



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

Μελέτη τοπολογιών αισθητήρων fluxgate

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Ε. Πετρολέκας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



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

Μελέτη τοπολογιών αισθητήρων fluxgate

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαήλ Ε. Πετρολέκας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Σεπτεμβρίου 2024

.....
Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

.....
Μιχαήλ Ε. Πετρολέκας

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

Copyright © Μιχαήλ Πετρολέκας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τα μαγνητόμετρα αναμφίβολα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις σύγχρονες τεχνολογίες, αποτελώντας ένα εξαιρετικά σημαντικό εργαλείο. Η εφαρμογή τους είναι απαραίτητη σε ποικίλους τομείς, που εκτείνονται από τις επιστήμες και τις μεταφορές μέχρι τη βιομηχανία και την ασφάλεια. Ιδιαίτερα, μαγνητόμετρα τύπου fluxgate χρησιμοποιούνται ευρέως για την ακριβή μέτρηση μαγνητικών πεδίων σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την ακρίβεια σε διάφορους κλάδους.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητήρων, κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικές διατάξεις αισθητήρων fluxgate, στην κάθε μία από τις οποίες δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικοί μαγνητικοί πυρήνες. Συγκεκριμένα, οι διατάξεις που υλοποιήθηκαν είναι οι: ορθογωνική, παράλληλη και race-track, ενώ οι πυρήνες που δοκιμάστηκαν είναι οι CoFeSiB, CoSiB, FeSiB και 101 DCST (UNITIKA). Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της τοπολογίας των αισθητήρων στην λειτουργία και την απόκρισή τους, καθώς και η ανάλυση της συμπεριφοράς και της καταλληλότητας για τον κάθε πυρήνα.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη: Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του ηλεκτρομαγνητισμού, με πληροφορίες για τα βασικά στοιχεία του ηλεκτρομαγνητισμού, των μαγνητικών υλικών και των βασικών χαρακτηριστικών των μαγνητικών αισθητήρων. Στο δεύτερο μέρος, εξηγείται η πειραματική διαδικασία, περιγράφοντας τη μέθοδο κατασκευής και μέτρησης των διατάξεων, ενώ παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα με τον σχετικό σχολιασμό.

Λέξεις κλειδιά

Μαγνητικό πεδίο, μαγνήτιση, μαγνητικά υλικά, μαγνητικός αισθητήρας, αισθητήρας πύλης-ροής, αισθητήρας fluxgate, μαγνητικοί πυρήνες.

Abstract

Magnetometers undoubtedly play a crucial role in modern technologies, serving as an immensely important tool. Their application is essential in a wide range of fields, from science and transportation to industry and security. In particular, fluxgate-type magnetometers are widely used for accurate magnetic field measurements in many of these applications, enhancing efficiency and precision across various sectors.

In the context of this thesis, conducted at the electronics sensor laboratory, three different fluxgate sensor configurations were constructed, with four different cores tested in each configuration. Specifically, the implemented configurations were: rectangular, parallel, and race-track, while the tested cores were CoFeSiB, CoSiB, FeSiB, and DCST (UNITIKA). The purpose of this work is to study and draw conclusions about the impact of sensor topology on their performance and response, as well as to analyze the behavior and suitability of each core.

The thesis consists of two parts: The first part presents the theoretical background of electromagnetism, providing information on the fundamental elements of electromagnetism, magnetic materials, and the key characteristics of magnetic sensors. The second part explains the experimental process, describing the method for constructing and measuring the configurations, and includes relevant diagrams with corresponding commentary.

Keywords

Magnetic field, magnetization, magnetic materials, magnetic sensor, fluxgate sensor, magnetic core.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Ευάγγελο Β. Χριστοφόρου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα καθηγητή αυτής της διπλωματικής εργασίας. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων όχι μόνο για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εκπονήσω αυτήν τη διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του, αλλά και για τις γνώσεις και την έμπνευση που μου μετέδωσε μέσα από τα μαθήματά του. Η μεταδοτικότητα του και ο τρόπος με τον οποίο παρουσίαζε το αντικείμενο αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για μένα και με οδήγησαν να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο πεδίο. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εργαστώ στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό και τις πηγές του, γεγονός που με βοήθησε να αποκτήσω πρακτική εμπειρία και να εμβαθύνω στις γνώσεις μου στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Πρίφτη για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι πολύτιμες συμβουλές του, ο χρόνος που αφιέρωσε και η συνεπής υποστήριξή του αποτέλεσαν σημαντικά εφόδια στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και στους δικούς μου ανθρώπους. Πρώτα στους γονείς μου, οι οποίοι εργάστηκαν πολύ σκληρά και έκαναν πολλές θυσίες για να μου προσφέρουν την καλύτερη ζωή που θα μπορούσα να ζητήσω. Μου προσέφεραν όλα τα απαραίτητα εφόδια για να καταφέρω να σπουδάσω και να αποφοιτήσω από μία τόσο απαιτητική σχολή. Η αδιάκοπη υποστήριξη και αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια ήταν καθοριστική για να φτάσω σήμερα να βρίσκομαι στην θέση που είμαι. Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αδερφή μου, Άννα, για την υποστήριξη, την κατανόηση, τις συμβουλές της και την βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων.

Αναφορικά με τον προσωπικό μου κύκλο θα ήθελα να ευχαριστήσω μία σειρά από φίλους μου, όπου ο καθένας με βοήθησε με τον δικό του τρόπο. Αρχικά του φίλους μου από την σχολή, Σπύρο, Νίκο και Παναγιώτη, με τους οποίους μοιραστήκαμε αξέχαστες στιγμές αλλά και πολλές δυσκολίες, στα πλαίσια της σχολής, αλλά υποστηρίζοντας και βοηθώντας ο ένας τον άλλον, καταφέραμε να τις ξεπεράσουμε και να εν τέλει να αποφοιτήσουμε. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου Άλεξ, Γεράσιμο, Δημήτρη και Γιάννη, για την παρέα, την υποστήριξη, τις συμβουλές και τις αμέτρητες στιγμές που έχουμε ζήσει μαζί όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω την κοπέλα μου, Εμμέλεια, η οποία υπήρξε το μεγαλύτερο ψυχολογικό στήριγμα μου κατά την διάρκεια των τελευταίων δύο, και πιο απαιτητικών, χρόνων των σπουδών μου. Η κατανόηση, η ενθάρρυνση και η θετική της στάση με βοήθησαν να αντιμετωπίσω τις προκλήσεις με μεγαλύτερη αισιοδοξία κάνοντας τις δύσκολες στιγμές να φαίνονται πιο εύκολες.

Περιεχόμενα

Περίληψη	VI
Abstract.....	VIII
Ευχαριστίες.....	X
Κεφάλαιο 1: Βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού	1
1.1 Τα βασικά μαγνητικά φυσικά μεγέθη.....	1
1.1.1 Το μαγνητικό πεδίο H	1
1.1.2 Η μαγνητική επαγωγή B	2
1.1.3 Η μαγνητική διαπερατότητα μ	2
1.1.4 Η μαγνήτιση M	3
1.1.5 Η μαγνητική πόλωση J	3
1.1.6 Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ	3
1.2 Μαγνητικό δίπολο – μαγνητική διπολική ροπή	4
1.3 Νόμος Gauss.....	5
1.4 Εξισώσεις Maxwell.....	5
1.5 Σωληνοειδές πηνίο.....	6
1.6 Σύστημα πηνίων Helmholtz.....	7
1.7 Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος.....	8
Κεφάλαιο 2: Θεωρία της μαγνήτισης	9
2.1 Ορισμός της μαγνήτισης.....	9
2.2 Μαγνητικές περιοχές.....	9
2.4 Ο βρόχος υστέρησης.....	12
Κεφάλαιο 3: Μαγνητικά υλικά	14
3.1 Εισαγωγή.....	14
3.2 Διαμαγνητικά υλικά	15
3.3 Παραμαγνητικά υλικά.....	15
3.4 Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	15
3.4.1 Μαλακά και σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά.....	16
3.5 Αντισιδηρομαγνητικά υλικά.....	17
3.6 Σιδηριμαγνητικά υλικά	17
Κεφάλαιο 4: Μαγνητικοί αισθητήρες.....	19
4.1 Εισαγωγή.....	19
4.2 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες.....	19
4.2.1 Αισθητήρας Hall.....	19

4.2.2 Αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Giant Magnetoresistance – GMR).....	20
4.2.3 Αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (Giant Magnetoimpedance – GMI).....	23
4.2.4 Αισθητήρας SQUID.....	25
Κεφάλαιο 5: Αισθητήρες fluxgate.....	28
5.1 Εισαγωγή.....	28
5.2 Βασικές αρχές αισθητήρων fluxgate.....	28
5.3 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρων fluxgate.....	30
5.4 Τοπολογίες μαγνητικών αισθητήρων fluxgate.....	31
5.4.1 Παράλληλη διάταξη.....	31
5.4.1.1 Τοροειδής διάταξη.....	32
5.4.1.2 Race-track.....	33
5.4.2 Ορθογωνική διάταξη.....	34
Κεφάλαιο 6: Πειραματικό μέρος.....	37
6.1 Σύντομη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.....	37
6.2 Πειραματικός εξοπλισμός.....	37
6.3 Διεξαγωγή των μετρήσεων.....	39
6.4 Συμπεράσματα.....	61
6.5 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	62
Παράρτημα.....	63
Βιβλιογραφία.....	70

Κεφάλαιο 1: Βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού

1.1 Τα βασικά μαγνητικά φυσικά μεγέθη

1.1.1 Το μαγνητικό πεδίο H

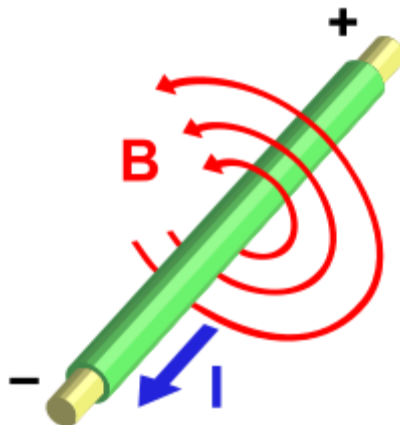
Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίον αναπτύσσονται μαγνητικές δυνάμεις και παρατηρούνται ηλεκτικά φαινόμενα. Μαγνητικό πεδίο δημιουργείται όταν υπάρχει κίνηση ηλεκτρικού φορτίου, όταν δηλαδή, για παράδειγμα, ηλεκτρικό ρεύμα ρέει εντός ενός αγωγού. Μαγνητικά πεδία παράγονται επίσης από μόνιμους μαγνήτες. Σε αυτή την περίπτωση, αντίθετα με πριν, δεν υπάρχει η παρουσία του συμβατικού ηλεκτρικού ρεύματος και το μαγνητικό πεδίο προκύπτει από τις τροχιακές κινήσεις και τις ιδιοστροφές (spins) των ηλεκτρονίων που βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό υλικό. Κατά αυτόν τον τρόπο προκαλείται μαγνήτιση μέσα στο υλικό και δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στον χώρο γύρω από αυτό [1].

Ο μαθηματικός υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων έγινε δυνατός με τον νόμο Biot-Savart, είναι ένας από τους θεμελιώδεις νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού. Σύμφωνα με τον νόμο αυτόν, υπολογίζεται το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο δH που δημιουργείται αγωγό στοιχειώδους μήκους dl όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I και η εξίσωση είναι ως εξής:

$$\delta H = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot I dl \times r \quad (1.1)$$

Εξίσου σημαντικός νόμος για τον υπολογισμό της έντασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι ο νόμος Ampere, ο οποίος είναι ένας νόμος γενικότερος του νόμου Biot-Savart. Ο νόμος Ampere συχετίζει το μαγνητικό πεδίο H , γύρω από έναν κλειστό βρόχο, με το ηλεκτρικό ρεύμα I_{in} , που διέρχεται μέσα από αυτόν, ως εξής:

$$\oint_C H dl = I_{in} \quad (1.2)$$



Εικόνα 1: Γραφική αναπαράσταση του νόμου Ampere.

1.1.2 Η μαγνητική επαγωγή B

Η μαγνητική επαγωγή B, γνωστή επίσης και ως πυκνότητα μαγνητικής ροής, ορίζεται ως εξής [2]:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1.3)$$

Όπου Φ η μαγνητική ροή, η οποία δημιουργείται λόγω της παρουσίας μαγνητικού πεδίου στον χώρο A και ισούται με:

$$F = \mu_0 AH \quad (1.4)$$

Αντικαθιστώντας λοιπόν την (4) στην (3), ο τύπος της μαγνητικής επαγωγής διαμορφώνεται ως εξής:

$$B = \mu_0 A \quad (1.5)$$

Όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και είναι ίση με $4\pi \times 10^{-7}$ με μονάδες N/A².

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής ορίζεται το 1 T=1 N·s/(C·m)=1 N/(A·m)

1.1.3 Η μαγνητική διαπερατότητα μ

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και η μαγνητική επαγωγή B ενός μαγνητισμένου υλικού, συνδέονται μεταξύ τους μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας μ σύμφωνα με την κάτωθεν σχέση:

$$B = \mu H \quad (1.6)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα χαρακτηρίζει τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, τα οποία ταξινομούνται ως παραμαγνητικά, διαμαγνητικά και μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά υλικά, ανάλογα την τιμή της διαπερατότητάς τους. Οι έννοιες αυτές θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο τρόπος περιγραφής των ιδιοτήτων ενός υλικού σύμφωνα με την σχέση (6) δεν είναι και τόσο πρακτικός ωστόσο, για αυτόν τον λόγο συνηθίζεται η διαπερατότητα ενός υλικού να περιγράφεται σε σχέση με την διαπερατότητα του κενού, δηλαδή με την σχετική διαπερατότητα μ_r για την οποία ισχύει:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.7)$$

Αντικαθιστώντας λοιπόν, η σχέση (1.6) με την βοήθεια της σχέσης (1.7) μπορεί να γραφτεί και ως:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (1.8)$$

Θεωρητικά η μαγνητική διαπερατότητα θα μπορούσε να ήταν ο καλύτερος τρόπος περιγραφής των ιδιοτήτων των μαγνητικών υλικών εφόσον παρέχει άμεση πληροφόρηση για την σχέση του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής.

Ωστόσο, στην πράξη, η κατάσταση είναι αρκετά πιο σύνθετη, καθώς:

- Η σχέση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής είναι σχεδόν πάντα μη γραμμική, και συνεπώς η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται από το σημείο και τα δεδομένα της μέτρησης.
- Η μαγνήτιση ενός υλικού εξαρτάται από το σχήμα του.
- Τα περισσότερα μαγνητικά υλικά είναι ανισοτροπικά και συνεπώς έχουν διαφορετικές τιμές διαπερατότητας για διάφορες κατευθύνσεις μαγνήτισης. Επομένως, η διαπερατότητα θα πρέπει να περιγράφεται με τη μορφή ενός τανυστή.

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}$$

Εικόνα 2: Η σχέση $B=\mu H$ με τη μαγνητική διαπερατότητα σε μορφή τανυστή.

1.1.4 Η μαγνήτιση M

Η σχέση (1.5) για κάθε υλικό πέρα του κενού χώρου γίνεται:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1.9)$$

Όπου M είναι η μαγνήτιση. Σε αυτή την σχέση ο όρος $\mu_0 H$ αντιπροσωπεύει την συνεισφορά εξωτερικής πηγής, ενώ ο όρος $\mu_0 M$ την συνεισφορά ενός μαγνητισμένου υλικού. Παρατηρούμε πως ακόμα και η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου είναι μηδενική, το υλικό μπορεί ακόμα να εμφανίζει μαγνητική επαγωγή επειδή είναι μαγνητισμένο. Η θεωρία και η διαδικασία της μαγνήτισης θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

1.1.5 Η μαγνητική πόλωση J

Η μαγνητική πόλωση η οποία ορίζεται ως:

$$J = B - \mu_0 H \quad (1.10) \quad \text{και} \quad J = \mu_0 H \quad (1.11)$$

εκφράζει τη μαγνητική ροή μαγνητικού πεδίου η οποία πηγάζει από το ίδιο το σώμα.

Μονάδα μέτρησης: 1 A/m

1.1.6 Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ

Σε ορισμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της φυσικής ανάλυσης των διαδικασιών μαγνήτισης, η μαγνητική επιδεκτικότητα χ είναι το μέγεθος που προτιμάται να χρησιμοποιείται έναντι της μαγνητικής διαπερατότητας, για την σύνδεση της μαγνήτισης M με την ένταση του μαγνητικού πεδίου H . Αυτό γίνεται μέσω της σχέσης:

$$M = \chi H \quad (1.12)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα συνδέεται με την μαγνητική διαπερατότητα μέσω της:

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (1.13)$$

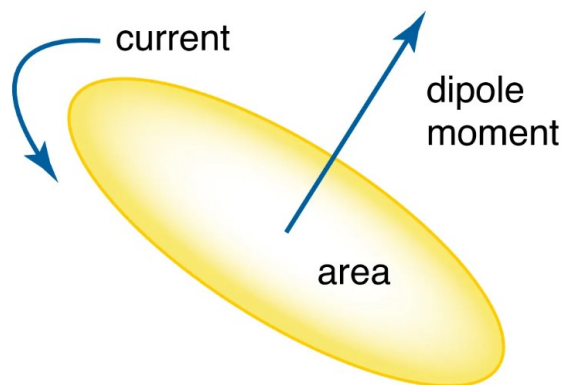
1.2 Μαγνητικό δίπολο – μαγνητική διπολική ροπή

Το μαγνητικό δίπολο είναι γενικά ένας μαγνήτης μικροσκοπικών έως και υποατομικών διαστάσεων και είναι ισοδύναμος με την ροή ηλεκτρικού φορτίου γύρω από έναν βρόχο. Τέτοια μαγνητικά δίπολα μπορεί να αποτελούν, για παράδειγμα, τα ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τα άτομα ή ηλεκτρόνια που περιστρέφονται γύρω από τους άξονές τους. Άλλο παράδειγμα μικροσκοπικού μαγνητικού διπόλου είναι η βελόνα της μαγνητικής πυξίδας.

Το μαγνητικό δίπολο θεωρείται ως ένας βρόχος ρεύματος, όπου το μέγεθος της έντασης του διπόλου, που ονομάζεται μαγνητική διπολική ροπή και συμβολίζεται με m , είναι ανάλογο του ρεύματος I πολλαπλασιασμένου με την επιφάνεια που οριοθετεί ο βρόχος A [3]. Η σχέση δηλαδή είναι:

$$m = IA \quad (1.14)$$

Η κατεύθυνση της ροπής του διπόλου, η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά ως διάνυσμα, είναι κάθετη προς την πλευρά της επιφάνειας που περικλείεται από τη διαδρομή ροής θετικού φορτίου με φορά αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, όπως αποτυπώνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση της μαγνητικής διπολικής ροπής [3].

Η μαγνητική ροπή διπόλου μπορεί να θεωρηθεί ως τρόπος αξιολόγησης της ικανότητας ενός διπόλου να ευθυγραμμιστεί με ένα δεδομένο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Σε ένα ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο, το μέγεθος της ροπής διπόλου m είναι ανάλογο της

μέγιστης ποσότητας ροπής τ που ασκείται στο δίπολο, η οποία υφίσταται όταν το δίπολο είναι κάθετα προς στο μαγνητικό πεδίο B . Είναι δηλαδή:

$$\tau = \mu B \sin\theta \quad (1.15)$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ της μαγνητικής διπολικής ροπής και του μαγνητικού πεδίου B .

1.3 Νόμος Gauss

Ο νόμος του Gauss για τα μαγνητικά πεδία στην ολοκληρωτική του μορφή δίνεται από την σχέση:

$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1.16)$$

Όπου B το μαγνητικό πεδίο και $d\vec{A}$ το στοιχειώδες εμβαδό πάνω στην κλειστή επιφάνεια A . Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι δεν υπάρχει καθαρή μαγνητική ροή, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ο αριθμός των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου μιας επιφάνειας, που διέρχεται από μία τυχαία κλειστή επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου που εισέρχονται και εξέρχονται από αυτή την κλειστή επιφάνεια είναι ο ίδιος.

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την έννοια του μαγνήτη, ο οποίος έχει έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο ίσης δύναμης. Αυτό ισοδυναμεί με το να λέμε ότι δεν μπορεί να υπάρξει ένα μαγνητικό μονόπολο, δηλαδή μόνο ένας βόρειος ή μόνο ένας νότιος πόλος, επειδή για κάθε θετικό μαγνητικό πόλο θα πρέπει να υπάρχει ίσος αριθμός αρνητικών μαγνητικών πόλων.

1.4 Εξισώσεις Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell, τέσσερις στον αριθμό, μαζί , σχηματίζουν μία πλήρη περιγραφή της παραγωγής και της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [4]. Οι διατυπώσεις των τεσσάρων αυτών εξισώσεων είναι:

$$1. \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.17) \quad (\text{νόμος του Gauss για την ηλεκτρική ροή})$$

$$2. \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.18) \quad (\text{νόμος του Gauss για την μαγνητική ροή})$$

$$3. \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.19) \quad (\text{νόμος Faraday})$$

$$4. \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.20) \quad (\text{νόμος Ampere})$$

Όπου:

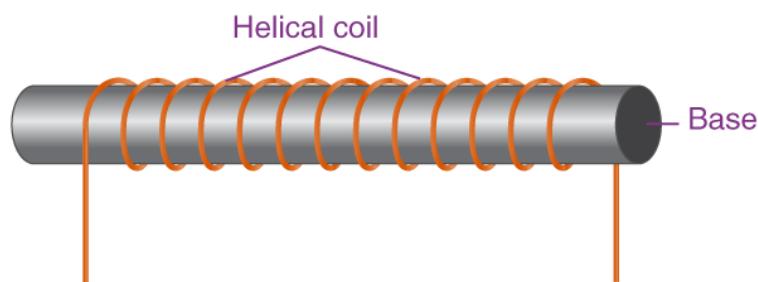
- E το ηλεκτρικού πεδίο
- H η ένταση του μαγνητικού πεδίου
- D το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης
- ρ η πυκνότητα της χωρικής κατανομής ηλεκτρικού φορτίου
- J η πυκνότητα ρεύματος

Η πρώτη εξίσωση επιτρέπει το υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από ένα φορτίο, η δεύτερη επιτρέπει τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, ενώ οι άλλες δύο περιγράφουν πως τα πεδία κινούνται γύρω από τις πηγές τους.

1.5 Σωληνοειδές πηνίο

Πριν γίνει η περιγραφή τους σωληνοειδούς πηνίου, θα κάνουμε μία σύντομη αναφορά στους ηλεκτρομαγνήτες. Οι ηλεκτρομαγνήτες είναι ένα είδος μαγνήτη όπου το σύρμα είναι τυλιγμένο γύρω από έναν πυρήνα σιδήρου. Με την τροφοδότηση ηλεκτρικού ρεύματος, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τον πυρήνα, το οποίο εξαφανίζεται όταν διακοπεί η παροχή ρεύματος. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται ελέγχεται από το παρεχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Το σωληνοειδές πηνίο, λοιπόν, είναι ένα είδος ηλεκτρομαγνήτη σκοπός του οποίου είναι να δημιουργήσει ένα ελεγχόμενο μαγνητικό πεδίο, μέσω ενός πηνίου τυλιγμένου σε μορφή έλικας [5].



Εικόνα 4: Διάταξη σωληνοειδούς πηνίου

Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ampere και η σχέση είναι η εξής:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (1.21)$$

Όπου:

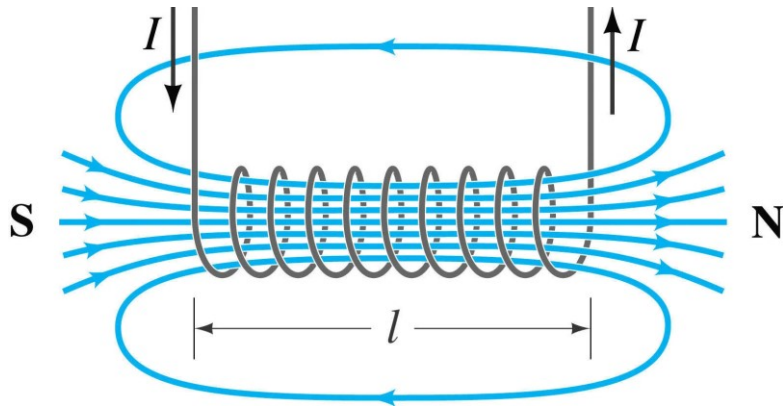
B το μαγνητικό πεδίο, στο κέντρο του σωληνοειδούς

I το ηλεκτρικό ρεύμα

N ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου

L το μήκος του σωληνοειδούς

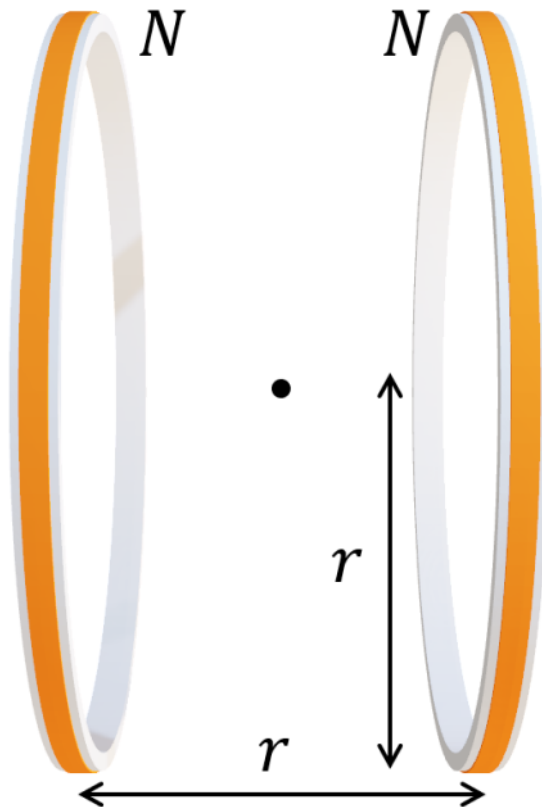
μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού



Εικόνα 5: Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς πηνίου.

