



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα καταγραφής του βρόχου υστέρησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χ. Βερίγος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα καταγραφής του βρόχου υστέρησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Βερίγος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Νοεμβρίου 2024.

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

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Χ. Βερίγος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Βερίγος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στη μνήμη των γονιών μου,
Χρήστου και Σοφίας Βερίγου*

Περίληψη

Οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι ζωτικής σημασίας για τον σύγχρονο κόσμο, καθώς προσφέρουν εξαιρετική ακρίβεια και ευαισθησία στην ανίχνευση και μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Συναντώνται σε ποικίλες εφαρμογές που βελτιώνουν την ασφάλεια, την άνεση και την αποτελεσματικότητα σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας, όπως την αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, τη ναυτιλία, και την πλοήγηση γενικότερα. Τέτοιου είδους αισθητήρια όργανα, με την κατάλληλη βαθμονόμηση εκμεταλλεύονται τα ειδικά χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών όπως τη μαγνητική τους διαπερατότητα, την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη μαγνητική επαγωγή που τα διαρρέει, προκειμένου να αντλήσουν πολύτιμες πληροφορίες για την δομή και την κατάσταση ενός υλικού.

Αξιοποιώντας αυτές, λοιπόν, τις ιδιότητες των μαγνητικών υλικών, στην παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται να ερευνηθεί και να κατασκευαστεί ένας αισθητήρας γoke με διάφορες παραλλαγές για πηνίο διέγερσης και πηνίο λήψης, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή του βρόχου υστέρησης δειγμάτων χάλυβα. Έτσι, επιτυγχάνεται μία μη καταστροφική ανάλυση του δείγματος για των προσδιορισμό ατελειών και αστοχιών στο υλικό.

Λέξεις-κλειδιά: Μαγνητικά υλικά, Μαγνητικοί αισθητήρες, Μη Καταστροφικός Έλεγχος, Βρόχος υστέρησης, Πηνίο

Abstract

Magnetic sensors are of vital importance in the modern world, as they provide exceptional precision and sensitivity in detecting and measuring magnetic fields. They are used in a variety of applications that enhance safety, comfort, and efficiency across many aspects of daily life, such as the automotive industry, medicine, navigation, and maritime sectors. These sensing instruments, with proper calibration, leverage the specific characteristics of magnetic materials, such as magnetic permeability, magnetic field strength, and magnetic flux density, to extract valuable information about the structure and condition of a material.

Thus, by utilizing these properties of magnetic materials, this thesis will explore and construct a yoke sensor with various configurations for the excitation and receiving coils. This sensor will be used to record the hysteresis loop of steel samples, achieving a non-destructive analysis of the sample to identify defects and failures in the material.

Keywords: *magnetic materials, magnetic sensors, Non Destructive Testing, Hysteresis loop, coil*

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη, διερεύνηση και υλοποίηση ενός μαγνητικού αισθητήρα για την καταγραφή και απεικόνιση του Βρόχου υστέρησης ενός δείγματος χάλυβα. Η υλοποίηση του αισθητήρα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της διπλωματικής ήταν η ακαδημαϊκή μελέτη μιας τέτοιας διάταξης, καθώς και η κατανόηση της λειτουργίας, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών που έχει ένα τέτοιο εγχείρημα.

Στο κεφάλαιο 1, γίνεται μια συνοπτική εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας αναφέροντας τη σημαντικότητα των αισθητήρων γενικότερα, αλλά και των μαγνητικών αισθητήρων ειδικότερα στην καθημερινότητα των ανθρώπων.

Στο κεφάλαιο 2, αναφέρονται περιληπτικά κάποιοι από τους κυριότερους θεμελιώδεις νόμους της Φυσικής και του Ηλεκτρομαγνητισμού που διέπουν τον κόσμο. Γίνεται αναφορά στις εξισώσεις του Maxwell, καθώς επίσης και στα μαγνητικά κυκλώματα και τις ιδιότητές τους.

Το κεφάλαιο 3 αναλώνεται στην εκτενή περιγραφή των κάποιων βασικών μαγνητικών αισθητήρων, των χαρακτηριστικών τους και της εφαρμογής τους. Στην αρχή, γίνεται κατηγοριοποίηση των μαγνητικών υλικών και των ιδιοτήτων τους. Επικεντρώνεται κυρίως στον Βρόχο υστέρησης των μαγνητικών υλικών και στο θόρυβο Barkhausen. Τέλος, περιγράφεται ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) και μερικές εφαρμογές του.

Στο κεφάλαιο 4, ξεκινά το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζεται η γενική διάταξη που θα κατασκευαστεί στο εργαστήριο μαζί με το απαραίτητο ηλεκτρικό κύκλωμα. Το μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαίου περιλαμβάνει όλες τις παραλλαγές των πηνίων του αισθητήρα και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους.

Το κεφάλαιο 5 χωρίζεται σε δύο νοητά μέρη: στην υλοποίηση του ηλεκτρικού κυκλώματος του αισθητήρα και στην απεικόνιση του Βρόχου υστέρησης των δειγμάτων. Το κύκλωμα, αρχικά, κατασκευάζεται σε προσομοιωτή έτσι ώστε να σχεδιαστεί με βάση τις απαιτήσεις της διάταξης.

Στο κεφάλαιο 6, γίνεται μια συγκεντρωτική ανασκόπηση όλων των παρατηρήσεων και των συμπερασμάτων που αντλήθηκαν κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης της εργασίας.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Πολλοί λένε ότι “το πιο δύσκολο κομμάτι είναι πάντα η αρχή”. Για μένα ήταν το τέλος. Γιατί όταν είσαι στην αρχή, δεν ξέρεις τι σε περιμένει στο τέλος. Και ενώ την αρχή μπορείς να την δεις, να προετοιμαστείς, να ενθουσιαστείς γι αυτήν, τελικά όλα τα ανεπάντεχα του μέλλοντος και όλα τα εμπόδια που θα προκύψουν είναι αυτά που μετράνε. Και αυτά ήρθανε στο τέλος... Θέλω να πω ένα ευχαριστώ στους γονείς μου Χρήστο και Σοφία Βερίγου, έστω από δω, κι ας είναι πια αργά, που μου έδωσαν τα πάντα και δεν πρόλαβαν να πάρουν πίσω τίποτα.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου Μάνο και Γιώργο μαζί με τις οικογένειες τους, τους θείους και τις θείες μου και τους φίλους μου που είναι κοντά μου και με στηρίζουν. Ακόμα, όλους τους άλλους ανθρώπους που εδώ και τόσα χρόνια είναι δίπλα μου και με κάνουν να αισιοδοξώ.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή μου Ευάγγελο Χριστοφόρου για την στήριξη που μου έδωσε και όλη την υπομονή και κατανόηση που έδειξε. Οι γνώσεις του και η αγάπη του για αυτόν τον τομέα και ο ζήλος του να τα διδάξει ήταν αυτά που μου έδωσαν, έστω και λίγο, νόημα να συνεχίσω. Επίσης, ειδικά απ’ το εργαστήριο αισθητήρων θα ήθελα να ευχαριστήσω μία κοπέλα με ξανθά μαλλιά που της δανείστηκα το πολύμετρο, όση ώρα εκπονούσε το πείραμα για το διδακτορικό της. Η θετική της ενέργεια και η εξωστρέφεια της εκείνη τη στιγμή ήταν πολύ σημαντική για μένα.

Αλλά πάνω απ’ όλα, το μεγαλύτερο ευχαριστώ στον εαυτό μου που δεν το βάζει κάτω.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vii
Πρόλογος – Ευχαριστίες.....	ix
Ευρετήριο Σχημάτων.....	xiii
Ευρετήριο Πινάκων.....	xv
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....	3
2.1 Βασικές έννοιες – εξισώσεις.....	3
2.1.1 Δύναμη Lorentz.....	3
2.1.2 Εξισώσεις Maxwell.....	4
2.1.3 Ένταση μαγνητικού πεδίου.....	5
2.2 Θεωρία των πηνίων.....	6
2.3 Μαγνητικά κυκλώματα.....	8
2.3.1 Βασική τοπολογία.....	8
2.3.2 Αναλογίες μεγεθών για ηλεκτρικά και μαγνητικά κυκλώματα.....	9
3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	11
3.1 Εισαγωγή.....	11
3.2 Τύποι μαγνητικών υλικών.....	12
3.3 Βρόχος Υστέρησης.....	12
3.3.1 Μαγνήτιση κορεσμού.....	14
3.3.2 Παραμένουσα μαγνήτιση.....	14
3.3.3 Συνεκτικό πεδίο.....	14
3.3.4 Μαλακά και σκληρά φερρομαγνητικά υλικά.....	14
3.4 Θόρυβος Barkhausen.....	15
3.4.1 Ορισμός του Θορύβου Barkhausen.....	15
3.4.2 Θόρυβος Barkhausen στα φερρομαγνητικά Υλικά.....	16

3.5 Μαγνητικοί Αισθητήρες.....	17
3.5.1 Εισαγωγή.....	17
3.5.2 Πηνίο ανίχνευσης.....	18
3.5.3 Αισθητήρες Hall.....	18
3.5.4 Αισθητήρες μαγνητοσυστολικής καθυστέρησης (MDL).....	21
3.5.5 Αισθητήρες πύλης ροής (fluxgate).....	22
3.5.6 Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (MR).....	25
3.5.7 Αισθητήρες SQUID (Superconducting Quantum Interference Device).....	27
3.6 Μη καταστροφικός έλεγχος.....	28
3.6.1 Μη Καταστροφικός Έλεγχος μαγνητικών υλικών.....	29
4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ	33
4.1 Εισαγωγή.....	33
4.2 Γενική Διάταξη αισθητήρα.....	34
4.3 Ηλεκτρικό κύκλωμα.....	35
4.4 Παραλλαγές του αισθητήρα.....	36
4.4.1 Κατασκευή των πηνίων.....	36
4.4.2 Μελέτη και σύγκριση μεταξύ τους.....	38
5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΠΑΝΩ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ.....	50
5.1 Εισαγωγή.....	50
5.2 Κατασκευή ολοκληρωτή.....	51
5.2.1 Προσομοίωση στο Pspice.....	51
5.2.2 Κατασκευή στο εργαστήριο.....	53
5.3 Μετρήσεις και απεικόνιση στον παλμογράφο.....	55
5.3.1 Συνολική διάταξη.....	55
5.3.2 Διεξαγωγή μετρήσεων.....	57
6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Βασική μορφή ενός πηνίου [5].....	7
Σχήμα 2: Αναλογία ηλεκτρικού - μαγνητικού κυκλώματος [6].....	8
Σχήμα 3: Τυπικός Βρόχος Υστέρησης [11].....	13
Σχήμα 4: Βρόχος Υστέρησης για μαλακό υλικό (αριστερά) και για σκληρό υλικό (δεξιά) [12].....	15
Σχήμα 5: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall [15].....	20
Σχήμα 6: Τυπική διάταξη αισθητήρα MDL [20].....	22
Σχήμα 7: Τυπική διάταξη αισθητήρα Fluxgate.....	23
Σχήμα 8: Fluxgate δακτυλιοειδούς πυρήνα.....	24
Σχήμα 9: Fluxgate ορθογώνιας διάταξης.....	24
Σχήμα 10: Δομή στοιχείων GMR.....	26
Σχήμα 11: Τυπική διάταξη αισθητήρα SQUID [25].....	28
Σχήμα 12: Τυπική διάταξη ολοκληρωτή.....	35
Σχήμα 13: Πηνίο διέγερσης (πηνίο 0).....	37
Σχήμα 14: Πηνία λήψης 1, 2 & 3.....	37
Σχήμα 15: Πηνία λήψης 4, 5, 6 & 7.....	38
Σχήμα 16: Πηνίο διέγερσης και λήψης στην ίδια βάση. ("πηνίο 8").....	38
Σχήμα 17: Τυπική διάταξη κυκλώματος για την μελέτη των πηνίων λήψης.....	39
Σχήμα 18: Συνολική διάταξη για τη σύγκριση των πηνίων.....	40
Σχήμα 19: Τάση απόκρισης πηνίων για συχνότητα $f=1\text{Hz}$.....	46
Σχήμα 20: Τάση απόκρισης πηνίων για συχνότητα $f=5\text{Hz}$.....	47
Σχήμα 21: Τάση απόκρισης πηνίων για συχνότητα $f=10\text{Hz}$.....	48
Σχήμα 22: Κύκλωμα ολοκληρωτή στο Pspice.....	51
Σχήμα 23: Σχέση εισόδου - εξόδου ολοκληρωτή για $R1=1\text{k}\Omega$, $R2=100\text{k}\Omega$ στο Pspice.....	52
Σχήμα 24: Σχέση εισόδου - εξόδου ολοκληρωτή για $R1=10\text{k}\Omega$, $R2=1\text{M}\Omega$ στο Pspice.....	52

Σχήμα 25: Σχέση εισόδου - εξόδου ολοκληρωτή για $R1=1k\Omega$, $R2=10M\Omega$ στο Pspice.....	53
Σχήμα 26: Κύκλωμα ολοκληρωτή στο breadboard.....	54
Σχήμα 27: Απεικόνιση παλμογράφου ολοκληρωτή με είσοδο τετραγωνικό παλμό $f=10Hz$	55
Σχήμα 28: Απεικόνιση παλμογράφου ολοκληρωτή με είσοδο ημίτονο συχνότητας $f=10Hz$	55
Σχήμα 29: Συνολική διάταξη για τον προσδιορισμό του βρόχου υστέρησης.....	56
Σχήμα 30: Δείγματα χάλυβα στα οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος.....	57
Σχήμα 31: Συνολική διάταξη καταγραφής του βρόχου υστέρησης.....	58
Σχήμα 32: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 αριστερά με $f=5Hz$	59
Σχήμα 33: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 κέντρο με $f=5Hz$	59
Σχήμα 34: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 δεξιά με $f=5Hz$	60
Σχήμα 35: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 αριστερά με $f=10Hz$	60
Σχήμα 36: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 κέντρο με $f=10Hz$	61
Σχήμα 37: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 δεξιά με $f=10Hz$	61
Σχήμα 38: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 αριστερά με $f=5Hz$	62
Σχήμα 39: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 κέντρο με $f=5Hz$	62
Σχήμα 40: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 δεξιά με $f=5Hz$	63
Σχήμα 41: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 αριστερά με $f=10Hz$	63
Σχήμα 42: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 κέντρο με $f=10Hz$	64
Σχήμα 43: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 δεξιά με $f=10Hz$	64
Σχήμα 44: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 1 με $f=5Hz$	65
Σχήμα 45: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 1 με $f=10Hz$	65
Σχήμα 46: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 2 με $f=5Hz$	66
Σχήμα 47: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 2 με $f=10Hz$	66

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Αναλογίες μεγεθών μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων.	9
Πίνακας 2: Συνοπτική περιγραφή των πηνίων που κατασκευάστηκαν.....	36
Πίνακας 3: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 1 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	40
Πίνακας 4: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 2 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	41
Πίνακας 5: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 3 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	42
Πίνακας 6: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 4 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	42
Πίνακας 7: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 5 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	43
Πίνακας 8: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 6 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	44
Πίνακας 9: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 7 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	44
Πίνακας 10: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 8 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.....	45
Πίνακας 11: Απόκριση των πηνίων λήψης για συχνότητα $f=1\text{Hz}$	46
Πίνακας 12: Απόκριση των πηνίων λήψης για συχνότητα $f=5\text{Hz}$	46
Πίνακας 13: Απόκριση των πηνίων λήψης για συχνότητα $f=10\text{Hz}$	47
Πίνακας 14: Συνοπτική παρουσίαση όλων των σημείων απεικόνισης του βρόχου υστέρησης.....	57

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αισθητήρες αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο της σύγχρονης τεχνολογίας, χρησιμοποιούμενοι σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών για τη μέτρηση, τον έλεγχο και τη συλλογή δεδομένων. Μετατρέπουν φυσικά μεγέθη, όπως θερμοκρασία, πίεση, δόνηση ή μαγνητικά πεδία, σε σήματα που μπορούν να επεξεργαστούν και να αξιοποιηθούν από συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου. Η συμβολή τους είναι κρίσιμη σε τομείς όπως η βιομηχανία, η ιατρική, η αεροδιαστημική και η ενέργεια, επιτρέποντας την αυτοματοποίηση διαδικασιών και την παρακολούθηση κρίσιμων συνθηκών με ακρίβεια.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η χρήση αισθητήρων σε τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ). Ο ΜΚΕ επιτρέπει την ανίχνευση ελαττωμάτων ή ανωμαλιών σε υλικά και δομές χωρίς να απαιτείται η καταστροφή του αντικειμένου που εξετάζεται. Τα μαγνητικά υλικά διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο σε αυτές τις διαδικασίες, καθώς μπορούν να ανιχνεύουν ακόμα και πολύ μικρές διαταραχές στο μαγνητικό πεδίο ενός υλικού. Τέτοιες διαταραχές μπορούν να συνδεθούν με την παρουσία ατέλειες στο υλικό.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη και χρήση ενός τέτοιου είδους αισθητήρα με σκοπό την διερεύνηση φερρομαγνητικών υλικών (πχ. Χάλυβα) ως προς την “υγεία” του υλικού. Δηλαδή, στην ύπαρξη ή μη ατελειών στην εσωτερική δομή του μετάλλου. Αυτό επιτυγχάνεται εκμεταλλευόμενοι την υψηλή διαπερατότητα αυτών των υλικών και τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Πρόκειται, επίσης, να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης διάταξης ως προς το ποια είναι τα καταλληλότερα πηνία για την ακριβή λειτουργία

του αισθητήρα και τι συμβιβασμοί και παραδοχές μπορούν να γίνουν έτσι ώστε το αποτέλεσμα να παραμένει ακριβές.

2

ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

2.1 Βασικές έννοιες – εξισώσεις

Το φαινόμενο του ηλεκτρομαγνητισμού είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, η οποία περιγράφεται από τις εξισώσεις του Maxwell. Στην καθημερινή ζωή, ο ηλεκτρομαγνητισμός έχει τεράστιο αντίκτυπο και βρίσκει εφαρμογές σε πληθώρα τεχνολογιών. Η θεμελίωση του ηλεκτρομαγνητισμού οφείλεται σε σημαντικούς επιστήμονες που συνέβαλαν στην κατανόηση αυτού του φαινομένου. Ο Coulomb ήταν από τους πρώτους που περιέγραψαν τη δύναμη μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων, εισάγοντας τον Νόμο του Coulomb για την αλληλεπίδρασή τους. Επίσης, ο Faraday διεύρυνε τις γνώσεις αυτές με την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, που δείχνει ότι η αλλαγή ενός μαγνητικού πεδίου μπορεί να δημιουργήσει ηλεκτρικό πεδίο. Ο Maxwell ενοποίησε τις γνώσεις του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού στις περίφημες εξισώσεις του, που παρέχουν ένα συνεκτικό θεωρητικό πλαίσιο για τον ηλεκτρομαγνητισμό. Τέλος, ο Lorentz συνέβαλε με τον ορισμό της δύναμης Lorentz και τους μετασχηματισμούς Lorentz, οι οποίοι περιγράφουν την κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία [1]. Στη συνέχεια, αναλύονται μερικές από τις θεμελιώδεις εξισώσεις που περιγράφουν τον ηλεκτρομαγνητισμό.

2.1.1 Δύναμη Lorentz

Στη φύση σε κάθε σώμα επιδρούν πάνω του δυνάμεις εξαιτίας του ηλεκτρομαγνητισμού που βρίσκεται γύρω μας. Η δύναμη αυτή περιγράφεται από την δύναμη Lorentz όπου στην γενική της μορφή, για ένα φορτίο q ισχύει:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

, όπου $\mathbf{v}$ η ταχύτητα με την οποία κινείται, $\mathbf{E}$ η ένταση του ηλεκτρικού φορτίου και $\mathbf{B}$ η μαγνητική επαγωγή του πεδίου.

2.1.2 Εξισώσεις Maxwell

Εκτός από την δύναμη Lorentz θεμελιώδεις εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού είναι και οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell [1], [2], [3], [4]. Οι εξισώσεις αυτές τόσο στην διαφορική, όσο και στην ολοκληρωτική τους μορφή είναι:

- Πρώτος νόμος – Νόμος Gauss.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = Q / \epsilon_0 \quad (2.3)$$

Αυτός ο νόμος περιγράφει ότι σε μια κλειστή επιφάνεια το επιφανειακό ολοκλήρωμα του $\mathbf{E}$ είναι ανάλογο με το ολικό φορτίο που περικλείεται από την επιφάνεια [1].

- Δεύτερος νόμος – Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2.5)$$

Ο νόμος αυτός δίνει ότι στο μαγνητικό πεδίο το επιφανειακό ολοκλήρωμα του $\mathbf{B}$ σε μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδέν που αποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα στη φύση [1].

- Τρίτος νόμος – Εξίσωση Maxwell-Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (2.6)$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d/dt \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.7)$$

Σε αυτήν την εξίσωση περιγράφεται ότι εφόσον υπάρξει μεταβολή του συνολικού μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από μια επιφάνεια, εξ αιτίας της μεταβολής αυτής δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο σύνορο της επιφάνειας.

- Τέταρτος νόμος – Νόμος Ampere με προσθήκη Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.9)$$

Αντίστοιχα, ο νόμος αυτός δηλώνει ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους: με ηλεκτρικό ρεύμα και με μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία. Στις παραπάνω εξισώσεις ισχύει:

$\mathbf{E}$ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

$\mathbf{B}$ η πυκνότητα μαγνητικής ροής

ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά στο κενό

μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό

ρ η χωρική πυκνότητα φορτίου

$\mathbf{J}$ η πυκνότητα ρεύματος

$\mathbf{I}$ η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

$\mathbf{A}$ η επιφάνεια του πεδίου

2.1.3 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Ως ένταση του μαγνητικού πεδίου $\mathbf{H}$ ορίζουμε το μέγεθος [4]:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (2.10)$$

,όπου $\mathbf{B}$ είναι η Μαγνητική επαγωγή, $\mathbf{M}$ ονομάζεται το διάνυσμα μαγνήτισης και μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η οποία είναι παγκόσμια σταθερά και ισούται με $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.11)$$

Για οποιοδήποτε σύστημα ή υλικό θα υπάρχει μια ποσότητα μ , την οποία ονομάζουμε μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, για την οποία θα ισχύει η σχέση [4]

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (2.12)$$

Αντίστοιχα, ορίζουμε την μαγνητική επιδεκτικότητα χ , ενός υλικού για την οποία θα ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{B} = \chi \cdot \mathbf{M} \quad (2.13)$$

Τα μεγέθη μ και χ συνδέονται με τη σχέση:

$$\mu = \mu_0 (\chi + 1) \quad (2.14)$$

2.2 Θεωρία των πηνίων

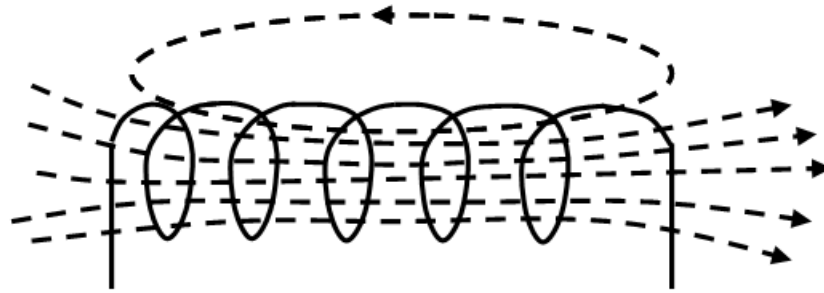
Το πηνίο ένα παθητικό ηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο είναι σχεδιασμένο να αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή ενέργειας μαγνητικού πεδίου και χρησιμοποιείται σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών στην ηλεκτρονική, στις τηλεπικοινωνίες και στα κυκλώματα ισχύος. Συνήθως το πηνίο αποτελείται από ένα κυλινδρικό αγωγίμο σύρμα με πολλές σπείρες. Εάν ρεύμα I ρέει μέσα από το πηνίο, τότε βρίσκουμε ότι η τάση V στα άκρα του είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος και δίνεται από τη σχέση [3]:

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (2.15)$$

όπου L είναι ένας συντελεστής αναλογίας που ονομάζεται αυτεπαγωγή του πηνίου. Η μονάδα της αυτεπαγωγής είναι το henry (H), που πήρε το όνομά της προς τιμή του Αμερικανού εφευρέτη Joseph Henry. Η αυτεπαγωγή εξαρτάται από τα φυσικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πηνίου. Στην περίπτωση ενός σωληνοειδούς πηνίου η αυτεπαγωγή είναι:

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.16)$$

όπου N είναι ο αριθμός των σπειρών, l το μήκος του, A το εμβαδόν της διατομής του και μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του πηνίου. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει αυτεπαγωγή αυξάνεται, είτε αυξάνοντας τον αριθμό N των σπειρών και το εμβαδόν A της διατομής του πηνίου, είτε ελαττώνοντας το μήκος l του πηνίου.



