



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Κατασκευή πηνίων διάταξης Single Sheet Tester και μετρήσεις δειγμάτων χάλυβα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ελευθερίου Κληρονόμος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Κατασκευή πηνίων διάταξης Single Sheet Tester και μετρήσεις
δειγμάτων χάλυβα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Κληρονόμος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Ιανουαρίου 2025

Ευάγγελος
Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης
Παπανάνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος
Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Ελευθερίου Κληρονόμος

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

Copyright © Ιωάννης Ελευθερίου Κληρονόμος, 2025.

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.

Περίληψη

Το θέμα της παρακάτω εργασίας βασίζεται στη χρήση της διάταξης Single Sheet Tester (SST) στον τομέα του Steel Health Monitoring. Συγκεκριμένα, είναι ανάγκη να υπάρχει εύκολος, γρήγορος και φθηνός, αλλά ταυτόχρονα αξιόπιστος και τυποποιημένος τρόπος ελέγχου δειγμάτων χάλυβα που προορίζονται για κατασκευές, όπως κτήρια, αεροπλάνα, υποδομές και άλλα. Για αυτόν τον σκοπό υπάρχουν καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές που γίνονται αναγκαστικά σε δείγματα χάλυβα από διαπιστευμένα εργαστήρια πριν από τη χρήση τους.

Μία από τις μη καταστροφικές μεθόδους ελέγχου της “υγείας” του χάλυβα είναι η χρήση μαγνητικών αισθητήρων για τη μελέτη του βρόχου υστέρησης και της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, άρα και της δομικής του κατάστασης. Σε επιστημονικές μελέτες έχει διαπιστωθεί η συσχέτιση των οι μαγνητικών ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών με τα σημεία όπου υπάρχουν ατέλειες στη μικροδομή του υλικού ή έχουν αναπτυχθεί μηχανικές τάσεις. Στις σύγχρονες εργαστηριακές μονάδες χρησιμοποιούνται αισθητήρες Hall, Fluxgate και τελευταία Single Sheet Testers.

Αντικείμενο ενασχόλησης στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής θα αποτελέσει η διάταξη SST. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από ένα πηνίο λήψης, ένα πηνίο διέγερσης (τυλιγμένο εξωτερικά από αυτό) και δύο yokes εκατέρωθεν του δείγματος και των πηνίων. Το υπό μέτρηση δείγμα εισέρχεται στο εσωτερικό αυτών των πηνίων και εφαρμόζοντας στο πηνίο διέγερσης ημιτονοειδή τάση ελεγχόμενης συχνότητας και πλάτους και στην έξοδο του συστήματος λαμβάνεται το σήμα εξόδου μέσω του πηνίου λήψης. Το σήμα αυτό μας παρέχει αρκετές πληροφορίες σχετικά με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του μετρούμενου δείγματος.

Στόχος της εργασίας είναι η κατασκευή και η συγκριτική μελέτη διαφόρων γεωμετριών και συνδυασμών πηνίων διέγερσης και λήψης για τη δημιουργία μιας ευαίσθητης διάταξης SST και η λήψη μετρήσεων σε δείγματα χάλυβα.

Λέξεις - Κλειδιά

Μαγνητικές μετρήσεις, Single Sheet Tester, επιτήρηση υγείας χάλυβα, μαγνητικά υλικά, πηνία, ηλεκτρονική, αισθητήρες.

Abstract

The topic of the following paper is based on the use of the Single Sheet Tester (SST) sensing array in the field of Steel Health Monitoring. In particular, it is deemed necessary to have an easy, fast and cheap, yet reliable and standardized way of testing steel samples intended for construction such as buildings, airplanes, infrastructure and others. To this end, there are destructive and non-destructive tests that are necessarily carried out on steel samples by accredited laboratories prior to their use.

One of the non-destructive ways of testing steel “health” is the use of magnetic sensors for the study of hysteresis loop and magnetic permeability of the material and, so, its structural composition. In scientific studies, there has been noted a correlation between the magnetic properties of ferromagnetic materials and points that exhibit flaws in their microstructure or high mechanical stresses. In modern laboratory units, Hall, Fluxgate sensors and, more recently, Single Sheet Testers are used.

Regarding this particular paper, the subject of the study will be the SST array. This array consists of a pickup coil, an excitation coil, wrapped over the former and two yokes on either side of the sample and coils. The sample under study is placed in the interior of these coils and, by applying a sinusoidal voltage of controlled frequency and amplitude to the excitation coil, the output signal can be obtained at the system’s output, from the pickup coil. This signal provides a wide range of information regarding the magnetic characteristics of the aforementioned sample.

The aim of this work is the construction and experimental comparison of various geometries and combinations of pickup and excitation coils, in order to create a sensitive SST array and obtain measurements from steel samples.

Keywords

Magnetic measurements, Single Sheet Tester, Steel Health Monitoring, magnetic materials, coils, electronics, sensors.

Πρόλογος

Αρχικά, στην εργασία, θα γίνει μία θεωρητική ανάλυση του πεδίου έρευνας. Ξεκινώντας από τις βασικές αρχές λειτουργίας των μαγνητικών κυκλωμάτων και φυσικών νόμων που εφαρμόζονται, καθώς και ορισμένων ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών και κυκλωμάτων, γίνεται, στη συνέχεια, μία βιβλιογραφική μελέτη του ευρύ πεδίου του Steel Health Monitoring, πάνω στο οποίο αναπτύσσονται και εφαρμόζονται αυτές οι τεχνολογίες. Ύστερα, γίνεται μία σύντομη αναφορά στις υπάρχουσες διατάξεις μέτρησης στο πεδίο του Steel Health Monitoring και μία ειδική αναφορά στη διάταξη του Single Sheet Tester, η οποία αποτελεί κεντρικό σημείο της εργασίας. Με βάση αυτά, αναφέρονται τα υπάρχοντα προβλήματα και οι όποιες αστοχίες παρουσιάζονται στις διατάξεις αυτές, καθώς και ορισμένοι προτεινόμενοι τρόποι για την αντιμετώπισή τους.

Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση του πειραματικού μέρους της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνοντας την κατασκευή διαφόρων τοπολογιών πηνίων διέγερσης και λήψης, τη λήψη μετρήσεων, τη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων καθώς και τη δημιουργία κατάλληλου ηλεκτρονικού κυκλώματος για την εξαγωγή του βρόχου υστέρησης του δείγματος από το σήμα εξόδου του πηνίου λήψης. Περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία μέτρησης του δοκιμίου με τη διάταξη αυτή επιβάλλοντας διαφορετικές τιμές τάσης και συχνότητας διέγερσης και οι μετρούμενες τιμές παρατίθενται σε πίνακες. Με βάση αυτές τις τιμές και μετρήσεις σχεδιάζονται τα απαραίτητα για την ανάλυση γραφήματα και γίνεται ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων, ως προς την ακρίβεια, την ορθότητα και την συμφωνία τους με τους θεωρητικούς υπολογισμούς και τις υποθέσεις με βάση την θεωρητική ανάλυση.

Τέλος, γίνεται μία σύντομη αναφορά στο πεδίο εφαρμογών της εργασίας και του κατασκευασμένου αισθητήρα, καθώς και σε διάφορα παραδείγματα χρήσης του στις εφαρμογές αυτές. Υπάρχει, ακόμη, μία απλή απαρίθμηση μερικών προβλημάτων και αστοχιών στο συγκεκριμένο έργο, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση και έρευνα, με στόχο τη διόρθωση των ατελειών ή τη βελτίωση της μελετούμενης διάταξης και προσαρμογής της σε μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Πίνακας Περιεχομένων

1 Θεωρητικό Μέρος	1
1.1 Αρχές Λειτουργίας Μαγνητικών Αισθητήρων	1
1.1.1 Βασικές Αρχές μαγνητισμού	1
1.1.2 Μαγνητικά Υλικά	4
1.1.3 Βρόχος Υστέρησης	7
1.1.4 Ανισοτροπία	13
1.2 Επιτήρηση “Υγείας” Φερρομαγνητικών Υλικών	16
1.2.1 Μη καταστροφικές τεχνικές	17
1.2.2 Καταστροφικές τεχνικές	21
1.2.3 Πρότυπα	25
1.3 Υπάρχουσες Διατάξεις Μαγνητικής Μέτρησης Υλικών	27
1.3.1 Εισαγωγή στον Single Sheet Tester	27
1.3.2 Μετρητικές Μέθοδοι και διατάξεις	30
1.3.3 Εφαρμογές της διάταξης SST	36
1.3.4 Προβλήματα και Αστοχίες των Υπάρχουσων Διατάξεων	38
1.4 Προτάσεις Βελτίωσης Διατάξεων	44
1.4.1 Απώλειες Σιδήρου	44
1.4.2 Κατασκευή και Μορφή των ηλεκτρομαγνητικών yokes	46
2 Πειραματικό Μέρος	49
2.1 Κατασκευή των πηνίων	49
2.2 Κύκλωμα Ενεργού Ολοκληρωτή	53
2.3 Μετρήσεις	58
3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	77
3.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	77
3.2 Μελλοντική Έρευνα	92
4 Βιβλιογραφία	95

Ευρετήριο Σχημάτων

Εικόνα 1 : Σωληνοειδές πηνίο με επισημασμένη τη ροή ρεύματος και το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, καθώς και τις αντίστοιχες διευθύνσεις [1].	3
Εικόνα 2 : Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας 2 ατόμων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης [3].	6
Εικόνα 3 : Σύγκριση βρόχων υστέρησης μεταξύ μαλακού (a) και σκληρού (b) μαγνητικού υλικού [5].	8
Εικόνα 4 : Τυπική μορφή βρόχου υστέρησης με σημειωμένα τα κρίσιμα σημεία προς μελέτη που περιγράφουν τις ιδιότητες του μαγνητικού υλικού [5].	9
Εικόνα 5 : Διάγραμμα μαγνήτισης ενός υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας του με σημειωμένη τη θερμοκρασία Curie [4].	11
Εικόνα 6 : Απλό διάγραμμα της μαγνητικής διαπερατότητας (μ) και της μαγνήτισης (B) ενός σιδηρομαγνητικού υλικού σε συνάρτηση με το εξωτερικό πεδίο (H) [5].	12
Εικόνα 7 : Παράδειγμα 3 βασικών υλικών με μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, καθώς και οι αντίστοιχες καμπύλες μαγνήτισης για την εύκολη και δύσκολη διεύθυνση [7].	15
Εικόνα 8 : Μαγνήτιση ενός υλικού στον εύκολο άξονα, στον δύσκολο άξονα και ενδιάμεσα, καθώς και το αποτέλεσμα της ανισοτροπίας στην ολική μαγνήτιση του υλικού [7].	15
Εικόνα 9 : α) Διάταξη X-ray diffraction και β) Διάγραμμα απόκρισης CPS - γωνία διάθλασης [16].	18
Εικόνα 10 : Διάταξη μέτρησης δινορευμάτων [18].	21
Εικόνα 11 : Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα strain gauge [19].	22
Εικόνα 12 : Αρχή λειτουργίας της μεθόδου drill hole testing [21].	24
Εικόνα 13 : Παράδειγμα διάταξης SST [23].	28
Εικόνα 14 : Διάταξη SST με την προσθήκη των 2 yokes [24].	29
Εικόνα 15 : Πλήρης διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο H-Coil [25].	31
Εικόνα 16 : Μία απλή διάταξη μέτρησης με χρήση του CRP [26].	34
Εικόνα 17 : Διαφορετικές αποκρίσεις έντασης μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό του δείγματος και την απόκλιση από τον εύκολο άξονα σε non oriented χάλυβα α) και grain oriented χάλυβα β) [33].	41
Εικόνα 18 : Κυματομορφές των μαγνητικών αποκρίσεων της τάσης στα πηνία B και H, καθώς και η μεταξύ τους διαφορά φάσης [36].	42
Εικόνα 19 : Σχετικό σφάλμα με yoke τύπου D των διατάξεων τύπου Ss και So. Οι μετρήσεις έγιναν σε βιομηχανική συχνότητα 50Hz [39].	47
Εικόνα 20 : Πυκνότητα ρεύματος δινορευμάτων ανά μονάδα επιφάνειας στον άξονα χ, προς το μήκος της διάταξης μέτρησης σε γράφημα [39].	47
Εικόνα 21: Κατανομή των δινορευμάτων σε διανύσματα στην επιφάνεια του δείγματος και των ηλεκτρομαγνητικών yokes για τις διατάξεις τύπου D και S [39].	48
Εικόνα 22 : Διαδικασία τυλίγματος των πηνίων.	51

Εικόνα 23 : Η διάταξη του SST της παρούσας εργασίας.	52
Εικόνα 24 : Βασική διάταξη ενός αναστρέφοντος ολοκληρωτή [40].	54
Εικόνα 25 : Απόκριση συχνότητας του ολοκληρωτή [40].	55
Εικόνα 26 : Σχεδιάγραμμα του κυκλώματος του ολοκληρωτή που χρησιμοποιήθηκε. 56	
Εικόνα 27 : Η κατασκευή του κυκλώματος του ολοκληρωτή, υλοποιημένη σε breadboard.	57
Εικόνα 28 : Η διάταξη του SST στο εργαστήριο.	57
Εικόνα 29 : Διάγραμμα τάσης εξόδου του αισθητήρα σε συνάρτηση με τη συχνότητα διέγερσης για σταθερή τάση διέγερσης και ίση με 0,2V.	78
Εικόνα 30 : Διάγραμμα τάσης απόκρισης του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 1Hz.	78
Εικόνα 31 : Διάγραμμα τάσης απόκρισης του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 0,5Hz.	79
Εικόνα 32 : Διάγραμμα τάσης απόκρισης του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 0,1Hz.	79
Εικόνα 33 : Διάγραμμα απόκρισης τάσης των τοπολογιών 2 και 5 του αισθητήρα σε συνάρτηση με τη συχνότητα διέγερσης για σταθερή τάση διέγερσης ίση με 0,2V	81
Εικόνα 34 : Διάγραμμα απόκρισης τάσης των τοπολογιών 2 και 5 του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης για σταθερή συχνότητα διέγερσης ίση με 1Hz	81
Εικόνα 35 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 1Hz και τάση διέγερσης 70mV.	82
Εικόνα 36 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 0,2Hz και τάση διέγερσης 200mV.	83
Εικόνα 37 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 2Hz και τάση διέγερσης 200mV.	84
Εικόνα 38 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 1Hz και τάση διέγερσης 300mV.	84
Εικόνα 39 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 6η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 5Hz και τάση διέγερσης 200mV.	86
Εικόνα 40 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 6η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 0,1Hz και τάση διέγερσης 200mV.	87
Εικόνα 41: Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 1η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 1Hz και τάση διέγερσης 350mV.	88
Εικόνα 42 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 1η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 0,1Hz και τάση διέγερσης 300mV.	89
Εικόνα 43 : Φωτογραφία της μέτρησης του βρόχου υστέρησης με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως.	90

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1	59
Πίνακας 2.2	60
Πίνακας 2.3	61
Πίνακας 2.4	62
Πίνακας 2.5	63
Πίνακας 2.6	64
Πίνακας 2.7	65
Πίνακας 2.8	66
Πίνακας 2.9	67
Πίνακας 2.10	68
Πίνακας 2.11	69
Πίνακας 2.12	70
Πίνακας 2.13	71
Πίνακας 2.14	72
Πίνακας 2.15	73
Πίνακας 2.16	74
Πίνακας 2.17	75
Πίνακας 2.18	76

1 Θεωρητικό Μέρος

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση των διατάξεων Single Sheet Tester (SST), καθώς και ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας τέτοιας διάταξης για την επιτήρηση της «υγείας» δειγμάτων χάλυβα. Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μία εισαγωγή στις αρχές που διέπουν τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και θα γίνει αναφορά στις υπάρχουσες τεχνολογίες στον τομέα της επιτήρησης της “υγείας” φερρομαγνητικών υλικών. Ακολουθώντας, θα παρουσιαστεί η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής της διάταξης SST για το χαρακτηρισμό δοκιμίων χάλυβα. Παράλληλα, θα γίνουν δοκιμές διαφορετικών τοπολογιών πηνίων λήψεων και διέγερσης για τη συγκεκριμένη διάταξη μέτρησης και θα γίνει παράθεση των αντίστοιχων μετρήσεων σε διάφορα δείγματα χάλυβα. Τέλος, θα γίνει συγκριτική μελέτη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών, ενώ θα προταθούν και μελλοντικές επεκτάσεις για την κατασκευή μιας τέτοιας διάταξης.

1.1 Αρχές Λειτουργίας Μαγνητικών Αισθητήρων

1.1.1 Βασικές Αρχές μαγνητισμού

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη αναφορά στις βασικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και των εννοιών του μαγνητισμού και των μαγνητικών υλικών, πριν γίνει εμβάθυνση σε πιο πολύπλοκες έννοιες.

Η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού έχει μελετηθεί εκτενώς και αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη ενός μεγάλου εύρους τεχνολογιών, καθώς και την επιστημονική πρόοδο και κατανόηση φυσικών νόμων σε τομείς όπως ο μαγνητισμός, η κβαντομηχανική και ο ηλεκτρισμός. Εδώ θα γίνει συγκεκριμένη αναφορά σε μία σημαντική ιδιότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η οποία είναι η συσχέτιση μεταξύ ρεύματος που ρέει μέσα σε έναν αγωγό και μαγνητικού πεδίου γύρω από αυτόν. Αυτή η σχέση περιγράφεται από την τρίτη εξίσωση του Maxwell, ή αλλιώς την εξίσωση Maxwell - Faraday, η οποία παρουσιάζεται εδώ :

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt} \quad (1.1)$$

όπου E το ηλεκτρικό, B το μαγνητικό πεδίο, H το πεδίο μαγνήτισης και dB/dt η στιγμιαία μεταβολή του μαγνητικού πεδίου.

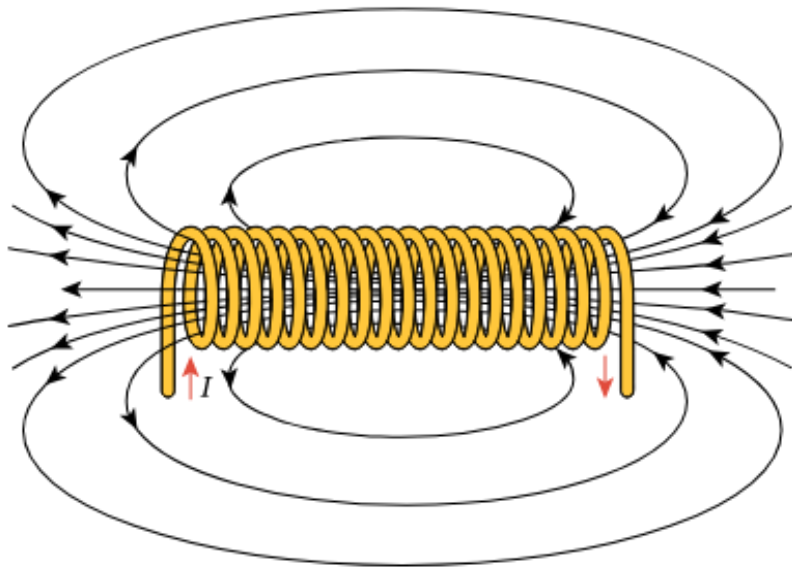
Η ερμηνεία αυτής της εξίσωσης είναι ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο πάντα συνοδεύει ένα χωρικά (και ίσως χρονικά) μεταβαλλόμενο, μη διατηρητικό ηλεκτρικό πεδίο και αντίστροφα. Το πρόσημο των πεδίων είναι αντίθετο, γεγονός που οφείλεται στον νόμο του Lenz, ο οποίος στηρίζει ότι το μαγνητικό πεδίο γύρω από έναν σωληνοειδή αγωγό, μέσα από τον οποίο διέρχεται ρεύμα, έχει προσανατολισμό βορρά-νότου κάθετο στη διεύθυνση αντίθετα από αυτή της ροής του ρεύματος. Αυτός ο νόμος είναι πολύ σημαντικός, καθώς αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας του πηνίου, το οποίο δεν είναι τίποτα άλλο από έναν σωληνοειδή αγωγό, τυλιγμένο σε σπείρες, έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τον νόμο Maxwell - Faraday να ακολουθεί μία κοινή διεύθυνση στο εσωτερικό του πηνίου. Κάθε σπείρα στο πηνίο παράγει ένα μικρό μαγνητικό πεδίο προς την ίδια κατεύθυνση, άρα, ο μεγαλύτερος αριθμός σπειρών δρα αθροιστικά στο ολικό πεδίο, οπότε επιβεβαιώνεται ο νόμος Faraday, σχετικά με τη μεγαλύτερη τάση ως αποτέλεσμα του μεγαλύτερου αριθμού σπειρών. Προφανώς, το φαινόμενο αυτό λειτουργεί και αντίστροφα, δηλαδή υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός πηνίου, παράγεται εξ' επαγωγής ένα ρεύμα στο εσωτερικό του πηνίου αυτού, με διεύθυνση που ορίζεται όπως αναφέρθηκε πριν.

Στην περίπτωση που το πεδίο είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, το ρεύμα που θα επάγεται στο πηνίο θα είναι και αυτό μεταβαλλόμενο με το χρόνο, οπότε η τιμή της παραγωγής του ρεύματος ως προς το χρόνο θα είναι μη μηδενική. Σύμφωνα με τη σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος σε ένα πηνίο :

$$V = L * \frac{di}{dt} \quad (1.2)$$

όπου V η τάση σε Volt, L η αυτεπαγωγή του πηνίου σε Henry και di/dt ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος στο πηνίο, η τάση στα άκρα του πηνίου θα είναι και αυτή μη μηδενική και, μάλιστα, εξαρτάται άμεσα από την ένταση και ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στο πηνίο. Η ένταση του ρεύματος εξαρτάται άμεσα από την ένταση του μαγνητικού πεδίου, σύμφωνα με τον νόμο Maxwell, και ο ρυθμός μεταβολής από τη συχνότητα του πεδίου διέγερσης. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του πεδίου και όσο μεγαλύτερη η έντασή του, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η απόκριση τάσης στα άκρα του πηνίου και αντίστροφα, όσο μεγαλύτερη η τιμή τάσης και συχνότητα διέγερσης στο πηνίο, τόσο μεγαλύτερη η ένταση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του [1], [2].

Solenoid magnetic field



Εικόνα 1 : Σωληνοειδές πηνίο με επισημασμένη τη ροή ρεύματος και το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο, καθώς και τις αντίστοιχες διευθύνσεις [1].

Ακόμη ένας βασικός νόμος του ηλεκτρομαγνητισμού είναι ο νόμος του Gauss, ο οποίος συσχετίζει το ηλεκτρικό φορτίο με το προκύπτον ηλεκτρικό πεδίο. Σύμφωνα με το νόμο του Gauss, για κάθε κλειστή, οριοθετημένη επιφάνεια, η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου είναι ανάλογη με το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που περικλείεται στην επιφάνεια αυτή, ανεξάρτητα με την κατανομή του φορτίου και ανεξάρτητα με το σχήμα ή τη συμμετρία της επιφάνειας προς μελέτη. Ο νόμος αυτός περιγράφεται και μαθηματικά ως αποτέλεσμα των εξισώσεων του Maxwell με τον ακόλουθο τύπο

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.3)$$

Όπου ο όρος $\nabla \cdot E$ ορίζει την απόκλιση του ηλεκτρικού πεδίου, ϵ_0 είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού και ρ είναι η συνολική πυκνότητα φορτίου ανά μονάδα όγκου.

Ένας τελευταίος βασικός νόμος του ηλεκτρομαγνητισμού που χρήζει αναφοράς είναι ο νόμος του Ampere, ο οποίος συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο σε έναν κλειστό βρόχο με το ρεύμα που διέρχεται από το βρόχο αυτό. Η βασική έννοια του νόμου αυτού θυμίζει αρκετά το νόμο του Gauss, απλά βρίσκει εφαρμογή στα μαγνητικά, αντί για τα ηλεκτρικά πεδία. Ο νόμος αυτός, έπειτα, διορθώθηκε από τον Maxwell, ο οποίος πρόσθεσε έναν επιπλέον όρο σχετικό με το ρεύμα μετατόπισης. Ο τελικός μαθηματικός τύπος είναι ο εξής :

$$\nabla \times H = J + \frac{dD}{dt} \quad (1.4)$$

Όπου H είναι το μαγνητικό πεδίο, J η πυκνότητα ροής ρεύματος που διέρχεται από τον κλειστό βρόχο και D η πυκνότητα ροής μετατόπισης σύμφωνα με τη σχέση

$$D = \varepsilon * E \quad (1.5)$$

Όπου ε είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού και E το ηλεκτρικό πεδίο [1].

1.1.2 Μαγνητικά Υλικά

Συνεχίζοντας, θα γίνει μία σύντομη ανάλυση της φυσικής έννοιας του μαγνητισμού και των μαγνητικών υλικών. Ο μαγνητισμός αποτελεί μία από τις δύο βασικές όψεις του ηλεκτρομαγνητισμού. Αφορά στις σχέσεις αλληλεπίδρασης και τα φυσικά χαρακτηριστικά ορισμένων υλικών, τα οποία επιτρέπουν την ανάπτυξη δυνάμεων έλξης και άπωσης. Συγκεκριμένα, τα μαγνητικά υλικά χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τα παραμαγνητικά, τα διαμαγνητικά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Ανεξάρτητα του τύπου, κάθε υλικό αποτελείται από άτομα, δηλαδή πυρήνες πρωτονίων και νετρονίων, γύρω από τα οποία περιστρέφονται ηλεκτρόνια. Ανάλογα με τον αριθμό ηλεκτρονίων, ο οποίος ορίζεται ώστε να εξισορροπείται το θετικό και αρνητικό φορτίο μεταξύ ηλεκτρονίων και πρωτονίων του πυρήνα, τα άτομα κατατάσσονται στον περιοδικό πίνακα και αντλούν τις εκάστοτε ιδιότητές τους. Τα ηλεκτρόνια γύρω από τον κάθε πυρήνα καταλαμβάνουν ορισμένα τροχιακά ελάχιστης ενέργειας, σύμφωνα με τη θεωρία της κβαντομηχανικής, η οποία ορίζει ζώνες, στις οποίες ένας ορισμένος αριθμός ηλεκτρονίων μπορούν να υπάρχουν ανά πάσα στιγμή. Αυτές οι ζώνες λέγονται και στιβάδες και, στην θεμελιώδη κατάσταση του ατόμου, τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν πρώτα τις στιβάδες κοντά στον πυρήνα και μετά τις επόμενες, πάλι λόγω της ελαχιστοποίησης της ενέργειάς τους. Τα ηλεκτρόνια κατατάσσονται σε ζεύγη αντίθετου spin μεταξύ τους, όπου το spin είναι $+\frac{1}{2}$ ή $-\frac{1}{2}$ και, με αυτόν τον τρόπο, τα ζεύγη ελαχιστοποιούν τη μεταξύ τους δυναμική ενέργεια.

Στις περιπτώσεις που η εξωτερική στιβάδα του ατόμου δεν είναι γεμάτη και υπάρχουν ηλεκτρόνια χωρίς ζεύγος, το συνολικό spin των ηλεκτρονίων του ατόμου είναι $+\frac{1}{2}$ ή $-\frac{1}{2}$ αντί για 0, άρα το άτομο περιέχει κάποιο ποσό δυναμικής ενέργειας. Αυτά τα άτομα αποτελούν το θεμέλιο των παραμαγνητικών υλικών. Τα ηλεκτρόνια χωρίς ζεύγος καλούνται σημειακά μαγνητικά δίπολα και έχουν την ιδιότητα να στρέφονται προς εξωτερικά μαγνητικά πεδία, δίνοντας έτσι στο υλικό μαγνητικές ιδιότητες, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Βασική ιδιότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι η εγγενής ευαισθησία τους σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Όμως, σημαντική λεπτομέρεια αυτής της ιδιότητας είναι πως αυτά τα υλικά δεν διατηρούν τις

μαγνητικές ιδιότητες όταν το εξωτερικό πεδίο αφαιρεθεί, αλλά τα δίπολα επαναπροσανατολίζονται και επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών αποτελούν το λίθιο και το μαγνήσιο.

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν στην εξωτερική στιβάδα του υλικού κάθε ηλεκτρόνιο έχει ένα ζεύγος, το συνολικό spin του υλικού είναι μηδενικό. Αυτά τα υλικά λέγονται διαμαγνητικά και έχουν την ιδιότητα να αντιστέκονται στην αλλαγή του πεδίου μαγνήτισης, λόγω του νόμου του Lenz. Κάπως έτσι λειτουργούν και τα πηνία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η κύρια ιδιότητα αυτών των υλικών είναι η ασθενής, αντίθετη αντίδραση που παρουσιάζουν σε εξωτερικά πεδία. Δηλαδή, απωθούνται από το επιβαλλόμενο πεδίο, αφού όλα τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας βρίσκονται σε ζεύγη, οπότε δεν αναπτύσσεται η απαραίτητη ροπή λόγω μαγνητικών διπόλων για να παρουσιαστούν οι μαγνητικές ιδιότητες των παραμαγνητικών υλικών. Ομοίως με πριν, οι ιδιότητες αυτών των υλικών δεν διατηρούνται μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών αποτελούν ο χαλκός, ο άργυρος και ο χρυσός, με πιο σημαντικό παράδειγμα τον χαλκό, από τον οποίο κατασκευάζονται καλώδια για χρήσεις σε πηνία.

Τα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά διαχωρίζονται μεταξύ τους με το μέτρο της μαγνητικής διαπερατότητας μ , όπου

$$\mu = \mu_0 * (1 + \chi) \quad (1.6)$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα, δηλαδή το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής ενός υλικού ως αποτέλεσμα ενός επιβαλλόμενου εξωτερικού πεδίου, και χ είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού, η οποία αφορά το μέτρο της εσωτερικής μαγνήτισης του υλικού προς το εξωτερικό πεδίο. Το μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και ίση με $4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$. Αν ο όρος $(1+\chi)$ είναι μεγαλύτερος του 1, πρόκειται για παραμαγνητικό υλικό, ενώ αν είναι μικρότερος του 1 πρόκειται για διαμαγνητικό αντίστοιχα.

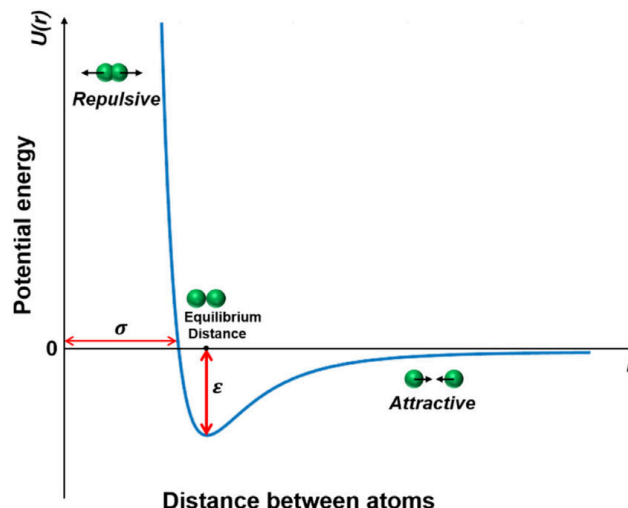
Σχετικά με τα μεγέθη της μαγνήτισης του υλικού, του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής, αυτά συνδέονται μεταξύ τους με την καταστατική σχέση του μαγνητισμού, δηλαδή

$$B = \mu_0 * (H + M) \quad (1.7)$$

όπου B είναι το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής, H το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, M η εσωτερική μαγνήτιση του υλικού και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Τα μεγέθη H και M έχουν μονάδες μέτρησης A/m (Ampere/meter), ενώ το B έχει μονάδες μέτρησης T (Tesla).

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντική η επεξήγηση των σιδηρομαγνητικών υλικών συγκεκριμένα, αφού αποτελούν το κύριο πεδίο μαγνητικών εφαρμογών, καθώς και των φυσικών φαινομένων που δίνουν στα υλικά αυτά τις μαγνητικές ιδιότητές τους. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν αυθόρμητη μαγνήτιση, χωρίς να είναι απαραίτητη η

παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ενώ παρουσιάζουν υψηλές τιμές μαγνητικής διαπερατότητας μ . Σε ένα υλικό, στην κρυσταλλική δομή του στην περίπτωση που αυτό είναι στερεό, τα άτομα βρίσκονται διατεταγμένα σε μία συγκεκριμένη απόσταση, γνωστή ως πλεγματική απόσταση. Όπως είναι γνωστό, το άτομο αποτελείται από έναν πυρήνα με θετικά φορτισμένα πρωτόνια και νετρόνια ουδετέρου φορτίου, άρα έναν θετικά φορτισμένο πυρήνα, και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε ορισμένα τροχιακά επίπεδα, καθώς έλκονται από το αντίθετο φορτίο του πυρήνα. Όταν 2 άτομα του υλικού αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, τα σωματίδια που τα αποτελούν δέχονται ελκτικές και απωστικές δυνάμεις Coulomb, οι οποίες είναι ανάλογες του φορτίου και αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ των σωματιδίων. Ο πυρήνας, καθώς περιέχει μεγαλύτερο μέγεθος και πιο πυκνή κατανομή πρωτονίων, έχει ισχυρότερο ηλεκτρικό πεδίο και, επομένως, δύναμη, από τα μικρότερου μεγέθους και θεμελιώδους φορτίου ηλεκτρόνια που τον περιβάλλουν. Όλες αυτές οι ασκούμενες δυνάμεις στα άτομα εκφράζονται με μία δυναμική ενέργεια του ατόμου, η οποία βρίσκεται σε συνάρτηση με την απόσταση του συγκεκριμένου ατόμου από κάποιο άλλο άτομο με το οποίο υπάρχει αλληλεπίδραση δυνάμεων Coulomb.



Εικόνα 2 : Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας 2 ατόμων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης [3].

Στο παραπάνω γράφημα διακρίνεται η περιοχή, στην οποία κυριαρχεί η απωστική δύναμη μεταξύ τους, η αντίστοιχη περιοχή για την ελκτική δύναμη και η πλεγματική απόσταση, δηλαδή η απόσταση ελάχιστης ενέργειας του συστήματος.

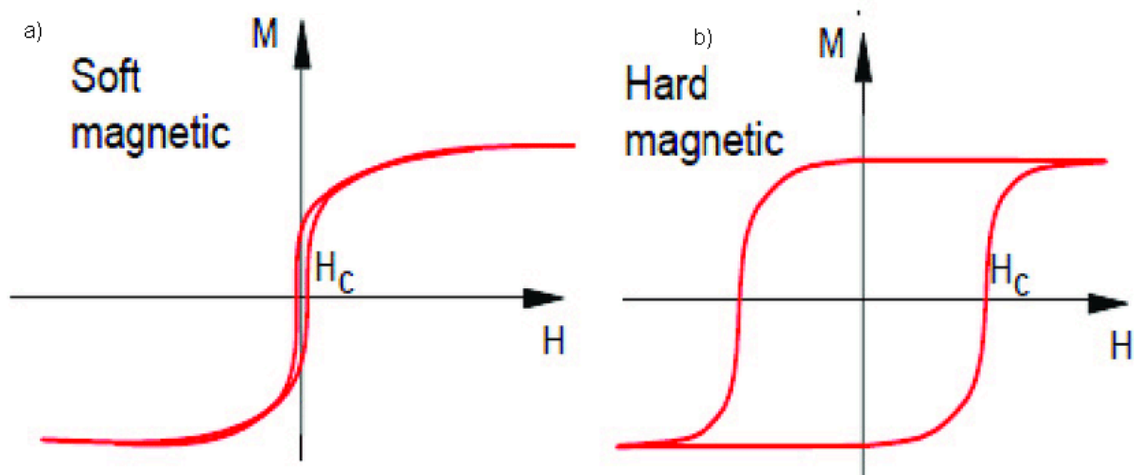
Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η πλεγματική απόσταση είναι η απόσταση στην οποία τα άτομα τείνουν να κατανεμηθούν στην κρυσταλλική δομή του υλικού, ώστε να ελαχιστοποιήσουν την δυναμική ενέργεια του μεταξύ τους συστήματος. Σε άτομα σιδηρομαγνητικών στοιχείων, αυτή η απόσταση είναι μικρότερη από την απόσταση του τροχιακού 3d, το οποίο, σε αυτά τα υλικά, περιέχει ένα ηλεκτρόνιο. Επομένως, λόγω της πλεγματικής απόστασης, στην τελική δομή,

δύο ηλεκτρόνια από γειτονικά άτομα καταλαμβάνουν το ίδιο κοινό τροχιακό μεταξύ δύο πυρήνων. Για να ελαχιστοποιήσουν και αυτά με τη σειρά τους τη μεταξύ τους δυναμική ενέργεια, τα spin των 2 ηλεκτρονίων τείνουν να ευθυγραμμιστούν. Αυτό το ζεύγος των ατόμων με κοινή εξωτερική στοιβάδα και κοινό spin ορίζει, μέσω της κατεύθυνσης του spin, μία διεύθυνση και ονομάζεται μαγνητικό δίπολο. Με αυτή τη διαδικασία, το υλικό αποκτά τις μαγνητικές του ιδιότητες, καθώς τα μαγνητικά δίπολα και η αναπτυσσόμενη μαγνητική ροπή εξαιτίας της παρουσίας τους, εξαπλώνονται ανά τη κρυσταλλική δομή του υλικού και επιβάλλουν μία σταδιακή μεταβολή του προσανατολισμού του spin γειτονικών ατόμων, μέχρι το σημείο όπου, στην τελική δομή, η φορά να έχει ολοκληρώσει μία περιστροφή 180 μοιρών, φαινόμενο το οποίο στη μεγάλη κλίμακα της ολικής δομής του υλικού, έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της εσωτερικής του ενέργειας μαγνήτισης. Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επιβάλλεται, αυτά τα δίπολα προσανατολίζονται προς αυτό, αλλάζοντας την εσωτερική μαγνήτιση του υλικού από την ελάχιστη τιμή του σε μία μεγαλύτερη, με διαδικασία που θα αναφερθεί παρακάτω. Όταν γειτονικά δίπολα προσανατολίζονται με αυτόν τον τρόπο προς το εξωτερικό πεδίο, δημιουργείται ένα σύνολο, το οποίο λέγεται μαγνητικό τοίχωμα ή μαγνητική περιοχή και θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω. Σημαντική ιδιότητα των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι πως διατηρούν τον προσανατολισμό τους, λόγω υψηλής δυναμικής ενέργειας, ακόμα και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου. Μερικά παραδείγματα άλλων υλικών, εκτός του σιδήρου, που έχουν παρόμοιες ιδιότητες είναι το κοβάλτιο και το νικέλιο, καθώς και αυτά έχουν την $3d$ ως την εξωτερική τους στιβάδα, χωρίς αυτή να είναι πλήρης. Όλα τα παραπάνω δίνουν στα σιδηρομαγνητικά υλικά την πολύ σημαντική ιδιότητα της ισχυρής έλξης σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία, ενώ τα συγκεκριμένα δίπολα και ηλεκτρόνια της στιβάδας $3d$, καθώς και οι μαγνητικές περιοχές των υλικών αυτών δίνουν την επιπλέον ιδιότητα της διατήρησης των μαγνητικών ιδιοτήτων, ακόμα και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου. Όπως θα αναφερθεί παρακάτω, αυτή είναι η πιο βασική ιδιότητα που δίνει στον βρόχο υστέρησης αυτών των υλικών το χαρακτηριστικό του σχήμα [3].

