερσης. Αυτό το μήκος με τη σειρά του επηρεάζει τη μορφή του σήματος λήψης που όπως δείξαμε έχει τη μορφή πρώτης παραγώγου της διέγερσης. Όταν η διέγερση είναι μεγάλης διάρκειας το σήμα λήψης διαχωρίζεται στις δυο κορυφές καθώς στο διάστημα όπου ο ελαστικός παλμός είναι σε σταθερή κατάσταση, δεν υπάρχει μεταβολή της μαγνητικής ροής στο πηνίο και δεν επάγεται τάση σε αυτό.

Η σχέση του χρόνου διέγερσης - σήματος λήψης θα παρουσιαστεί με το εξής πείραμα: στην πρώτη περίπτωση τροφοδοτείται το πηνίο διέγερσης με σύντομο παλμό ρεύματος διάρκειας 5μs, ενώ στη δεύτερη με έναν παρατεταμένο παλμό ρεύματος διάρκειας 78μs. Η απόσταση ανάμεσα στα δυο πηνία και στις 2 περιπτώσεις είναι ίση με 25cm.



Σχήμα 5.13 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για σύντομη διέγερση



Σχήμα 5.14 Κυματομορφές διέγερσης και λήψης για παρατεταμένη διέγερση

Στη πρώτη περίπτωση του Σχήματος 5.13 παρατηρείται:

την πρώτη κύρια (θετική) κορυφή ακολουθεί η δεύτερη κύρια (αρνητική) με το χρόνο από κορυφή σε κορυφή να αντιστοιχεί στον χρόνο διέγερσης και είναι ίσος περίπου 5μs. Ακολουθεί μια ακόμα ανεπιθύμητη κορυφή.

Στη δεύτερη περίπτωση του Σχήματος 5.14:

Λαμβάνεται η πρώτη κύρια κορυφή, αμέσως μετά από αυτή μια δεύτερη ανεπιθύμητη κορυφή, στη συνέχεια ένα διάστημα όπου μηδενίζεται το σήμα μέχρι την δεύτερη κύρια κορυφή και τέλος άλλη μια ανεπιθύμητη. Πάλι ο χρόνος από κορυφή σε κορυφή αντιστοιχεί στη διάρκεια της διέγερσης και είναι ίσος περίπου με 78μs.

Οι ανεπιθύμητες κορυφές προκύπτουν από τον ατελή παλμό τροφοδοσίας όπως συζητήθηκε στη ενότητα 5.2.

Στις εφαρμογές αισθητήρων θέσης με μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης επιθυμείται υψηλή ανάλυση, δηλαδή σε συγκεκριμένο μήκος γραμμής να είναι εφικτό να λαμβάνονται σε μια λήψη πολλά διακριτά σήματα από ελαστικούς παλμούς διαφορετικών διεγέρσεων. Αυτό σημαίνει πως το φυσικό μέγεθος του παλμού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Σε αυτή τη περίπτωση πρέπει να γίνεται παλμική διέγερση με όσο το δυνατόν συντομότερους παλμούς.

Πέρα όμως από το χρόνο διέγερσης, παίζει ακόμα ρόλο και το μήκος του μέσου διέγερσης, πηνίου ή cross-section. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή του υλικού που διεγείρεται, τόσο μεγαλύτερο είναι και το μήκος του ελαστικού παλμού. Για αυτόν το λόγο το πηνίο διέγερσης είναι λίγων στροφών (5 περιελίξεων, κατασκευασμένο από σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) και μήκους <1mm.

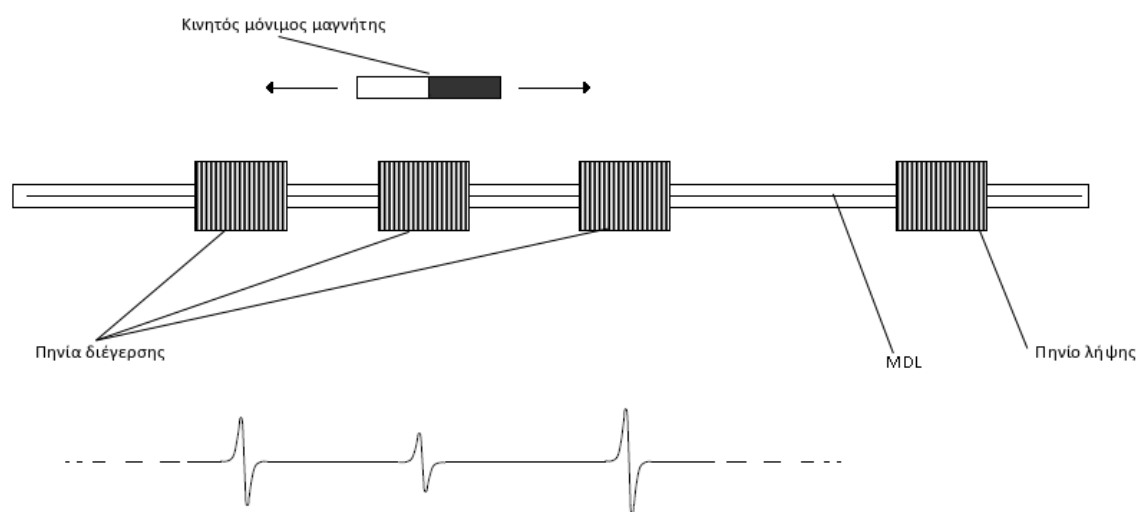
Αντίστοιχα το μήκος του πηνίου λήψης, επηρεάζει το σχήμα του σήματος που λαμβάνεται. Όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο περισσότερο φαίνεται να «απλώνει» το σήμα. Κάτι τέτοιο ισχύει και στη δική μας διάταξη, όπου λόγω κατασκευαστικών περιορισμών χρησιμοποιήθηκε μακρύ πηνίο λήψης. Στην ιδανική περίπτωση χρησιμοποιούνται λήψεις μικρού μήκους αλλά πολλών περιελίξεων, δηλαδή πηνία με μεγάλη αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρατηρείται διαφορά στην απόκριση του MDL με την εφαρμογή επιπρόσθετου σταθερού μαγνητικού πεδίου. Η συγκεκριμένη ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση αισθητήρα εντοπισμού μαγνήτη, ο οποίος κινείται παράλληλα στη μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης.

6.1 Περιγραφή διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων

Η διάταξη αποτελείται από πολλαπλά πηνία διέγερσης, ένα πηνίο λήψης, την μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης και ένα μόνιμο μαγνήτη που κινείται παράλληλα στη γραμμή.



Σχήμα 6.1 Η διάταξη εντοπισμού μαγνήτη πολλαπλών διεγέρσεων (επάνω).
Το σήμα στη λήψη και η επίδραση του μαγνήτη. (κάτω) [7]

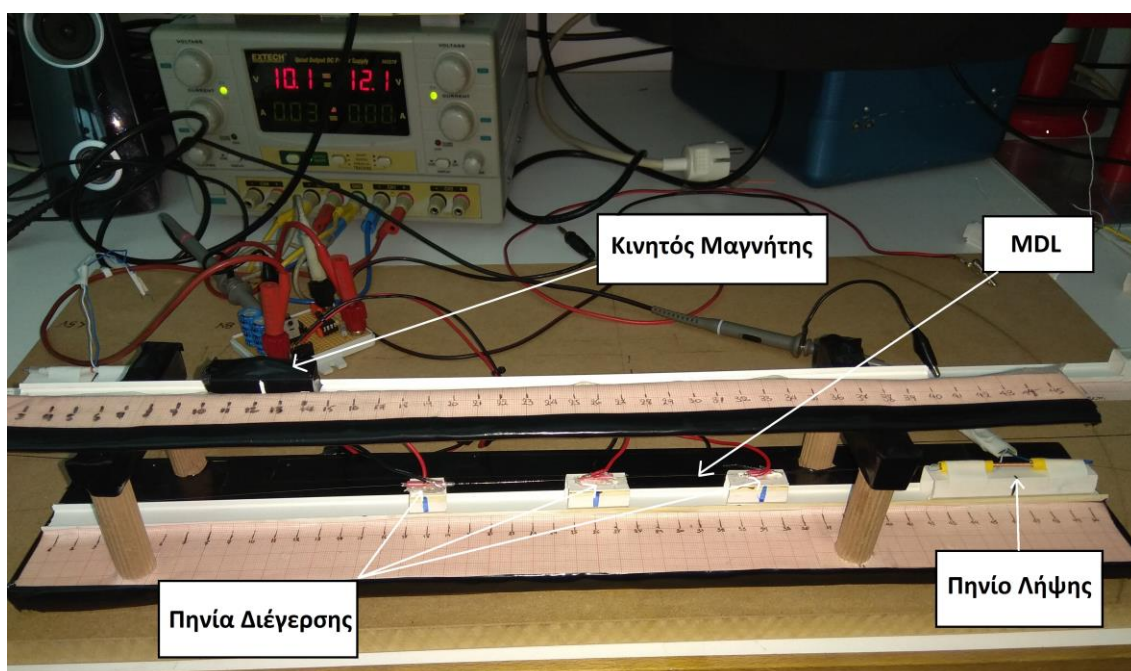
Τα πηνία διέγερσης τροφοδοτούνται από σύντομο παλμικό ρεύμα και δημιουργούν ελαστικούς παλμούς, που διαδίδονται κατά μήκος του MDL και τελικά επάγουν τάση στο πηνίο λήψης, παρόμοια με την βασική διάταξη MDL. Ο μόνιμος μαγνήτης μειώνει τοπικά την ικανότητα του πυρήνα να παρουσιάζει μαγνητοσυστολή και έτσι

οι διεγέρσεις που βρίσκονται κοντά του, δημιουργούν ασθενέστερους ελαστικούς παλμούς. Στο πηνίο λήψης λαμβάνεται μια σειρά ελαστικών παλμών, όπου ο καθένας αντιστοιχεί σε κάθε μια διέγερση.

Από το σήμα λήψης μπορεί να μετρηθεί η θέση του μαγνήτη, συγκρίνοντας τη μέγιστη τάση του κάθε παλμού με τους υπόλοιπους. Όπου βρεθεί μικρή κορυφή τάσης υποδηλώνεται ύπαρξη σταθερού μαγνητικού πεδίου γύρω από την αντίστοιχη περιοχή διέγερσης και άρα η παρουσία του μαγνήτη.

6.2 Κατασκευή διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων

Η διάταξη κατασκευάστηκε σε ξύλινη βάση και αποτελείται από δυο επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο κολλήθηκε ευθύγραμμη πλαστική ράγα που επιτρέπει την τοποθέτηση των πηνίων διέγερσης και λήψης σε καθορισμένες θέσεις επάνω σε



Σχήμα 6.2 Φωτογραφία της διάταξης εντοπισμού μαγνήτη πολλαπλών διεγέρσεων

αυτή. Συγκεκριμένα τα κέντρα των τριών πηνίων διέγερσης (5 περιελίξεων τυλιγμένα με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) βρίσκονται στις θέσεις $x_1 = 11cm$, $x_2 = 23cm$ και $x_3 = 35cm$, έχουν δηλαδή μεταξύ τους απόσταση 12cm. Η λήψη

(200 περιελίξεων τυλιγμένη επίσης με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm) βρίσκεται στη θέση $x_4 = 81\text{cm}$, απέχει δηλαδή 46cm από την πλησιέστερη διέγερση. Ο πυρήνας διέρχεται μέσα από τα 4 σωληνοειδή πηνία και τερματίζεται με κολλητική ταινία.

Στο δεύτερο επίπεδο βρίσκεται ράγα τοποθετημένη πάνω σε ξύλινα στηρίγματα, που επιτρέπει την ελεύθερη μετακίνηση του μαγνήτη παράλληλα με τον άξονα του MDL. Ο μαγνήτης έχει τοποθετηθεί έτσι ώστε οι δυο του πόλοι να ευθυγραμμίζονται με τον άξονα της γραμμής και το μαγνητικό του πεδίο στο χώρο να αντιτίθεται στο πεδίο πόλωσης της γης.