Σχήμα 1: Βασική μορφή ενός πηνίου [5].

Ως μαγνητική ροή Φ μέσα σε ένα πηνίο ορίζεται μέτρο της συνολικής μαγνητικής δύναμης που διαπερνά την επιφάνεια που ορίζεται από το πηνίο. Εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών του πηνίου, το μαγνητικό πεδίο και την επιφάνεια που διαπερνά το μαγνητικό πεδίο. Γενικά, η μαγνητική ροή Φ για μία διατομή με εμβαδόν A σε ένα μαγνητικό πεδίο με μαγνητική επαγωγή B δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\Phi = B \cdot A \cos(\theta) \quad (2.17)$$

Όπου θ η γωνία μεταξύ των γραμμών του μαγνητικού πεδίου και της κάθετης στην επιφάνεια. Για ένα πηνίο με σπείρες N προκύπτει η σχέση:

$$\Phi = N \cdot B \cdot A \cos(\theta) \quad (2.18)$$

Στην περίπτωση ενός σωληνοειδούς πηνίου, η διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών είναι κάθετη στην διεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος (και επομένως $\cos(\theta) = 1$). Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, για ένα πηνίο, η τάση που επάγεται στα άκρα του είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής. Δηλαδή ισχύει:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.19)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνεται ότι η επαγόμενη τάση V είναι ανάλογη της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου B :

$$V = -N \cdot A \frac{dB}{dt} \quad (2.20)$$

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει το γεγονός ότι η επαγόμενη διαφορά δυναμικού θα είναι αντίθετη στον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής.

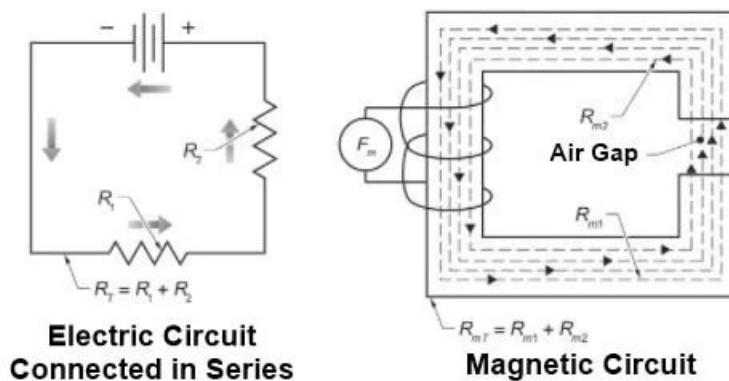
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τις μεταβολές στην μαγνητική ροή και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ευρέως σε κυκλώματα αισθητήρων και εφαρμογές.

2.3 Μαγνητικά κυκλώματα

2.3.1 Βασική τοπολογία

Μαγνητικά κυκλώματα ονομάζονται οι διατάξεις εκείνες οι οποίες περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερους κλειστούς βρόχους μαγνητικής ροής. Η μαγνητική αυτή ροή μπορεί να έχει σαν πηγή έναν ή περισσότερους ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμους μαγνήτες ενώ περιορίζεται, με την χρήση μαγνητικού πυρήνα κατασκευασμένου από φερρομαγνητικό υλικό [2].

Οι διατάξεις των μαγνητικών υλικών είναι σε απόλυτη αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα και για αυτό το λόγο είναι εύκολη η μελέτη και η ανάλυση τους. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αναλογία των μαγνητικών κυκλωμάτων με τα ηλεκτρικά.



Σχήμα 2: Αναλογία ηλεκτρικού - μαγνητικού κυκλώματος [6].

Στο παραπάνω μαγνητικό κύκλωμα το πηνίο είναι τυλιγμένο στην μία πλευρά του πυρήνα. Όταν αυτό τροφοδοτείται με ρεύμα I , λειτουργεί ως πηγή, η οποία δημιουργεί μαγνητικό πεδίο έντασης B στο εσωτερικό του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διαρρέει στον πυρήνα μαγνητική ροή έντασης Φ . Το διάκενο στον πυρήνα θεωρείται σαν αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος.

2.3.2 Αναλογίες μεγεθών για ηλεκτρικά και μαγνητικά κυκλώματα

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι αναλογίες μεγεθών μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων [2]:

Πίνακας 1: Αναλογίες μεγεθών μεταξύ ηλεκτρικών και μαγνητικών κυκλωμάτων.

Ηλεκτρικό Μέγεθος	Μαγνητικό Μέγεθος	Μονάδες
Τάση V	Μαγνητεγερτική δύναμη F	Amp-turns
Ένταση ρεύματος I	Μαγνητική Ροή Φ	Wb (Webers)
Αντίσταση R	Μαγνητική Αντίσταση R	Amp-turns/Wb
Ειδική Αγωγιμότητα $1/\rho$	Διαπερατότητα μ	Wb/A-t-m
Πυκνότητα ρεύματος J	Μαγνητική Επαγωγή B	Wb/m ²
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E	Ένταση μαγνητικού πεδίου H	Amp-turn/m

3

ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

3.1 Εισαγωγή

Τα μαγνητικά υλικά είναι υλικά που ανταποκρίνονται στα μαγνητικά πεδία, δηλαδή υλικά που μπορούν να μαγνητιστούν όταν τοποθετηθούν κοντά σε μαγνητική πηγή ή όταν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η απόκρισή τους αυτή οφείλεται στη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων τους, ειδικά στην περιστροφή και την τροχιά τους γύρω από τον ατομικό πυρήνα, οι οποίες δημιουργούν μικρές μαγνητικές ροπές. Τα υλικά αυτά ανάλογα με την επιδεκτικότητά τους χ (δηλαδή το βαθμό στον οποίο ένα υλικό μπορεί να μαγνητιστεί υπό την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου) κατηγοριοποιούνται σε διαμαγνητικά, παραμαγνητικά και σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Συγκεκριμένα για τα σιδηρομαγνητικά υλικά υπάρχουν διάφορες ιδιότητες, όπως για παράδειγμα ο βρόχος υστέρησης, για τις οποίες ο χαρακτηρισμός και προσδιορισμός τους είναι ζωτικής σημασίας για την κατασκευή αισθητήρων.

Σε αυτό το κεφάλαιο, στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε μερικές βασικές τοπολογίες μαγνητικών αισθητήρων, οι οποίες εκμεταλλεύονται τα εν λόγω χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών. Ο αισθητήρας Hall είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου αισθητήρα ο οποίος καταφέρνει και ανιχνεύει την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου. Τέλος, η επίτευξη Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε πληθώρα εφαρμογών, όπως η βιομηχανία, και οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών έχουν κύριο λόγο σε αυτόν τον τομέα.

3.2 Τύποι μαγνητικών υλικών

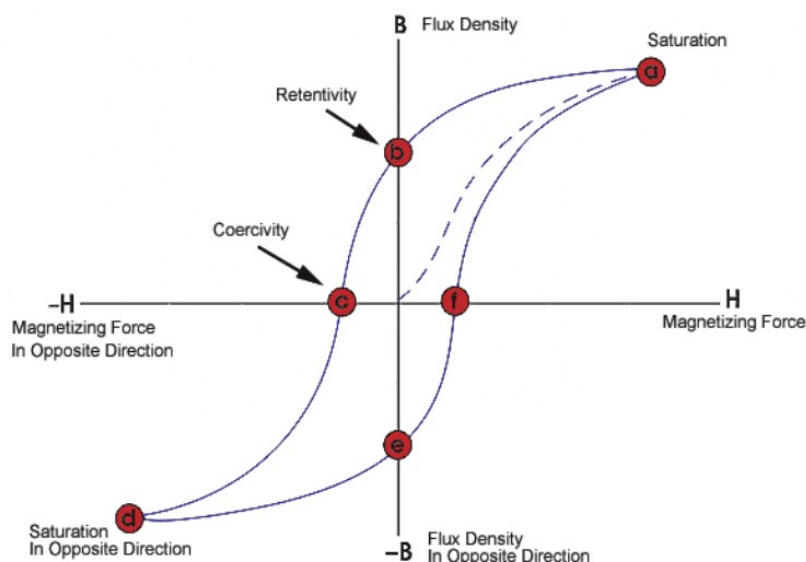
Τα μαγνητικά υλικά κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την επιδεκτικότητα χ που παρουσιάζουν. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει υλικά με μικρή και αρνητική επιδεκτικότητα, $\chi \approx -10^{-5}$. Αυτά τα υλικά ονομάζονται διαμαγνητικά και η μαγνητική τους απόκριση αντιτίθεται στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα διαμαγνητικών υλικών είναι ο χαλκός, ο άργυρος, το βισμούθιο και το βηρύλλιο. Οι υπεραγωγοί αποτελούν μια υποκατηγορία διαμαγνητικών υλικών με $\chi \approx -1$.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει υλικά με μικρή και θετική επιδεκτικότητα, που κυμαίνεται από 10^{-3} έως 10^{-5} . Αυτά τα υλικά ονομάζονται παραμαγνητικά και η επιδεκτικότητά τους είναι αδύναμη αλλά παράλληλη με το μαγνητικό πεδίο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα παραμαγνητικού υλικού είναι το αλουμίνιο.

Η πιο σημαντική κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά (ferromagnetic-ferrimagnetic), των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική και πολύ μεγαλύτερη της μονάδας, κυμαινόμενη από 50 έως 10000. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και κάποιες σπάνιες μεταλλικές γαίες με τα κράματά τους [2], [7], [8], [9], [10].

3.3 Βρόχος Υστέρησης

Βρόχος Υστέρησης (ή B-H loop) ενός φερρομαγνητικού υλικού λέγεται το σχήμα το οποίο σχηματίζεται όταν μελετηθεί η μαγνητική επαγωγή $\mathbf{B}$ που παρουσιάζει ως συνάρτηση μεταβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έντασης $\mathbf{H}$. Ο Βρόχος B-H σχηματίζεται λόγω του κορεσμού, της παραμένουσας μαγνήτισης του υλικού αλλά και του συνεκτικού πεδίου αυτού. Το σχήμα 3 παρουσιάζει έναν τυπικό βρόχο υστέρησης. Ένας τέτοιος βρόχος παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο υλικό είναι κατάλληλο ή όχι, για μία δεδομένη εφαρμογή [9].



Σχήμα 3: Τυπικός Βρόχος Υστέρησης [11].

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούνται διάφορες φάσεις μαγνήτισης του υλικού (φάσεις a, b, c, d, e, f).

Το υλικό αρχίζει χωρίς μαγνήτιση και με την αύξηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έντασης H , φτάνει στο σημείο κορεσμού (σημείο a), ακολουθώντας την διακεκομμένη καμπύλη. Σε αυτό το σημείο, η μαγνητική του επαγωγή δεν αυξάνεται περαιτέρω παρά την αύξηση του πεδίου. Το σημείο κορεσμού εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό.

Μειώνοντας την ένταση του εξωτερικού πεδίου, παρατηρείται μείωση στη μαγνητική επαγωγή του υλικού, αλλά αυτή η μείωση είναι συχνά πολύ μικρή ή ανεπαίσθητη. Όταν το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί, το υλικό διατηρεί την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r (retentivity), δηλαδή δεν απομαγνητίζεται πλήρως (σημείο b).

Για να μηδενιστεί η μαγνητική επαγωγή του υλικού, πρέπει να εφαρμόσουμε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης. Η ένταση του πεδίου που απαιτείται για να μηδενίσει την συνολική μαγνήτιση του υλικού ονομάζεται συνεκτικό πεδίο H_c (coercivity) (σημείο c).

Καθώς το πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κορεσμού προς την αντίθετη φορά (σημείο d).

Στη συνέχεια, το εξωτερικό πεδίο ελαττώνεται και η καμπύλη περνάει από το σημείο e όπου αντιστοιχεί στην αντίσταση απομαγνήτισης της αντίστροφης φοράς.

Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H , η καμπύλη δεν θα περάσει ξανά από την αρχή των αξόνων, αλλά από το σημείο f , λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης (remanence).

3.3.1 Μαγνήτιση κορεσμού

Καθώς αυξάνουμε σταδιακά το μαγνητικό πεδίο, η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε κάποια τιμή μέγιστη τιμή (σημείο a) και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού [8].

3.3.2 Παραμένουσα μαγνήτιση

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι όταν το εξωτερικό πεδίο απομακρύνεται, τότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν μηδενίζεται. Οι τιμές επαγωγής και μαγνήτισης που αντιστοιχούν σε αυτή την κατάσταση (σημεία b και e του βρόχου υστέρησης) καλούνται παραμένουσα επαγωγή B_r και παραμένουσα μαγνήτιση M_r (remanent induction, remanent magnetization) [8]. Η σχέση που τα συνδέει είναι:

$$B_r = \mu_0 \cdot M_r \quad (3.1)$$

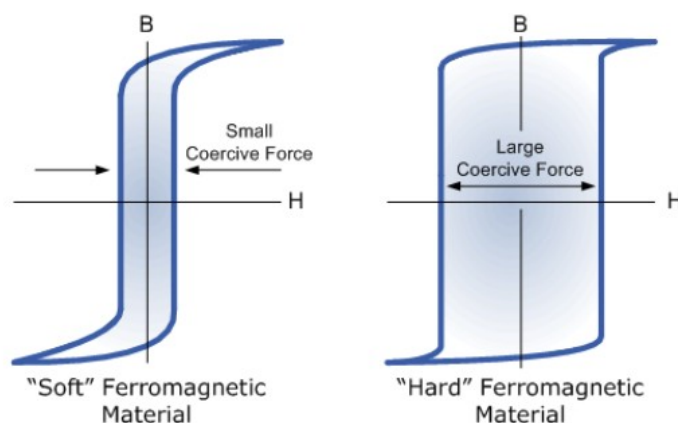
,όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

3.3.3 Συνεκτικό πεδίο

Για να επαναφέρουμε έναν προηγούμενα μαγνητισμένο σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης πρέπει να εφαρμόσουμε εξωτερικό πεδίο έντασης H_c . Το πεδίο αυτό καλείται συνεκτικό πεδίο-coercive field, ή coercive force ή coercivity και αντιστοιχεί στις τιμές του H στα σημεία c και f της καμπύλης υστέρησης.

3.3.4 Μαλακά και σκληρά φερρομαγνητικά υλικά

Με βάση το μέγεθος του συνεκτικού πεδίου, δηλαδή την ένταση του πεδίου που απαιτείται για να απομαγνητιστεί ένα υλικό, τα φερρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε σκληρά και μαλακά μαγνητικά. Πειραματικά έχει παρατηρηθεί ότι αυτό συνδέεται με τη μηχανική τους αντοχή. Συγκεκριμένα, υλικά από σίδηρο ή χάλυβα με μεγάλη σκληρότητα παρουσιάζουν υψηλό συνεκτικό πεδίο και χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα. Αντίθετα, τα μαλακά υλικά έχουν χαμηλό συνεκτικό πεδίο και σχετικά υψηλή μαγνητική διαπερατότητα [7].



Σχήμα 4: Βρόχος Υστέρησης για μαλακό υλικό (αριστερά) και για σκληρό υλικό (δεξιά) [12].

3.4 Θόρυβος Barkhausen

3.4.1 Ορισμός του Θορύβου Barkhausen

Ο θόρυβος Barkhausen βασίζεται στην αρχή των επαγωγικών μετρήσεων ενός ακουστικού σήματος που παράγεται όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο σε ένα ферρομαγνητικό δείγμα. Ο θόρυβος αυτός ονομάστηκε θόρυβος Barkhausen από τον Γερμανό καθηγητή Heinrich Barkhausen, ο οποίος πρώτος εξήγησε τη φύση του φαινομένου [7].

Σύμφωνα με το φαινόμενο Barkhausen, καθώς το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται συνεχώς, υπάρχουν διακριτές μεταβολές στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής μέσα σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1919, όταν ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω από ένα δείγμα σιδήρου συνδέθηκε με έναν ενισχυτή και ένα ηχείο. Καθώς το πεδίο H αυξανόταν ομοιόμορφα, το ηχείο παρήγαγε μια σειρά από αδύναμα κλικ, τα οποία προκλήθηκαν από μικρούς παλμούς που επάγονταν στο πηνίο λήψης. Σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής, αυτοί οι παλμοί προέρχονταν από μικρές αλλαγές στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής μέσω του πηνίου, που προέρχονταν από διακριτές μεταβολές της μαγνήτισης και συνεπώς της μαγνητικής επαγωγής [10].

Αν η αρχική καμπύλη μαγνήτισης, που φαίνεται συνεχής καθώς το H αυξάνεται, μεγεθυνθεί σημαντικά, τότε οι διακριτές μεταβολές που συνιστούν το φαινόμενο Barkhausen γίνονται εμφανείς. Αρχικά, το φαινόμενο αποδόθηκε σε ξαφνικές διακριτές περιστροφές της φοράς μαγνήτισης μέσα σε κάθε μαγνητική περιοχή. Σήμερα, γνωρίζουμε ότι η κίνηση των συνόρων των μαγνητικών περιοχών είναι ο κύριος παράγοντας που προκαλεί τις μεταβολές Barkhausen, αν και και οι δύο μηχανισμοί υπάρχουν και συνεισφέρουν στο φαινόμενο.

Δεδομένου ότι οι μεταβολές Barkhausen επηρεάζονται σημαντικά από τη μεταβολή της μικροδομής του υλικού και από την επιβολή μηχανικών τάσεων, οι μετρήσεις του θορύβου Barkhausen είναι εξαιρετικά χρήσιμες για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των υλικών [10].

3.4.2 Θόρυβος Barkhausen στα φερρομαγνητικά Υλικά

Τα φερρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από μικρές μαγνητικές περιοχές, οι οποίες μοιάζουν με ατομικούς μαγνητικούς ράβδους. Κάθε μαγνητική περιοχή μαγνητίζεται κατά μήκος ενός συγκεκριμένου κρυσταλλογραφικού άξονα εύκολης μαγνήτισης. Οι περιοχές αυτές διαχωρίζονται από όρια γνωστά ως μαγνητικά τοιχώματα. Τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία προκαλούν κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων εμπρός και πίσω. Τα εμπόδια στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι σημειακές ατέλειες, διαταραχές, όρια κόκκων, καθώς και άλλα σημεία αγκύρωσης με μέγεθος ίσο ή μεγαλύτερο από το πάχος του μαγνητικού τοιχώματος.

Για να κινηθούν τα μαγνητικά τοιχώματα, η περιοχή από τη μία πλευρά του τοιχώματος πρέπει να αυξηθεί σε μέγεθος, ενώ η περιοχή από την άλλη πλευρά πρέπει να μειωθεί. Αυτό οδηγεί σε αλλαγή της συνολικής μαγνήτισης του δείγματος. Αν τοποθετηθεί ένα πηνίο με αγώγιμο σύρμα κοντά στο δείγμα κατά τη διάρκεια της κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, η επακόλουθη αλλαγή στη μαγνήτιση θα προκαλέσει έναν ηλεκτρικό παλμό στο πηνίο.

Η διαδικασία της μαγνήτισης, που χαρακτηρίζεται από την καμπύλη υστέρησης, δεν είναι συνεχής αλλά αποτελείται από μικρές, ασυνεχείς διαβαθμίσεις, οι οποίες προκύπτουν όταν οι μαγνητικές περιοχές κινούνται υπό την επίδραση ενός εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου. Όταν παράγονται οι ηλεκτρικοί παλμοί από την

κίνηση των περιοχών και αθροίζονται όλοι μαζί, δημιουργείται ένα είδος ακουστικού σήματος που ονομάζεται θόρυβος Barkhausen.

Ο θόρυβος Barkhausen έχει ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που εκτείνεται από τη συχνότητα μαγνήτισης έως και πάνω από 2 MHz στα περισσότερα υλικά. Ο θόρυβος αυτός εξασθενεί εκθετικά ως συνάρτηση της απόστασης που έχει διανύσει μέσα στο υλικό. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της εξασθένησης των ρευμάτων αυτεπαγωγής ή δινορρευμάτων, τα οποία υπόκεινται στον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που δημιουργεί η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων [10].

3.5 Μαγνητικοί Αισθητήρες

3.5.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες είναι συσκευές που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ συστημάτων ή μεταξύ του φυσικού περιβάλλοντος και ενός ή περισσότερων συστημάτων. Κατά τη χρήση τους, μετρούν φυσικές ποσότητες και τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτά τα σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την παρακολούθηση των μετρημένων ποσοτήτων είτε για την ανατροφοδότηση σε κάποιο βρόχο ελέγχου. Επομένως, είναι απαραίτητοι για οποιοδήποτε σύστημα θεωρείται «έξυπνο» και η χρήση τους στην κατασκευή υλικών, ηλεκτρονικών συστημάτων, δομικών έργων και εμπορικών διεργασιών έχει οδηγήσει σε πληθώρα μεθόδων λειτουργίας και σχεδιασμού.

Μαγνητικοί Αισθητήρες είναι εκείνοι που χρησιμοποιούν φερρομαγνητικά υλικά, τα οποία αλλάζουν μηχανικές, ηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες υπό την επήρεια ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα του πεδίου. Εξαίρεση αποτελεί ο αισθητήρας φαινομένου Hall, ο οποίος επίσης επηρεάζεται από μαγνητικό πεδίο αλλά χρησιμοποιεί ημιαγώγιμα υλικά. Οι μαγνητικοί αισθητήρες κατέχουν σημαντικό μερίδιο στην αγορά των αισθητήρων για πολλά χρόνια, καθιστώντας τη μελέτη τους απαραίτητη λόγω των εκτεταμένων εφαρμογών τους. Ενδεικτικά, παρακάτω αναλύονται κάποιες από τις βασικότερες κατηγορίες μαγνητικών αισθητήρων.