1.1.3 Βρόχος Υστέρησης

Μία από τις βασικότερες μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού είναι ο βρόχος υστέρησης. Πρόκειται για το διάγραμμα εσωτερικής μαγνήτισης του υλικού συναρτήσει του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Έχει τη μορφή βρόχου, άρα η μαγνήτιση B δεν είναι γραμμική συνάρτηση του πεδίου H , αλλά εξαρτάται από την προηγούμενη μαγνητική κατάσταση του υλικού. Αυτό οφείλεται στη διαδικασία μαγνήτισης, δηλαδή τον προσανατολισμό των μαγνητικών τοιχωμάτων του υλικού προς το εξωτερικό πεδίο. Μαγνητικό τοίχωμα ονομάζεται ένα σύνολο μαγνητικών διπόλων σε ατομικό επίπεδο του υλικού με κοινό προσανατολισμό. Καθώς ολοένα και περισσότερα τοιχώματα προσανατολίζονται προς το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, ολοένα και

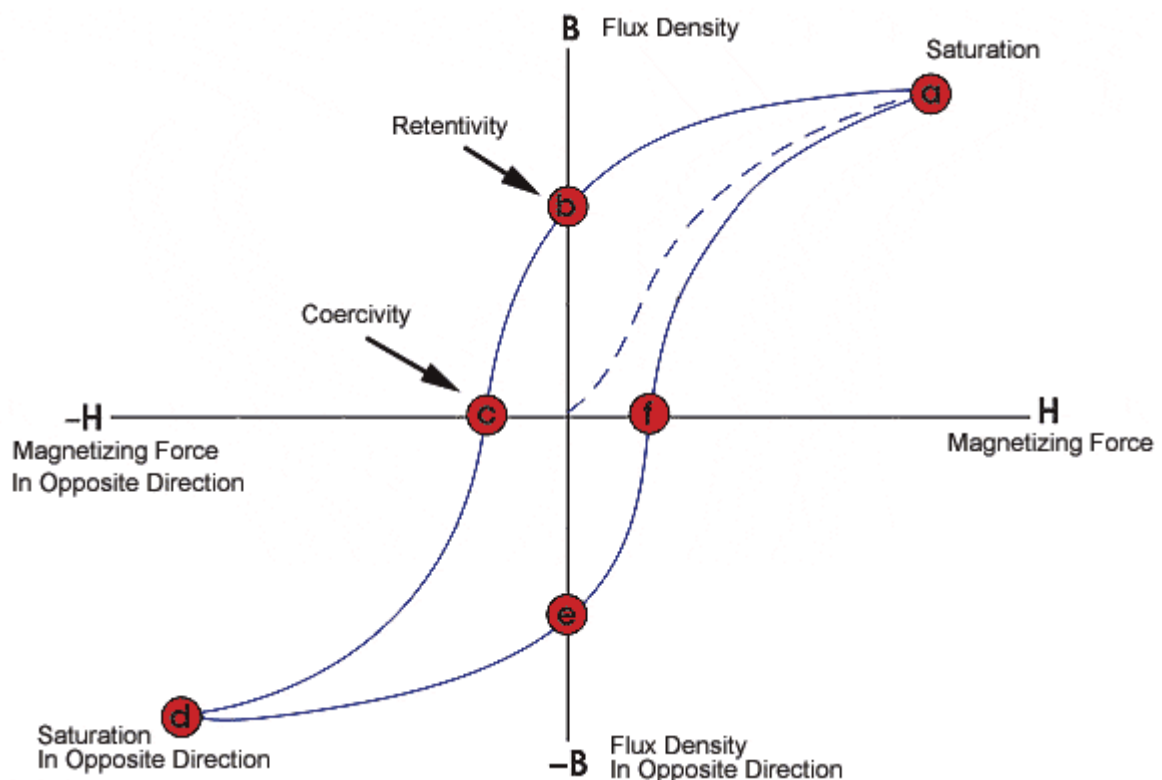
μεγαλύτερο ποσοστό του υλικού μαγνητίζεται, άρα αυξάνεται και η συνολική μαγνήτισή του. Όταν ένα μεγάλο ποσοστό των μαγνητικών τοιχωμάτων έχει προσανατολιστεί προς το επιβαλλόμενο πεδίο, η αύξηση του πεδίου αυτού έχει ολοένα και λιγότερη επίδραση στην ολική μαγνήτιση του υλικού, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα δίπολα και τοιχώματα για να στραφούν προς το πεδίο. Αυτό το φαινόμενο λέγεται μαγνητικός κορεσμός και διακρίνεται στον βρόχο υστέρησης από την χαμηλή κλίση του και τις υψηλές τιμές πεδίου H . Αντίστοιχα, για μηδενικές τιμές επιβαλλόμενου πεδίου, αν το υλικό έχει μαγνητιστεί εκ των προτέρων, η εσωτερική του μαγνήτιση δεν θα επιστρέψει ποτέ στο 0, αλλά σε μία τιμή γνωστή ως παραμένουσα μαγνήτιση. Σε αυτήν την περίπτωση, μερικά μαγνητικά τοιχώματα του υλικού μένουν προσανατολισμένα προς την προηγούμενη διεύθυνσή τους, δημιουργώντας μία μαγνήτιση χωρίς την ύπαρξη κάποιου μαγνητικού πεδίου και αυτή η τιμή μένει σταθερή για το κάθε υλικό. Τέλος, υπάρχουν δύο τιμές επιβαλλόμενου πεδίου για τις οποίες η εσωτερική μαγνήτιση του υλικού μηδενίζεται. Αυτές είναι αντίθετες τιμές, άρα ίδιου μέτρου, το οποίο ονομάζεται συνεκτικό πεδίο και αποτελεί το πεδίο που δημιουργεί στο υλικό ίση σε μέτρο και αντίρροπη μαγνήτιση από την παραμένουσά του. Σε αυτή την τιμή του πεδίου εμφανίζεται η μέγιστη κλίση του βρόχου υστέρησης, άρα και η μεγαλύτερη ευαισθησία στην μαγνητική απόκριση του υλικού σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Χαμηλές τιμές συνεκτικού πεδίου ($<1\text{kA/m}$) δείχνουν ότι το υλικό έχει χαρακτηριστικά μαλακού μαγνήτη, ενώ υψηλές τιμές ($>1\text{MA/m}$) δείχνουν ότι πρόκειται για μόνιμο μαγνήτη.



Εικόνα 3 : Σύγκριση βρόχων υστέρησης μεταξύ μαλακού (a) και σκληρού (b) μαγνητικού υλικού [5].

Στην εικόνα 3 είναι διακριτή η διαφορά μεταξύ μαλακών και σκληρών μαγνητικών υλικών. Το μεγαλύτερο συνεκτικό πεδίο, στην περίπτωση των τελευταίων, τους δίνει την ιδιότητα να διατηρούν την εγγενή μαγνήτισή τους, ανεξάρτητα από μικρά εξωτερικά πεδία, δρώντας έτσι ως μόνιμος μαγνήτης. Επίσης, τα σκληρά μαγνητικά υλικά παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές παραμένουσας μαγνήτισης, οπότε διατηρούν

μεγαλύτερο εσωτερικό πεδίο ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες. Αντίθετα, τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τη μαγνήτισή τους με αρκετά μικρές μεταβολές του εξωτερικού πεδίου και η παραμένουσα μαγνήτισή τους είναι αρκετά μικρή, ώστε να μην αντιστέκεται στις μεταβολές αυτές. Ακόμα, η συνολική επιφάνεια, δηλαδή το εμβαδόν, του βρόχου υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι πολύ μικρότερη, το οποίο μέγεθος συνδέεται άμεσα με τις απώλειες κατά τη διαδικασία μαγνήτισης. Οπότε, τα μαλακά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές, όπου αναμένεται η συχνή και γρήγορη μεταβολή του προσανατολισμού του εξωτερικού πεδίου και είναι σημαντική η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και ο περιορισμός των απωλειών πεδίου κατά τη μαγνήτιση. Κάποια παραδείγματα αποτελούν εφαρμογές σε πυρήνες μετασχηματιστών, όπου το πεδίο ακολουθεί τη συχνότητα του ρεύματος σε βιομηχανικές τάσεις, δηλαδή 50Hz. Αντίθετα, τα σκληρά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου χρειάζεται ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, ανεξάρτητα από τα εξωτερικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, όπως σε μαγνητικές δοκιμές ή διακριβώσεις αισθητήρων.



Εικόνα 4 : Τυπική μορφή βρόχου υστέρησης με σημειωμένα τα κρίσιμα σημεία προς μελέτη που περιγράφουν τις ιδιότητες του μαγνητικού υλικού [5].

Ένα σημαντικό φαινόμενο που δίνει στο βρόχο υστέρησης τη χαρακτηριστική του μορφή, αντί για μία ευθεία και που βασίζεται στη συμπεριφορά των μαγνητικών τοιχωμάτων και διπόλων είναι το Barkhausen Jump. Ουσιαστικά, κατά τη διαδικασία μαγνήτισης ενός υλικού, ένα μαγνητικό δίπολο, ή σε μεγαλύτερη κλίμακα αντίστοιχα ένα μαγνητικό τοίχωμα, δεν προσανατολίζεται άμεσα προς τη διεύθυνση του

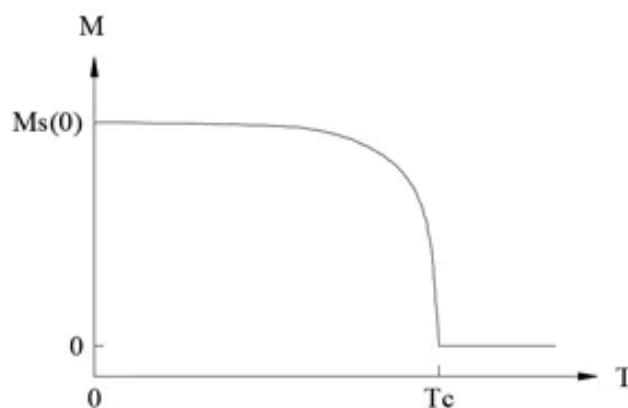
εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Αντίθετα, κάθε δίπολο, και μαγνητικό τοίχωμα κατά επέκταση, έχει ένα κατώφλι δυναμικής ενέργειας που δρα ως μαγνητική αδράνεια. Δηλαδή, η αύξηση του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται στο υλικό δεν έχει αποτέλεσμα τη στροφή του διπόλου, άρα και τη μαγνήτιση του υλικού, μέχρι η δύναμη μαγνήτισης αυτή να ξεπεράσει το κατώφλι δυναμικής ενέργειας του διπόλου ή τοιχώματος, όπου και παρατηρείται μία απότομη στροφή προς τον άξονα μαγνήτισης και μία σχεδόν κατακόρυφη αύξηση της μαγνήτισης του υλικού. Αυτό γίνεται αντιληπτό στο διάγραμμα B-H σε πολύ μικρή κλίμακα, με τη μορφή σκαλοπατιών, όπου υπάρχει μία περιοχή αύξησης του πεδίου H με σχεδόν μηδενική απόκριση και, στο τέλος αυτής, υπάρχει μία σχεδόν κατακόρυφη αύξηση της μαγνήτισης B ως αποτέλεσμα της απότομης στροφής των διπόλων προς τον άξονα. Σε μικρή κλίμακα μερικών διπόλων, αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Barkhausen Jump, ενώ σε μεγαλύτερη κλίμακα μαγνητικών τοιχωμάτων που αποτελούνται από πολλαπλά μαγνητικά δίπολα ονομάζεται Large Barkhausen Jump. Όταν η διαδικασία μαγνήτισης ολοκληρωθεί, δηλαδή όταν τα μαγνητικά τοιχώματα προσανατολιστούν προς μία διεύθυνση, δίνοντας έτσι εσωτερική μαγνήτιση στο υλικό, η μικροδομή του προσανατολίζεται σε μία νέα κατάσταση ελάχιστης ενέργειας. Αυτό σημαίνει πως, ακόμα και όταν το πεδίο διέγερσης αφαιρεθεί, το υλικό δεν θα επιστρέψει ποτέ στην αρχική κατάσταση μηδενικής εσωτερικής μαγνήτισης, αλλά στο σημείο παραμένουσας μαγνήτισης, εξού και το σχήμα του βρόχου. Σημαντική είναι η λεπτομέρεια πως ο βρόχος υστέρησης είναι συμμετρικός, το οποίο σημαίνει πως ο προσανατολισμός του πεδίου διέγερσης δεν έχει σημασία. Αντίθετα, είναι σημαντική η αρχική και τελική κατάσταση των μαγνητικών τοιχωμάτων του υλικού, καθώς η συνολική τους κίνηση και στροφή θέτει το ελάχιστο ποσό ενέργειας που πρέπει να προσφέρει ένα εξωτερικό πεδίο, ώστε να αλλάξει την εσωτερική μαγνήτιση του υλικού στην επιθυμητή τιμή.

Η μορφή, το σχήμα και, επομένως, τα χαρακτηριστικά του βρόχου υστέρησης είναι διαφορετικά για κάθε υλικό, όμως, ακόμα και για το ίδιο υλικό, είναι πιθανό ο βρόχος υστέρησης να έχει διάφορες μορφές. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο βρόχος και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού έχουν άμεση εξάρτηση από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, τη μηχανική τάση και δύναμη που ασκείται και τη συχνότητα του πεδίου διέγερσης. Την πιο μικρή επίδραση έχει η συχνότητα, καθώς, σε μεγάλες τιμές συχνότητας διέγερσης αυξάνονται σημαντικά τα δινορεύματα στο υλικό και, κατά συνέπεια, οι μαγνητικές απώλειες, αφού τα δινορεύματα αντιστέκονται στο πεδίο διέγερσης και έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερη τιμή μαγνήτισης για τις ίδιες τιμές πεδίου. Αυτό αντικατοπτρίζεται στον βρόχο υστέρησης με πιο φαρδύ βρόχο σε μεγαλύτερες συχνότητες και πιο στενό βρόχο σε συχνότητες κοντά στο μηδέν, το οποίο είναι λογικό, αφού με μεγαλύτερες απώλειες η τιμή του συνεκτικού πεδίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη για να αντισταθμίσει την εσωτερική μαγνήτιση του υλικού.

Η επόμενη επίδραση στη μορφή του βρόχου υστέρησης είναι αυτή της δύναμης και μηχανικής τάσης, είτε είναι εφελκυστική, είτε θλιπτική. Αυτή η ιδιότητα των μαγνητικών υλικών να αλλάζουν τη μαγνητική τους απόκριση ανάλογα με την

ασκούμενη δύναμη είναι πολύ σημαντική στη χρήση σε αισθητήρες δύναμης και μηχανικής αντοχής. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι η επίδραση της δύναμης είναι αντίθετη για εφελκυστικές τάσεις και θλιπτικές τάσεις, επομένως είναι δυνατή η μέτρηση δυνάμεων σε υποδομές και κατασκευές επί τόπου, καθώς και ο προσδιορισμός των κρίσιμων δυνάμεων και αντοχών των υλικών σε διαφορετικά είδη δυνάμεων. Για παράδειγμα, κάποια υλικά υποδομής είναι κατασκευασμένα, ώστε να έχουν υψηλή αντοχή σε θλιπτικές τάσεις, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στα θεμέλια και να χρειαστεί να υποστηρίξουν μεγάλο βάρος, όμως έχουν μικρότερη αντίσταση σε εφελκυσμό, αφού δεν είναι πιθανό να αναπτυχθούν τέτοιες τάσεις κατά τη χρήση τους.

Τέλος, η πιο σημαντική παράμετρος που πρέπει να διατηρείται σταθερή κατά τις μετρήσεις είναι η θερμοκρασία. Ο λόγος είναι, διότι, σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας, τα μαγνητικά δίπολα που αποτελούν τη μικροδομή των μαγνητικών υλικών και τη βάση των μαγνητικών ιδιοτήτων τους αρχίζουν να περιστρέφονται ανεξάρτητα από το εξωτερικό πεδίο, ως αποτέλεσμα της αυξημένης κινητικής ενέργειας των μορίων (δηλαδή της θερμοκρασίας). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να προσανατολιστούν προς το πεδίο διέγερσης, άρα η ολική μαγνήτιση του υλικού μειώνεται ως αποτέλεσμα. Μάλιστα, η απόκριση μαγνήτισης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έχει μία παραβολική σχέση, το οποίο σημαίνει ότι, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η μαγνήτιση μειώνεται ολοένα και περισσότερο, μέχρι μία κρίσιμη θερμοκρασία, γνωστή ως θερμοκρασία Curie, στην οποία το υλικό είναι ουσιαστικά άμορφο και χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες, καθώς τα μαγνητικά δίπολα αδυνατούν να διατηρήσουν τη δομή τους, λόγω της υψηλής ενέργειας των μορίων [4]-[6].



Εικόνα 5 : Διάγραμμα μαγνήτισης ενός υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας του με σημειωμένη τη θερμοκρασία Curie [4].

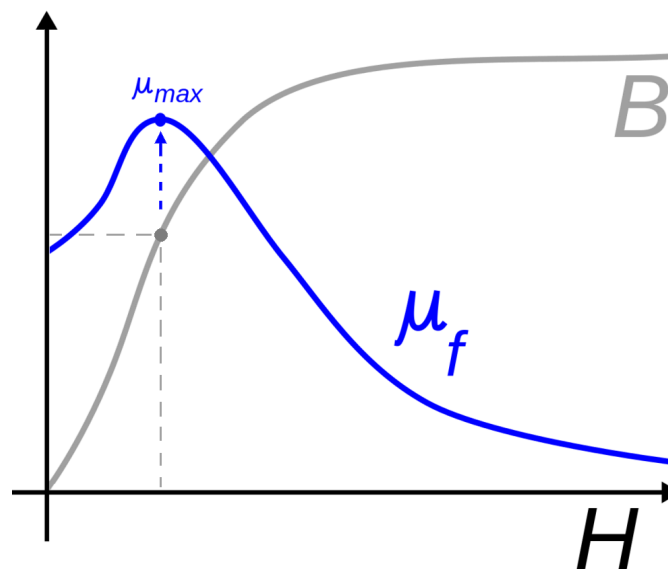
Φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα η παραβολική επίδραση της θερμοκρασίας στην εσωτερική μαγνήτιση ενός υλικού. Φαίνεται, επίσης, σημειωμένη η θερμοκρασία Curie, από την οποία και για όλες τις μεγαλύτερες τιμές η μαγνήτιση μηδενίζεται και το υλικό χάνει τις μαγνητικές ιδιότητές του.

Με βάση τη μορφή και τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη (συνεκτικό πεδίο, παραμένουσα μαγνήτιση, εμβαδόν, κλίση) από τον βρόχο υστέρησης εξάγονται συμπεράσματα για την εσωτερική δομή και τις μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού. Επίσης ένα πολύ σημαντικό μέγεθος που μπορεί να υπολογιστεί από τον βρόχο υστέρησης είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, δηλαδή η ευκολία με την οποία διέρχονται από αυτό μαγνητικές γραμμές, άρα διαδίδεται μαγνητική ροή. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη η μαγνητική διαπερατότητα μ , τόσο καλύτερος μαγνήτης είναι το υλικό και ενδείκνυται για χρήση σε μετασχηματιστές ή αισθητήρες, όπου είναι σημαντικό όλες οι μαγνητικές γραμμές να διέρχονται από το υλικό, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες και να μεγιστοποιηθεί η μαγνητική ροή.

Η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (1.8)$$

δηλαδή από την πρώτη παράγωγο του βρόχου υστέρησης. Αυτό θα είναι σημαντικό στις εφαρμογές μας παρακάτω, καθώς στόχος είναι η δημιουργία βρόχου υστέρησης για το υλικό από τη μέτρηση της μαγνητικής του διαπερατότητας. Για αυτό χρειάζεται προσοχή στη συγκεκριμένη κατασκευή, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες μαγνητικών γραμμών εκτός του αισθητήρα, και ώστε ο υπολογισμός της διαπερατότητας να είναι αντιπροσωπευτικός του δείγματος. Αντίθετα, το ολοκλήρωμα του βρόχου υστέρησης, δηλαδή το εμβαδόν του βρόχου, ενός υλικού δίνει ως αποτέλεσμα τις μαγνητικές απώλειές του για το εκάστοτε εξωτερικό πεδίο διέγερσης [4]-[6].



Εικόνα 6 : Απλό διάγραμμα της μαγνητικής διαπερατότητας (μ) και της μαγνήτισης (B) ενός σιδηρομαγνητικού υλικού σε συνάρτηση με το εξωτερικό πεδίο (H) [5].

1.1.4 Ανισοτροπία

Μία ακόμη βασική ιδιότητα ορισμένων σιδηρομαγνητικών υλικών, η οποία είναι σημαντική για την ανάπτυξη αισθητήρων και τη διεξαγωγή μετρήσεων, είναι η ανισοτροπία. Μαγνητική ανισοτροπία σημαίνει πως ο σιδηρομαγνητικός ή αντισιδηρομαγνητικός άξονας ενός υλικού βρίσκεται κατά μήκος μίας συγκεκριμένης διεύθυνσης, οπότε η μαγνήτιση του υλικού, ως αποτέλεσμα ενός εξωτερικού πεδίου έχει άμεση εξάρτηση από τη γωνία του εξωτερικού πεδίου προς τον άξονα και τη διεύθυνση αυτή. Λόγω της φύσης των μαγνητικών φαινομένων και της συμμετρίας ως προς τις χρονικές μεταβολές στα υλικά, χρειάζεται μία κατανομή μαγνήτισης να έχει την ίδια ενέργεια με την κατάσταση αντίστροφης μαγνήτισης κατά μήκος του ίδιου άξονα. Αυτό οφείλεται στην ελαχιστοποίηση της εσωτερικής ενέργειας της κρυσταλλικής δομής στην υστερητική φύση του φαινομένου της μαγνήτισης. Αυτό εκφράζεται μαθηματικά από τον τύπο :

$$E_{\alpha} = K_u * \sin^2(\theta) \quad (1.9)$$

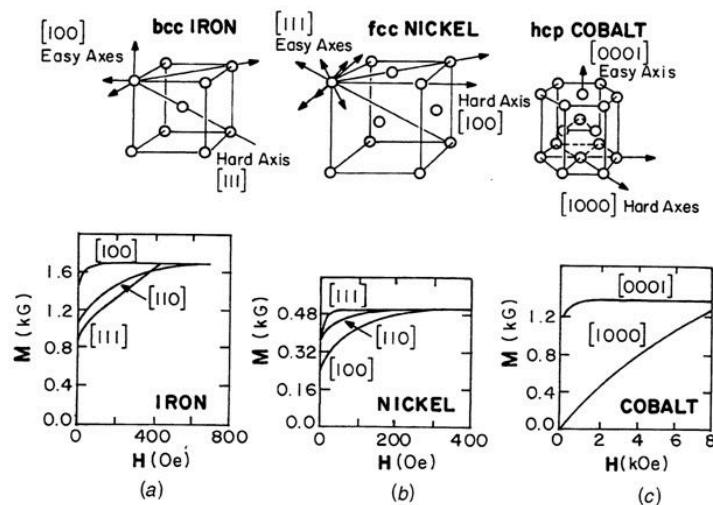
όπου E_{α} είναι η ενέργεια ανισοτροπίας και K_u η σταθερά ανισοτροπίας σε $J \cdot m^{-3}$ και τα δύο, ενώ θ είναι η γωνία μεταξύ της μαγνήτισης του υλικού και του άξονα ανισοτροπίας. Η ανισοτροπία είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για τους μόνιμους ή σκληρούς μαγνήτες, οι οποίοι είναι μονίμως προσανατολισμένοι, αφού θέτει ένα άνω όριο στο διαθέσιμο συνεκτικό πεδίο τους. Αντίθετα, σε μαλακούς μαγνήτες, όπου απαιτείται η συνεχής αλλαγή της μαγνήτισής τους και η μαγνητική ροή χωρίς απώλειες, χρειάζεται σχεδόν μηδενική ανισοτροπία, ώστε να αποφευχθεί η επίδραση ανεπιθύμητου συνεκτικού πεδίου. Η ανισοτροπία, και αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού και τείνει στο μηδέν στη θερμοκρασία Curie, όταν δεν υφίσταται η επίδραση εξωτερικού πεδίου. Επίσης, χωρίζεται σε τρεις βασικές πηγές, οι οποίες είναι η ανισοτροπία σχήματος, η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία και η επαγόμενη ανισοτροπία.

Η ανισοτροπία σχήματος σχετίζεται με το σχήμα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δείγματος, οπότε είναι ανεξάρτητη του υλικού και των φυσικών χαρακτηριστικών του. Είναι εξαιρετικά σημαντική σε δείγματα αρκετά μικρά, ώστε να μη σχηματίζονται ολόκληρες μαγνητικές περιοχές, αλλά και στην περίπτωση που σχηματίζονται, κάθε περιοχή να συμβάλλει με ένα πεδίο απομαγνήτισης και να υφίσταται την επίδραση άλλων πεδίων από τις υπόλοιπες περιοχές. Ο συντελεστής αυτής της ανισοτροπίας υπολογίζεται προσεγγιστικά με βάση ένα ελλειψοειδές σχήμα και θεωρώντας άλλα απλά σχήματα ως ελλειψοειδή. Στην περίπτωση της σφαίρας, ο συντελεστής είναι μηδέν, αφού η σφαίρα είναι απόλυτα συμμετρική. Για σιδηρομαγνητικά υλικά με μM της τάξης του 1 T, η ανισοτροπία του είναι της τάξεως των $200 \text{ kJ} \cdot m^{-3}$.

Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία είναι ίσως και η πιο σημαντική και αποτελεί την κύρια αιτία παρουσίας ανισοτροπικής συμπεριφοράς στη πλειοψηφία των δειγμάτων. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, αυτού του είδους η ανισοτροπία πηγάζει από τη μικροδομή του υλικού, οπότε είναι ανεξάρτητη από το σχήμα του δοκιμίου, αλλά εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού. Συγκεκριμένα, λόγω του τρόπου με τον οποίο διατάσσονται τα άτομα στην κρυσταλλική δομή του υλικού, σχηματίζονται μία εύκολη και μία δύσκολη διεύθυνση μαγνήτισης που διευκολύνουν και αντιστέκονται στη μαγνήτιση ως αποτέλεσμα ενός εξωτερικού πεδίου αντίστοιχα, ανάλογα με τη γωνία εφαρμογής του πεδίου αυτού. Προφανώς, όσο πιο κοντά στην εύκολη διεύθυνση βρίσκεται το πεδίο, άρα μικρότερη γωνία απόκλισης θ , τόσο μεγαλύτερη μαγνήτιση θα παρατηρηθεί στο δείγμα και αντίθετα για τη δύσκολη διεύθυνση. Ανάλογα με τη συμμετρία της μικροδομής του υλικού η ανισοτροπία χαρακτηρίζεται ως εξαγωνική, τετραγωνική, κυβική και τα λοιπά. Αυτού του είδους η ανισοτροπία οφείλεται στη συνεισφορά ενός ή δύο ιόντων κατά κύριο λόγο. Το ένα ιόν προκαλεί ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση ελεύθερων ηλεκτρονίων, στα οποία οφείλονται και οι σιδηρομαγνητικές ιδιότητες του υλικού, με το δυναμικό του κρυστάλλου στη θέση του ιόντος. Λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης, η μαγνητική ροπή τείνει να προσανατολιστεί προς μία διεύθυνση, την εύκολη διεύθυνση. Όσον αφορά τα δύο ιόντα, συνήθως η ανισοτροπία οφείλεται στην αλληλεπίδραση δύο διπόλων, τα οποία προσανατολίζονται μεταξύ τους σε μία διάταξη βορρά-νότου ή σε μία εγκάρσια διάταξη, με άξονα την εύκολη διεύθυνση μαγνήτισης, εκτείνοντας, έτσι αυτή την ανισοτροπία κατά μήκος του ίδιου άξονα σε όλο το κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού.

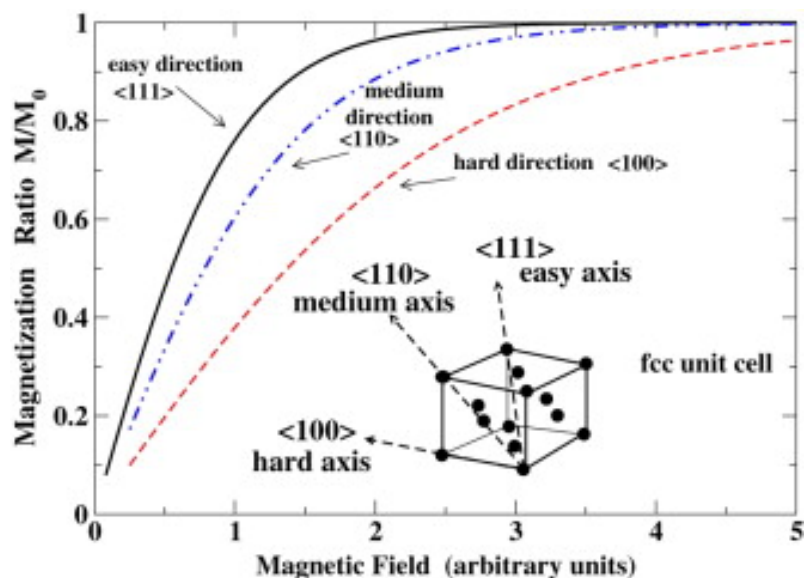
Τέλος, μία άλλη μορφή ανισοτροπίας είναι η επαγόμενη ανισοτροπία, η οποία παρουσιάζεται κυρίως σε κράματα μετάλλων κατά την ανόπτυσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει, γιατί τα άτομα διαφορετικών υλικών στο κράμα τείνουν να έχουν διαφορετικές τιμές ροπής σε μεγάλες θερμοκρασίες, οπότε αυτά με υψηλή ροπή τείνουν να προσανατολίζονται προς το μαγνητικό πεδίο. Αυτό το φαινόμενο δημιουργεί ένα ανάγλυφο στη δομή του υλικού που, με τη σειρά του προκαλεί μία ανισοτροπία. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μονοαξονικής ανισοτροπίας σε άμορφους μαγνήτες, ενώ αντίστοιχο αποτέλεσμα παρατηρείται και στην εναπόθεση λεπτών στρωμάτων υπό την παρουσία μαγνητικού πεδίου, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται. Ένας ακόμα μηχανισμός για αυτή την ανισοτροπία είναι η ανάπτυξη μονοαξονικής τάσης, λόγω ασκούμενης δύναμης, γεγονός το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων τάσης, όπως μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης, οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω. Εν κατακλείδι, βασική αρχή λειτουργίας των μαγνητικών αισθητήρων είναι να αλλάζουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες και, συγκεκριμένα, τη μαγνητική τους απόκριση ως σιδηρομαγνητικός πυρήνας και τη διερχόμενη μαγνητική ροή, ως αποτέλεσμα της άσκησης δύναμης σε κάποιο σημείο τους [7]-[10].

Magnetocrystalline anisotropy



Crystal structure showing easy and hard magnetization direction for Fe (a), Ni (b), and Co (c), above. Respective magnetization curves, below.

Εικόνα 7 : Παράδειγμα 3 βασικών υλικών με μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, καθώς και οι αντίστοιχες καμπύλες μαγνήτισης για την εύκολη και δύσκολη διεύθυνση [7].



Εικόνα 8 : Μαγνήτιση ενός υλικού στον εύκολο άξονα, στον δύσκολο άξονα και ενδιάμεσα, καθώς και το αποτέλεσμα της ανισοτροπίας στην ολική μαγνήτιση του υλικού [7].

1.2 Επιτήρηση “Υγείας” Φερρομαγνητικών Υλικών

Η Επιτήρηση «Υγείας» Φερρομαγνητικών Υλικών αναφέρεται στις διαδικασίες καταστροφικού και μη καταστροφικού ελέγχου δειγμάτων χάλυβα για το χαρακτηρισμό της δομικής τους ακεραιότητας. Οι τεχνικές αυτές έχουν διαδοθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια, λόγω της εκτενούς χρήσης του χάλυβα σε κατασκευές κατοικιών, εργοστασίων, μέσων μεταφοράς, υποδομών ενέργειας και αρκετών άλλων εφαρμογών. Έτσι, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για έλεγχο των προς χρήση υλικών, έτσι ώστε να αποφευχθούν καταστροφικές βλάβες, οι οποίες μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τη διακοπή λειτουργίας υποδομών, χρηματικές και χρονικές ζημιές κατά την ολοκλήρωση έργων ή και την απώλεια ανθρώπινης ζωής.

Όσον αφορά τον χάλυβα, υπάρχει πάλι μεγάλο εύρος εφαρμογών, για τις οποίες πρέπει να διερευνηθούν διάφορα χαρακτηριστικά του υλικού. Στην βιομηχανία και σε κατασκευαστικές χρήσεις, για παράδειγμα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δομική ακεραιότητα του χάλυβα και η αντοχή του σε εφελκυστικές και θλιπτικές μηχανικές τάσεις. Αυτού του τύπου τα κράματα χάλυβα βρίσκουν εφαρμογές σε τμήματα της βιομηχανίας, όπως κατασκευές, δρόμοι, γέφυρες, αεροπλάνα και παρόμοια παραδείγματα, όπου είναι συχνή η ανάπτυξη μεγάλων δυνάμεων και υπάρχει σοβαρός κίνδυνος οι αναπτυσσόμενες πιέσεις να προκαλέσουν ρήξεις και σπασίματα στον χάλυβα, ειδικά στην περίπτωση που έχουν εμφανιστεί ατέλειες στη μικροδομή, όπως ρωγμές, από τις διαδικασίες συγκόλλησης, ανόπτησης και, γενικά, επεξεργασίας του πριν την χρήση του. Όταν συμβαίνει αυτό, δημιουργείται μία περιοχή στον χάλυβα με λιγότερη ανεκτικότητα στις δυνάμεις και μηχανικές τάσεις, οπότε, όταν αυτές οι δυνάμεις αναπτυχθούν κατά τη χρήση του, η ατέλεια αυτή εξαπλώνεται σε όλη την κρυσταλλική δομή του υλικού και το καταστρέφει. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί ο ηλεκτρικός χάλυβας, για χρήση σε ηλεκτρικές εφαρμογές, όπως μετασχηματιστές ή σιδηρομαγνητικούς πυρήνες για χρήση σε μαγνητικά κυκλώματα, όπως είναι οι μαγνητικοί αισθητήρες. Σε αυτήν την περίπτωση, κύριο ενδιαφέρον έχει η μελέτη του χάλυβα ως προς τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του, έναντι της μηχανικής αντοχής του. Είναι σημαντικό το δείγμα να έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, χαμηλές απώλειες σιδήρου και χαμηλή τιμή συνεκτικού πεδίου, ώστε να λειτουργεί ως μαλακός μαγνήτης και να επιτρέπει την εύκολη διέλευση μεγάλης πυκνότητας εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής, χωρίς μεγάλες απώλειες πεδίου, λόγω υψηλού συνεκτικού πεδίου ή απωλειών δινορευμάτων. Σε αυτές τις εφαρμογές είναι πολύ σημαντική η υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων, ακριβώς λόγω των πολύπλοκων μεγεθών και φαινομένων που μελετώνται, καθώς και εξαιτίας των μικρών τιμών των αποτελεσμάτων, τα οποία είναι επιρρεπή σε υψηλά ποσοστά σφάλματος, ως αποτέλεσμα μικρών μεταβολών στο περιβάλλον και τη διαδικασία των δοκιμών [11], [12].

Κύριο πεδίο ενδιαφέροντος της επιτήρησης υγείας χάλυβα (Steel Health Monitoring) αποτελούν οι διαδικασίες μέτρησης και ανάλυσης των χαρακτηριστικών των δειγμάτων χάλυβα, οι οποίες βασίζονται κυρίως στη χρήση αισθητήρων και διατάξεων, και στις οποίες θα γίνει αναφορά σε αυτήν την ενότητα. Μία πιθανή, και αρκετά συχνή, κατηγοριοποίηση των μετρήσεων στο πλαίσιο του Steel Health Monitoring βασίζεται στην ικανότητα της μετρητικής διάταξης να διατηρεί τη δομική ακεραιότητα του δοκιμίου. Έτσι, οι δοκιμές χωρίζονται σε μη καταστροφικές, όπου το δείγμα δεν υφίσταται κάποια δομική παραμόρφωση, και σε καταστροφικές, όπου το δείγμα αναμένεται να υποστεί μόνιμες αλλαγές στις διαστάσεις και δομή του, καθιστώντας το μη κατάλληλο για χρήση σε περαιτέρω μετρήσεις ή εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα των μη καταστροφικών δοκιμών είναι η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας του δείγματος, το οποίο οδηγεί σε μικρότερο κόστος δοκιμών, καθώς και η δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών ιδιοτήτων στο ίδιο δείγμα. Όσον αφορά τις καταστροφικές δοκιμές, βασικά πλεονεκτήματα αποτελούν η απλότητα και ταχύτητα των μετρήσεων, καθώς και η ευκολία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

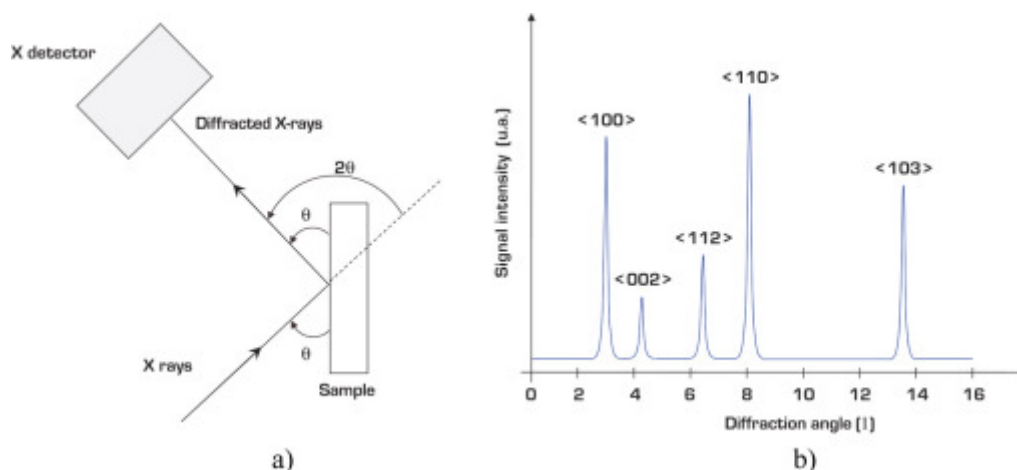
1.2.1 Μη καταστροφικές τεχνικές

Στις μη καταστροφικές τεχνικές επίβλεψης της «υγείας» του χάλυβα, είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός του δείγματος, με κατάλληλη χρήση αισθητήριων συστημάτων, χωρίς να προκληθεί μόνιμη αλλαγή της δομής του ή να επηρεαστεί η δομική του ακεραιότητα. Στο πλαίσιο αυτό των μη καταστροφικών δοκιμών χάλυβα, έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος διατάξεων μέτρησης και ανάλυσης δειγμάτων, εκτός από τους μαγνητικούς αισθητήρες. Ιδιαίτερα με την ανάπτυξη της σύγχρονης επιστήμης, έχει σημειωθεί πρόοδος στην ανίχνευση μικροδομής και τον ποιοτικό έλεγχο υλικών. Αρκετές μη καταστροφικές μετρήσεις γίνονται έμμεσα, δηλαδή περιλαμβάνουν την πρωταρχική μέτρηση ενός διαφορετικού μεγέθους από το ζητούμενο. Αυτό γίνεται με τη χρήση ειδικών αισθητήρων, οι οποίοι είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι για να μετρούν διάφορα μεγέθη μέσω φυσικών νόμων και αλληλεπιδράσεων στο υλικό. Μερικά παραδείγματα αποτελούν οι μαγνητικοί αισθητήρες, το κύριο ενδιαφέρον της εργασίας, η περίθλαση ακτίνων Χ και νετρονίων, η τεχνολογία ultrasonics και οι μετρήσεις eddy currents.