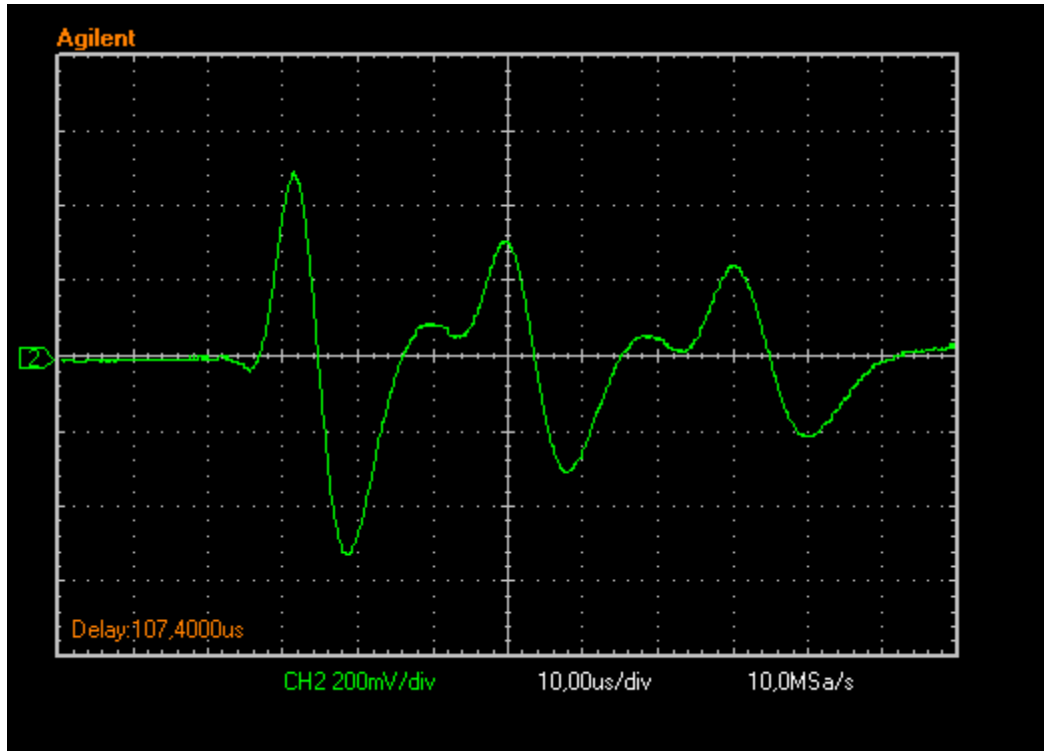
Όπως και στην προηγούμενη διάταξη, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο να μην χρησιμοποιηθούν καθόλου μεταλλικά υλικά όπως βίδες και καρφιά. Δίπλα στις ράγες του πρώτου και του δεύτερου επιπέδου έχει τοποθετηθεί μιλιμετρέ χαρτί και έχουν σημειωθεί οι θέσεις από 0 έως 50 cm με βήμα 1cm ώστε να μπορεί να μετρηθεί η θέση του μαγνήτη αναφορικά με τις θέσεις των πηνίων διέγερσης.

Τα πηνία διέγερσης έχουν συνδεθεί σε σειρά μεταξύ τους και βρίσκονται συνδεδεμένα στους ακροδέκτες Load+ και Load- του κυκλώματος διέγερσης. Με αυτό τον τρόπο έχουμε ίδιας έντασης ρεύμα διέγερσης και στα τρία πηνία. Φυσικά στο σήμα της λήψης φαίνεται ο ελαστικός παλμός μειωμένος κατά τον παράγοντα εξασθένησης, δηλαδή στη πλησιέστερη διέγερση επάγεται ισχυρότερο σήμα και στην μακρινότερη ασθενέστερο, όπως φαίνεται στην εικόνα του παλμογράφου 6.3.

Το πηνίο λήψης συνδέεται στο κύκλωμα ενίσχυσης, όπου έχουμε κέρδος περίπου 1000 και από εκεί στον παλμογράφο.

Η τάση τροφοδοσίας στο κανάλι ελέγχου είναι 9V ενώ η τροφοδοσία του διακοπτικού κυκλώματος είναι στα 3V.

Παρατηρείται πως υπάρχει μικρή επικάλυψη των 3 σημάτων πράγμα που θα επηρεάσει την απόκριση της διάταξης όπως θα φανεί και στα επόμενα αλλά έγινε αυτή η επιλογή ώστε να μειωθούν τα 'τυφλά' σημεία στις ενδιάμεσες περιοχές ανάμεσα σε δυο πηνία.



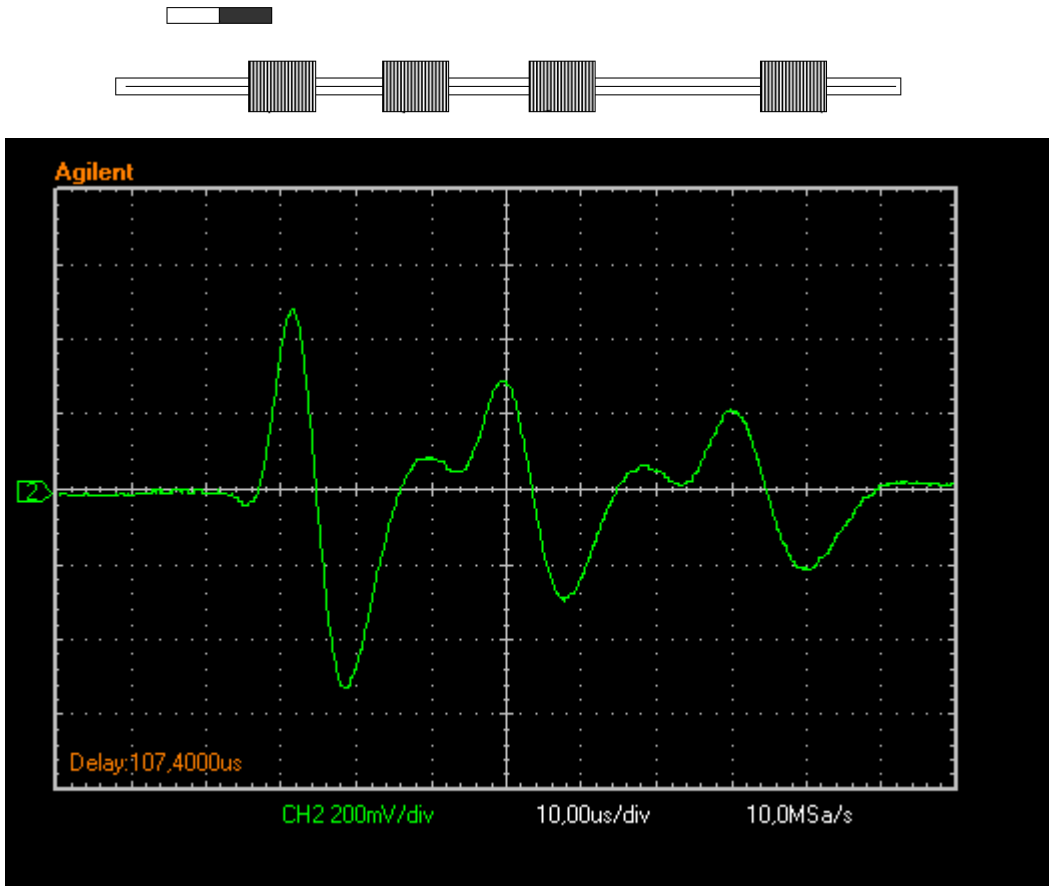
Σχήμα 6.3 Σήμα λήψης απουσία μαγνήτη

6.3 Μετρήσεις στη διάταξη πολλαπλών διεγέρσεων

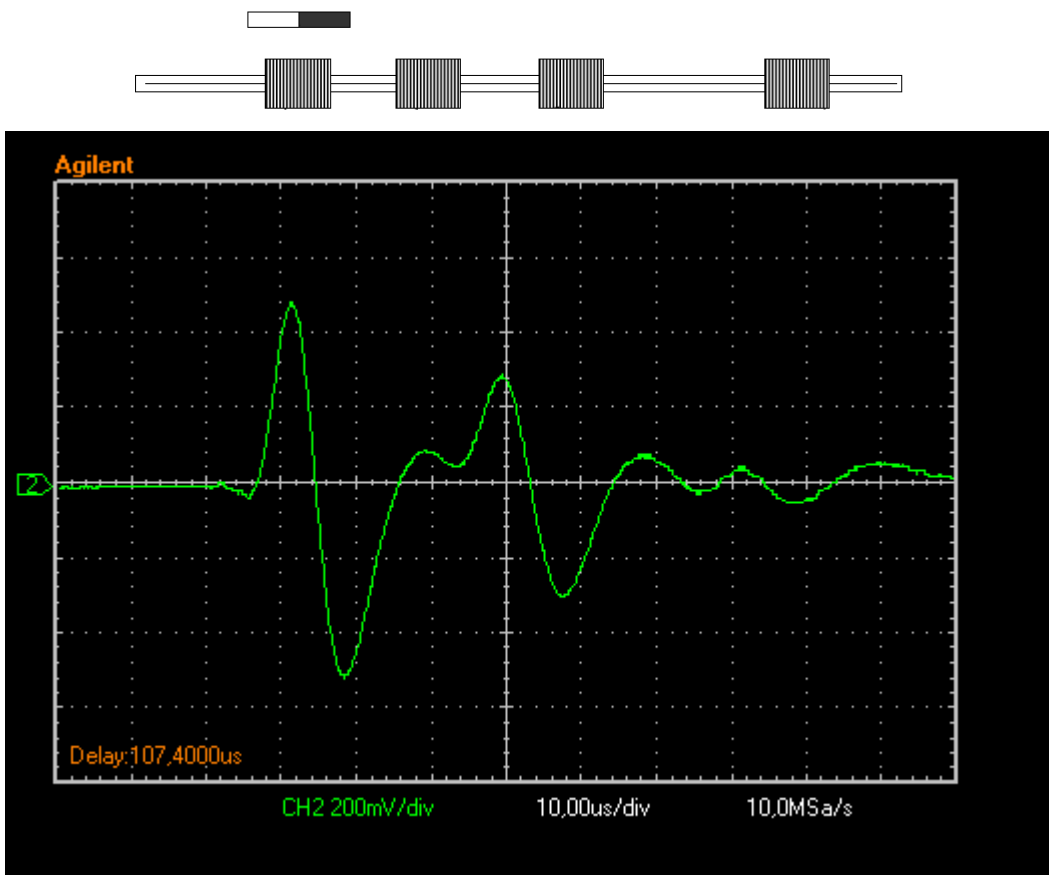
Οι θέσεις των πηνίων είναι μόνιμες και ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Στην παραπάνω διάταξη τοποθετείται ο μαγνήτης στη θέση $x=0\text{cm}$ και λαμβάνεται μια μέτρηση, στη συνέχεια μετατοπίζεται ο μαγνήτης με βήμα ενός εκατοστού και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, παίρνοντας συνολικά 43 μετρήσεις.

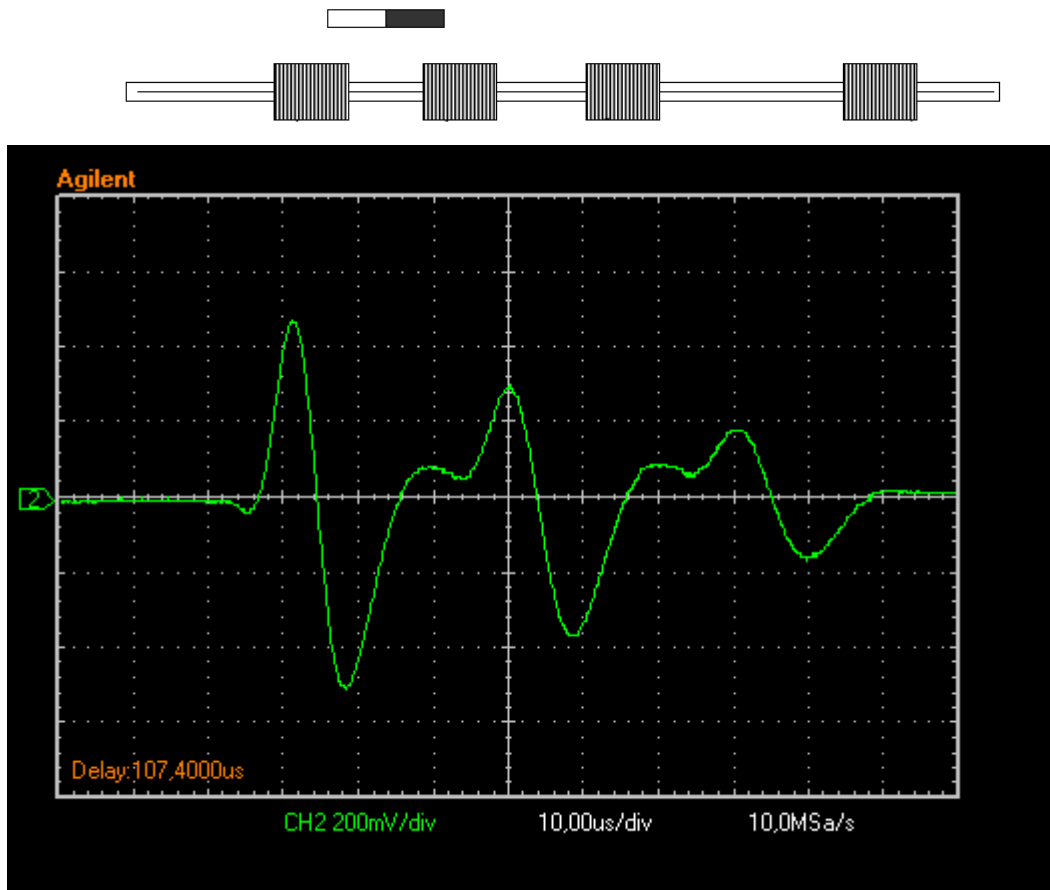
Στις εικόνες παλμογράφου που ακολουθούν παρουσιάζονται τα σήματα λήψης στις κρίσιμες θέσεις μαγνήτη $x=5$ έως 41cm με βήμα 6cm , που είναι θέσεις ακριβώς πάνω σε πηνία ή μεσοδιαστήματα ανάμεσα τους.