1.6 Σύστημα πηνίων Helmholtz

Μία εναλλακτική υλοποίηση πηγής ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου είναι τα πηνία Helmholtz. Μία διάταξη πηνίων Helmholtz αποτελείται από δύο πανομοιότυπα κυκλικά πηνία, που παραπέμπουν σε κυκλικούς βρόχους ρεύματος, τοποθετημένα παράλληλα μεταξύ τους κατά μήκος ενός κοινού άξονα και με την μεταξύ τους απόσταση να είναι ίση με την ακτίνα του κύκλου [6]. Η διάταξη γίνεται καλύτερα αντιληπτή με την βοήθεια της παρακάτω εικόνας:



Εικόνα 6: Διάταξη πηνίων Helmholtz.

Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται από ένα ιδανικό σύστημα πηνίων Helmholtz, στο οποίο το πάχος του τυλίγματος των δύο πηνίων θεωρείται μηδέν, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{r \left(\frac{5}{4}\right)^{3/2}} \quad (1.22)$$

Όπου: N είναι ο αριθμός των περιελίξεων του κάθε πηνίου, I ο ρεύμα που διαπερνάει κάθε πηνίο και r είναι η ακτίνα των πηνίων και η μεταξύ τους απόσταση.

Τέλος, εκτός από την παραγωγή μαγνητικών πεδίων, τα πηνία Helmholtz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Ένα πηνίο Helmholtz συχνά χρησιμοποιείται ως πηνίο ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου για ένα μαγνητόμετρο [7].

1.7 Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος

Υπάρχουν διάφοροι τύποι θορύβου που επηρεάζουν τα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα, με αποτέλεσμα να περιορίζουν την χρησιμότητά τους. Πρώτος μεταξύ αυτών των θορύβων είναι ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος που πηγάζει από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές.

Ο φυσικός ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος ονομάζεται σφαιρικός (sferics) και παράγεται από ηλεκτρικές εκκενώσεις που σχετίζονται με τις καταιγίδες. Το φάσμα του σφαιρικού θορύβου, το οποίο μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την ώρα της ημέρας, το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή, είναι ευρυζωνικό. Ο ανθρωπογενής ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος από την αλλαγή, που συνήθως προκαλείται από το ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές μεταφοράς ή κοντινούς ραδιοπομπούς υψηλής ισχύος, έχει φάσμα περιορισμένης ζώνης [8].

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορούμε να περιορίσουμε τους ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους:

1. Φιλτράρισμα: Ένας άμεσος τρόπος για την εξάλειψη ανεπιθύμητων σημάτων είναι μέσω του φιλτραρίσματός τους. Το φιλτράρισμα ξεκινά με ένα AC φίλτρο γραμμής, το οποίο εμποδίζει τους θορύβους να εισέλθουν στην γραμμή τροφοδοσίας του ηλεκτρικού ρεύματος. Η προσθήκη φίλτρων, βαθυπερατών σε αυτή την περίπτωση, σε κύρια κυκλωματικά στοιχεία όπως και στην είσοδο και έξοδο ενός κυκλώματος είναι επίσης σημαντική. Τα φίλτρα αυτά έχουν ως στόχο να εξασθενήσουν τις ψηφιακές κυματομορφές, για να αυξήσουν τους χρόνους ανόδου και καθόδου μειώνοντας έτσι την δημιουργία αρμονικών.
2. Μαγνητική θωράκιση: Αποτελεί τον προτιμώμενο τρόπο περιορισμού του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτηση του κυκλώματος μέσα σε έναν πλήρως σφραγισμένο χώρο, όπως ένα μεταλλικό κουτί. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου εξαρτάται από τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για τη πραγματοποίησή της. Ο σωστός σχεδιασμός αυτής της μεθόδου θεωρείται σύνθετη διαδικασία.

Κεφάλαιο 2: Θεωρία της μαγνήτισης

2.1 Ορισμός της μαγνήτισης

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι κάθε μαγνητισμένο υλικό αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό στοιχειωδών διπόλων. Τα δίπολα αυτά προκύπτουν από την τροχιά των ηλεκτρονίων γύρω από τους πυρήνες τους ή από την ίδια τους την ιδιοπεριστροφή (spin) και αναπαριστώνται από τις μαγνητικές ροπές m . Στην κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης ενός υλικού, η μέση μαγνητική ροπή εξισορροπείται και η προκύπτουσα μαγνήτιση είναι μηδέν. Αν το υλικό μαγνητιστεί, η μαγνήτισή του M είναι ίση με:

$$M = \frac{\Sigma m_i}{V} \quad (2.1)$$

Η μαγνήτιση ορίζεται ως η προκύπτουσα μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου και έχει μονάδα μέτρησης το 1 A/m . Μετά την έκθεση ενός υλικού σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, στα διαμαγνητικά υλικά η μαγνήτιση δεν είναι στην ίδια κατεύθυνση με το εφαρμοζόμενο πεδίο, με αποτέλεσμα η προκύπτουσα μαγνητική επαγωγή να εξασθενεί, ενώ, αντίθετα, στα παραμαγνητικά υλικά ενισχύεται καθώς η μαγνήτιση είναι στην ίδια κατεύθυνση με το εφαρμοζόμενο πεδίο.

Για να συσχετίσουμε την μαγνήτιση με την μαγνητική επαγωγή εργαζόμαστε ως εξής. Θεωρούμε έναν μαγνήτη ράβδο μήκους l , με μαγνητική ροή Φ στο κέντρο του και εμβαδό διατομής A . Η μαγνητική ροπή τότε δίνεται από την σχέση:

$$m = \frac{\Phi l}{\mu_0} \quad (2.2)$$

Με χρήση των δύο τελευταίων εξισώσεων παίρνουμε την παρακάτω:

$$M = \frac{\Phi}{\mu_0 A} \quad (2.2)$$

Και τέλος αντιλαθιστώντας την μαγνητική επαγωγή σύμφωνα με την εξίσωση (3) καταλήγουμε στην σχέση:

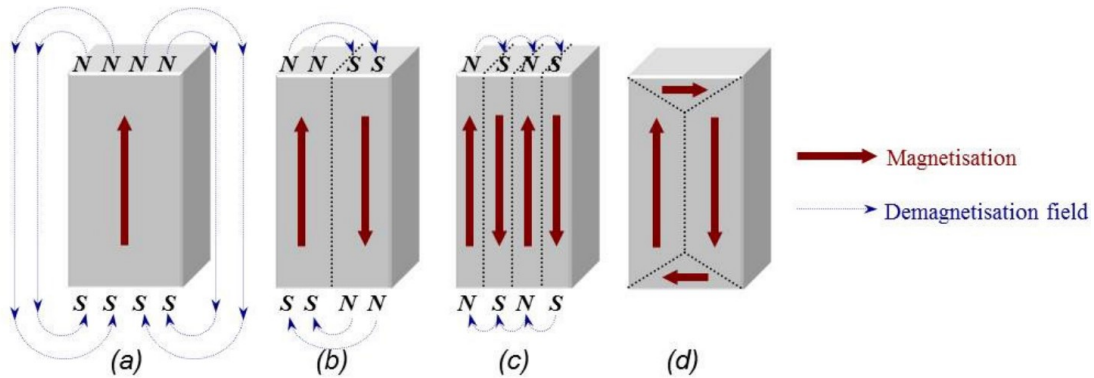
$$M = \frac{B}{\mu_0} \quad (2.4)$$

Σε αυτήν την περίπτωση θεωρήσαμε ότι δεν υφίστανται συμβατικά εξωτερικά πεδία και έτσι ισχύει ότι $B = \mu_0 M$. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι το τόσο η μαγνήτιση M όσο και το μαγνητικό πεδίο H συμβάλλουν στην μαγνητική επαγωγή με παρόμοιο τρόπο. Αν και τα δύο είναι παρόντα, τότε οι συνεισφορές τους μπορούν να αθροιστούν [1].

2.2 Μαγνητικές περιοχές

Τα μαγνητικά υλικά δημιουργούν αυθόρμητα μικρές περιοχές με την ίδια κατεύθυνση μαγνήτισης που ονομάζονται μαγνητικές περιοχές. Οι μαγνητικές περιοχές εξυπηρετούν στην μείωση της ενέργειας του συστήματος. Ένα ομοιόμορφα μαγνητισμένο υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 7(a), έχει μεγάλη μαγνητοστατική ενέργεια. Αυτό οφείλεται στην παρουσία μαγνητικών ελεύθερων πόλων στην

επιφάνεια του υλικού, οι οποίοι δημιουργούν ένα απομαγνητισμένο πεδίο, H_d . Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε ότι η μαγνήτιση ενός υλικού κατευθύνεται από τον νότιο πόλο προς στον βόρειο, ενώ η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι από τον βορρά προς τον νότο. Επομένως, το απομαγνητισμένο πεδίο είναι αντίθετο προς την μαγνήτιση του υλικού. Η διάσπαση της μαγνήτισης σε δύο περιοχές, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 7(b), μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια στο μισό. Αν ο μαγνήτης διασπαστεί σε N περιοχές, τότε η μαγνητοστατική ενέργεια μειώνεται κατά ένα συντελεστή $1/N$, συνεπώς το σχήμα 7(c) έχει το ένα τέταρτο της μαγνητοστατικής ενέργειας του σχήματος 7(a). Το σχήμα 7(d) δείχνει μία δομή περιοχών όπου η μαγνητοστατική ενέργεια είναι μηδέν.

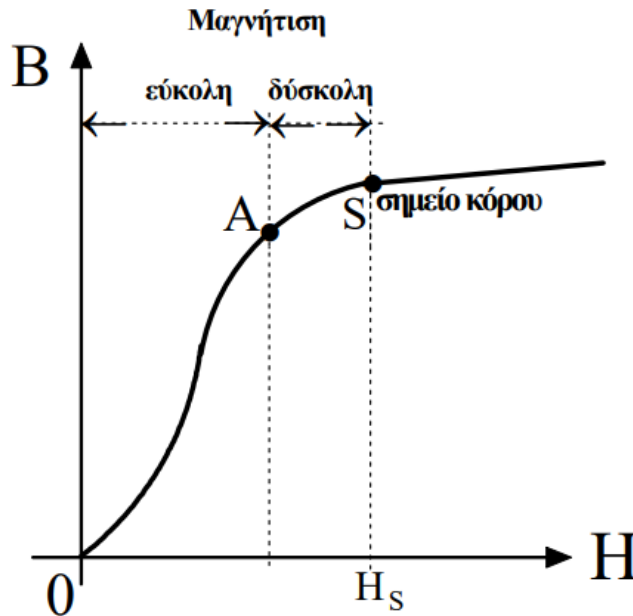


Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της διάσπασης μαγνητικών περιοχών

Αυτός ο διαχωρισμός των περιοχών όμως, κοστίζει ενεργειακά σε ενέργεια ανταλλαγής γιατί τα σπιν κοντά στο σύνορο μιας μαγνητικής περιοχής υπόκεινται σε αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής με τα σπιν μιας άλλης μαγνητικής περιοχής διαφορετικά προσανατολισμένης. Παρόλα αυτά επειδή η αλληλεπίδραση ανταλλαγής είναι μικρού εύρους, μόνο τα σπιν στα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών θα έχουν μεγάλες ενέργειες ανταλλαγής. Αντίθετα οι διπολικές αλληλεπιδράσεις είναι ένα φαινόμενο μεγάλου εύρους και έτσι η διπολική ενέργεια κάθε σπιν μειώνεται όταν δημιουργούνται μαγνητικές περιοχές.

2.3 Η καμπύλη μαγνήτισης

Η καμπύλη μαγνήτισης εκφράζει την σχέση που συνδέει το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής B με το μέτρο του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που μαγνητίζεται για πρώτη φορά. Η καμπύλη μαγνήτισης περιέχει θεμελιώδεις πληροφορίες για ένα υλικό και συνήθως εμφανίζεται σε καταλόγους υλικών. Μία τυπική καμπύλη μαγνήτισης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 8: Τυπική μορφή μιας καμπύλης μαγνήτισης.

Το τμήμα OA της καμπύλης ονομάζεται τμήμα εύκολης μαγνήτισης καθώς η καμπύλη εκεί παρουσιάζει μεγάλη κλίση. Αυτό μεταφράζεται στο ότι η μαγνητική επαγωγή αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό. Στο τμήμα δύσκολης μαγνήτισης AS, όπου η καμπύλη έχει πολύ μικρότερη κλίση συγκριτικά με πριν, ο ρυθμός αύξησης της μαγνητικής επαγωγής είναι αρκετά πιο αργός. Από το σημείο S και μετά έχουμε μια βραδύτατη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε αυτό το σημείο, όλες οι περιοχές Weiss έχουν προσανατολιστεί και η αύξηση του B ακολουθεί την σχέση $B = \mu_0 H$. Το σημείο S ονομάζεται σημείο κορεσμού [9].

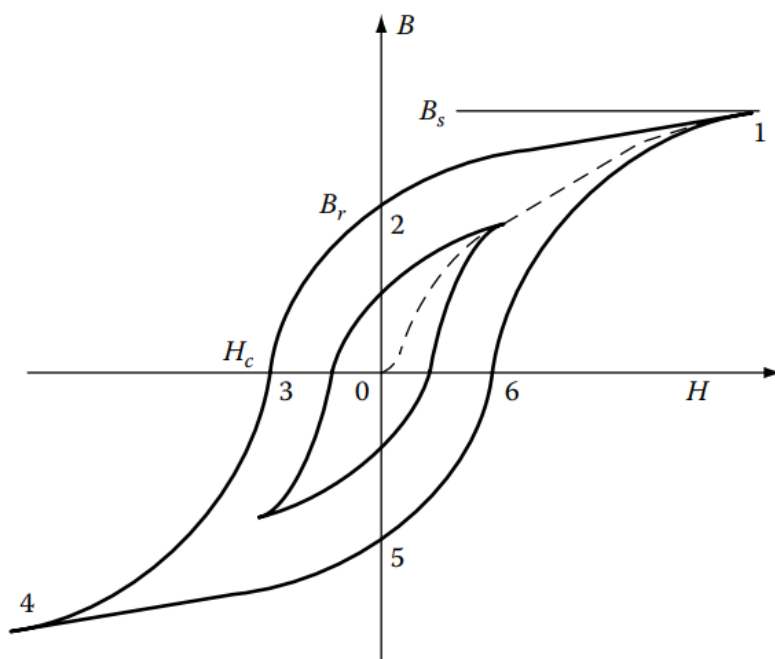
Αναλυτικότερα, η διαδικασία της μαγνήτισης ενός υλικού, με την εφαρμογή επιβαλλόμενου εξωτερικού πεδίου H, αναλύεται ως εξής:

- Έστω ένα μη μαγνητισμένο υλικό. Όταν σε αυτό εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο χαμηλής έντασης, παρατηρείται ότι οι μαγνητικές περιοχές του υλικού ευθυγραμμίζονται με το μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η έκταση της μαγνητικής περιοχής που “κοιτάει” στον προσανατολισμό του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα μαγνητικά τείχη μετακινούνται ελαφρώς, αυξάνοντας την έκταση της ευθυγραμμισμένης μαγνήτισης και μειώνοντας την έκταση των υπόλοιπων περιοχών. Για τέτοιες μικρές τιμές του μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές περιοχές μπορούν να επιστρέψουν στον αρχικό τους προσανατολισμό όταν σταματήσει η εφαρμογή του πεδίου.
- Καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται, η διαδικασία γίνεται όλο και πιο αντιστρέψιμη, καθώς τα μαγνητικά τοιχώματα δεν θα επιστρέψουν στην αρχική τους θέση, δηλαδή θα υπάρξει υστέρηση. Αυτό γίνεται διότι με την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, ορισμένες μαγνητικές περιοχές θα εξαφανιστούν, με αποτέλεσμα να παραμείνει η μαγνήτιση στο υλικό ακόμα και όταν η εφαρμογή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου διακοπεί.

Σε αυτή την περίπτωση, για να επαναφέρουμε το υλικό στην απομαγνητισμένη κατάσταση του, πρέπει να εφαρμόσουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αντίστοιχης έντασης αλλά αντίθετου προσανατολισμού από την μαγνήτιση. Η ένταση του πεδίου αυτού θα πρέπει να μειώνεται αργά, με σταθερό ρυθμό, έως ότου φτάσει στο μηδέν.

2.4 Ο βρόχος υστέρησης

Ο βρόχος υστέρησης ενός υλικού αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση των μακροσκοπικών και μικροσκοπικών μαγνητικών ιδιοτήτων των μαγνητικών υλικών. Συνήθως απεικονίζεται ως το διάγραμμα της μαγνητικής επαγωγής B συναρτήσει του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H . Ο βρόχος υστέρησης μας παρέχει με όλες τις κατάλληλες και απαραίτητες πληροφορίες για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, προκειμένου να αξιολογηθεί η καταλληλότητά του για διάφορες εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα, η ερμηνεία του οποίου θα δοθεί στην συνέχεια.



Εικόνα 9: Τυπικός βρόχος υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού

Ξεκινώντας από το σημείο 0, δηλαδή από ένα μη μαγνητισμένο υλικό, ή από ένα που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H οδηγεί σε αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B προς την κατεύθυνση του H . Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στο άνωθεν σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή η οποία ονομάζεται καμπύλη αρχικής μαγνήτισης. Καθώς αυξάνεται η τιμή της έντασης του πεδίου και σταδιακά φτάσουμε στο σημείο 1 του σχήματος, το οποίο αποτελεί το σημείο κορεσμού, όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση του H δεν επηρεάζει πλέον την τιμή του B , η οποία παραμένει σταθερή. Αυτή η σταθερή τιμή της μαγνητικής επαγωγής B συμβολίζεται ως B_s και ονομάζεται μαγνητική επαγωγή κόρου. Αντίστοιχα, η τιμή του εξωτερικού πεδίου στην οποία επιτυγχάνεται η μαγνήτιση κόρου ονομάζεται πεδίο κόρου και συμβολίζεται H_s .

Στην συνέχεια, καθώς μειώνουμε σταδιακά την τιμή του H , μεταβαίνουμε από το σημείο 1 στο σημείο 2, όπου το εξωτερικό πεδίο μηδενίζεται. Σε αυτό το σημείο, παρά τον μηδενισμό του H , η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται αλλά ισούται με B_r και ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική επαγωγή. Παρατηρούμε ότι στην διαδρομή $1 \rightarrow 2$ η καμπύλη δεν ακολουθεί την ίδια πορεία με αυτή της $0 \rightarrow 1$. Αυτό συμβαίνει λόγω της μη αντιστρεπτής αλλαγής των μαγνητικών περιοχών. Για αυτό τον λόγο όταν το H μηδενιστεί υπάρχει η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή.

Εφαρμόζοντας τώρα σταδιακά αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης με πριν, η μαγνητική επαγωγή αρχίζει να μειώνεται. Όταν φτάσουμε στο σημείο 3, η μαγνητική επαγωγή μηδενίζεται και το υλικό απομαγνητίζεται πλήρως. Η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου για το οποίο συμβαίνει αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο και συμβολίζεται H_c . Το συνεκτικό πεδίο αντιστοιχεί στο αντίστροφο πεδίο που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να απομαγνητιστεί πλήρως ένα μαγνητισμένο σιδηρομαγνητικό υλικό.

Συνεχίζοντας την αρνητική αύξηση του εξωτερικού πεδίου φτάνουμε στο σημείο 4, όπου το υλικό οδηγείται σε μαγνήτιση κόρου $-B_s$ προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Αν μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο, προς τις θετικές του τιμές τώρα, οδηγούμαστε στο σημείο 5, όπου έχουμε παραμένουσα μαγνητική επαγωγή $-B_r$. Ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της έντασης του πεδίου μας μεταφέρει πρώτα στο σημείο 6, όπου έχουμε το συνεκτικό πεδίο και στην συνέχεια στο σημείο 1, δηλαδή στο σημείο κορεσμού [2].

Κεφάλαιο 3: Μαγνητικά υλικά

3.1 Εισαγωγή

Όλα τα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την μαγνητική τους συμπεριφορά, κατατάσσοντάς τα σε μία από τις πέντε κατηγορίες ανάλογα με την μαγνητική επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν.

Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Διαμαγνητικά υλικά
- Παραμαγνητικά υλικά
- Σιδηρομαγνητικά υλικά
- Αντισιδηρομαγνητικά υλικά
- Σιδηριμαγνητικά υλικά

Οι δύο κυρίαρχες μορφές μαγνητισμού είναι ο διαμαγνητισμός και ο παραμαγνητισμός, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις μαγνητικές ιδιότητες των περισσότερων στοιχείων του περιοδικού πίνακα, σε θερμοκρασία δωματίου, όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από το παρακάτω σχήμα. Αυτά τα στοιχεία συνήθως αναφέρονται ως μη-μαγνητικά, ενώ εκείνα που αναφέρονται ως μαγνητικά ταξινομούνται ως σιδηρομαγνητικά. Ο μόνος άλλος τύπος μαγνητισμού που παρατηρείται σε καθαρά στοιχεία σε θερμοκρασία δωματίου είναι ο αντισιδηρομαγνητισμός. Τέλος, τα μαγνητικά υλικά μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως σιδηριμαγνητικά, αν και αυτός ο τύπος μαγνητισμού δεν παρατηρείται στα καθαρά στοιχεία παρά μόνο σε ενώσεις [10].

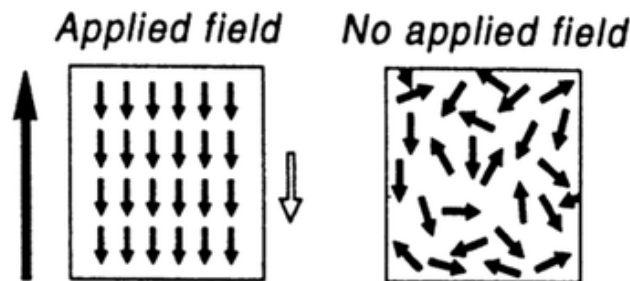
1 H																	2 He
		Ferromagnetic		Antiferromagnetic													
		Paramagnetic		Diamagnetic													

3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac															
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	

Εικόνα 10: Ταξινόμηση των στοιχείων του περιοδικού πίνακα ανάλογα με το είδος μαγνητισμού που παρουσιάζουν, σε θερμοκρασία δωματίου.

3.2 Διαμαγνητικά υλικά

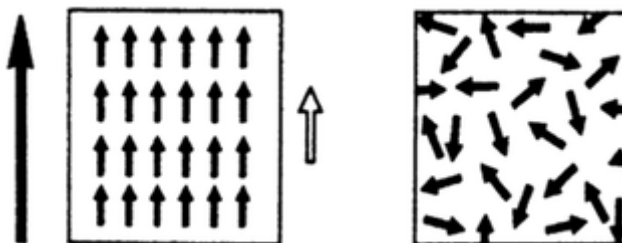
Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή της τάξης $\chi = -10^{-5}$, το οποίο αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Τα άτομα, στα διαμαγνητικά υλικά, δεν έχουν μόνιμη μαγνητική ροπή όταν δεν εφαρμόζεται κάποιο μαγνητικό πεδίο. Υπό την επίδραση ενός τέτοιου πεδίου H όμως, τα ηλεκτρόνια προχωρούν σε περιστροφή παράγοντας έτσι μία μαγνήτιση M προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του εφαρμοσμένου πεδίου.



Εικόνα 11: Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών, για ένα διαμαγνητικό υλικό, με(αριστερή εικόνα)και χωρίς(δεξιά εικόνα) την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου, ενώ το λευκό βέλος την κατεύθυνση των μαγνητικών διπολικών ροπών.

3.3 Παραμαγνητικά υλικά

Ο παραμαγνητισμός εμφανίζεται σε ορισμένα υλικά, τα άτομα των οποίων έχουν μόνιμες μαγνητικές ροπές, τυχαία προσανατολισμένες στον χώρο, χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η παρουσία εξωτερικού πεδίου προκαλεί μερικό προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών, προς την κατεύθυνσή του, προκαλώντας έτσι την μαγνήτιση του υλικού. Η μαγνήτιση αυτή δεν είναι ισχυρή και για αυτό η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού αυξάνεται ελαφρά και κυμαίνεται από 10^{-3} - 10^{-5} .



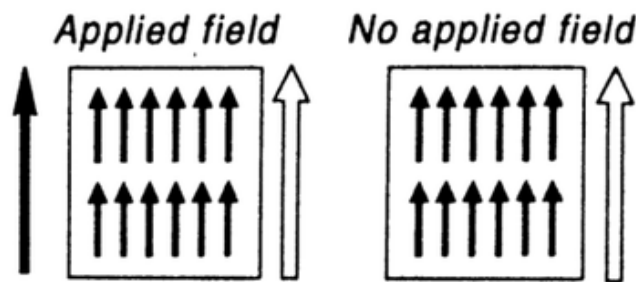
Εικόνα 12: Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών, για ένα παραμαγνητικό υλικό, με(αριστερή εικόνα)και χωρίς(δεξιά εικόνα) την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου, ενώ το λευκό βέλος την κατεύθυνση των μαγνητικών διπολικών ροπών.

3.4 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά, που αποτελούν την σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών, παρουσιάζουν μεγάλη τιμή επιδεκτικότητας που κυμαίνεται από 50 έως 10000, η οποία εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα υλικά αυτά επίσης έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση ακόμα και αν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

απουσιάζει και η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση M και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι μη γραμμική. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από μόρια με μαγνητικές ροπές παράλληλες και ίσες μεταξύ τους. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών μορίων είναι τόσο ισχυρές ώστε να προκαλούν ευθγράμμιση όλων των μαγνητικών ροπών σε μία μικρή περιοχή του υλικού, ακόμα και χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie T_c . Για θερμοκρασία πάνω από την T_c ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.