Πιο συγκεκριμένα, οι μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν το μαγνητικό πεδίο σημειακά στο υπό μέτρηση υλικό, το οποίο με τη σειρά του χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της μικροδομής του. Άλλοι αισθητήρες είναι πιο απλοί, μετρώντας, για παράδειγμα, αντίσταση σε συνάρτηση με δύναμη ή μηχανική τάση η οποία εφαρμόζεται στο δείγμα, ή ανακλάσεις σωματιδίων από την κρυσταλλική δομή του υλικού. Για να γίνει αυτό χρειάζεται σωστή μελέτη και γνώση των φυσικών νόμων που διέπουν τη λειτουργία αυτών των αισθητήρων, καθώς και κατανόηση των αποτελεσμάτων, ώστε να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα και να μεταφραστούν τα

αποτελέσματα από αριθμοί φυσικών μεγεθών σε χρήσιμες, κατανοητές πληροφορίες. Μερικά παραδείγματα τέτοιων διατάξεων αποτελούν οι αισθητήρες Hall, fluxgate και οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης. Οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών στη βιομηχανία, καθώς υπάρχει μεγάλο πλήθος διατάξεων, με την καθεμία να ειδικεύεται στη μέτρηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Οπότε οι πιθανές χρήσεις κυμαίνονται από τους ελέγχους ακεραιότητας της μικροδομής και παραμένουσων τάσεων μέχρι τις μετρήσεις μαγνητικής διαπερατότητας και απωλειών μαγνητικού πεδίου [13]-[15].

Στις τεχνικές X-RAY Diffraction (περίθλαση ακτίνων-X / XRD) και Neutron Diffraction (περίθλαση νετρονίων / NRD), το αντίστοιχο μέσο (συχνότερα ακτίνες-X και πιο σπάνια νετρόνια) ανακλάται από την επιφάνεια του δείγματος προς έναν ανιχνευτή που μετράει counts per second (CPS) ανάλογα με την πυκνότητα της απόκρισης και τη γωνία πρόσκρουσης και ανάκλασης. Οι ακτίνες-X ελέγχονται, ώστε το μήκος κύματος λ της δέσμης να είναι μικρότερο της μέσης πλεγματικής απόστασης μεταξύ ατόμων του χάλυβα, ώστε η ανάκλαση να δίνει στοιχεία για τη μικροδομή και αν υπάρχουν απώλειες ατόμων ή ομάδων ατόμων σε αυτήν. Έτσι, οι ακτίνες X ή τα νετρόνια ανακλώνται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο αριθμό, ανάλογα με την τοπική μορφή της μικροδομής του υλικού και η απόκριση σε CPS έχει μία μορφή τοπικών μεγίστων για συγκεκριμένες γωνίες ανάκλασης. Με αυτόν τον τρόπο ανιχνεύονται όρη και κοιλάδες στη δομή του υλικού και προσδιορίζονται τα σημεία στα οποία η απόκριση αποκλίνει από τη φυσιολογική, άρα υπάρχει κάποια ατέλεια στην κρυσταλλική δομή [16].



Εικόνα 9 : α) Διάταξη X-ray diffraction και β) Διάγραμμα απόκρισης CPS - γωνία διάθλασης [16].

Η επόμενη μέθοδος για μη καταστροφικές μετρήσεις χάλυβα λέγεται Ultrasonic Testing, ή μετρήσεις με χρήση υπερήχων (UT). Ουσιαστικά, αποτελεί μία μέτρηση, κατά την οποία ηχητικά κύματα υψηλών συχνοτήτων κατευθύνονται στο υλικό υπό μέτρηση. Οι συχνότητες του ηχητικού κύματος είναι, στη θεωρία, της τάξης των 50MHz, αλλά στην πράξη περιορίζονται στη ζώνη 0,1-5MHz. Στόχος αυτής της υψηλής συχνότητας των κυμάτων είναι η διεύθυνση του όγκου του υλικού, ώστε η

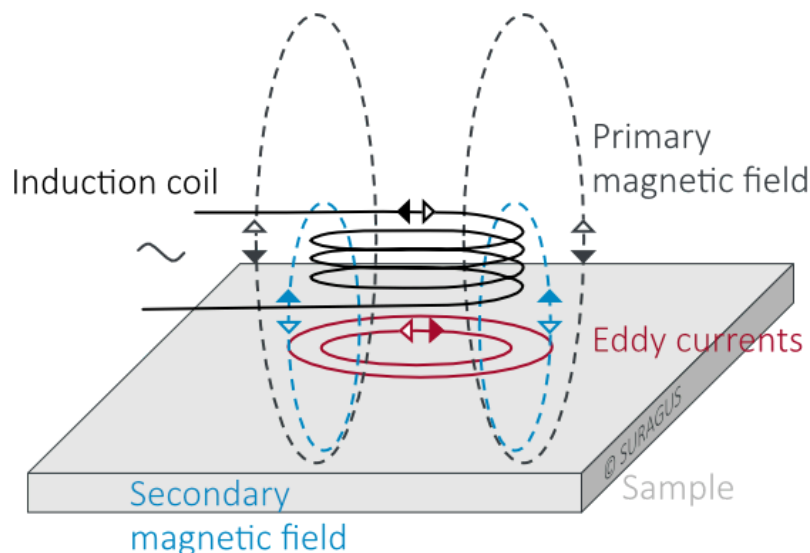
απόκριση να είναι αντιπροσωπευτική της συνολικής μικροδομής του και να μπορούν να ανιχνευθούν σφάλματα σε μεγαλύτερο βάθος. Για την παραγωγή των ηχητικών κυμάτων χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας, δηλαδή μία ηλεκτρική μηχανή με έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στο κέντρο του. Με την τροφοδότηση του μετατροπέα με μία τάση υψηλής συχνότητας και πλάτους, ο κρύσταλλος πάλλεται στην ίδια υψηλή συχνότητα, λόγω της ιδιότητας των πιεζοηλεκτρικών υλικών, και παράγει ένα ακουστικό κύμα. Αυτό το κύμα υψηλής συχνότητας και ενέργειας κατευθύνεται μέσω ενός συνδετικού υλικού με βάση το λάδι προς το δείγμα, όπου, ιδανικά, διαπερνά το υλικό χωρίς ανακλάσεις. Όμως, στην περίπτωση που η μικροδομή του υλικού παρουσιάζει ατέλειες, το ηχητικό κύμα ανακλάται. Έτσι, γνωρίζοντας ότι η ταχύτητα του ήχου σε ένα υλικό είναι σταθερή και γνωρίζοντας τις διαστάσεις του μετρητικού συστήματος, τοποθετούνται δύο αισθητήρες λήψης, ένας σε κάθε πλευρά του υλικού. Ανάλογα με τη χρονική διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων και την ολική ενέργεια των ανακλώμενων κυμάτων μπορούν να εντοπιστούν συγκεκριμένα τα σημεία ατέλειας στο υλικό και να προσδιοριστεί το βάθος τους, καθώς και η έκτασή τους στη συνολική δομή. Αυτού του είδους οι δοκιμές βρίσκουν χρήση σε εφαρμογές, όπως η ανίχνευση περιοχών διάβρωσης σε σωλήνες και ο χαρακτηρισμός και έλεγχος περιοχών συγκόλλησης σε δείγματα μετάλλων. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε σιδηρομαγνητικά υλικά, όσο και σε υλικά χωρίς μαγικές ιδιότητες, καθιστώντας την κατάλληλη για ελέγχους σε δείγματα χάλυβα, τα οποία είναι καλυμμένα με στρώσεις μη σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως ακρυλικά ή πλαστικό. Επίσης, αυτή η μέθοδος παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία και υψηλή ακρίβεια στον προσδιορισμό των σφαλμάτων της μικροδομής του υλικού, καθώς και μεγαλύτερο βάθος διεξόδου από τις περισσότερες άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος της, η εξάρτησή της από το μετρητικό περιβάλλον και τη γεωμετρία του δείγματος, καθώς και την υψηλή απαίτηση τεχνογνωσίας και εκπαίδευσης για τη χρήση των διατάξεων [17].

Στη συνέχεια, υπάρχει η μέθοδος eddy current testing. Όπως είναι προφανές από το όνομα, αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανάπτυξη και μέτρηση δινορευμάτων στο υλικό, για τον χαρακτηρισμό του. Η βασική διάταξη για αυτή τη μέτρηση αποτελείται από ένα probe, δηλαδή ένα κινούμενο πηνίο από χάλκινο σύρμα, το οποίο διεγείρεται με εναλλασσόμενο ρεύμα. Με βάση την αρχή λειτουργίας των πηνίων, είναι γνωστό πως το εναλλασσόμενο ρεύμα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός μαγνητικού πεδίου γύρω από το πηνίο με την ίδια συχνότητα. Όταν αυτή η διάταξη βρίσκεται κοντά σε ένα αγωγίμο υλικό προς μέτρηση, αναπτύσσονται στο υλικό δινορεύματα, δηλαδή στρεφόμενα ρεύματα επιφανειακά στο υλικό, τα οποία αντιστέκονται στο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αν το υλικό παρουσιάζει ατέλειες στη μικροδομή, τότε, τοπικά στα σημεία της ατέλειας, η μαγνητική διαπερατότητα και η ηλεκτρική αγωγιμότητά του θα αλλάξουν τιμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του πλάτους των δινορευμάτων και, επομένως, την αλλαγή της μετρούμενης εμπέδησης στα άκρα του πηνίου, αφού θα μεταβληθεί το επίπεδο αντίστασης στο υπάρχον μαγνητικό πεδίο. Μετρώντας, λοιπόν, την εμπέδηση στο

πηνίο και, συγκεκριμένα, τις περιοχές του υλικού, στις οποίες η μέτρηση της εμπίδησης δίνει διαφορετικό αποτέλεσμα, είναι δυνατή η ανίχνευση ατελειών στη μικροδομή του υλικού. Αυτού του είδους οι μετρήσεις έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών, με κύρια πεδία αυτά των επιφανειακών ελέγχων υλικών και ελέγχων σωληνώσεων. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία eddy current testing βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην αεροναυπηγική και πετροχημική βιομηχανία, λόγω της υψηλής ευαισθησίας της μεθόδου και τη δυνατότητα ανίχνευσης μικρών ρωγμών σε υλικά προς χρήση σε αεροπλάνα και διαστημόπλοια καθώς και σωλήνες ή ελάσματα για χρήση σε εργοστάσια χημικής επεξεργασίας ή πυρηνικούς αντιδραστήρες. Όλες αυτές είναι εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο ποσοστό ακριβείας στις μετρήσεις για την εξασφάλιση της ποιότητας και δομικής ακεραιότητας των υλικών. Ακόμη μερικές εφαρμογές αποτελούν οι μετρήσεις ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και οι μετρήσεις πάχους επίστρωσης, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει επικάλυψη διαφορετικών υλικών. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ο περιορισμός για χρήση σε ηλεκτρικά αγωγίμα δοκίμια, καθώς και το μικρό βάθος διείσδυσης, λόγω της φύσης των δινορευμάτων. Αυτό βασίζεται στο επιδερμικό φαινόμενο, το οποίο ορίζει το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων στο υλικό ως συνάρτηση της συχνότητας διέγερσης και της πυκνότητας του υλικού, οπότε η συγκεκριμένη μέθοδος μέτρησης είναι επιφανειακή. Ο παρακάτω τύπος δίνει το βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \omega \cdot \mu}} \quad (1.10)$$

όπου δ το βάθος διείσδυσης, σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα, ω η γωνιακή συχνότητα του πεδίου διέγερσης και μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Οπότε είναι εμφανές πως, για αγωγίμα υλικά σε υψηλές συχνότητες, το βάθος μέτρησης είναι αρκετά μικρότερο από άλλες διατάξεις [18].



Εικόνα 10 : Διάταξη μέτρησης δινορευμάτων [18].

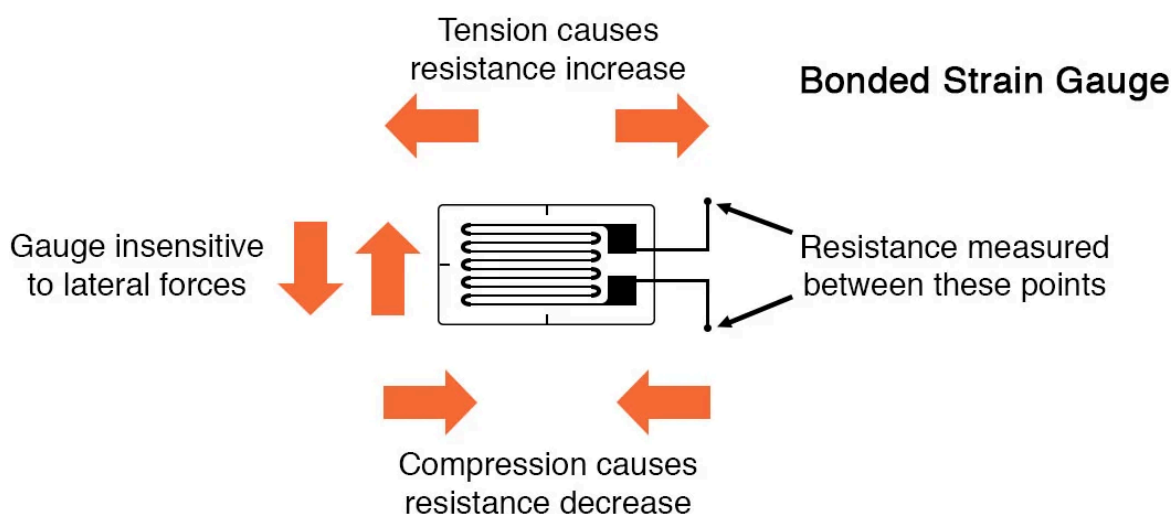
1.2.2 Καταστροφικές τεχνικές

Μία άλλη μέθοδος μέτρησης βασίζεται στις καταστροφικές δοκιμές, δηλαδή στην εσκεμμένη ανάπτυξη τάσεων κοντά στο ελαστικό όριο του υλικού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την πιθανή παραμόρφωση ή διάσπαση του προς μελέτη υλικού. Τέτοιες δοκιμές μπορούν να γίνουν απευθείας στο υλικό κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του, ή απευθείας στην όποια κατασκευή αυτό χρησιμοποιείται, είτε σε διαπιστευμένα εργαστήρια υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Κάποια παραδείγματα χρήσης καταστροφικών δοκιμών στη βιομηχανία αποτελούν οι έλεγχοι διαγωγιμότητας και αντίστασης επαφής, όπου εφαρμόζεται στα άκρα του υλικού υψηλή τάση μέχρι το σημείο υπερπήδησης ή διάτρησης και ο έλεγχος μηχανικής αντοχής, όπου ασκούνται εφελκυστικές, θλιπτικές και στρωφικές τάσεις μέχρι το σημείο πλαστικής παραμόρφωσης ή ρήξης του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, μερικές διατάξεις καταστροφικών δοκιμών περιλαμβάνουν τη χρήση του αισθητήρα strain gauge για τον προσδιορισμό του ορίου μηχανικής αντοχής του υλικού, η τεχνολογία tensile testing και η τεχνολογία drill hole testing.

Η πρώτη από αυτές τις εφαρμογές είναι ο αισθητήρας strain gauge. Αυτός ο αισθητήρας εκμεταλλεύεται την ιδιότητα των αγωγών να μεταβάλλουν την ειδική αντίστασή τους ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Δηλαδή, όταν ασκείται δύναμη στη διάταξη strain gauge, το αγωγίμο μέλος του εκτείνεται ή συνθλίβεται, αλλάζοντας έτσι την αντίσταση που εμφανίζεται στα άκρα του σύμφωνα με τον τύπο :

$$R = R_0 * (1 + \frac{k*F}{l}) \quad (1.11)$$

όπου R_0 η αντίσταση για μηδενική ασκούμενη δύναμη, l το μήκος του αγωγού, k η σταθερά ελατηρίου για την ελαστική περιοχή του αγωγού και F η ασκούμενη δύναμη στα άκρα του. Είναι σημαντική η χρήση του αισθητήρα στην ελαστική περιοχή του, γιατί αλλιώς οι ιδιότητές του, όπως η αντίσταση, αλλοιώνονται μόνιμα. Συγκεκριμένα, ιδανικά η χρήση του strain gauge γίνεται στην περιορισμένη γραμμική περιοχή του, όπου η απόκριση πτώσης τάσης σε συνάρτηση με τη δύναμη έχει γραμμική σχέση. Σε αυτή τη διάταξη, ο αισθητήρας τροφοδοτείται με τάση και παρατηρείται η πτώση τάσης στα άκρα του κατά την ανάπτυξη δυνάμεων. Με βάση αυτή, μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση και, από τον παραπάνω μαθηματικό τύπο, η ασκούμενη δύναμη. Αυτού του τύπου ο αισθητήρας έχει εφαρμογές σε on-site μετρήσεις, όπου τοποθετείται ως λεπτό υμένιο πάνω στο υπό μελέτη υλικό και λαμβάνονται αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο και σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εργαστηριακές μετρήσεις προσδιορισμού του σημείου στο οποίο το υλικό υφίσταται ρήξη ή μόνιμη παραμόρφωση, δηλαδή προσδιορισμού του ελαστικού ορίου του υλικού [19].

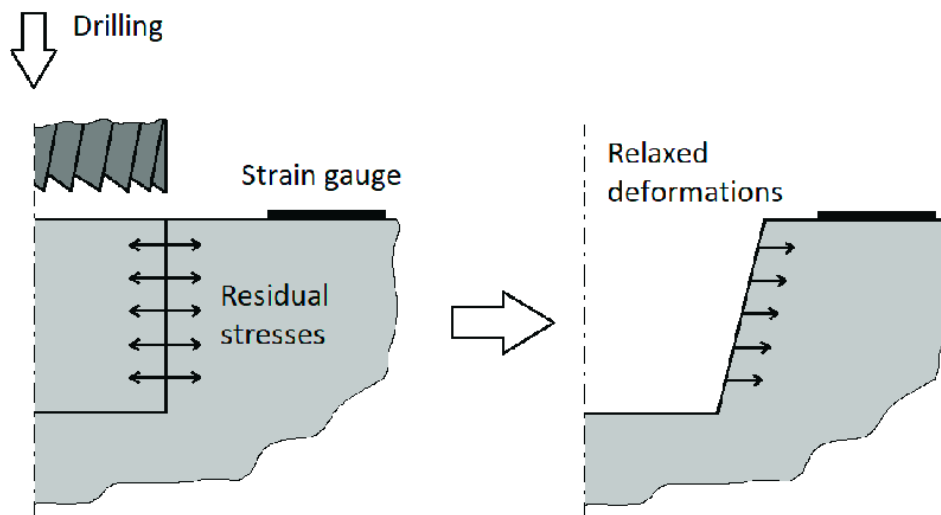


Εικόνα 11 : Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα strain gauge [19].

Η επόμενη τεχνική καταστροφικών μετρήσεων ονομάζεται tensile testing ή αλλιώς tension testing. Αυτή αποτελεί μία από τις πιο απλές μετρήσεις, κατά την οποία το δείγμα υφίσταται ελεγχόμενη μηχανική τάση, μέσω της άσκησης μίας ελεγχόμενης δύναμης, για τον προσδιορισμό των ορίων της μηχανικής αντοχής του. Η μηχανική τάση αυτή ασκείται μέχρι και το σημείο διάσπασης της δομής του υλικού, οπότε και λαμβάνεται ένα στιγμιότυπο της ασκούμενης δύναμης. Επίσης, η δύναμη ασκείται σε διαφορετικές διευθύνσεις του υλικού για τον έλεγχο της μηχανικής αντοχής του σε όλους τους άξονες γεωμετρίας της κρυσταλλικής δομής, ειδικά στην περίπτωση των ανισοτροπικών υλικών, καθώς και την απόκριση του υλικού σε τάσεις εφελκυσμού, θλίψης και στροφικές τάσεις. Μερικά χαρακτηριστικά του δείγματος που μετρώνται με την παραπάνω μέθοδο αποτελούν ο δείκτης Young, ο οποίος περιγράφει την εφελκυστική και θλιπτική αντοχή ενός υλικού κατά μήκος του κύριου άξονα της δομής του, ο λόγος Poisson, ο οποίος μετράει την παραμόρφωση στον άξονα κάθετο της ασκούμενης δύναμης, το yield strength, δηλαδή το σημείο στο οποίο το υλικό χάνει τις ελαστικές ιδιότητές του και υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση στη δομή του, περνώντας στην πλαστική περιοχή άσκησης μηχανικών τάσεων, καθώς και το strain hardening, το οποίο περιγράφει την αύξηση της μηχανικής αντοχής του υλικού μετά το σημείο πλαστικής παραμόρφωσης. Όλα αυτά τα μέτρα είναι ιδιαίτερα σημαντικά στη βιομηχανία, όπου αναμένεται η ανάπτυξη υψηλών δυνάμεων και τάσεων στα χρησιμοποιούμενα υλικά και είναι σημαντική η διατήρηση της μηχανικής τους αντοχής. Μερικά παραδείγματα αποτελούν τα δείγματα προς χρήση σε υποδομές, όπως γέφυρες, κεραίες και δρόμους, όπου υπάρχει συνεχή ανάπτυξη μηχανικών τάσεων, όπως θλιπτικές τάσεις λόγω διέλευσης οχημάτων, στροφικές λόγω των δυνάμεων του αέρα και εφελκυστικές τάσεις σε περιπτώσεις μηχανημάτων υποστήριξης σε εργοτάξια. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ απλή, γρήγορη και φθηνή,

ενώ η απαιτούμενη τεχνογνωσία είναι ελάχιστη, τόσο για τη διεξαγωγή του πειράματος, όσο και για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το περιορισμένο εύρος μετρούμενων μεγεθών και ιδιοτήτων, καθώς και η αναγκαία καταστροφή του δοκιμίου σε κάθε μέτρηση [20].

Η τελευταία καταστροφική δοκιμή λέγεται drill hole testing ή hole drilling method. Αποτελεί μία μέθοδο για τη μέτρηση παραμέουσων τάσεων στα υλικά, δηλαδή την παρουσία παραμορφώσεων στη κρυσταλλική δομή των υλικών ως αποτέλεσμα ασκούμενων τάσεων, οι οποίες παραμένουν μετά την αφαίρεση αυτών των μηχανικών τάσεων. Οι παραμένουσες τάσεις τείνουν να επηρεάζουν αρνητικά τη συνολική μηχανική αντοχή του υλικού, το ελαστικό όριό του καθώς και την αντοχή του σε απότομη ανάπτυξη δυνάμεων, τάσεων και σε διάβρωση με την παρατεταμένη χρήση του. Η τεχνική αυτής της μεθόδου βασίζεται στη χρήση κάποιου μηχανήματος όπως ένα τρυπάνι ακριβείας για τη δημιουργία μίας οπής στην επιφάνεια του υλικού προς μελέτη. Όταν αυτό γίνεται σε ένα δείγμα που παρουσιάζει παραμένουσες τάσεις και αφού δημιουργηθεί η τρύπα, η κρυσταλλική δομή του υλικού διατάσσεται σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας, η οποία περιέχει παραμορφώσεις και ατέλειες γύρω από την περιοχή της αρχικής παραμένουσας τάσης. Αυτές οι παραμορφώσεις μπορούν να μετρηθούν με οπτικά μέσα ή, πιο συχνά, με αισθητήρες όπως ο strain gauge. Με βάση αυτές τις μετρήσεις δημιουργείται ένας πίνακας συντελεστών που αντιστοιχούν στην τρισδιάστατη δομή του υλικού στην περιοχή ενδιαφέροντος και προκύπτει ένα μαθηματικό σύστημα, του οποίου η επίλυση δίνει ως αποτέλεσμα ένα διάνυσμα των αρχικών παραμέουσων τάσεων στο υλικό. Αυτή η μέθοδος λέγεται ολοκληρωτική μέθοδος και η επίλυση του συστήματος των πινάκων γίνεται με κάποιο πρόγραμμα, όπως το Matlab ή το FEM. Τα αποτελέσματα, δηλαδή το διάνυσμα των παραμέουσων τάσεων, ερμηνεύονται με βάση τους δύο κύριους άξονες ισοτροπίας του υλικού, οπότε και οι μετρούμενες τάσεις που παράγονται λέγονται διαξονικές. Κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απλότητα της μετρητικής διαδικασίας, η ταχύτητα προετοιμασίας του πειράματος, η δυνατότητα χρήσης του σε πολλαπλά υλικά και δοκίμια, καθώς και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Λόγω αυτής της δυνατότητας μέτρησης μεγάλου πλήθους δοκιμίων, η τεχνική drill hole testing βρίσκει μεγάλο εύρος εφαρμογών στη βιομηχανία, σε πολλαπλούς τομείς όπως αεροναυπηγική, τεχνολογία υποδομών, μηχανήματα υψηλής ακριβείας και άλλα [21].



Εικόνα 12 : Αρχή λειτουργίας της μεθόδου drill hole testing [21].

1.2.3 Πρότυπα

Στη σύγχρονη βιομηχανία, είναι καθιερωμένο ένα σύνολο προτύπων και κανονισμών, με σκοπό τη συνέπεια και επαναληψιμότητα των διαφόρων δραστηριοτήτων, καθώς και η καθιέρωση μιας κοινής βάσης κανόνων για τις ενέργειες και ασχολίες των διαφόρων φορέων. Με επεκτάσεις σε διάφορους τομείς, ακόμα και εκτός της βιομηχανίας, τα πρότυπα καλύπτουν ένα σύνολο παραμέτρων, στις οποίες ορίζουν όρια και βάσεις και τα οποία πρέπει να τηρούνται κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας μίας εγκατάστασης ή ενός έργου. Αυτή η επισημοποίηση των λειτουργιών και η αυστηρότητα των κανονισμών είναι αποτέλεσμα πολλών σφαλμάτων και κινδύνων ανά τα χρόνια, τα οποία έχουν στοιχίσει χρήματα, χρόνο και ανθρώπινο δυναμικό, οπότε τα πρότυπα αποτελούν μία αναγκαία συνθήκη για την κρίση μίας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος ως κατάλληλα. Τα πρότυπα έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών και καθένα αφορά μία συγκεκριμένη δραστηριότητα ή έναν τομέα της βιομηχανίας. Μπορεί να χωρίζονται σε εθνικά ή ευρωπαϊκά πρότυπα, πρότυπα ανά χώρα ή πρότυπα επιβαλλόμενα από έναν αρμόδιο φορέα που ελέγχει την συγκεκριμένη δραστηριότητα. Είναι σημαντικό να υπάρχουν διαπιστευμένοι φορείς με την τεχνογνωσία και την απαραίτητη τεχνολογία, ώστε να προβούν στις απαραίτητες δοκιμές και ελέγχους και να κριθεί αν το κάθε έργο πληροί τις προδιαγραφές των προτύπων που εφαρμόζονται. Για αυτό και ο τομέας του Steel Health Monitoring, ως μία λύση στο πρόβλημα ελέγχου δειγμάτων χάλυβα, έχει αναπτυχθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια. Το πλήθος αισθητήριων τεχνολογιών και τρόπων μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα σε εργαστήρια και αρμόδιους φορείς να πραγματοποιήσουν τους απαραίτητους ελέγχους και να χαρακτηρίσουν τα δείγματα χάλυβα ως προς ένα πλήθος παραμέτρων του. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτών των αισθητήρων είναι δυνατή η πιο ενδελεχής μέτρηση και ανάλυση περισσότερων χαρακτηριστικών των δοκιμίων, αλλά καθίσταται δυνατή και η δοκιμή για εφαρμογές που απαιτούν μικρότερο περιθώριο σφάλματος και υψηλότερη ακρίβεια.

Εκτός από τα πρότυπα για τις κατασκευές και τη βιομηχανία, υπάρχουν ανάλογα πρότυπα για τους ίδιους τους αισθητήρες. Αυτού του είδους τα πρότυπα είναι διαφορετικά από τα προηγούμενα και έχουν σκοπό να συγκρίνονται νέοι αισθητήρες με άλλα, προϋπάρχοντα και διακριβωμένα συστήματα, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία τους. Αυτή η σύγκριση γίνεται με βάση ένα εθνικό πρότυπο, δηλαδή μία πειραματική διάταξη που μετράει με ακρίβεια ένα φυσικό μέγεθος, όπως ο χρόνος, για τον οποίο τα μοντέρνα συστήματα έχουν ακρίβεια της τάξης του $10^{(-21)}$, ή η θερμοκρασία, η οποία αποτελείται από 17 κλίμακες που μετρούν τη θερμοκρασία πήξης και τήξης διαφόρων υλικών με γνωστές φυσικές ιδιότητες. Κάποια βασικά μεγέθη δεν έχουν εθνικό πρότυπο συσχετισμένο με την βασική τιμή τους, όπως η μάζα, αλλά συσχετίζονται με άλλα επιβεβαιωμένα μεγέθη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της μάζας η συσχέτιση γίνεται με το γινόμενο h^*N . Ύστερα, παρεμβάλλονται ενδιάμεσα πρότυπα, δηλαδή διακεκριμένες αισθητήριες

διατάξεις, των οποίων το αποτέλεσμα έχει ελεγχθεί ως προς την ακρίβειά του και πρότυπα μεταφοράς, δηλαδή γνωστά υλικά ή μεγέθη, των οποίων οι τιμές είναι συγκεκριμένες και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προς εξέταση αισθητήρων. Με τη χρήση των παραπάνω εργαλείων και προτύπων, ένας καινούργιος αισθητήρας πρέπει να ελεγχθεί σε ένα διακεκριμένο εργαστήριο δοκιμών και μετρήσεων. Αυτό το εργαστήριο είναι ειδικά κατασκευασμένο με βάση διαφορετικά πρότυπα με σκοπό την ακριβή και χωρίς σφάλματα μέτρηση και αξιολόγηση ενός αισθητήριου συστήματος. Γίνεται μέτρηση διαφόρων μεγεθών με τον αισθητήρα, ανάλογα φυσικά με την κατασκευή και λειτουργία του, και ύστερα, συγκρίνονται οι τιμές των αποτελεσμάτων με τις γνωστές τιμές των προτύπων, ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα σχετικά με την απόκλιση της μέτρησης από την πραγματική τιμή και την αξιολόγηση του αισθητήρα ως κατάλληλου ή μη κατάλληλου. Είναι σημαντικό τα εργαστήρια μετρήσεων και δοκιμών να έχουν σταθερές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ροή αέρα, να διαθέτουν έλεγχο κραδασμών με κατάλληλα επίπεδα απόσβεσης και να έχουν τουλάχιστον ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής προστασίας, ώστε να αποφευχθεί η επίδραση αυτών των παραμέτρων στις μετρήσεις, για τις οποίες χρειάζεται εξαιρετικά μεγάλος βαθμός ακριβείας.

Κύριο ενδιαφέρον σε αυτήν την εργασία έχει η μέθοδος μέτρησης παραμένουσων τάσεων και ανίχνευσης μικροδομής μέσω των μαγνητικών ιδιοτήτων του δείγματος, δηλαδή μη καταστροφικές δοκιμές. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη χρήση μαγνητικών αισθητήρων, τη μέτρηση μαγνητικού πεδίου τοπικά στο δείγμα και ανάλυση της απόκρισής τους. Περισσότερες τέτοιες διατάξεις και εφαρμογές, καθώς και η βασική αρχή λειτουργίας αυτών των μετρήσεων θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο [22].

1.3 Υπάρχουσες Διατάξεις Μαγνητικής Μέτρησης Υλικών

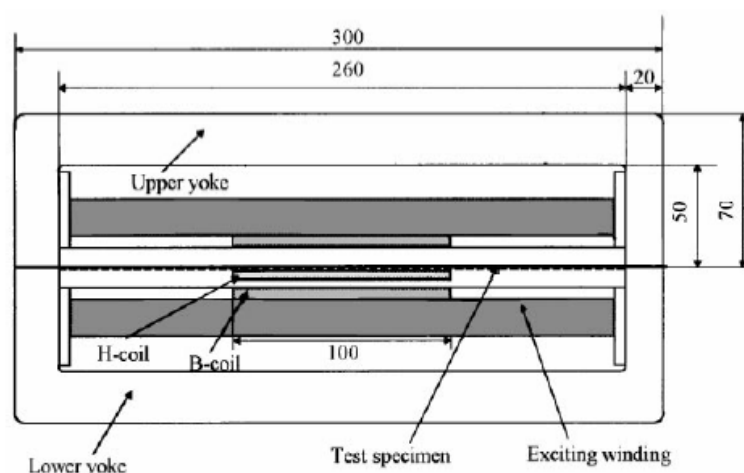
Η διάταξη που αποτελεί κύριο ενδιαφέρον της εργασίας για το χαρακτηρισμό των δειγμάτων χάλυβα είναι η διάταξη του Single Sheet Tester (SST), η οποία θα αναλυθεί πιο λεπτομερώς ως προς την κατασκευή και λειτουργία του με βάση βιβλιογραφικές πηγές. Σε αυτό το πλαίσιο, θα γίνει μία αναφορά στις υπάρχουσες τοπολογίες και διατάξεις του SST. Ακολουθώντας, θα αναφερθούν οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στη χρήση και ανάλυση των παραπάνω μεθόδων, καθώς και ορισμένοι τρόποι βελτίωσης της μέτρησης και ανάλυσης των δοκιμών.

1.3.1 Εισαγωγή στον Single Sheet Tester

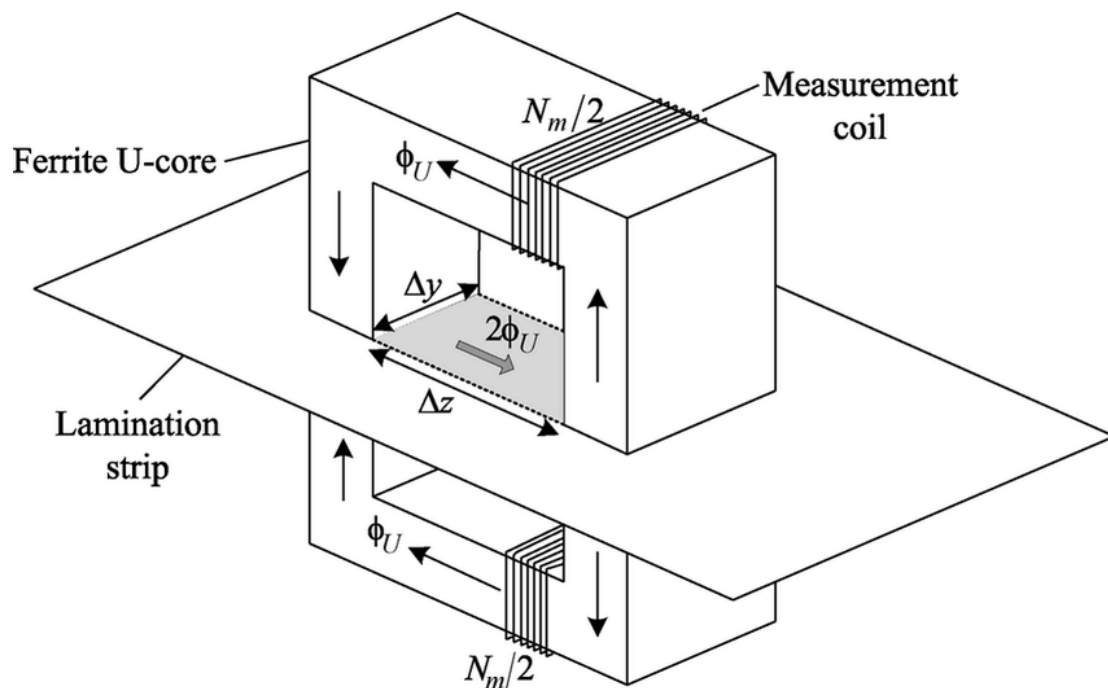
Μία από τις μαγνητικές διατάξεις μη καταστροφικών δοκιμών χάλυβα και η βασική διάταξη, στην οποία γίνεται μελέτη σε αυτήν την εργασία είναι η διάταξη Single Sheet Tester. Κύριο πλεονέκτημα του SST είναι ότι οι μετρήσεις και η κατασκευή της διάταξης είναι σε μεγάλο βαθμό τυποποιημένες, οπότε ενδείκνυνται για τον χαρακτηρισμό δοκιμών.