3.5.2 Πηνίο ανίχνευσης

Το πηνίο ανίχνευσης (search – coil) στηρίζει την λειτουργία του στο νόμο του Faraday. Σύμφωνα με το νόμο αυτό η επαγόμενη τάση u εξαρτάται από τη μαγνητική ροή Φ_B που διαπερνά στοιχειώδη επφάνεια του στοιχείου και δίνεται από τη σχέση:

$$u = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.2)$$

Τα χαρακτηριστικά του πηνίου όπως: ο αριθμός σπειρών του, τα φυσικά μεγέθη του, μήκος - πάχος του αγωγού και το υλικό του πυρήνα στο οποίο είναι τυλιγμένος ο αγωγός, καθορίζουν το επίπεδο της έντασης του μαγνητικού πεδίου που μπορεί αυτό να ανιχνεύσει. Για την ανίχνευση και τη μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου το πηνίο χρησιμοποιείται με διατάξεις γέφυρας. Όταν διαταραχθεί η τάση στα άκρα του πηνίου ανίχνευσης λόγω διαταραχής της μαγνητικής ροής, η εναλλασσόμενη τάση εξόδου της γέφυρας μεταβάλλεται συναρτήσει της έντασης την μαγνητικής ροής που διαπερνά το πηνίο ανίχνευσης [7].

Το πηνίο ανίχνευσης γενικά χρησιμοποιείται σε διατάξεις ανίχνευσης μετάλλων. Σε μια τέτοια διάταξη το πηνίο ανίχνευσης παράγει το μαγνητικό πεδίο. Όταν ένα μεταλλικό στοιχείο βρεθεί μέσα στις δυναμικές γραμμές του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου, τότε η δημιουργία δινορευμάτων (eddy current) στην επιφάνεια του στοιχείου διαταράσσει το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την ανίχνευση του μετάλλου.

3.5.3 Αισθητήρες Hall

Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον Edwin Hall το 1879 [13]. Σύμφωνα με την αρχή του φαινομένου, όταν ένα πλακίδιο διαρρέεται από ρεύμα έντασης I και βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο B τότε εμφανίζεται σε αυτό εγκάρσια τάση. Το φαινόμενο Hall εξηγείται από την επίδραση της δύναμης Lorentz που ασκείται σε ηλεκτρικό φορτίο το οποίο κινείται με ταχύτητα v μέσα σε μαγνητικό πεδίο B . Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο προς το ηλεκτρικό, τότε λόγω των διανυσματικών μεγεθών v και B υπάρχει εκτροπή των φορτίων κάθετα στη δομή του στοιχείου. Καθώς η συσσώρευση των φορτίων συνεχίζεται, η εγκάρσια ηλεκτροστατική δύναμη

που αναπτύσσεται εξισορροπεί τη μαγνητική δύναμη. Η τάση Hall (V_H), της τάξης των μV , που αναπτύσσεται σε στοιχεία ημιαγωγών δίνεται από τη σχέση:

$$V_H = \frac{R_H B I}{d} \quad (3.3)$$

Όπου,

d : το πάχος του ημιαγωγού,

I : η ένταση του ρεύματος

R_H : η σταθερά Hall ($1/nq$)

B : η μαγνητική επαγωγή

Οι σύγχρονοι αισθητήρες ημιαγωγού Hall κατασκευάζονται από πυρίτιο Si. Άλλα υλικά όπως GaAs, InAs και InSb επίσης χρησιμοποιούνται [14]. Για τους αισθητήρες ημιαγωγού, ο οποίος φέρει φορείς από ηλεκτρόνια και οπές, η σταθερά Hall δίνεται από τη σχέση:

$$R_H = \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{q_e(p\mu_h - n\mu_e)^2} \quad (3.4)$$

Όπου,

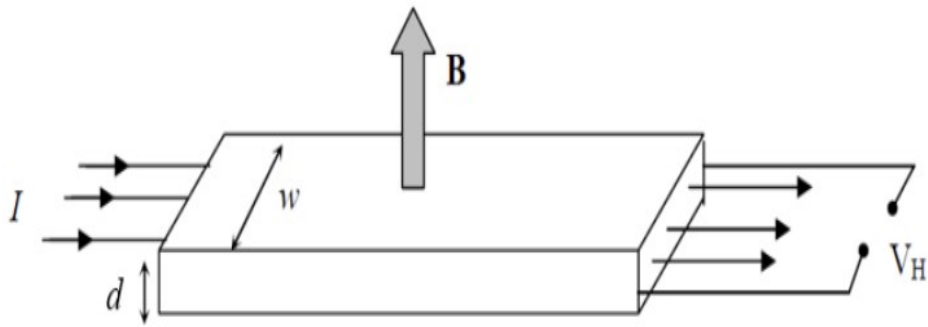
n : η συγκέντρωση ηλεκτρονίων

p : η συγκέντρωση οπών

μ_e : η κινητικότητα των ηλεκτρονίων

μ_h : η κινητικότητα των οπών

q_e : το φορτίο ηλεκτρονίου



Σχήμα 5: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall [15].

Στο εμπόριο συναντώνται τρεις βασικές κατηγορίες αισθητήρων Hall ανάλογα με τις λειτουργίες του και τις εφαρμογές τους. Στην πρώτη κατηγορία είναι οι λεγόμενοι latch Hall sensors. Αυτοί οι αισθητήρες παράγουν ένα συγκεκριμένο σήμα εξόδου όταν το μαγνητικό πεδίο υπερβαίνει ή υποβαίνει μια προκαθορισμένη τιμή. Επομένως, χρησιμοποιούνται κυρίως για τον ανιχνευτή της παρουσίας μαγνητικού πεδίου και όχι για την μέτρηση της τιμής αυτού. Εφαρμόζονται κυρίως σε περιπτώσεις ανίχνευσης αριθμού περιστροφών, μέτρησης ταχύτητας περιστροφής ή άλλες παρόμοιες [16].

Στην δεύτερη και στην τρίτη κατηγορία αισθητήρων Hall ανήκουν οι αισθητήρες που παράγουν μία τάση εξόδου που σχετίζεται γραμμικά με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι γραμμικοί αισθητήρες Hall χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τους μονοπολικούς (linear unipolar) και τους διπολικούς (linear bipolar). Οι μονοπολικοί αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μόνο η μέτρηση της απόλυτης τιμής του μαγνητικού πεδίου. Για την ανίχνευση και της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου ως προς τον αισθητήρα, τότε είναι απαραίτητη η χρήση των διπολικών αισθητήρων Hall. Στην περίπτωση των διπολικών αισθητήρων Hall, η τάση εξόδου V_{H0} για μηδενικό επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας V_{cc} . Άρα, εάν $V_H \in (0, \frac{V_{cc}}{2})$, δηλαδή εάν η τάση εξόδου είναι μικρότερη απ αυτή του μηδενικού μαγνητικού πεδίου, τότε προκύπτει ότι το μαγνητικό πεδίο έχει κατεύθυνση αντίθετη ως προς την εμπρόσθια όψη του αισθητήρα. Αντίθετα, εάν $V_H \in (\frac{V_{cc}}{2}, V_{cc})$, δηλαδή η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη

της αρχικής τάσης V_{H0} , συμπεραίνεται ότι το πεδίο έχει ίδια κατεύθυνση με αυτή του αισθητήρα [16].

3.5.4 Αισθητήρες μαγνητοσυστολικής καθυστέρησης (MDL)

Οι αισθητήρες MDL (Magnetostrictive Delay Lines – Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης) βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Σύμφωνα με αυτό, το μέγεθος των φερρομαγνητικών υλικών μεταβάλλεται όταν ένα μαγνητικό πεδίο ασκηθεί σε αυτά [17]. Η μαγνητοσυστολή δίδεται ως κλασματική μεταβολή από την σχέση:

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.5)$$

Όπου

ΔL : η μεταβολή του μήκους του υλικού κατά την επιβολή του μαγνητικού πεδίου

L : το αρχικό του μήκος

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής βασίζεται στη δομή των φερρομαγνητικών υλικών. Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών μέσα στο υλικό μετακινούνται, με αποτέλεσμα να προσαρμόζονται κατάλληλα και να προκαλούν αλλαγές στις διαστάσεις του υλικού.

Υλικά όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αισθητήρων MDL. Συχνά, αυτοί οι αισθητήρες έχουν τη μορφή σύρματος για να επιτρέπεται η εύκολη παρακολούθηση των διαστασιακών αλλαγών. Το σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα εκπέμπει παλμούς και λειτουργεί ως κυματοδηγός. Μια τυπική διάταξη MDL αποτελείται ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένας κυματοδηγός. Μέσω του πηνίου διέγερσης, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που διαδίδεται μέσω του άμορφου μαγνητικού σύρματος ή ταινίας που έχει το ρόλο του κυματοδηγού. Λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, αυτό το υλικό παραμορφώνεται τοπικά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας ελαστικός παλμός, ο οποίος διαδίδεται μέσω του κυματοδηγού. Τελικά, το σήμα λαμβάνεται από το πηνίο λήψης που είναι τοποθετημένο στο άλλο άκρο του κυματοδηγού.

Αυτός ο συγκεκριμένος αισθητήρας θέσης δεν υπόκειται σε φθορά και δεν προκαλεί φθορές στο εξεταζόμενο υλικό, καθώς δεν έρχεται σε επαφή με αυτό. Επιπλέον, το μήκος του εξεταζόμενου υλικού μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 60 μέτρα, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι, οι αισθητήρες MDL χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτοκινήτων και γενικότερα σε μηχανικά μέρη, όπως οι υδραυλικοί κύλινδροι, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της θέσης και της λειτουργίας τους [18], [19].



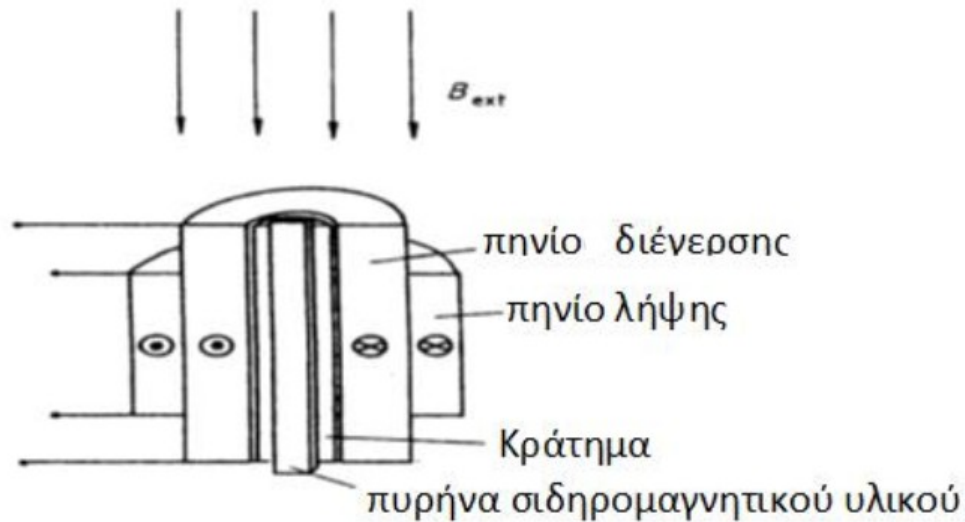
Σχήμα 6: Τυπική διάταξη αισθητήρα MDL [20].

3.5.5 Αισθητήρες πύλης ροής (fluxgate)

Οι αισθητήρες Fluxgate αναπτύχθηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1930 για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης. Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου χρησιμοποιήθηκαν για ανθυποβρυχιακό πόλεμο και από τα υποβρύχια για τον εντοπισμό των χαμηλά ιπτάμενων αεροσκαφών. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν για αποστολές στο διάστημα. Τα μαγνητόμετρα Fluxgate μπορούν να μετρήσουν την απόλυτη τιμή της έντασης μαγνητικού πεδίου και την μέτρηση της διαφοράς μεταξύ δύο σημείων εντός μαγνητικού πεδίου. Μπορούν να μετρήσουν πεδίο της τάξης των 10-1 έως 106 nT και η διακριτική τους ικανότητα μπορεί να πλησιάσει τα 100pT [7], [21].

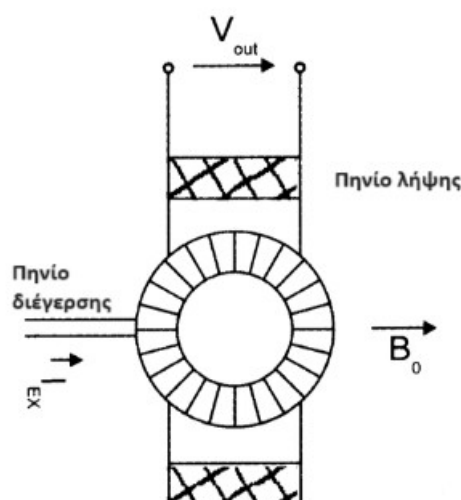
Ένας αισθητήρας Fluxgate περιλαμβάνει συνήθως έναν πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και χαμηλού συνεκτικού πεδίου, γύρω από το οποίο τυλίγονται δύο πηνία, το πηνίο διέγερσης και το πηνίο λήψης. Οι αισθητήρες Fluxgate για να μετρήσουν το μαγνητικό πεδίο απαιτούν ένα πεδίο αναφοράς ώστε να γίνει η σύγκριση με το προς μέτρηση πεδίο. Για να λειτουργήσει ο αισθητήρας Fluxgate πρέπει να επιβληθεί μέσω του πηνίου

διέγερσης στον πυρήνα του πεδίο αναφοράς το οποίο συνήθως είναι ένα εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ή τετραγωνικό ή τριγωνικό σήμα. Με αυτόν τον τρόπο ο πυρήνας οδηγείται σε κορεσμό. Το μετρούμενο πεδίο το λαμβάνουμε από το πηνίο λήψης

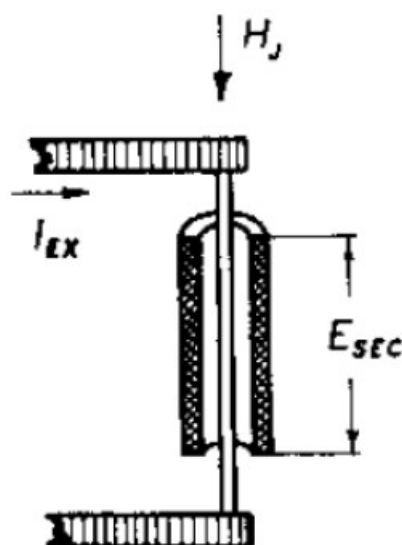


Σχήμα 7: Τυπική διάταξη αισθητήρα Fluxgate.

Η επιλογή ενός αισθητήρα Fluxgate για συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τον βρόχο υστέρησης του πυρήνα. Τα χαρακτηριστικά τα οποία παρατηρούμε στον βρόχο υστέρησης ώστε να κριθεί κατάλληλος για τον Fluxgate είναι το σχήμα του, η συμμετρία, η συμπεριφορά μηδενικού σημείου και η συμπεριφορά κορεσμού [21]. Οι διατάξεις των αισθητήρων Fluxgate χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: παράλληλου τύπου και ορθογώνιου. Ως fluxgates παράλληλου τύπου ορίζονται οι αισθητήρες εκείνοι στους οποίους το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες διαμήκους πυρήνα. Επίσης, Fluxgate παράλληλου τύπου είναι οι διατάξεις δακτυλιοειδούς πυρήνα. Μία διάταξη ορθογώνιου τύπου είναι όταν δεν χρησιμοποιείται πηνίο διέγερσης, αλλά το σήμα διαρρέει απευθείας μέσα στον μαγνητικό πυρήνα [7].



Σχήμα 8: Fluxgate δακτυλιοειδούς πυρήνα.



Σχήμα 9: Fluxgate ορθογώνιας διάταξης.

Οι σύγχρονες εφαρμογές αυτών των αισθητήρων περιλαμβάνουν γεωμαγνητικές παρατηρήσεις, αναζήτηση ορυκτών, μετρήσεις στο εξώτερο διάστημα, ανίχνευση υποβρυχίων, μαγνητική προστασία πλοίων κλπ. Οι αισθητήρες Fluxgate διαθέτουν δυνατότητα μέτρησης περισσότερων από μίας συνιστωσών μαγνητικού πεδίου, καθώς και εφαρμογές σε μεταλλογραφικές συσκευές προς ανίχνευση ανωμαλιών ή δομικών κενών σε μεταλλικά υλικά.

3.5.6 Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (MR)

Κατά το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης η αντίσταση του στοιχείου μεταβάλλεται όταν αυτό βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο. Η ύπαρξη της μαγνητοαντίστασης οφείλεται στη δύναμη Lorentz που ασκείται στα φορτία του στοιχείου, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα έντασης I [22]. Ανάλογα της κατασκευαστικής δομής των υλικών διακρίνουμε:

- τις ανισοτροπικές αντιστάσεις (Anisotropic MagnetoResistance, AMR)
- τις γιγάντιες μαγνητοαντιστάσεις (Giant MagnetoResistance, GMR)
- μαγνητοαντιστάσεις τούνελ (Tunneling MagnetoResistance, TMR)

Μια **ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση** (AMR) είναι κατασκευασμένη ως στοιχείο αντίστασης σε διάταξη ημιαγωγού από κράματα νικελίου και σιδήρου (Permalloy). Με ύπαρξη ενός μαγνητικού πεδίου το στοιχείο AMR μεταβάλλει την τιμή του συναρτήσει της έντασης του πεδίου. Ο καθορισμός της διεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου γίνεται μέσω διάταξης Whetstone, στην οποία κάθε στοιχείο αποτελείται από μαγνητοαντίσταση AMR. Χαρακτηριστικό των στοιχείων αυτών είναι το μικρό μέγεθος, η υψηλή θερμοκρασία και η ικανότητα απομόνωσης παρασιτικών θορύβων. Η αντίσταση ενός στοιχείου AMR μεταβάλλεται σε σχέση με τη γωνία θ του μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \theta \quad (3.6)$$

Όπου,

R_0 : η σταθερά υλικού του αισθητήρα

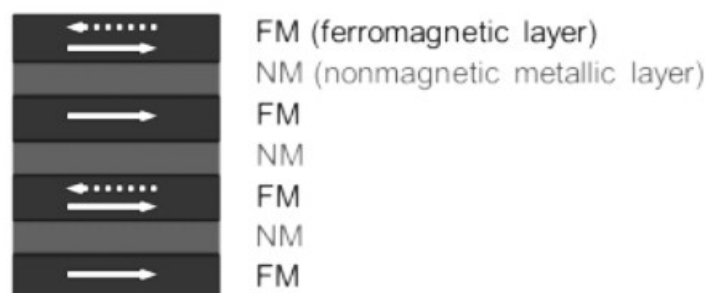
ΔR_0 : εξαρτώμενο ποσοστό μεταβολής υλικού (συνήθως 3%-5%)

Αυτοί οι αισθητήρες τοποθετούνται σε ρομποτικές διατάξεις, αλλά και σε μεταφορικά μέσα, κυρίως ως αισθητήρες προσανατολισμού. Επιπλέον έχουν γίνει και κάποιες προσπάθειες ώστε να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για την ανίχνευση βιομορίων, με σκοπό την αντικατάσταση της χρήσης μεθόδων φθορισμού σε διαγνωστικές εξετάσεις. Αντί των φθοριζουσών ουσιών, δοκιμάστηκε η εισαγωγή καταλλήλων μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία είναι ικανά να

ανιχνεύονται από τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και να παράγουν κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα [22].

Τα στοιχεία **γιγάντιων μαγνητοαντιστάσεων** (Giant Magnetoresistance, GMR), αποτελούνται από διαδοχικές δομές φερρομαγνητικών υλικών και μη μαγνητικών υλικών (όπως ο χαλκός). Τα στρώματα του φερρομαγνητικού υλικού βρίσκονται σε αντιπαράλληλη μαγνητική διάταξη μεταξύ τους ενώ διαχωρίζονται από το μη μαγνητικό αγωγό, πάχους της τάξης των nm. Το κατώτερο στρώμα καλείται στρώμα αναφοράς, ενώ το ανώτερο στρώμα που εκτίθεται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο καλείται στρώμα μέτρησης.

Όταν στο στοιχείο GMR δεν επιδρά κάποιο μαγνητικό πεδίο, τα αντιπαράλληλα μαγνητικά πεδία του στοιχείου παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση. Στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο επιδρά στις μαγνητικές ροπές του στοιχείου που εκτίθεται σε αυτό, το μέγεθος R της μαγνητοσντίστασης μειώνεται σε σχέση με την γωνία εφαρμογής του υπό μέτρηση μαγνητικού πεδίου. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ευαισθησίας της δομής ενός GMR χρησιμοποιούνται διαδοχικά στρώματα φερρομαγνητικών και μη μαγνητικών υλικών.



Σχήμα 10: Δομή στοιχείων GMR.

Τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM) καθώς και σε βιοαισθητήρες [7].

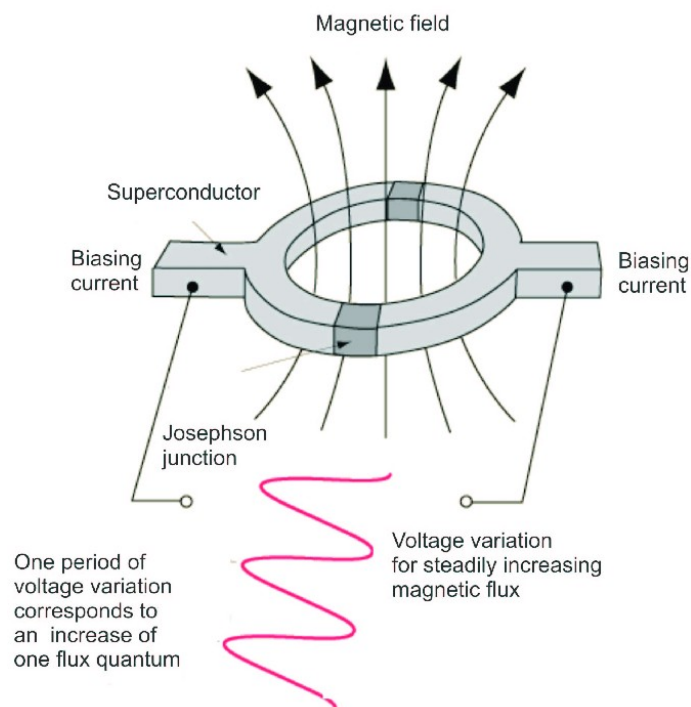
Τέλος η **μαγνητοαντίσταση τύπου τούνελ** (Tunneling Magnetoresistance, TMR) παρουσιάζει ίδια δομή με την μαγνητοαντίσταση GMR με τη διαφορά ότι το μονωτικό στοιχείο μεταξύ του στρώματος αναφοράς και μέτρησης είναι από ημιαγώγιμο υλικό, αυξάνοντας την αντίσταση που παρουσιάζει το στοιχείο. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αντίστοιχες των GMR.

3.5.7 Αισθητήρες SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*)

Οι αισθητήρες SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) είναι οι πιο ευαίσθητοι αισθητήρες που υπάρχουν, ικανοί να ανιχνεύσουν μαγνητικά πεδία επιπέδων βιομαγνητισμού της καρδιάς εντάσεως 10^{-10} T και του εγκεφάλου εντάσεως 10^{-13} T. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν υπεραγώγιμα υλικά, τα οποία παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική ηλεκτρική αντίσταση όταν ψυχθούν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία [23]. Οι αισθητήρες SQUID διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους:

- **LTS (Low Temperature SQUIDs)**: Λειτουργούν σε θερμοκρασίες της τάξης των -270°C και κατασκευάζονται από νιόβιο ή μολύβδινα κράματα και χρυσό. Η ψύξη τους απαιτεί υγρό ήλιο, καθιστώντας τους λιγότερο πρακτικούς λόγω της πολυπλοκότητας και του κόστους της ψύξης.
- **HTS (High Temperature SQUIDs)**: Λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως και περίπου -130°C. Αυτοί οι αισθητήρες κατασκευάζονται από YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο είναι πιο εύχρηστο και οικονομικότερο σε σύγκριση με το υγρό ήλιο.