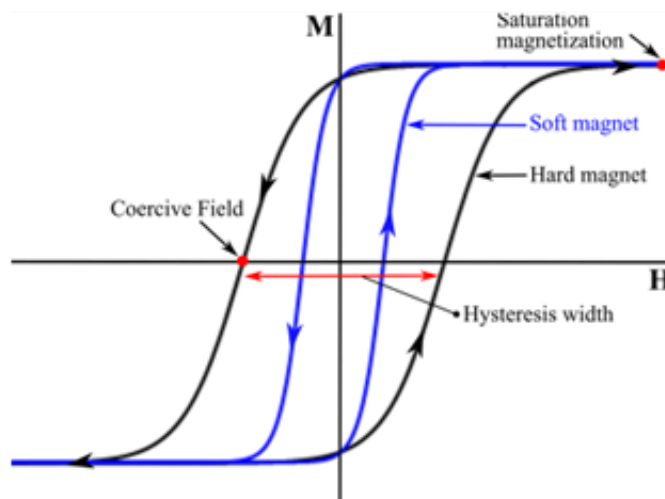


Εικόνα 13: Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών, για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, με(αριστερή εικόνα)και χωρίς(δεξιά εικόνα) την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου, ενώ το λευκό βέλος την κατεύθυνση των μαγνητικών διπολικών ροπών.

3.4.1 Μαλακά και σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά

Ανάλογα την ευκολία με την οποία μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά. Τα μαλακά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα, εμφανίζουν πολύ μεγάλες τιμές του B για μικρές τιμές του H , μικρές τιμές συνεκτικού πεδίου H_c και επομένως στενό μέγιστο βρόχο υστέρησης με μικρο εμβαδό. Τέτοια υλικά πρέπει να είναι καθαρά, με ελάχιστες προσμίξεις, έτσι ώστε τα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών τους να μετακινούνται εύκολα. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.

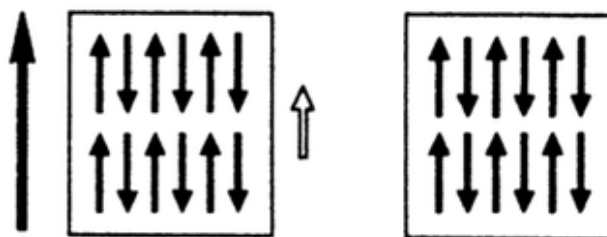
Τα σκληρά μαγνητικά υλικά, από την άλλη, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, εμφανίζουν μεγάλες τιμές του B μόνο για μεγάλες τιμές του H , έχουν πολύ μεγάλο H_c και συνεπώς πλατύ μέγιστο βρόχο υστέρησης με μεγάλο εμβαδό. Στα σκληρά υλικά η μετακίνηση των συνόρων μεταξύ των μαγνητικών περιοχών τους γίνεται δύσκολα. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές



Εικόνα 14: Ο βρόχος υστέρησης μαλακών και σκληρών υλικών σε κοινούς άξονες [12].

3.5 Αντισιδηρομαγνητικά υλικά

Αντισιδηρομαγνητισμός ονομάζεται το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο οι ισχυρές δυνάμεις ανταλλαγής προσανατολίζουν παράλληλα και αντίρροπα τις μαγνητικές ροπές των διπόλων. Οι ίσου μέτρου αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές εξουδετερώνονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά να εμφανίζονται αμαγνήτιστα χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ακόμα και με την παρουσία μαγνητικού πεδίου όμως, προκαλείται μικρή μόνο συνολική καθαρή μαγνητική ροπή και επομένως μικρή μαγνήτιση του υλικού. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel T_N . Σε θερμοκρασίες πάνω από την T_N , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά.

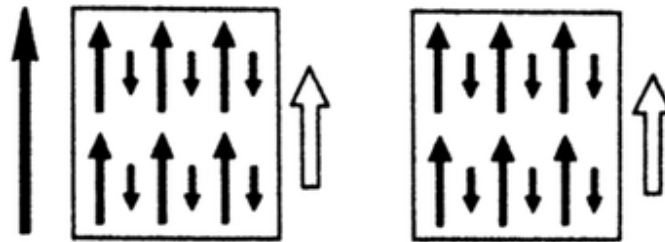


Εικόνα 15: Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών, για ένα αντισιδηρομαγνητικό υλικό, με(αριστερή εικόνα)και χωρίς(δεξιά εικόνα) την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου, ενώ το λευκό βέλος την κατεύθυνση των μαγνητικών διπολικών ροπών.

3.6 Σιδηριμαγνητικά υλικά

Ο σιδηριμαγνητισμός είναι φαινόμενο ανάλογο του αντισιδηριμαγνητισμού, με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή οι δύο ομάδες των αντιπαράλληλων ατομικών μαγνητικών ροπών έχουν διαφορετικά μέτρα. Τα Σιδηριμαγνητικά υλικά εμφανίζονται μακροσκοπικά αμαγνήτιστα χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου διότι υπάρχουν μαγνητικές περιοχές αυθόρμητα μαγνητισμένες με τυχαίες διευθύνσεις μαγνητικών ροπών από περιοχή σε περιοχή. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά κάτω από την θερμοκρασία Curie T_C εμφανίζουν παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους

σιδηρομαγνήτες ενώ σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από T_C γίνονται παραμαγνητικά [11].



Εικόνα 16: Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών, για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, με(αριστερή εικόνα)και χωρίς(δεξιά εικόνα) την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μαύρο βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου, ενώ το λευκό βέλος την κατεύθυνση των μαγνητικών διπολικών ροπών [13].

Κεφάλαιο 4: Μαγνητικοί αισθητήρες

4.1 Εισαγωγή

Αισθητήρα ονομάζουμε την συσκευή που ανιχνεύει και ανταποκρίνεται σε κάποιο ερέθισμα από το φυσικό περιβάλλον (είσοδος) π.χ. θερμότητα, κίνηση, φως, υγρασία, πίεση ή οποιοδήποτε άλλο περιβαλλοντικό φαινόμενο και παράγει μία αντίστοιχη αντίδραση (έξοδος). Οι αισθητήρες, πλέον, είναι ηλεκτρονικοί το οποίο σημαίνει πως οποιαδήποτε είσοδος θα μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα και αυτό θα μεταφραστεί ως έξοδος είτε τοπικά, δηλαδή μέσω μιας οθόνης κοντά στο αισθητήρα, είτε θα μεταδοθεί σε απομακρυσμένη περιοχή, ηλεκτρονικά μέσω ενός δικτύου, για ανάγνωση ή περαιτέρω επεξεργασία.

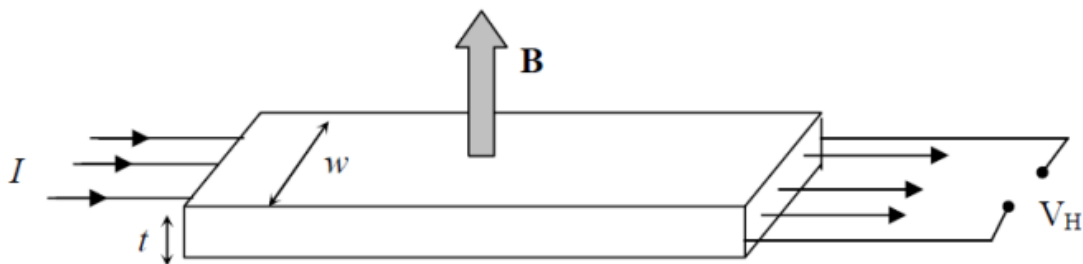
Μαγνητικοί αισθητήρες ορίζονται ως οι συσκευές που μπορούν να παρακολουθήσουν και να ανιχνεύσουν την παρουσία μαγνητικών πεδίων και να μεταφράσουν αυτή την πληροφορία σε ηλεκτρική τάση. Δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί εύκολα να εξαπλωθεί στον ελεύθερο χώρο, επιτρέπει την ανέπαφη ανίχνευση σε ποικίλες εφαρμογές όπως την μαγνητοκαρδιογραφία και την αυτόνομη οδήγηση [14]. Οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι στην πράξη αισθητήρες μαγνητικής επαγωγής B ή μαγνητικής ροής Φ , με μια μικρή μερίδα να μετράει κι άλλα φυσικά μεγέθη, π.χ. αισθητήρες πίεσης μέσω της μαγνητοεμπέδησης.

4.2 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες

4.2.1 Αισθητήρας Hall

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου που βασίζονται στο φαινόμενο Hall είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι μαγνητικοί αισθητήρες, λόγω της εύκολης χρήσης τους, του μικρού μεγέθους τους και του χαμηλού κόστους παραγωγής τους. Οι αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται σχετικά σπάνια για την απλή μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου αλλά πολύ πιο συχνά χρησιμοποιούνται ως βασικό στοιχείο σε αισθητήρες χωρίς επαφή, για την ανίχνευση γραμμικής θέσης, γωνιακής θέσης, ταχύτητας, περιστροφής και ηλεκτρικού ρεύματος [15].

Η λειτουργία του μαγνητικού αισθητήρα Hall βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο όταν ένα ρεύμα διαρρέει έναν αγωγό ή ημιαγωγό και ταυτοχρόνως στο υλικό εφαρμόζεται και ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος, τότε κατά μήκος του υλικού εμφανίζεται μια τάση, η οποία είναι κάθετη τόσο στο ρεύμα, όσο και στο μαγνητικό πεδίο. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση Hall (V_H) [16].



Εικόνα 17: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall.

Η τάση Hall δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = \frac{R_x \cdot I_x \cdot B_z}{t} \quad (4.1)$$

Όπου:

R_H ο συντελεστής Hall

I_x η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την διεύθυνση του άξονα x

B_z το μαγνητικό πεδίο κατά την διεύθυνση του άξονα z

t το πάχος του ημιαγωγού

Όσον αφορά τις φυσικές παραμέτρους, οι αισθητήρες Hall συνήθως λειτουργούν ορθά στις ακόλουθες περιοχές:

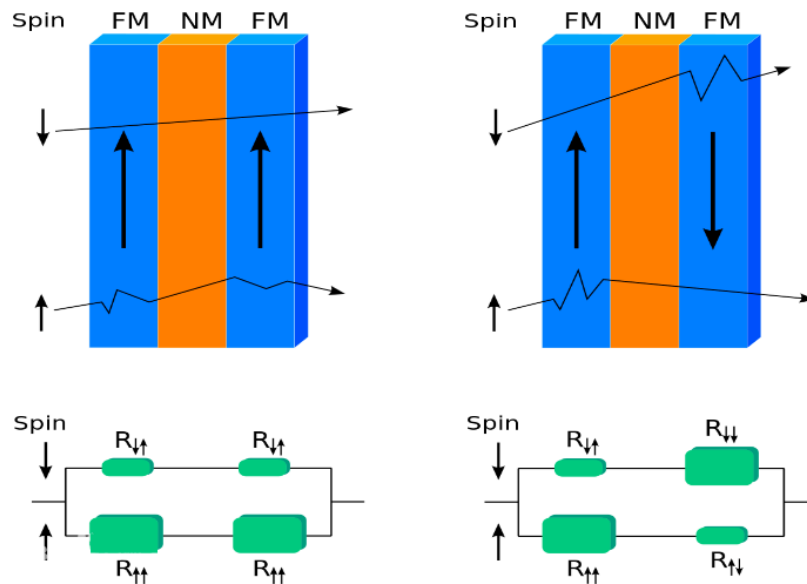
- Σε τιμές μαγνητικής επαγωγής μεγαλύτερες από 1 mT
- Σε θερμοκρασίες μεταξύ -100°C και 100°C
- Συχνότητες από DC μέχρι 30 kHz

Οι ακριβείς τιμές αυτών των παραμέτρων εξαρτώνται από το υλικό και την σχεδίαση της συσκευής Hall και μπορεί να διαφέρουν αρκετά σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

4.2.2 Αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Giant Magnetoresistance – GMR)

Το φαινόμενο κατά το οποίο η τιμή της αντίστασης μιας ουσίας αλλάζει υπό την επίδραση ενός συγκεκριμένου μαγνητικού πεδίου είναι γνωστό ως μαγνητοαντίσταση. Γενικά, η ειδική αντίσταση μιας ουσίας μειώνεται ελαφρώς μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Υπό ορισμένες συνθήκες όμως, η ειδική αντίσταση μειώνεται σε σημαντικό βαθμό, περισσότερο από 10 φορές πιο πολύ από την τιμή της μαγνητοαντίστασης των μαγνητικών μετάλλων και κραμάτων, και αυτό ονομάζεται "Γιγαντιαία Μαγνητοαντίσταση" (GMR). Σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο, ορισμένα μονωτικά υλικά γίνονται αγωγοί, και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται "Κολοσσιαία Μαγνητοαντίσταση".

Η Γιγαντιαία Μαγνητοαντίσταση πρόκειται για ένα είδος μαγνητοαντίστασης που μπορεί να παρατηρηθεί σε λεπτά στρώματα, πάχους μερικών νανομέτρων, μεταξύ μαγνητικών και μη μαγνητικών υλικών. Η τιμή της αντίστασης του υλικού της δομής εξαρτάται από την κατεύθυνση της μαγνήτισης της λεπτής μαγνητικής μεμβράνης. Η τιμή της αντίστασης για δύο στρώματα μαγνητικού υλικού με αντίθετη κατεύθυνση μαγνήτισης είναι προφανώς μεγαλύτερη από εκείνη με την ίδια κατεύθυνση μαγνήτισης. Η αντίσταση μεταβάλλεται σημαντικά υπό την επίδραση αδύναμου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 18: Βασική διάταξη αισθητήρα GMR, με ομοπαράλληλες και αντιπαράλληλες μαγνητίσεις.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, τα υλικά στα αριστερά και στα δεξιά έχουν την ίδια δομή, με μία λεπτή μεμβράνη μαγνητικού υλικού (με το μπλε χρώμα) στις δύο πλευρές και ένα λεπτό στρώμα μη μαγνητικού υλικού (με το πορτοκαλί χρώμα) στη μέση.

Στην αριστερή δομή, οι κατευθύνσεις μαγνήτισης των δύο στρωμάτων μαγνητικού υλικού είναι οι ίδιες.

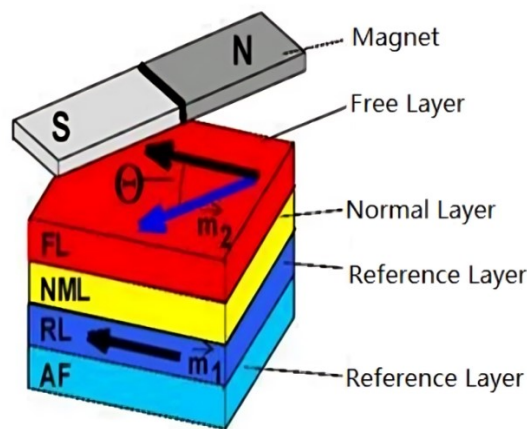
- Όταν μία δέσμη ηλεκτρονίων με ίδια κατεύθυνση spin με αυτή της μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού διέρχεται, είναι ευκολότερο για τα ηλεκτρόνια να διαπεράσουν τα δύο στρώματα μαγνητικού υλικού, παρουσιάζοντας μικρή τιμή αντίστασης.
- Όταν η δέσμη ηλεκτρονίων έχει αντίθετη κατεύθυνση spin από την κατεύθυνση μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού που διέρχεται, είναι εύκολο για τα ηλεκτρόνια να περάσουν από τα δύο στρώματα μαγνητικού υλικού, παρουσιάζοντας μεγάλη τιμή αντίστασης. Αυτό συμβαίνει επειδή η κατεύθυνση του spin του ηλεκτρονίου είναι αντίθετη από την κατεύθυνση μαγνήτισης του υλικού, με αποτέλεσμα τη σκέδαση και την μείωση του αριθμού των ηλεκτρονίων που περνούν, μειώνοντας έτσι το ρεύμα

Στην δεξιά δομή, οι κατευθύνσεις μαγνήτισης των δύο στρωμάτων μαγνητικού υλικού είναι αντίθετες.

- Όταν μία δέσμη ηλεκτρονίων με κατεύθυνση spin ίδια με αυτή του πρώτου στρώματος μαγνητικού υλικού διέρχεται, είναι ευκολότερο για τα ηλεκτρόνια να περάσουν και παρουσιάζουν μικρή τιμή αντίστασης. Ωστόσο, είναι δύσκολο να περάσουν από το δεύτερο στρώμα μαγνητικού υλικού, του οποίου η κατεύθυνση μαγνήτισης είναι αντίθετη προς την κατεύθυνση του spin των ηλεκτρονίων, παρουσιάζοντας έτσι μεγάλη τιμή αντίστασης.

- Όταν η δέσμη ηλεκτρονίων έχει κατεύθυνση spin αντίθετη από την κατεύθυνση μαγνήτισης του πρώτου στρώματος μαγνητικού υλικού που διέρχεται, είναι δύσκολο για τα ηλεκτρόνια να περάσουν, παρουσιάζοντας μεγάλη τιμή αντίστασης. Ωστόσο, είναι ευκολότερο να περάσουν από το δεύτερο στρώμα μαγνητικού υλικού, του οποίου η κατεύθυνση μαγνήτισης είναι ίδια με την κατεύθυνση του spin των ηλεκτρονίων, παρουσιάζοντας μικρή τιμή αντίστασης.

Ο αισθητήρας που βασίζεται στο φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης έχει τρία στρώματα επαγωγικών υλικών: το στρώμα αναφοράς, το κανονικό στρώμα και το ελεύθερο στρώμα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, το στρώμα αναφοράς έχει μία σταθερή κατεύθυνση μαγνήτισης, η οποία δεν επηρεάζεται από την κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το κανονικό στρώμα είναι η λεπτή μη μαγνητική μεμβράνη που διαχωρίζει τα άλλα δύο μαγνητικά στρώματα. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του ελεύθερου στρώματος μεταβάλλεται σύμφωνα με την κατεύθυνση του παράλληλου μαγνητικού πεδίου [17].

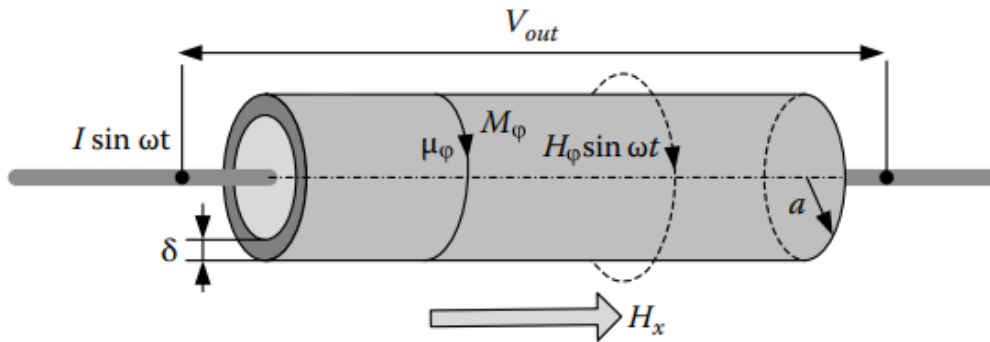


Εικόνα 19: Η στρωματική δομή του GMR

Ο αισθητήρας τέτοιων προδιαγραφών ονομάζεται spin valve. Η ελεύθερη στρώση κατασκευάζεται από μαλακό μαγνητικό υλικό, π.χ. CoFeB, NiFe. Η αντίσταση ενός GMR αισθητήρα είναι ανάλογη του ημίτονου της μεταβαλλόμενης γωνίας του προσανατολισμού της ελεύθερης στρώσης, υπό την επίδραση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Για ασθενή μαγνητικά πεδία, το ημίτονο της γωνίας έχει σχέση ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού. Αυτή η χαρακτηριστική ιδιότητα είναι που καθιστά τον αισθητήρα ιδιαίτερα ελκυστικό.

4.2.3 Αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (Giant Magnetoimpedance – GMI)

Το φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης ΜΙ αναπτύσσεται σε ένα λεπτό σύρμα, ribbon ή λεπτό φιλμ. Στο σύρμα, το ρεύμα υψηλής συχνότητας δημιουργεί κυκλικό μαγνητικό πεδίο $H_\phi = Ir/2\pi a^2$, όπου r είναι η ακτινική συντεταγμένη. Έτσι, το μαγνητικό σύρμα πρέπει να εμφανίζει κυκλική ανισοτροπία και μεγάλη κυκλική διαπερατότητα μ_ϕ , όπως φαίνεται και από το σχήμα 20.



Εικόνα 20: Αισθητήρας μαγνητοεμπέδησης σύρματος.

Το άμορφο σύρμα είναι κατάλληλο για αυτόν τον σκοπό, καθώς διαθέτει κυκλική δομή μαγνητικών περιοχών. Με κατάλληλη ανόπτηση του δείγματος, μπορεί να προκληθεί κυκλική ανισοτροπία. Αυτή η υψηλής συχνότητας κυκλική διαπερατότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ένα συνεχές ή χαμηλής συχνότητας αξονικό μαγνητικό πεδίο.

Στο λεπτό σιδηρομαγνητικό σύρμα, η εμπέδηση αλλάζει με το εξωτερικό πεδίο λόγω της αλλαγής της διαπερατότητας και του φαινομένου του δέρματος (skin effect), όπου το ρεύμα ρέει μόνο στο λεπτό εξωτερικό στρώμα δ του σύρματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 20. Το φαινόμενο του δέρματος εξαρτάται επίσης από την αλλαγή της διαπερατότητας (και της ειδικής αντίστασης ρ), διότι

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (4.2)$$

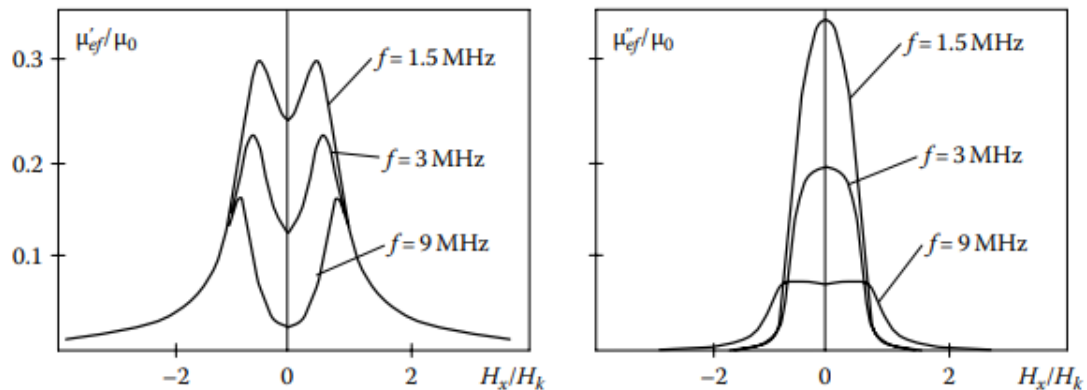
Η προκύπτουσα εμπέδηση, στην απλοποιημένη της μορφή, μπορεί να εκφραστεί ως

$$Z = \frac{l\rho}{a} \frac{1}{2\pi\delta} + j\omega \frac{l\mu}{8\pi} \frac{2\delta}{a} \quad (4.3)$$

Σε χαμηλές συχνότητες, όταν το φαινόμενο του δέρματος είναι ασθενές, το πραγματικό μέρος της εμπέδησης αλλάζει μόνο λίγο με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και η αλλαγή της εμπέδησης προκαλείται κυρίως από την αλλαγή της επαγωγής $L=l\mu/8\pi$. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως το φαινόμενο της μαγνητοεπαγωγής και μπορεί να ανιχνευθεί ως παλμοί τάσης που επάγονται στο πηνίο που είναι τυλιγμένο γύρω από το σύρμα [2].

Σε υψηλές συχνότητες ρεύματος, το φαινόμενο του δέρματος κυριαρχεί και τόσο το πραγματικό όσο και το φανταστικό μέρος της εμπέδησης αλλάζουν σημαντικά. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση (GMI).

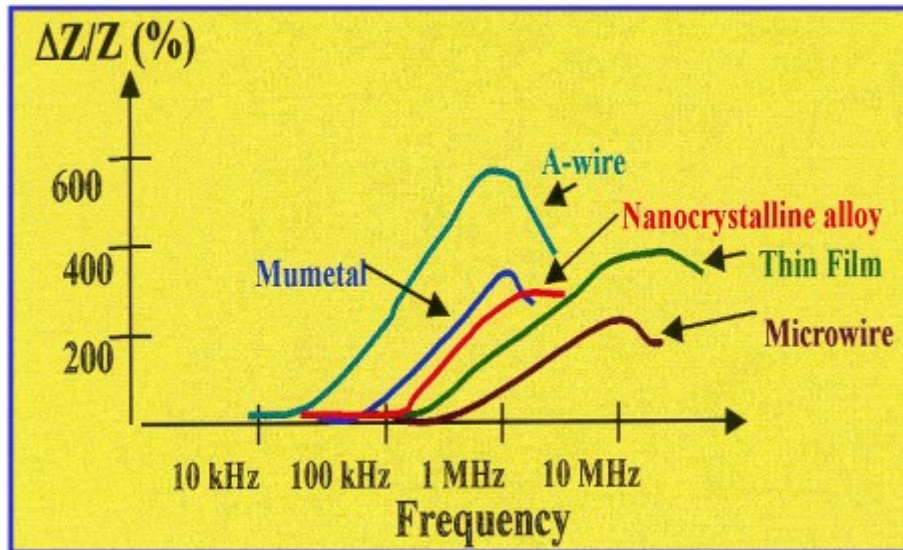
Πρέπει να σημειωθεί ότι σε λειτουργία υψηλής συχνότητας, η σύνθετη διαπερατότητα πρέπει να ληφθεί υπόψη ως $\mu_\phi = \mu_\phi' - j\mu_\phi''$ όπου μ_ϕ' είναι η πραγματική και μ_ϕ'' η φανταστική συνιστώσα της διαπερατότητας. Η αλλαγή και των δύο συνιστωσών της διαπερατότητας για ένα σύρμα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 21: Η αποτελεσματική διαπερατότητα ενός σύρματος ως προς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

Για να παρατηρηθεί το φαινόμενο GMI, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί υλικό με μεγάλη διαπερατότητα, το οποίο μπορεί επιπλέον να τροποποιηθεί κατάλληλα με ένα συνεχές (DC) πεδίο. Συνοπτικά, η GMI αναμένεται να παρατηρηθεί σε υπερμαλακά (ultrasoft) μαγνητικά υλικά με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επίσης, το πάχος τους θα πρέπει να είναι συγκρίσιμο με τις αλλαγές του βάθους δέρματος που προκαλούνται από το εφαρμοζόμενο συνεχές πεδίο.