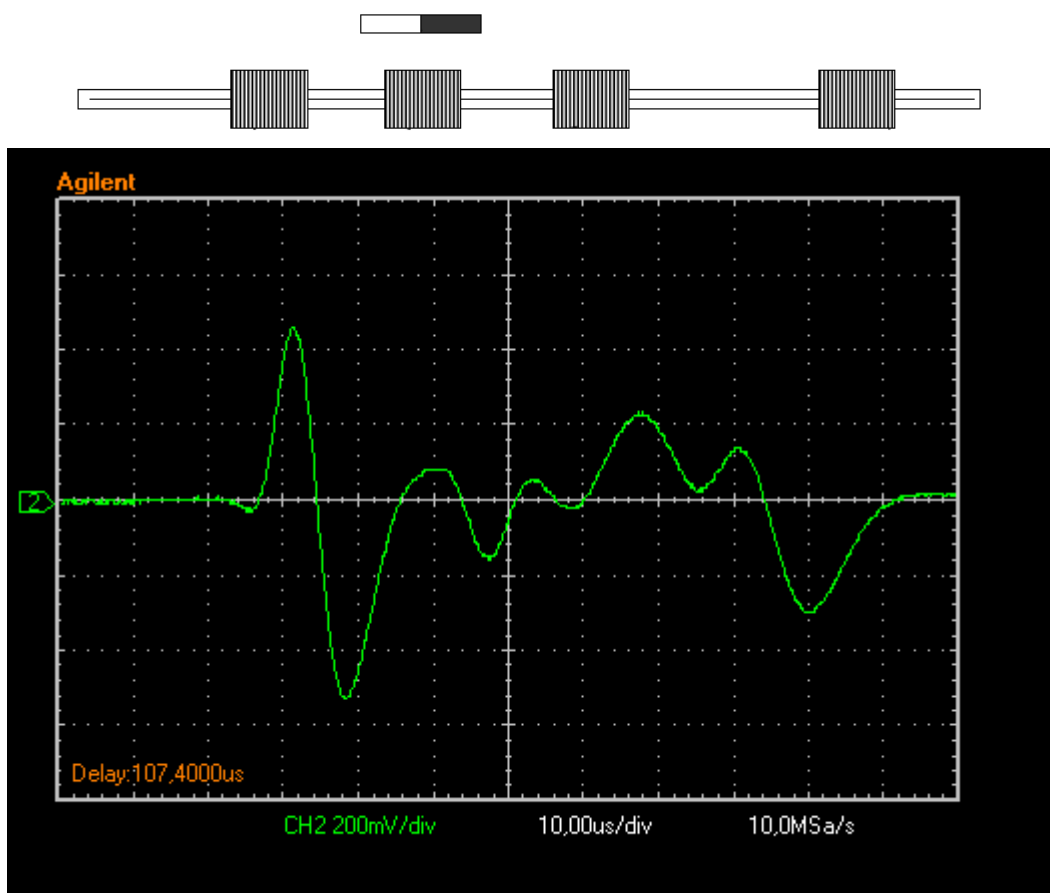
Σχήμα 6.4 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=5\text{cm}$



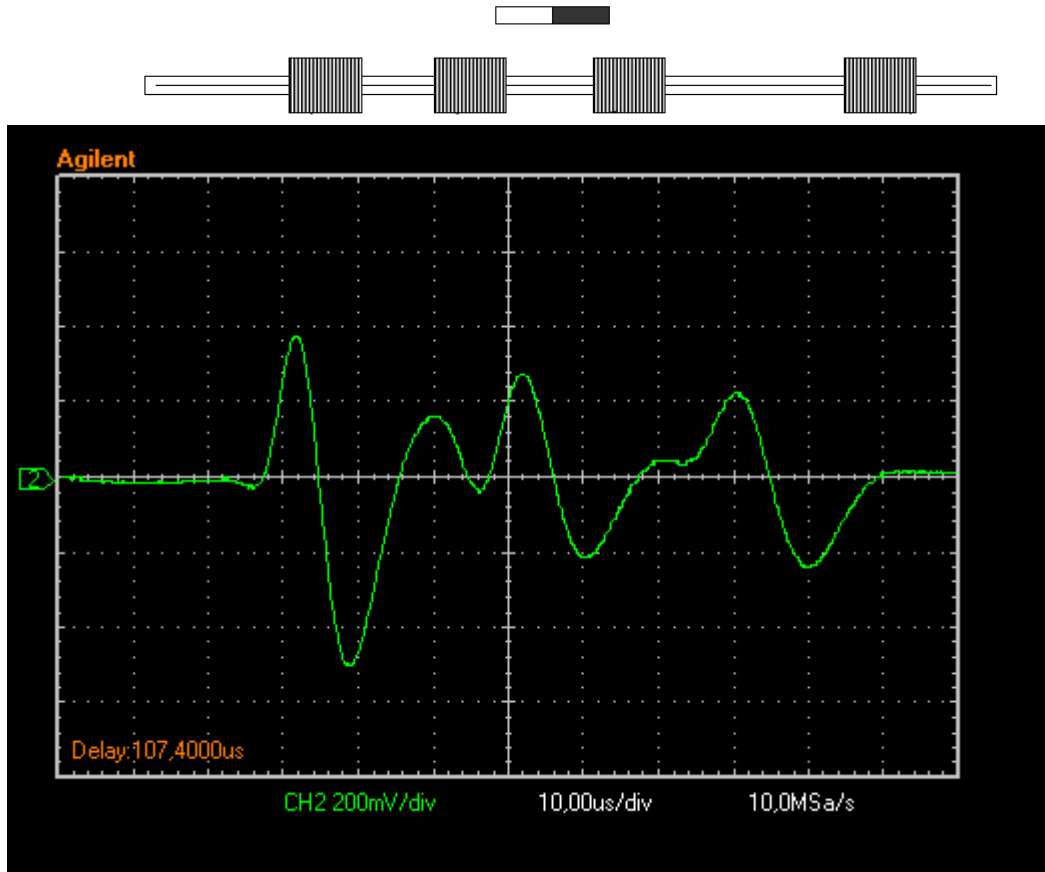
Σχήμα 6.5 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=11\text{cm}$



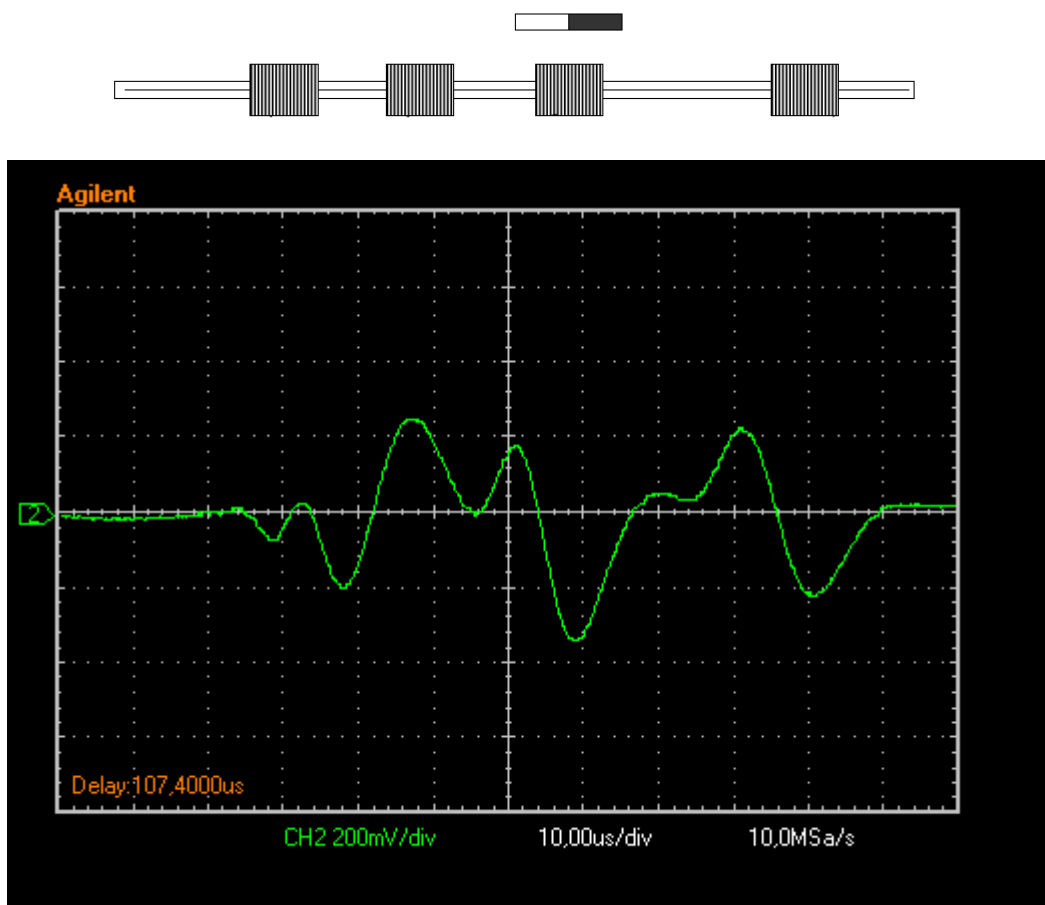
Σχήμα 6.6 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=17\text{cm}$



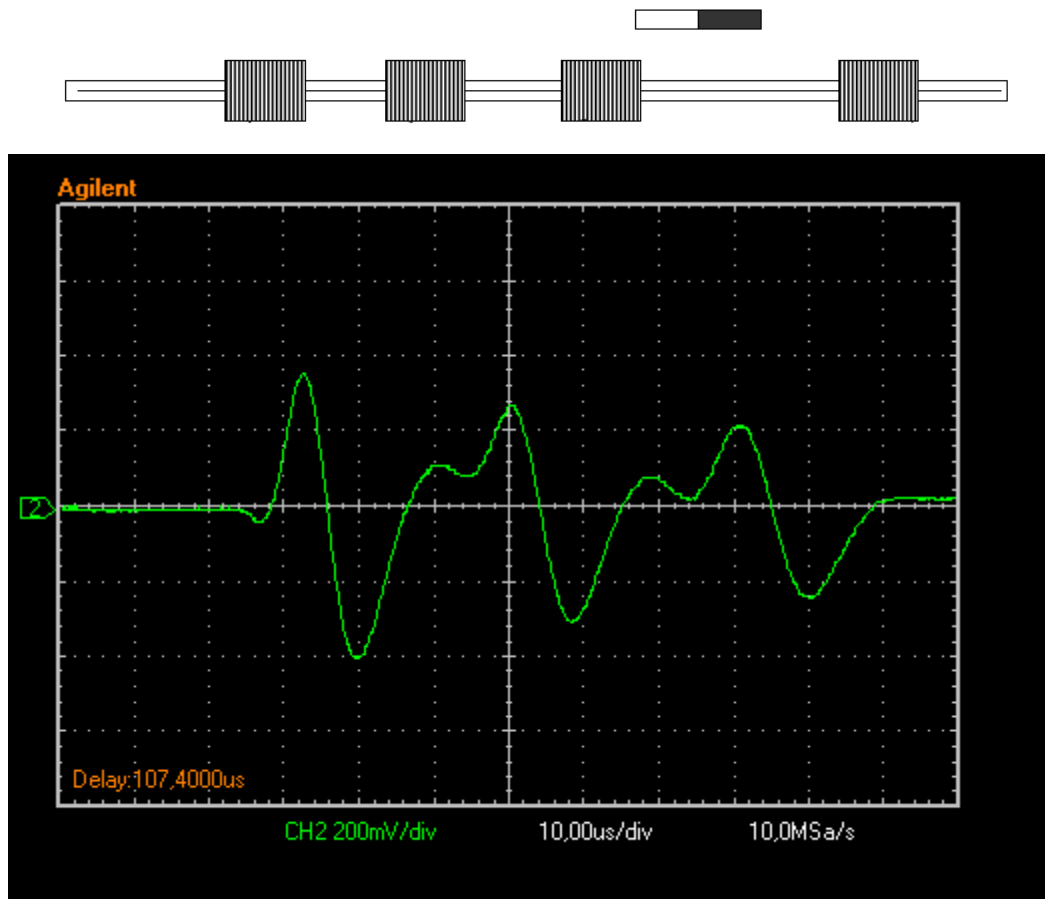
Σχήμα 6.7 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=23\text{cm}$