Η λειτουργία των SQUID αισθητήρων βασίζεται στο κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson. Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο, ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο μη υπεραγώγιμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ δύο υπεραγώγιμων υλικών. Όταν οι αισθητήρες ψύχονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, παράγεται μια συνεχής μαγνητική ροή. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί αιφνίδια αλλαγή της ροής, οδηγώντας σε αντίστοιχη απώλεια ενέργειας. Η μέτρηση αυτής της ενέργειας επιτρέπει τον υπολογισμό της τιμής του μαγνητικού πεδίου [24]. Παρά την εξαιρετική ευαισθησία τους, οι SQUID αισθητήρες δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε καταναλωτικά προϊόντα λόγω των ειδικών συνθηκών λειτουργίας που απαιτούνται. Έτσι, βρίσκουν κυρίως εφαρμογές σε ερευνητικά εργαστήρια και ειδικές εφαρμογές, όπου η ανίχνευση εξαιρετικά αδύναμων μαγνητικών πεδίων είναι κρίσιμη.



Σχήμα 11: Τυπική διάταξη αισθητήρα SQUID [25].

3.6 Μη καταστροφικός έλεγχος

Με τον όρο **Μη-Καταστροφικός Έλεγχος** (NDI – Non Destructive Inspection), ονομάζεται ο έλεγχος που δεν καταστρέφει το εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής καθώς χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος των ελαττωμάτων τους χωρίς όμως να τα καταστρέψουν ούτε να επηρεάσουν τη λειτουργικότητά τους. Κάθε μέθοδος των ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, εφαρμόζονται σε συνδυασμό, οπότε τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου.

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων και συναντώνται σχεδόν παντού, όπως για παράδειγμα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική στον κατασκευαστικό τομέα, στη βιομηχανία σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος,

ορυχεία, στο σιδηρόδρομο, σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς, στην ιατρική κλπ [26], [27].

Οι ΜΚΕ εφαρμόζουν ποικίλες τεχνικές, κάθε μία από τις οποίες στηρίζεται σε συγκεκριμένες επιστημονικές αρχές ή θεωρητικές παραδοχές. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε επιμέρους μεθόδους. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος που εξετάζεται και είναι κρίσιμη για την τελική αποδοτικότητα των ΜΚΕ. Ενδεικτικά, κάποιες από τις κατηγορίες είναι οι **οπτικές μέθοδοι** (οπτικός έλεγχος, βιντεοσκόπηση, laser), **Ραδιογραφικές μέθοδοι** που περιλαμβάνουν τη χρήση ακτίνων Χ και γάμα, ψηφιακή τομογραφία, **μέθοδοι υπερήχων** (τεχνικές ανάκλασης, τεχνικές περίθλασης, συστοιχίες φάσης υπερήχων και περιστρεφόμενα συστήματα), οι **ηλεκτρικές μέθοδοι** (ρεύματα Eddy, μέθοδος πτώσης δυναμικού), οι **μαγνητικές μέθοδοι** (έλεγχος με Μαγνητικά σωματίδια, μαγνητογραφία, έλεγχος θορύβου Barkhausen κλπ), οι **μηχανικές μέθοδοι** (ακουστική πρόσκρουση, θερμογραφικός έλεγχος, μέθοδος μηχανικής αντίστασης) κλπ [26], [27], [28], [29], [30], [31].

3.6.1 Μη Καταστροφικός Έλεγχος μαγνητικών υλικών

Ειδικά, ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) για τα μαγνητικά υλικά εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους προκειμένου να εξεταστεί το αντίστοιχο υλικό ως προς την αντοχή του, τις ατέλειες του και την αξιοπιστία του. Όπως έχει αναφερθεί και στις προηγούμενες ενότητες τα βασικά μεγέθη που καθορίζουν την κατάσταση ενός φερρομαγνητικού υλικού είναι η Μαγνητική επαγωγή **B**, η ένταση του μαγνητικού πεδίου **H** και η μαγνητική διαπερατότητα **μ**. Ο υπολογισμός και ο προσδιορισμός αυτών των στοιχείων μπορούν να περιγράψουν σε μεγάλο βαθμό την κατάσταση του υλικού [32], [33].

Τα **δινωρρεύματα (eddy currents)** μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο (ΜΚΕ) υλικών. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, απαιτείται ένα πηνίο που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που διαδίδεται κάθετα στο εξεταζόμενο υλικό. Όταν ένα αγωγίμο υλικό τοποθετείται κοντά στο πηνίο, παράγονται δινωρρεύματα σε κλειστούς βρόχους. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από αυτά τα ρεύματα

μπορεί να ανιχνευθεί μέσω ενός δεύτερου πηνίου και να αναλυθεί, επιτρέποντας την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του υλικού και τις ατέλειές του. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε υλικά που δεν είναι μαγνητικά, αρκεί να είναι ηλεκτρικά αγώγιμα. Η μέθοδος ελέγχου με δινορρεύματα χρησιμοποιείται επίσης για τον χαρακτηρισμό υλικών ως προς την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, τη μαγνητική τους διαπερατότητα και το πάχος τους [34].

Για τη **μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής**, διατίθενται διάφοροι αισθητήρες που τοποθετούνται πάνω ή κοντά στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού, επιτρέποντας την εκτέλεση εντοπισμένων μετρήσεων. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να συσχετιστούν με την κατάσταση του υλικού στη συγκεκριμένη περιοχή. Ορισμένοι από τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και τους αισθητήρες Hall [26].

Επιπλέον, η **μέτρηση του Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen**, αποτελεί μία μη καταστροφική τεχνική και στηρίζεται στη λήψη του σήματος που παράγεται κατά τη διαδικασία μαγνήτισης του εξεταζόμενου φερρομαγνητικού υλικού. Κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης, η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων συμβαίνει με απότομο και ασυνεχή τρόπο, με αποτέλεσμα το σήμα που καταγράφεται να έχει την εμφάνιση θορύβου όταν αναλύεται μέσω ενός πηνίου λήψης. Οι ατέλειες και οι παραμορφώσεις που επηρεάζουν το υλικό αποτυπώνονται στο σήμα. Σε αυτή τη διαδικασία, καταγράφεται η ενεργός τιμή του σήματος καθώς και ο αριθμός των "αλμάτων Barkhausen", τα οποία αναφέρονται στις τιμές του σήματος που ξεπερνούν ένα καθορισμένο κατώφλι και υποδηλώνουν την απότομη και ασυνεχή κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων του υλικού. Με την χρήση του αισθητήρα Barkhausen, είναι δυνατή η ανάλυση του σήματος και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση του υλικού [35], [36].

Τέλος, ο **προσδιορισμός του Βρόχου υστέρησης** ενός φερρομαγνητικού υλικού αποτελεί μία σημαντική μέθοδο Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Για την καταγραφή του είναι απαραίτητη η μέτρηση τόσο της μαγνητικής επαγωγής B , όσο και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H που διαρρέει το υπό εξέταση υλικό. Κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα δινορρεύματα που τυχόν

δημιουργούνται. Για το λόγο αυτό η διέγερση του κυκλώματος είναι αναγκαίο να γίνεται με μικρό πλάτος σήματος και κυρίως χαμηλές συχνότητες, της τάξεως των 1-10 Hz. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου μια διάταξη η οποία θα προσδιορίζει τον Βρόχο υστέρησης ενός φερρομαγνητικού υλικού [37].

4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης ενός φερρομαγνητικού υλικού είναι πολύ σημαντικός, καθώς μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη δομή, τις αστοχίες και τις πιθανές ατέλειες μπορεί να έχει. Σε αυτήν την εργασία για την καταγραφή του βρόχου υστέρησης, χρησιμοποιήθηκε η συνήθης μέθοδος στην οποία μια γνωστή διάταξη “κλείνει” μαγνητικό κύκλωμα με το δείγμα που εξετάζεται. Με ένα πηνίο διέγερσης και ένα καθορισμένο σήμα λαμβάνεται το αντίστοιχο σήμα απ το πηνίο λήψης, αφού πρώτα έχει επηρεαστεί από τις άγνωστες και απρόβλεπτες ιδιότητες του δείγματος που μελετάται. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για αυτό.

Στην παρούσα εργασία , στο πρώτο μέρος της πειραματικής διαδικασίας, κρατώντας την γενική διάταξη σταθερή, κατασκευάστηκαν πολλαπλά πηνία λήψης. Επίσης, δοκιμάστηκαν σε διάφορες συχνότητες και πλάτη ημιτονικού σήματος εισόδου προκειμένου να συγκριθούν μεταξύ τους και να μελετηθεί η ευαισθησία και η ακρίβεια τους για την διάταξη που κατασκευάστηκε. Στη συνέχεια, στο δεύτερο μέρος, επιλέχθηκε ο καταλληλότερος συνδυασμός πηνίου διέγερσης – λήψης για να υπολογιστεί τελικά ο βρόχος υστέρησης του υλικού.

4.2 Γενική Διάταξη αισθητήρα

Η διάταξη του σχεδιάστηκε βασίζεται στη χρήση ενός πυρήνα σε σχήμα Π “yoke” πάνω στο οποίο τυλίγονται τα πηνία διέγερσης και λήψης. Ακουμπώντας τον πυρήνα πάνω στο δοκίμιο, δημιουργείται μαγνητικό κύκλωμα στο οποίο δεν χρειάζεται περαιτέρω παρέμβαση στο υπό εξέταση υλικό. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο μη καταστροφικός έλεγχος.

Ο αισθητήρας αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τον πυρήνα σε σχήμα Π (yoke) ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ηλεκτρικό χάλυβα, το πηνίο διέγερσης το οποίο λειτουργεί ως πηγή μαγνητικής ροής και το πηνίο λήψης που αποτελεί τον δέκτη της μαγνητικής επαγωγής. Αυτή η διάταξη μαζί με το εξεταζόμενο υλικό σχηματίζουν μαγνητικό κύκλωμα που μπορεί να μελετηθεί.

Συγκεκριμένα, αυτό το μαγνητικό κύκλωμα μπορεί να περιγραφεί από το νόμο του Ampere και το νόμο του Faraday:

$$H = \frac{N_{\delta} I}{l_{\phi}} \quad (4.1)$$

$$B(t) = -\frac{1}{A N_{\lambda}} \int V_{out}(t), dt \quad (4.2)$$

Όπου,

H : το μαγνητικό πεδίο διέγερσης

N_{δ} : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου διέγερσης

I : η ένταση του παρεχόμενου ρεύματος

l_{ϕ} : το μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής

B : η μαγνητική επαγωγή

A : το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου

N_{λ} : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου λήψης

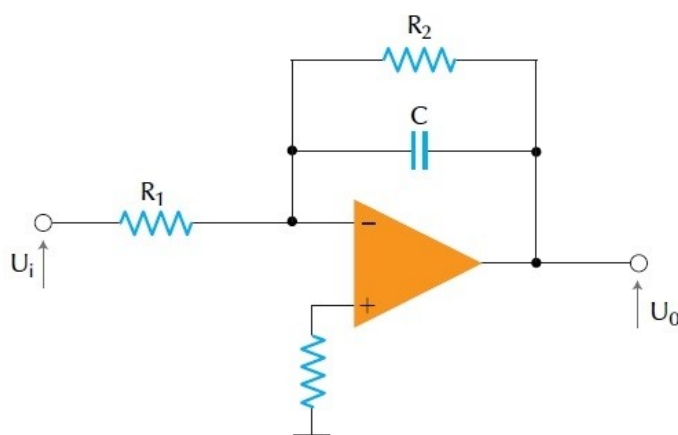
$V_{out}(t)$: το πλάτος του σήματος εξόδου.

Επομένως, από την γνωστή σχέση $B = \mu \cdot H$, είναι ικανό να προσδιοριστεί η μαγνητική διαπερατότητα μ του υλικού και συνεπώς ο βρόχος υστέρησής του. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζοντας το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα μπορούν να εξαχθούν τα απαραίτητα μεγέθη B και H και συνεπώς να προσδιοριστεί ο βρόχος υστέρησης του υλικού.

4.3 Ηλεκτρικό κύκλωμα

Επομένως, με βάση την παραπάνω θεωρητική μελέτη, προκειμένου να εξάγουμε τον βρόχο υστέρησης, είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H είναι ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο διέγερσης. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, είναι δυνατή η καταγραφή της, μέσω της μέτρησης της τάσης στα άκρα μιας γνωστής αντίστασης χαμηλής τιμής, ώστε να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα. Για την μαγνητική επαγωγή B , στην έξοδο του πηνίου διέγερσης λαμβάνεται η παράγωγος αυτής ως προς τον χρόνο, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (4.2). Άρα, για την καταγραφή των τιμών της μαγνητικής επαγωγής, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός ολοκληρωτή.

Μία τυπική διάταξη ολοκληρωτή με χρήση τελεστικού ενισχυτή, περιλαμβάνει μία αντίσταση σε σειρά με τον τελεστικό ενισχυτή και έναν πυκνωτή και αντίσταση παράλληλα σε αυτόν, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 12: Τυπική διάταξη ολοκληρωτή.

Η επιλογή των τιμών για τα R_1 , R_2 και C είναι πολύ σημαντική και καθορίζεται ανάλογα τον τελεστικό ενισχυτή που θα επιλεγθεί καθώς και το εύρος των συχνοτήτων που απαιτεί η κάθε εφαρμογή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η συχνότητα κοπής $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ δεν είναι τόσο υψηλή ώστε να κοπεί το σήμα [38]. Το κύκλωμα του ολοκληρωτή αναλύεται περαιτέρω στο κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας.

4.4 Παραλλαγές του αισθητήρα

4.4.1 Κατασκευή των πηνίων

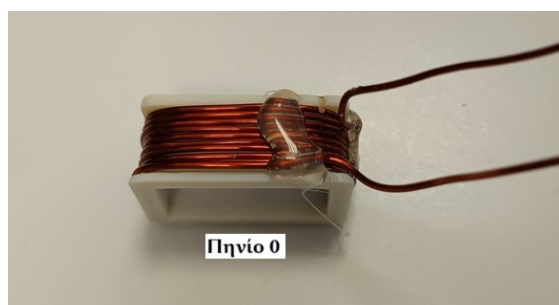
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν συνολικά 9 διαφορετικά πηνία. Η ευαισθησία του πηνίου λήψης στο κύκλωμα είναι αρκετά σημαντική και εξαρτάται κυρίως από τη διατομή του χαλκού και από τον αριθμό των σπειρών. Για το λόγο αυτό δοκιμάστηκαν και κατασκευάστηκαν 1 πηνίο διέγερσης και 8 διαφορετικά πηνία λήψης. Όλα τα πηνία τυλίχθηκαν πάνω σε 3D εκτυπωμένες βάσεις στήριξης πηνίων, οι οποίες εφαρμόζονται πάνω στον πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο, τα πηνία εναλλάσσονται πιο εύκολα και γίνονται οι μετρήσεις πιο αποδοτικά, χωρίς σημαντικές απώλειες. Τα πηνία λήψης για να είναι το κατά το δυνατόν πιο ακριβή με την απόκριση του κυκλώματος πρέπει να είναι όσο πιο κοντά στον πυρήνα γίνεται. Βέβαια, χρησιμοποιώντας τις πλαστικές βάσεις στήριξης, το πηνίο δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με τον πυρήνα. Παρόλ' αυτά οι απώλειες που προκύπτουν είναι αμελητέες και δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις. Επίσης, ως επιπλέον παραλλαγή χρησιμοποιήθηκαν βάσεις στήριξης με δύο διαφορετικά πλάτη (1cm & 1.4cm).

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτονται όλα τα πηνία που κατασκευάστηκαν:

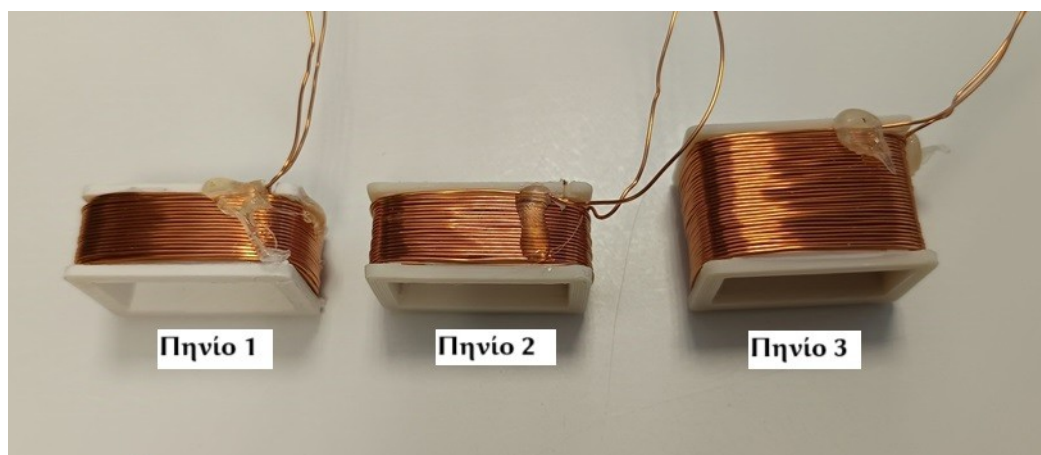
Πίνακας 2: Συνοπτική περιγραφή των πηνίων που κατασκευάστηκαν.

	Σπείρες	Διατομή χαλκού (mm)	Μήκος βάσης (cm)	Χρήση
Πηνίο 0	10	1.0	1	Πηνίο διέγερσης
Πηνίο 1	76	0.5	1	Πηνίο λήψης
Πηνίο 2	37	0.5	1	Πηνίο λήψης
Πηνίο 3	66	0.5	1.4	Πηνίο λήψης

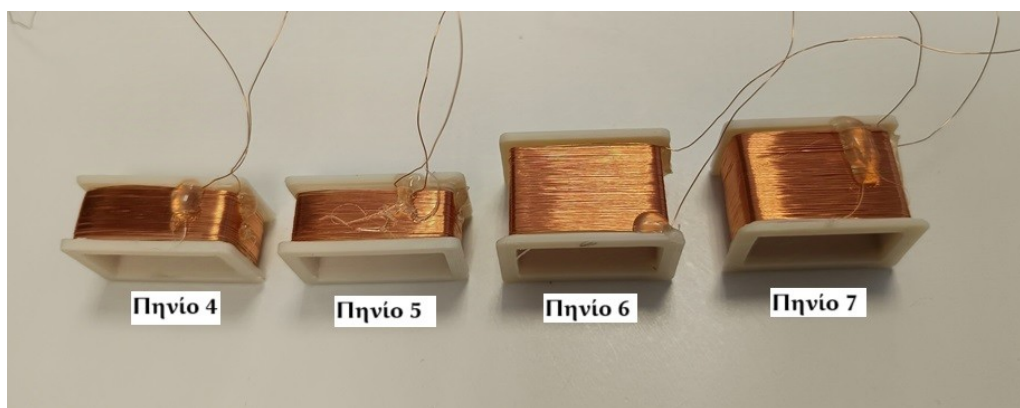
Πηνίο 4	147	0.15	1	Πηνίο λήψης
Πηνίο 5	74	0.15	1	Πηνίο λήψης
Πηνίο 6	76	0.15	1.4	Πηνίο λήψης
Πηνίο 7	147	0.15	1.4	Πηνίο λήψης
Πηνίο 8	10	1.0	1.4	Πηνίο διέγερσης
	73	0.15	1.4	Πηνίο λήψης



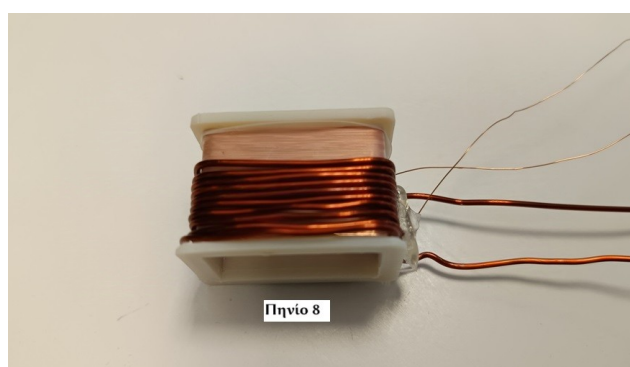
Σχήμα 13: Πηνίο διέγερσης (πηνίο 0).



Σχήμα 14: Πηνία λήψης 1, 2 & 3.



Σχήμα 15: Πηνία λήψης 4, 5, 6 & 7.



Σχήμα 16: Πηνίο διέγερσης και λήψης στην ίδια βάση. ("πηνίο 8").

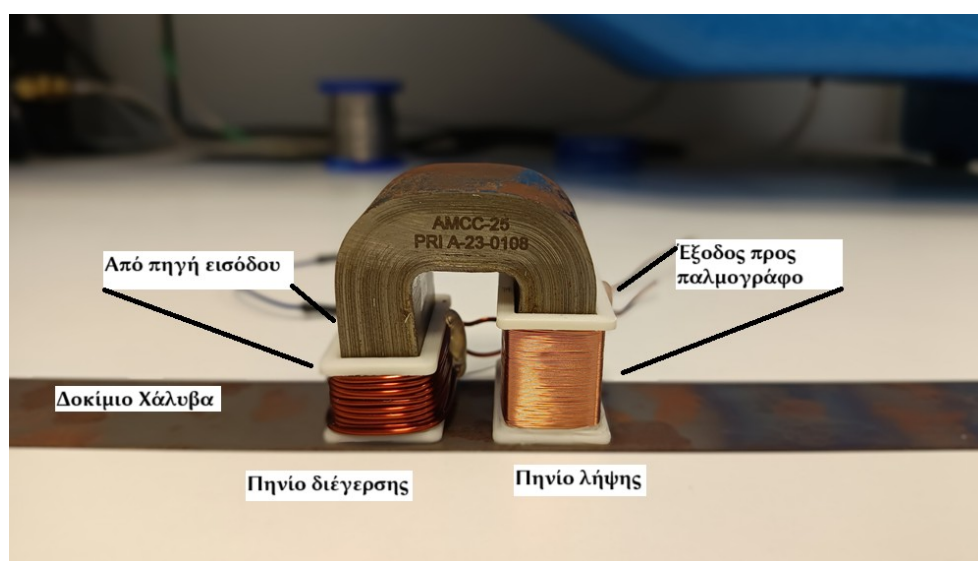
4.4.2 Μελέτη και σύγκριση μεταξύ τους

Πριν καταγραφεί ο βρόχος υστέρησης του επιλεγμένου φερρομαγνητικού υλικού, είναι σκόπιμο να συγκριθούν οι διάφορες διατάξεις ως προς την ευαισθησία και την ακρίβεια στην απόκρισή τους. Σε γενικές γραμμές αναζητούνται ο κατάλληλος συνδυασμός πηνίων εισόδου και εξόδου για να έχουμε την κατά το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση του σήματος. Η παρούσα εργασία εστιάζει κυρίως στην επιλογή του πηνίου λήψης της διάταξης σε συνδυασμό του πλάτους και της συχνότητας εισόδου, καθώς το πηνίο διέγερσης παραμένει σταθερό με $N=10$ και διατομή 1.0mm (πηνίο 0).