Η γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση (GMI) είναι ιδιαίτερα έντονη σε υλικά όπως τα μαλακά άμορφα υλικά (ribbons και σύρματα), όπου εκτός από την μαλακή τους φύση, επιδεικνύουν επίσης σχετικά υψηλή αγωγιμότητα. Το τυπικό φάσμα συχνοτήτων στο οποίο παρατηρείται η GMI κυμαίνεται από 100 kHz έως 10 MHz για άμορφα σύρματα και ribbons, και συνήθως αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι τόσο μαλακά υλικά, η GMI έχει παρατηρηθεί επίσης σε λεπτά φιλμ και πολυστρωματικά υλικά, καθώς και σε πολυστρωματικά μικροσύρματα (βλ. Εικόνα 22).



Εικόνα 22: Τυπικές τιμές του GMI για μερικές οικογένειες μαλακών μαγνητικών υλικών [18].

4.2.4 Αισθητήρας SQUID

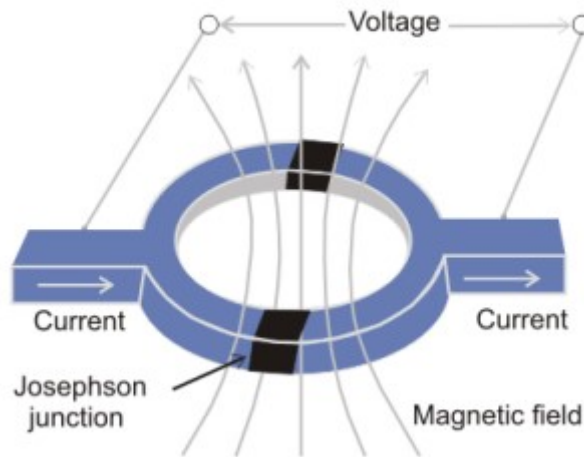
Οι συσκευές υπεραγώγιμης κβαντικής διεπαφής (Superconducting QUantum Interface Device – SQUID) είναι οι πιο ευαίσθητες συσκευές για την ανίχνευση μαγνητικής ροής Φ . Μετατρέπουν τη μαγνητική ροή ή οποιαδήποτε φυσική ιδιότητα που μπορεί να μετασχηματιστεί σε μαγνητική ροή, όπως για παράδειγμα την μαγνητική επαγωγή B , σε τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος της συσκευής.

Το DC SQUID αποτελείται από έναν υπεραγώγιμο βρόχο ο οποίος διακόπτεται από δύο ενώσεις Josephson. Πριν προχωρήσουμε στην αρχή λειτουργίας των αισθητήρων SQUID, θα γίνει μία συνοπτική αναφορά στο φαινόμενο Josephson.

Το φαινόμενο Josephson

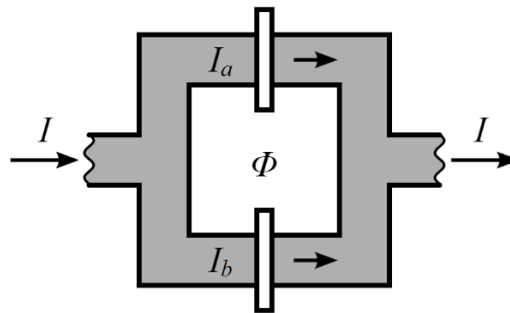
Στη φυσική, το φαινόμενο Josephson είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται όταν δύο υπεραγώγιμα υλικά τοποθετηθούν κοντά το ένα στο άλλο, με κάποιο εμπόδιο ή περιορισμό μεταξύ τους. Το φαινόμενο Josephson παράγει ένα ρεύμα, γνωστό ως υπεραγώγιμο ρεύμα (supercurrent), το οποίο ρέει συνεχώς χωρίς να εφαρμόζεται τάση, μέσω μιας διάταξης γνωστής ως σύνδεσμος Josephson (Josephson junction). Αυτοί οι σύνδεσμοι αποτελούνται από δύο ή περισσότερους υπεραγωγούς που συνδέονται μέσω ενός ασθενούς συνδέσμου (weak link). Ο ασθενής σύνδεσμος μπορεί να είναι ένα λεπτό μονωτικό φράγμα (γνωστό ως σύνδεσμος υπεραγωγού-μονωτή-υπεραγωγού), ένα μικρό τμήμα μη υπεραγώγιμου μετάλλου ή ένας φυσικός περιορισμός που εξασθενεί την υπεραγωγιμότητα στο σημείο επαφής. Το μέγιστο υπεραγώγιμο ρεύμα I_C που μπορεί να διέλθει μέσω του Josephson junction εξαρτάται από το πάχος και την επιφάνεια του μονωτικού υλικού, καθώς και από τα υπεραγώγιμα υλικά και τη θερμοκρασία [19].

Συνεχίζοντας τώρα στην περιγραφή των αισθητήρων SQUID, αυτοί έχουν δύο επαφές Josephson παράλληλες μεταξύ τους, αντιδιαμετρικά στον βρόχο, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23: Διάταξη DC SQUID.

Χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το ρεύμα εισόδου I διαχωρίζεται σε δύο ίσες συνιστώσες I_a και I_b όπως φαίνεται και από το ακόλουθο σχήμα,



Εικόνα 24: Διάγραμμα ενός DC SQUID.

Όταν εφαρμοστεί ένα μικρό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στον υπεραγώγιμο βρόχο, ένα ρεύμα αντιστάθμισης I_s αρχίζει να κυκλοφορεί γύρω από τον βρόχο, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο που αντισταθμίζει την εξωτερική ροή και δημιουργεί μια επιπλέον φάση Josephson, η οποία είναι ανάλογη με την εξωτερική μαγνητική ροή. Το παραγόμενο ρεύμα κατευθύνεται στην ίδια κατεύθυνση με το I σε μία από τις κλαδώσεις του υπεραγώγιμου βρόχου και αντίθετα με το I στην άλλη κλάδο. Έτσι, το συνολικό ρεύμα γίνεται $I/2 + I_s$ στον έναν κλάδο και $I/2 - I_s$ στον άλλον. Μόλις το ρεύμα σε οποιαδήποτε κλάδο υπερβεί το κρίσιμο ρεύμα I_c της ένωσης Josephson, θα αναπτυχθεί διαφορά δυναμικού στη διάταξη.

Τώρα ας υποθέσουμε ότι η εξωτερική ροή αυξάνεται περαιτέρω μέχρι να ξεπεράσει το $\Phi_0/2$, δηλαδή το ήμισυ της στοιχειώδους μαγνητικής ροής. Δεδομένου ότι η ροή που περιβάλλεται από τον υπεραγώγιμο βρόχο πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της στοιχειώδους μαγνητικής ροής, αντί να αντισταθμίσει τη ροή, το SQUID τώρα προτιμά ενεργειακά να την αυξήσει σε Φ_0 .

Το ρεύμα πλέον ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση, αντιτίθεται στη διαφορά μεταξύ της αποδεκτής ροής Φ_0 και του εξωτερικού πεδίου που είναι λίγο πάνω από το $\Phi_0/2$. Το ρεύμα μειώνεται καθώς αυξάνεται το εξωτερικό πεδίο, μηδενίζεται όταν η ροή είναι ακριβώς Φ_0 , και ξαναστρέφεται στην αντίθετη κατεύθυνση καθώς το εξωτερικό πεδίο αυξάνεται περαιτέρω. Έτσι, το ρεύμα αλλάζει κατεύθυνση περιοδικά, κάθε φορά που η ροή αυξάνεται κατά επιπλέον ημι-ακέραιο πολλαπλάσιο του Φ_0 , με αλλαγή στη μέγιστη ένταση ρεύματος σε κάθε ημι-πρόσθετο πολλαπλάσιο του Φ_0 και με μηδενισμό της έντασης κάθε ακέραιο πολλαπλάσιο [20].

Για τιμές της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος μελύτερες του I_c , η τάση όπου θα αναπτύσσεται θα είναι ανάλογη του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και η περίοδος θα είναι ίση με Φ_0 . Λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος τοποθετούμε έναν αντιστάτη R διαγώνια στις ενώσεις για να εξαλειφθεί η υστερητικότητα. Το ρεύμα αντιστάθμισης είναι η εφαρμοσμένη μαγνητική ροή διαιρεμένη με την αυτοεπαγωγή L του δακτυλίου. Επομένως, η $\Delta\Phi$ μπορεί να εκτιμηθεί ως συνάρτηση της ΔV (μετατροπέας ροής σε τάση) ως εξής:

$$\Delta V = R \cdot \Delta I \quad (4.4)$$

$$2 \cdot \Delta I = 2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{L} \quad (4.5)$$

$$\Delta V = \frac{R}{L} \cdot \Delta\Phi \quad (4.6)$$

Οι αισθητήρες SQUID προσφέρουν εξαιρετική ευαισθησία για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων, χρησιμοποιούμενοι σε εφαρμογές όπως η μαγνητοεγκεφαλογραφία, η γεωφυσική ανάλυση και η μελέτη αστρονομικών φαινομένων. Επίσης, είναι σημαντικοί σε κβαντικούς υπολογιστές και στην ανίχνευση μαγνητικών πεδίων σε βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές. Το κύριο μειονέκτημα των αισθητήρων SQUID όμως είναι ότι απαιτούν συνεχή ψύξη λόγω της χρήσης υπεραγώγιμων φαινομένων, κάτι που καθιστά τη διαδικασία ακριβή και ογκώδη

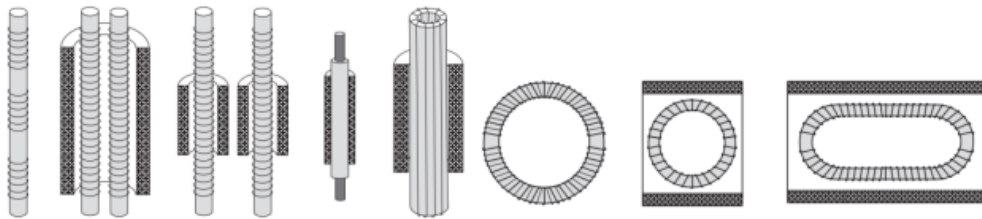
Κεφάλαιο 5: Αισθητήρες fluxgate

5.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες fluxgate ή αλλιώς αισθητήρες πύλης-ροής αναπτύχθηκαν το 1930 με αρχικό σκοπό την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Στην συνέχεια όμως χρησιμοποιήθηκαν σε πληθώρα εφαρμογών όπως σε γεωφυσικές έρευνες και αργότερα σε διαστημικές εφαρμογές. Από το Sputnik 3 το 1958, χιλιάδες τριαξονικοί αισθητήρες fluxgate έχουν εκτοξευτεί στο διάστημα, λειτουργώντας στην Σελήνη και στο βαθύ διάστημα. Οι πυξίδες fluxgate χρησιμοποιούνται εκτενώς για την πλοήγηση αεροσκαφών και οχημάτων, έως και σήμερα.

Τα μαγνητόμετρα fluxgate μετρούν την απόλυτη τιμή της ισχύς ενός περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου ή τη διαφορά στην ισχύ του πεδίου μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Είναι solid-state συσκευές χωρίς κινούμενα μέρη που λειτουργούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Είναι ανθεκτικοί, αξιόπιστοι και συνήθως έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Μπορούν να μετρήσουν εντάσεις ασθενούς μαγνητικού πεδίου της τάξης από 10^{-1} έως 10^6 nT με διακριτική ικανότητα που μπορεί να πλησιάσει τα 100pT. Πολλά DC μαγνητόμετρα πύλης-ροής έχουν συχνότητα αποκοπής μερικών hertz, αλλά, όταν είναι απαραίτητο, μπορούν να λειτουργήσουν σε συχνότητες έως και kilohertz.

Το εύρος λειτουργίας τους και η διακριτική ικανότητά τους, τους τοποθετούν ακριβώς στο κενό μεταξύ φθηνών αισθητήρων, όπως οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης ή αισθητήρες τύπου Hall με όριο ανάλυσης 10 nT, και πολύ ακριβών μαγνητομέτρων που βασίζονται σε κβαντικά φαινόμενα, όπως οι αισθητήρες SQUID και άλλοι [21].



Εικόνα 25: Διάφορες τοπολογίες αισθητήρων fluxgate.

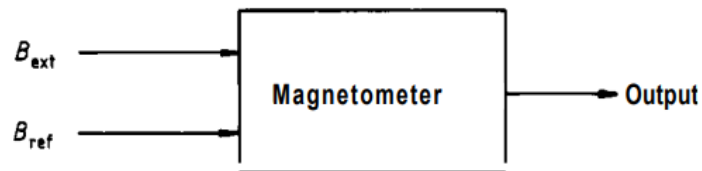
5.2 Βασικές αρχές αισθητήρων fluxgate

Για να μετατραπεί η πυκνότητα μαγνητικής ροής B σε ένα μαγνητικό πεδίο προς μέτρηση σε ηλεκτρικό σήμα, μια απλή μέθοδος, όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα 26, κατά την οποία η είσοδος του συστήματος είναι η απόλυτη τιμή της μαγνητικής επαγωγής και η έξοδος είναι το σήμα που πρόκειται να μετρηθεί. Μία τέτοια μέθοδος θα ήταν προτιμότερη λόγω της ευκολίας κατανόησης και της απλότητάς της στην εφαρμογή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις ασθενών μαγνητικών πεδίων, για τις οποίες άλλωστε σχεδιάστηκαν οι αισθητήρες fluxgate, αυτή η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα.



Εικόνα 26: Απλή μέθοδος μέτρησης μαγνητικού πεδίου.

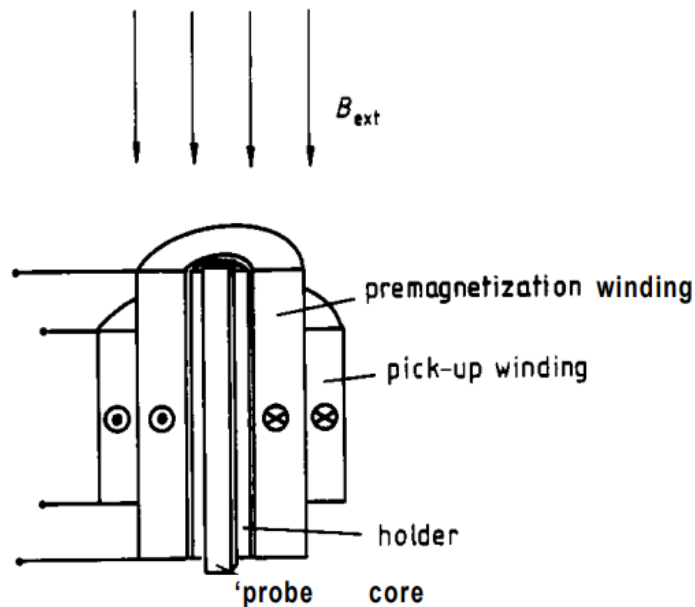
Για αυτό το λόγο, οι αισθητήρες πύλης-ροής δεν χρησιμοποιούν αυτήν την απλή μέθοδο και πάντα χρειάζονται ένα μαγνητικό πεδίο αναφοράς B_{ref} με το οποίο συγκρίνεται το προς μέτρηση πεδίο.



Εικόνα 27: Μέτρηση μαγνητικού πεδίου, με χρήση πεδίου αναφοράς.

Το πεδίο αναφοράς είναι συνήθως ένα εναλλασσόμενο ημιτονοειδές, τετραγωνικό ή τριγωνικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο επιβάλλεται στον πυρήνα μέσω ενός πηνίου προμαγνήτισης (premagnetization winding) και περιοδικά οδηγεί τον πυρήνα σε κορεσμό. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης, βασισμένο στην μαγνητική επαγωγή μέσα στον πυρήνα, εκτιμάται μέσω του πηνίου λήψης (pick-up winding) που τυλίγεται γύρω από τον πυρήνα.

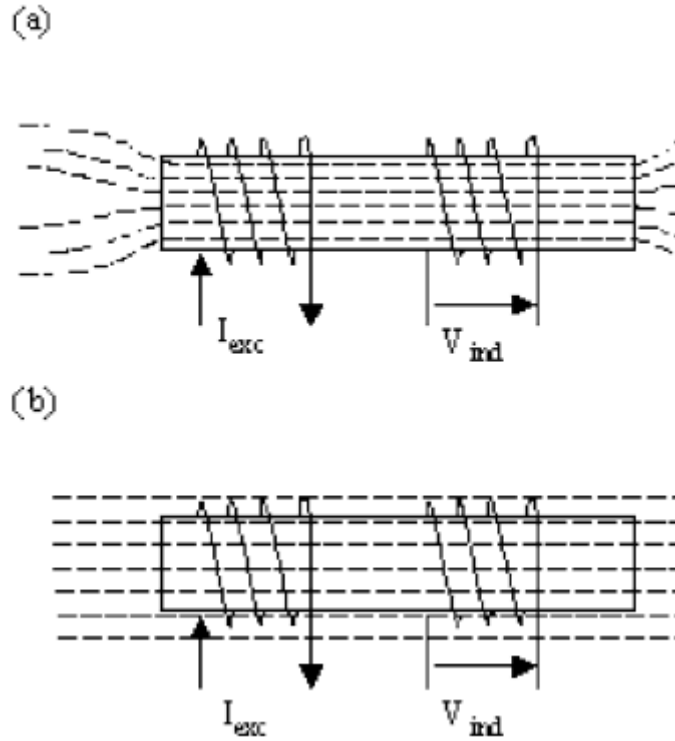
Επομένως, οι αισθητήρες fluxgate συνήθως αποτελούνται από έναν πυρήνα (probe core) σιδηρομαγνητικού υλικού που χαρακτηρίζεται από υψηλή διαπερατότητα και χαμηλό συνεκτικό πεδίο, ο οποίος τοποθετείται σε μια βάση (holder) και τουλάχιστον δύο πηνία είναι τυλιγμένα γύρω από αυτή τη βάση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 28 [22].



Εικόνα 28: Βασική τοπολογία αισθητήρα fluxgate

5.3 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρων fluxgate

Οι αισθητήρες fluxgate μετρούν το στατικό ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικό πεδίο. Είναι διανυσματικές συσκευές και είναι ευαίσθητες τόσο στην κατεύθυνση όσο και στο πλάτος του πεδίου μέχρι 1 mT, με επιτεύξιμη διακριτική ικανότητα 100 pT. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο γεγονός ότι ένα ρεύμα διέγερσης I_{exc} μέσω ενός πηνίου διέγερσης παράγει ένα εναλλασσόμενο πεδίο διέγερσης, το οποίο περιοδικά προκαλεί κορεσμό του μαλακού μαγνητικού υλικού του πυρήνα του αισθητήρα.



Εικόνα 29: Αρχή λειτουργίας του αισθητήρα fluxgate. a) ο πυρήνας δεν έχει κορεστεί b) ο πυρήνας έχει κορεστεί.

Όταν ο πυρήνας κορεστεί, η διαπερατότητά του μειώνεται και η μαγνητική ροή που σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο που μετράται B_0 , μειώνεται. Ο όρος αισθητήρας "fluxgate" ή αλλιώς αισθητήρας "πύλης-ροής", προέρχεται από αυτή τη διαδικασία περιορισμού της μαγνητικής ροής που συμβαίνει όταν ο πυρήνας κορεστεί. Υπό την παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου B_0 , η τάση V_i που επάγεται στο πηνίο λήψης, περιέχει συνιστώσες στη δεύτερη αρμονική αλλά και σε υψηλότερες άρτιες αρμονικές της συχνότητας διέγερσης. Τα πλάτη των αρμονικών συνιστωσών είναι ανάλογα του εξωτερικού πεδίου B_0 και αποτελούν την έξοδο του αισθητήρα. Το πλάτος της επαγόμενης τάσης περιγράφεται από τον νόμο του Φαραντέι [23]:

$$V_{out} = -N_{sens} \cdot S \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu \cdot N_{exc} \cdot I_0 \sin(2\pi f_{exc} t)}{l} \right) \quad (5.1)$$

Όπου:

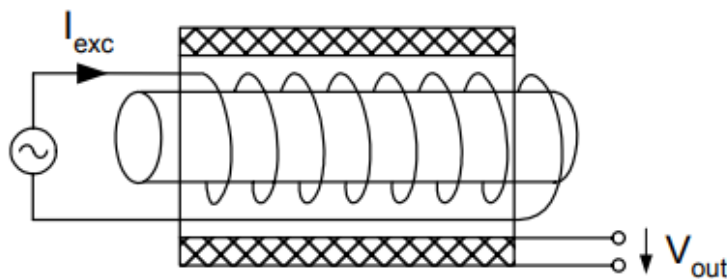
όπου N_{sens} είναι ο αριθμός σπειρών του πηνίου λήψης, N_{exc} είναι ο αριθμός σπειρών του πηνίου διέγερσης, S είναι η διατομή του πηνίου λήψης, l είναι το μήκος του πηνίου διέγερσης, μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα, και $I_0 \sin(2\pi f_{exc} t)$ είναι το ημιτονοειδές ρεύμα διέγερσης με συχνότητα f_{exc} .

Η ευαισθησία του αισθητήρα μπορεί να βελτιωθεί μεγιστοποιώντας την επαγόμενη τάση, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας τη συχνότητα διέγερσης f_{exc} , τον αριθμό των σπειρών του πηνίου λήψης N_{sens} και/ή τη διατομή του φερρομαγνητικού υλικού.

5.4 Τοπολογίες μαγνητικών αισθητήρων fluxgate

5.4.1 Παράλληλη διάταξη

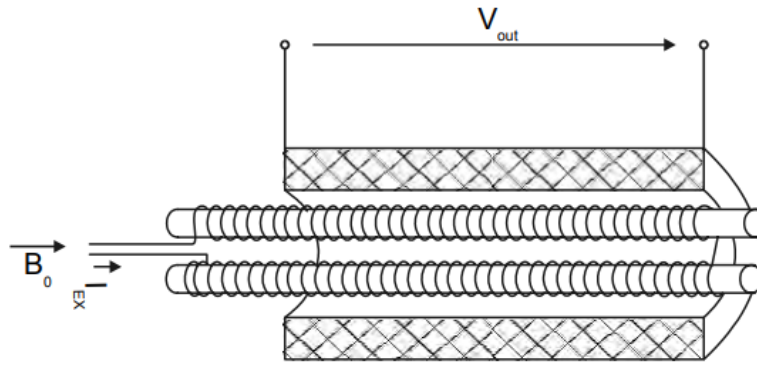
Ως fluxgates παράλληλου τύπου ορίζονται οι αισθητήρες εκείνοι στους οποίους το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Η απλούστερη διάταξη αισθητήρα fluxgate είναι ο αισθητήρας διαμήκους πυρήνα που φαίνεται στο σχήμα 30.



Εικόνα 30: Διάταξη fluxgate με μονό πυρήνα.

Η διάταξη του fluxgate με μονό πυρήνα είναι ένας θεμελιώδης τύπος αισθητήρα μαγνητικού πεδίου, που ξεχωρίζει για την απλότητα και τον συμπαγή σχεδιασμό του. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιεί έναν μόνο σιδηρομαγνητικό πυρήνα, συνήθως από υλικό με υψηλή διαπερατότητα, γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένα δύο πηνία: ένα πρωτεύον πηνίο για διέγερση και ένα δευτερεύον πηνίο για λήψη. Το πρωτεύον πηνίο διεγείρεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο κυκλικά οδηγεί τον μαγνητικό πυρήνα σε κορεσμό. Η παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου διαταράσσει τη συμμετρία αυτού του κορεσμού, οδηγώντας σε επαγωγή τάσης στο δευτερεύον πηνίο που αντιστοιχεί στην ένταση και την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Αν και δεν είναι τόσο ευαίσθητα όσο πιο περίπλοκες διατάξεις, τα fluxgates με μονό πυρήνα είναι πολύτιμοι λόγω της απλής κατασκευής τους και της ευκολίας ενσωμάτωσής τους σε διάφορες εφαρμογές. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για φορητές συσκευές μέτρησης μαγνητικού πεδίου και για βασική επιστημονική έρευνα, όπου απαιτείται μέτρια ευαισθησία.

Το βασικό μειονέκτημα της διάταξης παράλληλου τύπου με μονό πυρήνα έγκειται στο γεγονός ότι προκαλεί ισχυρό σήμα στη συχνότητα διέγερσης στην έξοδο του αισθητήρα, καθώς η συσκευή λειτουργεί ως μετασχηματιστής. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ακριβεία των μετρήσεων και την απόδοση του αισθητήρα. Για την απαλειφή του θορύβου αυτού, στην διάταξη προστίθεται ακόμα ένας πυρήνας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [25].