Σχήμα 6.8 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=29\text{cm}$



Σχήμα 6.9 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=35\text{cm}$



Σχήμα 6.10 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=41\text{cm}$

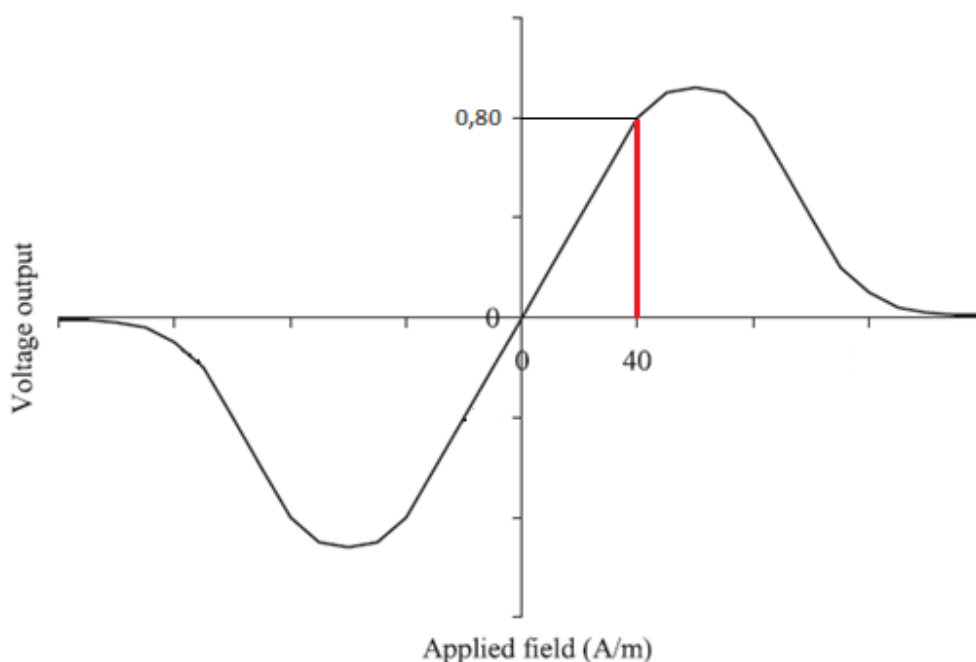
Καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει από τα αριστερά προς τα δεξιά (στις εικόνες παλμογράφου από δεξιά προς τα αριστερά), παρατηρείται διαδοχική καταστροφή του ελαστικού παλμού στις περιοχές κοντά στο μαγνήτη. Στα παραπάνω βλέπουμε την τρίτη κορυφή να μειώνεται στη θέση $x=5\text{cm}$, στη συνέχεια για $x=11\text{cm}$ να καταστρέφεται εντελώς και καθώς ο μαγνήτης απομακρύνεται $x=17\text{cm}$ αρχίζει να επανέρχεται, ενώ πλέον η δεύτερη κορυφή αρχίζει να καταστρέφεται. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει σε όλο το εύρος κίνησης του μαγνήτη και για τις άλλες δυο κορυφές.

Αυτή τη τοπική καταστροφή του ελαστικού παλμού μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε υπολογιστεί η θέση του μαγνήτη που βρίσκεται παράλληλα στο MDL δεδομένων των θέσεων των πηνίων διέγερσης. Σημειώνεται πως με τον όρο καταστροφή των ελαστικών παλμών, εννοείται η εξάρτηση που παρουσιάζει η απόκριση με το πεδίο πόλωσης.

Ο μαγνήτης είναι τοποθετημένος με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές του γραμμές να αντιτίθενται σε αυτές τις γης επομένως έχουμε κίνηση πάνω στην καμπύλη

εξάρτησης $V_o(H)$ προς τα αριστερά μειώνοντας το συνολικό σταθερό πεδίο τοπικά. Ο μαγνήτης είναι αρκετά μικρός ώστε να μην επηρεάζει όλα τα πηνία αλλά μια κοντινή περιοχή. Ακόμα παρατηρείται από τις εικόνες παλμογράφου πως στις θέσεις ακριβώς επάνω από τις διεγέρσεις, έχουμε μείωση του σήματος αλλά όχι αντιστροφή της πόλωσης επομένως το εύρος της κίνησης επί της καμπύλης είναι μόνο στο θετικό ημιάξονα του πεδίου.

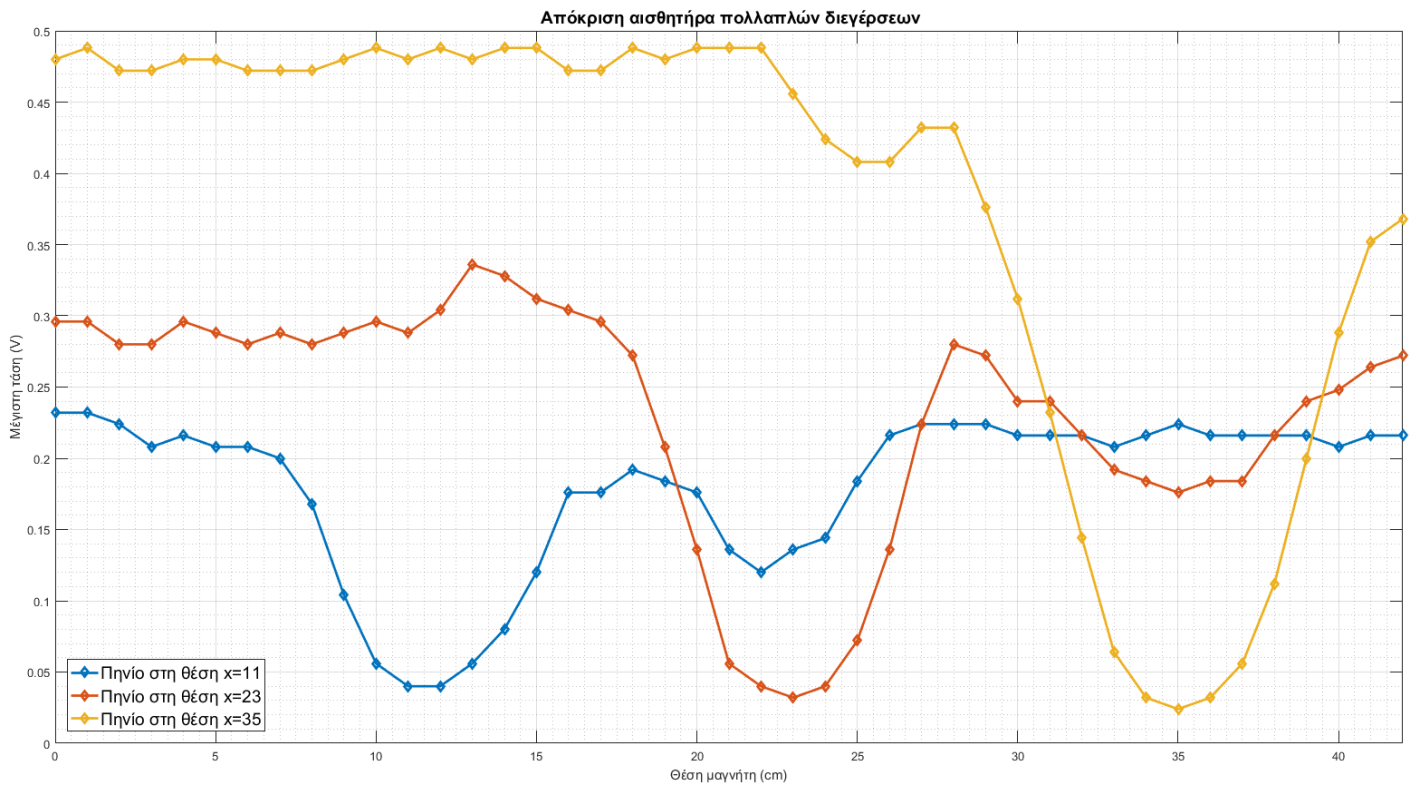
Σχήμα 6.11 Καμπύλη εξάρτησης της απόκρισης MDL από το πεδίο



Κάτι ακόμα που παρουσιάζεται και σε ορισμένα σημεία στο διάγραμμα απόκρισης είναι πως το πεδίο του μαγνήτη δεν είναι προς μια κατεύθυνση αλλά έχει την διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών, δηλαδή αντιτίθεται πλήρως στις περιοχές επάνω και κάτω από το κέντρο του ενώ στις περιοχές δεξιά και αριστερά του οι μαγνητικές γραμμές του μπορούν να έχουν και συνιστώσα, η οποία συμβάλλει με τις γραμμές του πεδίου της γης. Κάτι τέτοιο μεταφράζεται ως κίνηση στα δεξιά στην καμπύλη εξάρτησης και άρα αύξηση της απόκρισης σε ένα γειτονικό πηνίο.

6.4 Διάγραμμα απόκρισης διάταξης πολλαπλών διεγέρσεων

Για τον σχεδιασμό του διαγράμματος απόκρισης λήφθηκαν τα υπολογιστικά φύλλα από το πρόγραμμα του παλμογράφου όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις της παραγράφου 6.3. Εισήχθησαν στο Matlab όπου εκεί υπολογίστηκε η μέγιστη τάση κορυφής κάθε διεγερσης για τις διάφορες θέσεις του μαγνήτη και σχεδιάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 6.12 Η απόκριση του αισθητήρα πολλαπλών πηνίων διεγερσης

Από το διάγραμμα απόκρισης αρχικά γίνεται φανερό πως ο παράγοντας της εξασθένισης είναι πολύ σημαντικός και επηρεάζει πολύ τις μετρήσεις. Είναι δυνατόν ωστόσο να γίνει κανονικοποίηση και να ανεξαρτητοποιηθούν οι υπολογισμοί μας από αυτόν (Σχήμα 6.13).

Παρατηρείται ακόμα, πως πράγματι σημειώνονται ολικά ελάχιστα στις θέσεις μαγνήτη που αντιστοιχούν στις θέσεις διεγερσης, όπως αναμενόταν.

Επίσης στις θέσεις ανάμεσα σε δυο πηνία, παρατηρείται μείωση και στις δυο γειτονικές κορυφές που επηρεάζονται από το μαγνήτη. Παρόλα αυτά οι βυθίσεις μεταξύ τους δεν παρουσιάζουν ιδανική επικάλυψη και έτσι προκύπτουν ‘τυφλά’ σημεία στη διάταξη, περιοχές που δεν περιγράφονται μονοσήμαντα από τις τρεις κορυφές.

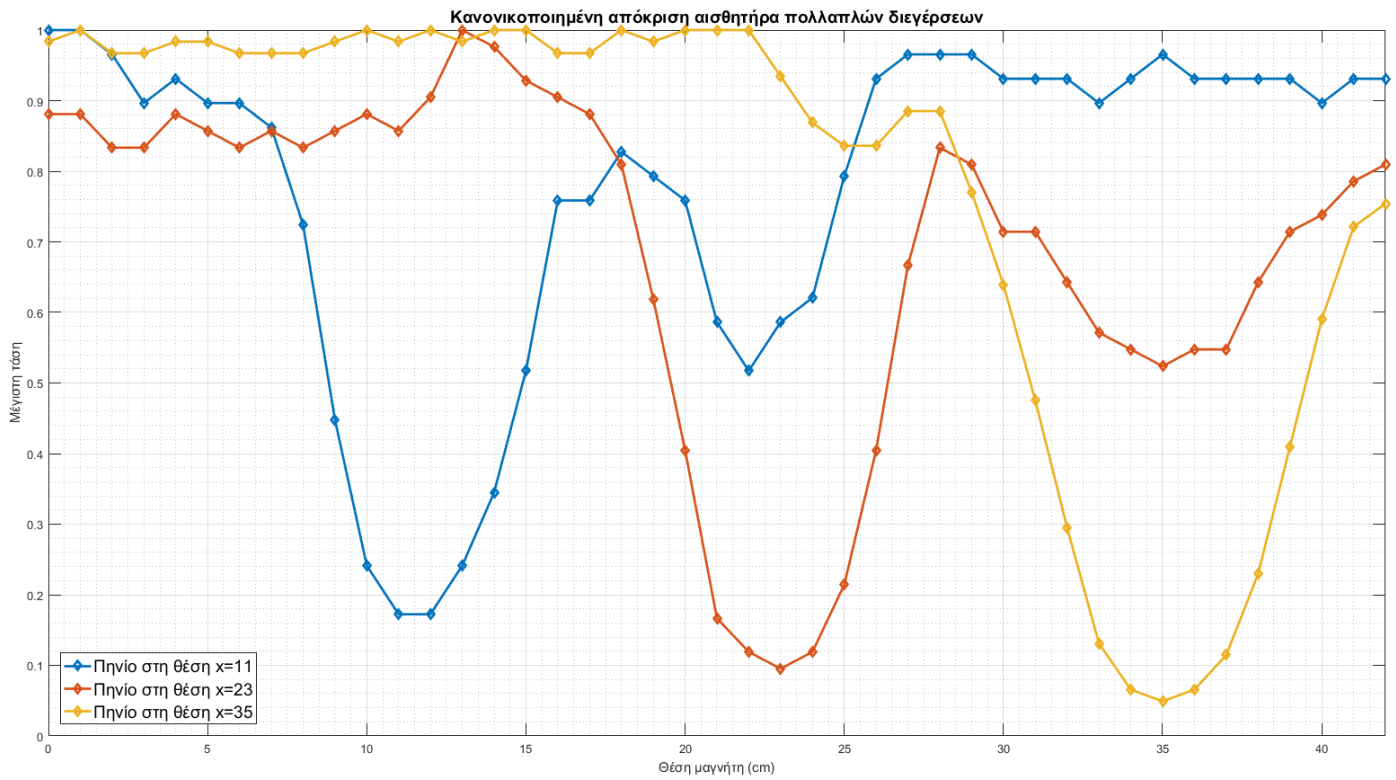
Μια σημαντική αστοχία φαίνεται να προκύπτει στις περιοχές όπου σημειώνεται ολικό ελάχιστο για την δεύτερη κορυφή και ταυτόχρονα τοπικό για την πρώτη, αντίστοιχα στο ολικό ελάχιστο τις τρίτης φαίνεται ελάχιστο και στη δεύτερη. Το παραπάνω έχει να κάνει με την επικάλυψη των δυο σημάτων που είναι ορατή στο Σχήμα 6.3 και πρέπει να αποφεύγεται.