Για τη διάταξη SST συνήθως χρησιμοποιούνται δύο yokes (το καθένα σαν τετράγωνο από το οποίο λείπει μία πλευρά) από σιδηρομαγνητικό υλικό, τα οποία έχουν κατάλληλες διαστάσεις, ώστε η διάταξη των πηνίων του SST και του δοκιμίου να εφάπτεται στο εσωτερικό τους. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι κάποιο κράμα φερρίτη με μεγάλη περιεκτικότητα σε σίδηρο, νικέλιο, ψευδάργυρο ή μαγγάνιο. Με τη χρήση των yokes, το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει γύρω από το δοκίμιο, μαζεύοντας τις μαγνητικές γραμμές, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες, να ενισχυθεί το μαγνητικό πεδίο που διέρχεται από το δείγμα και να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα της διάταξης. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται μία σταθερή βάση για το τύλιγμα των πηνίων, η οποία μπορεί είναι φτιαγμένη από ένα μη αγώγιμο υλικό χωρίς μαγνητικές ιδιότητες για να μην επηρεάζει τη μέτρηση, όπως το πλαστικό. Πάνω σε αυτό τυλίγονται 2 πηνία συνήθως, ένα πηνίο λήψης εσωτερικά, κοντά στο δείγμα και ένα πηνίο διέγερσης εξωτερικά, συνήθως πάνω από το πηνίο λήψης. Τα πηνία είναι φτιαγμένα από χάλκινο σύρμα με το πηνίο διέγερσης να απαιτεί σύρμα μεγαλύτερης διατομής, της τάξης του 1mm, ώστε να εξασφαλιστεί η αντοχή του σε ρεύματα μέχρι και 10A κατά τις μετρήσεις, ενώ για το πηνίο λήψης χρησιμοποιείται μικρότερη διατομή σύρματος, προκειμένου να είναι «ευαίσθητο» ακόμη και σε μικρές αλλαγές του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος των σπειρών του πηνίου λήψης σε σχέση με το πηνίο διέγερσης καθορίζει την ευαισθησία της μέτρησης, καθώς όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο λόγος τόσο πιο ενισχυμένο λαμβάνεται το σήμα λήψης (όπως αντίστοιχα συμβαίνει στους μετασχηματιστές). Ο λόγος, λοιπόν, για τον οποίο

το πηνίο λήψης διαθέτει αρκετά περισσότερες σπείρες από αυτό της διέγερσης αφορά στην ενίσχυση του σήματος λήψης, έτσι ώστε να ληφθεί ένα σήμα αρκετά μεγάλου πλάτους για να είναι δυνατή η ανάλυσή του. Μάλιστα, σκοπός αυτής της εργασίας είναι η πειραματική μέτρηση διατάξεων με διάφορες τιμές λόγου σπειρών μεταξύ πηνίων διέγερσης και λήψης. Έπειτα, το υλικό προς μελέτη, το οποίο έχει συγκεκριμένες διαστάσεις, μετρημένες εκ των προτέρων, ώστε να εφάπτεται στο εσωτερικό της διάταξης του SST τοποθετείται στο εσωτερικό της πλαστικής βάσης, ανάμεσα στα πηνία και τα δύο yokes. Κάποια παραδείγματα διαστάσεων για δοκίμια αποτελούν τα 50x50cm, δηλαδή τετράγωνο, αλλά και 50x10cm, δηλαδή ορθογώνιο με την μία πλευρά πολύ μεγαλύτερη. Ιδανικά, το πάχος του δοκιμίου θα είναι αρκετά λεπτό, ώστε η μέτρηση να γίνεται σε όλο τον όγκο και να μην επηρεάζεται από το επιδερμικό φαινόμενο, όπως αυτό εξηγήθηκε με τη σχέση (1.10) και το δοκίμιο θα βρίσκεται εξ ολοκλήρου στο εσωτερικό της διάταξης του SST, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες μαγνητικών γραμμών. Ύστερα, τα δύο yokes τοποθετούνται εκατέρωθεν του δοκιμίου και κλείνουν στο εσωτερικό τους την βάση με τα πηνία και το δείγμα, έτσι κλείνοντας τη μαγνητική διαδρομή και εξασφαλίζοντας ότι όλες οι μαγνητικές γραμμές από το πηνίο διέγερσης θα διέρχονται μέσα από το υλικό προς μελέτη, το οποίο πλέον λειτουργεί ως πυρήνας για τη διάταξη. Μετά, στο πηνίο διέγερσης εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα της τάξης των 1-10A, ανάλογα την εφαρμογή και συχνότητας όσο πιο χαμηλή γίνεται για την αποφυγή ανάπτυξης δινορευμάτων, αλλά συνήθως της τάξης των 0,1-5Hz. Αυτό το εναλλασσόμενο ρεύμα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου από το πηνίο, το οποίο προκαλεί μία μαγνητική ροή στο σιδηρομαγνητικό δοκίμιο. Αυτό το τελευταίο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την ανάπτυξη ενός ρεύματος εξ επαγωγής στο πηνίο λήψης και, επομένως, μίας τάσης στα άκρα του πηνίου αυτού. Αυτή η τάση αποτελεί το σήμα εξόδου της διάταξης SST και τη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας του δοκιμίου. Έτσι, η απόκριση αυτή μπορεί να αναλυθεί με τη χρήση ενός παλμογράφου ή με την ολοκλήρωσή της, μέσω ενός κυκλώματος ολοκληρωτή, για την εξαγωγή του βρόχου υστέρησης [23], [24].



Εικόνα 13 : Παράδειγμα διάταξης SST [23].



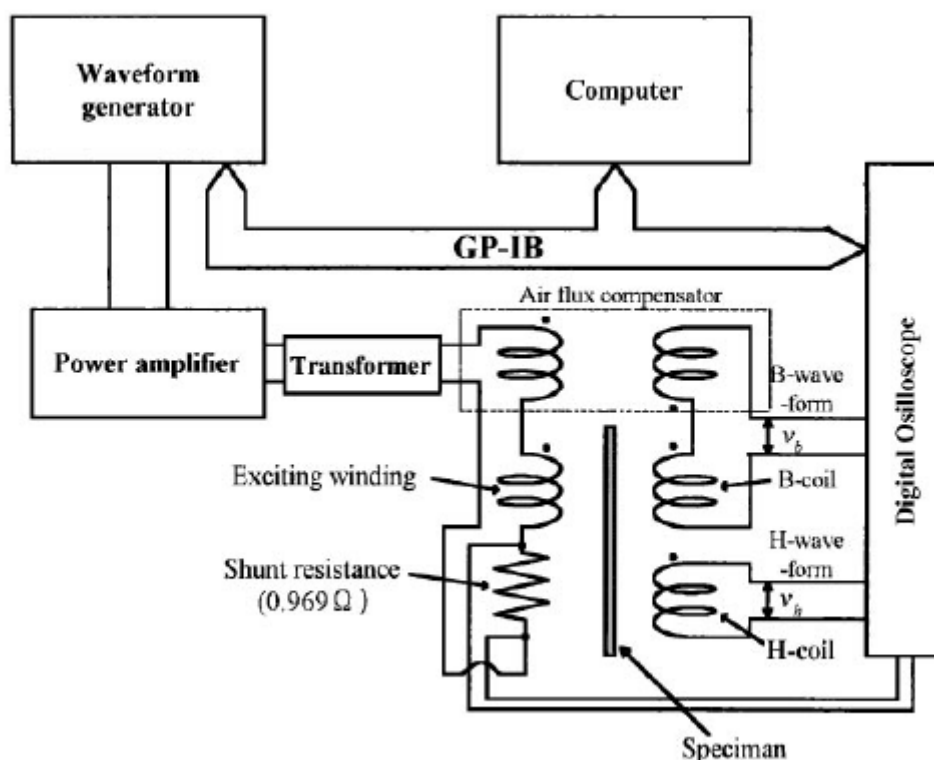
Εικόνα 14 : Διάταξη SST με την προσθήκη των 2 yokes [24].

Η βασική χρήση ενός single sheet tester είναι η μέτρηση μαγνητικών ιδιοτήτων και παραμέτρων ενός δοκιμίου από χάλυβα ή άλλο μέταλλο με μαγνητικές ιδιότητες, το οποίο προορίζεται για βιομηχανική χρήση. Με βάση αυτές τις μαγνητικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα λαμβάνονται στοιχεία για την εσωτερική δομή του υλικού και εντοπίζονται τυχόν ατέλειες στη μικροδομή του, οι οποίες πιθανόν να αποτελέσουν πρόβλημα σε βιομηχανική κλίμακα, όπου ασκείται πίεση και το μέταλλο υφίσταται καταπόνηση. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού μεταβάλλεται και αλλάζει τιμή σε περιοχές ατέλειας της μικροδομής, καθώς η απώλεια ατόμων σε σημεία της κρυσταλλικής δομής του έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη μαγνητικών διπόλων για την απόκριση σε μεταβολές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Να σημειωθεί πως, εκτός από τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μαγνητικής διαπερατότητας και βρόχου υστέρησης, δηλαδή μεγέθη σχετικά με την μικροδομή του υλικού, σημαντική επίσης είναι η απώλεια ισχύος οφειλόμενη στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Σε περίπτωση χρήσης του χάλυβα ως μαγνητικού πυρήνα σε μετασχηματιστή για παράδειγμα, ή κάποια παρόμοια εφαρμογή, είναι κρίσιμα τα αναπτυσσόμενα δινορεύματα ή οι απώλειες του μαγνητικού πεδίου. Ταυτόχρονα, η χρήση των 2 ηλεκτρομαγνητικών yokes στην κατασκευή εξασφαλίζει τη κλειστή διαδρομή μαγνητικών γραμμών στο κύκλωμα και, επομένως αυξάνει τη διακριτική ικανότητα της συνολικής διάταξης και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Τέλος, λόγω των προκαθορισμένων διαστάσεων του SST και των δειγμάτων του είναι δυνατή η τυποποιημένη και γρήγορη μέτρηση μεγάλου αριθμού δοκιμίων, με πολύ μικρή απόκλιση στις συνθήκες κάθε μέτρησης, εξασφαλίζοντας έτσι την ορθότητα και επαναληψιμότητα των δοκιμών [23], [24].

1.3.2 Μετρητικές Μέθοδοι και διατάξεις

Η μέτρηση με τη διάταξη SST βασίζεται στις σιδηρομαγνητικές ιδιότητες του δοκιμίου και στην δυνατότητα διέλευσης μαγνητικών γραμμών στο εσωτερικό του. Το σήμα εξόδου λαμβάνεται με τη χρήση του πηνίου λήψης, το οποίο διεγείρεται από το μαγνητικό πεδίο που διέρχεται μέσω του δείγματος στο εσωτερικό της διάταξης και παράγει ένα ρεύμα εξ επαγωγής (και επομένως την αντίστοιχη τάση). Για τη μέτρηση του ρεύματος αυτού και, επομένως, του μαγνητικού πεδίου τοπικά στο δείγμα, υπάρχουν δύο βασικές διαφορετικές μέθοδοι με τις διατάξεις SST, όπως αυτές αναφέρονται στην βιβλιογραφία, οι οποίες είναι η μέθοδος H-Coil και η μέθοδος magnetizing current.

Η πρώτη μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος H-Coil. Αυτή χρησιμοποιείται πιο σπάνια και μετρά την πυκνότητα μαγνητικής ροής B και το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο H μέσω των αναπτυσσόμενων τάσεων σε 2 πηνία που τοποθετούνται στο yoke στη θέση του πηνίου λήψης. Μετρώντας τις κυματομορφές τάσης στα πηνία H και B ξεχωριστά, μπορούν να υπολογιστούν τα αντίστοιχα μεγέθη και, τελικά, να υπολογιστεί η ολική απώλεια ισχύος οφειλόμενη στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Συχνά, το πηνίο λήψης, δηλαδή H-Coil τοποθετείται κοντά στο δείγμα για καλύτερη ακρίβεια μέτρησης και το πηνίο διέγερσης, δηλαδή το B-Coil εξωτερικά του πηνίου λήψης. Έπειτα, ελέγχεται ο λόγος σπειρών μεταξύ των δύο πηνίων και, λόγω του νόμου Faraday (στον οποίο θα γίνει αναφορά παρακάτω), το σήμα διέγερσης περνάει μέσω του σιδηρομαγνητικού υλικού και των δύο πηνίων, όπως σε έναν μετασχηματιστή, και στην έξοδο λαμβάνεται μία ενισχυμένη απόκριση τάσης.



Εικόνα 15 : Πλήρης διάταξη μέτρησης με τη μέθοδο H-Coil [25].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην παραπάνω διάταξη έχουν τα πηνία διέγερσης και λήψης, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται το υλικό προς μέτρηση, η γεννήτρια συχνοτήτων, ο ενισχυτής ρεύματος και η έξοδος που οδηγείται σε έναν παλμογράφο για ανάλυση του σήματος και περαιτέρω μελέτη.

Η άλλη μέθοδος είναι γνωστή ως Magnetizing current method. Σε αυτήν υπολογίζεται την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω των περιελίξεων του πηνίου διέγερσης, της έντασης του ρεύματος διέγερσης και του μήκους της μαγνητικής διαδρομής, την οποία διανύει η μαγνητική ροή. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται η ολική απώλεια ισχύος. Βέβαια, μία πιο μοντέρνα προσέγγιση σε αυτή τη μέθοδο αντικαθιστά τα B και H πηνία, καθώς και το πηνίο διέγερσης, και η διέγερση γίνεται με ένα δευτερεύον πηνίο B, ώστε η επαγόμενη τάση να είναι η ίδια με αυτή στο κύριο πηνίο B. Με αυτόν τον τρόπο, η υπολογιζόμενη απώλεια ισχύος οφείλεται στις απώλειες σιδήρου του αισθητήρα, δηλαδή του σιδηρομαγνητικού yoke. Με αυτόν τον τρόπο, αφαιρούνται αυτές οι απώλειες από τις ολικές που υπολογίστηκαν με την αρχική μέθοδο και το τελικό αποτέλεσμα είναι μόνο οι απώλειες οφειλόμενες στο υλικό προς μελέτη.

Παρακάτω παρατίθενται μερικοί χρήσιμοι τύποι για τη μέθοδο H-Coil

$$B = c * \int_{-\infty}^{+\infty} u_b dt \quad (1.12)$$

$$H = \frac{1}{N_h * A * \mu_0} * \int_{-\infty}^{+\infty} u_h dt \quad (1.13)$$

όπου U_b και U_h οι αναπτυσσόμενες τάσεις στα πηνία B και H αντίστοιχα. B είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής και H η ισχύς μαγνητικού πεδίου στο δείγμα. $N_h A$ είναι η επιφάνεια των σπειρών του πηνίου H και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η οποία είναι σταθερά ίση με $4\pi * 10^{-7}$ N/A².

$$P = \frac{f}{\rho} * \int_0^T (H * \frac{dB}{dt}) dt = k * \int_0^T (\int u_h dt) * u_b dt \quad (1.14)$$

όπου P είναι η ειδική απώλεια ισχύος κατά τη μέτρηση, f η συχνότητα διέγερσης και πεδίου γενικά, ρ η πυκνότητα του δείγματος και k μία σταθερά που τα συνδυάζει σε συνάρτηση με την τάση στο πηνίο H για ευκολία στην εφαρμογή του τύπου.

Μερικοί ακόμα χρήσιμοι τύποι, αυτή τη φορά για τη μέθοδο magnetizing current

$$H_m = N_{ex} * \frac{i}{l_m} \quad (1.15)$$

όπου N_{ex} οι περιελίξεις στο πηνίο διέγερσης, i το ρεύμα μαγνήτισης και l_m το μήκος μαγνητικής διαδρομής.

$$P_m = f * l * \int_0^T \frac{i^* u}{m * l_m} dt \quad (1.16)$$

όπου P είναι πάλι η ειδική απώλεια ισχύος, όπου m και l είναι η μάζα και το μήκος του δείγματος αντίστοιχα και u η τάση η οποία υπολογίζεται με βάση τον τύπο

$$u = N_{ex} * \frac{u_b}{N_b} \quad (1.17)$$

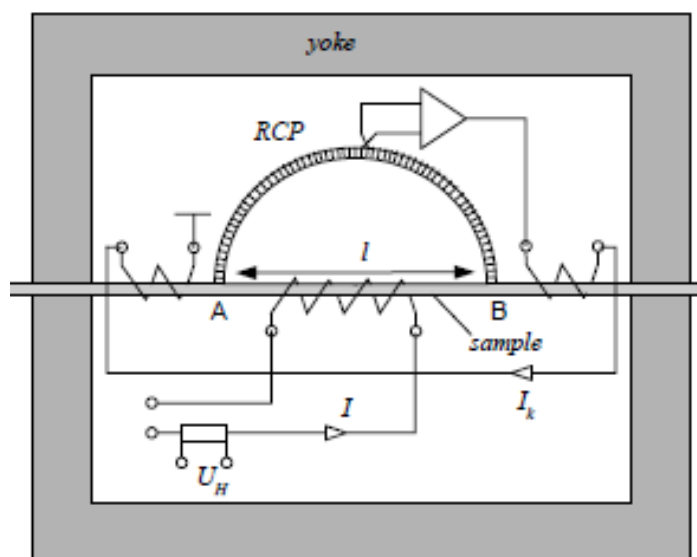
όπου u_b και N_b είναι η αναπτυσσόμενη τάση και ο αριθμός περιελίξεων στο B πηνίο από την προηγούμενη μέθοδο H Coil [25].

Λόγω της πολυπλοκότητας της μέτρησης των παραμέτρων ενός δείγματος χάλυβα ή άλλων σιδηρομαγνητικών υλικών, πολλές φορές αυτές χρειάζεται να προσδιοριστούν έμμεσα. Ειδικότερα, τέτοια δοκίμια χαρακτηρίζονται συχνά βάσει της ειδικής απώλειας ισχύος τους. Αυτό το μέτρο δείχνει την αποτελεσματικότητα του υλικού σε χρήσεις μαγνητικού πυρήνα και, με βάση αυτό και άλλες μετρήσεις πάνω σε ιδανικά

υλικά, είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα ανάλογα με τη δομή, την κατάσταση και τις ιδιότητες του υλικού. Για να μετρηθεί η ειδική απώλεια ισχύος είναι χρήσιμα και κάποια άλλα μαγνητικά μεγέθη του υλικού, όπως μαγνητικό πεδίο, μαγνητική επαγωγή και μαγνητική διαπερατότητα. Αυτές οι τιμές υπολογίζονται επίσης έμμεσα όπως αναφέρθηκε πριν με τις μεθόδους magnetizing current και H-Coil, αν και, για αυτές τις εφαρμογές, κυρίως χρησιμοποιείται η πρώτη. Η έμμεση αυτή μέτρηση είναι σχετικά απλή και δίνει στην έξοδο σχετικά μεγάλα σήματα, κάνοντας την ανάλυσή τους πιο εύκολη. Τα μειονεκτήματα είναι ότι σπάνια είναι γνωστό το μήκος της μαγνητικής διαδρομής και άλλες σημαντικές παράμετροι για υψηλή ακρίβεια μέτρησης, είναι δύσκολη η μέτρηση δυσδιάστατων δοκιμίων και απαιτείται ένα δείγμα με κλειστό σχήμα, όπως δακτύλιο ή τοροειδές.

Για αυτόν το λόγο υπάρχει η δυνατότητα άμεσης μέτρησης των μαγνητικών παραμέτρων ενός υλικού. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν συνήθως να δώσουν την ένταση μαγνητικού πεδίου, άρα B και H , τοπικά στην περιοχή που εφαρμόζεται ο αισθητήρας στο υλικό. Πιο σπάνια και με μεγαλύτερη δυσκολία μπορεί να μετρηθεί η μαγνητική ροή στην περιοχή. Για την μέτρηση έντασης μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιείται η μέθοδος H-Coil, ένας magnetoresistive sensor, ένας Hall Sensor, ή μία διάταξη γνωστή ως CRP στην οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω. Για τη μέτρηση μαγνητικής ροής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν η μέθοδος Kerr, η μέθοδος των τρυπών και η μέθοδος των βελόνων.

Προηγουμένως αναφέρθηκε η διάταξη CRP ή Chattock Rogowski Potentiometer. Αυτή ουσιαστικά αποτελείται από ένα κύκλωμα αντιστάθμισης του ρεύματος μαγνήτισης, με βάση το οποίο, το ρεύμα μαγνήτισης που περνάει από το υλικό μηδενίζεται και περνάει ολόκληρο από τον αισθητήρα. Αυτό είναι σημαντικό γιατί μέσα στον αισθητήρα έχει κατασκευαστεί μία απόσταση, την οποία και διανύει το ρεύμα μαγνήτισης, δηλαδή το μήκος μαγνητικής διαδρομής, και η οποία είναι γνωστή, άρα μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα η μέθοδος magnetizing current, σε αντίθεση με το δοκίμιο, στο οποίο πολλές φορές η απόσταση είναι άγνωστη ή μετρημένη με μικρή ακρίβεια.



Εικόνα 16 : Μία απλή διάταξη μέτρησης με χρήση του CRP [26].

Ένα σημαντικό πεδίο μελέτης και για τις δύο παραπάνω μεθόδους αποτελεί η θεωρία της σχέσης μεταξύ των σπειρών του πηνίου λήψης και διέγερσης, δηλαδή το φαινόμενο του μετασχηματιστή, το οποίο παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή και ενίσχυση της τάσης στην έξοδο της διάταξης. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα πηνίο διέγερσης, το οποίο αποτελείται από χαμηλό αριθμό σπειρών με υψηλή διατομή καλωδίου για ανοχή σε υψηλά ρεύματα, το οποίο παράγει, εξ επαγωγής, μία μαγνητική ροή, καθώς το ρεύμα ρέει στις σπείρες του. Στη συνέχεια, αυτή η μαγνητική ροή, δηλαδή οι μαγνητικές γραμμές, περνάει μέσα από κατάλληλο σιδηρομαγνητικό πυρήνα (στην περίπτωση του SST είναι το δοκίμιο), του οποίου η μαγνητική διαπερατότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αέρα, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες μαγνητικών γραμμών εκτός του συστήματος. Αυτή η μαγνητική ροή φτάνει διεγείρει, τελικά, το πηνίο λήψης, το οποίο αποτελείται από πολλές σπείρες με μικρή διατομή. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, η τάση που λαμβάνεται στην έξοδο του πηνίου αυτού είναι ανάλογη με τον αριθμό των σπειρών του πηνίου εξόδου, σύμφωνα με τον τύπο

$$\varepsilon = - N * \frac{\Delta\phi}{\Delta\tau} \quad (1.18)$$

όπου ε η τάση εξόδου

N ο αριθμός σπειρών στο πηνίο που δέχεται τη μαγνητική ροή

και $\Delta\phi/\Delta\tau$ η στιγμιαία μεταβολή μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του συστήματος

Προφανώς λοιπόν, όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος σπειρών του πηνίου λήψης προς το πηνίο διέγερσης, τόσο μεγαλύτερη ενίσχυση θα υπάρχει στην τάση εξόδου, άρα και μεγαλύτερη ευαισθησία στο αισθητήριο σύστημα, καθώς θα μπορεί να ενισχύει αρκετά τις μεταβολές τάσης από μικρότερες μεταβολές στο σήμα εισόδου, ώστε να

είναι παρατηρήσιμες. Όπως, επίσης, αναφέρθηκε προηγουμένως, μεγαλύτερος λόγος ενίσχυσης σημαίνει πως αυξάνεται η διακριτική ικανότητα της διάταξης για χαμηλές συχνότητες πεδίου διέγερσης, οπότε γίνεται δυνατή η μέτρηση σε αυτές τις συχνότητες, οι οποίες ενδείκνυται για μελέτη μαγνητικών χαρακτηριστικών, καθώς οι μαγνητικές γραμμές μπορούν να διεισδύσουν σε μεγαλύτερο βάθος στον όγκο του υλικού, όχι μόνο επιφανειακά, όπως σε υψηλές συχνότητες.

Συμπαιρόνοντας, για την κατασκευή ενός SST χρειάζονται δύο ηλεκτρομαγνητικά yokes και μία βάση με τυλιγμένα δύο πηνία, το πηνίο διέγερσης και το πηνίο λήψης. Έστερα, ανάλογα με την εφαρμογή, χρειάζεται κάποιο κύκλωμα ανάλυσης του σήματος λήψης και προβολής, ώστε να λάβουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να κυμαίνεται από έναν απλό ολοκληρωτή, έναν ενισχυτή, τη διάταξη CRP που αναλύσαμε πριν, μέχρι και κάποιον πιο πολύπλοκο μικροελεγκτή, ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία. Για τα πηνία χρειάζεται απλός χαλκός, όμως όσο πιο λεπτά είναι, τόσο πιο μεγάλη ακρίβεια θα έχουμε στη μέτρηση, αλλά με πιο λεπτό καλώδιο μειώνεται η ευαισθησία του αισθητήρα και η αντοχή του σε μηχανικές τάσεις. Το electromagnetic yoke κατασκευάζεται, συνήθως, από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό με βάση το σίδηρο ή το νικέλιο, ώστε να έχει μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα από τον αέρα και, άρα, να διέρχονται από αυτό όλες οι μαγνητικές γραμμές από το υλικό. Για το κύκλωμα ανάλυσης είναι απαραίτητος συνήθως κάποιος ενισχυτής (πχ op amp), καθώς και διάφορα άλλα εξαρτήματα όπως πυκνωτές, αντιστάσεις και άλλα, καθώς και οι διάφορες καλωδιώσεις για σύνδεση μεταξύ των εξαρτημάτων, ώστε να παρεμβληθούν απλά κυκλώματα, όπως ολοκληρωτής ή κάποιο φίλτρο μεταξύ του αισθητήρα και κάποιου παλμογράφου για ανάλυση των μετρήσεων. Η ανάλυση αυτή μπορεί να κυμαίνεται από απλή αρχειοθέτηση των τιμών σε υπολογιστικά φύλλα προς περαιτέρω ανάλυση και μελέτη, μέσω κάποιου κώδικα, μέχρι την προβολή τους σε οθόνη παλμογράφου και την επιτόπου καταγραφή των τιμών ενδιαφέροντος ή ακόμα και την ολοκλήρωση του σήματος εξόδου, μέσω ενός κυκλώματος ολοκληρωτή για την εξαγωγή του βρόχου υστέρησης [26], [27].

1.3.3 Εφαρμογές της διάταξης SST

Ο αισθητήρας Single Sheet Tester έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όσον αφορά τις δοκιμές και μετρήσεις δειγμάτων σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως ο χάλυβας. Για αυτό, η ανάπτυξη και χρήση του SST και παρόμοιων μετρητικών διατάξεων γίνεται, συνήθως, στο πλαίσιο του πεδίου του Steel Health Monitoring, ενός τομέα, του οποίου κύριο αντικείμενο ενασχόλησης είναι οι μη καταστροφικές δοκιμές του χάλυβα για χρήσεις στη βιομηχανία.

Ο αισθητήρας Single Sheet Tester λειτουργεί, μετρώντας ένα τυποποιημένο δείγμα χάλυβα, του οποίου οι διαστάσεις ταιριάζουν με αυτές του αισθητήρα. Με αυτόν τον τρόπο, καθώς και με την κατάλληλη χρήση ενός διπλού ηλεκτρομαγνητικού yoke που περιβάλλει το δείγμα, διασφαλίζεται πως η μέτρηση θα είναι αντιπροσωπευτική των ιδιοτήτων του δοκιμίου. Με την πλήρη επικάλυψη του δοκιμίου από τη μετρητική διάταξη, το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει μέσω του δείγματος, άρα η μαγνητική ροή διέρχεται μέσω αυτού με ελάχιστες απώλειες στο εξωτερικό της διάταξης. Έτσι, η μέτρηση που λαμβάνεται στην έξοδο του αισθητήρα είναι αυτή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, συμπεριλαμβανομένης της κυματομορφής, καθώς και της απόκρισης πλάτους και συχνότητας σε συνάρτηση με τις παραμέτρους των μεγεθών διέγερσης. Αυτού του τύπου οι μετρήσεις έχουν το πλεονέκτημα ότι παρέχουν μία ολοκληρωμένη εικόνα για τη δομή και τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Έτσι, με βάση τη μέτρηση ενός δοκιμίου με γνωστές ιδιότητες, μπορεί να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία του αισθητήρα, καθώς και το ποσοστό σφάλματος για περαιτέρω μετρήσεις, αφού η κατασκευή της διάταξης επιτρέπει την ακριβή μέτρηση των ιδιοτήτων του υλικού. Επομένως, αν γίνει αυτό, είναι δυνατόν ο αισθητήρας να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για τη διακρίβωση άλλων αισθητήρων ή για τη μελέτη της επίδρασης συμπληρωματικών διατάξεων στις μετρήσεις, όπως για παράδειγμα, τη χρήση κλωβών Faraday, για την εξάλειψη της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε περιβάλλοντα με υψηλά παρασιτικά πεδία, λόγω ασύρματων ζεύξεων ή ροής ρεύματος σε καλώδια. Αλλιώς, όταν πιστοποιηθεί η λειτουργία του αισθητήρα, αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαπιστευμένα εργαστήρια για περαιτέρω διαδικασίες διακρίβωσης και τη μέτρηση προτύπων άλλων σιδηρομαγνητικών υλικών. Όσον αφορά τις μη καταστροφικές δοκιμές του χάλυβα και το πεδίο ενδιαφέροντος του Steel Health Monitoring, υπάρχει ένα πλήθος εφαρμογών για μαγνητικούς αισθητήρες. Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, οι διατάξεις μαγνητικών αισθητήρων, όπως ο Single Sheet Tester, ενδείκνυνται για μη καταστροφικές δοκιμές και μετρήσεις χάλυβα, καθώς δεν προκαλούν μόνιμες παραμορφώσεις και αλλαγές στη μικροδομή του υλικού κατά τη διαδικασία της μέτρησης, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, όπως δοκιμές αντοχής σε μηχανικές τάσεις, ενώ οι τα αποτελέσματα των μαγνητικών δοκιμών παρέχουν χρήσιμα στοιχεία σχετικά με την κατάσταση της μικροδομής, τις ατέλειες, τις παραμένουσες τάσεις και άλλες πολύ σημαντικές παραμέτρους για βιομηχανικές εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα, στη βιομηχανία, τα δείγματα χάλυβα που στέλνονται σε εργαστήρια για δοκιμές, προορίζονται για χρήση σε κατασκευές υποδομής, όπως δρόμους, γέφυρες, υδροηλεκτρικά φράγματα, ραδιοτηλεοπτικές κεραιές, πύργους μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικών φορτίων σπίτια και άλλες παρόμοιες εφαρμογές, όπου αναπτύσσονται υψηλές δυνάμεις και μηχανικές τάσεις, λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους των κατασκευών. Ταυτόχρονα, κατά τη διαδικασία της κατασκευής, των θεμελίων και διασυνδέσεων που αποτελούν τη βάση υποστήριξης του συνολικού φορτίου, είναι αναγκαίες διαδικασίες όπως κοπή ή συγκόλληση του χάλυβα, οι οποίες επηρεάζουν τη μικροδομή του και εμφανίζουν ατέλειες. Για αυτό, οι μετρήσεις του Single Sheet Tester έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης τέτοιων ατελειών, καθώς και τον χαρακτηρισμό της κρυσταλλικής δομής των δειγμάτων, με βάση τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής της μαγνητικής απόκρισης του δοκιμίου, όπως αυτά μετρούνται με τη διάταξη του αισθητήρα. Αυτά τα χαρακτηριστικά αποτελούν η ομοιομορφία της κυματομορφής κατά μήκος του υλικού, το ποσοστό διαταραχών στο τελικό σήμα, το πλάτος της τάσης εξόδου και η απόκριση συχνότητας. Έτσι, μπορεί να γίνει πρόληψη καταστροφικών ατυχημάτων, λόγω της δομικής αστοχίας του χάλυβα που χρησιμοποιείται, λόγω της έγκαιρης ανίχνευσης σφαλμάτων στο υλικό.

Ταυτόχρονα, σε άλλους τομείς της βιομηχανίας, ορισμένα κράματα ηλεκτρικού χάλυβα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ακριβείας, όπως μετασχηματιστές, κέντρα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, και άλλες παρόμοιες διατάξεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου χάλυβα, όπως οι απώλειες πυρήνα και η μαγνητική διαπερατότητα ή ο βρόχος υστέρησης. Με τον αισθητήρα Single Sheet Tester και τη διάταξη του ολοκληρωτή είναι δυνατές αυτές οι μετρήσεις, οπότε και ο χαρακτηρισμός του ηλεκτρικού χάλυβα ως προς την καταλληλότητά του με βάση τις απώλειες και τις ιδιότητες που παρουσιάζει. Έτσι, μπορούν να επιλεγούν κατάλληλα δείγματα για κάθε εφαρμογή, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές του κατασκευαστή ή του αντίστοιχου προτύπου, όπως είναι η μέγιστη πτώση τάσης ή ονομαστικό ρεύμα, πεδίο και μαγνητική ροή. Ακόμη, ο αισθητήρας αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των ιδιοτήτων νέων σιδηρομαγνητικών υλικών και κραμάτων, προτού αυτά χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές για να προσδιοριστεί η καταλληλότητά τους σε σχέση με ήδη υπάρχοντα υλικά [23], [24].

1.3.4 Προβλήματα και Αστοχίες των Υπάρχουσων Διατάξεων

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας του μαγνητισμού, των αισθητήρων και την ανάγκη για πιο αποτελεσματικές και ακριβείς μελέτες υλικών, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διατάξεις μέτρησης και ανάλυσης δοκιμίων χάλυβα. Κύριο ενδιαφέρον σε αυτή την εργασία έχει η προαναφερθείσα διάταξη SST. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες έχουν την ιδιότητα ότι περιβάλλουν ολόκληρο το δοκίμιο, άρα παρέχουν αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά της συνολικής δομής του υλικού. Όμως, για να γίνει μέτρηση με αυτές τις μεθόδους, χρειάζεται το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου να συμπίπτουν με τις προδιαγραφές του εκάστοτε αισθητήρα, οπότε πρέπει το δείγμα να συμμορφώνεται με τον τρόπο μέτρησης και όχι το αντίστροφο, όπως είναι και το σύνηθες. Επίσης, η κατασκευή αυτών των αισθητήρων είναι σχετικά ακριβή, απαιτώντας μεγάλη ποσότητα καλωδίων, ακριβή μέτρηση διαστάσεων και κατάλληλα κατασκευασμένο σιδηρομαγνητικών yokes. Λόγω του παραπάνω προβλήματος με τις διαφορές μεταξύ δοκιμίων, είναι πιθανό ένας αισθητήρας Single Sheet Tester να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα δοκίμιο, αλλά σε ένα διαφορετικό να χρειάζεται να κατασκευαστεί ένας άλλος, ώστε να πληροί τις προδιαγραφές των διαστάσεων. Αυτό οφείλεται ως επί των πλείστον στο γεγονός ότι αυτή η τεχνολογία είναι αρκετά καινούργια και τα σχετικά πρότυπα περί μετρήσεων και δοκιμίων δεν είναι ευρέως καθιερωμένα [28], [29].

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός δοκιμίου, παρότι είναι διαφορετικές ως προς τον τρόπο και τον χρησιμοποιούμενο αισθητήρα, έχουν μερικά κοινά σημεία, τα οποία επηρεάζουν άμεσα την μέτρηση και το αποτέλεσμα. Καταρχάς, σημαντικός είναι ο προσανατολισμός και η τοποθέτηση του αισθητήρα κατά τη μέτρηση, ειδικά στην περίπτωση του αισθητήρα Hall. Αυτό απαιτείται, γιατί η γη έχει ένα εγγενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι προσανατολισμένο στη διεύθυνση βορρά-νότου, άρα, όσο μικρή και αν είναι αυτή η παρεμβολή, επηρεάζει το σήμα εξόδου διαφορετικά ανάλογα με τον προσανατολισμό του μαγνητικού αισθητήρα. Επίσης, η τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στο δοκίμιο, στις περιπτώσεις του Hall και Fluxgate για παράδειγμα, δίνει διαφορετικά αποτελέσματα, καθώς αυτοί οι αισθητήρες μετρούν τοπικά το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή του υλικού, όχι σε όλο του τον όγκο. Κατά επέκταση αυτού, σε δοκίμια με μεγαλύτερο πάχος αναπτύσσονται επιφανειακά δινορεύματα, τα οποία παρεμβάλλονται και αλλοιώνουν τη μέτρηση, λόγω της επαγόμενης απώλειας μαγνητικής ροής.

Ταυτόχρονα, υπάρχει το ερώτημα της προτεινόμενης συχνότητας σήματος εισόδου (και άρα όλης της μέτρησης) για μαγνητικές μετρήσεις. Προφανώς, μεγαλύτερη συχνότητα σημαίνει πιο γρήγορη μέτρηση και, άρα, μεγαλύτερος όγκος δοκιμών συνολικά. Όμως, η αυξημένη συχνότητα επηρεάζει τον βρόχο υστέρησης και αυξάνει τη συχνότητα και ένταση των δινορευμάτων, τα οποία αντιστέκονται στο πεδίο διέγερσης και έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερη τιμή μαγνήτισης M από ίδιο πεδίο H , άρα έχουν τη συμπεριφορά απωλειών μαγνητικής ροής εσωτερικά του υλικού.

Ακόμη, χαμηλές τιμές συχνότητας διέγερσης δίνουν τη δυνατότητα στις μαγνητικές γραμμές να διεισδύουν βαθύτερα στον όγκο του υλικού, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές συχνότητας, η απόκριση των αισθητήρων αφορά τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δείγματος. Κρίνεται, λοιπόν, ότι η μέτρηση, για την καλύτερη δυνατή απόκριση και ποιότητα μέτρησης ως προς τα χαρακτηριστικά του υλικού γίνεται όσο πιο κοντά σε συχνότητα DC είναι δυνατό. Προφανώς, η μέτρηση με απολύτως μηδενική συχνότητα είναι αδύνατη, διότι οι μετρήσεις βασίζονται στην ιδιότητα των πηνίων να παράγουν ένα μαγνητικό πεδίο εξ επαγωγής, όταν το ρεύμα και η τάση στα άκρα τους αλλάζουν φορά. Αν η συχνότητα του σήματος εισόδου ήταν μηδενική, η εμπέδηση και μαγνητική απόκριση του πηνίου θα γινόταν μηδέν, άρα θα γινόταν το αντίστοιχο ενός βραχυκυκλώματος, οπότε το μαγνητικό πεδίο διέγερσης θα ήταν μηδενικό. Ακόμα ένα αποτέλεσμα της συχνότητας στη μέτρηση είναι η αλλαγή της έντασης του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το πηνίο διέγερσης. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη συχνότητα σημαίνει πιο γρήγορες εναλλαγές της φοράς της τάσης και ρεύματος, άρα μεγαλύτερη ένταση του πεδίου και, επομένως, μεγαλύτερη τιμή σήματος απόκρισης. Αυτό θα εξεταστεί πειραματικά μέσω των διαφόρων διατάξεων, αλλά θεωρητικά χρειάζεται μία διάταξη με αρκετά μεγάλη ενίσχυση και μικρό ποσοστό θορύβου, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση και ανάλυση αποκρίσεων σε πολύ μικρές συχνότητες κοντά στο μηδέν [30].

Ένα ακόμα σημαντικό κομμάτι των μετρήσεων αφορά τον θόρυβο κατά τη δοκιμή και ενίσχυση του σήματος, καθώς και η περαιτέρω ανάλυση του σήματος εξόδου, είτε αυτό γίνεται από κάποιον παλμογράφο, είτε μέσω της τροποποίησής του με τη βοήθεια κάποιας επιπλέον διάταξης, όπως φίλτρο, ολοκληρωτής και άλλα. Ο θόρυβος των ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων προέρχεται από διάφορες πηγές. Αρχικά, υπάρχει η περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (Electromagnetic Interference / EMI). Αυτός ο όρος περιγράφει την επίδραση του μαγνητικού πεδίου στις μετρήσεις που παράγεται από τη ροή ρεύματος μέσα από τα καλώδια που συνδέουν τα διάφορα μηχανήματα και μετρητικό εξοπλισμό στο περιβάλλον του πειράματος. Οι μετρήσεις γίνονται σε περιβάλλον εργαστηρίου, όπου πολλά εξαρτήματα και μηχανήματα βρίσκονται συνδεδεμένα στο ρεύμα και χρησιμοποιούνται ανά πάσα στιγμή. Σύμφωνα με τους βασικούς νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, κατά τη διέλευση ρεύματος μέσω ενός κλειστού καλωδίου δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το καλώδιο. Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να προκληθεί και από άλλες πηγές, όπως κεραίες, ασύρματες ζεύξεις, το πεδίο της γης και άλλα, προφανώς με διάφορα επίπεδα σοβαρότητας και έντασης του πεδίου παρεμβολής.