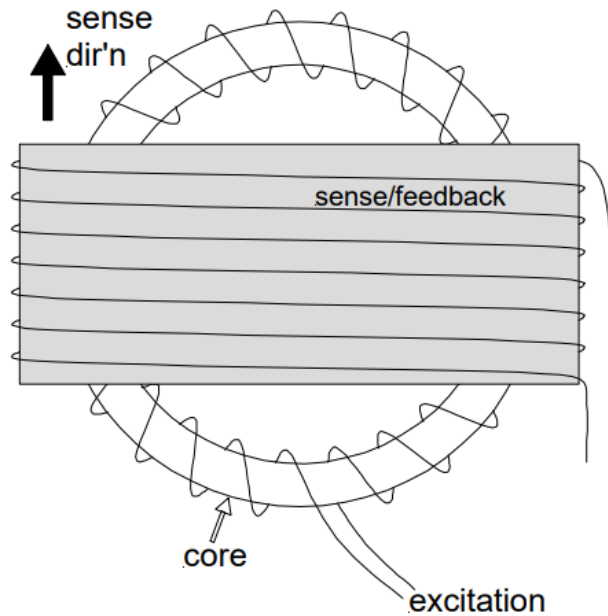


Εικόνα 31: Παράλληλη διάταξη διπλού πυρήνα

Αυτή η διάταξη χρησιμοποιεί δύο παράλληλους όμοιους σιδηρομαγνητικούς πυρήνες, τοποθετημένους σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, καθένας από τους οποίους διαθέτει τα δικά του πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πηνία. Τα πρωτεύοντα πηνία τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα σε αντίθετες φάσεις, δημιουργώντας ένα διαφοροποιημένο μαγνητικό πεδίο που οδηγεί σε κορεσμό κάθε πυρήνα εναλλάξ. Αυτή η εναλλασσόμενη διαδικασία κορεσμού επιτρέπει στο σύστημα να εξουδετερώνει αποτελεσματικά τα σήματα, απουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όταν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αυτό διαταράσσει την ισορροπία μεταξύ των δύο πυρήνων, οδηγώντας σε μια διαφοροποιημένη τάση εξόδου στα δευτερεύοντα πηνία που σχετίζεται άμεσα με την ένταση και την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου [25]. Αυτός ο σχεδιασμός ενισχύει την ευαισθησία και μειώνει τον θόρυβο και τις παρεμβολές, παρέχοντας μια πιο ακριβή και γραμμική απόκριση σε ένα ευρύ φάσμα εντάσεων μαγνητικού πεδίου. Ως αποτέλεσμα, τα fluxgates με διπλό πυρήνα είναι ιδιαίτερα πολύτιμα για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως γεωμαγνητικές έρευνες, όργανα διαστημόπλοιων και βιομηχανική παρακολούθηση, όπου η ανίχνευση ασθενών μαγνητικών ανωμαλιών και η απόκτηση ακριβών μετρήσεων είναι κρίσιμης σημασίας.

5.4.1.1 Τοροειδής διάταξη

Τοροειδής διάταξη ονομάζεται η διάταξη κατά την οποία το μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται βρίσκεται υπό την μορφή δακτυλίου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Ο τοροειδής πυρήνας αποτελεί στην ουσία μια λογική επέκταση του διπλού πυρήνα, που περιγράφηκε προηγουμένως, όπου τα δύο πάνω και τα δύο κάτω άκρα των ράβδων συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι ένα συνεχές μαγνητικό κύκλωμα. Το πηνίο διέγερσης έχει και αυτό τοροειδές σχήμα και είναι τοποθετημένο ομοιόμορφα γύρω από τον τοροειδή πυρήνα, ενώ το πηνίο λήψης βρίσκεται εξωτερικά και είναι ορθογώνιο προς την επιφάνεια του πυρήνα (βλ εικόνα 32)



Εικόνα 32: Τοροειδής διάταξη αισθητήρα fluxgate

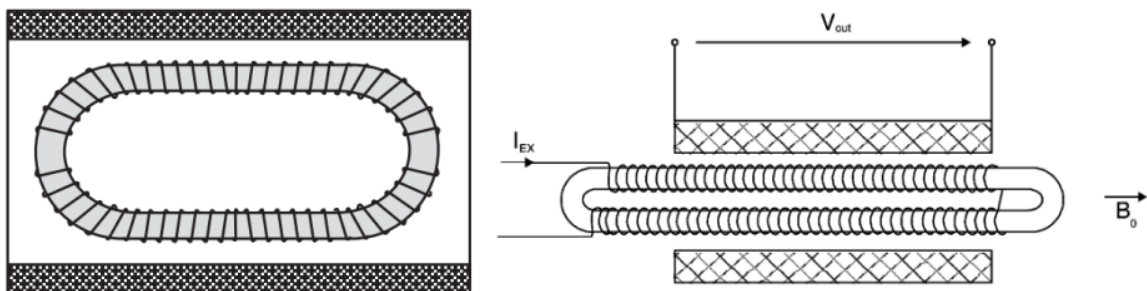
Ο άξονας του πηνίου λήψης καθορίζει την ευαίσθητη κατεύθυνση του αισθητήρα, καθώς ο πυρήνας είναι ιστροπικός [24]. Είναι εφικτό να τοποθετηθούν δύο σει πηνίων λήψης πάνω από τον τοροειδή πυρήνα, σχηματίζοντας ορθή γωνία μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι έναν αισθητήρα δύο αξόνων (XY).

Έχει αποδειχθεί ότι η τοροειδής διάταξη αποτελεί την βέλτιστη για αισθητήρες χαμηλού θορύβου για τους εξής λόγους [25]:

1. Επιτρέπει την ακριβή ισορρόπηση της συμμετρίας του πυρήνα περιστρέφοντας τον πυρήνα σε σχέση με το πηνίο ανίχνευσης.
2. Η πιθανή μηχανική τάση στον πυρήνα κατανέμεται ομοιόμορφα.
3. Δεν υπάρχουν ελεύθερα άκρα, τα οποία συνήθως συνδέονται με περιοχές αυξημένου θορύβου.

5.4.1.2 Race-track

Ο αισθητήρας fluxgate τύπου race-track απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



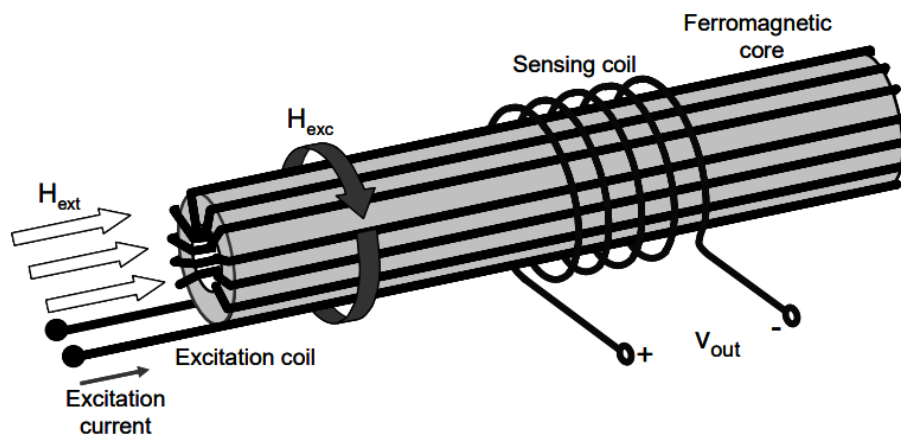
Εικόνα 33: Διάταξη race-track αισθητήρα fluxgate.

Η φιλοσοφία της γεωμετρίας του μαγνητικού υλικού ακολουθεί αυτή του τοροειδούς πυρήνα, δηλαδή και πάλι ενώνουμε τα πάνω και κάτω άκρα της διάταξης του διπλού πυρήνα, αυτή την φορά σχηματίζοντας οβάλ διάταξη. Το πηνίο διέγερσης είναι τυλιγμένο πάνω στον πυρήνα ενώ το πηνίο λήψης το εγκλωβίζει.

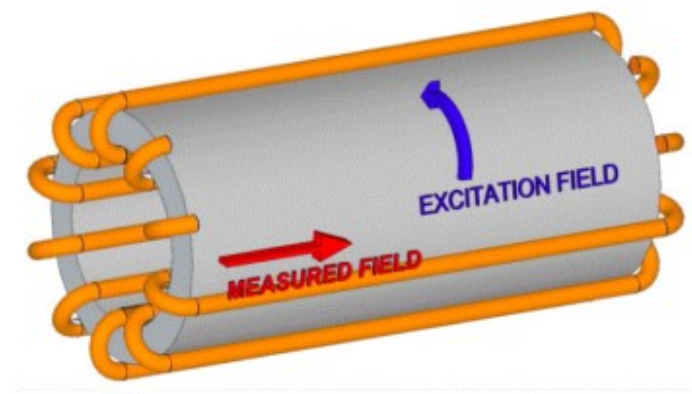
Αυτή η γεωμετρία πυρήνα έχει χαμηλότερο συντελεστή απομαγνητισμού σε σύγκριση με τον τοροειδή πυρήνα, γεγονός που σημαίνει ότι η ευαισθησία του αισθητήρα είναι υψηλότερη και ο αισθητήρας είναι λιγότερο ευαίσθητος σε κάθετα πεδία [26].

5.4.2 Ορθογωνική διάταξη

Ένας αισθητήρας fluxgate ορθογωνικής διάταξης αποτελείται στη βασική του μορφή από έναν κυλινδρικό μαγνητικό πυρήνα, με το πηνίο διέγερσης να περιελίσσεται γύρω του (βλ. Εικόνα 34). Το πεδίο που ανιχνεύεται είναι στη διεύθυνση του άξονα του πυρήνα, ωστόσο, το πεδίο διέγερσης που παράγεται από πηνίο διέγερσης είναι κυκλικό. Σε αυτή την περίπτωση, το πεδίο διέγερσης βρίσκεται στο επίπεδο XY, το οποίο είναι ορθογώνιο ως προς την κατεύθυνση λήψης, δηλαδή τον άξονα Z (ο οποίος αντιστοιχεί στον άξονα του πυρήνα). Γι' αυτόν τον λόγο ονομάζουμε αυτόν τον αισθητήρα ορθογώνιο, επειδή το πεδίο διέγερσης και το πεδίο λήψης είναι κάθετα μεταξύ τους (βλ. Εικόνα 35) [27].



Εικόνα 34: Ορθογωνική διάταξη αισθητήρα fluxgate

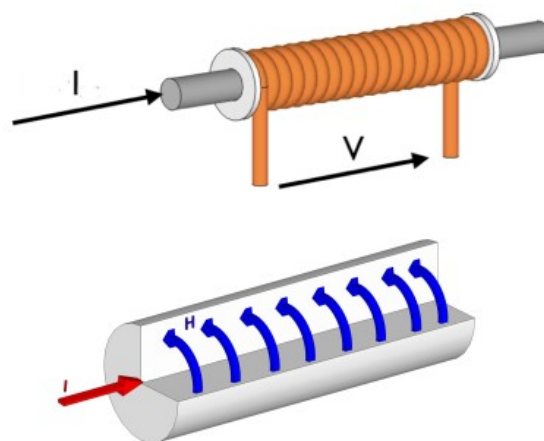


Εικόνα 35: Σχηματική αναπαράσταση της κατεύθυνσης των πεδίων διέγερσης και λήψης.

Συγκριτικά με την παράλληλη διάταξη, όπου οι μηχανισμοί διέγερσης και λήψης είναι αλληλοεξαρτώμενοι και επομένως δεν μπορούν να σχεδιαστούν ανεξάρτητα, η ορθογωνική διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι διαθέτει ξεχωριστούς μηχανισμούς διέγερσης και λήψης, επιτρέποντας τον ανεξάρτητο σχεδιασμό και των δύο μερών. Στην παράλληλη διάταξη, ένας αισθητήρας με μεγαλύτερο γραμμικό εύρος απαιτεί έναν κοντότερο πυρήνα με υψηλότερο συντελεστή απομαγνητισμού, γεγονός που αυξάνει το μαγνητικό πεδίο διέγερσης για σωστή λειτουργία. Αντίθετα, στην ορθογώνια δομή η μείωση του μήκους του πυρήνα δεν επηρεάζει το απαιτούμενο πεδίο διέγερσης, αλλά αυξάνει το γραμμικό εύρος λειτουργίας της συσκευής με παρόμοιο τρόπο [28].

Μαγνητικοί πυρήνες στην ορθογωνική διάταξη:

- Κυλινδρικός πυρήνας: ο κυλινδρικός πυρήνας, ο οποίος αποτυπώνεται στην εικόνα 35, δεν είναι πλέον το πιο συνηθισμένο σχήμα πυρήνα για έναν ορθογώνιο αισθητήρα fluxgate, ωστόσο συχνά χρησιμοποιείται επειδή πήρξε η πρώτη δομή που προτάθηκε ιστορικά, αλλά και επειδή μας επιτρέπει να κατανοήσουμε εύκολα πώς λειτουργεί ο αισθητήρας. Το μειονέκτημα αυτής της γεωμετρίας έγκειται στο ότι ο τοροειδής πυρήνας δεν είναι τόσο εύκολο να κατασκευαστεί γύρω από έναν κύλινδρο. Παρ' όλα αυτά, επιτρέπει τη δημιουργία ενός μεγάλου πεδίου διέγερσης, τυλίγοντας επαρκή αριθμό σπειρών.
- Πυρήνας σε μορφή σύρματος (ribbon): Αυτή η διάταξη χρησιμοποιεί ένα φερρομαγνητικό σύρμα ως πυρήνα (Εικ. 36). Το ρεύμα διέγερσης ρέει απευθείας μέσω του φερρομαγνητικού σύρματος, δημιουργώντας ένα κυκλικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του. Σε αυτή την διάταξη η δομή είναι πιο απλή καθώς το μόνο που χρειαζόμαστε για τον πυρήνα είναι ένα φερρομαγνητικό σύρμα, το οποίο χρησιμεύει τόσο ως μαγνητικός πυρήνας όσο και ως στοιχείο διέγερσης. Με άλλα λόγια, απλά απαλασσόμαστε από το πηνίο διέγερσης. Ωστόσο, το πεδίο διέγερσης που παράγεται από το ρεύμα που ρέει μέσω του φερρομαγνητικού σύρματος είναι πολύ μεγαλύτερο συγκριτικά με το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα τοροειδές πηνίο.



Εικόνα 36: Ορθογώνιος αισθητήρας fluxgate, με πυρήνα ribbon: Το ρεύμα ρέει μέσα από το σύρμα και δημιουργεί ένα κυκλικό πεδίο μέσα σε αυτό.

- Πυρήνας σύρματος σύνθετου υλικού: Οι ορθογώνιοι αισθητήρες fluxgate βασισμένοι σε σύρμα έγιναν αμέσως πολύ δημοφιλείς γιατί εξαλείφουν την ανάγκη για πηνίο διέγερσης, απλοποιώντας έτσι τη δομή του αισθητήρα. Ωστόσο, έχουν ένα μειονέκτημα: το κέντρο του σύρματος συνήθως δεν είναι πλήρως κορεσμένο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το περιμετρικό πεδίο H_{ϕ} που παράγεται από το ρεύμα διέγερσης δεν είναι σταθερό για κάθε απόσταση από το κέντρο του σύρματος. Σύμφωνα με τον νόμο του Ampère, το H_{ϕ} αυξάνεται γραμμικά έχοντας μηδενική τιμή στο κέντρο του σύρματος μέχρι να λάβει την μέγιστη τιμή του στην ακτίνα του σύρματος. Έτσι, στο κέντρο του πυρήνα θα υπάρχει ένα τμήμα του σύρματος που δεν είναι κορεσμένο επειδή το πεδίο διέγερσης H_{ϕ} είναι χαμηλότερο από το πεδίο που απαιτείται για να κορεστεί το υλικό του σύρματος. Επιπλέον, υπάρχει το φαινόμενο δέρματος (skin effect), το οποίο δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα στρέφεται προς τα άκρα του σύρματος, κάνοντάς το περιμετρικό πεδίο χαμηλότερο στο κέντρο. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι το skin effect, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή του εσωτερικού μη κορεσμένου τμήματος του σύρματος. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, έχει προτάθηκε η χρήση σύνθετου υλικού που αποτελείται από πυρήνα χαλκού μέσα σε περίβλημα από κράμα νικελίου-σιδήρου. Η χαμηλότερη αντίσταση του χαλκού σε σύγκριση με το κράμα καθιστά τον χαλκό πιο ευνοϊκό για τη διαδρομή του ηλεκτρικού ρεύματος, περιορίζοντας έτσι το φαινόμενο. Για αρκετά μεγάλες διεγέρσεις, το σύνθετο υλικό πρέπει να αλλάξει για να μειώσει περαιτέρω τον θόρυβο, γι' αυτό τοποθετούμε σύρμα χαλκού σε περίβλημα από γυαλί. Στη συνέχεια, η διάταξη επιχρυσώνεται και κλείνεται μέσα σε σιδηρομαγνητικό κέλυφος.



Εικόνα 37: Διαφασικό σύρμα με γυάλινη επένδυση ανάμεσα στον πυρήνα χαλκού και το φερρομαγνητικό κέλυφος

- Πυρήνας πολλαπλών συρμάτων: Ένα από τα μειονεκτήματα των ορθογώνιων αισθητήρων fluxgate που βασίζονται σε μικρό σύρμα είναι η χαμηλή ευαισθησία τους. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, έχουν προταθεί ορθογώνιοι αισθητήρες fluxgate με πυρήνα πολλαπλών σύρματα. Διαπιστώθηκε ότι η ευαισθησία αυξάνεται σχεδόν εκθετικά με τον αριθμό των σύρματων. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθούν 16 σύρματα αντί για ένα μόνο σύρμα, η ευαισθησία γίνεται 65 φορές μεγαλύτερη [28].

Κεφάλαιο 6: Πειραματικό μέρος

6.1 Σύντομη περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της τοπολογίας των αισθητήρων στην λειτουργία και την απόκρισή τους, καθώς και η ανάλυση της συμπεριφοράς και της καταλληλότητας για τον κάθε πυρήνα. Αναλυτικότερα, στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητήρων υλοποιήθηκαν τρεις διατάξεις fluxgate, παράλληλη μονού πυρήνα, ορθογωνική και race-track, ενώ οι πυρήνες που δοκιμάστηκαν είναι οι: CoFeSiB, CoSiB, FeSiB και DCST (UNITIKA). Συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Αρχικά κατασκευάστηκε η εκάστοτε διάταξη fluxgate και ύστερα την τοποθετήθηκε εντός του συστήματος πηνίων Helmholtz το οποίο τροφοδοτείται με ρεύμα γνωστής έντασης, δημιουργώντας έτσι γνωστό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα τροφοδοτείται με γνωστό σήμα από την γεννήτρια σημάτων και το πηνίο λήψης συνδέεται με τον παλμογράφο, ώστε να παρακολουθείται η τάση εξόδου. Υπολογίζεται και καταγράφεται η διαφορά τάσης εξόδου στην έξοδο του αισθητήρα, που δημιουργείται με την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για όλες τις διατάξεις των αισθητήρων και για όλους τους εξεταζόμενους πυρήνες και θα επεξηγηθεί αναλυτικότερα στο τρίτο υποκεφάλαιο.

6.2 Πειραματικός εξοπλισμός

Γεννήτρια RIGOL DG2102

Η γεννήτρια σήματος RIGOL DG2102 είναι το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σημάτων και την παροχή τους στο πηνίο διέγερσης των αισθητήρων fluxgate. Τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ήταν ημιτονοειδή, τάσης 5 Vpp, συχνοτήτων 0-700 kHz, με offset 0-2.5 Vpp. Τα σήματα της γεννήτριας μεταφέρονται στις διατάξεις μέσω ομοαξονικού καλωδίου το οποίο συνδέεται στην γεννήτρια με βύσμα BNC.



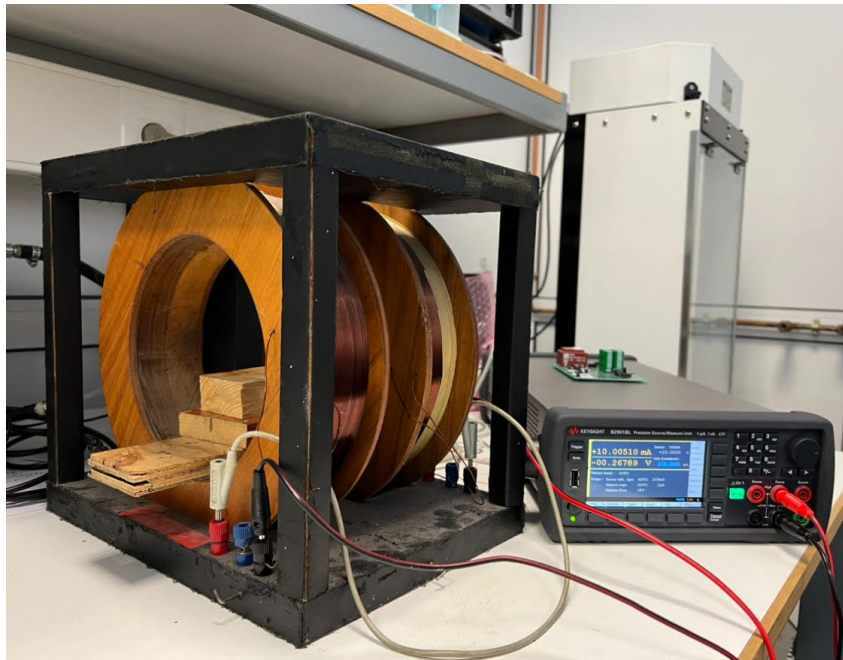
Εικόνα 38: Γεννήτρια RIGOL DG2102

Τροφοδοτικό KEYSIGHT B2901BL

Το τροφοδοτικό KEYSIGHT B2901BL χρησιμοποιήθηκε για την παροχή σταθερού ρεύματος στο σύστημα πηνίων Helmholtz, το οποίο όπως περιγράφηκε και στο θεωρητικό μέρος δημιουργεί σταθερό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο στην εσωτερικό του. Η ένταση του ρεύματος που τροφοδοτήθηκε κυμάνθηκε από μερικά microampere (μA) έως και 120 milliampere (mA), τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές τιμές.



Εικόνα 39: Τροφοδοτικό KEYSIGHT B2901BL



Εικόνα 40: Σύστημα πηνίων Helmholtz συνδεδεμένο με το τροφοδοτικό

Σύστημα πηνίων Helmholtz

Η διάταξη πηνίων Helmholtz, συνδεδεμένη με το τροφοδοτικό, απεικονίζεται στην εικόνα 40. Αποτελείται από 2 ίδια πηνία, ακτίνας $R=100\text{ mm}$, με την με μεταξύ τους απόσταση να είναι ίση $R=100\text{ mm}$ και το κάθε πηνίο να έχει $N=600$ σπείρες. Η διάταξη τροφοδοτείται με ρεύμα σταθερής έντασης I_H .

Η μαγνητική επαγωγή στο κέντρο της διάταξης είναι ίση με:

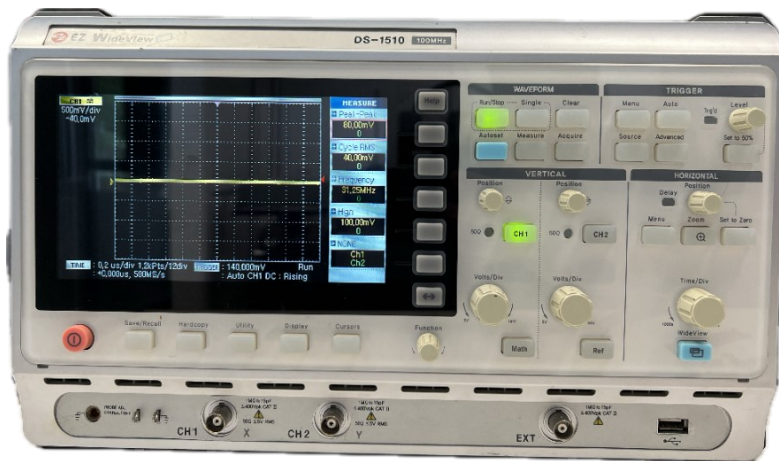
$$B = \mu_0 \frac{8NI_H}{5\sqrt{5}R} = 8,9910^{-7} \frac{NI_H}{R} \quad (6.1)$$

Άρα στην συγκεκριμένη διάταξη, αφήνοντας ως μεταβλητή την ένταση του ρεύματος, η μαγνητική επαγωγή στο κέντρο της είναι ίση με:

$$B = 5,395 \times 10^{-3} \cdot I_H \quad (6.2)$$

Παλμογράφος EZ WideView DS-1510

Ο παλμογράφος συνδέεται μέσω ομοαξονικών καλωδίων στο πηνίο λήψης της εκάστοτε διάταξης αισθητήρα fluxgate, και στην οθόνη του αποτυπώνεται το πλάτος του σήματος εξόδου της διάταξης, όπως λαμβάνεται από το πηνίο λήψης του αισθητήρα. Με την χρήση κερσόρων προσδιορίζουμε με ακρίβεια την τιμή του πλάτους V_{pp} .



Εικόνα 41: Παλμογράφος EZ WideView DS-1510

6.3 Διεξαγωγή των μετρήσεων

Αναλυτικά, ο τρόπος εργασίας είναι ως εξής: Η εκάστοτε διάταξη fluxgate τοποθετείται εντός του συστήματος πηνίων Helmholtz, το οποίο και τροφοδοτείται με ρεύμα I_H από το τροφοδοτικό, για την δημιουργία γνωστού μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. Αρχικά τροφοδοτείται με ρεύμα έντασης 50 mA, και στην συνέχεια μειώνεται σταθερά με βήμα 5 mA έως ότου το ρεύμα, άρα και το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, μηδενιστεί. Μέσω του παλμογράφου, ο οποίος έχει συνδεθεί στην έξοδο του αισθητήρα, παρακολουθείται το πλάτος εξόδου. Για κάθε βήμα μείωσης του ρεύματος, υπολογίζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου ΔV_{pp} ως εξής: Αρχικά, μετράται η τάση εξόδου του αισθητήρα όταν το τροφοδοτικό του συστήματος Helmholtz είναι απενεργοποιημένο (χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου). Στη συνέχεια, ενεργοποιείται το τροφοδοτικό και εφαρμόζεται το εκάστοτε ρεύμα στο σύστημα Helmholtz, καταγράφοντας την αντίστοιχη τάση εξόδου του αισθητήρα. Η μεταβολή της τάσης ΔV_{pp} για κάθε βήμα ρεύματος υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της τάσης εξόδου με μηδενικό ρεύμα και της τάσης εξόδου υπό την επίδραση του

συγκεκριμένου ρεύματος. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε βήμα ρεύματος, με αποτέλεσμα να καταγράφεται η ΔV_{pp} για διάφορες τιμές εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το σύστημα Helmholtz. Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, υπολογίζεται η μαγνητική επαγωγή B που αντιστοιχεί σε κάθε ρεύμα τροφοδότησης των πηνίων Helmholtz, μέσω της εξίσωσης 6.2, και κατασκευάζουμε τα διαγράμματα ΔV_{pp} - B , τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της απόδοσης της κάθε διάταξης και πυρήνα. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για κάθε διάταξη fluxgate και για τον κάθε ένα μαγνητικό πυρήνα.