Γενικότερα για την επίτευξη σωστής απόκρισης πρέπει να γίνεται μοναδική αντιστοίχιση μιας θέσης μαγνήτη με μια τριάδα τιμών. Στην ιδανική περίπτωση οι 3 καμπύλες θα πρέπει να παραμένουν σταθερές στις περιοχές μακριά του μαγνήτη, να είναι γνησίως φθίνουσες καθώς αυτός πλησιάζει, παρουσιάζοντας ολικό ελάχιστο στη θέση ακριβώς σε αυτόν και να είναι γνησίως αύξουσες καθώς απομακρύνεται. Ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνεται επικάλυψη των 3 βυθίσεις.

Για παράδειγμα οι θέσεις 18 και 28 έχουν την ίδια απόκριση στη δεύτερη κορυφή επομένως από μόνη της αυτή η μέτρηση δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό της θέσης, ωστόσο η τριάδες

18 [0.81,0.83,1] και **28 [0.83,0.96,0.88]**

διαφέρουν με βάση τις άλλες δυο κορυφές επομένως η πρώτη μέτρηση αντιστοιχεί σε θέση κοντινότερη στο πρώτο πηνίο και μακρινή από το τρίτο, ενώ η δεύτερη σε μακρινή από το πρώτο και κοντινή από το δεύτερο.



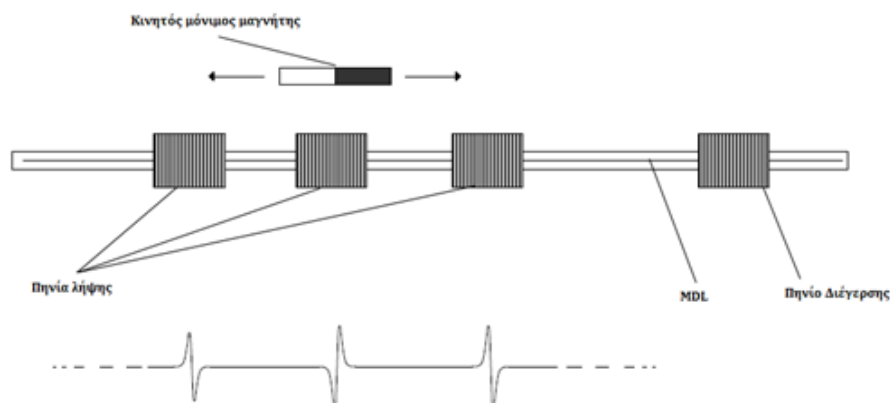
Σχήμα 6.13 Κανονικοποιημένο διάγραμμα απόκρισης αισθητήρα πολλαπλών διεγέρσεων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΛΗΨΕΩΝ

Αξιοποιώντας την εξάρτηση της απόκρισης MDL με το μαγνητικό πεδίο αυτή τη φορά στη λήψη, υλοποιείται διάταξη παρόμοια με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου.

7.1 Περιγραφή και κατασκευή διάταξης πολλαπλών λήψεων

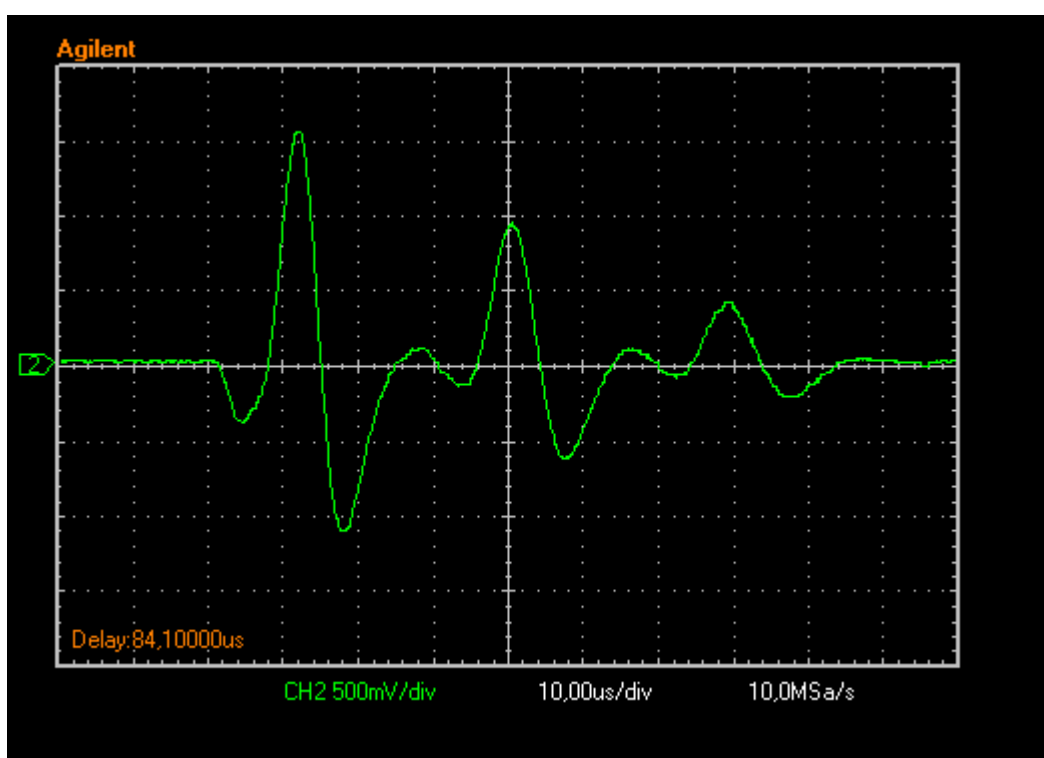
Η διάταξη αποτελείται από πολλαπλά πηνία λήψης, ένα πηνίο διέγερσης, την μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης και ένα μόνιμο μαγνήτη που κινείται παράλληλα στη γραμμή.



Σχήμα 7.1 Η διάταξη εντοπισμού μαγνήτη πολλαπλών λήψεων (επάνω).
Το σήμα στη λήψη και η επίδραση του μαγνήτη (κάτω) [7]

Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται από σύντομο παλμικό ρεύμα και δημιουργεί ελαστικούς παλμούς, που διαδίδονται κατά μήκος του MDL και τελικά επάγει τάση στα πηνία λήψης, κατά τα γνωστά. Ο μόνιμος μαγνήτης μεταβάλλει τοπικά το πεδίο πόλωσης και αλλάζει την απόκριση MDL κατά τη γνωστή εξάρτηση με το πεδίο.

Η διάταξη στην οποία έγιναν οι μετρήσεις είναι η ίδια με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου αλλάζοντας απλά τα πηνία. Για λήψεις χρησιμοποιήθηκαν πηνία 100 περιελίξεων, 3 επιπέδων των 33 περιελίξεων το κάθε επίπεδο, τυλιγμένα με σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm και για διέγερση χρησιμοποιείται ένα πηνίο 5 περιελίξεων τυλιγμένο με το ίδιο σύρμα. Το πηνίο διέγερσης συνδέεται κατευθείαν στο κύκλωμα διέγερσης, ενώ τα πηνία λήψης βρίσκονται σε σειρά, συνδέονται στο κύκλωμα ενίσχυσης και από εκεί στο παλμογράφο. Οι θέσεις των λήψεων είναι ίδιες με αυτές της προηγούμενης διάταξης, $x=11\text{cm}$, $x=23\text{cm}$ και $x=35\text{cm}$. Το σήμα στη λήψη χωρίς την επίδραση μαγνήτη είναι το ακόλουθο:

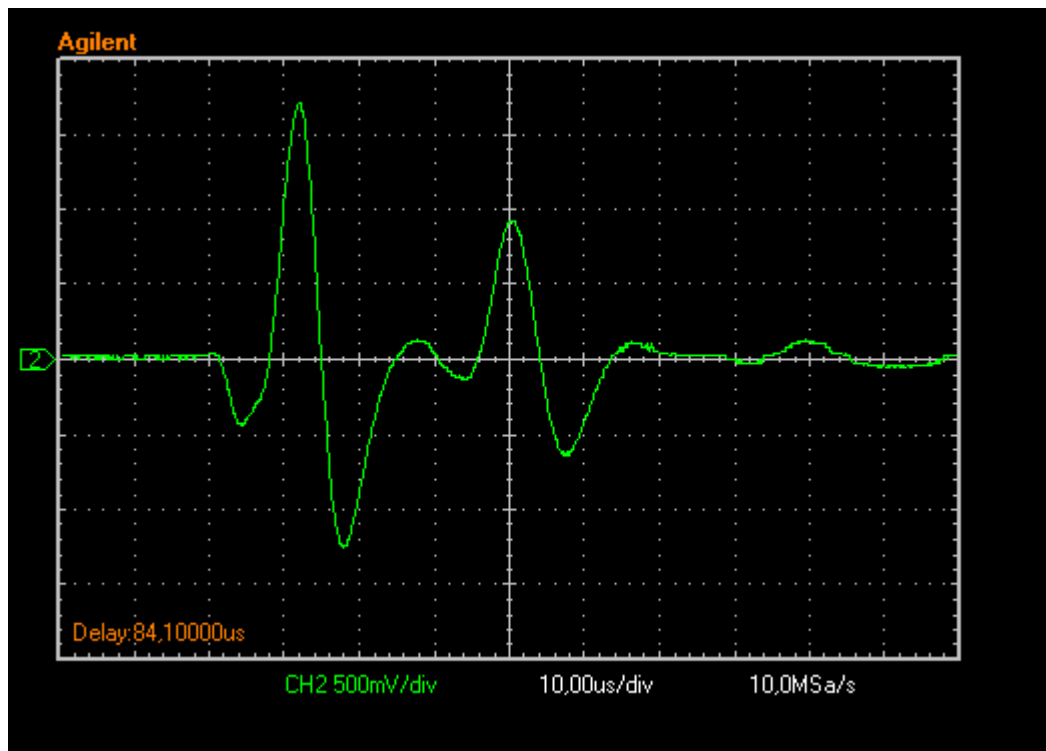
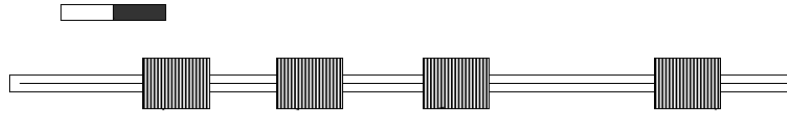


Σχήμα 7.2 Σήμα λήψης απουσία μαγνήτη

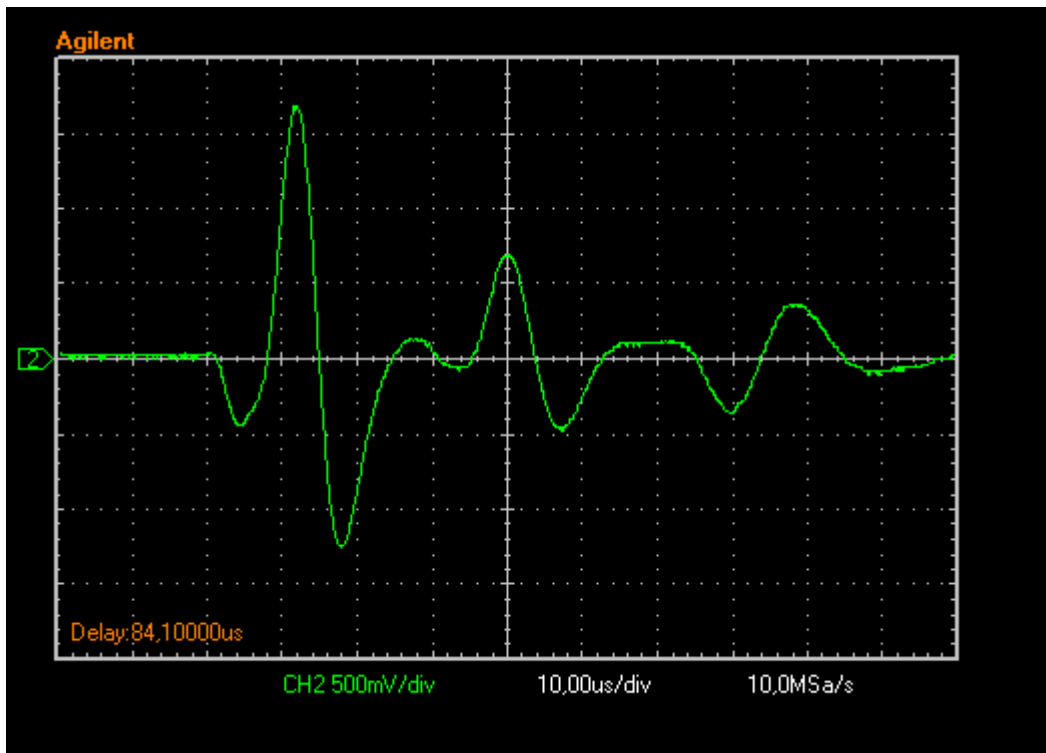
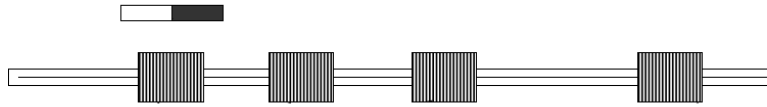
7.2 Μετρήσεις στη διάταξη πολλαπλών λήψεων

Στην διάταξή μας τοποθετείται ο μαγνήτης στη θέση $x=0\text{cm}$ και λαμβάνεται μια μέτρηση, στη συνέχεια μετατοπίζεται ο μαγνήτης με βήμα ένα εκατοστό και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, παίρνοντας συνολικά 43 μετρήσεις.