Εκτός του πεδίου αυτού υπάρχουν και πολλά είδη σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως χάλυβας, ασάλι και άλλα υλικά υποδομής που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Αυτά έχουν μεγαλύτερη μαγνητική διαπερατότητα από τον αέρα, οπότε υπάρχει περίπτωση κάποιες μαγνητικές γραμμές κατά τη μέτρηση να μην διέρχονται από τη διάταξη, αλλά από τα υλικά αυτά. Έτσι, υπάρχει μία σταθερή ηλεκτρομαγνητική

διαταραχή καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης, η οποία μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα, αυξομειώνοντας την τάση εξόδου.

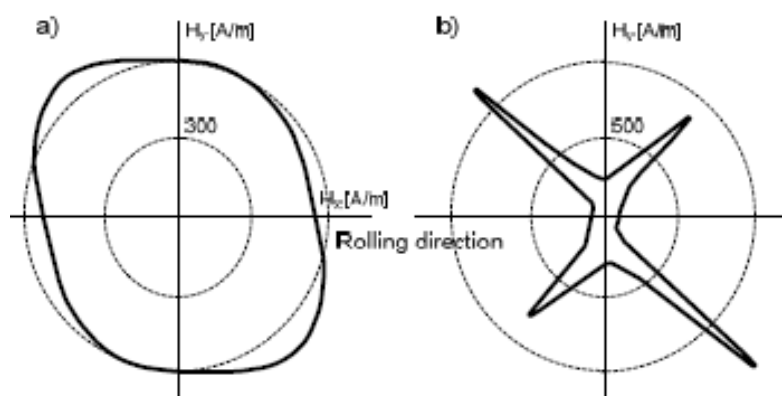
Ακόμα μία πηγή θορύβου είναι οι συνδέσεις μεταξύ των μηχανημάτων, δηλαδή γεννήτριας, τροφοδοτικού και παλμογράφου, και του προς μέτρηση αισθητήρα μαζί με την υπόλοιπη διάταξη. Λόγω του τρόπου σύνδεσης των μηχανημάτων με τον αισθητήρα, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, υπάρχει πάντα η πιθανότητα κατακάθισης σκόνης ή άλλων μονωτικών υλικών στις αγωγίμες διασυνδέσεις, αυξάνοντας, έτσι, την αντίσταση διεπαφής και μειώνοντας την τάση και το ρεύμα διέγερσης ή εξόδου, ανάλογα με το σημείο του σφάλματος [31], [32].

Επίσης, ανεξαρτήτως του θορύβου, πρέπει να ληφθεί υπόψη το ανθρώπινο σφάλμα. Οι αισθητήρες, οι διατάξεις και τα πηνία κατασκευάστηκαν με το χέρι, χωρίς τη χρήση μηχανημάτων ακριβείας. Οι μετρήσεις, ομοίως, λήφθηκαν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια προσφέρουν ο παλμογράφος, το τροφοδοτικό και η γεννήτρια. Για αυτό, είναι πιθανό να υπάρχουν σφάλματα και αβεβαιότητα στις τιμές που αναφέρονται, όπως ο ακριβής αριθμός περιελίξεων ανά τοπολογία, ιδιαίτερα όπως αυξάνεται ο αριθμός αυτών στο πηνίο λήψης. Τα πηνία μπορεί να έχουν κενά αέρος ή οι σπείρες να επικαλύπτονται σε μικρό αριθμό ανά την κατασκευή, τα οποία φαινόμενα προσθέτουν ένα ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση. Ο παλμογράφος, λόγω του θορύβου, καθιστά την ακριβή ανάγνωση του μέγιστου της τάσης εξόδου αρκετά δύσκολη, οπότε αναγκαστικά αυτή προσεγγίζεται όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τέλος, το τροφοδοτικό έχει αναλογική διεπαφή, οπότε η ανάγνωση της έντασης του ρεύματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης εμπεριέχει μια αβεβαιότητα.

Ακόμα, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανισοτροπία των δειγμάτων. Το σχήμα του δοκιμίου παραμένει σταθερό ανά τις μετρήσεις, όμως ο προσανατολισμός και η διεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου μπορεί να αλλάζουν, οπότε αλλάζει και η τιμή της ανισοτροπίας. Βέβαια, λόγω της μορφής της διάταξης, το δείγμα παραμένει σταθερό στο εσωτερικό της βάσης των δύο πηνίων, άρα η διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου παραμένει και αυτή όσο γίνεται σταθερή. Όμως, υπάρχει η πιθανότητα να κουνηθεί το δοκίμιο ή η μετρητική διάταξη, οπότε η μαγνήτιση του δείγματος διαταράσσεται και ελαττώνεται ως αποτέλεσμα της απόκλισης γωνίας από την εύκολη διεύθυνση μαγνήτισης. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται περιστροφικές απώλειες και είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις περιπτώσεις χάλυβα για ηλεκτρική χρήση, όπως για τους πυρήνες μετασχηματιστών, όπου ακόμα και μικρές απώλειες έχουν μεγάλο αποτέλεσμα στην τελική τάση εξόδου, εξαιτίας των μεγάλων πεδίων και τιμών ενίσχυσης σε αυτές τις εφαρμογές. Παρόλο που το αποτέλεσμα αυτού του σφάλματος είναι αρκετά μικρό, αν όχι αμελητέο, πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση των μετρήσεων και στις πιθανές πηγές αβεβαιότητας.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του χάλυβα, υπάρχουν δύο είδη σχετικά με την ανισοτροπία, τα οποία εξαρτώνται από το κράμα που χρησιμοποιείται και τη διαδικασία παρασκευής του χάλυβα και είναι ο μη προσανατολισμένος χάλυβας

(non-oriented) και ο χάλυβας προσανατολισμένος προς τους κόκκους της δομής του (grain-oriented). Η ανισοτροπία του χάλυβα, γενικά, συμπεριφέρεται ως γνωστόν, με τρόπο κατά τον οποίο υπάρχει μία εύκολη διεύθυνση μαγνήτισης, στην οποία το πεδίο επιφέρει τη μέγιστη δυνατή αλλαγή μαγνήτισης στο υλικό και, ανάλογα με τη γωνία προς την εύκολη διεύθυνση, στην οποία εφαρμόζεται το πεδίο διέγερσης, παρουσιάζεται μεγάλο ποσοστό απώλειας στο πεδίο μαγνήτισης. Η μέγιστη αυτή απώλεια και, επομένως, η χειρότερη γωνία εξωτερικού πεδίου διέγερσης είναι 90 μοίρες, ή κάθετη, ως προς την εύκολη διεύθυνση μαγνήτισης. Στην πρώτη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση του non oriented χάλυβα, οι διαφορές και απώλειες λόγω ανισοτροπίας είναι αρκετά μικρές, της τάξης του 10%, οπότε η χρήση αυτού του τύπου χάλυβα ενδείκνυται για χρήσεις και εφαρμογές ή μετρήσεις με στρεφόμενα μαγνητικά πεδία διέγερσης. Αυτό γίνεται, διότι τα στρεφόμενα μαγνητικά πεδία καλύπτουν όλο το φάσμα γωνιών και αξόνων του υλικού, οπότε είναι σημαντικό να μην υπάρχουν μεγάλες απώλειες ακόμη και σε διεύθυνση κάθετη της εύκολης διεύθυνσης του υλικού. Αντίθετα, ο δεύτερος τύπος χάλυβα, δηλαδή ο τύπος grain oriented, έχει αρκετά πιο πολύπλοκη μικροδομή και παρουσιάζει ισχυρά ανισοτροπικά πεδία που αντιστέκονται στη μαγνήτισή του κατά την εφαρμογή πεδίων στη δύσκολη διεύθυνση. Επίσης, εκτός από τη δύσκολη διεύθυνση στις 90 μοίρες, όπως τα υπόλοιπα υλικά, αυτού του τύπου ο χάλυβας παρουσιάζει μία ακόμη κρίσιμη γωνία στις 55 μοίρες, όπου το πεδίο ανισοτροπίας είναι αρκετά ισχυρό και παρατηρούνται μεγάλες απώλειες μαγνήτισης. Για αυτόν το λόγο, αυτός ο τύπος χάλυβα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου έχει ενδιαφέρον η κατεύθυνση και ο προσανατολισμός του δείγματος, γιατί υπάρχει μεγάλη διαφορά απόκρισης για μικρές τιμές απόκλισης της γωνίας του επιβαλλόμενου πεδίου από τον εύκολο άξονα μαγνήτισης [33]-[35].

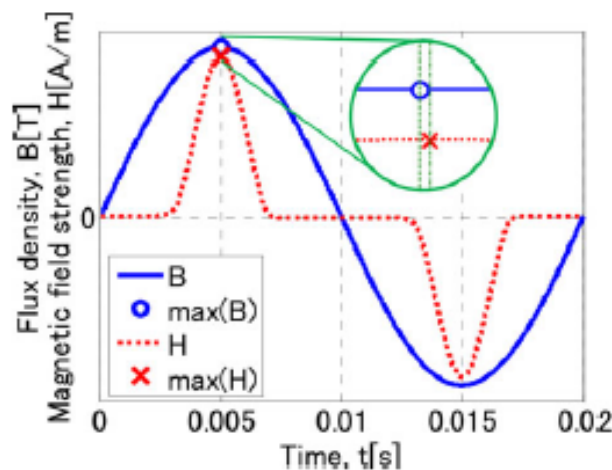


Εικόνα 17 : Διαφορετικές αποκρίσεις έντασης μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό του δείγματος και την απόκλιση από τον εύκολο άξονα σε non oriented χάλυβα α) και grain oriented χάλυβα β) [33].

Στη συνέχεια, ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε σε μετρήσεις του βρόχου υστέρησης από την απόκριση του Single Sheet Tester είναι η αναδίπλωση του βρόχου υστέρησης, δηλαδή η επικάλυψη και διασταύρωση τμημάτων του. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως σε μεγαλύτερες τιμές πεδίου και πυκνότητας

μαγνητικής ροής και έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη απόκριση στην έξοδο του αισθητήρα. Επίσης, οι μελέτες έδειξαν ότι αυτή η απώλεια είναι ανεξάρτητη του προσανατολισμού, και επομένως της ανισοτροπίας, του υλικού. Συγκεκριμένα, η απόκριση που μετρήθηκε στις μελέτες ήταν οι απώλειες σιδήρου, αλλά χρησιμοποιήθηκε η τάση εξόδου του πηνίου λήψης του αισθητήρα, οπότε το ίδιο φαινόμενο ισχύει για κάθε μέτρηση με τη χρήση Single Sheet Tester. Αυτό το σφάλμα είναι πολύ σημαντικό για μετρήσεις όπου χρειάζεται υψηλή ακρίβεια, ειδικά σε εφαρμογές όπου τα υλικά δοκιμάζονται με μεγάλες τιμές πεδίων και μαγνητικής ροής.

Προσδιορίστηκε, μετά από μελέτες, ότι η αιτία αυτής της πτώσης του σήματος απόκρισης είναι μία διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων στα πηνία B και H. Συγκεκριμένα, το σήμα διέγερσης στο πηνίο B προηγείται μερικές μοίρες φάσης από το σήμα απόκρισης στο πηνίο H και σε μεγαλύτερες τιμές πεδίου το φαινόμενο προκαλεί αισθητή αναδίπλωση του βρόχου υστέρησης και επηρεάζει την μετρούμενη απόκριση.



Εικόνα 18 : Κυματομορφές των μαγνητικών αποκρίσεων της τάσης στα πηνία B και H, καθώς και η μεταξύ τους διαφορά φάσης [36].

Αυτή η διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων στα δύο πηνία μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, οι περισσότεροι από τους οποίους δεν μπορούν να ελεγχθούν. Μερικά παραδείγματα είναι οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των περιελίξεων στα δύο πηνία, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη διαφορά της εμπέδησης μεταξύ των δύο, οι ενδογενείς χωρητικότητες του συστήματος και η παρασιτική χωρητικότητα των καλωδιώσεων και άλλων συνδέσεων [36].

Τελικά, όπως είναι λογικό, και όπως υπάρχει σε κάθε μέτρηση, παρουσιάζεται ένα επίπεδο αβεβαιότητας στις δοκιμές του πειράματος. Παρ' όλα αυτά, έγινε σημαντική προσπάθεια να κρατηθούν οι διάφορες παράμετροι σταθεροί κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων και λήφθηκε η κατάλληλη προσοχή, ώστε η ανάγνωση των αποτελεσμάτων να μην περιέχει λάθη. Εφόσον δεν είναι δυνατός ο έλεγχος εξωτερικών παραμέτρων, όπως φυσικά φαινόμενα, ο χώρος εργασίας και ο

διαθέσιμος εξοπλισμός, ένα ποσοστό αβεβαιότητας θα υπάρχει στις μετρήσεις, όμως, με κατάλληλη προετοιμασία και μελέτη, αυτή μπορεί να μειωθεί στο ελάχιστο απαραίτητο και να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις από ελεγχόμενους παράγοντες. Με αυτόν τον τρόπο, προσδίδεται στα παρακάτω αποτελέσματα ένας καλός βαθμός αξιοπιστίας και η μικρή τιμή των διακυμάνσεων που οφείλονται στην αβεβαιότητα και σε άλλους παράγοντες δεν είναι αρκετά σημαντική για να αλλοιώσει τελείως το αποτέλεσμα. Τέλος, τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν στο πλαίσιο της εργασίας βασίζονται κυρίως στη συμπεριφορά των αισθητήρων και διατάξεων ως σύνολο, χωρίς να είναι απαραίτητη η λεπτομερής ανάλυση των επιμέρους αποτελεσμάτων σε βαθμό που απαιτείται μικρότερη αβεβαιότητα.

1.4 Προτάσεις Βελτίωσης Διατάξεων

Με βάση τις παραπάνω υπάρχουσες διατάξεις και τη συνήθη χρήση τους έχουν διεξαχθεί έρευνες και έχουν προταθεί λύσεις ώστε να μειωθεί το σφάλμα των μετρήσεων, να διορθωθούν οι αστοχίες των μετρητικών μεθόδων και να βελτιωθούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες για μέτρηση και αξιολόγηση δειγμάτων χάλυβα. Παρακάτω θα γίνει μία σύντομη αναφορά σε δύο τέτοιες μεθόδους, οι οποίες αποσκοπούν στην ελάττωση του σφάλματος των μετρήσεων με τη διάταξη SST.

1.4.1 Απώλειες Σιδήρου

Αρχικά υπάρχει το θέμα των απωλειών του σιδηρομαγνητικού πυρήνα κατά τις μετρήσεις και του βαθμού της επιρροής τους στα αποτελέσματα. Σε συχνότητες μεγαλύτερες του μηδέν δημιουργούνται δινορεύματα επιφανειακά στον όγκο των σιδηρομαγνητικών υλικών, τα οποία αντιτίθενται στο επιβαλλόμενο εξωτερικό πεδίο και στη μεταβολή της μαγνήτισής τους. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας στη μορφή μαγνητικής ροής στο υλικό, οπότε και μειωμένη τάση εξόδου στο πηνίο λήψης από την ιδανική τιμή της με βάση την τάση εισόδου και τις παραμέτρους του μαγνητικού κυκλώματος. Να σημειωθεί ότι οι απώλειες ισχύος που μετρούνται με τη μέθοδο magnetizing current εμπεριέχουν τις απώλειες σιδήρου των yokes του μαγνητικού αισθητήρα, οι οποίες πρέπει να απομονωθούν και να χωριστούν από το τελικό αποτέλεσμα για καλύτερη ακρίβεια. Ένας προτεινόμενος τρόπος να γίνει αυτό είναι ο απευθείας υπολογισμός των απωλειών σιδήρου στα yokes. Για να γίνει αυτό, αφαιρούνται τα κύρια πηνία διέγερσης και λήψης και διεγείρεται ένα δευτερεύον πηνίο διέγερσης με κατάλληλο ρεύμα, έτσι ώστε η επαγόμενη τάση στο πηνίο αυτό να είναι ίδια με την τάση που επάγεται στο κύριο πηνίο διέγερσης κατά την κανονική διαδικασία μέτρησης. Τότε, οι απώλειες που οφείλονται στα σιδηρομαγνητικά yokes υπολογίζονται με τον τύπο

$$W_y = f * \int_0^T i_y * \frac{N_{ey}}{N_{by}} * U_{by} dt \quad (1.19)$$

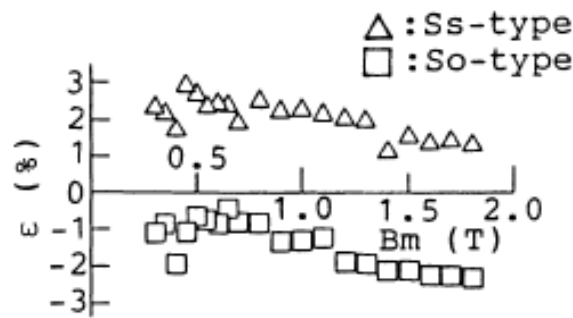
όπου W_y οι ζητούμενες απώλειες σιδήρου, f η συχνότητα διέγερσης του δευτερεύοντος πηνίου, U_{by} η επαγόμενη τάση στα πηνία διέγερσης που είναι ίδια για το κύριο και το δευτερεύον και N_{ey}/N_{by} ο λόγος των δευτερευόντων πηνίων λήψης και διέγερσης. Αφαιρώντας αυτόν τον όρο από το αποτέλεσμα της εξίσωσης (1.14) λαμβάνεται ένα βελτιωμένο αποτέλεσμα, περισσότερο αντιπροσωπευτικό του δείγματος, χωρίς την περίσσεια του παραπάνω όρου, ο οποίος αφορά μόνο τα σιδηρομαγνητικά yokes της διάταξης και που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση. Οι

απώλειες σιδήρου στα yokes αυξάνονται για μεγαλύτερες τιμές πεδίου διέγερσης και για μεγαλύτερες συχνότητες σε μέγεθος της τάξης 0,25 mW στα 0,5T πεδίου διέγερσης και 1,73mW στα 1,69T πεδίου. Οπότε το ίδιο ισχύει και για το σχετικό σφάλμα μέτρησης μεταξύ των απωλειών ενέργειας και της ίδιας μέτρησης χωρίς τις απώλειες σιδήρου, με σχετική βελτίωση σφάλματος να ανέρχεται στο 3%-4% [37].

Ακόμη ένας παράγοντας που αυξάνει την απώλεια ενέργειας έγκειται στην επεξεργασία και τη μέθοδο κατασκευής του ίδιου του yoke. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρομαγνητικά yokes που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές για πυρήνες κόβονται και γυαλίζονται, ώστε οι διαστάσεις τους να είναι συμβατές με το δείγμα και τη μέθοδο μέτρησης. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρική βραχυκύκλωση μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων ηλεκτρομαγνητικού υλικού, οπότε και τη ροή ρεύματος μεταξύ τους, φαινόμενο το οποίο αυξάνει τις απώλειες σιδήρου στον πυρήνα με μορφή θερμότητας που εκλύεται στο περιβάλλον. Ένας απλός τρόπος αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου είναι η πλήση των πυρήνων με οξύ, η οποία διαδικασία επαναφέρει την τραχύτητα στην επιφάνεια των στρωμάτων και αυξάνει την αντίσταση επαφής μεταξύ τους, λόγω της εισαγωγής κενών αέρος, το οποίο δρα ως μονωτικό μέσο για ρεύματα χαμηλής έντασης. Συγκεκριμένα, τα λεία στρώματα έχουν αντίσταση διεπαφής της τάξης των 0,3-0,5Ω, ενώ μετά την πλήση με οξύ τα τραχιά στρώματα έχουν μεταξύ τους αντίσταση της τάξης των 800-900Ω, δηλαδή περίπου 2000 φορές μεγαλύτερη αντίσταση. Όπως και πριν, το σφάλμα μεταξύ των δύο μετρήσεων, δηλαδή λείων στρωμάτων yokes και πλυμένων με οξύ, αυξάνεται όσο αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο διέγερσης. Για χαμηλά πεδία της τάξης των 0,5T το σφάλμα είναι αμελητέο, αλλά για μεγαλύτερα πεδία, της τάξης των 1,5T, το σφάλμα ανέρχεται στο 3,1%, το οποίο είναι μία σημαντική τιμή. Αυτή η συμπεριφορά για μεγαλύτερα πεδία δείχνει τη σημαντικότητα των παραπάνω μέτρων και διορθώσεων για εφαρμογές όπως μετασχηματιστές, όπου αναμένονται μεγάλες τιμές πυκνότητας πεδίου και απώλειες της τάξης του 3% είναι μη αποδεκτές λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής και διανομής του ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα, απώλεια 3% σε έναν μετασχηματιστή εξόδου 100kV σημαίνει απώλεια 3kV, και αντίστοιχου ρεύματος σε κάποιο φορτίο, η οποία τιμή είναι πολύ μεγάλη και, συνήθως, εκτός των ελάχιστων προδιαγραφών τέτοιων κατασκευών [37], [38].

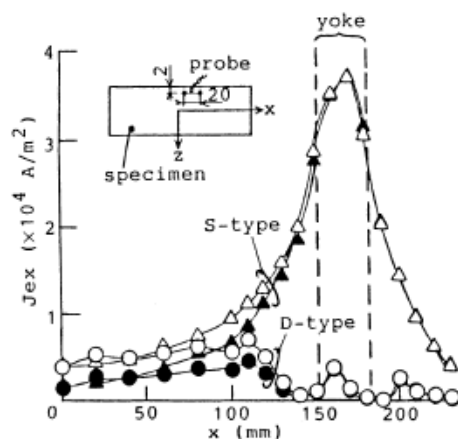
1.4.2 Κατασκευή και Μορφή των ηλεκτρομαγνητικών yokes

Μία ακόμη παράμετρος προς μελέτη, η οποία μάλιστα συμβάλλει στις απώλειες σιδήρου που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι η κατασκευή και τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών yokes που χρησιμοποιούνται στις αισθητήριες διατάξεις. Γενικά, οι πυρήνες μαγνητικών κυκλωμάτων, όπως αισθητήρες και μετασχηματιστές, φτιάχνονται από κράματα μετάλλων με βάση το σίδηρο, λόγω των ηλεκτρομαγνητικών του ιδιοτήτων. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, ο πυρήνας δεν φτιάχνεται σε ένα ενιαίο κομμάτι σιδηρομαγνητικού υλικού, αλλά από πολλαπλές λεπτές στρώσεις κολλημένες μεταξύ τους χωρίς κενά αέρος. Αυτό γίνεται για την αποφυγή ανάπτυξης ισχυρών δινορευμάτων και την απώλεια ενέργειας κατά τη μαγνήτιση του πυρήνα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, περιορίζοντας το μέγιστο βάθος διείσδυσης των δινορευμάτων στο υλικό. Όσον αφορά τα yokes που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως ο Single Sheet Tester, το αντικείμενο της εργασίας, αυτά κατασκευάζονται με παρόμοιο τρόπο. Αποτελούν ουσιαστικά ένα κομμάτι σιδηρομαγνητικού υλικού σε σχήμα Π, το οποίο παρέχει μία μαγνητική διαδρομή ανάμεσα σε δύο άκρες ενός δοκιμίου, ώστε να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα και να ληφθούν μετρήσεις αντιπροσωπευτικές των ιδιοτήτων του δοκιμίου, χωρίς απώλειες μαγνητικής ροής μεταξύ του πεδίου διέγερσης και της απόκρισης του αισθητήρα, λόγω απωλειών μαγνητικών γραμμών. Οι μελετημένες διατάξεις των yokes αναφέρουν δύο βασικές τοπολογίες, τα yokes τύπου D και τύπου S. Ο τύπος D αποτελείται από δύο yokes που περιβάλλουν το δοκίμιο από δύο αντίθετες πλευρές, συνήθως πάνω και κάτω. Ο τύπος S καλύπτει μία μόνο πλευρά του δοκιμίου και χωρίζεται σε τύπου Ss, πάνω από το δοκίμιο και So, κάτω από το δείγμα. Όπως είναι αναμενόμενο, η βέλτιστη διάταξη είναι ο τύπος D, διότι, περικλείοντας το δοκίμιο με σιδηρομαγνητικό υλικό, είναι σίγουρο ότι δεν θα υπάρξει απώλεια μαγνητικών γραμμών και, επομένως, ροής και ισχύος κατά τη λειτουργία του αισθητήρα, επομένως οι μετρήσεις αποκτούν μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τα χαρακτηριστικά του δείγματος. Στο παρακάτω γράφημα φαίνονται τα σχετικά σφάλματα των διατάξεων τύπου S με βάση τον τύπο D. Τα σφάλματα κυμαίνονται σε μία απόλυτη τιμή 2%-3%, το οποίο επηρεάζει αρκετά τις μετρήσεις, ιδιαίτερα σε δοκιμές, όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια.



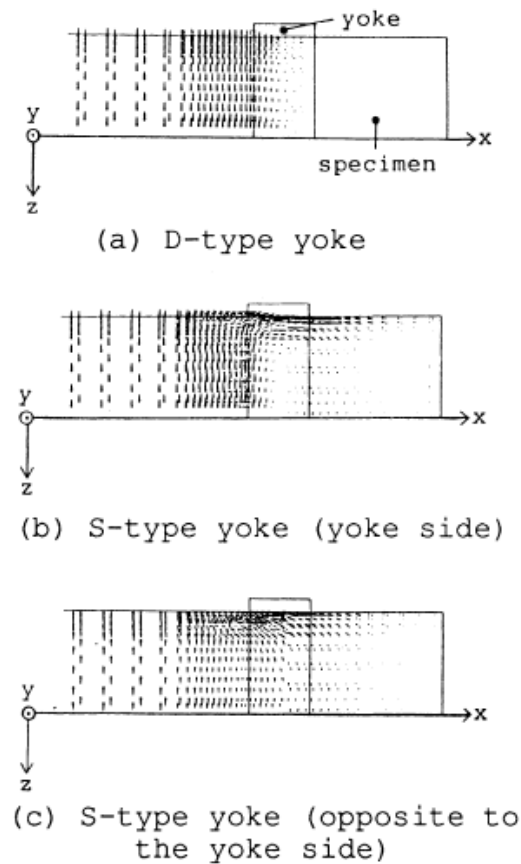
Εικόνα 19 : Σχετικό σφάλμα με yoke τύπου D των διατάξεων τύπου Ss και So. Οι μετρήσεις έγιναν σε βιομηχανική συχνότητα 50Hz [39].

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του διπλού yoke τύπου D έναντι του τύπου S είναι ο περιορισμός των δινορευμάτων που αναπτύσσονται στο δείγμα σε σημαντικό βαθμό. Αυτό έχει να κάνει με την ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου, όταν υπάρχει διαθέσιμη κλειστή μαγνητική διαδρομή και στις δύο όψεις του δείγματος. Με τη χρήση μίας ειδικής διάταξης μέτρησης, κατά την οποία ένα probe τοποθετείται στην επιφάνεια του δείγματος είναι δυνατή η μέτρηση της κάθετης συνιστώσας των δινορευμάτων που αναπτύσσονται σε όλο το μήκος της αισθητήριας διάταξης κατά τη διαδικασία της μέτρησης. Αυτή η μέτρηση και ανάλυση των δινορευμάτων περιλαμβάνει και το δείγμα και τον πυρήνα και έχει πραγματοποιηθεί για σύγκριση της πυκνότητας έντασης των δινορευμάτων στις περιπτώσεις του yoke τύπου D και S, ως μέτρο σύγκρισης των δύο διατάξεων.



Εικόνα 20 : Πυκνότητα ρεύματος δινορευμάτων ανά μονάδα επιφάνειας στον άξονα x, προς το μήκος της διάταξης μέτρησης σε γράφημα [39].

Οι μετρήσεις έγιναν με πεδίο διέγερσης $B = 1\text{T}$ και σε βιομηχανική συχνότητα 50 Hz . Στο διάγραμμα διακρίνονται οι μετρήσεις για yokes τύπου D και τύπου S.



Εικόνα 21: Κατανομή των δινορευμάτων σε διανύσματα στην επιφάνεια του δείγματος και των ηλεκτρομαγνητικών yokes για τις διατάξεις τύπου D και S [39].

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η πυκνότητα ρεύματος των δινορευμάτων είναι αρκετά μικρότερη στα yokes τύπου D από ότι στα yokes τύπου S, ενώ τα δινορεύματα στο yoke τύπου D προσεγγίζουν το μηδέν σε ορισμένα σημεία. Επίσης, η κατανομή των δινορευμάτων είναι πολύ πιο ομοιόμορφη και περιορισμένη στα yokes τύπου D και, σε αντίθεση με αυτά του τύπου S, δεν παρατηρείται πυκνότητα δινορευμάτων στο ίδιο το δείγμα, το οποίο είναι πολύ σημαντικό μέτρο αξιοπιστίας και ακρίβειας για τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων του δοκιμίου [39].

2 Πειραματικό Μέρος

2.1 Κατασκευή των πηνίων

Για την κατασκευή του SST χρησιμοποιήθηκαν δύο yokes από Mu-Metal και μία βάση εκτυπωμένη σε 3d printer από PLA, προκειμένου να υποστηριχθούν τα πηνία λήψης και διέγερσης εσωτερικά των yokes. Τα yokes αποτελούνται από άμορφο σιδηρομαγνητικό υλικό, με περίπου ημικυκλικό σχήμα, αποτελούμενο από πολλαπλές λεπτές στρώσεις του υλικού συμπιεσμένες μεταξύ τους, ώστε να μειώνεται η απώλεια ενέργειας λόγω αναπτυσσόμενων δινορρευμάτων στην περίπτωση που το υλικό παρουσιάζει μεγάλο πάχος, κατά τη διέλευση εναλλασσόμενου ρεύματος από το πηνίο και, άρα μαγνητικού πεδίου μέσω του υλικού. Γύρω από αυτό τυλίγονται τα 2 πηνία, πηνίο λήψης εσωτερικά κοντά στο δοκίμιο και το πηνίο διέγερσης από πάνω. Τα καλώδια είναι φτιαγμένα από χαλκό με κατάλληλη μόνωση και διάμετρο όπως αναφέρεται παρακάτω. Για τον αριθμό των σπειρών γίνονται δοκιμές με διάφορες τιμές και αναλογίες και μετρούνται οι τιμές τάσης εξόδου, συχνότητας διέγερσης και εξόδου, καθώς και ρεύματος διέγερσης. Για τη λήψη των μετρήσεων τοποθετήθηκαν διαφορετικά δείγματα χάλυβα στη διάταξη αυτή του SST. Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των πηνίων λήψης και διέγερσης που κατασκευάστηκαν.

Πηνίο διέγερσης : Χρησιμοποιείται καλώδιο πάχους 1mm για να αντέχει τα ρεύματα τάξης 3-5A σε χαμηλές συχνότητες (μέχρι 10Hz). Επίσης οι περιελίξεις του είναι αρκετά λιγότερες από αυτές του πηνίου λήψης, ώστε το σήμα να ενισχύεται κατά τη μέτρηση.

Πηνίο λήψης : Χρησιμοποιείται καλώδιο μικρής διατομής, της τάξης των 0,15mm, αρκετό για να διασφαλίζεται η μηχανική αντοχή του, αλλά αρκετά λεπτό για να επιτρέπει τον υψηλό αριθμό περιελίξεων. Ο αριθμός των στρωμάτων για το πηνίο λήψης πρέπει να είναι υψηλός για αυξημένη ευαισθησία σε μικρές αλλαγές του σήματος διέγερσης και καλύτερη ενίσχυση του σήματος μέτρησης. Με βάση τον νόμο Faraday και την αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών, είναι αναμενόμενο ότι η αύξηση του λόγου σπειρών στο πηνίο λήψης προς αυτές του πηνίου διέγερσης θα οδηγήσει σε αυξημένη τάση απόκρισης και διακριτική ικανότητα σε χαμηλές συχνότητες.

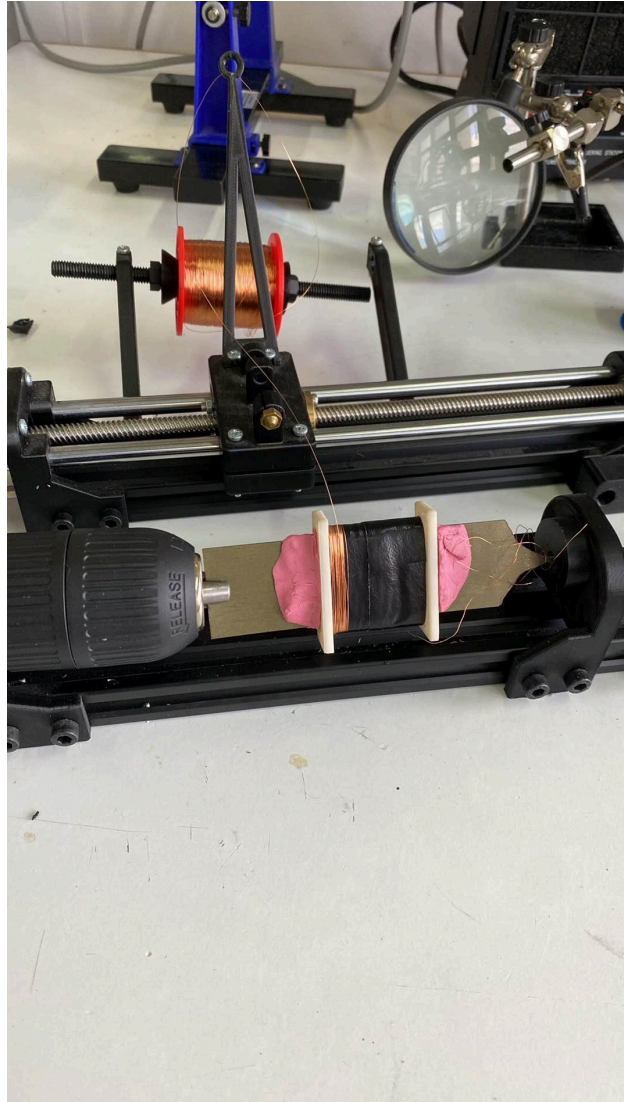
Για τις περιελίξεις, αρχικά έγιναν δοκιμές με μία στρώση στο πηνίο λήψης και μία στο πηνίο διέγερσης και, αφού έγιναν οι απαραίτητες μετρήσεις, κατασκευάστηκαν ακόμα μερικές τοπολογίες με μεγαλύτερο αριθμό στρωμάτων στα πηνία λήψης και διέγερσης, αλλάζοντας έτσι τον λόγο μεταξύ σπειρών λήψης και διέγερσης και, άρα, τον λόγο ενίσχυσης σήματος. Όσο αυξάνονταν οι περιελίξεις στο πηνίο λήψης,

έπρεπε το πηνίο να κατασκευαστεί σε πολλαπλά επίπεδα. Έτσι, τυλίχθηκε ένα στρώμα στην εκτυπωμένη βάση και, από πάνω, τοποθετήθηκε μία στρώση κολλητικής ταινίας, ώστε η επόμενη στρώση πηνίου να είναι πιο εύκολη στην κατασκευή, λόγω της ομοιόμορφης επιφάνειας τύλιξης, καθώς και για να μην διασταυρώνονται διαφορετικά τμήματα του πηνίου και δημιουργηθεί ανομοιόμορφο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Μεγάλη προσοχή δόθηκε στην ομοιομορφία του κάθε πηνίου, ώστε να μην υπάρχουν επικαλύψεις, αναδιπλώσεις ή διαφορές στην πυκνότητα του πηνίου, άρα και του πεδίου, καθώς αυτό θα δημιουργούσε σφάλματα στη μέτρηση αργότερα, τα οποία θα μεγεθύνονταν λόγω της ενίσχυσης από το πηνίο λήψης.

Στη συνέχεια, με τη χρήση μεταλλικής συγκόλλησης συνδέονται οι άκρες του πηνίου λήψης με κανονικά καλώδια με πλαστική μόνωση. Αυτά τα καλώδια χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις, ενώ τα υπόλοιπα προσκολλώνται πάνω στον αισθητήρα με τη χρήση κόλλας, ώστε να διασφαλιστεί η μηχανική αντοχή των συρμάτων και να μην υπάρχει αγωγή σύνδεση με άλλα τμήματα της μετρητικής διάταξης. Αυτό γίνεται, γιατί το πηνίο λήψης είναι πολύ λεπτό και διατρέχει κίνδυνο να κοπεί, όπως ασκούνται διάφορες τάσεις κατά τη μέτρηση και μεταφορά, ενώ το καλώδιο με πλαστική μόνωση είναι ασφαλισμένο έναντι μηχανικών τάσεων και δεν είναι τόσο εύκολο να κοπεί. Όσον αφορά το πηνίο λήψης, η χρήση απλού γυαλόχαρτου είναι αρκετή για να απομακρύνει την εξωτερική στρώση μόνωσης και να δημιουργήσει αγωγή σύνδεση στην άκρη του καλωδίου. Επειδή το πηνίο λήψης κατασκευάζεται από σύρμα πάχους 1mm, η μηχανική αντοχή του είναι αρκετά μεγάλη και δεν χρειάζονται περαιτέρω μέτρα για να μην κοπεί.