Από την γεννήτρια σημάτων παρέχεται στο πηνίο διέγερσης της διάταξης ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 50 kHz, πλάτους 5 V_{pp}, offset 2,5 V.

Θα μελετηθούν τρεις διατάξεις αισθητήρων fluxgate, παράλληλη, ορθογωνική και race-track, για κάθε μία από την οποία θα δοκιμαστούν τέσσερις διαφορετικοί μαγνητικοί πυρήνες που αποτελούνται από άμορφο μαγνητικό σύρμα διαμέτρου 101 μm:

1. CoSiB: μαγνητικός πυρήνας από κράμα κοβαλτίου-πυριτίου-βορίου
2. FeSiB: μαγνητικός πυρήνας από κράμα σιδήρου-πυριτίου-βορίου.
3. CoFeSiB: μαγνητικός πυρήνας από κράμα κοβαλτίου-σιδήρου-πυριτίου-βορίου
4. DCST (UNITIKA): Directional Controlled Steel Tape

Σχετικά με τους πυρήνες, οι διαφορές τους εστιάζονται κυρίως στη μαγνητοσυστολή και την επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν. Η πρώτη δείχνει την ικανότητα ενός υλικού να αλλάζει τις διαστάσεις του υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, και συνδέεται άμεσα με τον θόρυβο. Η δεύτερη, όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος, δείχνει την ικανότητα ενός υλικού να επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο.

Όσον αφορά τους υπο εξέταση πυρήνες, γνωρίζουμε τα εξής:

- Το υλικό FeSiB, παρουσιάζει την καλύτερη θεωρητικά επιδεκτικότητα, δηλαδή μαγνητίζεται ευκολότερα από τα υπόλοιπα υλικά, αλλά έχει επίσης και την υψηλότερη μαγνητοσυστολή, γεγονός που προκαλεί σημαντικό θόρυβο στις μετρήσεις [29].
- Στο CoFeSiB, η προσθήκη κοβαλτίου μειώνει τη μαγνητοσυστολή, καθιστώντας το υλικό πιο σταθερό όσον αφορά τις μηχανικές τάσεις που προκύπτουν από τα μαγνητικά πεδία, ελαττώνοντας έτσι σημαντικά τον θόρυβο. Επίσης, και αυτό το υλικό παρουσιάζει καλή επιδεκτικότητα, αν και είναι ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή του FeSiB [30].
- Το CoSiB έχει την χαμηλότερη μαγνητοσυστολή από τα τέσσερα υλικά, γεγονός που ελαχιστοποιεί τον θόρυβο που προκαλείται από τη μηχανική παραμόρφωση. Ωστόσο, η επιδεκτικότητά του είναι επίσης αρκετά χαμηλή, καθιστώντας το λιγότερο αποδοτικό σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή μαγνητική ευαισθησία [31].

- Ο πυρήνας DCST της εταιρίας UNITIKA, είναι μαλακό μαγνητικό υλικό που χαρακτηρίζεται από υψηλή επιδεκτικότητα και χαμηλή μαγνητοσυστολή

Ξεκινώντας την πειραματική διαδικασία, πρώτα θα μελετηθεί η παράλληλη διάταξη, στην συνέχεια θα ακολουθήσει η ορθογωνική διάταξη και τέλος η διάταξη race-track. Σε όλες τις διατάξεις θα δοκιμαστούν και οι τέσσερις πυρήνες.

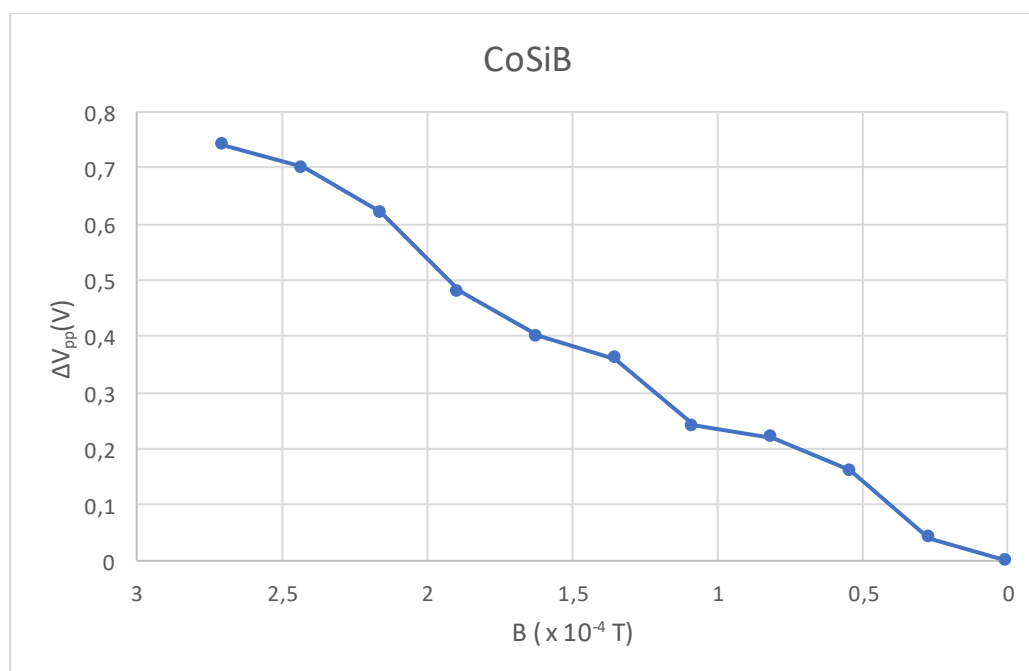
Παράλληλη διάταξη

Πρώτα, θα εξεταστεί η παράλληλη διάταξη αισθητήρα fluxgate μονού πυρήνα, η οποία απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Ο αισθητήρας περιβάλλεται εξωτερικά από δύο πηνία τα οποία είναι τυλιγμένα γύρω από έναν γυάλινο σωλήνα. Για την κατασκευή των πηνίων χρησιμοποιήθηκε γυάλινος σωλήνας μήκους 7 cm και διαμέτρου 1mm. Για την είσοδο και έξοδο του σήματος, είναι τοποθετημένες υποδοχές τύπου BNC



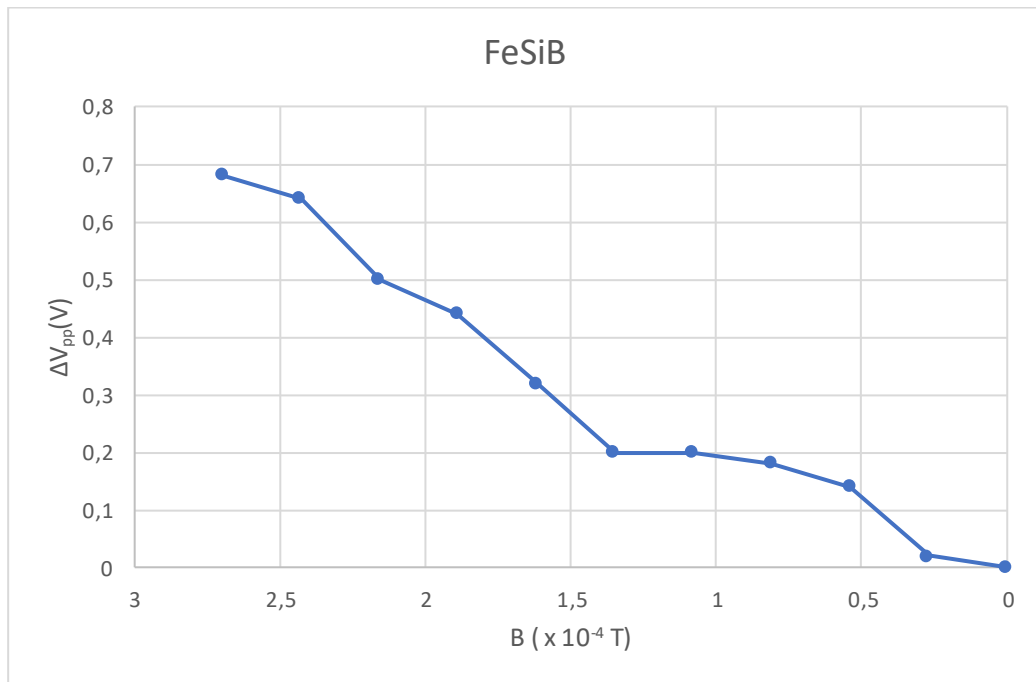
Εικόνα 42: Υλοποίηση παράλληλης διάταξης αισθητήρα fluxgate

1. Πυρήνας CoSiB:



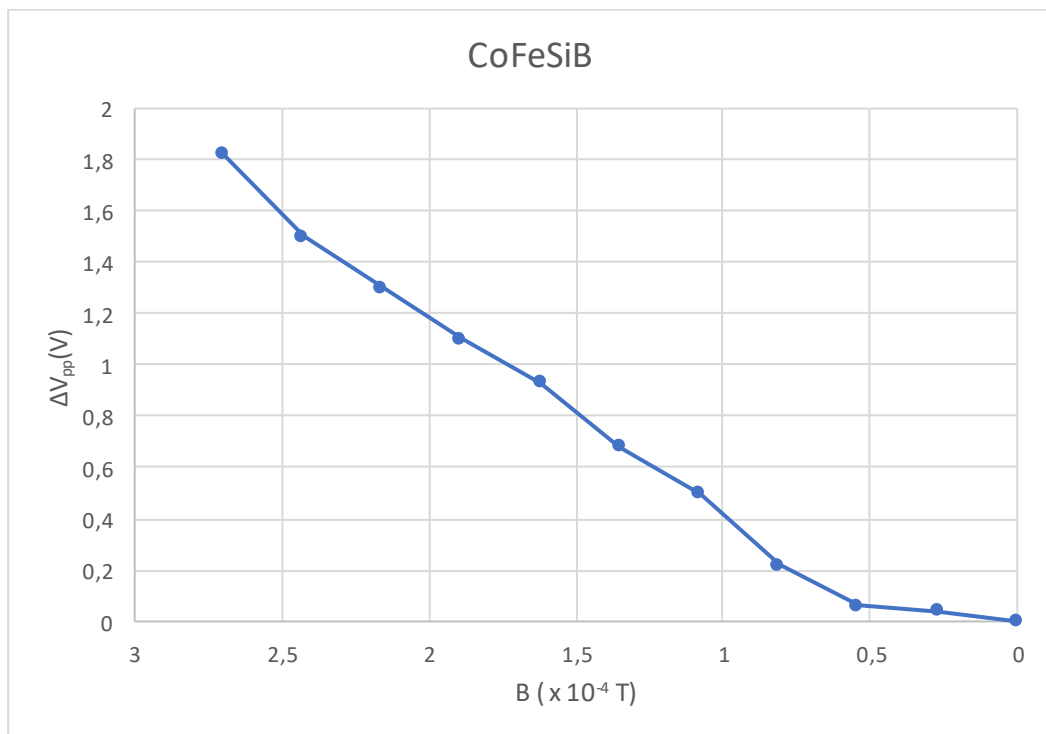
Εικόνα 43: Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα CoSiB

2. Πυρήνας FeSiB:



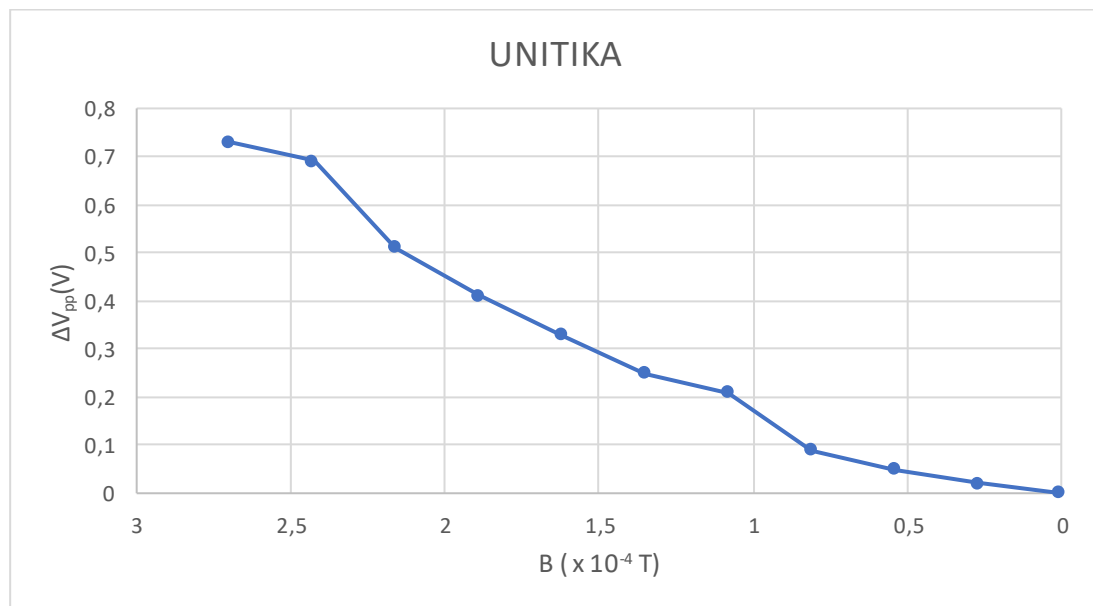
Εικόνα 44: Γράφημα ΔV - B για τον πυρήνα FeSiB

3. Πυρήνας CoFeSiB:



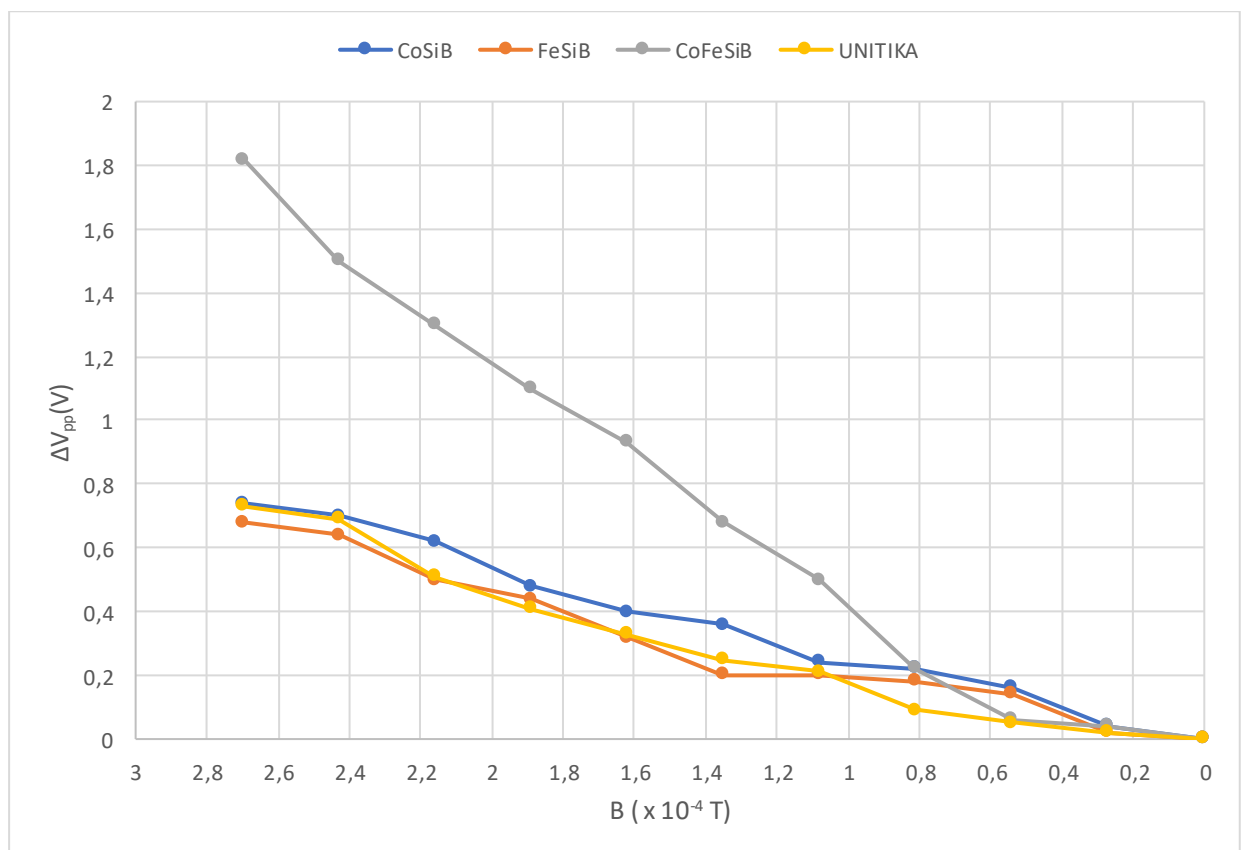
Εικόνα 45: Γράφημα ΔV - B για τον πυρήνα CoFeSiB

4. Πυρήνας 101 DCST (UNITIKA):



Εικόνα 46: Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα UNITIKA

Τέλος, οι γραφικές όλων των πυρήνων σε κοινούς άξονες



Εικόνα 47: Αποτύπωση των αποδόσεων όλων των πυρήνων σε κοινούς άξονες

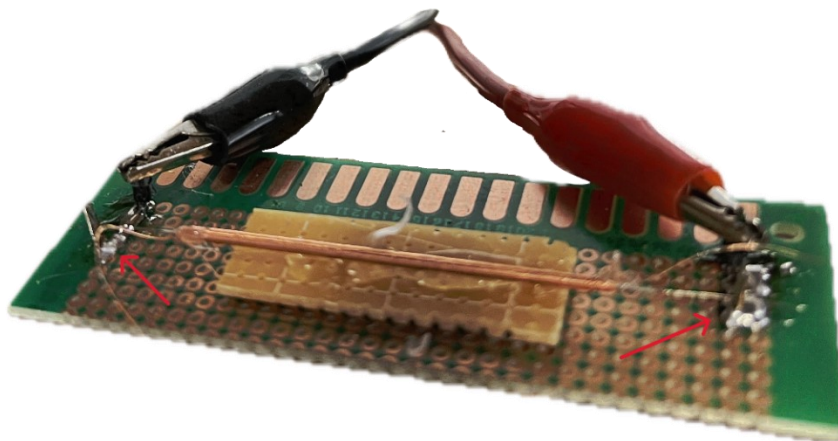
Από το κοινό γράφημα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο πυρήνας CoFeSiB παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή ΔV για υψηλό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, γεγονός που τον καθιστά τον πιο ευαίσθητο πυρήνα από αυτούς που μελετώνται. Ακόμα, φαίνεται να έχει γραμμικότερη συμπεριφορά συγκριτικά με τους άλλους 3 πυρήνες.
- Οι πυρήνες CoSiB, FeSiB και UNITIKA παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερη τιμή ΔV , περίπου υποτριπλάσια, για υψηλό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Παρατηρούμε επίσης πως η τάση ΔV μειώνεται με πιο αργό ρυθμό καθώς μειώνεται το μαγνητικό πεδίο, συγκριτικά με τον πυρήνα CoFeSiB.

Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό πως αν προτεραιότητα αποτελεί η ευαισθησία σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία, ο καταλληλότερος πυρήνας είναι ο CoFeSiB.

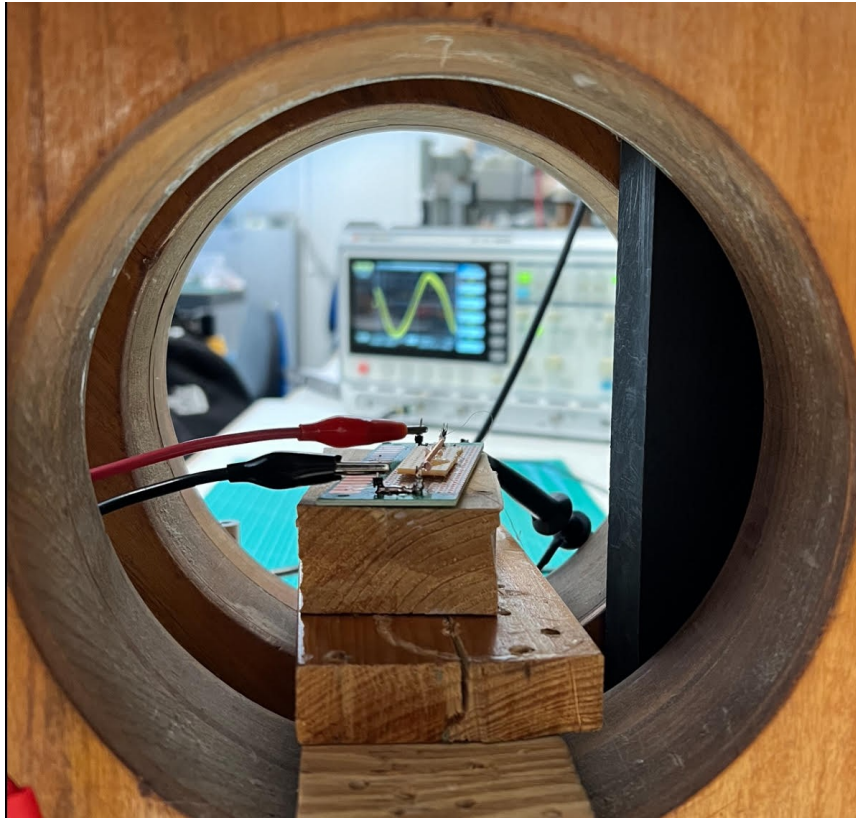
Ορθογωνική διάταξη

Στην συνέχεια, κατασκευάζεται και εξετάζεται η ορθογωνική διάταξη αισθητήρα fluxgate. Η διάταξη παρουσιάζεται παρακάτω. Για τη δημιουργία του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε γυάλινος σωλήνας μήκους 7 cm και διαμέτρου 1mm, στον οποίο τυλίχτηκαν 5 στρώσεις σύρματος χαλκού διαμέτρου 0,1mm, για την δημιουργία των πηνίων, τα άκρα των οποίων συγκρατήθηκαν με θερμοσυστελόμενο υλικό.



Εικόνα 48: Υλοποίηση ορθογωνικής διάταξης αισθητήρα fluxgate

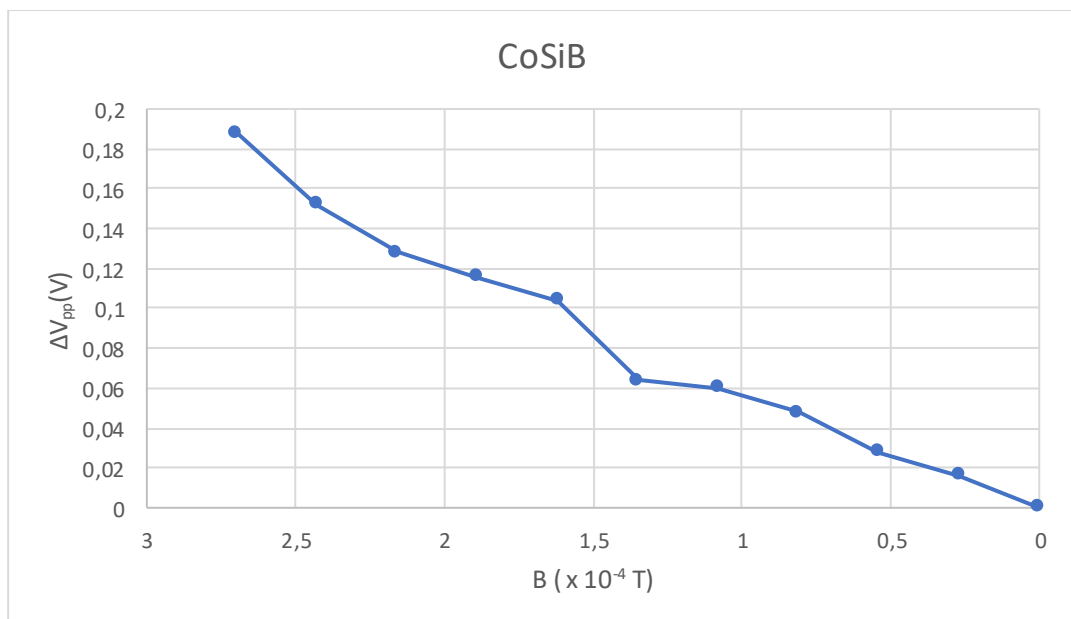
Οι άκρες του πυρήνα συγκολλήθηκαν σε αγωγίμο υλικό, στα σημεία που υποδεικνύουν τα κόκκινα βέλη, ώστε σε αυτά τα σημεία να εφαρμοστούν τα probes της γεννήτριας σημάτων και να τροφοδοηθεί το πηνίο διέγερσης. Τέλος, στις άκρες του πηνίου λήψης, έγινε συγκόλληση αγωγίμου υλικού, ώστε να τοποθετηθούν τα probes του παλμογράφου. Η διάταξη τοποθετήθηκε εντός των πηνίων Helmholtz και υπολογίστηκαν οι τιμές του ΔV .



Εικόνα 49: Ο ορθογώνιος αισθητήρας fluxgate εντός του πηνίου Helmholtz

Παράτω, παρατίθενται τα γραφήματα ΔV_{pp} -B για κάθε πυρήνα, με την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως.