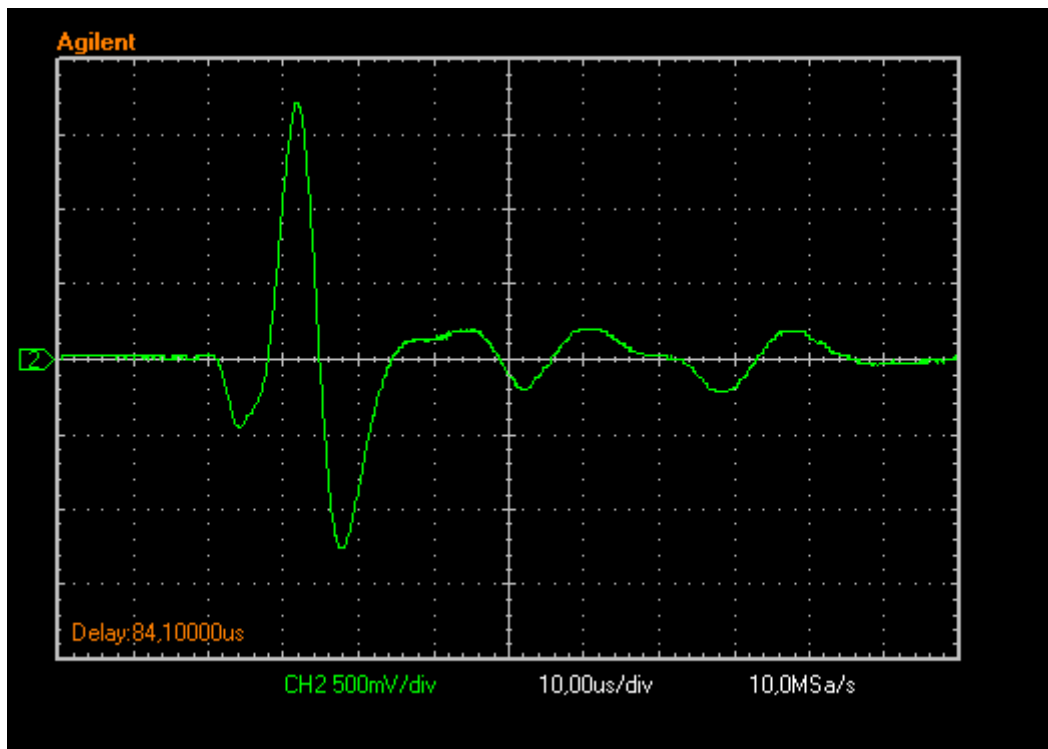
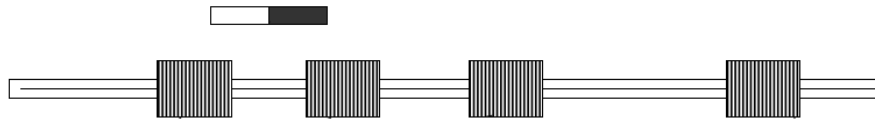
Στις εικόνες παλμογράφου που ακολουθούν παρουσιάζονται τα σήματα λήψης στις κρίσιμες θέσεις μαγνήτη $x=5$ έως 41cm με βήμα 6cm , που είναι θέσεις ακριβώς πάνω σε πηνία ή μεσοδιαστήματα ανάμεσά τους.



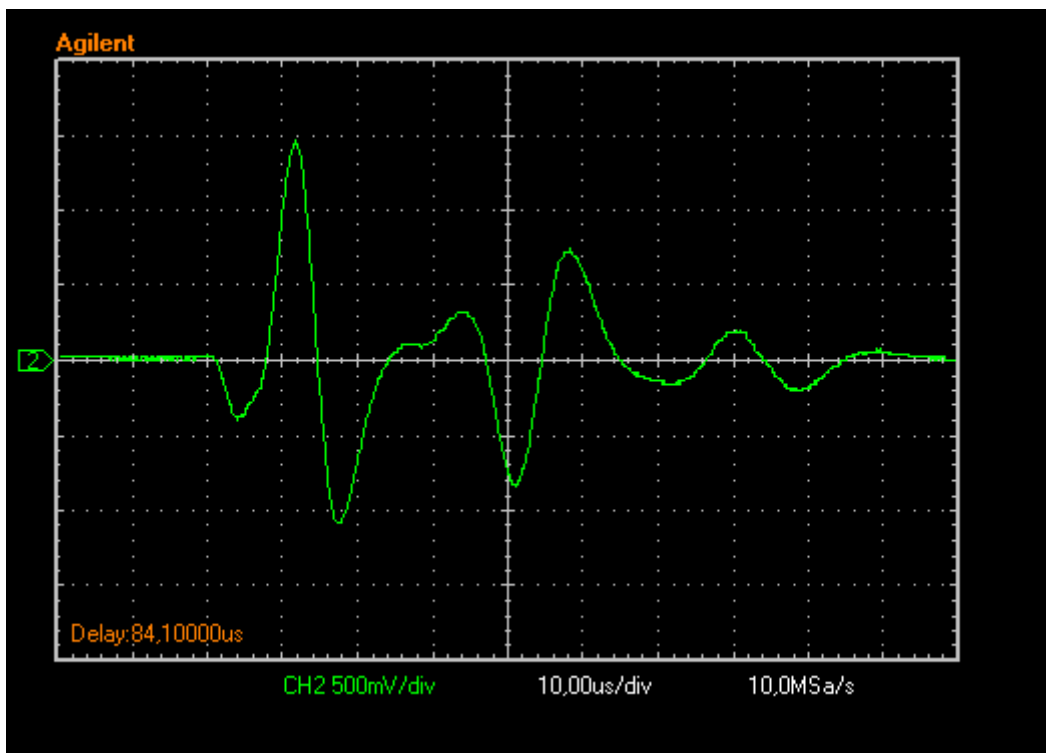
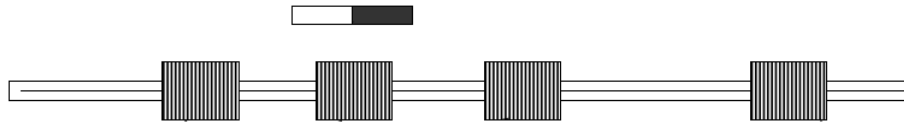
Σχήμα 7.3 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=5\text{cm}$



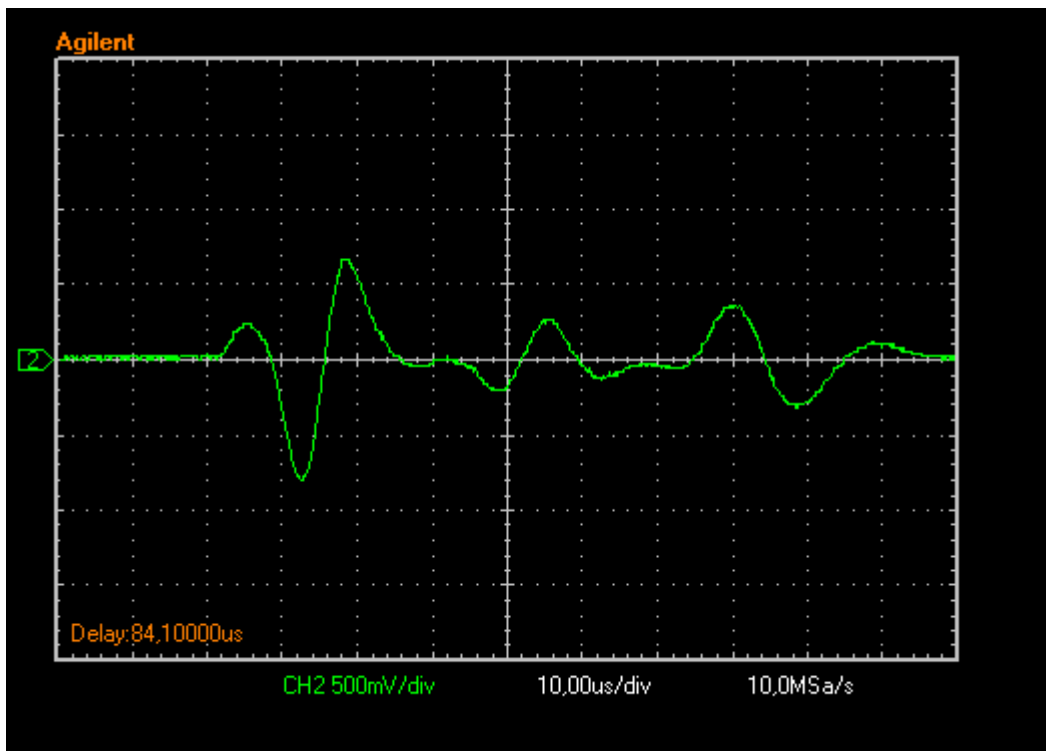
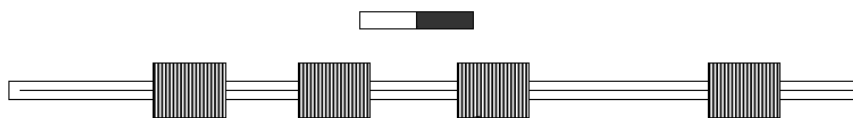
Σχήμα 7.4 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=11\text{cm}$



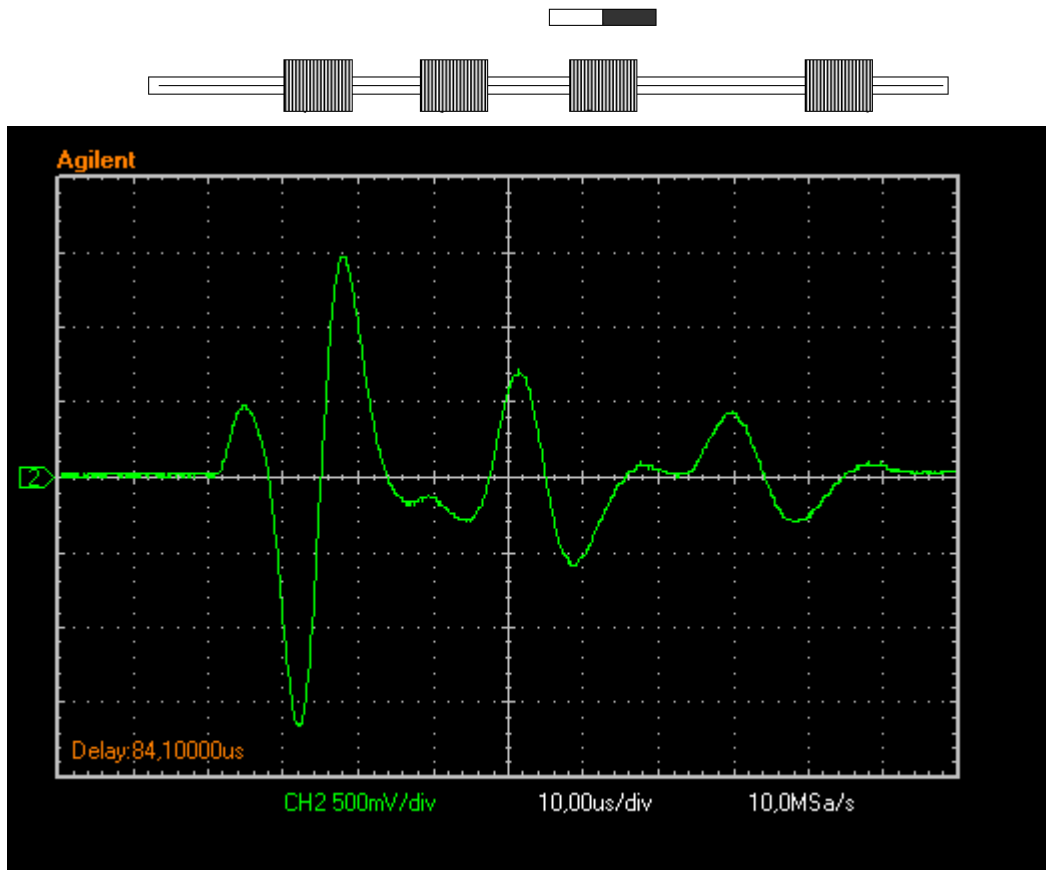
Σχήμα 7.5 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=17\text{cm}$