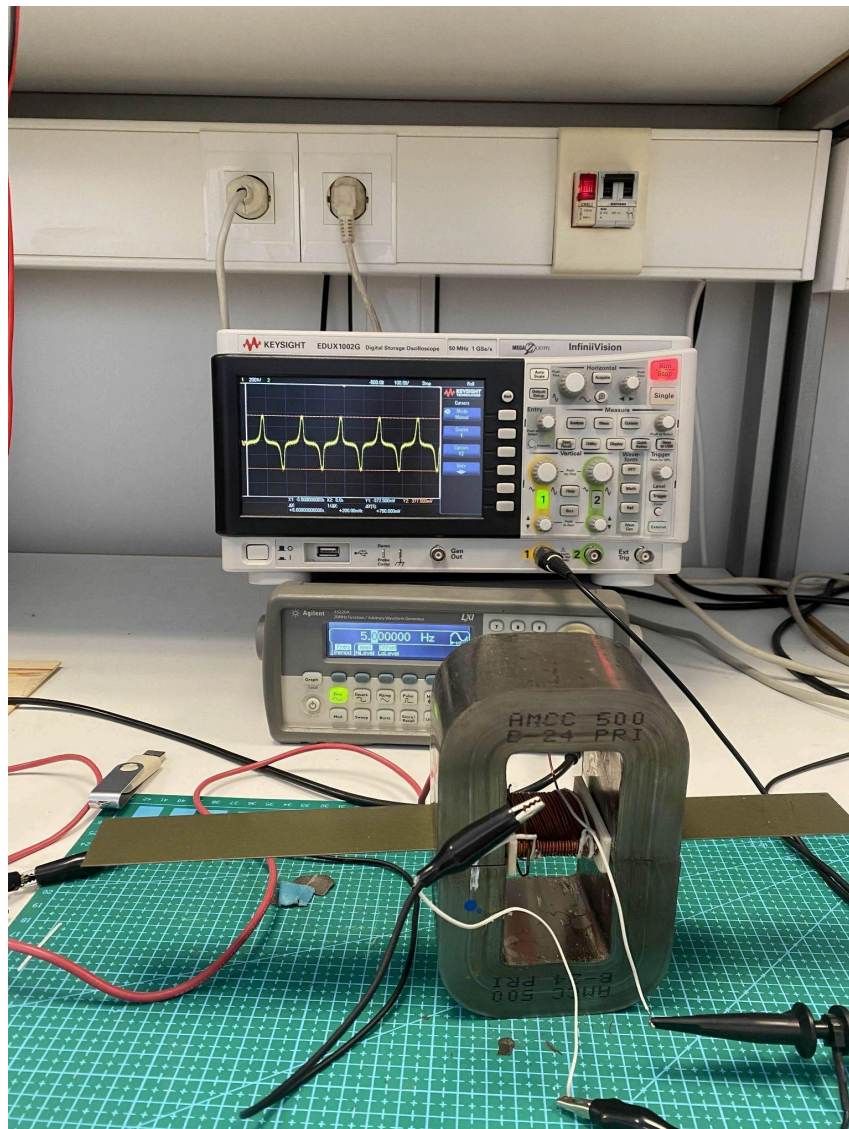
Αφού διασφαλιστεί η διάταξη και ολοκληρωθεί η κατασκευή, είναι δυνατή η χρήση της για μετρήσεις. Αρχικά, τοποθετείται στο εσωτερικό του 3d printed frame ένα λεπτό φύλλο ηλεκτρικού χάλυβα, προκειμένου να μετρηθεί. Μετά, ο αισθητήρας τοποθετείται μεταξύ των δύο μαγνητικών yokes, τα οποία αποτελούνται από πολλαπλά φύλλα σιδηρομαγνητικού υλικού κολλημένα μεταξύ τους με πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Ο λόγος για τα φύλλα, έναντι ομογενούς υλικού είναι για την αποφυγή δινορρευμάτων και περαιτέρω απωλειών, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως. Αφού το μαγνητικό κύκλωμα κλείσει με τον αισθητήρα και το δοκίμιο ανάμεσα στον μαγνητικό πυρήνα, όλες οι μαγνητικές γραμμές και, επομένως, η μαγνητική ροή, θα διέρχονται μέσω του συστήματος και θα μπορούν να ανιχνευτούν από το πηνίο λήψης. Ύστερα, συνδέεται μία γεννήτρια συχνοτήτων που παράγει ημιτονοειδή παλμό ρυθμιζόμενης τάσης και πλάτους με ένα τροφοδοτικό, το οποίο ελέγχει το ρεύμα και την τάση που περνάει από τα άκρα του. Το τροφοδοτικό χρησιμεύει στην αποφυγή ανάπτυξης μεγάλων ρευμάτων κατά τις δοκιμές, κάτι το οποίο θα μπορούσε να κάψει το πηνίο, καθώς και στη μέτρηση του ρεύματος διέγερσης καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Η έξοδος του τροφοδοτικού, επομένως, συνδέεται στο πηνίο διέγερσης και τα άκρα του πηνίου λήψης συνδέονται σε έναν παλμογράφο για ανάλυση του σήματος εξόδου. Η σημαντική πληροφορία που λαμβάνεται από το σήμα εξόδου είναι η τάση peak to peak μεταξύ δύο

διαδοχικών κορυφών του σήματος ή αλλιώς η τιμή διπλάσια από το πλάτος του σήματος. Επίσης σημαντική πληροφορία είναι η συχνότητα, η οποία είναι σχεδόν ίδια με τη συχνότητα διέγερσης με πολύ μικρή απόκριση, και το ρεύμα διέγερσης, το οποίο πρέπει να μην υπερβεί τα 3-5 A, για την ασφάλεια του πηνίου διέγερσης, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να καεί.



Εικόνα 22 : Διαδικασία τυλίγματος των πηνίων.

Φαίνεται η πλαστική βάση, πάνω στην οποία έχει τυλιχτεί ήδη μία στρώση πηνίου λήψης και, αφού περάστηκε κολλητική ταινία για να δημιουργηθεί μία ομοιόμορφη επιφάνεια, τυλίγεται μία επόμενη στρώση. Το τύλιγμα των υπόλοιπων στρώσεων έγινε με τη βοήθεια ενός μηχανισμού που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο για ελεγχόμενο και πιο γρήγορο τύλιγμα πηνίων. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει ένα μικρό κινητήρα, ο οποίος ελεγχόμενος από έναν μικροελεγκτή και από τα χαρακτηριστικά του πηνίου που του ορίζει ο χρήστης μπορεί να δημιουργεί συγκεκριμένο αριθμό σπειρών γύρω από μία επιφάνεια



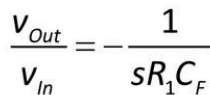
Εικόνα 23 : Η διάταξη του SST της παρούσας εργασίας.

Στην εικόνα 23 διακρίνονται οι δύο πυρήνες από Mu-Metal, τοποθετημένοι εκατέρωθεν του αισθητήρα. Στο μέσο τους βρίσκεται ο αισθητήρας με συνδεδεμένο το πηνίο διέγερσης στη γεννήτρια και το τροφοδοτικό και το πηνίο λήψης συνδεδεμένο με τον παλμογράφο, όπου διακρίνεται το σήμα εξόδου. Η μέτρηση του σήματος εξόδου είναι η διαφορά δυναμικού V_{p-p} μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του διαγράμματος.

2.2 Κύκλωμα Ενεργού Ολοκληρωτή

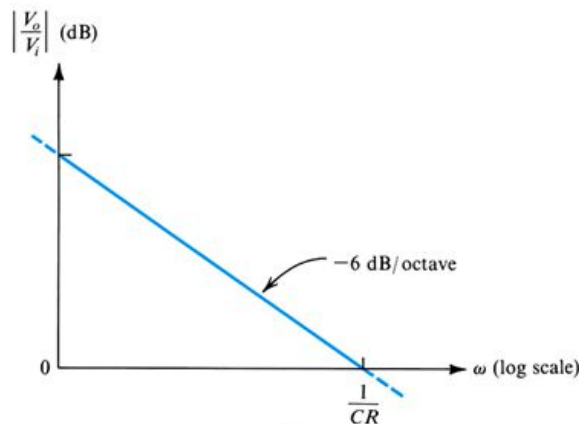
Για τον υπολογισμό και παραγωγή του βρόχου υστέρησης, μέσω της μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας, είναι απαραίτητη η ολοκλήρωση του σήματος εξόδου της διάταξης του SST. Για να γίνει αυτό στην παραπάνω διάταξη, αρκεί η κατασκευή ενός απλού κυκλώματος ολοκληρωτή και η παρεμβολή αυτού μεταξύ της εξόδου του αισθητήρα και του παλμογράφου ή οποιασδήποτε άλλης διάταξης για ανάλυση της τάσης εξόδου. Επομένως, είναι σημαντική η αναφορά της λειτουργίας, των υπολογισμών και της κατασκευής ενός κυκλώματος ολοκληρωτή.

Το βασικό κύκλωμα ενός ενεργού ολοκληρωτή ονομάζεται αναστρέφων ολοκληρωτής ή ολοκληρωτής Miller, προς τιμήν ενός μελετητή του κυκλώματος και της διάταξης. Έχει ως βάση έναν τελεστικό ενισχυτή, με τον οποίο επιτυγχάνεται η ανάδραση και η ενίσχυση που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του κυκλώματος. Από την ονομασία (δηλαδή αναστρέφων ολοκληρωτής) είναι εμφανές ότι πρόκειται για μία αναστρέφουσα διάταξη τελεστικού ενισχυτή, όπου, δηλαδή, η ανάδραση του κυκλώματος συνδέει την έξοδο του ενισχυτή με την αναστρέφουσα είσοδό του. Σε ενισχυτικές διατάξεις, η ανάδραση αποτελείται από μία αντίσταση, την R_f , και μία δεύτερη αντίσταση που συνδέει την είσοδο του κυκλώματος με την αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή. Η μη αναστρέφουσα είσοδος παραμένει γειωμένη, ενώ η θετική και αρνητική τροφοδοσία του ενισχυτή είναι ανεξάρτητες και ανάλογες με τις παραμέτρους του ολοκληρωμένου κυκλώματος που χρησιμοποιείται. Να σημειωθεί πως, επειδή ο βρόχος υστέρησης είναι συμμετρικός και περιλαμβάνει θετικό και αρνητικό υστερητικό κλάδο, χρειάζεται η τροφοδοσία του τελεστικού ενισχυτή να περιλαμβάνει θετική και αρνητική τάση, ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή της αρνητικής τάσης του βρόχου υστέρησης. Στην περίπτωση του ολοκληρωτή, η διάταξη είναι σχεδόν ίδια με αυτή του αναστρέφοντος ενισχυτή, με μόνη αλλαγή την εναλλαγή της αντίστασης R_f με έναν πυκνωτή στον κλάδο ανάδρασης. Είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή η λειτουργία αυτής της διάταξης μέσω της μελέτης του κυκλώματος με την εφαρμογή του νόμου Kirchhoff.



$$\frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = - \frac{1}{j\omega * C * R} \quad (2.2)$$

Αυτή, με απλή μιγαδική ανάλυση, δίνει το μέτρο ή πλάτος ενίσχυσης ίσο με $1/\omega CR$ και εισαγωγή φάσης στο σήμα 90 μοίρες, άρα ένα ημιτονοειδές σήμα στην είσοδο θα έχει αποτέλεσμα στην έξοδο ένα ημιτονοειδές σήμα, απλά ανεστραμμένης πολικότητας με πλάτος ίσο με το αρχικό επί τον παραπάνω όρο.



Εικόνα 25 : Απόκριση συχνότητας του ολοκληρωτή [40].

Το πρόβλημα με την απλή διάταξη του αναστρέφοντος ολοκληρωτή παρουσιάζεται όταν υπάρχει DC συνιστώσα στην τάση εισόδου. Καθώς ο πυκνωτής λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα σε DC ρεύμα, δεν υπάρχει ο κλάδος ανάδρασης σε αυτήν την περίπτωση, άρα το DC σήμα δέχεται θεωρητικά άπειρο κέρδος και πρακτικά το μέγιστο κέρδος που μπορεί να παρέχει ο τελεστικός ενισχυτής. Αυτό επιβεβαιώνεται από τη συνάρτηση μεταφοράς, όπου αν το $\omega=0$ το κέρδος τείνει στο άπειρο. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η παράλληλη σύνδεση της αντίστασης R_f στον κλάδο ανάδρασης, παράλληλα με τον πυκνωτή. Έτσι, το κέρδος για DC τάσεις θα είναι ίσο με την διάταξη του αναστρέφοντος ενισχυτή, δηλαδή $A_{dc} = -R_f/R$ και όχι άπειρο. Το πρόβλημα είναι ότι χρειάζεται μία αρκετά μεγάλη αντίσταση R_f , διότι για μικρές τιμές της αντίστασης το κύκλωμα του ολοκληρωτή αποκλίνει από την ιδανική συμπεριφορά του. Αυτό επιβεβαιώνεται αν αναθεωρηθεί η συνάρτηση μεταφοράς, η οποία γίνεται

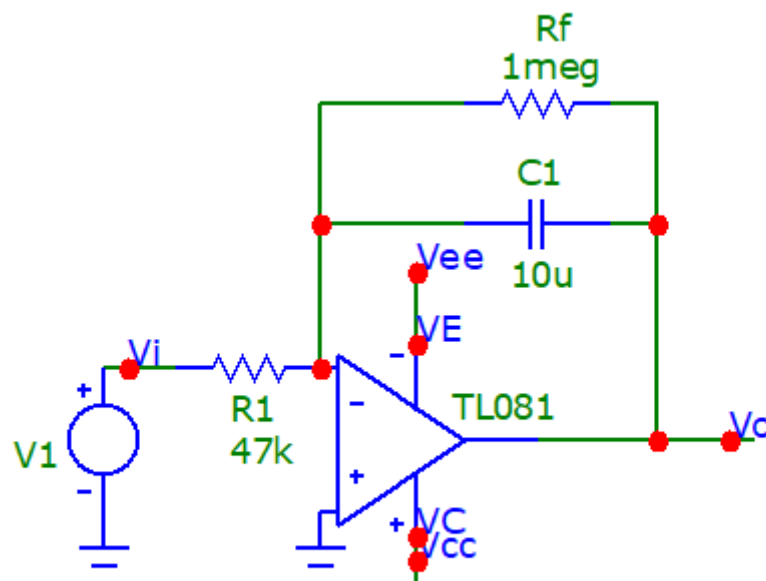
$$\frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = - \frac{R_f/R}{1 + j\omega * C * R * R_f} \quad (2.3)$$

Οπότε φαίνεται ότι ο πόλος της συνάρτησης μεταφοράς μετατοπίζεται από την ιδανική θέση $\omega=0$ στη συχνότητα καμψής του δικτύου. Όμως, με κατάλληλη επιλογή υψηλής τιμής της αντίστασης R_f αυτή η παραλλαγή του κυκλώματος είναι προτιμότερη, ιδιαίτερα στις εφαρμογές όπως αυτή του βρόχου υστέρησης, όπου οι μετρήσεις γίνονται σε αρκετά χαμηλές συχνότητες [40], [41].

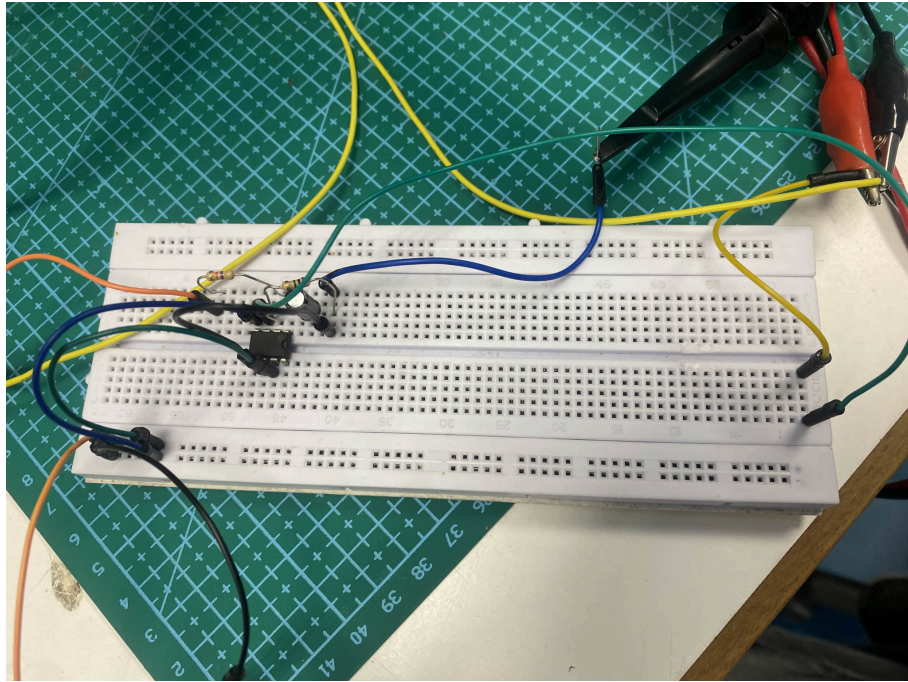
Με βάση τα παραπάνω και μετά το τέλος αυτών των βασικών μετρήσεων και τον προσδιορισμό της βέλτιστης διάταξης για μετρήσεις με χαμηλή συχνότητα διέγερσης κατασκευάστηκε ένα απλό κύκλωμα ολοκληρωτή. Ο αισθητήρας Single Sheet Tester, στην μορφή που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία μετράει τη μαγνητική διαπερατότητα του δοκιμίου, οπότε η ολοκλήρωση του σήματος απόκρισης αυτού θα δώσει αποτέλεσμα τον βρόχου υστέρησης που αντιστοιχεί στο υλικό. Είναι σημαντική η μέτρηση σε χαμηλές συχνότητες, δηλαδή 0,1Hz, με σήμα χαμηλού θορύβου και με διακριτές κορυφές τάσεις, όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος.

Το κύκλωμα του ολοκληρωτή έχει ως βάση τον τελεστικό ενισχυτή TL081. Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη αναστρέφοντος ολοκληρωτή Miller, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τις παρακάτω παραμέτρους. Σημαντικά σημεία ήταν η μέτρηση σε συχνότητα 0,1Hz και η διατήρηση του κέρδους σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μην εισαχθεί θόρυβος στις μετρήσεις. Οι τιμές των στοιχείων είναι $R_1 = 47\text{ k}\Omega$, $R_f = 1\text{ M}\Omega$, $C = 10\mu\text{F}$ και διπλή τροφοδοσία του τελεστικού ενισχυτή $V_{cc} = +15\text{V}$ και $V_{ee} = -15\text{V}$, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή.

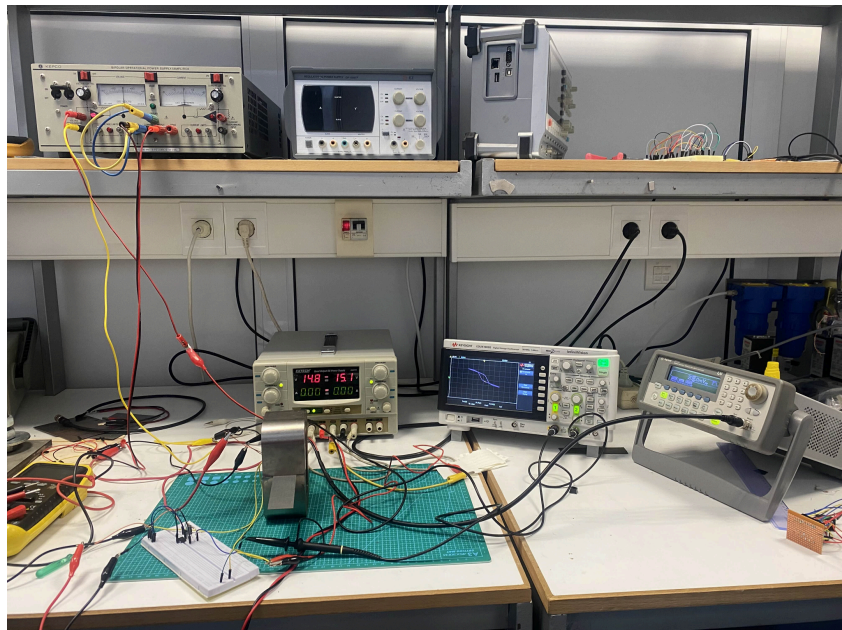
Αυτές οι τιμές εξασφαλίζουν πως η κρίσιμη συχνότητα πόλου του ολοκληρωτή βρίσκεται αρκετά μακριά από την περιοχή λειτουργίας, ώστε να μην εμπλέκεται στη μέτρηση. Επίσης, το κέρδος κλειστού βρόχου υπολογίζεται ίσο με $A = 21,2$, το οποίο αφήνει ένα αρκετά μεγάλο περιθώριο μεταξύ του σήματος εξόδου και της τροφοδοσίας, για να προληφθεί ο ψαλιδισμός του σήματος, καθώς επίσης εξασφαλίζει το απαραίτητο περιθώριο κέρδους, ώστε το κύκλωμα να είναι ευσταθές και να μην αυξάνεται ανεξέλεγκτα το ρεύμα ή η τάση εξόδου.



Εικόνα 26 : Σχεδιάγραμμα του κυκλώματος του ολοκληρωτή που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 27 : Η κατασκευή του κυκλώματος του ολοκληρωτή, υλοποιημένη σε breadboard.



Εικόνα 28 : Η διάταξη του SST στο εργαστήριο.

Η διάταξη του αισθητήρα είναι η γνωστή, ενώ το νέο τροφοδοτικό συνδέεται με τον τελεστικό ενισχυτή με ρυθμίσεις τάσης +15V και -15V. Στον παλμογράφο εμφανίζεται το κοινό γράφημα του ολοκληρωμένου σήματος του αισθητήρα από την έξοδο του ολοκληρωτή προς το σήμα διέγερσης.

2.3 Μετρήσεις

Για την πρώτη δοκιμή, η μέτρηση γίνεται με 250 σπείρες στο πηνίο λήψης και 30 στο πηνίο διέγερσης. Η εσωτερική αντίσταση του πηνίου λήψης μετρήθηκε στα 40Ω και του πηνίου διέγερσης στα $0,35\Omega$. Για τις μετρήσεις, αρχικά μένει σταθερή η τάση (και άρα το ρεύμα) διέγερσης στα $0,2V$ και μεταβάλλεται η συχνότητα διέγερσης, μετρώντας την τάση V_{pp} και συχνότητα απόκρισης στο πηνίο λήψης. Ύστερα, μένει σταθερή η συχνότητα διέγερσης στις τιμές 1 Hz , $0,5\text{ Hz}$ και $0,1\text{ Hz}$ και μεταβάλλεται η τάση και άρα το ρεύμα διέγερσης, μετρώντας το ρεύμα διέγερσης και την τάση V_{pp} στο πηνίο λήψης. Η συχνότητα παραμένει ίδια μεταξύ διέγερσης και απόκρισης.

Η δεύτερη τοπολογία έχει 470 σπείρες (δηλαδή 2 στρώσεις) στο πηνίο λήψης και 32 στο πηνίο διέγερσης. Οι περιελίξεις του πηνίου λήψης αυξήθηκαν αρκετά, άρα αναμένεται μεγαλύτερη τάση απόκρισης και μεγαλύτερη ευαισθησία στο σήμα εξόδου. Ο τρόπος που έγινε αυτή η κατασκευή ήταν με το τυλίγμα μιας επιπλέον στρώσης πηνίου λήψης πάνω από την πρώτη, αφού παρεμβλήθηκε μία στρώση κολλητικής ταινίας για τη διασφάλιση ομοιόμορφης επιφάνειας τυλίγματος.

Η τρίτη τοπολογία αποτελείται από 3 στρώσεις πηνίου λήψης, κρατώντας περίπου σταθερές τις σπείρες του πηνίου διέγερσης. Συγκεκριμένα, το πηνίο λήψης αποτελείται από 620 περιελίξεις με εσωτερική αντίσταση 33Ω και το πηνίο διέγερσης από 30 περιελίξεις με αντίσταση $0,35\Omega$.

Η τέταρτη τοπολογία έχει 4 στρώσεις πηνίου λήψης, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τον λόγο ενίσχυσης του σήματος εξόδου. Το πηνίο λήψης έχει 920 περιελίξεις συνολικά με αντίσταση στα $79,5\Omega$ και το πηνίο διέγερσης 30 περιελίξεις με αντίσταση $0,35\Omega$.

Η πέμπτη τοπολογία αποτελείται από 4 στρώσεις πηνίου λήψης, όπως πριν, αλλά αυτήν τη φορά τυλίχθηκαν 2 στρώσεις πηνίου διέγερσης, ώστε να διερευνηθεί το αποτέλεσμα της αύξησης των σπειρών διέγερσης. Το πηνίο λήψης έχει 910 περιελίξεις με εσωτερική αντίσταση στα 62Ω και το πηνίο διέγερσης 62 περιελίξεις με αντίσταση στα $0,7\Omega$.

Η έκτη τοπολογία αποτελείται από 6 στρώσεις πηνίου λήψης και μία στρώση πηνίου διέγερσης, στοχεύοντας για ακόμα μεγαλύτερο λόγο σπειρών και, λογικά, καλύτερη ποιότητα σήματος εξόδου. Το πηνίο λήψης αποτελείται από 1360 περιελίξεις με αντίσταση στα 85Ω , ενώ το πηνίο διέγερσης από 32 περιελίξεις με αντίσταση στα $0,65\Omega$.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες μετρήσεων, φωτογραφίες, καθώς και χρήσιμα διαγράμματα για την ανάλυση. Συγκεκριμένα παρατίθενται μετρήσεις με διαφορετικές τάσεις και συχνότητες διέγερσης για κάθε τοπολογία που αναφέρθηκε και παραπάνω.

- **1η τοπολογία :**

$N_2 = 250 - 40\Omega$, $N_1 = 30 - 0,35\Omega$, όπου N_2 είναι ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης και N_1 ο αριθμός σπειρών του πηνίου διέγερσης.

Επομένως ο λόγος μεταξύ σπειρών πηνίου λήψης και διέγερσης είναι 8,33

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1) παρατίθενται μετρήσεις από τη διάταξη επιβάλλοντας τάση διέγερσης 0.2 V και διαφορετικές τιμές συχνότητας διέγερσης, ενώ στους επόμενους πίνακες μετρήσεων (Πίνακας 2.2 και 2.3) της τοπολογίας αυτής περιλαμβάνονται μετρήσεις με σταθερή συχνότητα διέγερσης και μεταβαλλόμενη τάση διέγερσης.

Πίνακας 2.1

Διέγερση (V = 0,2V)	Απόκριση
f (Hz)	V _{pp} (mV)
0,1	22,5
0,2	42,5
0,3	59
0,4	76
0,5	95
0,6	115
0,7	132
0,8	148,5
0,9	167
1	182,5
1,1	198,5
1,2	212
1,3	227,5
1,4	240
1,5	262
2	332,5
2,5	410
3	485
3,5	550
4	610
4,5	690
5	750

Πίνακας 2.2

Διέγερση (f = 1Hz)		Απόκριση (f = 1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,1	15
60	0,15	16,5
70	0,2	18,5
80	0,23	23
90	0,25	27
100	0,25	33
110	0,28	42
120	0,3	52
130	0,35	67
140	0,4	78
150	0,43	95
160	0,46	110
170	0,48	127,5
180	0,49	140
190	0,5	153,5
200	0,5	170
250	0,51	232,5
300	0,65	285,5
350	0,95	350
400	1,1	410
450	1,25	470
500	1,3	520
600	1,6	610
700	1,8	700
800	2	770
900	2,2	860
1000	2,4	930

Πίνακας 2.3

Διέγερση (f = 0,5Hz)		Απόκριση (f = 0,5Hz)	Διέγερση (f = 0,1Hz)		Απόκριση (f = 0,1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)	V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,25	14,5	50	0,25	5
100	0,45	55	100	0,4	15,5
150	0,52	90	150	0,5	22,5
200	0,7	125	200	0,75	30
250	0,95	158	250	0,95	37,5
300	1,1	188	300	1,1	44,5
350	1,25	215	350	1,2	50
400	1,4	250	400	1,45	58
450	1,51	280	450	1,55	64,5
500	1,75	315	500	1,75	70
600	2	380	600	2	78,5
700	2,25	412,5	700	2,4	90,5
800	2,55	450	800	2,65	107
900	2,85	490	900	3	226
1000	-	-	1000	-	-

- 2η τοπολογία :

$$N2 = 470 - 18,5\Omega, N1 = 32 - 0,45\Omega$$

Επομένως ο λόγος μεταξύ σπειρών πηνίου λήψης και διέγερσης είναι 14,6875

Στις παρακάτω τοπολογίες και δοκιμές, η λήψη των μετρήσεων έγινε με τον ίδιο τρόπο. Άρα οι επόμενοι πίνακες ακολουθούν τη μορφή της πρώτης τοπολογίας.

Πίνακας 2.4

Διέγερση (V = 0,2V)	Απόκριση
f (Hz)	V _{pp} (mV)
0,1	30
0,2	50
0,3	65
0,4	90
0,5	103
0,6	110
0,7	135
0,8	163
0,9	198
1	255
1,1	290
1,2	320
1,3	365
1,4	390
1,5	420
2	490
2,5	570
3	635
3,5	700
4	775
4,5	840
5	910

Πίνακας 2.5

Διέγερση (f = 1Hz)		Απόκριση (f = 1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,2	30
60	0,25	40
70	0,3	48
80	0,32	56
90	0,36	70
100	0,4	78
110	0,43	90
120	0,47	95
130	0,49	103
140	0,5	111
150	0,51	130
160	0,52	143
170	0,52	161
180	0,525	172
190	0,53	180
200	0,535	200
250	0,75	260
300	0,93	315
350	1	390
400	1,1	468
450	1,25	539
500	1,5	610
600	1,7	715
700	2	805
800	2,4	890
900	2,6	995
1000	2,85	1110

Πίνακας 2.6

Διέγερση (f = 0,5Hz)		Απόκριση (f = 0,5Hz)	Διέγερση (f = 0,1Hz)		Απόκριση (f = 0,1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)	V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,2	20	50	0,2	7
100	0,4	70	100	0,4	25
150	0,58	120	150	0,5	33
200	0,52	180	200	0,6	45
250	0,7	235	250	0,8	65
300	0,92	290	300	1	88
350	1	360	350	1,1	100
400	1,15	415	400	1,25	125
450	1,25	470	450	1,45	138
500	1,45	530	500	1,55	169
600	1,85	590	600	1,8	210
700	2,1	645	700	2,1	250
800	2,5	705	800	2,5	300
900	2,75	775	900	2,9	360
1000	3	850	1000	-	-

- **3η τοπολογία :**

$N2 = 620 - 33\Omega$, $N1 = 30 - 0,35\Omega$

Επομένως ο λόγος μεταξύ σπειρών πηνίου λήψης και διέγερσης είναι 20,66

Πίνακας 2.7

Διέγερση (V = 0,2V)	Απόκριση
f (Hz)	V _{pp} (mV)
0,1	110
0,2	210
0,3	310
0,4	390
0,5	480
0,6	570
0,7	650
0,8	720
0,9	810
1	870
1,1	950
1,2	1020
1,3	1090
1,4	1160
1,5	1220
2	1520
2,5	1780
3	2000
3,5	2250
4	2470
4,5	2660
5	2830

Πίνακας 2.8

Διέγερση (f = 1Hz)		Απόκριση (f = 1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,1	120
60	0,15	170
70	0,2	220
80	0,25	270
90	0,28	310
100	0,3	350
110	0,33	400
120	0,35	440
130	0,38	480
140	0,4	520
150	0,43	570
160	0,45	600
170	0,475	630
180	0,48	660
190	0,49	700
200	0,5	750
250	0,5	970
300	0,51	1200
350	0,52	1330
400	0,53	1500
450	1	1620
500	1,2	1800
600	1,3	2120
700	1,51	2350
800	2	2620
900	2,35	2900
1000	2,5	3100

Πίνακας 2.9

Διέγερση (f = 0,5Hz)		Απόκριση (f = 0,5Hz)	Διέγερση (f = 0,1Hz)		Απόκριση (f = 0,1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)	V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,25	100	50	0,1	30
100	0,48	230	100	0,22	50
150	0,5	360	150	0,33	80
200	0,75	480	200	0,45	100
250	0,95	610	250	0,6	130
300	1	720	300	0,78	155
350	1,23	820	350	0,95	190
400	1,45	910	400	1	210
450	1,51	1000	450	1,05	235
500	1,7	1080	500	1,3	265
600	2,1	1300	600	1,6	310
700	2,5	1450	700	1,9	365
800	2,6	1550	800	2	420
900	2,7	1670	900	2,1	470
1000	2,9	1780	1000	2,4	520

- **4η τοπολογία :**

$$N2 = 920 - 79,5\Omega, N1 = 33 - 0,35\Omega$$

Επομένως ο λόγος μεταξύ σπειρών πηνίου λήψης και διέγερσης είναι 27,87

Πίνακας 2.10

Διέγερση (V = 0,2V)	Απόκριση
f (Hz)	V _{pp} (mV)
0,1	180
0,2	350
0,3	510
0,4	660
0,5	810
0,6	960
0,7	1120
0,8	1230
0,9	1350
1	1470
1,1	1600
1,2	1720
1,3	1840
1,4	1950
1,5	2060
2	2530
2,5	2980
3	3360
3,5	3730
4	4100
4,5	4400
5	4700

Πίνακας 2.11

Διέγερση (f = 1Hz)		Απόκριση (f = 1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,15	300
60	0,2	350
70	0,25	460
80	0,3	540
90	0,35	620
100	0,35	700
110	0,38	760
120	0,42	840
130	0,46	930
140	0,48	1000
150	0,49	1080
160	0,5	1140
170	0,5	1200
180	0,505	1260
190	0,51	1330
200	0,51	1400
250	0,6	1730
300	0,85	2030
350	0,93	2300
400	1	2550
450	1,1	2780
500	1,2	3040
600	1,5	3380
700	1,7	3810
800	2	4220
900	2,45	4650
1000	2,6	5050

Πίνακας 2.12

Διέγερση (f = 0,5Hz)		Απόκριση (f = 0,5Hz)	Διέγερση (f = 0,1Hz)		Απόκριση (f = 0,1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)	V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,2	180	50	0,2	40
100	0,37	400	100	0,4	90
150	0,5	590	150	0,5	140
200	0,55	800	200	0,6	180
250	0,6	1000	250	0,73	225
300	0,65	1190	300	0,83	280
350	0,75	1370	350	1	315
400	0,93	1540	400	1,25	360
450	1,05	1700	450	1,45	410
500	1,2	1830	500	1,51	460
600	1,5	2100	600	1,7	540
700	1,95	2420	700	2	620
800	2,3	2650	800	2,5	700
900	2,5	2880	900	2,9	790
1000	2,75	3050	1000	-	-

- **5η τοπολογία :**

$N_2 = 910 - 62\Omega$, $N_1 = 62 - 0,7\Omega$

Επομένως ο λόγος μεταξύ σπειρών πηνίου λήψης και διέγερσης είναι 14,677

Πίνακας 2.13

Διέγερση (V = 0,2V)	Απόκριση
f (Hz)	V _{pp} (mV)
0,1	25
0,2	45
0,3	60
0,4	85
0,5	100
0,6	110
0,7	130
0,8	155
0,9	190
1	245
1,1	280
1,2	310
1,3	350
1,4	375
1,5	400
2	480
2,5	560
3	620
3,5	685
4	750
4,5	830
5	900

Πίνακας 2.14

Διέγερση (f = 1Hz)		Απόκριση (f = 1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,2	25
60	0,25	40
70	0,3	45
80	0,33	55
90	0,38	70
100	0,41	80
110	0,44	90
120	0,48	95
130	0,5	105
140	0,5	115
150	0,51	135
160	0,52	148
170	0,52	163
180	0,525	176
190	0,53	188
200	0,535	205
250	0,75	258
300	0,9	320
350	1	385
400	1,1	473
450	1,25	550
500	1,5	620
600	1,8	730
700	2	825
800	2,4	910
900	2,6	990
1000	2,85	1050

Πίνακας 2.15

Διέγερση (f = 0,5Hz)		Απόκριση (f = 0,5Hz)	Διέγερση (f = 0,1Hz)		Απόκριση (f = 0,1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)	V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,2	15	50	0,2	10
100	0,4	65	100	0,4	25
150	0,5	130	150	0,5	35
200	0,55	170	200	0,6	46
250	0,7	220	250	0,8	68
300	0,9	280	300	1	90
350	1	350	350	1,1	105
400	1,1	400	400	1,2	120
450	1,25	460	450	1,4	135
500	1,4	520	500	1,6	167
600	1,8	570	600	1,8	205
700	2,2	630	700	2,1	245
800	2,6	700	800	2,5	305
900	2,8	770	900	3	350
1000	3	840	1000	-	-

- 6η τοπολογία :

$N_2 = 1360 - 85\Omega$, $N_1 = 32 - 0,65\Omega$

Επομένως ο λόγος μεταξύ σπειρών πηνίου λήψης και διέγερσης είναι 42,5

Πίνακας 2.16

Διέγερση (V = 0,2V)	Απόκριση
f (Hz)	V _{pp} (mV)
0,1	320
0,2	640
0,3	930
0,4	1210
0,5	1480
0,6	1760
0,7	2000
0,8	2260
0,9	2450
1	2700
1,1	2930
1,2	3140
1,3	3350
1,4	3550
1,5	3740
2	4600
2,5	5400
3	6100
3,5	6800
4	7400
4,5	7900
5	8400

Πίνακας 2.17

Διέγερση (f = 1Hz)		Απόκριση (f = 1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,15	650
60	0,2	820
70	0,23	960
80	0,25	1110
90	0,3	1270
100	0,35	1400
110	0,4	1550
120	0,43	1690
130	0,45	1830
140	0,48	2000
150	0,5	2100
160	0,5	2220
170	0,5	2340
180	0,51	2480
190	0,53	2590
200	0,55	2700
250	0,75	3260
300	0,9	3760
350	1	4280
400	1,1	4700
450	1,25	5100
500	1,4	5530
600	1,5	5950
700	1,6	6760
800	1,9	7500
900	2,25	8100
1000	2,5	8800

Πίνακας 2.18

Διέγερση (f = 0,5Hz)		Απόκριση (f = 0,5Hz)	Διέγερση (f = 0,1Hz)		Απόκριση (f = 0,1Hz)
V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)	V (mV)	I(A)	V _{pp} (mV)
50	0,25	350	50	0,2	60
100	0,4	740	100	0,4	140
150	0,5	1000	150	0,48	200
200	0,55	1420	200	0,5	275
250	0,75	1830	250	0,75	360
300	1	2190	300	0,9	445
350	1,1	2500	350	1	550
400	1,25	2810	400	1,25	620
450	1,5	3120	450	1,4	700
500	1,6	3430	500	1,5	770
600	1,9	3930	600	1,8	850
700	2,1	4420	700	2,15	925
800	2,5	4870	800	2,5	1000
900	2,75	5200	900	2,7	1100
1000	3	5750	1000	3	1150

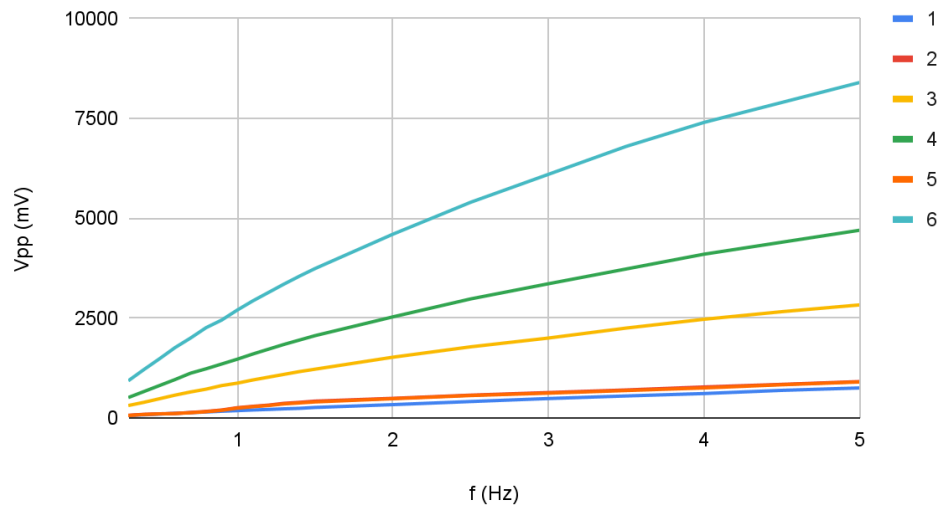
3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

3.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Έχοντας ολοκληρώσει τις μετρήσεις, τα αναμενόμενα αποτελέσματα από τη θεωρητική ανάλυση επιβεβαιώνονται. Αρχικά, υπάρχουν μερικές παρατηρήσεις ανεξάρτητα από την κατασκευή και το λόγο σπειρών του κάθε αισθητήρα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι, για μεγαλύτερες τιμές συχνότητας διέγερσης και μεγαλύτερες τιμές τάσης διέγερσης, η τιμή τάσης απόκρισης είναι και αυτή πιο υψηλή. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο με βάση όσα έχουν αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος, ωστόσο, με χαμηλότερη συχνότητα διέγερσης και πεδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση των μαγνητικών γραμμών στο δείγμα, άρα είναι δυνατός ο έλεγχος του συνολικού όγκου του υλικού έναντι της επιφανειακής μέτρησης. Για αυτό, είναι σημαντική ή μελέτη των διατάξεων, ώστε να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν επαρκή διακριτική ικανότητα και απόκριση τάσης για χαμηλές τιμές συχνότητας διέγερσης (της τάξης του 0,1-1Hz). Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζονται στο σήμα εξόδου του αισθητήρα πιο ευδιάκριτες κορυφές στην κυματομορφή της τάσης και λιγότερο ποσοστό θορύβου, όπως θα φανεί παρακάτω.