Πιο συγκεκριμένα, με ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου με κυμαινόμενο πλάτος και συχνότητα από $V=50\text{mV}$ έως 600mV και $f=0.1\text{ Hz}$ έως $f=10\text{Hz}$ αντίστοιχα αφού το παρεμβάλουμε από έναν ενισχυτή ισχύος, διεγείρουμε το μαγνητικό κύκλωμα και καταγράφουμε την τάση στο πηνίο λήψης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 η

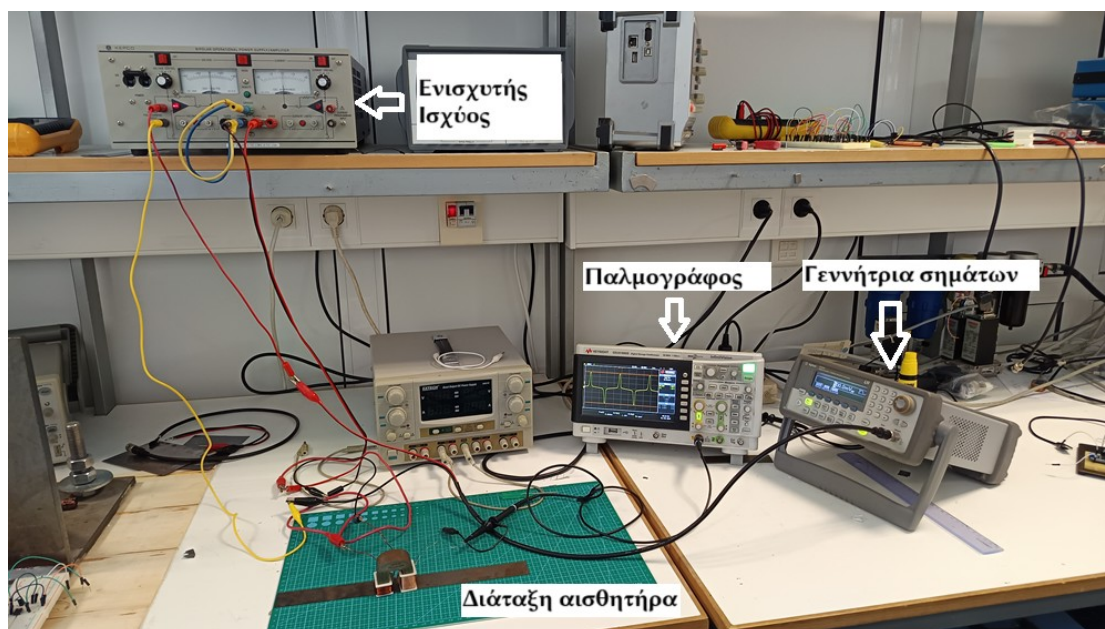
συχνότητα και το πλάτος του σήματος διέγερσης πρέπει να είναι μικρή προκειμένου να μην δημιουργηθούν δινορρέυματα που μπορεί να αλλοιώσουν τις μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για καθένα απ' τα πηνία λήψης. Μεταξύ της γεννήτριας σημάτων το πηνίο διέγερσης παρεμβάλλεται ένας ενισχυτής ισχύος, έτσι ώστε να αυξηθεί το ρεύμα του διαρρέει το κύκλωμα και να παραχθεί μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο. Σε κάθε περίπτωση καταγράφονταν επίσης και η ένταση του ρεύματος εισόδου με σκοπό να μην ξεπεραστεί το όριο των 3 A στην ένδειξη του ενισχυτή ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται πόσο ακριβές και ευαίσθητο είναι το κάθε πηνίο λήψης ανάλογα με το πόσο ακριβής είναι η ένδειξη της τάσης του.

Ενδεικτικά, η διάταξη του μαγνητικού κυκλώματος για την πραγματοποίηση των μετρήσεων είναι η παρακάτω:



Σχήμα 17: Τυπική διάταξη κυκλώματος για την μελέτη των πηνίων λήψης.

Η συνολική διάταξη για τη σύγκριση των πηνίων είναι η παρακάτω:



Σχήμα 18: Συνολική διάταξη για τη σύγκριση των πηνίων.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 18, με μία γεννήτρια σημάτων παράγονται τα επιθυμητά σήματα εισόδου τα οποία οδηγούνται στον ενισχυτή ισχύος. Διεγείροντας το πηνίο διέγερσης με το ενισχυμένο σήμα από τον ενισχυτή ισχύος, λαμβάνεται το σήμα απόκρισης από το πηνίο λήψης με τη βοήθεια ενός παλμογράφου.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, για κάθε διάταξη πηνίων, η μέτρηση σταματούσε εάν ο ενισχυτής ισχύος έδινε ρεύμα μεγαλύτερο από 3 A. Οπότε για κάποια πλάτη εισόδου δεν έγιναν μετρήσεις. Επίσης, σε συγκεκριμένα πηνία, ειδικά σε πηνία με λιγότερες σπείρες, για μικρότερα πλάτη εισόδου και συχνότητες, το πηνίο λήψης έδινε αμελητέα έξοδο, οπότε και αυτή παραλείπεται. Γι αυτό και στους παρακάτω πίνακες κάποιες μετρήσεις έχουν σημειωθεί με "-". Επομένως, όλες οι μετρήσεις που διεξάχθηκαν εμφανίζονται αναλυτικά για κάθε πηνίο:

Πίνακας 3: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 1 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1(Hz)	0.2(Hz)	0.5(Hz)	0.8(Hz)	1(Hz)
V _{in} (mV)	V _{out} (mV)				
50	12.3	15.5	23.4	31.5	34.1
100	18	23.2	41.2	62.2	66.2
150	20.3	31.1	57.7	81.5	96.2

200	23.5	38	75	120	126.2	
250	28.5	42.1	91.1	141	158.8	
300	-	-	-	167	190	
f=	2(Hz)	3(Hz)	4(Hz)	5(Hz)	8(Hz)	10(Hz)
Vin(mV)	Vout					
50	57	80	110	150	230	260
100	114	171.1	239	293	450	520
200	213	327.5	458	547	810	940
300	314	465	651	770	1.1 (V)	1.27 (V)
400	423	600	820	960	1.35 (V)	1.61 (V)
500	523	727	960	1.13 (V)	1.61 (V)	1.83 (V)
600	-	862	1.12 (V)	1.3 (V)	1.81 (V)	2.09 (V)

Πίνακας 4: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 2 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)	
Vin (mV)	Vout (mV)					
50	-	-	11.4	15.5	18.5	
100	-	12.4	20	28.1	33.8	
150	-	15.7	28	40.8	49.6	
200	-	18.9	34.2	52.5	65.5	
250	13.2	21.05	42.2	64	81.3	
300	-	-	-	-	91.1	
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)
Vin (mV)	Vout					
50	29	45	57	70	98	117
100	59.8	90	113	139	201	241
200	119.5	174	217	257	390	446
300	179.4	253	312	368	550	623
400	231.9	322	402	474	680	780
500	-	390	454	543	790	920
600	-	454	519	623	880	1.05

700	-	507	603	-	-	-
-----	---	-----	-----	---	---	---

Πίνακας 5: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 3 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)	
Vin (mV)	Vout (mV)					
50	-	16	23.5	33.3	38.5	
100	18.3	21.6	40	58.4	72.8	
150	20.4	29.9	58	83	105.8	
200	23.4	35	75.5	113.3	135.8	
250	26.4	41.5	88	138.8	168.8	
300	-	-	-	-	190.3	
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)
Vin (mV)	Vout					
50	66	93.1	118.1	140	208	250
100	132.5	190.7	241.9	291.3	427.3	507.5
200	256.3	356.3	458.8	555	785	940
300	360.7	508.8	641.3	770	1.08 (V)	1.29 (V)
400	468.8	636.3	820	845	1.32 (V)	1.55 (V)
500	-	720	950	920	1.49 (V)	1.81 (V)
600	-	830	1.02 (V)	1.16(V)	1.69 (V)	1.95 (V)

Πίνακας 6: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 4 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)
Vin (mV)	Vout (mV)				
50	-	38	60.3	78	92
100	39	56.9	95	148.2	175
150	42	73.5	141	205.6	255
200	56.8	88.8	178.1	266.9	326.3
250	64.7	106	215	326.9	410

300	-	-	-	381.3	468.3	
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)
Vin (mV)	Vout					
50	160	213.8	267.5	325	471	605
100	317.5	433.8	555	672	965	1.16 (V)
200	597.5	830	1.04 (V)	1.22 (V)	1.78 (V)	2.06 (V)
300	855	1.15 (V)	1.51 (V)	1.71 (V)	2.4 (V)	2.85 (V)
400	1.09 (V)	1.43 (V)	1.85 (V)	2.11 (V)	2.97 (V)	3.3 (V)
500	1.22(V)	1.70 (V)	2.13 (V)	2.45 (V)	3.42 (V)	3.86 (V)
600	-	1.96 (V)	2.43 (V)	2.81 (V)	3.86 (V)	4.14 (V)

Πίνακας 7: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 5 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)	
Vin (mV)	Vout (mV)					
50	-	15.2	18.5	25.5	30	
100	16	18.7	30.6	44.4	55	
150	17	23.3	42.8	69.5	78.3	
200	25	27.3	51.8	86.3	106.5	
250	27	32.6	70	110	131.8	
300	-	-	-	132.5	156.9	
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)
Vin (mV)	Vout					
50	52.5	77.5	98.8	113.1	175.1	199.4
100	98.8	150	194.4	236.3	350.6	432.5
200	195.6	293.1	376.3	452.5	675	812.5
300	293.8	428.8	546.3	655	970	1.14 (V)
400	383.8	553.8	700	850	1.2 (V)	1.44 (V)
500	467.5	661.3	842.5	1.01 (V)	1.47 (V)	1.71 (V)
600	-	763.8	1.09 (V)	1.17 (V)	1.67 (V)	1.95 (V)

Πίνακας 8: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 6 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)		
Vin (mV)	Vout (mV)						
50	13.5	13.5	25.8	37.3	44.4		
100	17.6	17.6	44.6	67.3	90		
150	21.1	21.1	64.3	96.5	125		
200	26.1	26.1	90	126	165		
250	28.4	28.4	111	155	195		
300	-	-	-	193	225		
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)	
Vin (mV)	Vout						
50	74.8	111	139	171	249	291	
100	151.3	217	275	342	498	590	
200	297	410	527	619	910	1.05 (V)	
300	422	590	750	870	1.24 (V)	1.45 (V)	
400	531	730	920	1.09 (V)	1.55 (V)	1.79 (V)	
500	635	880	1.09 (V)	1.28 (V)	1.81 (V)	2.07 (V)	
600	740	1.01 (V)	1.26 (V)	1.46 (V)	2.03 (V)	2.33 (V)	

Πίνακας 9: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 7 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)		
Vin (mV)	Vout (mV)						
50	-	39	61	82	94		
100	41	59	110	151	179		
150	46	75.2	147	209	265		
200	53	91	185	271	329		
250	66	107	220	331	414		
300	-	-	-	389	471		
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)	
Vin (mV)	Vout						
50	175	241	281	333	465	615	

100	318	454	560	667	970	1.17 (V)
200	580	820	1.03 (V)	1.24 (V)	1.79 (V)	2.11 (V)
300	803	1.15 (V)	1.45 (V)	1.75 (V)	2.43 (V)	2.87 (V)
400	1.03 (V)	1.46 (V)	1.83 (V)	2.17 (V)	3 (V)	3.54 (V)
500	1.25 (V)	1.73 (V)	2.17 (V)	2.51 (V)	3.52 (V)	4.18 (V)
600	-	2.01 (V)	2.47 (V)	2.91 (V)	4.06 (V)	4.7 (V)

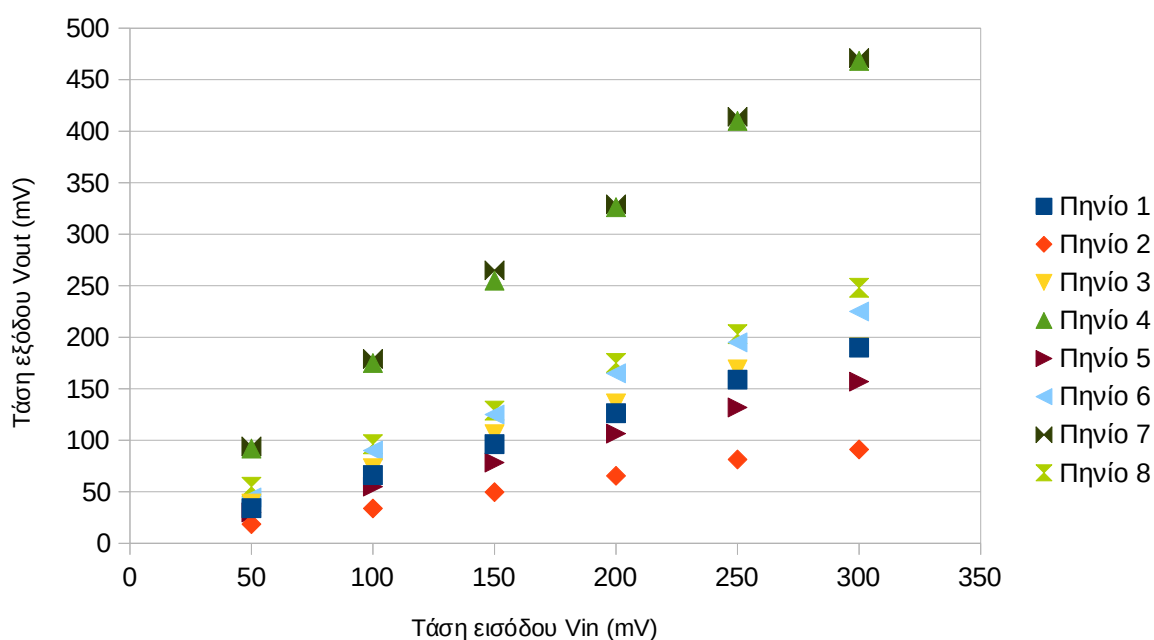
Πίνακας 10: Τιμές της τάσης του πηνίου λήψης 8 ανάλογα με το πλάτος και την συχνότητα του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης.

f=	0.1 (Hz)	0.2 (Hz)	0.5 (Hz)	0.8 (Hz)	1 (Hz)	
Vin (mV)	Vout (mV)					
50	-	25	39	50	54.8	
100	-	37.5	61	78	96.1	
150	39	43	77	106	128.8	
200	41	49	96	138	175	
250	43	58	110	175	203	
300	-	-	-	205	248	
f=	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	8 (Hz)	10 (Hz)
Vin (mV)	Vout					
50	86	131	163	210	260	298
100	165	225	326	360	550	635
200	330	448	567	679	970	1.14 (V)
300	455	650	820	960	1.35 (V)	1.59 (V)
400	580	810	1.03 (V)	1.19 (V)	1.65 (V)	1.95 (V)
500	710	960	1.21 (V)	1.41 (V)	1.97 (V)	2.25 (V)
600	-	1.1 (V)	1.39 (V)	1.61 (V)	2.19 (V)	2.55 (V)

Ενδεικτικά, μπορούμε να εστιάσουμε στην απόκριση όλων των πηνίων λήψης για μία μόνο συχνότητα τη φορά προκειμένου να είναι πιο εύκολη και κατανοητή η σύγκριση μεταξύ τους. Γι αυτό, λοιπόν για συχνότητα εισόδου **f=1 Hz** (και συχνότητα **f=5Hz** και **f=10Hz** παρακάτω) οι μετρήσεις είναι οι εξής:

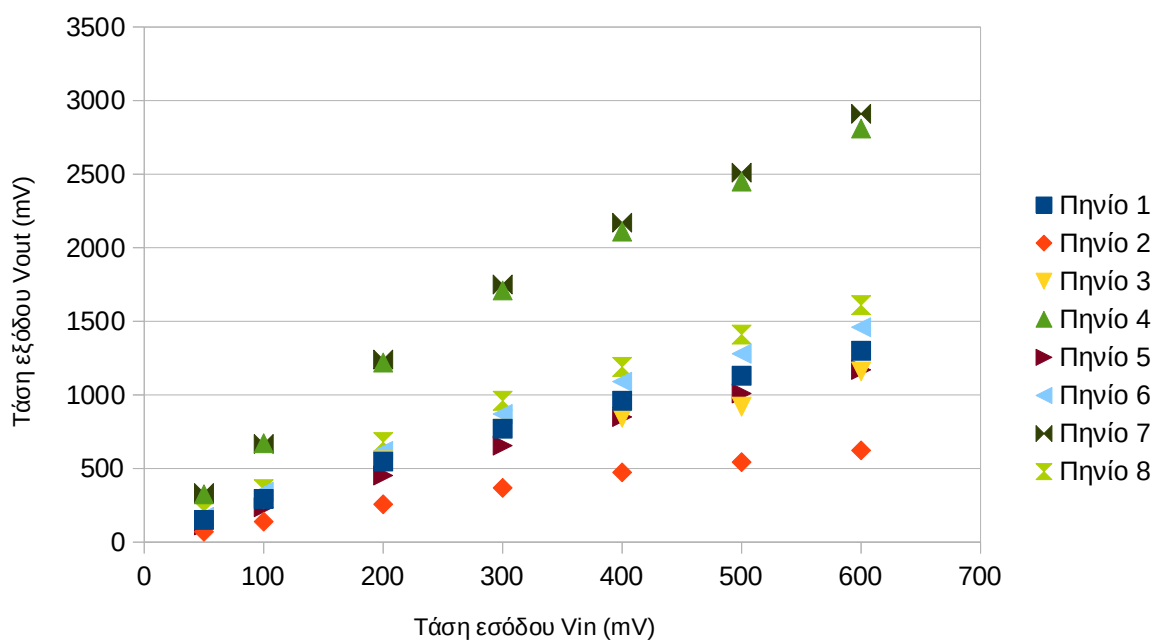
Πίνακας 11: Απόκριση των πηνίων λήψης για συχνότητα $f=1\text{Hz}$.

Vin(mV)	Vout (mV)							
	Πηνίο 1 N=76 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 2 N=37 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 3 N=66 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 4 N=147 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 5 N=74 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 6 N=76 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 7 N=147 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 8 N=73 $\delta=0.15\text{mm}$
50	34.1	18.5	38.5	92	30	44.4	94	54.8
100	66.2	33.8	72.8	175	55	90	179	96.1
150	96.2	49.6	105.8	255	78.3	125	265	128.8
200	126.2	65.5	135.8	326.3	106.5	165	329	175
250	158.8	81.3	168.8	410	131.8	195	414	203
300	190	91.1	190.3	468.3	156.9	225	471	248

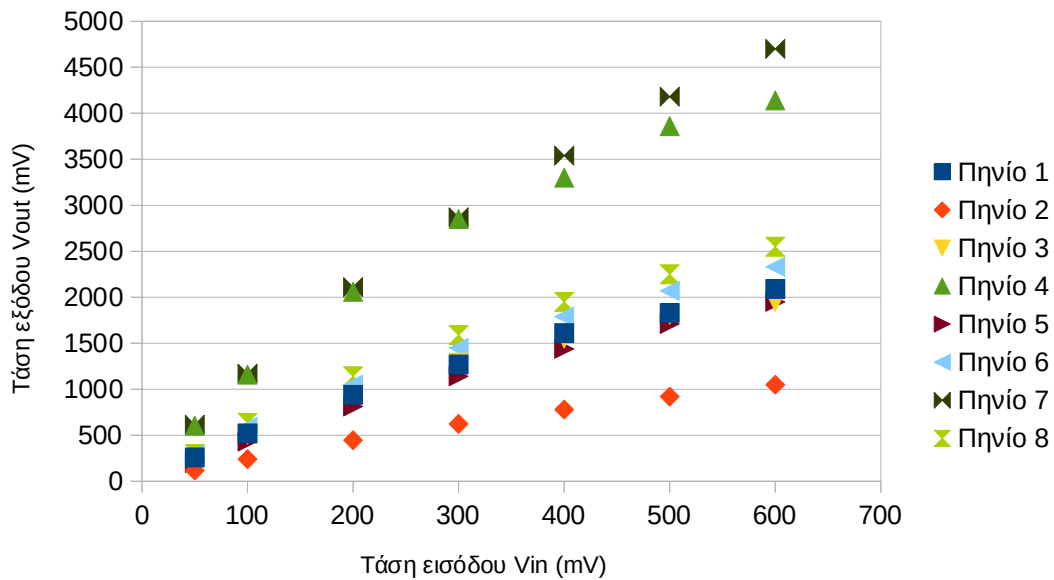
Σχήμα 19: Τάση απόκρισης πηνίων για συχνότητα $f=1\text{Hz}$.Πίνακας 12: Απόκριση των πηνίων λήψης για συχνότητα $f=5\text{Hz}$.

Vin(mV)	Vout (mV)							
	Πηνίο 1 N=76 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 2 N=37 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 3 N=66 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 4 N=147 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 5 N=74 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 6 N=76 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 7 N=147 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 8 N=73 $\delta=0.15\text{mm}$
50	150	70	140	325	113.1	171	333	210
100	293	139	291.3	672	236.3	342	667	360
200	547	257	555	1.22 (V)	452.5	619	1.24 (V)	679

300	770	368	770	1.71 (V)	655	870	1.75 (V)	960
400	960	474	845	2.11 (V)	850	1.09 (V)	2.17 (V)	1.19 (V)
500	1.13	543	920	2.45 (V)	1.01 (V)	1.28 (V)	2.51 (V)	1.41 (V)
600	1.3	623	1.16(V)	2.81 (V)	1.17 (V)	1.46 (V)	2.91 (V)	1.61 (V)

Σχήμα 20: Τάση απόκρισης πηνίων για συχνότητα $f=5\text{Hz}$.Πίνακας 13: Απόκριση των πηνίων λήψης για συχνότητα $f=10\text{Hz}$.

Vin(mV)	Vout (mV)							
	Πηνίο 1 N=76 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 2 N=37 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 3 N=66 $\delta=0.5\text{mm}$	Πηνίο 4 N=147 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 5 N=74 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 6 N=76 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 7 N=147 $\delta=0.15\text{mm}$	Πηνίο 8 N=73 $\delta=0.15\text{mm}$
50	260	117	250	605	199.4	291	615	298
100	520	241	507.5	1.16 (V)	432.5	590	1.17 (V)	635
200	940	446	940	2.06 (V)	812.5	1.05 (V)	2.11 (V)	1.14 (V)
300	1.27	623	1.29(V)	2.85 (V)	1.14 (V)	1.45 (V)	2.87 (V)	1.59 (V)
400	1.61	780	1.55(V)	3.3 (V)	1.44 (V)	1.79 (V)	3.54 (V)	1.95 (V)
500	1.83	920	1.81(V)	3.86 (V)	1.71 (V)	2.07 (V)	4.18 (V)	2.25 (V)
600	2.09	1.05	1.95(V)	4.14 (V)	1.95 (V)	2.33 (V)	4.7 (V)	2.55 (V)



Σχήμα 21: Τάση απόκρισης πηνίων για συχνότητα $f=10\text{Hz}$.

Όπως ήταν θεωρητικά αναμενόμενο, και για τις τρεις συχνότητες με βάση και τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων και γραφημάτων παρατηρείται ότι μεγαλύτερη τάση εξόδου και συνεπώς καλύτερη ακρίβεια στην καταγραφή του βρόχου υστέρησης έχουν τα πηνία με περισσότερο αριθμό σπειρών. Το **πηνίο 2** που έχει λιγότερες σπείρες ξεκάθαρα υστερεί σε σχέση με υπόλοιπα πηνία. Αντίθετα, τα **πηνία 4 και 7** τα οποία έχουν τον μεγαλύτερο αριθμό σπειρών δείχνουν να έχουν και την καλύτερη απόδοση. Μεταξύ τους, οι μετρήσεις είναι σχεδόν ίδιες πράγμα που σημαίνει ότι στο παρόν πείραμα το μήκος της βάσης στην οποία τυλίχθηκαν τα πηνία δεν παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο στις τιμές των πηνίων λήψης. Για τα **πηνία 1 και 6**, τα οποία έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών αλλά με διαφορετική διατομή χαλκού, μεγαλύτερη ακρίβεια παρατηρείται στο πηνίο 6 που έχει μικρότερη διατομή. Το **πηνίο 8** είναι μία παραλλαγή της διάταξης με το πηνίο λήψης και το πηνίο διέγερσης να είναι μαζί τυλιγμένα στην ίδια βάση. Τα χαρακτηριστικά αυτού του πηνίου είναι ίδια με το πηνίο 6 και γι αυτό οι ενδείξεις είναι κατά προσέγγιση ίδιες. Εκτενέστερος σχολιασμός για τα αποτελέσματα πραγματοποιείται στο κεφάλαιο 6 της παρούσας εργασίας.