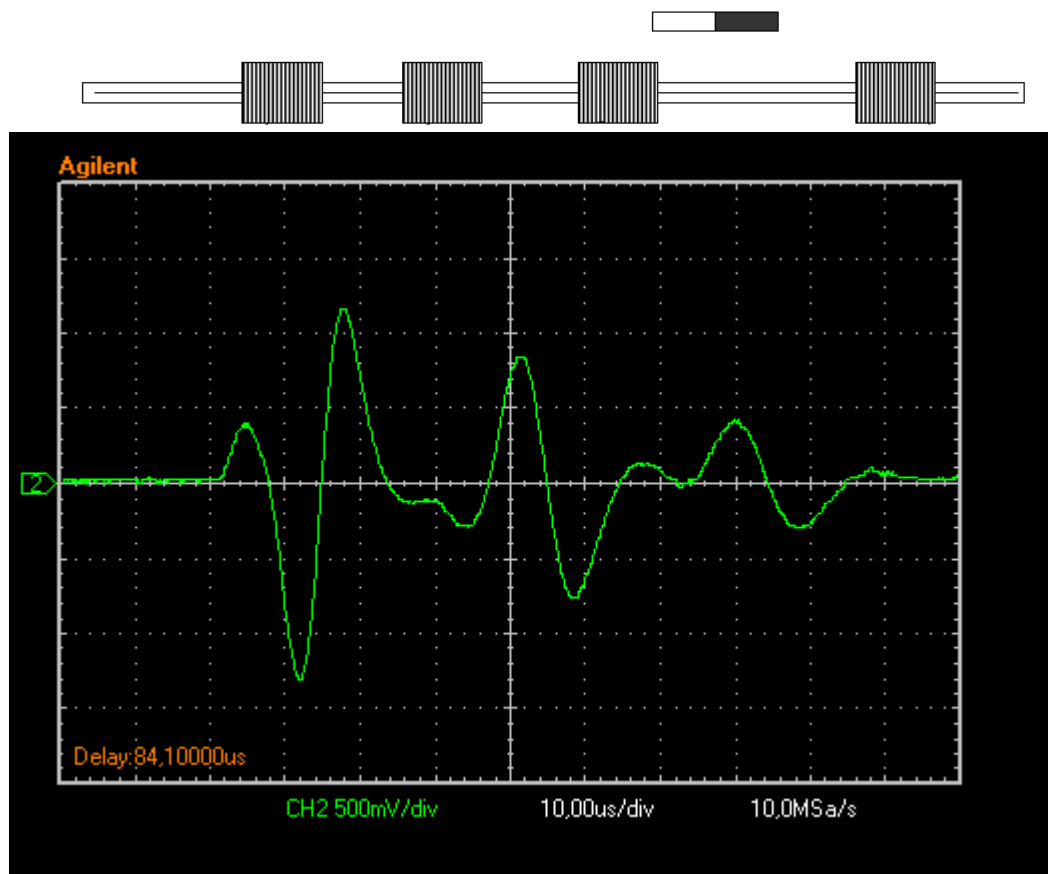
Σχήμα 7.6 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=23\text{cm}$



Σχήμα 7.7 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=29\text{cm}$



Σχήμα 7.8 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=35\text{cm}$



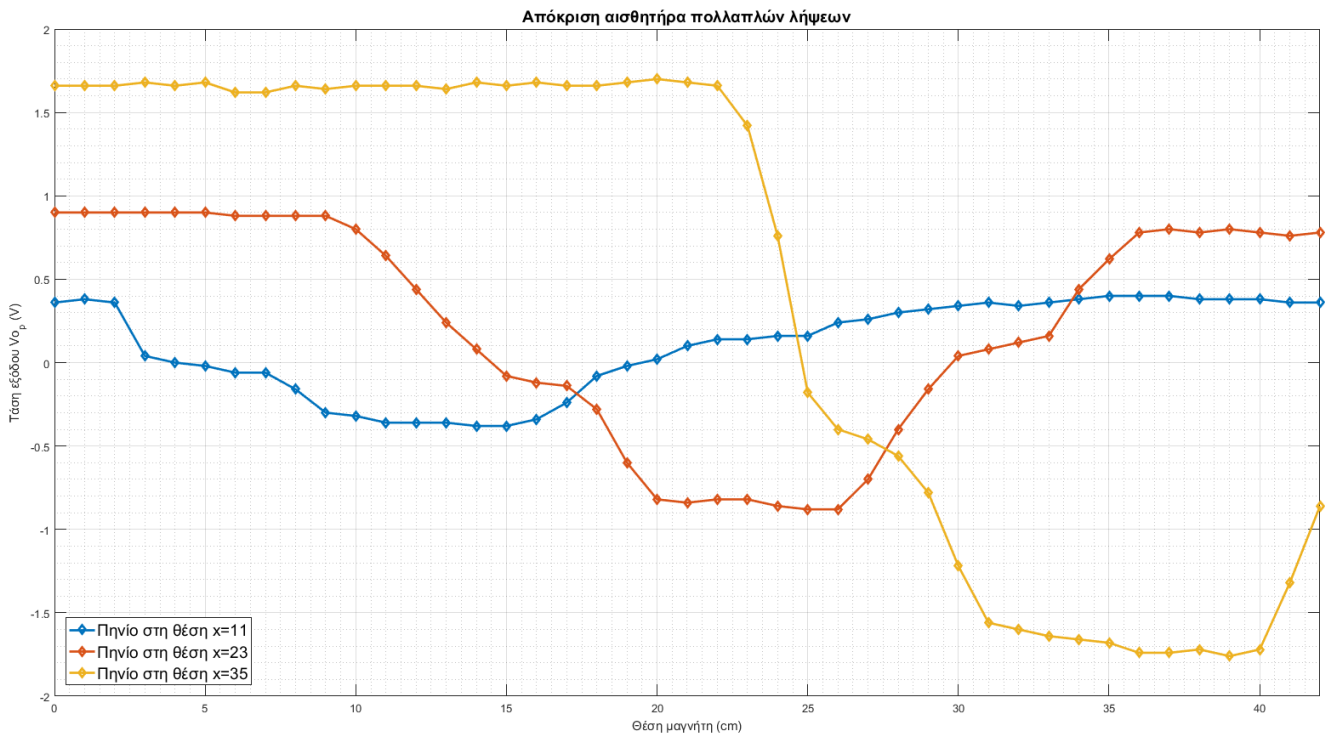
Σχήμα 7.9 Σήμα λήψης για θέση μαγνήτη $x=41\text{cm}$

Η συμπεριφορά της διάταξης εκ πρώτης όψεως φαίνεται πολύ διαφορετική από την προηγούμενη, παρόλα αυτά, θα παρουσιαστεί στα επόμενα πως είναι παρόμοια. Παρατηρείται λοιπόν: καθώς ο μαγνήτης πλησιάζει από τα αριστερά προς τα δεξιά (στις εικόνες παλμογράφου από δεξιά προς τα αριστερά), δεν υπάρχει απλά μείωση αλλά, αντιστροφή του ελαστικού παλμού στις περιοχές κοντά στο μαγνήτη. Συγκεκριμένα, η τρίτη κορυφή μειώνεται στη θέση $x=5\text{cm}$, στη συνέχεια για $x=11\text{cm}$ αντιστρέφεται εντελώς και καθώς ο μαγνήτης απομακρύνεται, στη θέση $x=17\text{cm}$ αρχίζει να επανέρχεται, ενώ πλέον η δεύτερη κορυφή αρχίζει να αντιστρέφεται. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει σε όλο το εύρος κίνησης του μαγνήτη και για τις άλλες δυο κορυφές.

Ο μαγνήτης και σε αυτές τις μετρήσεις είναι τοποθετημένος με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές του γραμμές να αντιτίθενται σε αυτές της γης επομένως παρατηρείται κίνηση πάνω στην καμπύλη εξάρτησης $V_o(H)$ προς τα αριστερά μειώνοντας το συνολικό σταθερό πεδίο τοπικά. Από την συμπεριφορά της απόκρισης γίνεται φανερό πως ξεπερνάμε την περιοχή της καμπύλης που έχουμε μηδενισμό της απόκρισης, περνάμε στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης και μάλιστα έως τη μη γραμμική περιοχή όπως θα γίνει φανερό στο διάγραμμα απόκρισης. Ο μαγνήτης που χρησιμοποιήθηκε και στις δυο μετρήσεις ήταν ο ίδιος, πράγμα που μας δείχνει ότι η καμπύλη εξάρτησης στην περιοχή της λήψης είναι πολύ πιο απότομη και επομένως η διάταξη πολύ πιο ευαίσθητη στις μεταβολές του πεδίου πόλωσης.

7.3 Διάγραμμα απόκρισης διάταξης πολλαπλών λήψεων

Η διαδικασία σχεδιασμού του διαγράμματος απόκρισης είναι παρόμοια: λήφθηκαν τα υπολογιστικά φύλλα από το πρόγραμμα του παλμογράφου όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις της προηγούμενης παραγράφου. Εισήχθησαν στο Matlab όπου εκεί λήφθηκε η κατά απόλυτο μέγιστη τάση κάθε κορυφής για τις διάφορες θέσεις του μαγνήτη και σχεδιάστηκε το διάγραμμα.



Σχήμα 7.10 Η απόκριση του αισθητήρα πολλαπλών πηνίων λήψης

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση κανονικοποιείται το διάγραμμα ώστε να αποβληθεί ο παράγοντας της εξασθένησης και λαμβάνεται το Σχήμα 7.11.

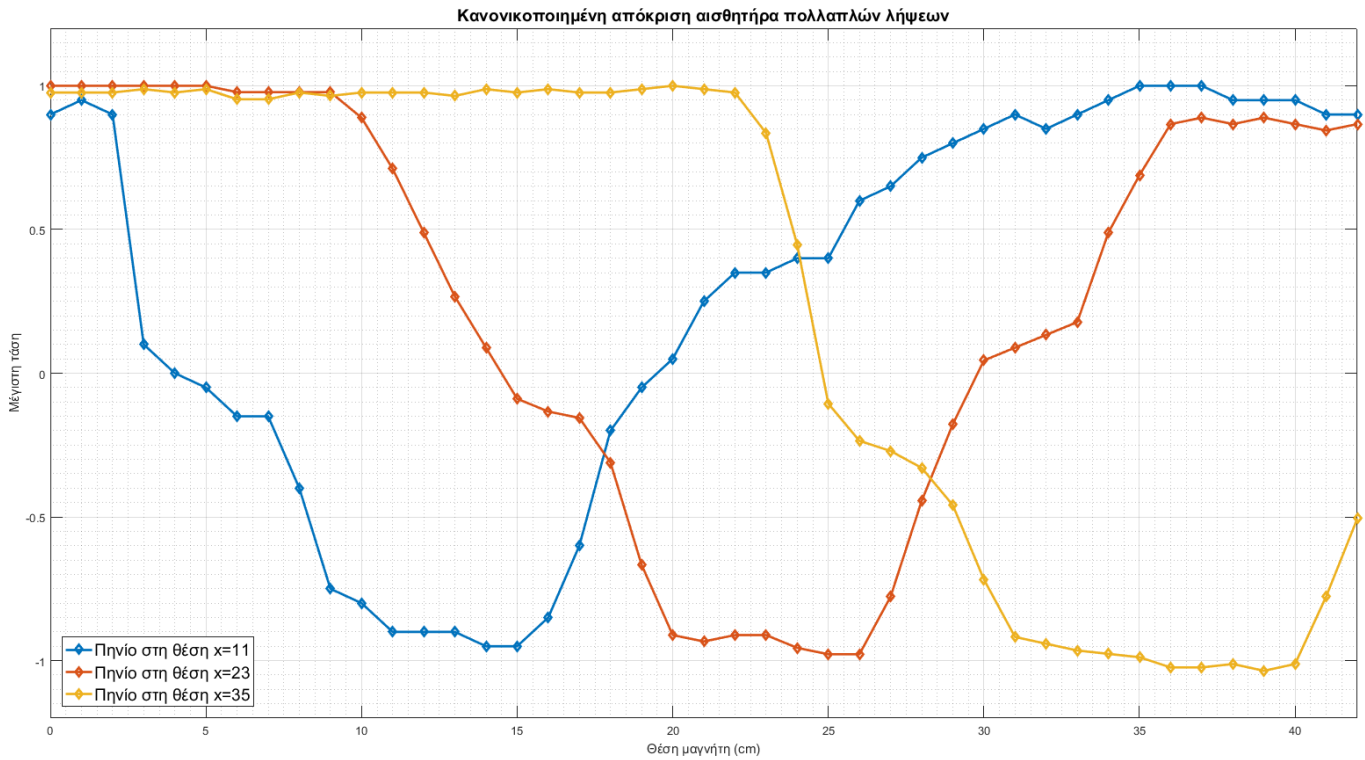
Από το διάγραμμα παρατηρείται πως υπάρχουν πλέον και αρνητικές τιμές, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί πρόβλημα, αφού μπορεί να διορθωθεί με την εισαγωγή μιας DC συνιστώσας κατά το στάδιο ενίσχυσης.