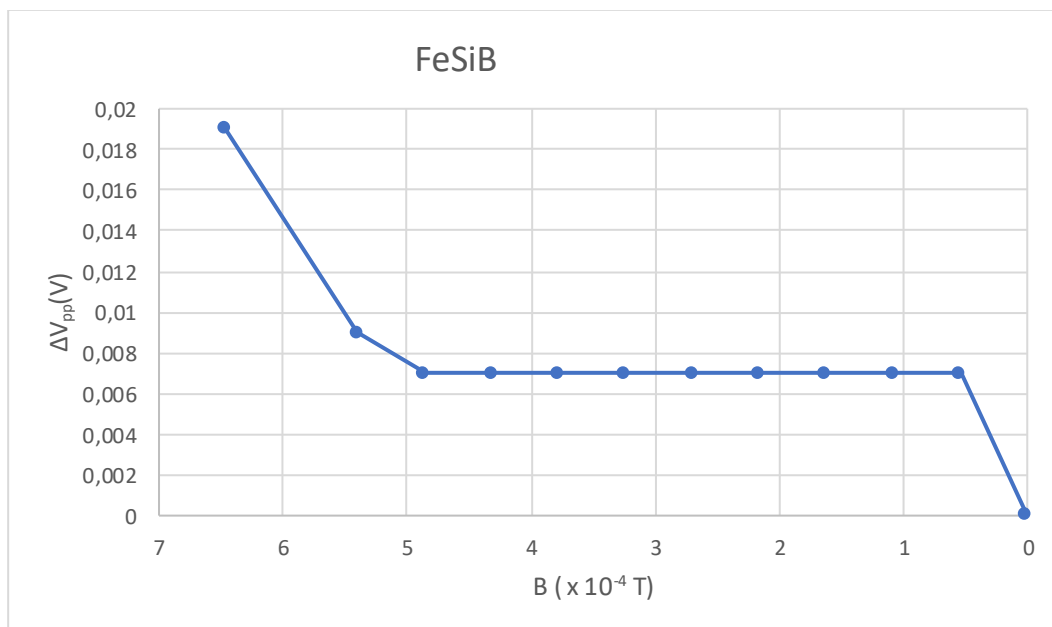
1) Πυρήνας CoSiB:



Εικόνα 50:Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα CoSiB

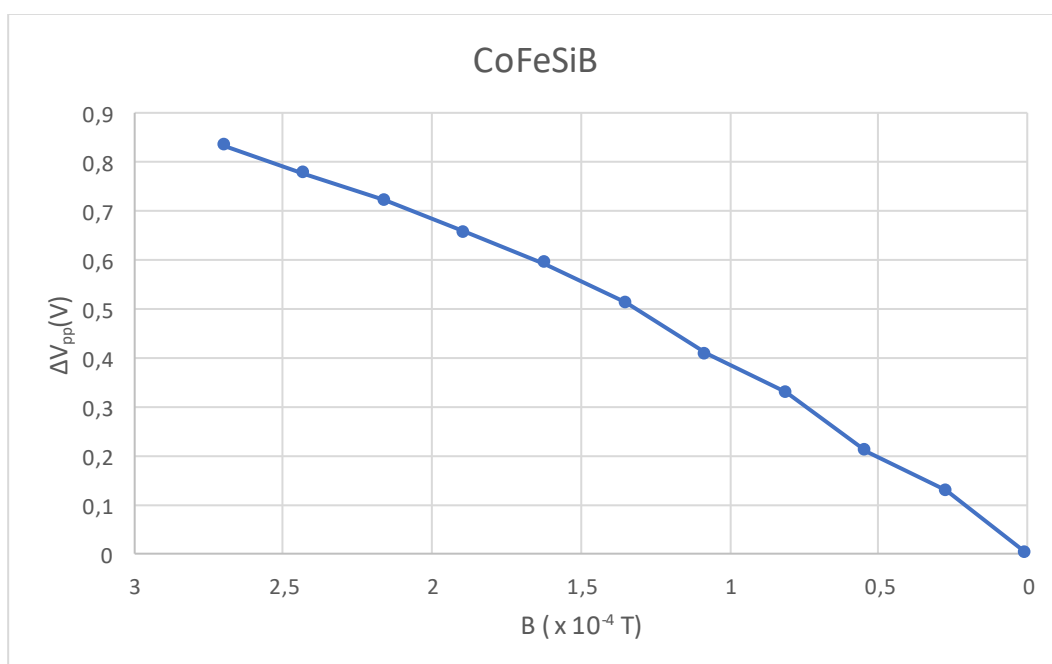
2) Πυρήνας FeSiB:

Κατά την μέτρηση για τον πυρήνα FeSiB δεν λήφθηκε καλό σήμα στα 50 kHz, οπότε η συχνότητα διέγερσης αυξήθηκε στο 1 MHz. Επίσης, μετρήθηκε και για υψηλότερες τιμές εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από το γράφημα, ο συγκεκριμένος πυρήνας σε αυτή την διάταξη παρουσιάζει ελάχιστη ευαισθησία.



Εικόνα 51: Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα FeSiB

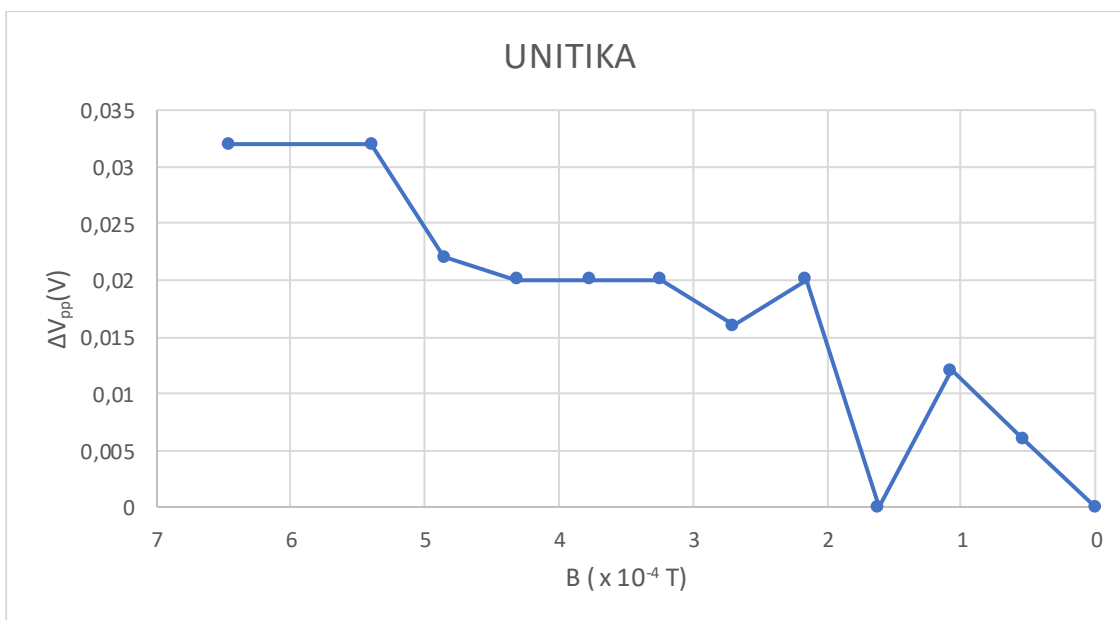
3) Πυρήνας CoFeSiB:



Εικόνα 52: Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα CoFeSiB

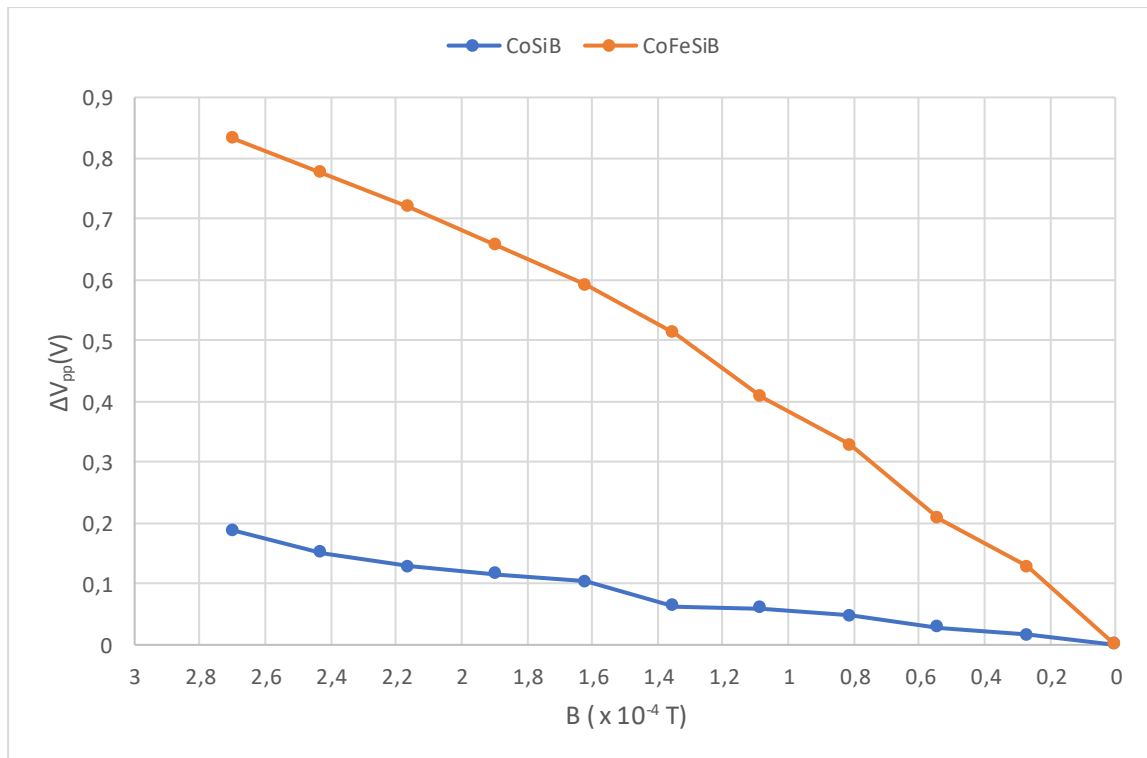
4) Πυρήνας UNITIKA:

Και σε αυτόν τον πυρήνα λήφθηκε κακό σήμα στα 50 kHz, οπότε η συχνότητα διέγερσης αυξήθηκε στο 1 MHz και επίσης έγιναν μετρήσεις και για μεγαλύτερες τιμές εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το γράφημα, και ο πυρήνας UNITIKA σε αυτή την διάταξη παρουσιάζει ελάχιστη ευαισθησία.



Εικόνα 53: Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα UNITIKA

Τέλος, παρατίθενται οι γραφικές μόνο των πυρήνων CoSiB και CoFeSiB σε κοινούς άξονες, καθώς δεν έχει νόημα να παρουσιαστούν οι άλλοι δύο πυρήνες αφού οι μετρήσεις έγιναν σε διαφορετική συχνότητα και οι διατάξεις παρουσίασαν ελάχιστη ευαισθησία.



Εικόνα 54: Γραφικές των πυρήνων CoSiB και CoFeSiB σε κοινούς άξονες

Παρατηρείται πως και στην ορθογωνική διάταξη, ο πυρήνας CoFeSiB παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευαισθησία σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία, αφού παράγει υψηλές τιμές ΔV , οι οποίες μειώνονται σταδιακά καθώς μειώνεται το εξωτερικό πεδίο, με σχετικά γραμμική συμπεριφορά.

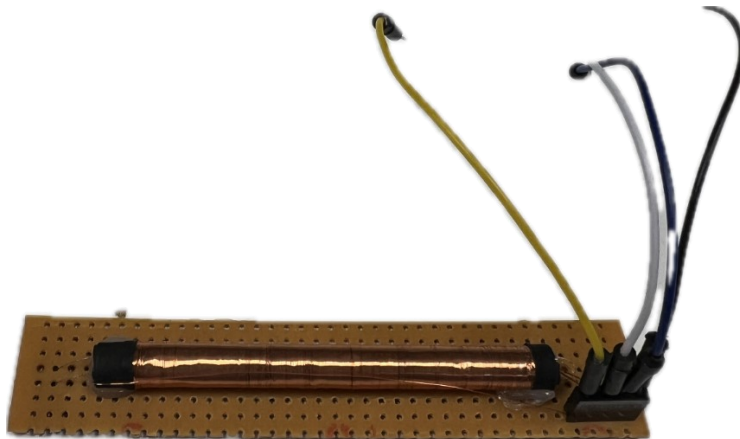
Από την άλλη, ο πυρήνας CoSiB είναι εμφανώς λιγότερο ευαίσθητος, με πολύ χαμηλότερες τιμές ΔV για όλο το εύρος των τιμών του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Η μορφή της καμπύλης του, δείχνει χαμηλότερη απόκριση στις αλλαγές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Οι πυρήνες FeSiB και UNITIKA παρουσιάζουν σαφώς ακόμα λιγότερη ευαισθησία από τον CoSiB.

Συγκριτικά με την παράλληλη διάταξη, στην ορθογωνική παρατηρούνται χαμηλότερες εναλλαγές ΔV και αυτό οφείλεται στο γεγονός απουσίας πηνίου διέγερσης και άρα το μαγνητικό σήμα που λαμβάνεται είναι ασθενέστερο. Ο πυρήνας CoFeSiB και σε αυτή την περίπτωση αποτελεί την καλύτερη επιλογή για υψηλή ευαισθησία στο εξωτερικό πεδίο, ενώ οι υπόλοιποι 3 πυρήνες είναι ακόμα λιγότερο αποδοτικοί.

Διάταξη race-track

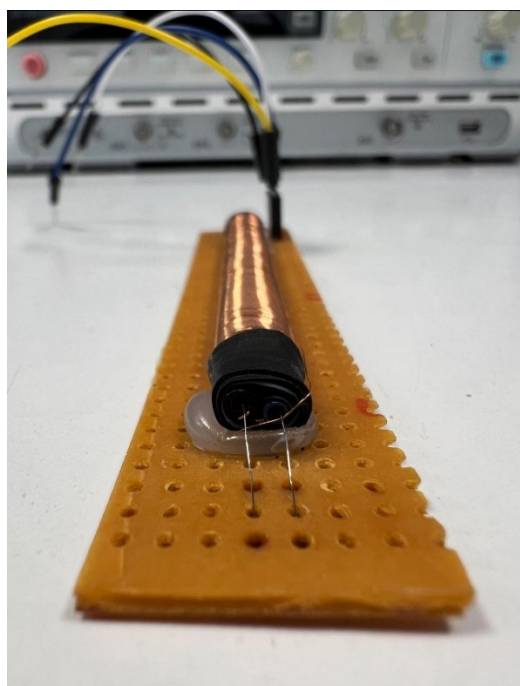
Τέλος, εξετάζουμε την περίπτωση της race-track διάταξης αισθητήρα fluxgate.



Εικόνα 55: Υλοποίηση αισθητήρα fluxgate διάταξης race-track

Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο γυάλινους σωλήνες μήκους 7 cm και διαμέτρου 1mm, στους οποίους τυλίχτηκαν 5 στρώσεις σύρματος χαλκού διαμέτρου 0,1mm, ώστε να δημιουργηθεί το πηνίο διέγερσης. Το σύστημα των δύο σωλήνων τυλίγεται εξωτερικά από σύρμα χαλκού, το οποίο αποτελεί και το πηνίο λήψης του αισθητήρα.

Ο μαγνητικός πυρήνας εισέρχεται από τον έναν γυάλινο σωλήνα και μόλις τον εξέρθει από αυτόν, με στροφή 180°, εισέρχεται στον δεύτερο σωλήνα. Ο πυρήνας, τέλος, εξέρχεται και από τον δεύτερο σωλήνα και βραχυκυκλώνεται με το άλλο του άκρο στο κάτω μέρος της πλακέτας, παίρνοντας έτσι το οβάλ σχήμα που περιγράφηκε στο θεωρητικό μέρος.



Εικόνα 56: Υλοποίηση αισθητήρα fluxgate διάταξης race-track

Η διάταξη τοποθετείται εντός του συστήματος πηνίων Helmholtz και εξετάζεται η συμπεριφορά των τεσσάρων μαγνητικών πυρήνων.

Σε αυτή την διάταξη του αισθητήρα fluxgate, δεν προστέθηκε DC offset από την γεννήτρια σημάτων όπως στις προηγούμενες διατάξεις, καθώς ο αισθητήρας δεν συμπεριφερόταν σωστά.



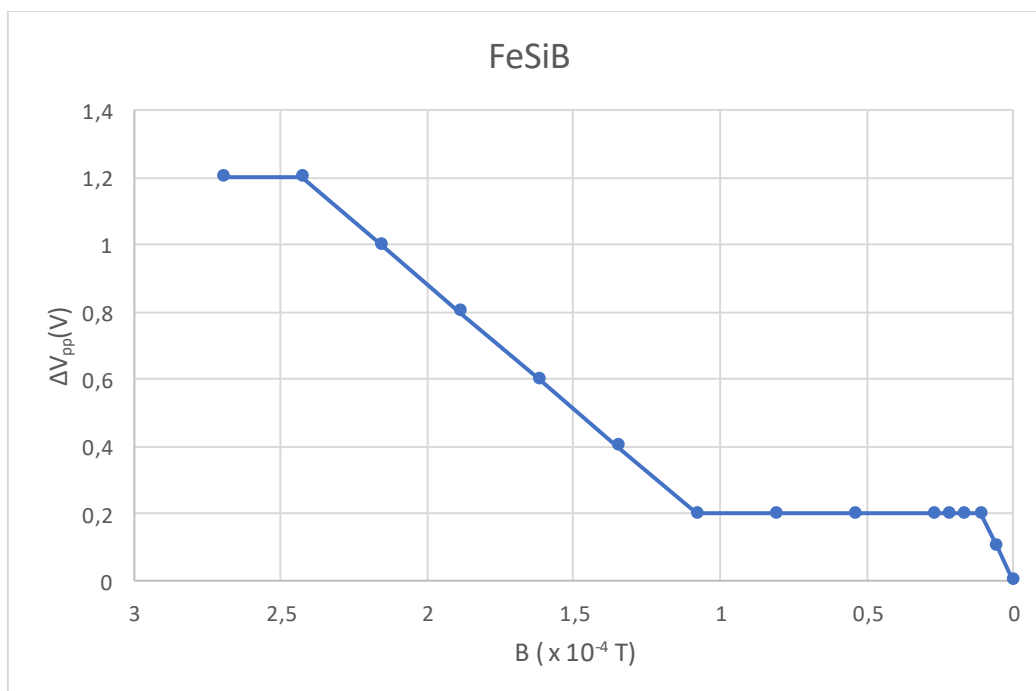
Εικόνα 57: Ο race-track αισθητήρας fluxgate εντός του πηνίου Helmholtz

1. Πυρήνας CoSiB



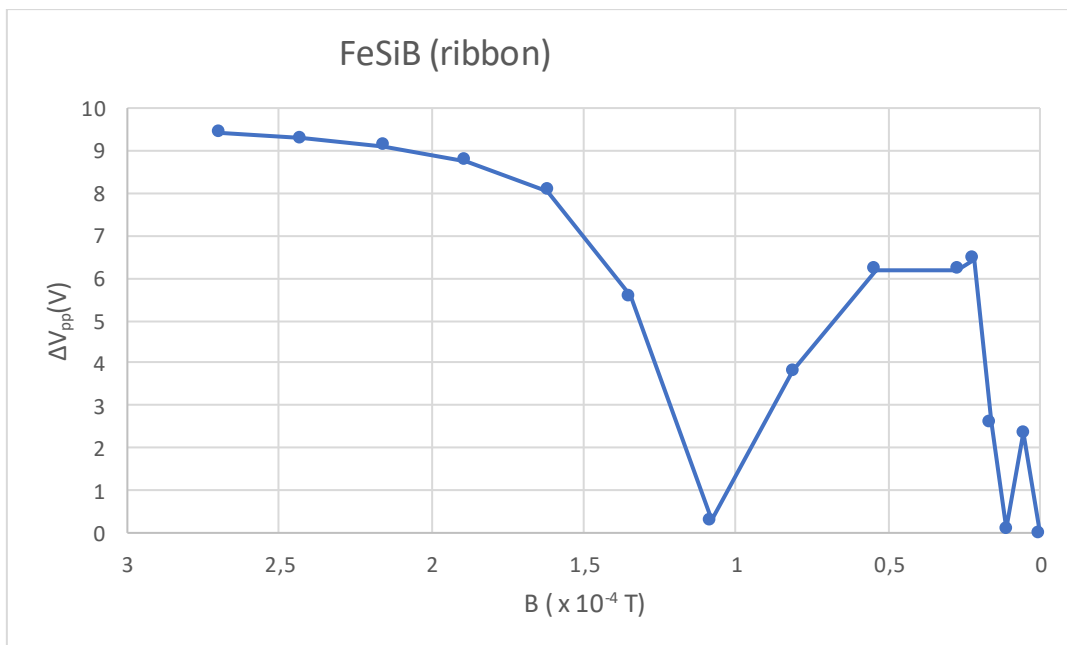
Εικόνα 58: Γράφημα ΔV - B για τον πυρήνα CoSiB

2. Πυρήνας FeSiB



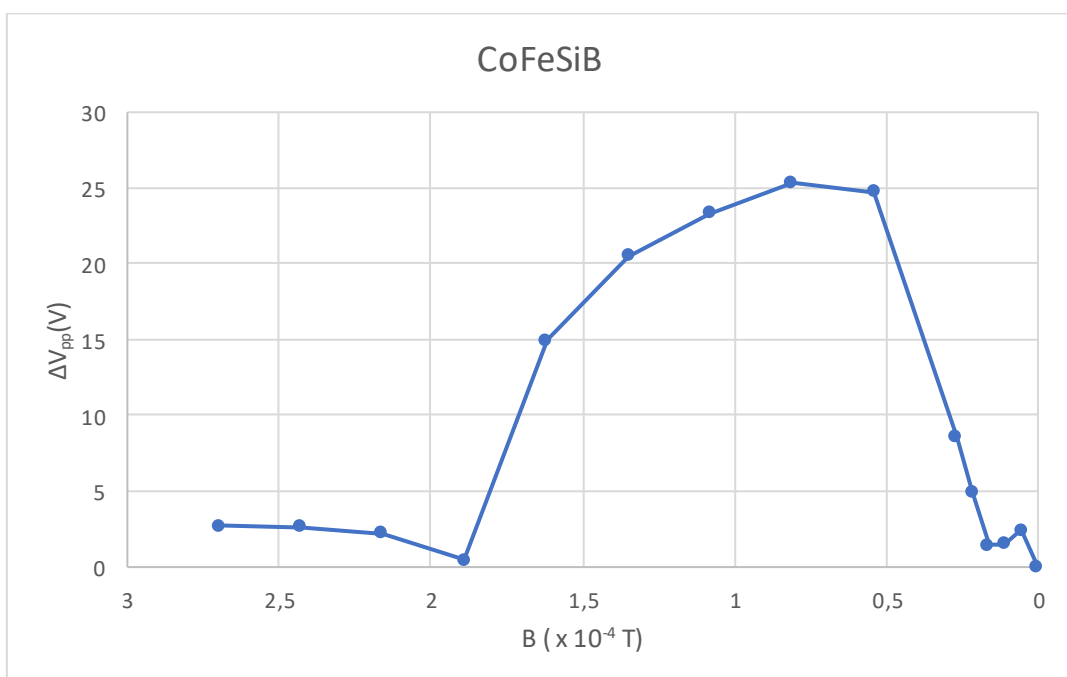
Εικόνα 59: Γράφημα ΔV - B για τον πυρήνα FeSiB

Ο πυρήνας FeSiB δοκιμάστηκε και στην μορφή ribbon



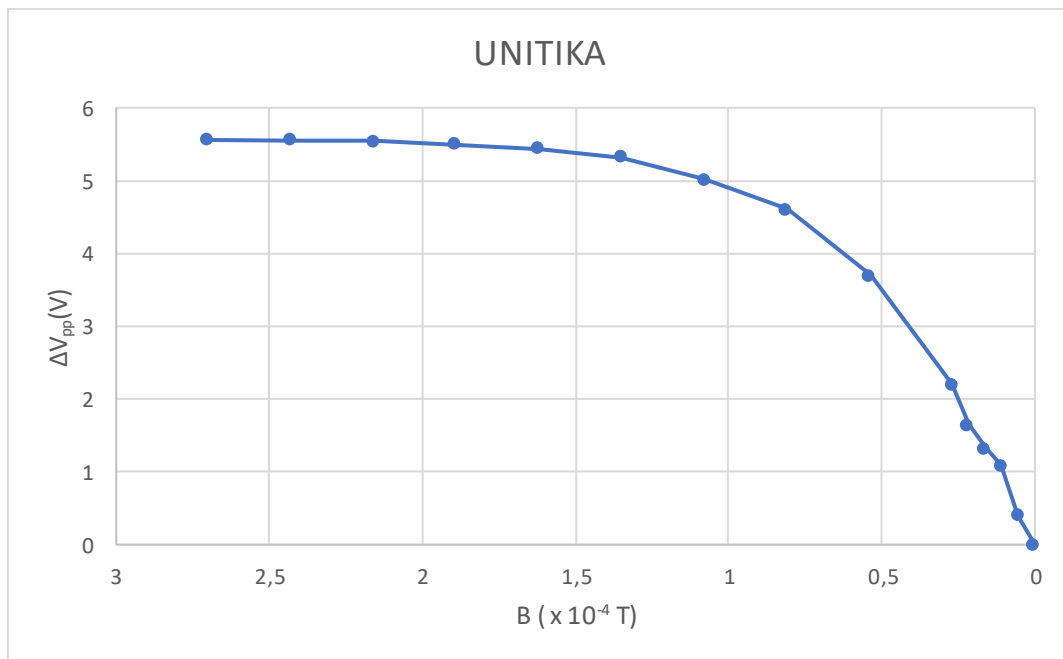
Εικόνα 60: Γράφημα ΔV - B για τον πυρήνα CoFeSiB σε μορφή ribbon