Αντίστοιχα αποτελέσματα μπορούν να παρατηρηθούν και για όλες τις υπόλοιπες συχνότητες.

5

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΠΑΝΩ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ

5.1 Εισαγωγή

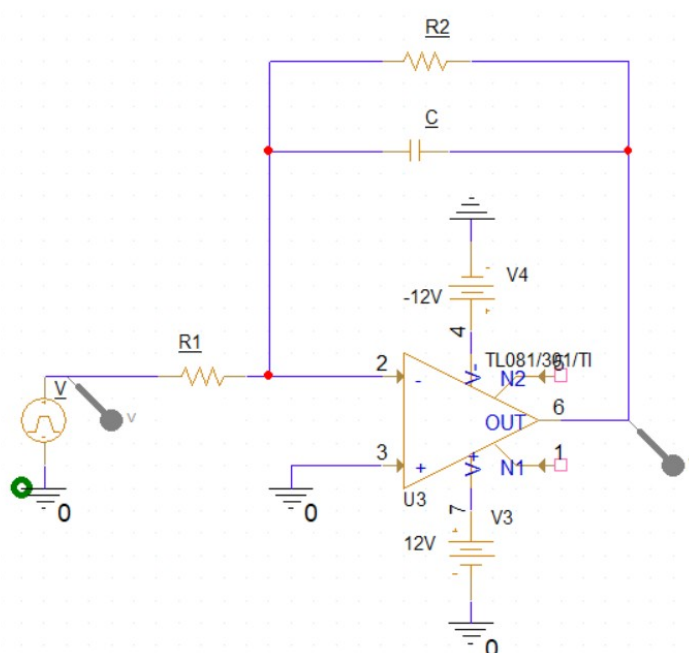
Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται και αναπτύσσεται όλη η διάταξη του μαγνητικού αισθητήρα που είναι απαραίτητη για να προσδιοριστεί ο βρόχος υστέρησης ενός δείγματος χάλυβα. Η μέθοδος αυτή είναι μη καταστροφική, αφού δεν χρειάζεται να παρέμβουμε απευθείας πάνω στο υλικό για να το εξετάσουμε για τυχόν ατέλειες. Έχοντας μελετήσει ποικίλες τοπολογίες της διάταξης στο προηγούμενο κεφάλαιο, το επόμενο βήμα είναι να επιλεγεί η επικρατέστερη και να κατασκευαστεί όλη η ηλεκτρική διάταξη. Στη συνέχεια, να γίνει ο αντίστοιχος έλεγχος του δείγματος απεικονίζοντας τον βρόχο υστέρησης του στον παλμογράφο. Καθώς η διάταξη του αισθητήρα μετακινείται κατά μήκος του δοκιμίου, η ένδειξη στον παλμογράφο πιθανώς μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται και η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ του υλικού. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται, αφού ισχύει η σχέση $B = \mu \cdot H$ και στον παλμογράφο προβάλλεται η συνάρτηση $B-H$ που εξαρτάται άμεσα από την μαγνητική διαπερατότητα μ του δοκιμίου στο συγκεκριμένο σημείο. Ένα τέλειο υλικό θα έχει σταθερή μαγνητική διαπερατότητα σε όλη την επιφάνεια και επομένως αμετάβλητη καμπύλη στον παλμογράφο. Βέβαια, όπως λέει και ένας καλός μου φίλος, “το τέλειο δεν υπάρχει”.

5.2 Κατασκευή ολοκληρωτή

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, για να απεικονισθεί ο βρόχος υστέρησης, η ολοκλήρωση του σήματος εξόδου απ το πηνίο λήψης είναι απαραίτητη. Για την παρούσα εφαρμογή και την κατασκευή του ολοκληρωτή επιλέχθηκε απ το εργαστήριο ο τελεστικός ενισχυτής TL081 [39]. Στόχος είναι ο ολοκληρωτής να λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (περίπου 5-10 Hz).

5.2.1 Προσομοίωση στο Pspice

Με βάση, λοιπόν, των παραπάνω απαιτήσεων και δεδομένων, κατασκευάστηκε το κύκλωμα του ολοκληρωτή αρχικά σε προσομοιωτή (πρόγραμμα Pspice):

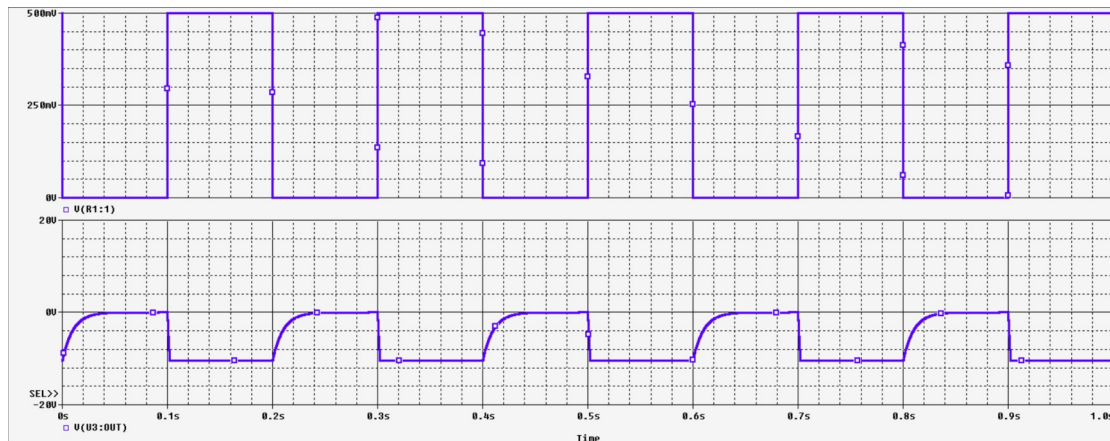


Σχήμα 22: Κύκλωμα ολοκληρωτή στο Pspice.

Βάζοντας πηγή εισόδου τετραγωνικό παλμό με περίοδο $T=0.2s$, duty cycle 50% και πλάτος 500mV, το αποτέλεσμα που αναμένεται είναι ένας τριγωνικός παλμός. Δοκιμάστηκαν διάφοροι Συνδυασμοί τιμών των στοιχείων στον προσομοιωτή. Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιοι παρακάτω. Για:

- $R1=1k\Omega$
- $R2=100k\Omega$
- $C=100nF$

προκύπτει:

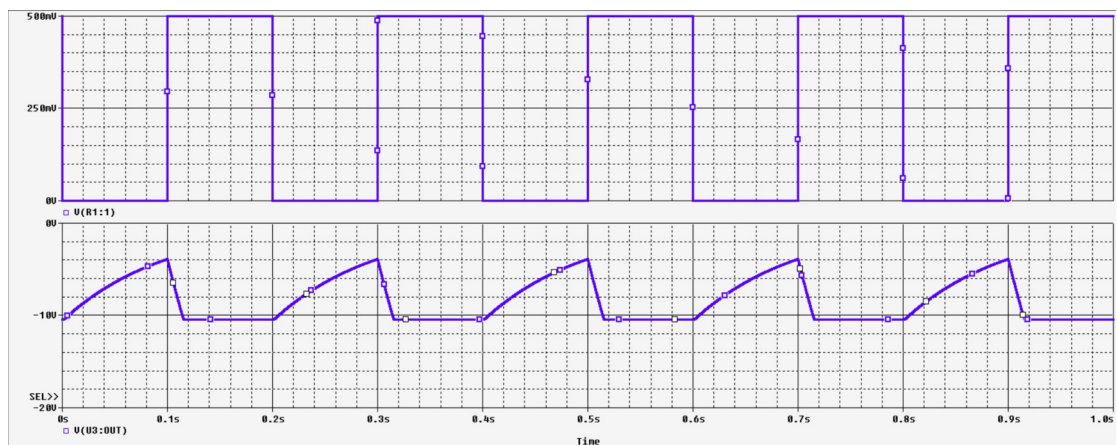


Σχήμα 23: Σχέση εισόδου - εξόδου ολοκληρωτή για $R1=1k\Omega$, $R2=100k\Omega$ στο Pspice.

Για:

- $R1=10k\Omega$
- $R2=1M\Omega$
- $C=100nF$

προκύπτει:



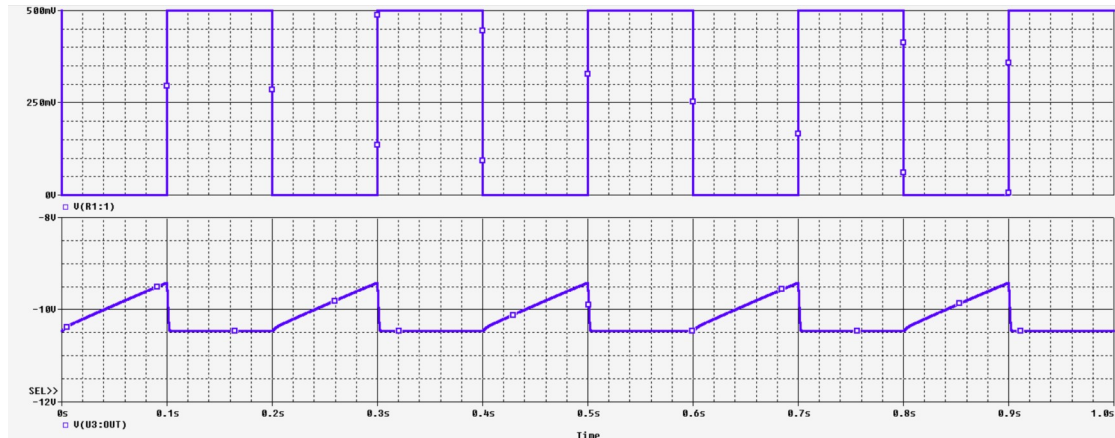
Σχήμα 24: Σχέση εισόδου - εξόδου ολοκληρωτή για $R1=10k\Omega$, $R2=1M\Omega$ στο Pspice.

Για:

- $R1=10k\Omega$
- $R2=10M\Omega$

- $C=100\text{nF}$

προκύπτει:

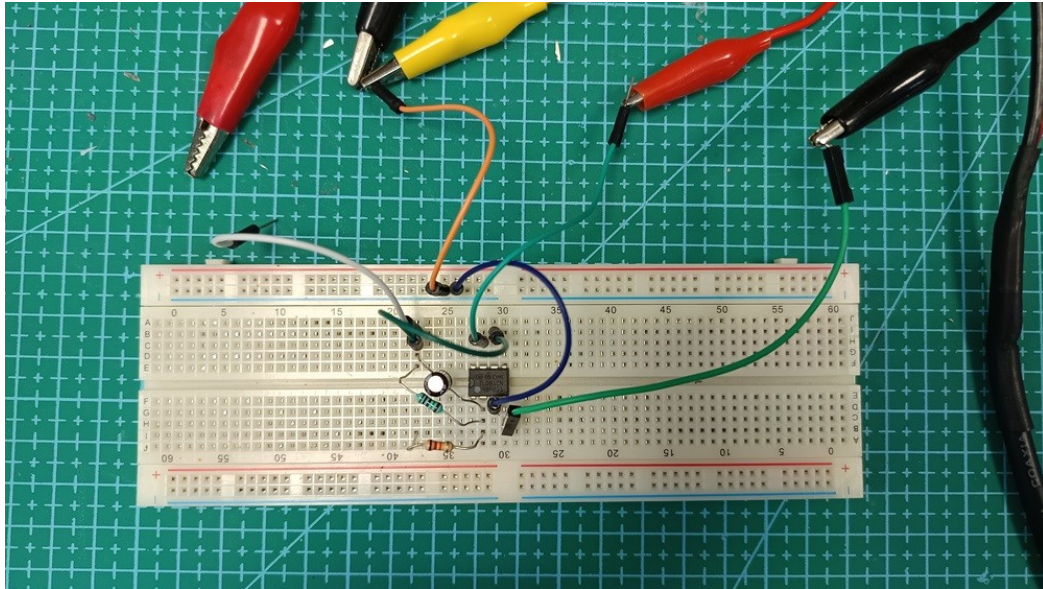


Σχήμα 25: Σχέση εισόδου - εξόδου ολοκληρωτή για $R1=1\text{k}\Omega$, $R2=10\text{M}\Omega$ στο Pspice.

Ύστερα, λοιπόν, από αρκετές προσομοιώσεις παρατηρείται ότι για επιτευχθεί τέλεια ολοκλήρωση σε χαμηλές συχνότητες, πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντίσταση $R2$ της τάξης των $\text{M}\Omega$. Για τον πυκνωτή C πρέπει να είναι της τάξης των nF . Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες τιμές είναι επιλεγμένες με βάση και την συμπεριφορά του τελεστικού ενισχυτή που επιλέχθηκε. Άλλος τελεστικός ενισχυτής, με άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά, απαιτεί και άλλες τιμές αντιστάσεων και πυκνωτών!

5.2.2 Κατασκευή στο εργαστήριο

Μετά την μελέτη στον προσομοιωτή και τον προσδιορισμό των τιμών για τα στοιχεία του ολοκληρωτή, το παραπάνω κύκλωμα κατασκευάστηκε στο breadboard, όπως φαίνεται παρακάτω:



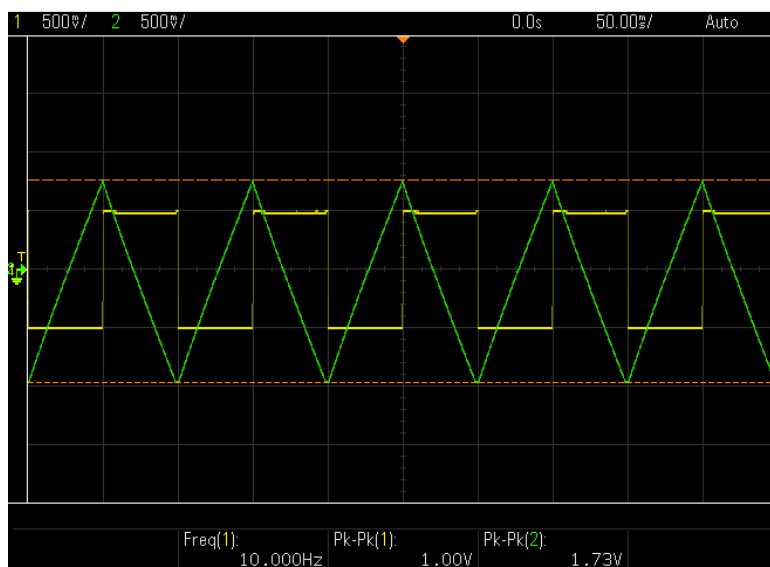
Σχήμα 26: Κύκλωμα ολοκληρωτή στο breadboard.

όπου

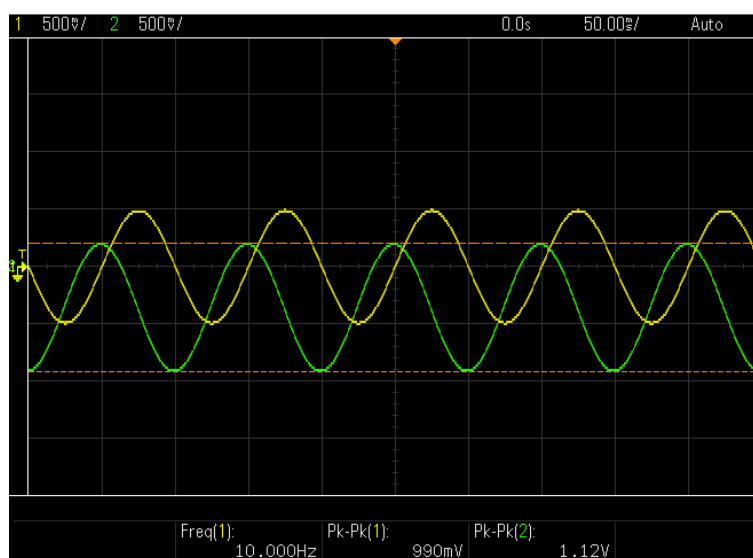
- $R1=12k\Omega$
- $R2=10M\Omega$
- $C=0.1\mu F$ (δηλ, $100nF$)

όπως ακριβώς και στο αντίστοιχο κύκλωμα της προσομοίωσης.

Για εξακριβωθεί η σωστή λειτουργία του ολοκληρωτή που κατασκευάστηκε, δοκιμάστηκαν πρώτα τετραγωνικά σήματα εισόδου. Η απόκριση θεωρητικά πρέπει να είναι ένας τριγωνικός παλμός. Ενδεικτικά, για σήμα εισόδου με τάση $V1=1V$ και $f=10Hz$ η απόκριση στον παλμογράφο είναι πράγματι ένας τριγωνικός παλμός με ελαφρώς ενισχυμένο πλάτος $V2$. Για σήμα εισόδου ημιτονοειδές με πλάτος $V1=1V$ και συχνότητα $f=10Hz$, η έξοδος και πάλι είναι η αναμενόμενη. Δηλαδή μια ημιτονοειδής καμπύλη με καθυστέρηση 90° .



Σχήμα 27: Απεικόνιση παλμογράφου ολοκληρωτή με είσοδο τετραγωνικό παλμό $f=10\text{Hz}$.



Σχήμα 28: Απεικόνιση παλμογράφου ολοκληρωτή με είσοδο ημίτονο συχνότητας $f=10\text{Hz}$.

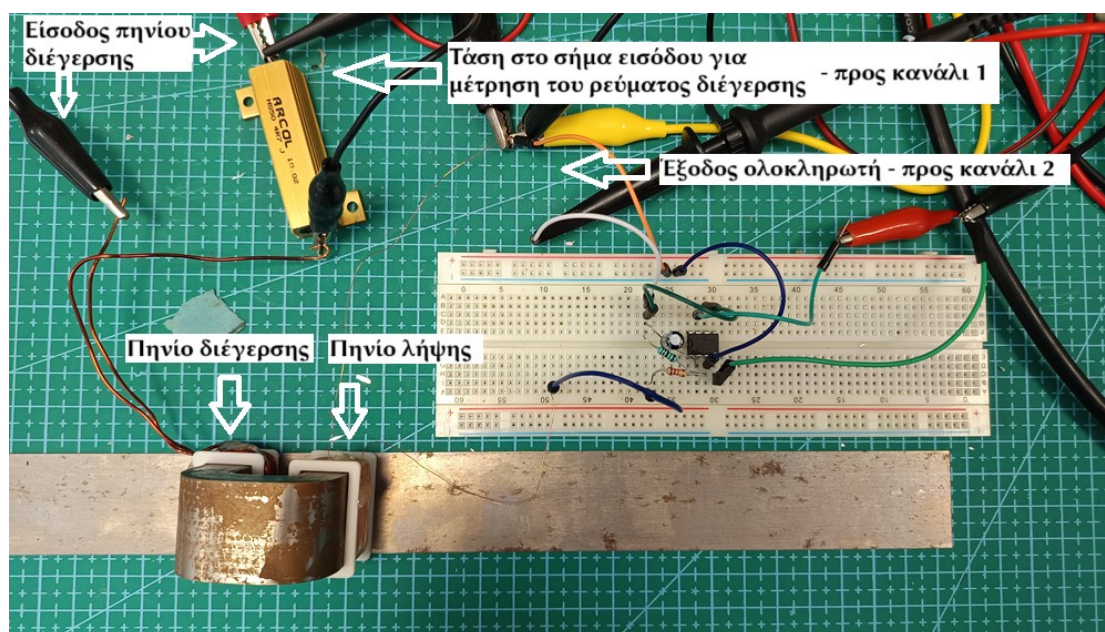
5.3 Μετρήσεις και απεικόνιση στον παλμογράφο

5.3.1 Συνολική διάταξη

Για τις μετρήσεις, με βάση τη μελέτη στο κεφάλαιο 4, στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε

- ως πηνίο διέγερσης το πηνίο 0 με χαρακτηριστικά $N=10$ σπείρες, διατομή 1.0mm σε βάση πλάτους 1cm
- ως πηνίο λήψης το πηνίο 7 με χαρακτηριστικά $N=147$, διατομή 0.15mm σε βάση πλάτους 1.4cm
- Yoke από μέταλλο μαγνητικής θωράκισης (μ metal) AMCC-25 διαστάσεων 41x82x25
- πηγή σήματος διέγερσης ημιτονικό σήμα πλάτους $V=500\text{mV}$ και συχνότητας $f=5\text{Hz}$ & $f=10\text{Hz}$
- ο ολοκληρωτής που κατασκευάστηκε στην παράγραφο 5.2 και
- για τον προσδιορισμό της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , μια αντίσταση ισχύος χαμηλής τιμής ($4.7\ \Omega$) ώστε να μην επηρεάζει το αποτέλεσμα, η οποία συνδέθηκε σε σειρά με το πηνίο διέγερσης. Προτιμήθηκε αντίσταση ισχύος και όχι απλή αντίσταση λόγω της αυξημένης έντασης του ρεύματος που τη διαρρέει.

Συνολικά η διάταξη που κατασκευάστηκε φαίνεται παρακάτω:



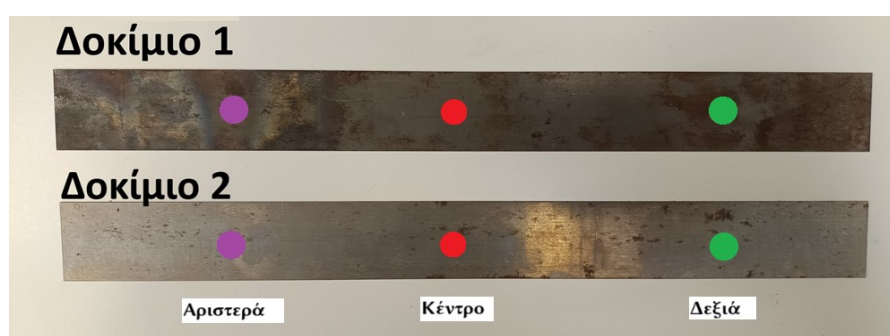
Σχήμα 29: Συνολική διάταξη για τον προσδιορισμό του βρόχου υστέρησης.

5.3.2 Διεξαγωγή μετρήσεων

Ως τελευταίο βήμα, λοιπόν, η διάταξη του μαγνητικού αισθητήρα που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή δύο διαφορετικών δειγμάτων χάλυβα. Το δοκίμιο 1 και το δοκίμιο 2 με διαστάσεις $300 \times 30 \times 0.6 \text{ mm}^3$. Χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα χάλυβα τα οποία εξωτερικά έχουν εμφανείς διαφορές μεταξύ τους. Το δοκίμιο 1 έχει περισσότερες τοπικές ατέλειες στην επιφάνειά του συγκριτικά με το δοκίμιο 2, οι οποίες έχουν προκύψει από τοπική θέρμανση του δείγματος και απότομη ψύξη του. Αντλήθηκαν μετρήσεις με δύο διαφορετικές συχνότητες σε τρία διαφορετικά σημεία πάνω σε κάθε δοκίμιο. Έγιναν δηλαδή 12 διαφορετικές απεικονίσεις του βρόχου υστέρησης. Ως σημείο μετρήσεων θεωρείται το σημείο του γοκε που είναι τοποθετημένο το πηνίο λήψης και ακουμπάει το δείγμα του χάλυβα.