Πριν γίνει πιο λεπτομερής ανάλυση μεταξύ των διαφόρων τοπολογιών που κατασκευάστηκαν, παρατίθενται μερικά χρήσιμα διαγράμματα για πιο εύκολη ανάλυση και κατανόηση των προηγούμενων μετρήσεων. Επίσης, θα ακολουθήσουν μερικές φωτογραφίες μετρήσεων της κυματομορφής εξόδου στον παλμογράφο, οι οποίες θα σχολιαστούν, ώστε να γίνει περαιτέρω ανάλυση και σύγκριση των διαφορετικών διατάξεων, καθώς και για την κατανόηση των αποτελεσμάτων της κάθε μέτρησης.

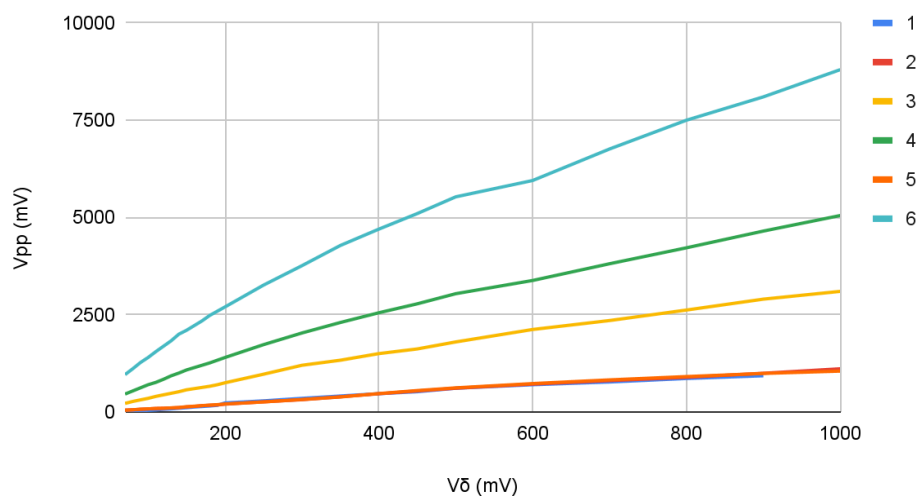
V_{pp} (mV) - f (Hz) | $V_{\delta} = 0,2V$ σταθερή



Εικόνα 29 : Διάγραμμα τάσης εξόδου του αισθητήρα σε συνάρτηση με τη συχνότητα διέγερσης για σταθερή τάση διέγερσης και ίση με 0,2V.

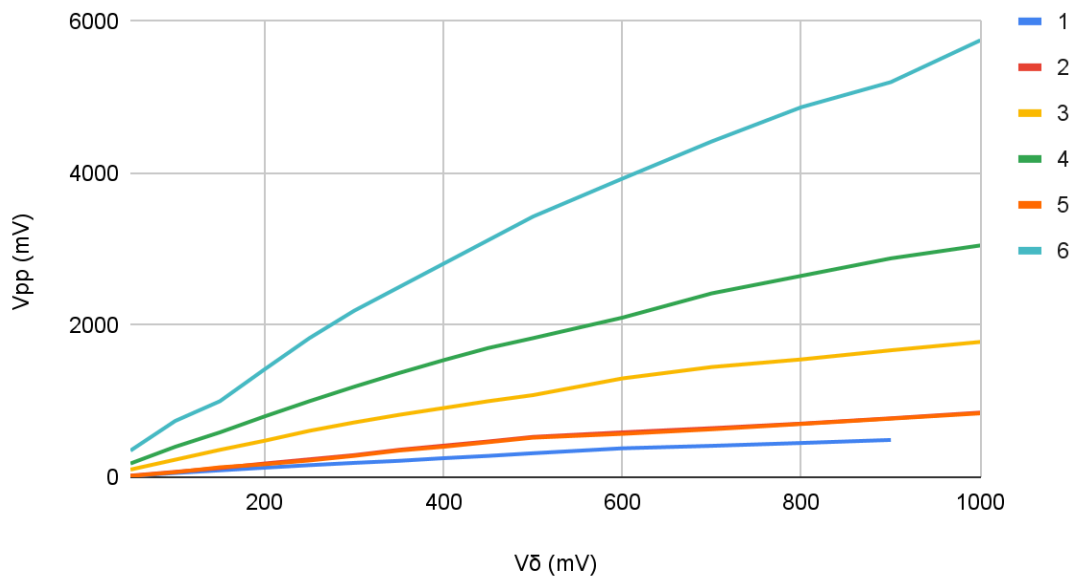
Φαίνονται στην εικόνα 29 οι διαφορετικές καμπύλες των διαφόρων τοπολογιών και, επομένως, λόγω σπειρών μεταξύ πηνίου λήψης και διέγερσης. Με βάση αυτό, μπορεί να γίνει η σχετική σύγκριση των διατάξεων.

V_{pp} (mV) - V_{δ} (mV) | $f = 1Hz$ σταθερή



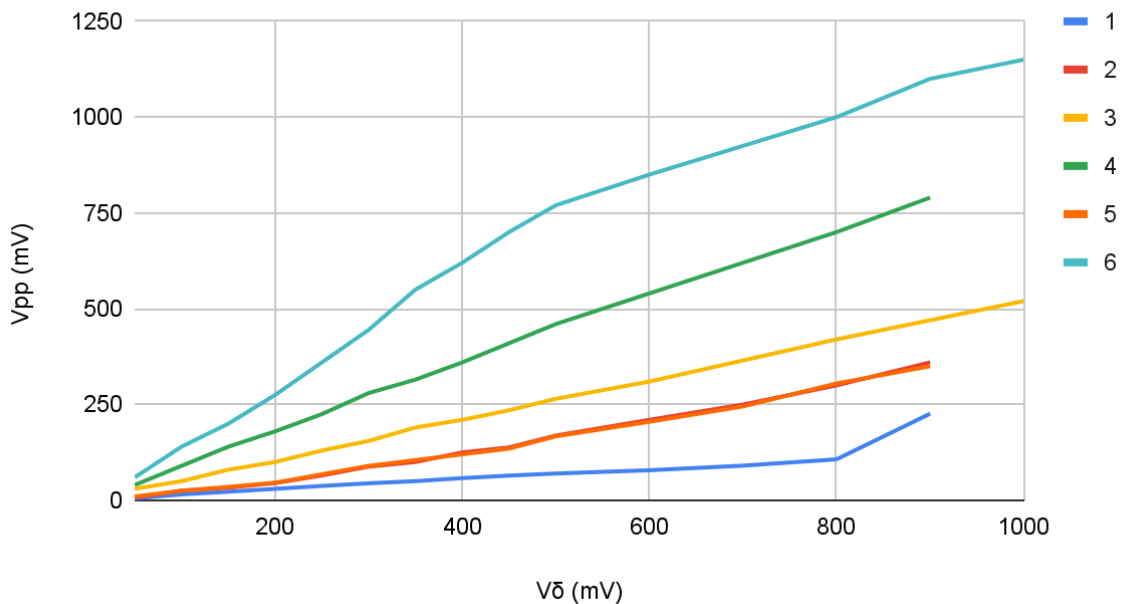
Εικόνα 30 : Διάγραμμα τάσης απόκρισης του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 1Hz.

V_{pp} (mV) - V_{δ} (mV) | $f=0,5$ Hz σταθερή



Εικόνα 31 : Διάγραμμα τάσης απόκρισης του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 0,5Hz.

V_{pp} (mV) - V_{δ} (mV) | $f=0,1$ Hz σταθερή

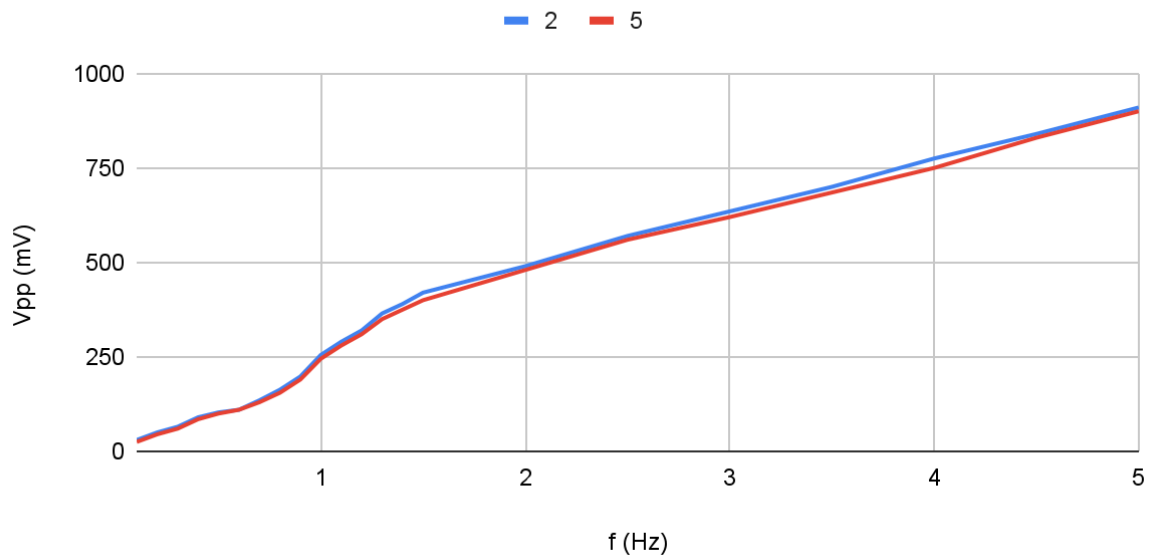


Εικόνα 32 : Διάγραμμα τάσης απόκρισης του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης, για σταθερή συχνότητα 0,1Hz.

Στις περιπτώσεις, όπου τα παραπάνω διαγράμματα δεν φτάνουν μέχρι τη μέγιστη τιμή διέγερσης, ο λόγος είναι επειδή το ρεύμα περιορίζεται σε τιμές μέχρι και 3A, ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια του πηνίου διέγερσης, το οποίο σχεδιάστηκε με ονομαστική τιμή ρεύματος 3-5A. Για να διατηρηθεί μία συνοχή στις μετρήσεις, αυτές έγιναν με αυξανόμενες τιμές διέγερσης μέχρι, είτε 1V τάση, 5Hz συχνότητα ή 3A ρεύμα διέγερσης αντίστοιχα.

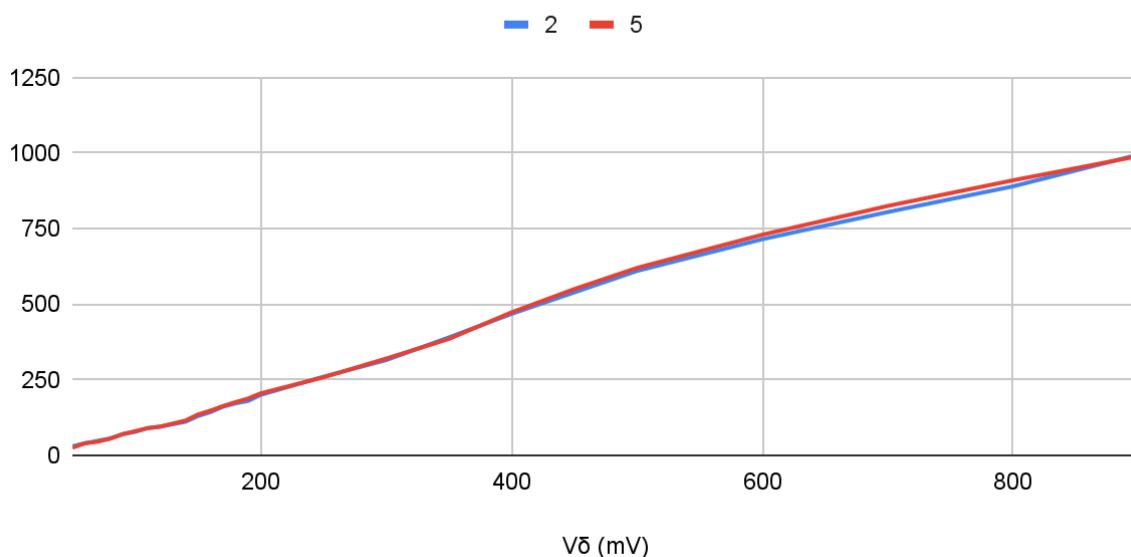
Στα παραπάνω διαγράμματα, οι αποκρίσεις των τοπολογιών 2 και 5 δεν είναι ευδιάκριτες, επειδή τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι αρκετά παρόμοια. Αυτό είναι λογικό με βάση τη θεωρία, καθώς, παρά τον διαφορετικό αριθμό σπειρών στα πηνία λήψης και διέγερσης (δηλαδή η 5η τοπολογία διαθέτει μεγαλύτερο αριθμό σπειρών και στα 2 πηνία), ο λόγος μεταξύ των σπειρών των δύο πηνίων είναι ίδιος και για τις δύο τοπολογίες (για την τοπολογία 2 ο λόγος ισούται με 14,6875, ενώ για την 5 είναι ίσος με 14,677). Οπότε, το αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των σπειρών, αλλά μόνο από το λόγο των σπειρών μεταξύ πηνίου λήψης και διέγερσης. Οι μικρές αποκλίσεις μεταξύ τιμών στις μετρήσεις για τις τοπολογίες 2 και 5 μπορεί να οφείλονται σε διαφορά μεταξύ των εμπεδήσεων των πηνίων, λόγω αυξημένου αριθμού περιελίξεων, καθώς και σε άλλους εξωτερικούς παράγοντες που εισάγουν ένα μικρό ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση. Ακόμη και έτσι, όμως, οι τιμές του αποτελέσματος είναι αρκετά παραπλήσιες, ώστε να επιβεβαιώνεται η θεωρητική ανάλυση. Για να γίνει πιο διακριτή αυτή η συσχέτιση, παρατίθενται δύο διαγράμματα, τα οποία συγκρίνουν μόνο αυτές τις δύο τοπολογίες.

Σύγκριση αποκρίσεων V_{pp} (mV) - f (Hz) για $V_{\delta} = 0,2V$ σταθερή για τις τοπολογίες 2 και 5

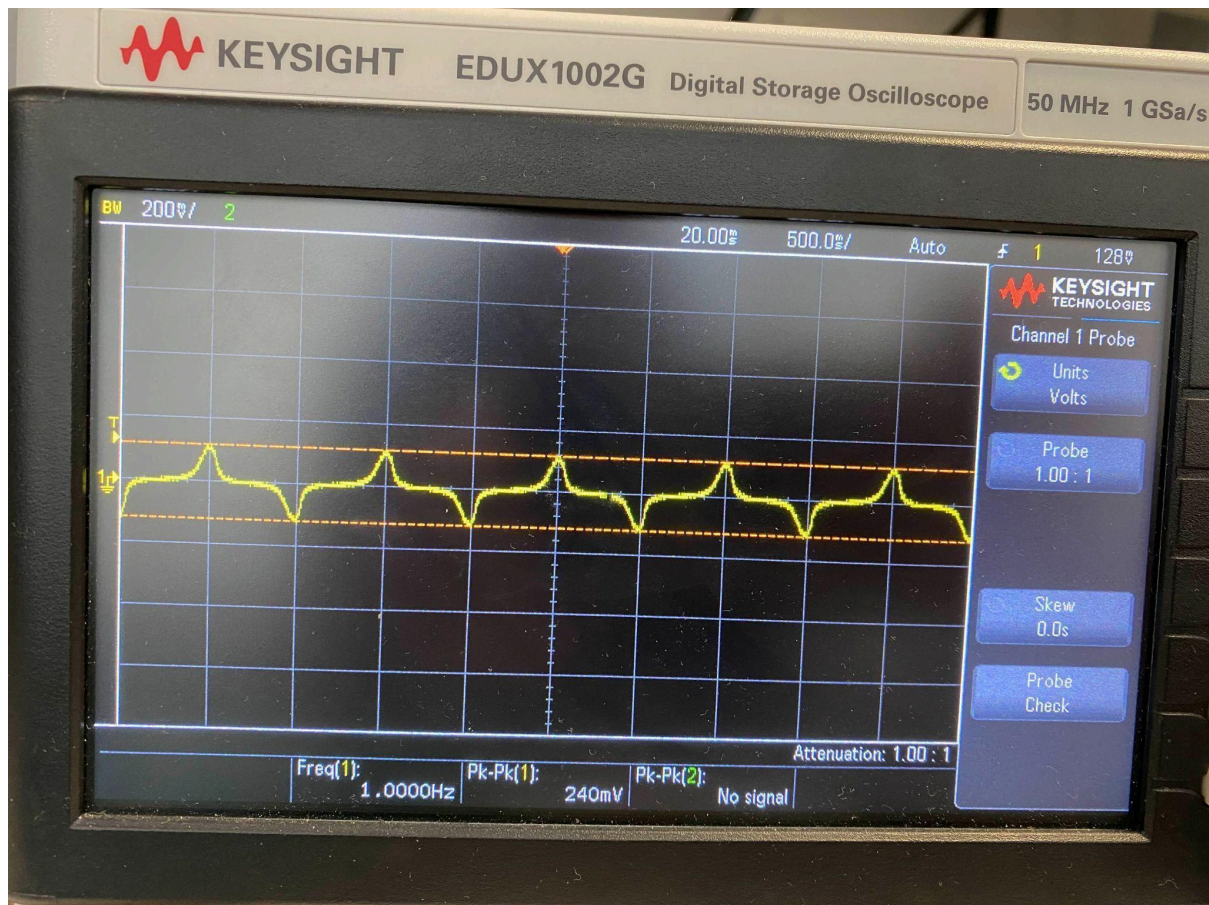


Εικόνα 33 : Διάγραμμα απόκρισης τάσης των τοπολογιών 2 και 5 του αισθητήρα σε συνάρτηση με τη συχνότητα διέγερσης για σταθερή τάση διέγερσης ίση με 0,2V

Σύγκριση αποκρίσεων V_{pp} (mV) - V_{δ} (mV) για $f = 1Hz$ σταθερή για τις τοπολογίες 2 και 5

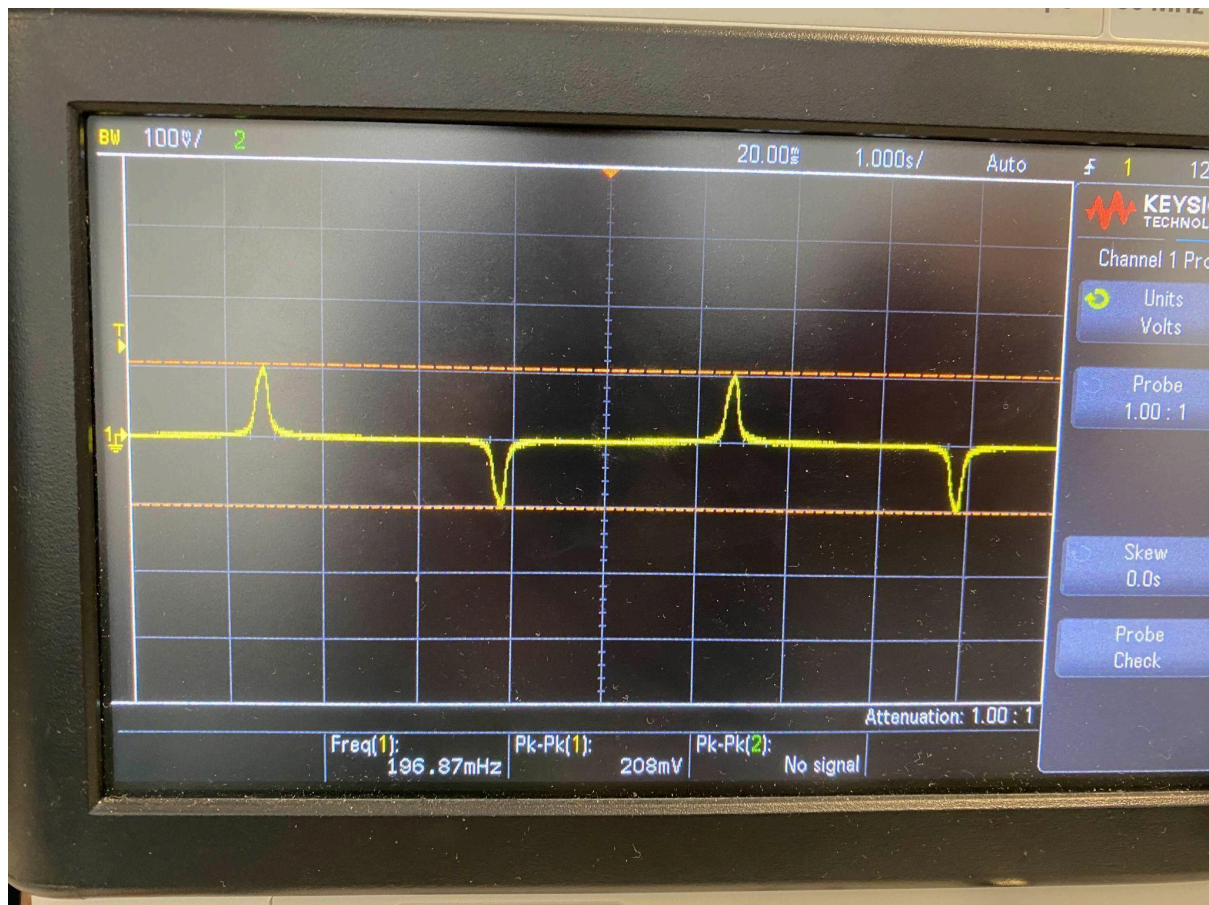


Εικόνα 34 : Διάγραμμα απόκρισης τάσης των τοπολογιών 2 και 5 του αισθητήρα σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης για σταθερή συχνότητα διέγερσης ίση με 1Hz



Εικόνα 35 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 1Hz και τάση διέγερσης 70mV.

Φαίνεται στην εικόνα 35 η χαρακτηριστική κυματομορφή της τάσης απόκρισης του μαγνητικού αισθητήρα, η οποία είναι μηδενική στη μόνιμη κατάσταση και παρουσιάζει ένα μέγιστο μόνο όταν παρατηρείται εναλλαγή του προσήμου της τάσης διέγερσης, αφού τότε ο όρος dv/dt είναι μη μηδενικός και προκαλεί την επαγωγή ρεύματος στο πηνίο διέγερσης, οπότε και τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου διέγερσης στο σύστημα. Λόγω του σχετικά χαμηλού λόγου σπειρών και της χαμηλής τάσης διέγερσης, φαίνεται πως τα peaks της τάσης απόκρισης δεν είναι πολύ διακριτά και το σήμα περιέχει αρκετό θόρυβο. Παρά τη χαμηλή τάση διέγερσης, είναι σημαντικό ότι το σήμα ενισχύεται στην έξοδο του αισθητήρα, εξαιτίας του υψηλού λόγου σπειρών μεταξύ πηνίου λήψης και διέγερσης. Αυτή η ενίσχυση μέσω του μαγνητικού κυκλώματος, δηλαδή του δοκιμίου και των δύο ηλεκτρομαγνητικών yokes, καθιστά δυνατή την παρατήρηση μικρών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου και, επομένως, τη μελέτη των μαγνητικών χαρακτηριστικών του δείγματος. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η ενίσχυση, τόσο μικρότερες μεταβολές μπορούν να παρατηρηθούν για μικρότερες τιμές συχνότητας και τάσης διέγερσης, κάνοντας δυνατή την υψηλότερη ποιότητα μέτρησης.

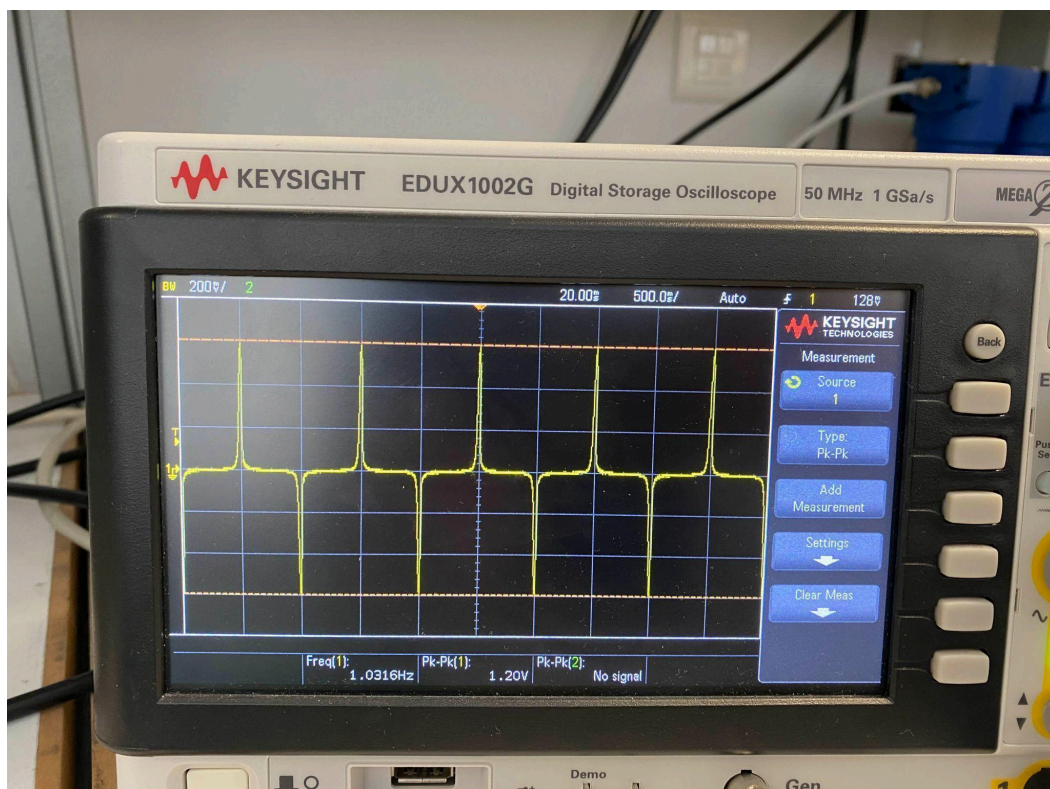


Εικόνα 36 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 0,2Hz και τάση διέγερσης 200mV.

Παρατηρείται στην εικόνα 36 η επίδραση της χαμηλότερης συχνότητας διέγερσης στο σήμα απόκρισης, καθώς αυξάνεται ο απαιτούμενος χρόνος για μία μέτρηση, ενώ οι κορυφές της τάσης απόκρισης είναι πιο διακριτές. Επίσης, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα διέγερσης, τόσο μειώνεται η επίδραση των δινορευμάτων, αφού αυτά εξαρτώνται άμεσα από τη συχνότητα του ρεύματος και μαγνητικού πεδίου. Σε διατάξεις με μικρότερο λόγο σπειρών μεταξύ των πηνίων αυτές οι χαμηλές τιμές τάσης και συχνότητας διέγερσης επιστρέφουν πιο δυσανάγνωστο αποτέλεσμα, με τα peaks της τάσης να αντικαθίστανται από πιο ομαλές καμπύλες, χωρίς καθαρό μέγιστο και μεγαλύτερο ποσοστό θορύβου. Το αντίθετο συμβαίνει για διατάξεις με μεγαλύτερο λόγο σπειρών μεταξύ πηνίου διέγερσης και λήψης, στις οποίες περιπτώσεις η τάση απόκρισης είναι μεγαλύτερη, ακόμα και για χαμηλές συχνότητες, οπότε η μέγιστη τιμή της τάσης αυτής είναι ευδιάκριτη και το ποσοστό θορύβου μειώνεται, ως αποτέλεσμα της αύξησης του επιπέδου της τάσης απόκρισης.



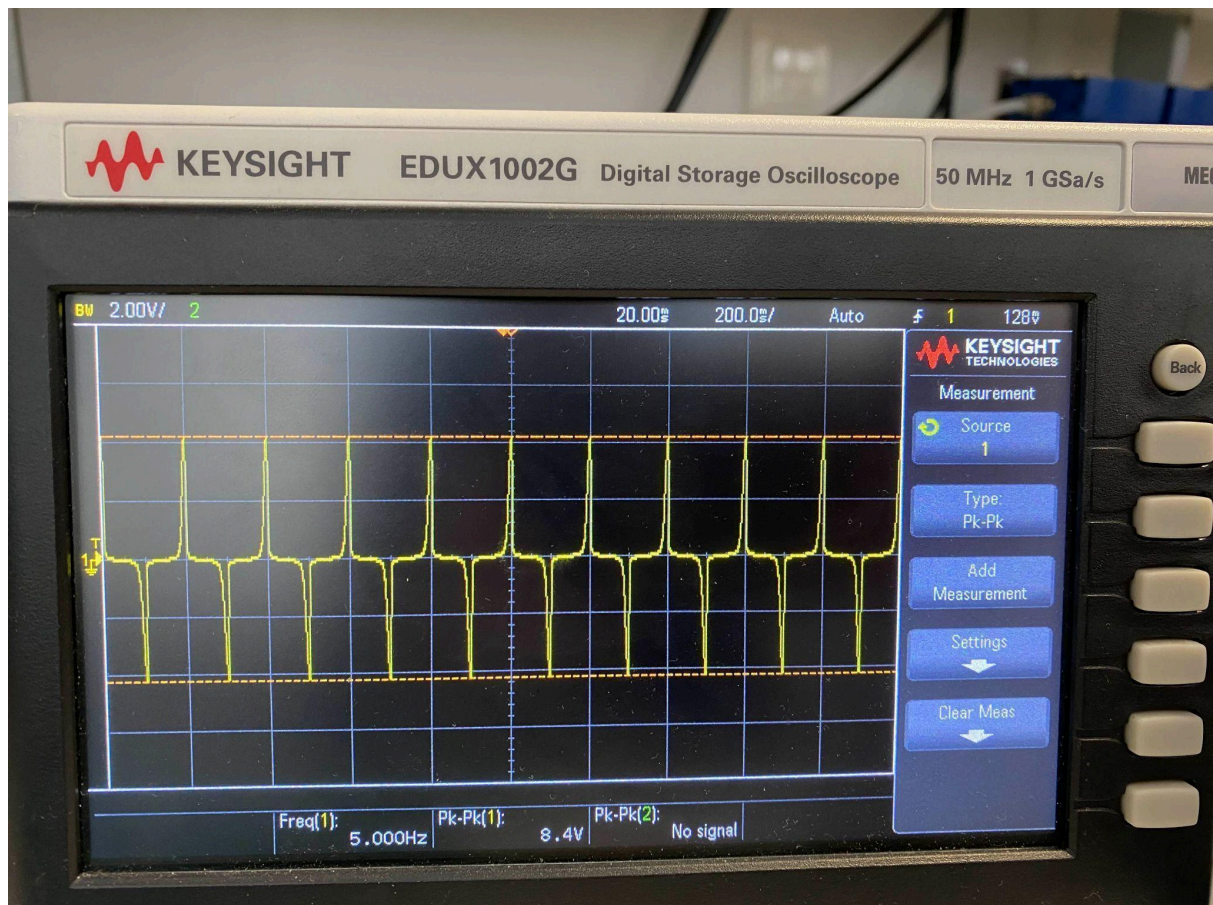
Εικόνα 37 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 2Hz και τάση διέγερσης 200mV.



Εικόνα 38 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 3^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 1Hz και τάση διέγερσης 300mV.

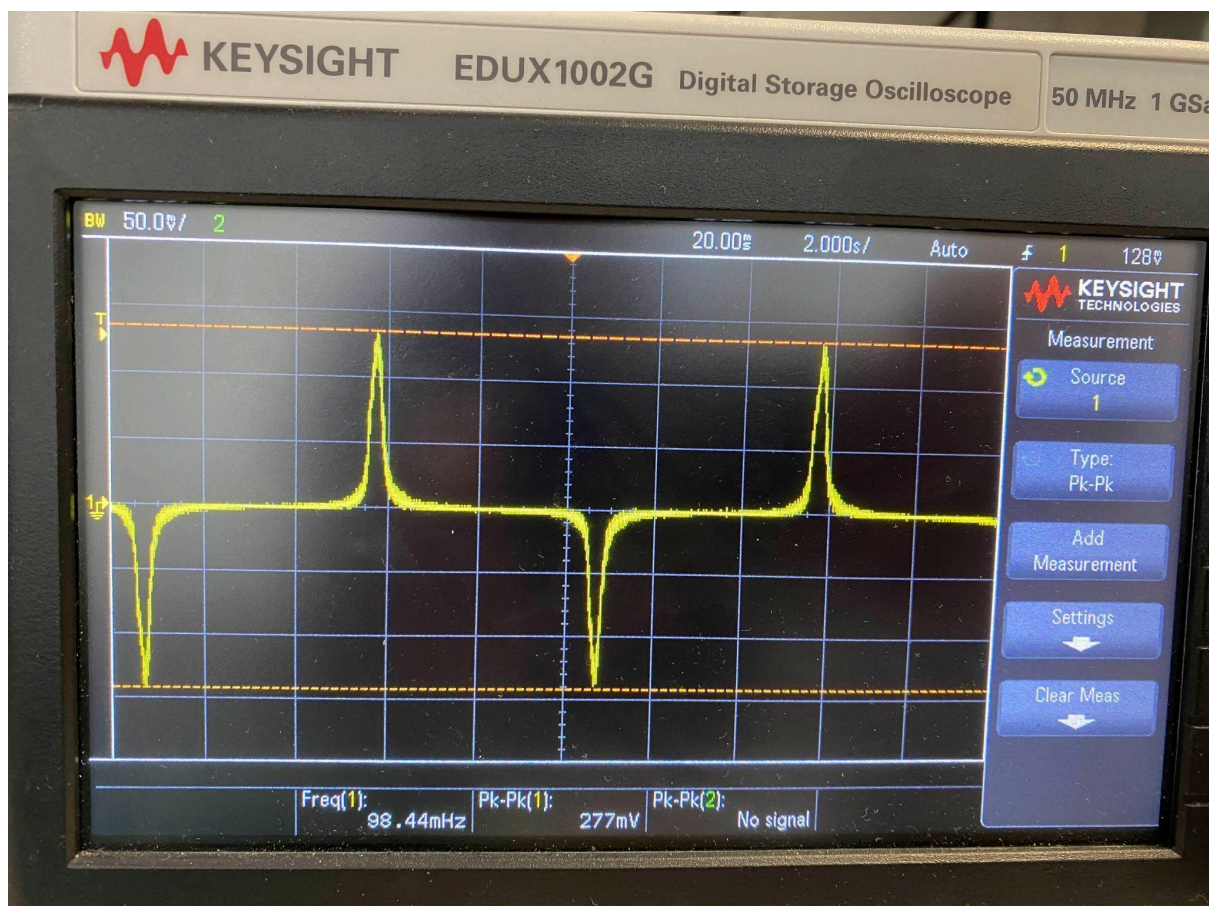
Φαίνεται στις εικόνες 37 και 38 καθαρά η διαφορά ποιότητας του σήματος από τις προηγούμενες μετρήσεις με χαμηλότερη συχνότητα διέγερσης. Η υψηλή συχνότητα δημιουργεί μεγαλύτερη πυκνότητα δινορευμάτων στον όγκο του υλικού, όμως αυξάνει το ρυθμό εναλλαγής τάσης, άρα και την ένταση του επαγόμενου ρεύματος στο πηνίο διέγερσης, οπότε και την ένταση του μαγνητικού πεδίου και την πυκνότητα μαγνητικής ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη τιμή τάσης απόκρισης, πιο διακριτά μέγιστα στην κυματομορφή εξόδου και λιγότερο ποσοστό θορύβου στο τελικό σήμα. Για διατάξεις, στις οποίες ο λόγος σπειρών μεταξύ των πηνίων είναι μικρός, ένας εύκολος τρόπος για μετρήσεις είναι η αύξηση της συχνότητας ή τάσης διέγερσης, ώστε το σήμα εξόδου να αποκτήσει μεγαλύτερη τιμή και να είναι εύκολη η ανάγνωση και ανάλυσή του. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως, ιδανικά, οι μαγνητικές μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε χαμηλές συχνότητες, της τάξης του 0,1-1 Hz, οπότε μεγαλύτερες συχνότητες εισάγουν σφάλματα λόγω απωλειών και δινορευμάτων, καθώς αυξάνουν αρκετά την πυκνότητα μαγνητικής ροής στο δείγμα, το οποίο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη απόκριση, λόγω μαγνητικού κορεσμού ανάλογα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του κάθε δείγματος. Αυτό έχει να κάνει με τη μορφή του βρόχου υστέρησης και ο λόγος που οι μετρήσεις σε χαμηλές συχνότητες, άρα χαμηλά πεδία, θεωρούνται βέλτιστες είναι επειδή σε αυτές τις τιμές η κλίση του βρόχου υστέρησης, άρα η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, έχει τη μέγιστη τιμή της, οπότε αυξάνεται αρκετά η μαγνητική απόκριση του συστήματος, ακόμη και για πολύ μικρές αλλαγές του πεδίου διέγερσης. Σε περιπτώσεις που χρειάζεται να μετρηθούν φαινόμενα, όπως Barkhausen Jumps, τα οποία παίρνουν πολύ μικρές τιμές, είναι απαραίτητη αυτή η υψηλή ενίσχυση και διακριτική ικανότητα για να γίνει ανίχνευση και ανάλυση των επιδράσεων και κυματομορφών αυτών των φαινομένων.

Η μέτρηση με συχνότητα διέγερσης 1Hz είναι αρκετά πιο αξιόπιστη και το επίπεδο τάσης εξόδου είναι αρκετό για να παρέχει την απαιτούμενη διακριτική ικανότητα και ενίσχυση, ώστε να γίνει σωστή μελέτη των χαρακτηριστικών του δείγματος, μέσω των μικρών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου. Φαίνεται πως, παρόλο που η τάση διέγερσης είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση, κατά 100 mV, η μείωση της συχνότητας διέγερσης κατά 1Hz έχει μεγαλύτερη επίδραση στην απόκριση τάσης του αισθητήρα, οπότε η τάση εξόδου έχει μικρότερη τιμή. Ταυτόχρονα, όμως, η κυματομορφή του σήματος περιέχει χαμηλό ποσοστό θορύβου και διακριτές κορυφές τάσεις, οπότε η μέτρηση και ανάλυση γίνεται αρκετά εύκολη και αξιόπιστη, ενώ η ίδια η μέτρηση γίνεται σε ρυθμό ενός κύκλου το δευτερόλεπτο, οπότε είναι γρήγορη σε σχέση με χαμηλότερες συχνότητες, οι οποίες χρειάζονται αρκετά δευτερόλεπτα για κάθε κύκλο. Για γρήγορες εργαστηριακές μετρήσεις σε δείγματα χάλυβα ως προς τη δομική τους ακεραιότητα, μία τέτοια μέτρηση είναι αρκετή και ενδείκνυται λόγω της ταχύτητας και ευκολίας ανάλυσης.