Ακόμα είναι φανερό πως δεν υπάρχει ένα ολικό ελάχιστο στη θέση των περιοχών λήψης αλλά ένα 'πλατό' γύρω από αυτές (εδώ γίνεται αντιληπτό πως βρισκόμαστε πλέον στη μη γραμμική περιοχή της καμπύλης εξάρτησης), σε εκείνες τις περιοχές ο προσδιορισμός της θέσης γίνεται από τις τιμές των άλλων δύο καμπυλών.

Γενικά παρουσιάζεται καλή επικάλυψη των βυθίσεων και μονοτονία των τριών καμπυλών, έτσι η θέση του μαγνήτη είναι σαφέστερη και δεν έχουμε 'τυφλά' σημεία.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σημεία τομής των καμπυλών, ανάμεσα σε περιοχές λήψης, όπου σε μια ιδανική απόκριση θα υπήρχε ταύτιση με το

μεσοδιάστημα ανάμεσα στα κέντρα δύο πηνίων λήψης. Στην απόκριση του σχήματος 7.11 δεν συμβαίνει αυτό, αλλά υπάρχει μια μικρή απόκλιση, η οποία οφείλεται σε γεωμετρικές αποκλίσεις, αλλά και σε κατασκευαστικές διαφορές ανάμεσα στα πηνία λήψης.



Σχήμα 7.11 Κανονικοποιημένη απόκριση του αισθητήρα πολλαπλών πηνίων λήψης

Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής εντοπισμού έχουν επιτευχθεί τριάδες τιμών που ορίζουν μονοσήμαντα τη θέση του μαγνήτη και η απόκριση της διάταξης κρίνεται καλή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στα δυο προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν δυο διατάξεις εντοπισμού μαγνήτη βασισμένες στην εξάρτηση της απόκρισης MDL από το μαγνητικό πεδίο πόλωσης στη περιοχή διέγερσης και λήψης αντίστοιχα. Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί μια συγκριτική μελέτη των δυο, ώστε να εντοπιστούν οι επιτυχίες και οι αστοχίες που παρατηρούνται στις δυο διατάξεις.

8.1 Σύγκριση των δυο διατάξεων

Αρχικά εξετάζονται οι παράγοντες που παίζουν ρόλο και προκαλούν ορατές διαφορές ανάμεσα στις δυο διατάξεις.

Η ανομοιομορφία των περιοχών:

Στην πρώτη διάταξη υπάρχουν πολλαπλές διεγέρσεις, δηλαδή η δημιουργία ελαστικών παλμών σε τρεις ξεχωριστές περιοχές του υλικού και λήψη σε μια. Αυτό σημαίνει πως η ανομοιομορφία των περιοχών διέγερσης δημιουργεί τρεις ελαστικούς παλμούς που διαφέρουν στην πλευρά της λήψης. Στην δεύτερη διάταξη υπάρχει μια μόνο διέγερση και τρεις λήψεις, το οποίο σημαίνει πως λαμβάνονται τρεις διαφορετικοί παλμοί καθώς αυτοί επηρεάζονται αυτή τη φορά από την ανομοιομορφία των περιοχών λήψης. Ωστόσο οι διαφορές από την ανομοιομορφία των περιοχών λήψης είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από την ανομοιομορφία των περιοχών διέγερσης, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ομοιότεροι μεταξύ τους παλμοί στην διάταξη πολλαπλών λήψεων.

Η εξάρτηση απόκρισης από το πεδίο πόλωσης:

Στις δύο διατάξεις χρησιμοποιούνται παρόμοιοι μαγνήτες για την τοπική μείωση του πεδίου πόλωσης, ωστόσο στη πρώτη διάταξη επιτυγχάνεται μικρή μείωση της κορυφής τάσης, ενώ στη δεύτερη πλήρης αναστροφή της. Από αυτό γίνεται

αντιληπτό πως η δεύτερη διάταξη είναι πολύ πιο ευαίσθητη σε αλλαγές του μαγνητικού πεδίου από την πρώτη. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη επικάλυψη των βυθίσεων στο διάγραμμα απόκρισης, αλλά επίσης σημαίνει πως η απόκρισή της μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας.

Η ανάλυση:

Η ανάλυση παίζει σημαντικό ρόλο και στις δυο διατάξεις, ειδικότερα στην πρώτη φαίνεται πως έχουμε επικάλυψη των σημάτων των ελαστικών παλμών ακόμα και σε απόσταση 12 εκατοστών από πηνίο σε πηνίο. Κάτι τέτοιο πρέπει να αποφεύγεται καθώς επηρεάζει την απόκριση όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της πρώτης διάταξης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ελαττώνοντας τον χρόνο διέγερσης.

Η μορφή του ρεύματος διέγερσης:

Στη πρώτη διάταξη πραγματοποιείται η διέγερση τριών πηνίων σε σειρά ενώ στη δεύτερη μόνο ενός, κάτι τέτοιο αλλάζει τα χαρακτηριστικά του φορτίου και επομένως του ρεύματος που το διαρρέει, προκαλώντας αντίστοιχες αλλαγές στην μορφή των ελαστικών παλμών.

Τα μέσα διέγερσης και λήψης:

Στην πρώτη διάταξη κατασκευάστηκαν τρία πηνία για την διέγερση 5 περιελίξεων και στη δεύτερη 3 πηνία για τη λήψη 100 περιελίξεων τριών επιπέδων. Τα πηνία διέγερσης είναι ομοιότερα μεταξύ τους ενώ στην περίπτωση των πηνίων λήψης μπορεί να παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους. Αυτός ο παράγοντας είναι καθαρά κατασκευαστικός αλλά δείχνει πως είναι πιο εύκολη και πιθανά πιο φτηνή η υλοποίηση με πολλές διεγέρσεις.

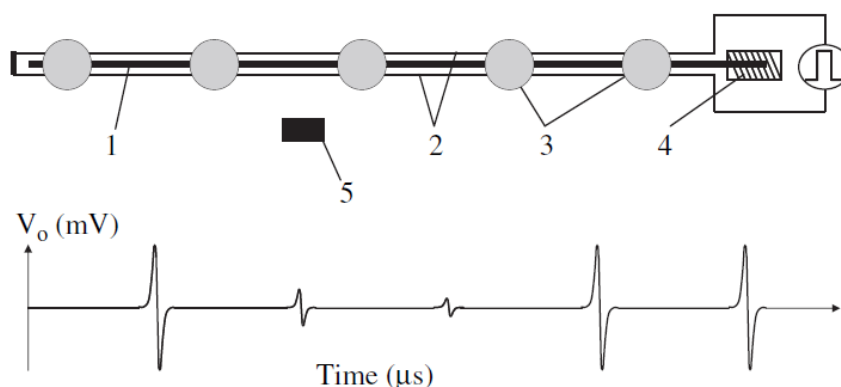
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα απόκρισης είναι φανερό πως η δεύτερη διάταξη δίνει καλύτερα αποτελέσματα αφού παρουσιάζει μονοτονία στην απόκριση, σαφή σημεία τομής των καμπυλών και έχει πολύ λιγότερα τυφλά σημεία. Αυτό δεν σημαίνει πως η πρώτη διάταξη είναι κατά ανάγκη χειρότερη, αφού με επιπλέον παραμετροποίηση θα μπορούσαν να επιτευχθούν αντίστοιχα αποτελέσματα.

8.2 Μελλοντική εργασία

Ο αισθητήρες MDL παρουσιάζουν καλές επιδόσεις και πολύ χαμηλό κόστος, επομένως περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα θα μπορούσε να οδηγήσει στην κατασκευή οικονομικότερων και ανταγωνιστικότερων διατάξεων.

Σε αυτή τη κατεύθυνση θα μπορούσε να κατασκευαστεί το κύκλωμα δειγματοληψίας και ψηφιοποίησης του σήματος, αλλά και το αντίστοιχο λογισμικό για μετρήσεις πραγματικού χρόνου. Ένα τέτοιο κύκλωμα θα είχε να κάνει με τον έλεγχο της διέγερσης, την μέτρηση χρόνου και την λήψη δειγμάτων πάνω στις κορυφές των ελαστικών παλμών, την μετατροπή της τάσης σε ψηφιακά δεδομένα και τη χρήση πίνακα αντιστοίχισης για την εύρεση της απόλυτης θέσης του μαγνήτη σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον στη βιβλιογραφία [8], έχει προταθεί ένας βελτιωμένος αισθητήρας του οποίου η λειτουργία είναι παρόμοια με αυτή της πρώτης διάταξης. Η κύρια διαφορά που παρουσιάζει είναι πως τα μέσα διέγερσης αντί για πηνία, είναι πλέον αγώγιμοι δίσκοι που βρίσκονται επάνω από τη μαγνητοσυστολική γραμμή.



Σχήμα 8.1 Βελτιωμένος αισθητήρας εντοπισμού μαγνήτη, με δίσκους δινορρευμάτων 1) MDL, 2) παράλληλοι αγωγοί, 3) δίσκοι δινορρευμάτων, 4) πηνίο λήψης 5) μαγνήτης

Παράλληλα στο MDL, βρίσκονται αγωγοί που τροφοδοτούνται από παλμικό ρεύμα. Αντίστροφα με τη ροή του ρεύματος, δημιουργούνται δινορρεύματα επάνω στους

δίσκους, παράγοντας τοπικά παλμικό μαγνητικό πεδίο και δημιουργώντας ελαστικό παλμό κατά μήκος του MDL. Ο εντοπισμός ενός μόνιμου μαγνήτη μπορεί να γίνει μέσω της εξάρτησης της απόκρισης από το μαγνητικό πεδίο, παρόμοια με τις διατάξεις που παρουσιάστηκαν.

Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, που έχουν να κάνουν με το μειωμένο κόστος και την ευκολία συσκευασίας και παραγωγής του αισθητήρα σε μορφή ταινίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Καλαιτζάκης, Ε. Κουτρούλης, Ηλεκτρικές μετρήσεις και Αισθητήρες, Κλειδάριθμος, 2010
- [2] Herceg, E.E., Handbook of Measurement and Control, Schaevitz Engineering, 1976
- [3] D. Jiles, Introduction to magnetism and magnetic materials, CRC press, 2015
- [4] E. Hristoforou, A. Ktena, "Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 316(2), pp.372-378, 2007
- [5] <http://www.centropiaggio.unipi.it/sites/default/files/course/material/magneto-reologicimagneto-strittivi.pdf>
- [6] Feynman, Leighton, Sands, The Feynman lectures on Physics Vol. II, Basic Books, 1964
- [7] E. Hristoforou, "Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications", Measurement Science and Technology, 14(2), p.R15, 2003
- [8] E. Hristoforou, "New position sensor based on the magnetostrictive delay line principle", Sensor Letters 7(3), pp.303-309, 2009
- [9] E. Hristoforou, C. Tsomokou, H. Chiriac, M. Neagu, V. Nagacevski, "Improving the magnetostrictive delay line resolution", Sensors and Actuators A: Physical, 59(1-3), pp. 84-88, 1997
- [10] E. Hristoforou, "Amorphous magnetostrictive wires used in delay lines for sensing applications", Journal of magnetism and magnetic materials, 249(1-2), pp.387-392, 2002
- [11] E. Hristoforou, R.E. Reilly, "Nonuniformity in amorphous ribbon delay lines after stress and current annealing", Journal of Applied Physics 69(8), pp.5008-5010, 1991
- [12] H. Chiriac, E. Hristoforou, M. Neagu, I. Darie, "On the bias field dependence of FeSiB wire delay lines response", Sensors and Actuators A: Physical 59(1-3), pp.75-78, 1997

- [13] H. Chiriac, E. Hristoforou, M. Neagu, I. Darie, F Barariu, "Dependence of the sound velocity in FeSiB amorphous wires on the magnetic bias field", Journal of magnetism and magnetic materials 157, 229-230, 1996
- [14] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, "Pulse width effect on magnetostrictive amorphous ribbons and wires", physica status solidi (a), 143(2), pp. 391-397, 1994
- [15] Application Note: Power MOSFET Selecting MOSFETs and Consideration for Circuit Design, 2017
<https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=13416>
- [16] Application Note: Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits, 2002
www.ti.com/lit/ml/slva618/slva618.pdf