Πίνακας 14: Συνοπτική παρουσίαση όλων των σημείων απεικόνισης του βρόχου υστέρησης.

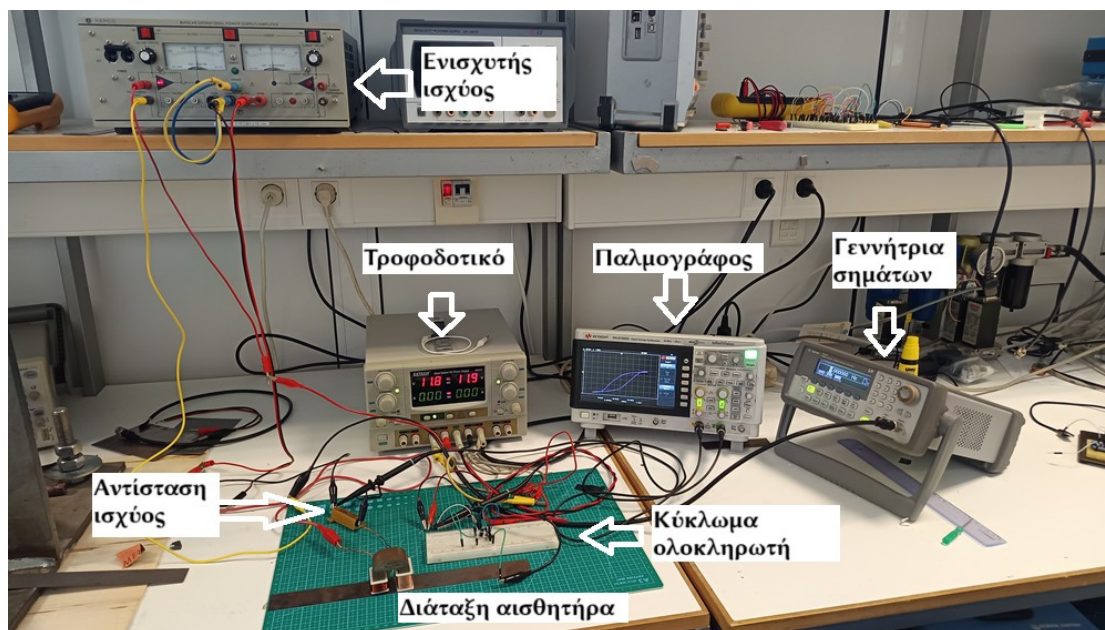
Δοκίμιο 1	Αριστερά (f=5Hz)	Κέντρο (f=5Hz)	Δεξιά (f=5Hz)
	Αριστερά (f=10Hz)	Κέντρο (f=10Hz)	Δεξιά (f=10Hz)
Δοκίμιο 2	Αριστερά (f=5Hz)	Κέντρο (f=5Hz)	Δεξιά (f=5Hz)
	Αριστερά (f=10Hz)	Κέντρο (f=10Hz)	Δεξιά (f=10Hz)



Σχήμα 30: Δείγματα χάλυβα στα οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος.

Για την παραγωγή του σήματος εισόδου στο πηνίο διέγερσης του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια σημάτων με έξοδο ημίτονο πλάτους 500mV και συχνότητα 5 & 10Hz. Το σήμα αυτό ήταν η είσοδος στον ενισχυτή ισχύος της διάταξης. Στα άκρα του πηνίου διέγερσης συνδέθηκε ο ενισχυτής ισχύος προκειμένου να δημιουργηθεί επαγωγή και επομένως μαγνητικό κύκλωμα μεταξύ του αισθητήρα και

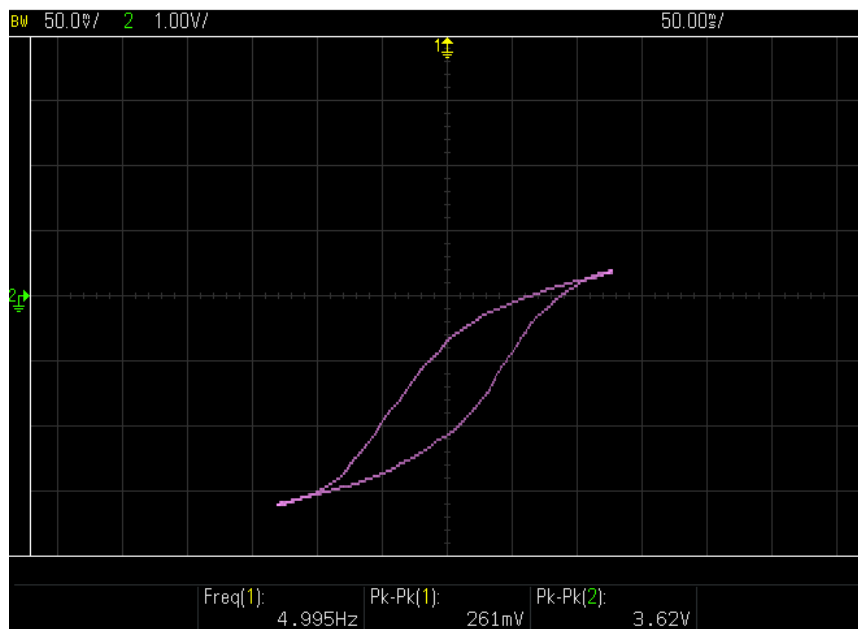
του δοκιμίου. Η έξοδος από το πηνίο λήψης οδηγείται σε έναν ολοκληρωτή, όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 5.2. Επίσης, για τη διάταξη είναι απαραίτητη η χρήση ενός τροφοδοτικού με δύο κανάλια για DC τροφοδοσία $\pm 12V$ στον τελεστικό ενισχυτή. Η συνολική διάταξη παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



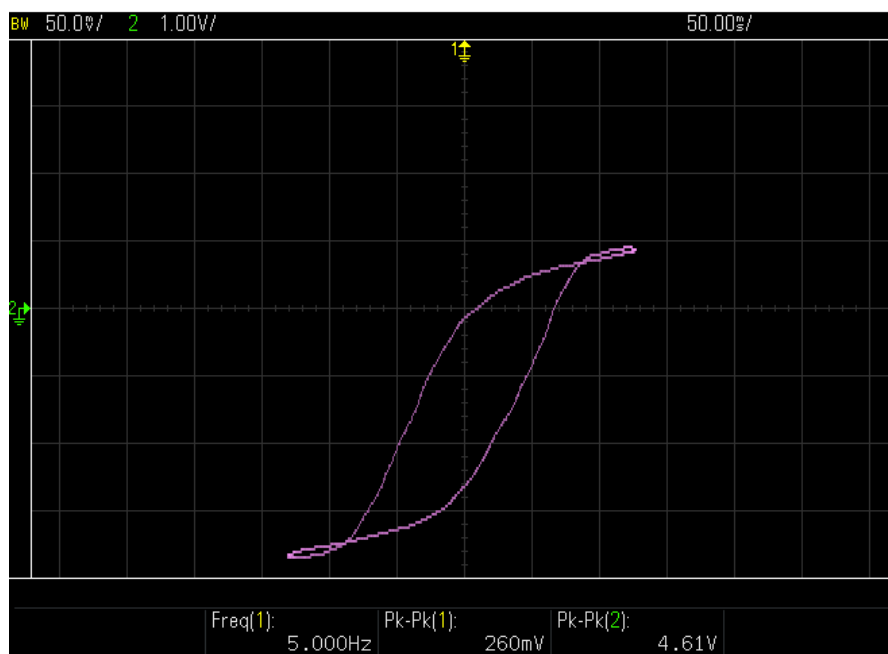
Σχήμα 31: Συνολική διάταξη καταγραφής του βρόχου υστέρησης.

Έχοντας τον παλμογράφο στη λειτουργία XY, λαμβάνεται το σήμα στα άκρα της αντίστασης ισχύος στο κανάλι 1 και η απόκριση του ολοκληρωτή στο κανάλι 2 και τα προβάλλουμε στους αντίστοιχους άξονες. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ύπαρξης του τελεστικού ενισχυτή, στην απόκριση του σήματος έχει προστεθεί μία DC συνιστώσα (DC offset). Επιπλέον, εφόσον η τάση για το κανάλι 1 του παλμογράφου μετράται στα άκρα μιας αντίστασης γνωστής τιμής (4.7Ω), με βάση το νόμο του Ohm $V = I \cdot R$ μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα I που διαρρέει το πηνίο διέγερσης. Κάνοντας χρήση του νόμου του Ampere [εξίσωση (4.1)] μπορεί, άρα, να υπολογιστεί η συνολική ένταση του μαγνητικού πεδίου H που διαρρέει το μαγνητικό κύκλωμα.

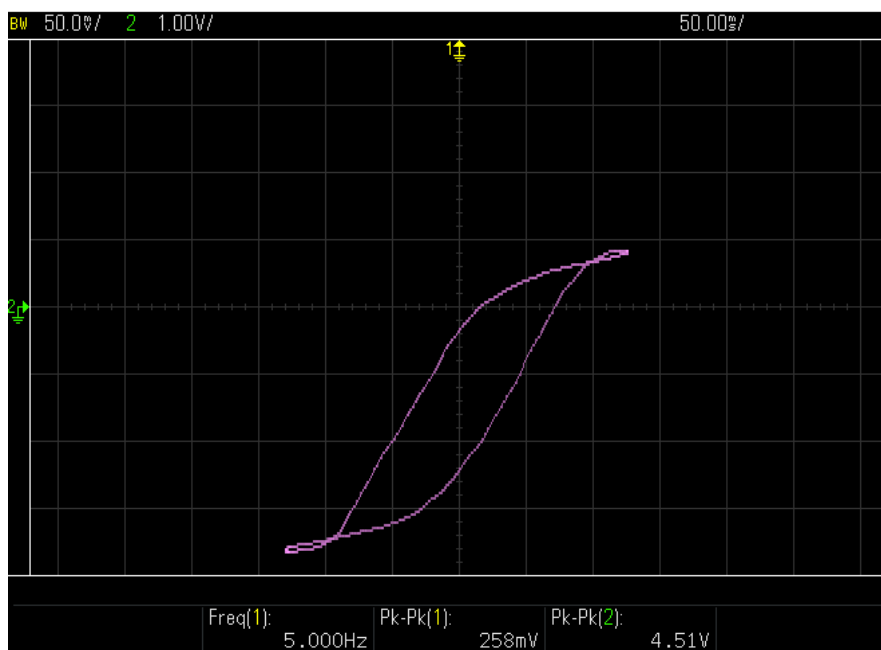
Οι απεικονίσεις παρουσιάζονται παρακάτω:



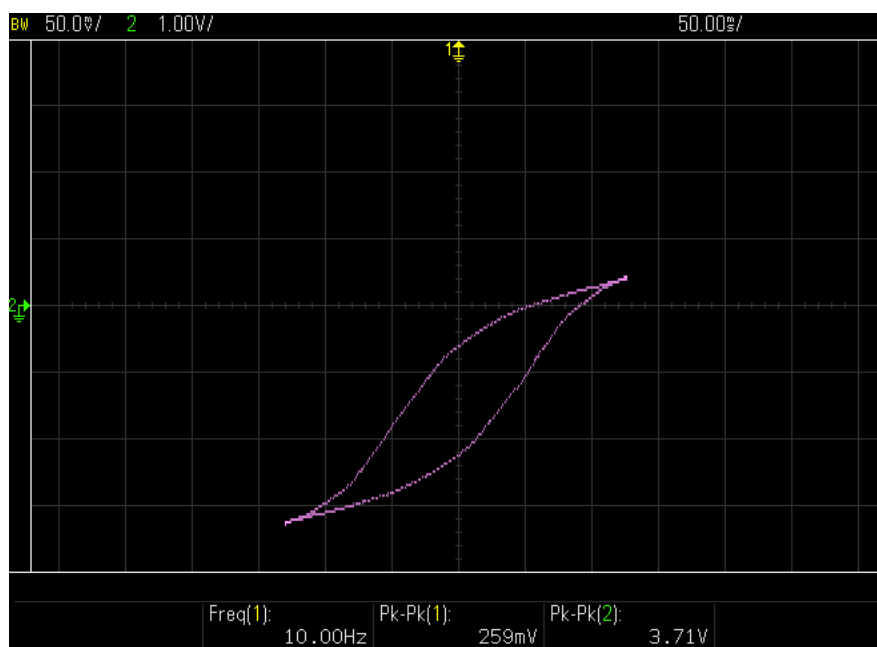
Σχήμα 32: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 αριστερά με $f=5\text{Hz}$.



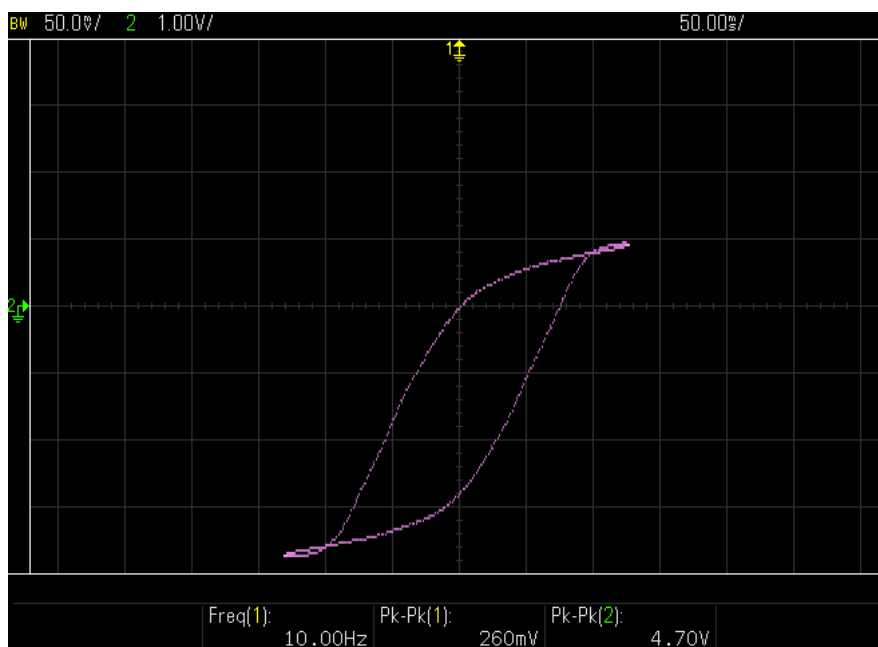
Σχήμα 33: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 κέντρο με $f=5\text{Hz}$.



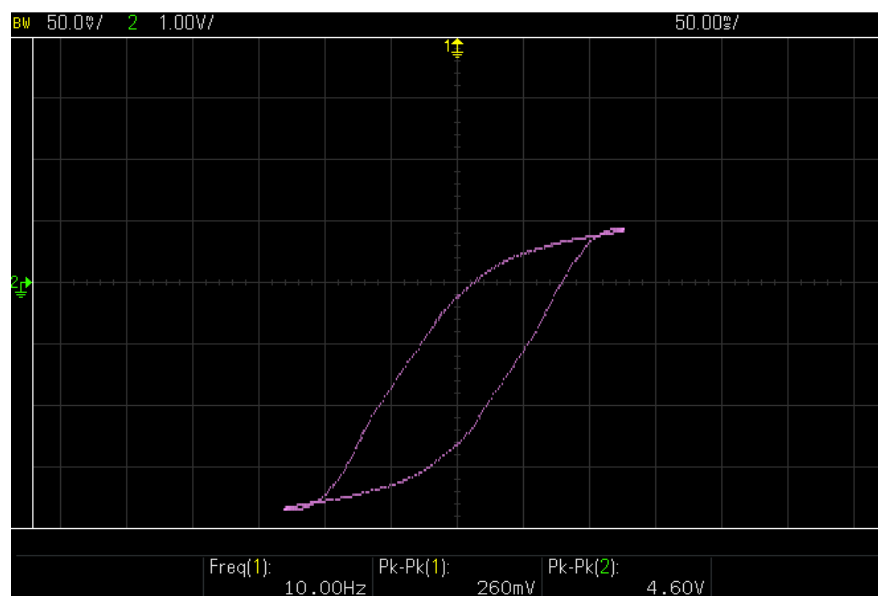
Σχήμα 34: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 δεξιά με $f=5\text{Hz}$.



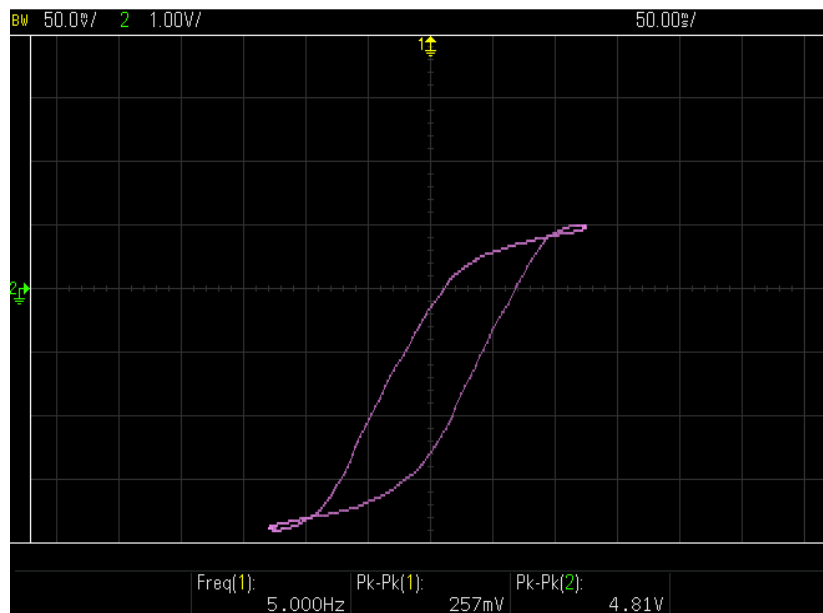
Σχήμα 35: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 αριστερά με $f=10\text{Hz}$.



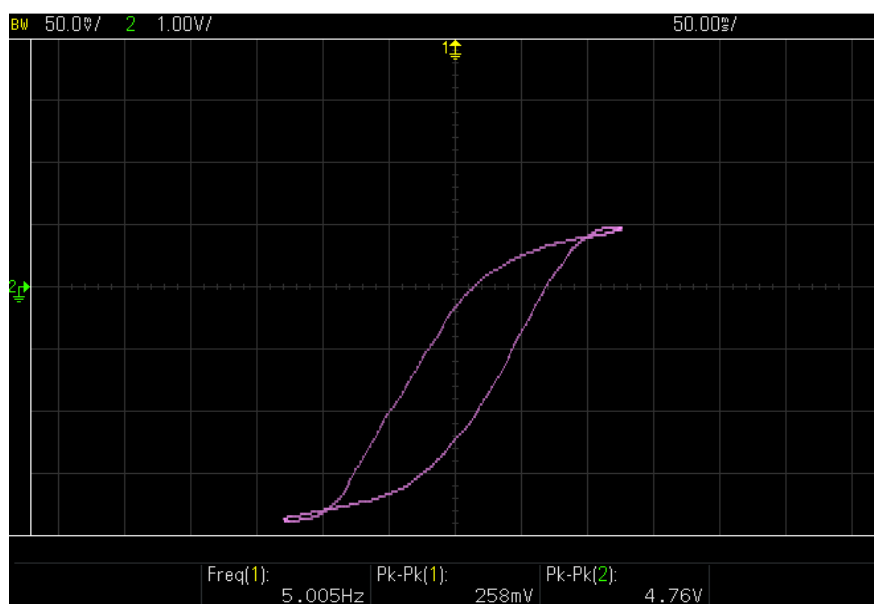
Σχήμα 36: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 κέντρο με $f=10\text{Hz}$.



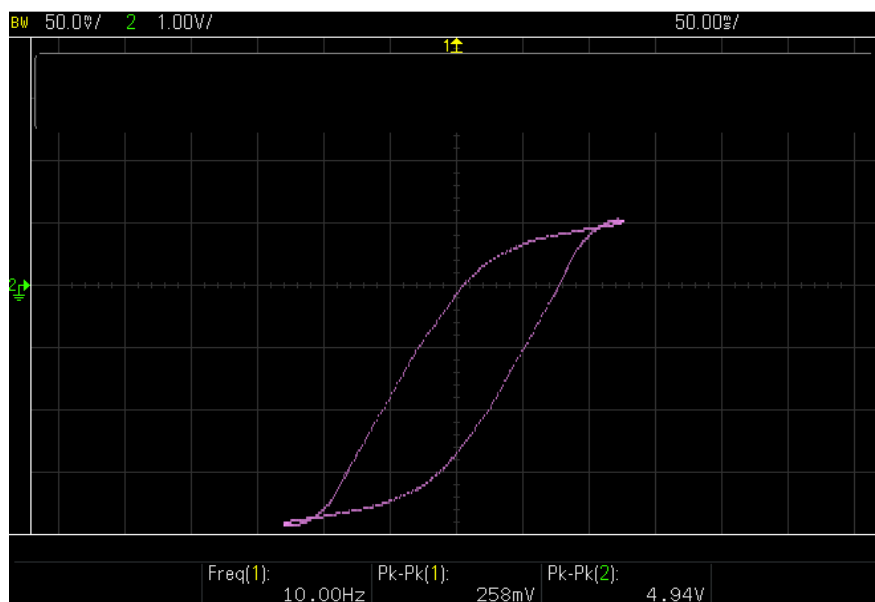
Σχήμα 37: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 1 δεξιά με $f=10\text{Hz}$.



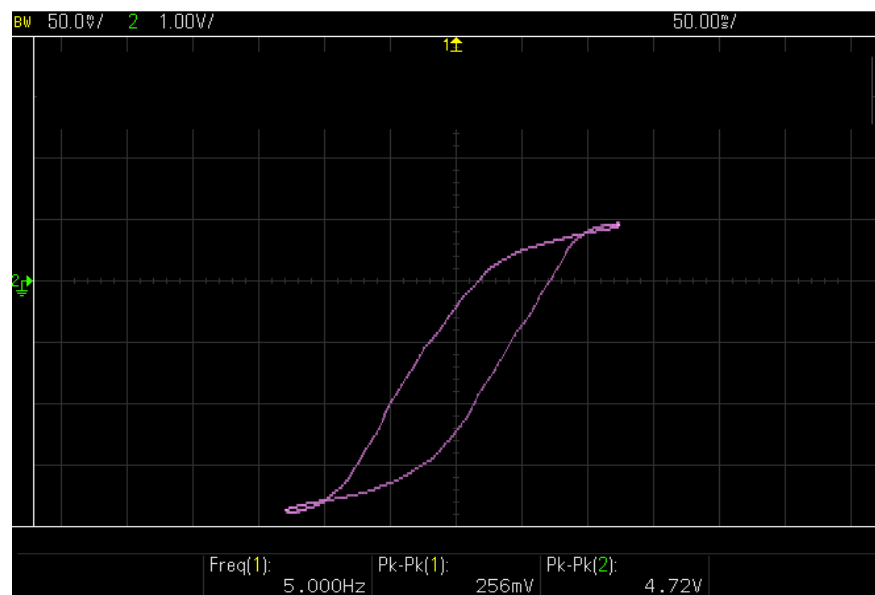
Σχήμα 38: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 αριστερά με $f=5\text{Hz}$.