Εικόνα 39 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 6^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 5Hz και τάση διέγερσης 200mV.

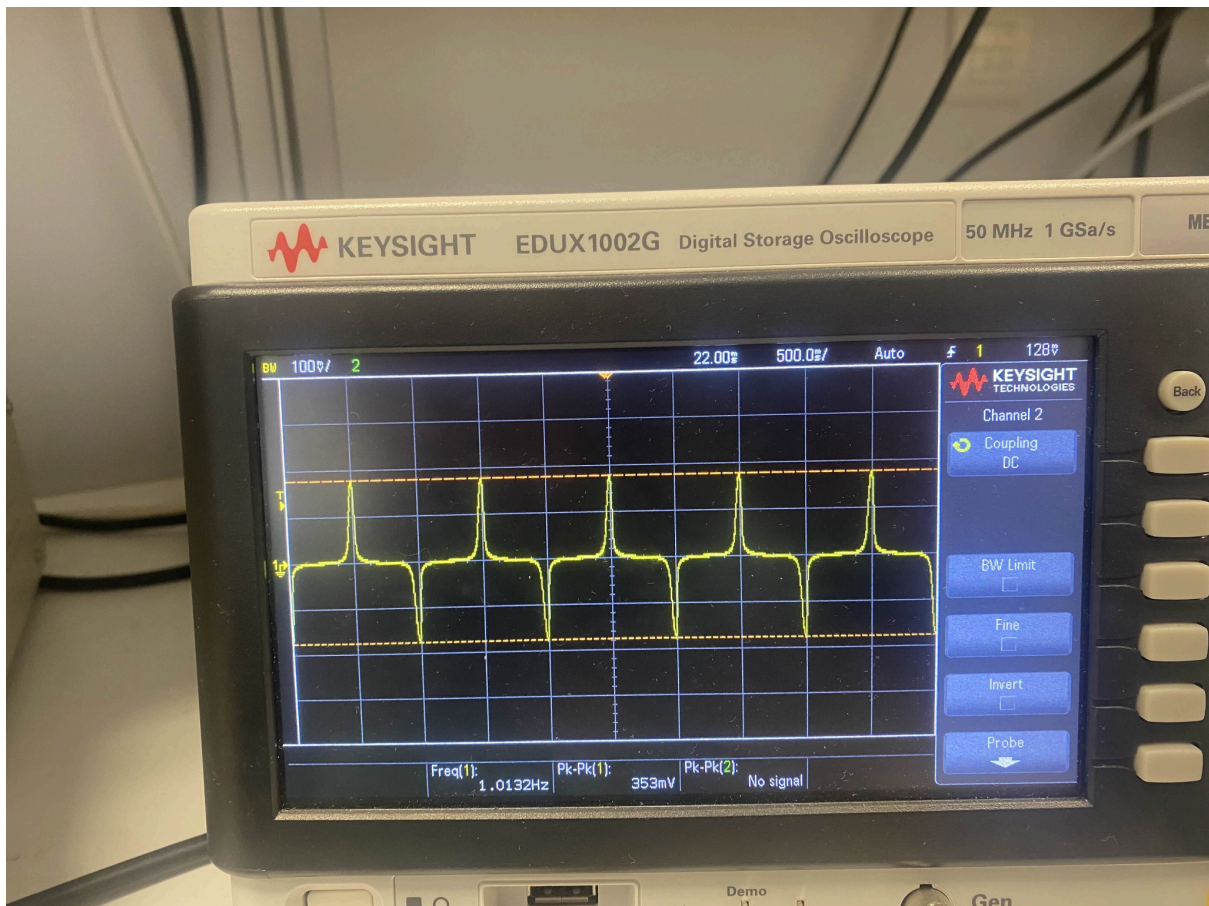
Σε αυτό το παράδειγμα, δηλαδή στην εικόνα 39, υπογραμμίζεται η μεγάλη διαφορά μεταξύ των λόγων σπειρών των πηνίων λήψης και διέγερσης, καθώς ο νόμος του Faraday υποστηρίζει πως, ιδανικά, η τάση εξόδου είναι ανάλογη του λόγου αυτού. Προφανώς, σε ρεαλιστικές μετρήσεις, μαγνητικός κορεσμός του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και απώλειες οφειλόμενες σε ατέλειες της κατασκευής και εξωτερικούς παράγοντες, όπως δυνάμεις μειώνουν την ιδανική αυτή απόκριση. Πάντως, η μεγαλύτερη τάση εξόδου που επιτεύχθηκε ήταν η παραπάνω, με τη χρήση σχετικά υψηλής συχνότητας διέγερσης στα 5Hz για απόκριση 8,4V στην έξοδο του αισθητήρα. Στην έκτη τοπολογία, καθώς αυτή διαθέτει τον υψηλότερο λόγο μεταξύ σπειρών λήψης και διέγερσης, όλες οι μετρήσεις ήταν καθαρά μεγαλύτερης τιμής από τις αντίστοιχες των προηγούμενων τοπολογιών, αλλά και είχαν υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο, οπότε μικρό σφάλμα στη μέτρηση της τάσης εξόδου.



Εικόνα 40 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 6^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 0,1Hz και τάση διέγερσης 200mV.

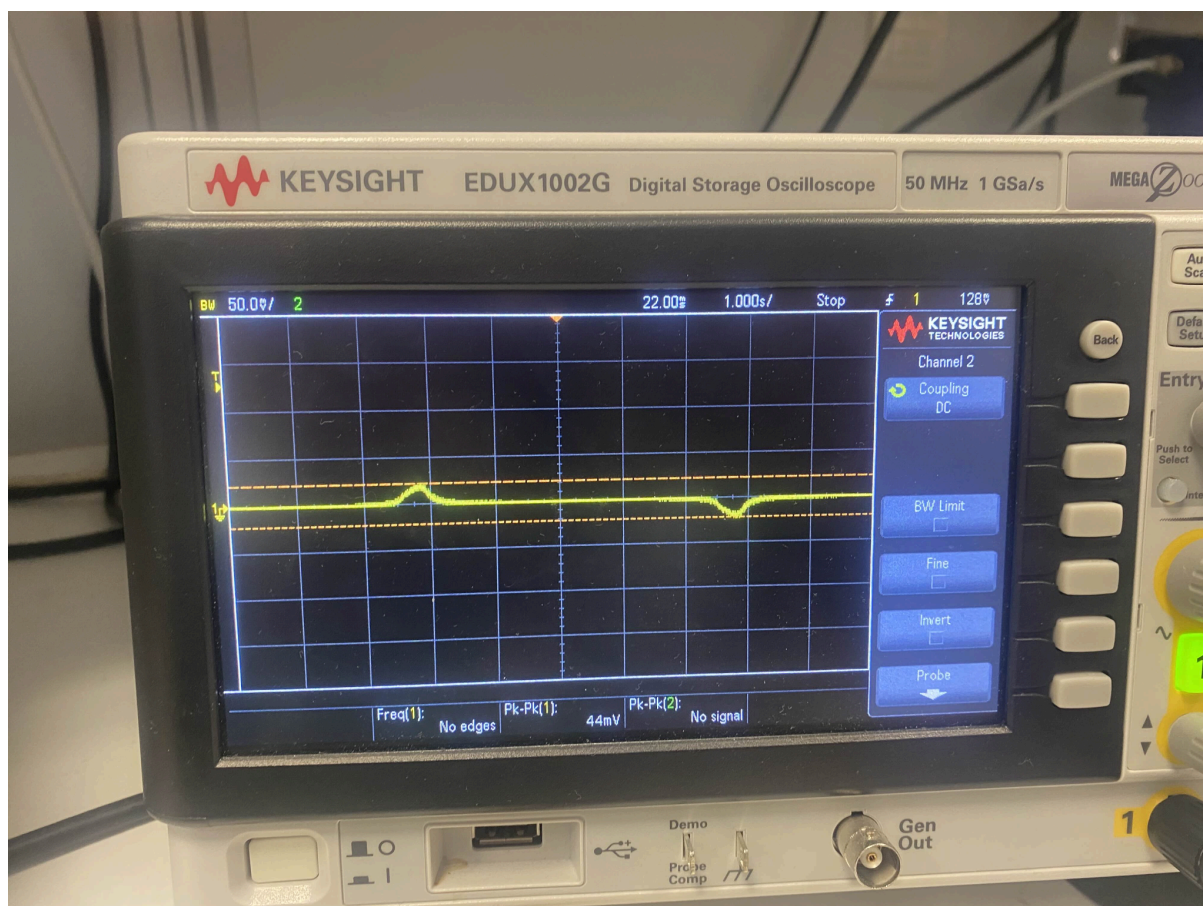
Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του υψηλού λόγου σπειρών μεταξύ πηνίων λήψης και διέγερσης είναι η πιο ευδιάκριτη και χωρίς θόρυβο απόκριση για μικρές συχνότητες διέγερσης. Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα της εικόνας 40, το σήμα εξόδου για συχνότητα 100 mHz έχει μικρό ποσοστό θορύβου και διακριτές κορυφές τάσεις, ενώ τοπολογίες με λιγότερες σπείρες πηνίου λήψης είχαν πολύ μικρή απόκριση για την ίδια τιμή συχνότητας διέγερσης, ή απλά ήταν αδύνατον να μετρηθεί η απόκριση αυτή. Οι δοκιμές χαμηλών συχνοτήτων είναι μεγάλης σημασίας σε εφαρμογές ηλεκτρικού χάλυβα, όπου κύριο ενδιαφέρον έχει η μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας, μελέτη του βρόχου υστέρησης και υπολογισμός απωλειών σιδήρου. Αυτές οι τιμές επηρεάζονται έντονα από τις απώλειες λόγω δινορευμάτων, οι οποίες επιδεινώνονται για μεγαλύτερες τιμές συχνότητας διέγερσης, άρα και πεδίου διέγερσης και μαγνητικής ροής, αλλά επηρεάζονται και από τον μαγνητικό κορεσμό σε αυτές τις υψηλές τιμές πεδίου. Για αυτόν το λόγο, για τέτοιες εφαρμογές, ένα πιο εκλεπτυσμένο αισθητήριο σύστημα είναι αναγκαίο, ώστε να γίνει σωστή μελέτη των μαγνητικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου.

Φαίνεται, στην ίδια εικόνα 40, ακόμα μία μικρή διαφορά μεταξύ της συχνότητας διέγερσης στα 100mHz και της συχνότητας του σήματος απόκρισης στα 98,44Hz. Αυτό το σφάλμα με τιμή 1,56% οφείλεται στην προαναφερθείσα διαφορά φάσης μεταξύ της επαγόμενης τάσης στα πηνία Β και Η, όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 1.5. Οφείλεται κυρίως στη διαφορά εμπέδησης μεταξύ των δύο πηνίων, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς μεταξύ των σπειρών τους (1360 - 32), αλλά και στην παρασιτική χωρητικότητα του πηνίου λήψης, πάλι εξαιτίας του υψηλού αριθμού σπειρών και στρώσεων, οι οποίες δημιουργούν κάποια κενά αέρος ή μονωτικού υλικού και εισάγουν αυτές τις χωρητικότητες στο σύστημα. Πάντως, το σφάλμα της τάξης του 1,56% είναι αρκετά μικρό για να θεωρηθεί αμελητέο, ή τουλάχιστον να μην επηρεάζει αισθητά το αποτέλεσμα της μέτρησης, αν και θα μπορούσε να διορθωθεί με την τεχνική διόρθωσης φάσης, η οποία περιγράφεται επίσης στην παράγραφο 1.5.



Εικόνα 41: Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 1^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 1Hz και τάση διέγερσης 350mV.

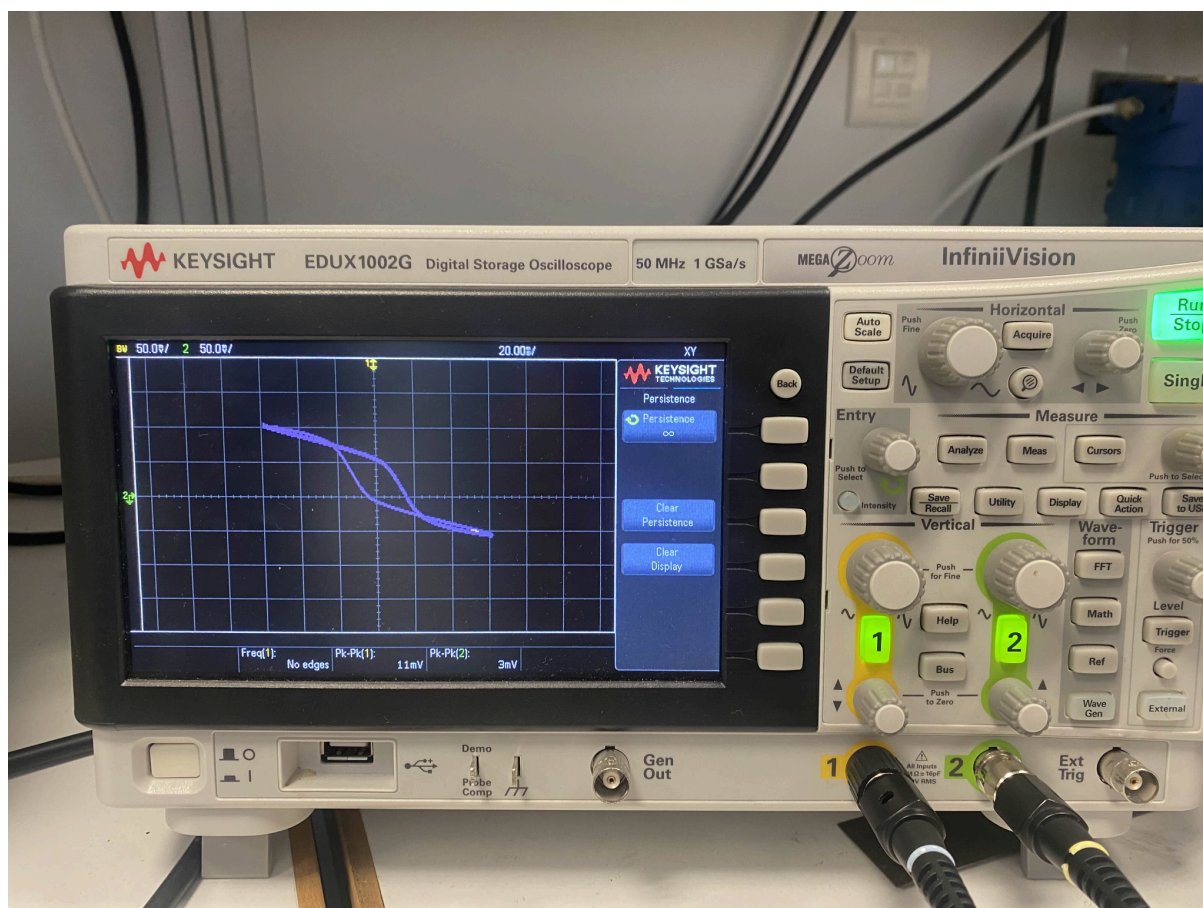
Φαίνεται στην εικόνα 41 η μείωση της απόλυτης τιμής απόκρισης και το ελαττωμένο πλάτος στο σήμα εξόδου του αισθητήρα, τα οποία είναι αναμενόμενα σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση και τα διαγράμματα των μετρήσεων.



Εικόνα 42 : Η απόκριση της διάταξης χρησιμοποιώντας την 1^η τοπολογία με συχνότητα διέγερσης 0,1Hz και τάση διέγερσης 300mV.

Είναι εμφανής στην εικόνα 42 η διαφορά της απόκρισης σε σχέση με αυτή της εικόνας 41, ιδιαίτερα σε χαμηλές συχνότητες διέγερσης. Φαίνεται πως το σήμα απόκρισης είναι λιγότερο διακριτό και εμφανίζει δυσκολία προσδιορισμού και μέτρησης των ακμών της κυματομορφής. Ταυτόχρονα, το σήμα περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό θορύβου, άλλον έναν παράγοντα που καθιστά πιο δύσκολη την ανάλυση και ακρίβεια μέτρησης του σήματος απόκρισης.

Αφού, λοιπόν, είναι εμφανές πως η 6η τοπολογία με τον μεγαλύτερο λόγο σπειρών μεταξύ των δύο πηνίων είναι αυτή που παρέχει την βέλτιστη απόκριση σε χαμηλές συχνότητες (0,1Hz), αποφασίστηκε πως αυτή θα χρησιμοποιηθεί για τις δοκιμές με τον ολοκληρωτή και τη μελέτη του βρόχου υστέρησης. Με τη χρήση του παραπάνω ολοκληρωτή, του οποίου αναφέρθηκε η υλοποίηση στην παράγραφο 2.1, ολοκληρώνεται το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Η έξοδος του ολοκληρωτή, η οποία είναι η ολοκληρωμένη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, συνδέεται στο πρώτο κανάλι του παλμογράφου και στο δεύτερο συνδέεται το σήμα διέγερσης, από τα άκρα του πηνίου διέγερσης. Μετά, με κατάλληλη ρύθμιση του παλμογράφου, σχεδιάζεται στην οθόνη το κοινό διάγραμμα των δύο, δηλαδή στον άξονα του x αντιστοιχεί το σήμα διέγερσης και στον άξονα y το ολοκληρωμένο σήμα εξόδου.



Εικόνα 43 : Φωτογραφία της μέτρησης του βρόχου υστέρησης με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Φαίνεται στην εικόνα 43 πως ο βρόχος υστέρησης είναι ανεστραμμένος, γεγονός το οποίο οφείλεται στην αναστροφή του πεδίου στο πηνίο, λόγω του νόμου Faraday και στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία του τελεστικού ενισχυτή στο κύκλωμα του ολοκληρωτή. Για αυτό, το πρόσημο αλλάζει και ο βρόχος υστέρησης παρουσιάζεται ανεστραμμένος ως προς τον άξονα y . Οι ατέλειες στα άκρα του βρόχου, στην περιοχή κορεσμού, όπου παρουσιάζεται μία τοπική αναδίπλωση των δύο κλάδων του βρόχου, είναι πανομοιότυπες με αυτές που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.5, σχετικά με τη διαφορά φάσης μεταξύ των δύο πηνίων, γεγονός που οφείλεται (όπως έχει ήδη αναφερθεί) στην παρασιτική χωρητικότητα του πηνίου λήψης, στη μεγάλη διαφορά αριθμού σπειρών μεταξύ των δύο πηνίων και στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή στο εργαστήριο, ως αποτέλεσμα των πολλαπλών συσκευών συνδεδεμένων στο δίκτυο σε διαρκή λειτουργία κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Ακόμα και με αυτό το σφάλμα, η μορφή του βρόχου υστέρησης είναι η αναμενόμενη, ενώ η ποιότητα της μέτρησης είναι υψηλή, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή συχνότητα διέγερσης (0,1Hz).

Συνοψίζοντας, λοιπόν, με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, μπορούν να διακριθούν ορισμένες βασικές διαφορές και ομοιότητες ανάμεσα στις διαφορετικές τοπολογίες του αισθητήρα, καθώς και κάποια ακόμη συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία του αισθητήρα.

Καταρχάς, η βασικότερη διαφορά μεταξύ των διατάξεων είναι ο λόγος μεταξύ των σπειρών στα πηνία λήψης και διέγερσης. Φαίνεται από τις μετρήσεις πως μεγαλύτερος λόγος σπειρών έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο λόγο ενίσχυσης μεταξύ τάσης εισόδου και τάσης απόκρισης. Ταυτόχρονα, μειώνεται το ποσοστό θορύβου και αρμονικών στην τελική κυματομορφή στην έξοδο του αισθητήρα και αυξάνεται η διακριτική ικανότητά του, δηλαδή η μεταβολή της απόκρισης του αισθητήρα για μικρές μεταβολές του μετρούμενου μεγέθους. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της συχνότητας ή τάσης διέγερσης, τόσο μεγαλύτερη απόκριση παρουσιάζεται στην έξοδο του συστήματος, ανεξάρτητα με τον λόγο σπειρών της κάθε διάταξης. Όμως, για χαμηλότερες τιμές των μεγεθών διέγερσης, οι αισθητήρες με μεγαλύτερο λόγο σπειρών αποδίδουν καλύτερα. Αυτό σημαίνει πως οι κυματομορφές στην έξοδο διαθέτουν στενούς παλμούς με ευδιάκριτες αιχμές τάσεις και μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), σε αντίθεση με διατάξεις με μικρότερο λόγο σπειρών.

Επίσης, φαίνεται πως οι διατάξεις με μικρότερο λόγο μεταξύ των σπειρών τους αναπτύσσουν μεγαλύτερες τιμές ρεύματος διέγερσης για τις ίδιες τιμές τάσης διέγερσης. Αυτό οφείλεται στη μικρή τιμή της εμπέδησης του πηνίου διέγερσης, η οποία με τη σειρά της οφείλεται στον μικρό αριθμό περιελίξεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μικρότερο εύρος μέτρησης πριν αναπτυχθούν αρκετά μεγάλες τιμές ρεύματος στο πηνίο διέγερσης, ώστε να τεθεί σε κίνδυνο η μηχανική αντοχή του, όμως καθιστά τη διάταξη ακατάλληλη για μετρήσεις όπου είναι απαραίτητες μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος και πεδίου διέγερσης. Σε αυτήν την κατασκευή, ο βασικός άξονας λειτουργίας του αισθητήρα είναι η ενισχυτική συμπεριφορά του μεγάλου λόγου μεταξύ σπειρών λήψης και διέγερσης, αντί για δοκιμές σε υψηλές συχνότητες ή υψηλές τιμές πεδίου.

Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις περιορίστηκαν σε χαμηλές τιμές συχνοτήτων και ιδιαίτερα στην περιοχή μεταξύ 0,1-1Hz. Στις χαμηλές αυτές τιμές πεδίου καθίσταται δυνατή η αποτελεσματική μέτρηση ακριβείας των μαγνητικών χαρακτηριστικών διαφόρων υλικών, όπως η μαγνητική διαπερατότητα και, με την κατάλληλη επεξεργασία του σήματος και την ολοκλήρωσή του, ο βρόχος υστέρησης. Γενικά, παρατηρήθηκε πως, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα διέγερσης του μαγνητικού πεδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η διεύθυνση των μαγνητικών γραμμών στο υλικό. Επομένως, αυτές οι μετρήσεις παρέχουν πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη δομική κατάσταση του υλικού συνολικά στον όγκο του και όχι μόνο επιφανειακά, όπως γίνεται με μεγαλύτερες τιμές συχνότητας διέγερσης.

3.2 Μελλοντική Έρευνα

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας μελετήθηκε η διαδικασία κατασκευής και ο τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα Single Sheet Tester και διαφόρων διατάξεών του. Όμως, υπάρχουν ακόμη αρκετοί τομείς αυτής της έρευνας που έμειναν εκτός του πεδίου ενδιαφέροντος του συγκεκριμένου έργου, οπότε και αποτελούν βάση για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο.

Αρχικά, κατά την κατασκευή του αισθητήρα, όλη η διαδικασία έγινε με το χέρι, χωρίς τη χρήση μηχανημάτων ακριβείας ή τον ακριβή υπολογισμό των διαστάσεων και σπειρών των πηνίων, καθώς αυτό δεν ήταν δυνατό. Μία πρόταση για βελτίωση της διάταξης είναι η τυποποίηση της κατασκευής της διάταξης, με αυστηρά όρια που θέτουν το κενό ανάμεσα στις σπείρες των πηνίων, τη μέτρηση του κενού αέρος μεταξύ των πολλαπλών στρώσεων, αλλά και τον ακριβή αριθμό τους για πιο αναλυτική μελέτη του λόγου ενίσχυσης μεταξύ των πηνίων λήψης και διέγερσης. Η ίδια η διαδικασία της κατασκευής μπορεί να γίνει με τη χρήση μηχανημάτων, ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιομορφία και συνοχή των τυλίξεων του πηνίου και να εξαλειφθούν τυχόν σφάλματα ή κατασκευαστικές αστοχίες, όπως διασταυρώσεις ή ελλiptή σημεία στην επιφάνεια του πηνίου. Αυτά μπορεί να προκαλέσουν ανομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο ή να επηρεάσουν αρνητικά τη διακριτική ικανότητα του αισθητήρα και τη μετρητική ικανότητα της διάταξης ως σύνολο.

Ταυτόχρονα, είναι σημαντική η μελέτη του διάκενου αέρα ανάμεσα στα δύο ηλεκτρομαγνητικά yokes εκατέρωθεν του δείγματος, καθώς η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι πολύ μικρότερη από αυτή του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και διάκενα της τάξης των δεκάτων του χιλιοστού μπορεί να επηρεάσουν αρκετά την απόδοση του μαγνητικού κυκλώματος. Με κατάλληλη μελέτη της διάταξης και χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης της κατανομής μαγνητικού πεδίου, όπως το femm, είναι δυνατή η ανάλυση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στη διάταξη και ο προσδιορισμός, καθώς και η διόρθωση τυχόν αστοχιών της κατασκευής, ώστε το πεδίο να παραμένει ομοιόμορφο και χωρίς περισσειες απώλειες. Αυτό, καθώς και η τυποποίηση των παραμέτρων του πυρήνα και των παραμέτρων μέτρησης, όπως μαγνητική διαπερατότητα, τάση και συχνότητα διέγερσης και άλλα, είναι σημαντική, ώστε να διατηρείται η συνοχή και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, αλλά και για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μετρήσεων με την διάταξη του SST, χωρίς αυτές να επηρεάζονται από παράγοντες εξωτερικούς της μέτρησης.

Επιπλέον, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο είχαν τη διάσταση του πλάτους τους μετρημένη ώστε να κατασκευαστεί το άνοιγμα της πλαστικής βάσης των πηνίων και του αισθητήρα. Όμως, στο μήκος τους, τα δείγματα ήταν πολύ μεγαλύτερα, με αποτέλεσμα να μπορεί να μετρηθεί μόνο ένα τμήμα του υλικού κάθε φορά, το οποίο είναι αποδεκτό για μετρήσεις της μικροδομής και γενικών μαγνητικών ιδιοτήτων του δείγματος, αλλά ακατάλληλο για μετρήσεις με σκοπό τη σάρωση του

όγκου του υλικού, ώστε να εντοπιστούν συγκεκριμένα σημεία ατελειών. Με αυτόν τον σκοπό, είναι δυνατή η μελέτη και ανάπτυξη μίας διάταξης προς αυτοματοποίηση της μέτρησης με τη χρήση Single Sheet Tester. Δηλαδή, ένας τρόπος να κινείται το δείγμα εσωτερικά του αισθητήρα με σταθερή ταχύτητα, ώστε να πραγματοποιείται μία μέτρηση καθ' όλο το μήκος του. Έτσι, με το αποτέλεσμα της μέτρησης, θα μπορούν να εντοπιστούν τα επίμαχα σημεία ατέλειας στη μικροδομή, εφιστώντας την προσοχή στα συγκεκριμένα τμήματα, ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν τα αίτια των διαταραχών της μικροδομής με βάση το σημείο στο οποίο προκλήθηκαν πάνω στο δοκίμιο.

Επίσης, ένα σημαντικό μέτρο κάθε δοκιμής είναι η αβεβαιότητα και οι πηγές σφάλματος, όπως αυτές αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.5. Η μελέτη αυτών, καθώς και η διαδικασία εξάλειψης των πηγών τους είναι ένας τρόπος να εξασφαλιστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και η τυποποίηση της μέτρησης, αλλά και της διάταξης. Ιδανικά, για την μελέτη αυτή, θα γίνονταν μετρήσεις σε περιβάλλον με την ελάχιστη δυνατή ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, όπως στο εσωτερικό ενός κλωβού Faraday. Επίσης, πρέπει να βελτιωθούν οι διεπαφές μεταξύ του αισθητήρα και των σημάτων διέγερσης και απόκρισης, ώστε η αντίσταση λόγω χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, εξαιτίας σκόνης ή τμημάτων της μόνωσης που παρεμποδίζουν τη σύνδεση, να μην επηρεάζει τη μέτρηση. Παράγοντες όπως η διαφορά φάσης στις επαγόμενες τάσεις των δύο πηνίων πρέπει να αντιμετωπιστούν, για παράδειγμα με κάποια εφαρμογή της μεθόδου διόρθωσης φάσης, η οποία επίσης αναφέρθηκε σύντομα στην παράγραφο 1.5, ώστε να εξαλειφθούν οι ενδογενείς πηγές σφάλματος κατά τη διαδικασία της μέτρησης.

Ακόμη, ένα πεδίο ενδιαφέροντος υπάρχει στην ευρύτερη εφαρμογή του αισθητήρα Single Sheet Tester. Είναι δυνατή η μελέτη περισσότερων τοπολογιών, όπου γίνονται πειράματα με διαφορετικές διατάξεις, για παράδειγμα περισσότερες σπείρες πηνίου διέγερσης, ώστε να αυξηθεί η εμπέδηση του πηνίου αυτού και, επομένως, η ανοχή στην τάση και το ρεύμα διέγερσης. Έτσι, είναι δυνατή η εφαρμογή του αισθητήρα σε μετρήσεις υψηλής πυκνότητας ρεύματος και συχνοτήτων, άρα δοκιμές υψηλών πεδίων και μελέτη της μη περιοχής κορεσμού του βρόχου υστέρησης των υλικών. Προφανώς, μεταβάλλοντας τις προδιαγραφές και τα δείγματα είναι δυνατή η χρήση του SST σε ένα πλήθος εφαρμογών ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, ώστε να μελετηθεί ένα πλήθος ιδιοτήτων του εκάστοτε υλικού για διαφορετικά πεδία ενδιαφέροντος.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα μελέτης και υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος για τη λήψη και απευθείας ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση παλμογράφου. Αυτό το κύκλωμα θα μπορούσε να έχει ως βάση έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος θα μπορεί και να παράγει το σήμα εισόδου για το πηνίο διέγερσης (έπειτα από την ενίσχυσή του με κάποιον ενισχυτή ισχύος) και να λαμβάνει τη μέτρηση από το πηνίο λήψης της διάταξης και να επεξεργάζεται το σήμα αυτό. Επιπλέον, με τη βοήθεια ενός τέτοιου μικροελεγκτή είναι εφικτό να γίνει και σύνδεση της διάταξης με κάποιον server, όπου μπορούν να

αποστέλλονται τα δεδομένα μέσω Wi-Fi και να είναι προσβάσιμα στο χρήστη μέσω ενός κατάλληλα διαμορφωμένου γραφικού περιβάλλοντος. Έτσι, δημιουργείται η δυνατότητα ανάπτυξης διατάξεων, μικρών σε μέγεθος και εύκολων στη χρήση, οι οποίες μπορούν να διατίθενται σε συνεργεία και μη διακεκριμένους φορείς ή και σε ιδιώτες, για την χρήση σε απλές δοκιμές σε δείγματα χάλυβα, κάνοντας, επομένως, πιο διαδεδομένη και προσιπή την ιδέα του ελέγχου “υγείας” του χάλυβα.

4 Βιβλιογραφία

- [1] Ι. Τσαλαμέγκας, Ι. Ρουμελιώτης. *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα*. Εκδόσεις Τζιόλα. 2017
- [2] Paul Kinsler. *Faraday's Law and Magnetic Induction: Cause and Effect, Experiment and Theory*. Physics Department, Lancaster University. 2020. <https://doi.org/10.3390/physics2020009>
- [3] Alex A. Kaufman, Richard O. Hansen, Robert L.K. Kleinberg. *Paramagnetism, Diamagnetism, and Ferromagnetism*. Methods in Geochemistry and Geophysics. Elsevier. Volume 42, Pages 207-254. 2008. [https://doi.org/10.1016/S0076-6895\(08\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6895(08)00006-1)
- [4] J. M. D. Coey. *Magnetism and Magnetic Materials*. CCity Publish. 2014
- [5] Greig A. Paterson, Xiang Zhao, Mike Jackson, David Heslop. Measuring, Processing, and Analyzing Hysteresis Data. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. Wiley Online Library. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018GC007620>
- [6] H.W.F Sung, C Rudowicz. Physics behind the magnetic hysteresis loop—a survey of misconceptions in magnetism literature. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 260, Pages 250-260. Elsevier. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)01339-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)01339-2)
- [7] O Stupakov, T Uchimoto and T Takagi. *Magnetic anisotropy of plastically deformed low-carbon steel*. Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 43. 2010
- [8] Bernard Fryskowski. *Experimental evaluation of magnetic anisotropy in electrical steel sheets*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Elsevier. Volume 320, Pages 515-522. 2008
- [9] Teruyuki Tamaki, Keisuke Fujisaki, Kiyoshi Wajima, Koji Fujiwara. *Comparison of Magnetic Field Analysis Methods Considering Magnetic Anisotropy*. IEEE Transaction on Magnetics. Volume 46, Pages 187-190. 2010
- [10] Krivokrysenko, Elena A., et al. *Use of Magnetic Anisotropy Method for Assessing Residual Stresses in Metal Structures*. Trans Tech Publications, Ltd. Key Engineering Materials, Volume 854, Pages 10–15. 2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.854.10>
- [11] Fiorillo F. *Measurement and characterization of magnetic materials*. Current Applied Physics - Elsevier. 2004

- [12] Calvin S Wang, Fan Wu, Fu-Kuo Chang. *Structural health monitoring from fiber-reinforced composites to steel-reinforced concrete*. IOP Publishing Ltd. Volume 10. 2001
- [13] P. Vourna, A. Ktena, P.E. Tsakiridis, E. Hristoforou. *A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels*. NDT & E International. Volume 71. 2015 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.09.011>
- [14] I. Altpeter, R. Tschuncky, K. Szielasko. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods - Electromagnetic techniques for materials characterization*. Woodhead Publishing. Chapter 8, Pages 225-262. 2016
- [15] S. Tumanski, H. Lampa. *Nondestructive testing of electrical steel heterogeneity*. Soft Magnetic Materials Conference, Balatonfüred. 1999
- [16] Bunaciu A. A., Udristioiu, E. gabriela, Aboul-Enein, H. Y. *X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications*. Critical Reviews in Analytical Chemistry, Volume 45, Pages 289–299. 2015. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- [17] F. Honarvar, A. Varvani-Farahani. *A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control*. Ultrasonics. Elsevier. Volume 108. 2020
- [18] Javier García-Martín, Jaime Gómez-Gil, Ernesto Vázquez-Sánchez. *Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing*. Sensors. Volume 11, Pages 2525-2565. 2011. <https://doi.org/10.3390/s110302525>
- [19] Haksoo Choi, Sukwon Choi, Hojung Cha. *Structural Health Monitoring system based on strain gauge enabled wireless sensor nodes*. 2008 5th International Conference on Networked Sensing Systems. IEEE. 2008. <https://doi.org/10.1109/INSS.2008.4610888>
- [20] Joseph R. Davis. *Tensile Testing, 2nd Edition*. ASM International. 2004
- [21] Gary S. Schajer, Philip S. Whitehead. *Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses*. Morgan & Claypool Publishers. 2018
- [22] K. Καλοβρέκτης, N. Κατέβας. *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου Ηλεκτρικές Μετρήσεις Τεχνολογία Μετρήσεων*. Εκδόσεις Τζιόλα. Αθήνα. 2021
- [23] M. Enokizono, Y. Takeshima, H. Matsuo. *Measuring magnetic properties under DC-biased magnetization using single-sheet tester*. J. Magn. Soc. Jpn. 2000
- [24] T. Nakata, M. Nakano, M. Okada. *Studies on the measurement of magnetic properties of amorphous materials using single sheet tester*. Annales de Fisica A. Volume 86. 1990

- [25] T. Nakata, Y. Ishihara, M. Nakaji, T. Todaka. *Comparison between the H-coil method and the magnetizing current method for the single sheet tester*. J. Magn. Magn. Mat. Volume 215-216. 2000
- [26] IEC 60404-3. *Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester*. Geneva, Switzerland. 2010
- [27] S. Tumanski and T. Bakon. *Measuring system for two-dimensional testing of electrical steel*. J. Magn. Magn. Mater. 2001
- [28] J. A. Pérez-Benitez, J. Capó-Sánchez, L. R. Padovese. *Modeling of the Barkhausen jump in low carbon steel*. J. Appl. Phys. Volume 103. AIP Publishing. 2008. <https://doi.org/10.1063/1.2840058>
- [29] Patryk Kot, Magomed Muradov, Michaela Gkantou, George S. Kamaris, Khalid Hashim, David Yeboah. *Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring*. Applied Sciences Special Issue : Non Destructive Testing. Volume 2. 2021. <https://doi.org/10.3390/app11062750>
- [30] DM Stewart, KJ Stevens, AB Kaiser. *Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel*. Current Applied Physics - Elsevier. Volume 4. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2003.11.035>
- [31] Sahar Hassani, Ulrike Dackermann. *A Systematic Review of Advanced Sensor Technologies for Non-Destructive Testing and Structural Health Monitoring*. Sensor and Sensing Technologies for Structural Health Monitoring and Non-Destructive Testing. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23042204>
- [32] Shu-Yi Wang; Shujuan Huang; Diana-Andra Borca-Tasciuc. *Potential Sources of Errors in Measuring and Evaluating the Specific Loss Power of Magnetic Nanoparticles in an Alternating Magnetic Field*. IEEE. Volume: 49, Pages 255-262. 2013. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2224648>
- [33] Zhu J.G., Lin Z.W., Guo Y.G., Huanf Y. *3D measurement and modelling of magnetic properties of soft magnetic composite*. Przegl. Elektr. Volume 85, Pages 11-15. 2009
- [34] Anuszczyk J., Pluta W., *Soft ferromagnetics in rotating magnetic fields*. WNT. 2009
- [35] Tani Y, Daikoku A, Nakano M, Arita H, Yamaguchi S, Toide Y. *Magnetic power loss characteristics of non oriented electrical steel sheets under stress (Part II)*. Papers of the Technical Meeting on Magnetics. IEEJ. MAG-06. Volume 139, Pages 45–49. 2006

- [36] Kanada T, Kutsukake A, Kido Y, Ikeda T, Todaka T, Enokizono M. *Investigation of H-coil for single sheet tester*. 2010 National Convention Record. IEEJ. Volume 2. 2010
- [37] T. Nakata, K. Hosaka, Y. Ishihara, T. Yamamoto. *Inter-comparison of single sheet testers for amorphous alloys by round robin measurements*. J Magn. Magn. Mater. Volume 196. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)01004-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)01004-X)
- [38] International Standard: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester. IEC 60404-3, 1992.
- [39] T. Nakata, Y. Kawase, M. Nakano. *Accuracy of Magnetic Field Strength Measurement by Single Sheet Testers*. Trans. IEEJ A. Volume 106, Page 565.1986
- [40] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. *Sedra/Smith Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα 7η Έκδοση*. Αθήνα. Εκδόσεις Παπασωτηρίου. 2017
- [41] Pratibhadevi Tapashetti, Ankur Gupta, Chandrashekhar Mithlesh, A.S Umesh. *Design and Simulation of Op Amp Integrator and Its Applications*. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). Volume 1, Issue 3. February 2012