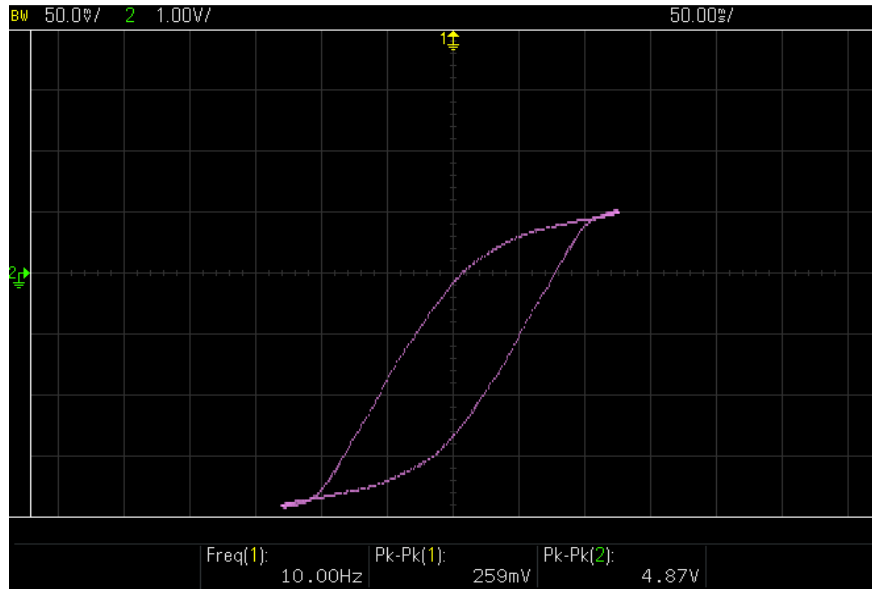
Σχήμα 39: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 κέντρο με $f=5\text{Hz}$.



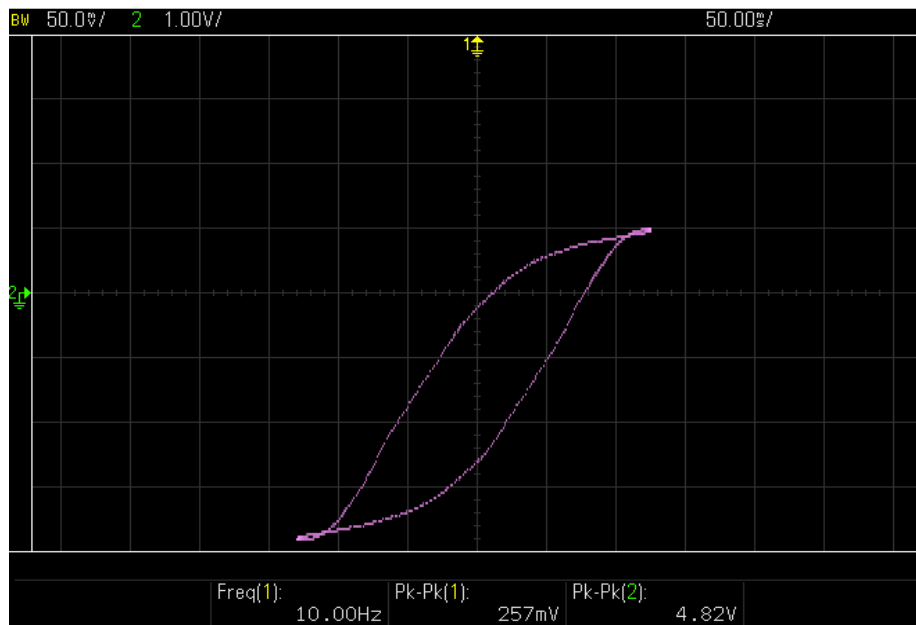
Σχήμα 40: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 δεξιά με $f=5\text{Hz}$.



Σχήμα 41: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 αριστερά με $f=10\text{Hz}$.

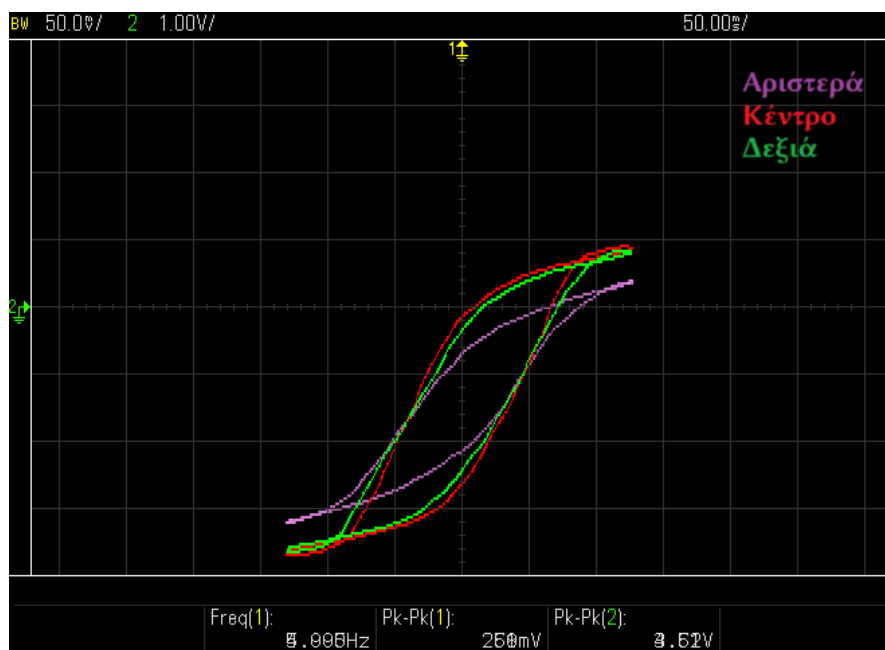


Σχήμα 42: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 κέντρο με $f=10\text{Hz}$.

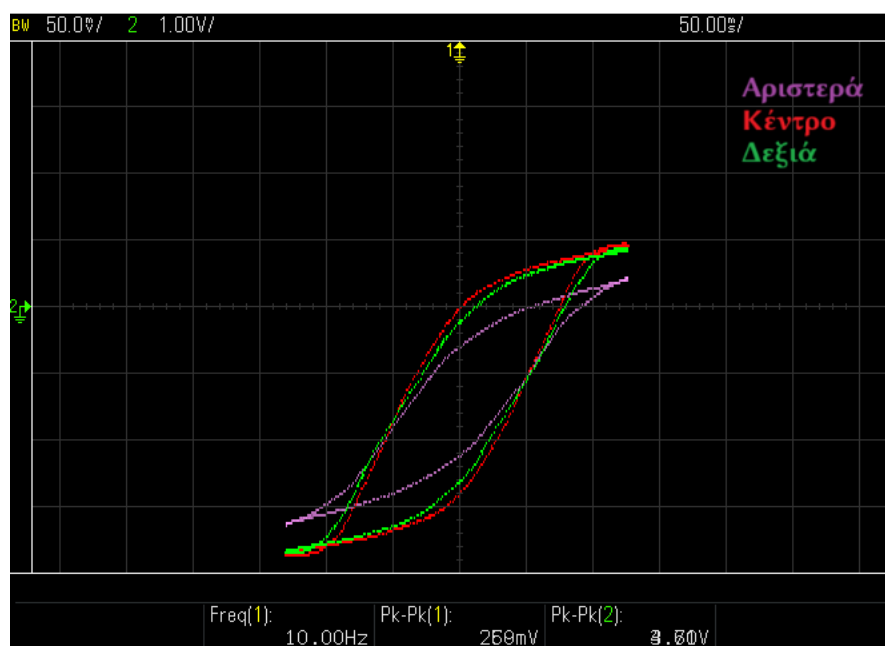


Σχήμα 43: Βρόχος υστέρησης για το δοκίμιο 2 δεξιά με $f=10\text{Hz}$.

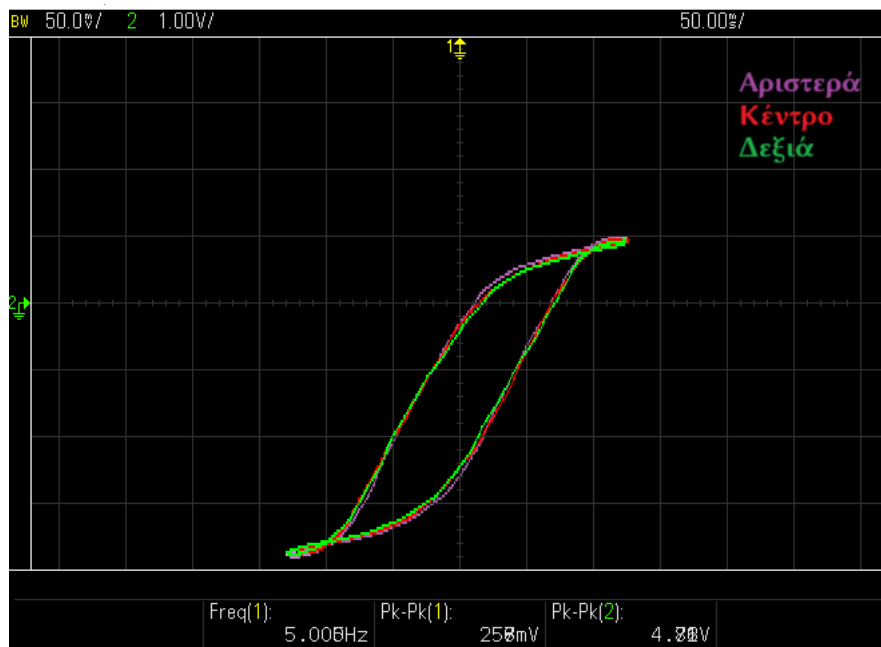
Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό επεξεργασίας εικόνων έτσι ώστε για κάθε δοκίμιο και συχνότητα διέγερσης να προβληθούν όλοι οι βρόχοι υστέρησης στην ίδια εικόνα. Με αυτόν τον τρόπο είναι πιο εμφανή τα συμπεράσματα.



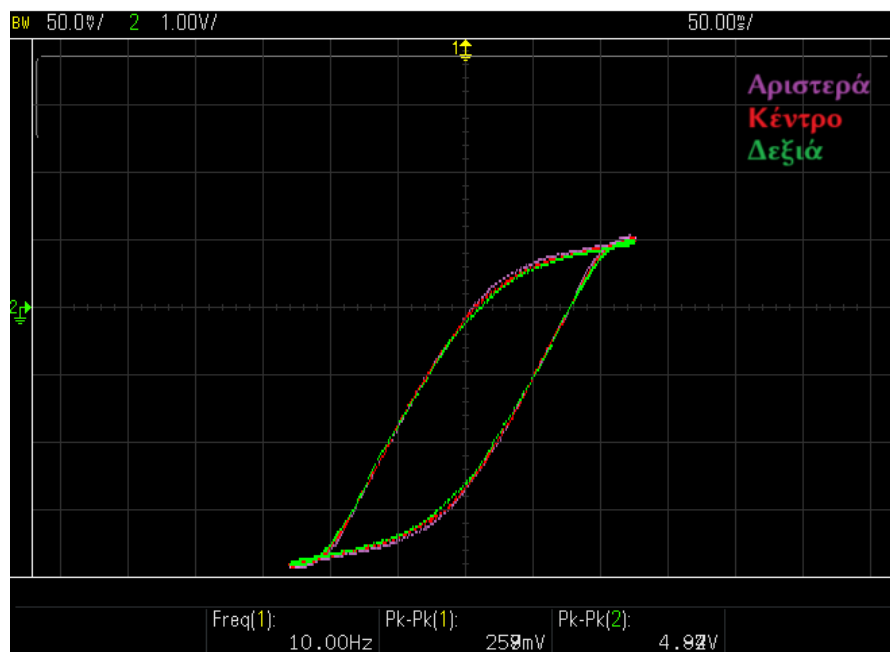
Σχήμα 44: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 1 με $f=5\text{Hz}$.



Σχήμα 45: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 1 με $f=10\text{Hz}$.



Σχήμα 46: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 2 με $f=5\text{Hz}$.



Σχήμα 47: Συγκεντρωτική απεικόνιση για το δοκίμιο 2 με $f=10\text{Hz}$.

Παρατηρείται ότι, για το δοκίμιο 1 και στις δύο συχνότητες στο κέντρο και αριστερά του δείγματος η απεικόνιση είναι όμοια ενώ στα αριστερά του δείγματος διαφέρει αρκετά. Οποιαδήποτε μεταβολή της απεικόνισης του βρόχου υστέρησης οφείλεται στην αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας στο συγκεκριμένο σημείο του

χάλυβα. Για το δοκίμιο 2, και στα τρία σημεία που ελήφθη η τιμή ο βρόχος υστέρησης είναι αρκετά όμοιος. Τέλος, συγκρίνοντας τις δύο συχνότητες, παρατηρείται ότι οι απεικονίσεις στον παλμογράφο είναι αρκετά όμοιες μεταξύ τους για όλα τα σημεία και των δύο δοκιμίων. Περαιτέρω ανάλυση όλων των αποτελεσμάτων γίνεται στο κεφάλαιο 6.

6

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ -
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πρώτο βήμα της παρούσας εργασίας, αλλάζοντας τα πηνία λήψης στην διάταξη, εξετάστηκαν αρκετοί συνδυασμοί του αισθητήρα. Τόσο το πάχος της διατομής του χαλκού, όσο και ο αριθμός των σπειρών του κάθε πηνίου έπαιξε σημαντικό ρόλο στην απόκριση του αισθητήρα. Βέβαια, πάντα σε μία πειραματική διαδικασία, πρέπει να ληφθούν κάποιοι συμβιβασμοί ότι οι εξωτερικοί παράγοντες που επηρεάζουν το πείραμα είναι αμελητέοι. Ένα πηνίο λήψης με υψηλό αριθμό σπειρών και μικρή διατομή χαλκού έδειξε μεγαλύτερη ευαισθησία και ακρίβεια συγκριτικά με κάποιο άλλο πηνίο. Συγκρίνοντας τα πηνία 4 & 7, το πλάτος της βάσης δεν έπαιξε κάποιο ιδιαίτερο ρόλο στην απόκριση των πηνίων. Για το πηνίο 8 το οποίο ήταν ένας συνδυασμός πηνίου διέγερσης και λήψης στην ίδια βάση, βλέποντας την απόκριση του σχετικά με το πηνίο 6 (που έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά) δεν παρατηρήθηκε αισθητή διαφορά στην έξοδό τους. Συνεπαίρνεται, λοιπόν, μεταξύ άλλων, ότι το βασικό χαρακτηριστικό ενός πηνίου λήψης προκειμένου να έχει πιο ακριβή απόκριση είναι ο αριθμός των σπειρών του.

Κατά την κατασκευή του ολοκληρωτή ήταν υποχρεωτική η προσομοίωση του στο πρόγραμμα psrisc, έτσι ώστε να επιλεγθούν κατάλληλα οι τιμές των στοιχείων του. Η απαίτηση ο συγκεκριμένος ολοκληρωτής να δουλεύει σε πολύ χαμηλές συχνότητες μας οδήγησε να χρησιμοποιηθούν πολύ μεγάλες αντιστάσεις της τάξης των ΜΩ. Επίσης, ένας πυκνωτής μικρής χωρητικότητας (της τάξης των nF) ήταν αναγκαίος. Αυτές οι πληροφορίες αντλήθηκαν ύστερα από μελέτη στον προσομοιωτή πριν γίνει η κατασκευή του στο εργαστήριο.

Μεταξύ της γεννήτριας και του πηνίου διέγερσης παρεμβάλλεται ενισχυτής ρεύματος για τους λόγους που έχουν αναφερθεί. Επομένως για την απεικόνιση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στον παλμογράφο, χρησιμοποιήθηκε **αντίσταση ισχύος** για να αντέξει τις μεγάλες ποσότητες ρεύματος που την διαρρέουν.

Για την καταγραφή και απεικόνιση του βρόχου υστέρησης που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5, στο δοκίμιο 1 παρατηρήθηκε μια εμφανής μεταβολή του βρόχου του συγκεκριμένα στο αριστερό σημείο της μέτρησης. Το σημείο αυτό επιλέχθηκε ειδικά επειδή είχε εμφανείς τοπικές ατέλειες στο εξωτερικό του. Γι αυτό, λοιπόν, και η απεικόνιση στον παλμογράφο είχε την μεγαλύτερη απόκλιση από τα άλλα δύο σημεία. Το δοκίμιο 2 έχει σχεδόν πανομοιότυπη καμπύλη και στα τρία σημεία που ελήφθη ο βρόχος υστέρησης του. Άλλωστε, αυτό το δοκίμιο του χάλυβα δεν είχε την ίδια εμφανή αλλοίωση σε σχέση με το δοκίμιο 1, οπότε δεν αναμένονταν να έχει τεράστια μεταβολή στην τιμή της μαγνητικής του διαπερατότητας κατά μήκος όλων των σημείων. Αξιολογώντας τα δύο αυτά δείγματα θα έλεγε κάποιος ότι το δείγμα 2 είναι πιο “υγιές” σε σχέση με το δείγμα 1. Βέβαια για ένα πιο αξιόπιστο συμπέρασμα θα έπρεπε να ληφθούν περισσότερες μετρήσεις σε περισσότερα σημεία για κάθε δοκίμιο. Βέβαια, αυτό δεν ήταν ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να ήταν μία **περαιτέρω μελέτη** και επέκταση της εργασίας.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μία τέτοια διάταξη ελέγχου έχει το **πλεονέκτημα** ότι δεν χρειάζεται η άμεση παρεμβολή στο δείγμα, παρά μόνο η τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω του. Η αλλαγή από το δοκίμιο 1 στο δοκίμιο 2 ήταν στιγμιαία. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, όλη η διάταξη του αισθητήρα περιορίστηκε μόνο στην κατασκευή του. **Περαιτέρω μελέτη** θα ήταν το “πακετάρισμα” του σε έναν πλήρως λειτουργικό αισθητήρα έτοιμο προς χρήση με το ηλεκτρικό κύκλωμα τυπωμένο σε πλακέτα και τα πηνία ενσωματωμένα πάνω στον πυρήνα.

7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τσαλαμέγκας Ι. and Ρουμελιώτης Ι., *ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα*, vol. Τόμος Α'.
- [2] Τσαλαμέγκας Ι. and Ρουμελιώτης Ι., *ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα*, vol. ΤΟΜΟΣ Β'.
- [3] E. M. Purcell and D. J. Morin, *Electricity and Magnetism*, Third edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. doi: 10.1017/CBO9781139012973.
- [4] E. R. Dobbs, *Basic Electromagnetism*. in Physics and Its Applications Ser. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [5] “ΠΗΝΙΟ ΚΑΙ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ,” ΠΗΝΙΟ ΚΑΙ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ ~ Ηλεκτρονικά. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://e-lektronikos.blogspot.com/2013/04/pinio-kai-autepagogi.html>
- [6] “Magnetic Circuit Properties: Understanding Reluctance - Technical Articles.” Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://eepower.com/technical-articles/magnetic-circuit-properties-understanding-reluctance/>
- [7] Κ. Ν. Καλοβρέκτης Κ., *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ, 3η Έκδοση*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2018.
- [8] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*, Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [9] F. Fiorillo, *Measurement and characterization of magnetic materials*. in Elsevier series in electromagnetism. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.
- [10] S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, 1st edition. CRC Press, 2016.

- [11] “Figure (1): A typical hysteresis loop,” ResearchGate. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-A-typical-hysteresis-loop_fig1_240180231
- [12] “What Are Ferromagnetic Materials? -,” <https://jdamagnet.com/>. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://jdamagnet.com/ferromagnetic-materials/>
- [13] J. Fraden, *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*, 4th ed. New York: Springer, 2010.
- [14] E. Ramsden, *Hall-Effect Sensors: Theory and Application*, 2nd ed. Burlington: Elsevier Science, 2011.
- [15] “hall effect – PhysicsOpenLab.” Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://physicsopenlab.org/tag/hall-effect/>
- [16] C. L. Chien and C. R. Westgate, Eds., *The Hall Effect and Its Applications*. Boston, MA: Springer US, 1980. doi: 10.1007/978-1-4757-1367-1.
- [17] S. C. Mukhopadhyay and R. Y. M. Huang, Eds., *Sensors: Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and Practical Applications*, vol. 21. in Lecture Notes Electrical Engineering, vol. 21. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-69033-7.
- [18] E. Hristoforou, “Magnetostrictive delay lines and their applications,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 59, no. 1–3, pp. 183–191, Apr. 1997, doi: 10.1016/S0924-4247(97)80171-9.
- [19] E. Hristoforou and A. Ktena, “Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 316, no. 2, pp. 372–378, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.025.
- [20] “Schematic diagram of magnetostrictive sensors for steel wires,” ResearchGate. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-magnetostrictive-sensors-for-steel-wires_fig1_331108518
- [21] P. Ripka, “New directions in fluxgate sensors,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 215–216, pp. 735–739, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0304-8853(00)00273-0.

- [22] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, "Magnetoresistive sensors," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 19, no. 16, p. 165221, Apr. 2007, doi: 10.1088/0953-8984/19/16/165221.
- [23] A. I. Braginski and J. Clarke, Eds., *The SQUID handbook: Vol. 1: Fundamentals and technology of SQUIDs and SQUID systems*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. doi: 10.1002/3527603646.
- [24] D. . Drung *et al.*, "Highly Sensitive and Easy-to-Use SQUID Sensors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 699–704, Jun. 2007, doi: 10.1109/TASC.2007.897403.
- [25] "SQUID Magnetometer and Josephson Junctions | Spirit science, Magnetic field, Physics," Pinterest. Accessed: Nov. 05, 2024. [Online]. Available: <https://nl.pinterest.com/pin/squid-magnetometer-and-josephson-junctions--376332112625440773/>
- [26] J. Blitz, *Electrical and magnetic methods of non-destructive testing*, 2. ed. in Non-destructive evaluation series. London: Chapman & Hall, 1997.
- [27] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, and Prof. A. Soni, "Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 3690–3698, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.
- [28] R. Hanke, T. Fuchs, and N. Uhlmann, "X-ray based methods for non-destructive testing and material characterization," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 591, no. 1, pp. 14–18, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.nima.2008.03.016.
- [29] B. Hu, R. Yu, and H. Zou, "Magnetic non-destructive testing method for thin-plate aluminum alloys," *NDT & E International*, vol. 47, pp. 66–69, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.12.007.
- [30] C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, and G. Dobmann, *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures*. in Woodhead publishing in materials. Boca Raton: CRC press, 2010.
- [31] J. B. Hull and V. John, *Non-Destructive Testing*, 1st ed. 1988. London: Macmillan Education UK, 1988. doi: 10.1007/978-1-349-85982-5.

- [32] J. Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing*, vol. 3. in Non-Destructive Evaluation Series, vol. 3. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. doi: 10.1007/978-94-011-5818-3.
- [33] S. Huang and S. Wang, *New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing*. in Springer Series in Measurement Science and Technology. Singapore: Springer Singapore, 2016. doi: 10.1007/978-981-10-0578-7.
- [34] G. Birnbaum and G. Free, *Eddy-Current Characterization of Materials and Structures*. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1981. doi: 10.1520/STP722-EB.
- [35] O. Kypris, I. C. Nlebedim, and D. C. Jiles, “Measuring stress variation with depth using Barkhausen signals,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 407, pp. 377–395, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jmmm.2016.01.072.
- [36] S. White, T. Krause, and L. Clapham, “Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 11, pp. 3501–3510, Nov. 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/11/034.
- [37] G. Bertotti, *Hysteresis in magnetism: for physicists, materials scientists, and engineers*. in Electromagnetism. San Diego: Academic Press, 1998.
- [38] Μάργαρης Ν., *ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
- [39] “TL081 data sheet, product information and support | TI.com.” Accessed: Oct. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/TL081>