3. Πυρήνας CoFeSiB



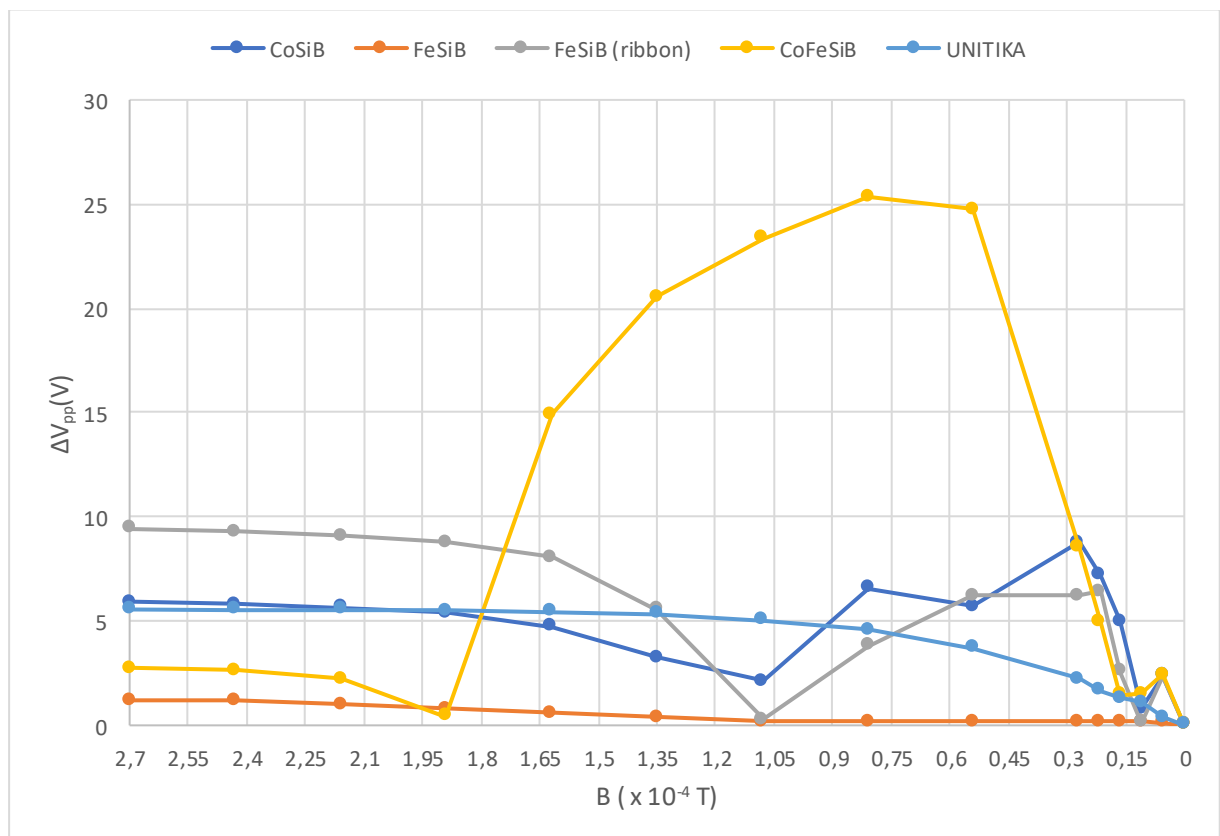
Εικόνα 61: Γράφημα ΔV - B για τον πυρήνα CoFeSiB

4. Πυρήνας UNITIKA



Εικόνα 62: Γράφημα ΔV-B για τον πυρήνα UNITIKA

Και τέλος η συμπεριφορά των πυρήνων σε κοινό γράφημα



Εικόνα 63: Αποτύπωση των αποδόσεων όλων των πυρήνων σε κοινούς άξονες

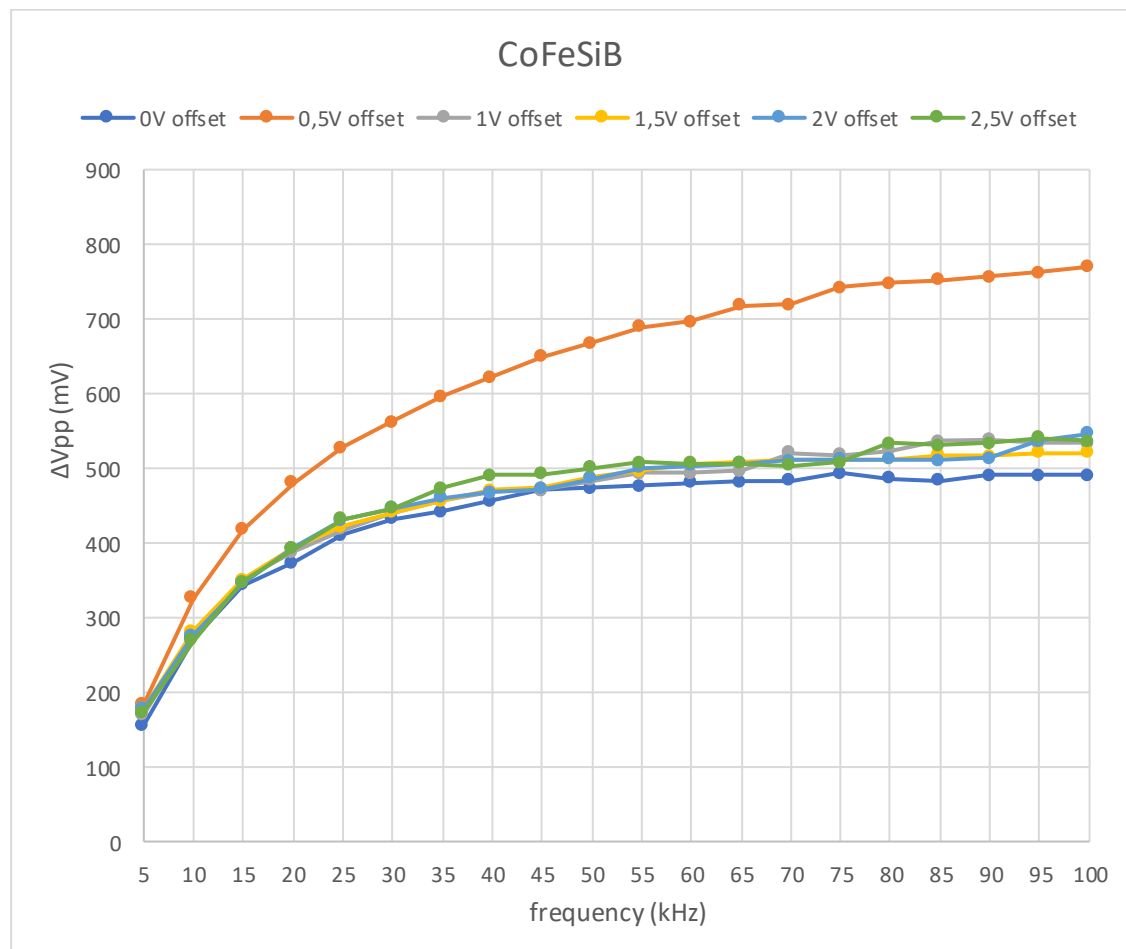
Από το κοινό γράφημα των πυρήνων, εξάγονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Ο πυρήνας CoFeSiB παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές ΔV , σε σχέση με τους άλλους πυρήνες, για συγκεκριμένο όμως εύρος τιμών του επιβαλλόμενου πεδίου (περίπου 28-170 μT). Περίπου στα 15 μT παρατηρούμε απότομη αύξηση του ΔV , έως ότου φτάσει την μέγιστη τιμή του στα 80,9 mT ίση με $\Delta V_{pp_{\max}} = 25,35 \text{ V}$. Στην συνέχεια, αρχικά μειώνεται με αργό ρυθμό ως τα 135 μT , και ύστερα μειώνεται απότομα και διατηρείται σε πολύ χαμηλές τιμές για μεγαλύτερες τιμές ρεύματος.
- Οι πυρήνες FeSiB μορφής ribbon και CoSiB παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά μεταξύ τους, αλλά αντίστροφη, θα μπορούσαμε να πούμε, από αυτή του CoFeSiB. Συγκεκριμένα περίπου στα 26,9 μT οι δύο πυρήνες έχουν αρκετά υψηλό ΔV , το οποίο μειώνεται απότομα μέχρι τα 105 μT και ακολούθως αυξάνεται απότομα μέχρι τα 163 μT όπου και σταθεροποιείται. Από τους δύο, ο πυρήνας FeSiB μορφής ribbon έχει διπλάσιες περίπου τιμές ΔV , από τον CoSiB, μετά από τα 163 μT όπου και το ΔV σταθεροποιείται.
- Για τον πυρήνα UNITIKA παρατηρούμε πως για χαμηλό εξωτερικό πεδίο παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία, η οποία όμως αυξάνεται καθώς αυξάνεται το εξωτερικό πεδίο. Οι τιμές του ΔV προσεγγίζουν τις τιμές ΔV του πυρήνα CoSiB, για ρεύμα μεγαλύτερο από 163 μT . Τέλος από το γράφημα γίνεται αντιληπτό ότι η ευαισθησία του πυρήνα UNITIKA αυξάνεται με ομαλό τρόπο σε σχέση με όλους τους άλλους πυρήνες.
- Ο πυρήνας FeSiB παρουσιάζει την τη χαμηλότερη ευαισθησία από όλους, με το ΔV να διατηρείται κάτω από τα 2V σε όλες τις τιμές του B και δεν εμφανίζει μεγάλη αλλαγή με την αύξηση του ρεύματος. Είναι προφανές ότι ο πυρήνας FeSiB μορφής ribbon έχει πολύ καλύτερη απόδοση.

Συνοψίζοντας, στην διάταξη race-track, ο πυρήνας CoFeSiB, εμφανίζει εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία σε μεσαία επίπεδα εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι πυρήνες FeSiB ribbon, CoSiB και UNITIKA παρουσιάζουν εμφανώς μικρότερη ευαισθησία η οποία όμως παραμένει σταθερή για τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου άνω των 163 μT και τέλος ο πυρήνας FeSiB έχει την χαμηλότερη ευαισθησία από όλους.

Στην συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, θα μελετηθεί περαιτέρω η συμπεριφορά του πυρήνα CoFeSiB στην ορθογωνική διάταξη fluxgate, για εύρος συχνοτήτων διέγερσης και για διάφορες τιμές DC offset της γεννήτριας σημάτων, υπό σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί για συχνότητες διέγερσης έως 100 kHz με βήμα 5 kHz και για offset από 0V έως 2,5V, με βήμα 0,5 V. Από το σύστημα πηνίων Helmholtz επιβάλλεται στην διάταξη σταθερό μαγνητικό πεδίο έντασης $0,539 \times 10^{-4}$ T (53.9 μ T). Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί πως οι μετρήσεις που παίρνονται δεν εντάσσονται στη σφαίρα της συμπεριφοράς των αισθητήρων fluxgate, καθώς ανεβάζοντας αρκετά την συχνότητα διέγερσης, ξεφεύγουμε από την λειτουργία fluxgate.

Ο λόγος που επιλέχθηκε να εξεταστεί περαιτέρω η ορθογωνική τοπολογία fluxgate είναι ότι παρατηρήθηκε μια αυξητική πορεία στην απόδοση και ευαισθησία του αισθητήρα καθώς αυξανόταν η συχνότητα. Αυτό ξεπερνάει τα όρια της λειτουργία ενός fluxgate και εισέρχεται στα φαινόμενα της μαγνητοεμπέδησης. Ωστόσο εδώ ελέγχθηκε μόνο η συχνотική απόκριση του αισθητήρα σε σχέση με εξωτερικό πεδίο και όχι η σχέση της συχνότητας με την εμπέδηση του υλικού



Εικόνα 64: Εξέταση συμπεριφοράς του πυρήνα CoFeSiB στην ορθογωνική διάταξη αισθητήρα fluxgate,, για διάφορες συχνότητες διέγερσης και διάφορες τιμές DC offset, υπό σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

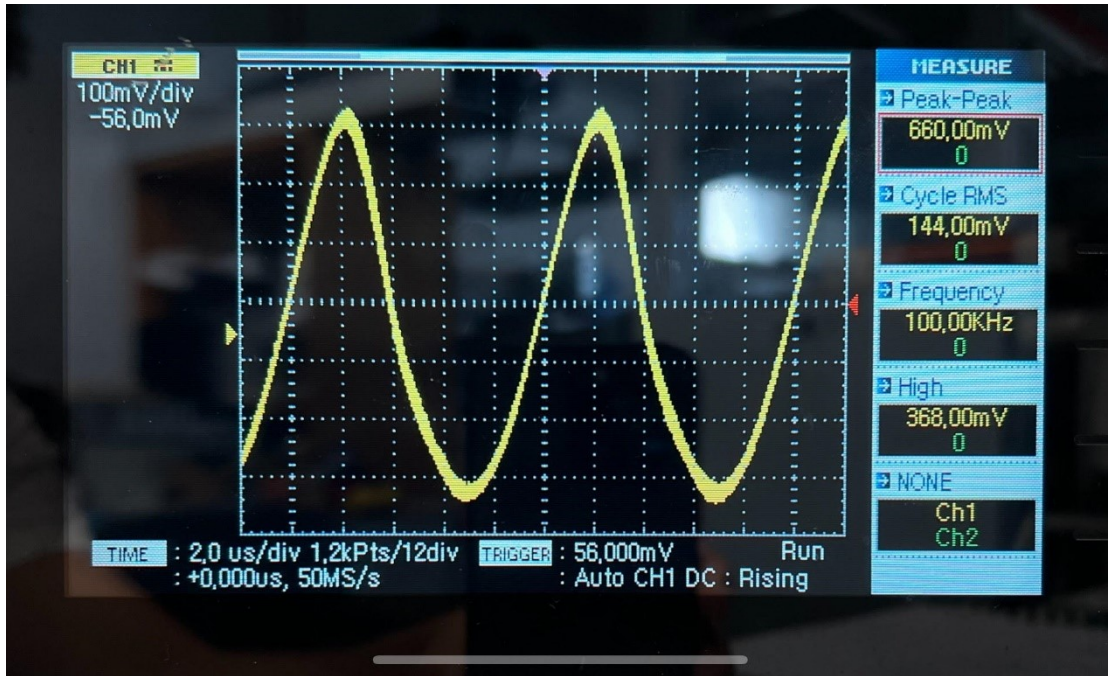
Από το παραπάνω γράφημα μπορεί να παρατηρηθεί πως η εφαρμογή ενός μικρού DC offset (0,5V) βελτιώνει την απόκριση του πυρήνα, αυξάνοντας την τάση ΔV_{pp} . Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές offset (πάνω από 1V), η απόδοση μειώνεται ελαφρώς, υποδηλώνοντας ότι η υπερβολική τάση offset δεν προσφέρει πρόσθετα οφέλη.

Σε συνέχεια της προηγούμενης μέτρησης, θα εξεταστεί η ίδια διάταξη για ακόμα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, από 50 έως 700 kHz. Ορίζουμε σταθερό DC offset ίσο με 0,5 V, καθώς όπως διαπιστώθηκε προηγουμένως, αυτή η τιμή προσφέρει την καλύτερη απόδοση για τον αισθητήρα. Εξακολουθείται να παρέχεται στο πηνίο Helmholtz ρεύμα έντασης 10 mA, δημιουργώντας σταθερό μαγνητικό πεδίο έντασης $0,539 \times 10^{-4}$ T. Σκοπός της μέτρησης αυτής είναι να εξακριβωθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του αισθητήρα.

Παρατίθενται ενδεικτικά δύο στιγμιότυπα κατά την διαδικασία των μετρήσεων. Πρόκειται για την μέτρηση με σήμα διέγερσης συχνότητας 100 kHz. Στην εικόνα 65 παρατηρείται το σήμα της τάσης εξόδου V_{pp} του αισθητήρα, χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στην εικόνα 66 φαίνεται το σήμα της τάσης εξόδου του αισθητήρα, όταν το σύστημα πηνίων Helmholtz έχει τροφοδοτηθεί με σταθερό ρεύμα έντασης 10 mA, προκαλώντας μαγνητικό πεδίο έντασης 53,9 μ T στο κέντρο του. Αφαιρώντας τα δύο αυτά πλάτη, προκύπτει η τιμή του ΔV_{pp} .

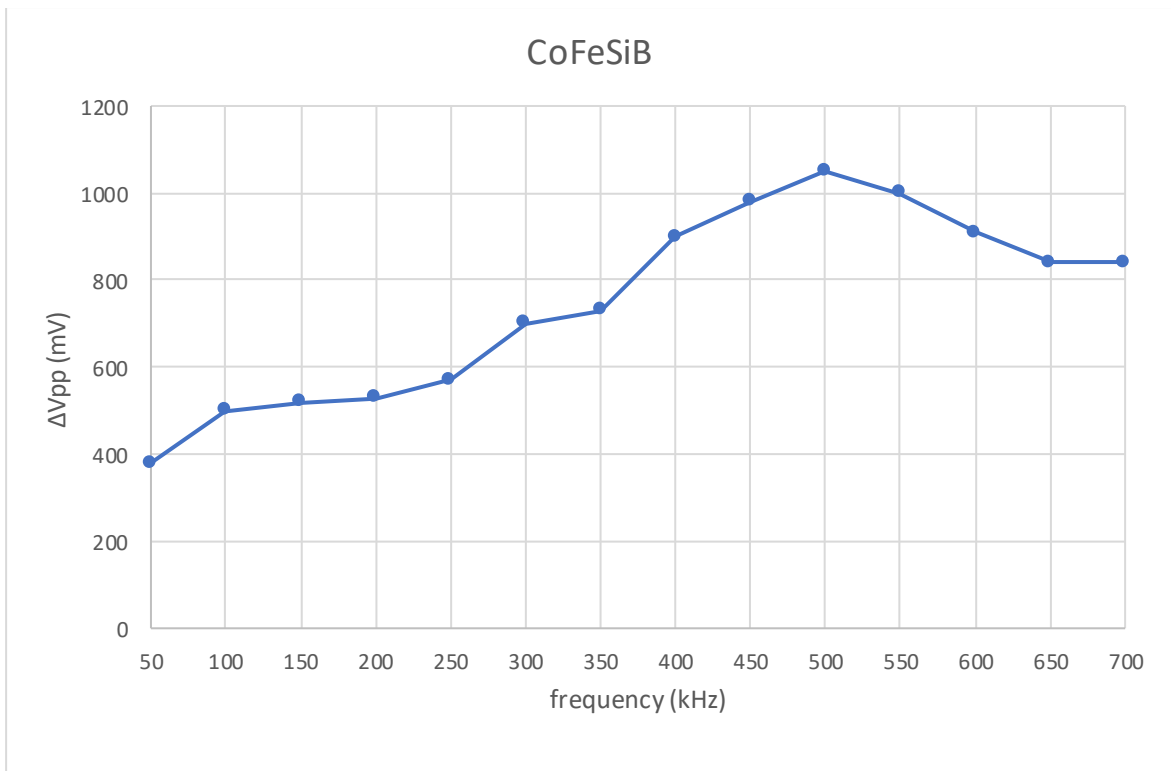


Εικόνα 65: Κυματομορφή τάσης εξόδου V_{pp} του αισθητήρα, με συχνότητα διέγερσης 100 kHz, χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου



Εικόνα 66: Κυματομορφή τάσης εξόδου V_{pp} του αισθητήρα, με συχνότητα διέγερσης 100 kHz, υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

Εκτελώντας αυτή την διαδικασία για όλο το εύρος των συχνοτήτων που αναφέρθηκε προηγουμένως, δημιουργείται το διάγραμμα διαφοράς πλάτους συναρτήσει της συχνότητας, $\Delta V_{pp}-f$



Εικόνα 67: Μελέτη συμπεριφοράς πυρήνα CoFeSiB για μεγάλο εύρος συχνοτήτων, με σταθερό DC offset 0,5V, υπό σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο

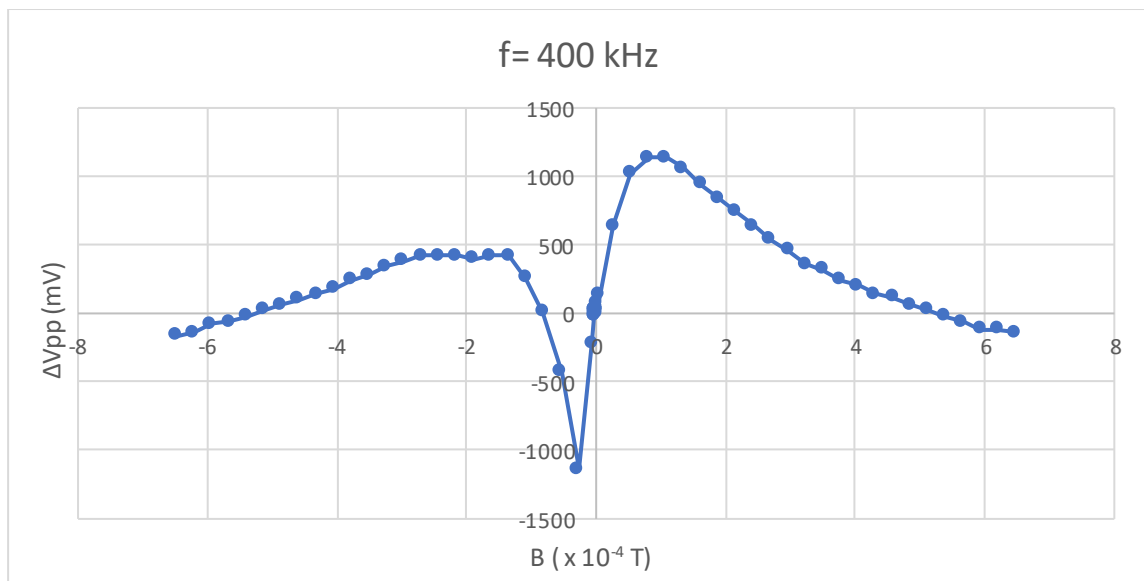
Από την ανάλυση του γραφήματος προκύπτει πως η τιμή του ΔV_{pp} αυξάνεται σταθερά από τις χαμηλότερες συχνότητες έως περίπου τα 450-500 kHz, όπου και φτάνει την μέγιστη τιμή του, αποτελώντας το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του αισθητήρα. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 500 kHz, η τάση εξόδου σταδιακά μειώνεται και η απόδοση του αισθητήρα πέφτει.

Συμπερασματικά, λοιπόν, για τον πυρήνα CoFeSiB, οι συχνότητες διέγερσης στην περιοχή των 450-500 kHz φαίνεται να παρέχουν τη μέγιστη απόδοση, με το DC offset των 0,5 V να συνεχίζει να εξασφαλίζει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Ολοκληρώνοντας την πειραματική διαδικασία, για τον μαγνητικό πυρήνα CoFeSiB, στην ορθογωνική διάταξη αισθητήρα fluxgate, θα παραχθούν και θα μελετηθούν τα διαγράμματα ΔV -B, για μεγαλύτερο εύρος τιμών του B, τόσο θετικών όσο και αρνητικών. Αυτό το διάγραμμα αποτυπώνει την ηλεκτρική απόκριση του αισθητήρα fluxgate σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Μέσω αυτού, μπορούν να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με τη γραμμικότητα, την ευαισθησία, και τα όρια του αισθητήρα, καθώς και να αναγνωριστούν σημεία κορεσμού ή μη γραμμικής συμπεριφοράς.

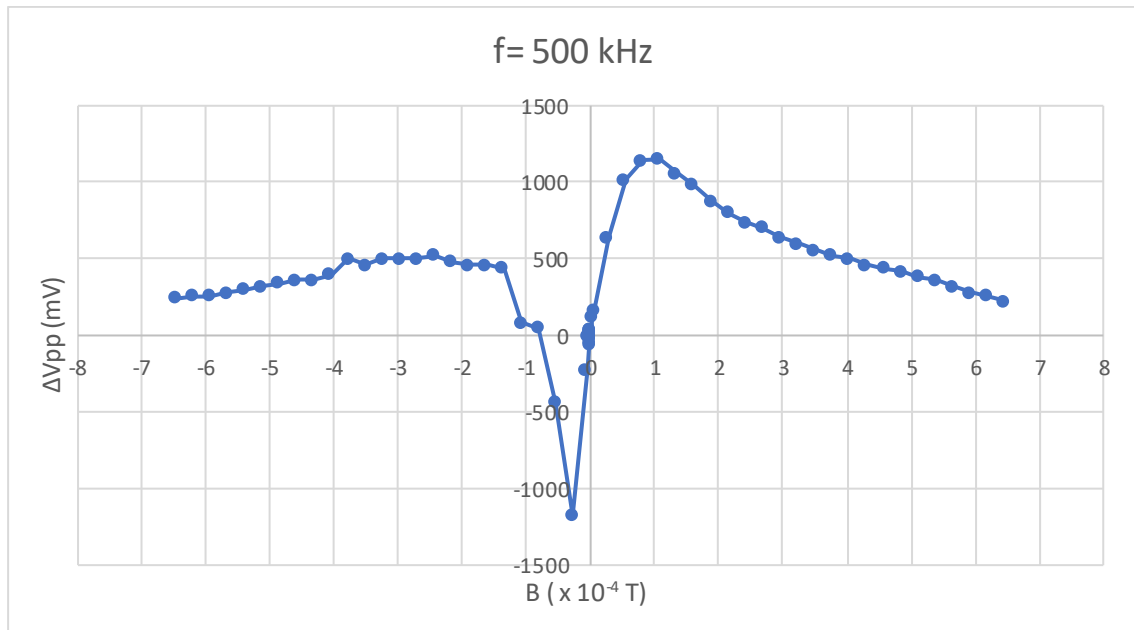
Τα διαγράμματα θα εξεταστούν για συχνότητες διέγερσης 400, 500, και 600 kHz, δηλαδή για αυτές τις συχνότητες που, όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως, ο αισθητήρας “πιάνει” την καλύτερη απόδοση. Σκοπός είναι να συγκριθεί η απόκριση του αισθητήρα σε αυτές τις συχνότητες και να μελετηθεί η συμπεριφορά του ΔV_{pp} σε συνάρτηση με την ένταση του επιβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Αρχικά για συχνότητα $f = 400$ kHz:



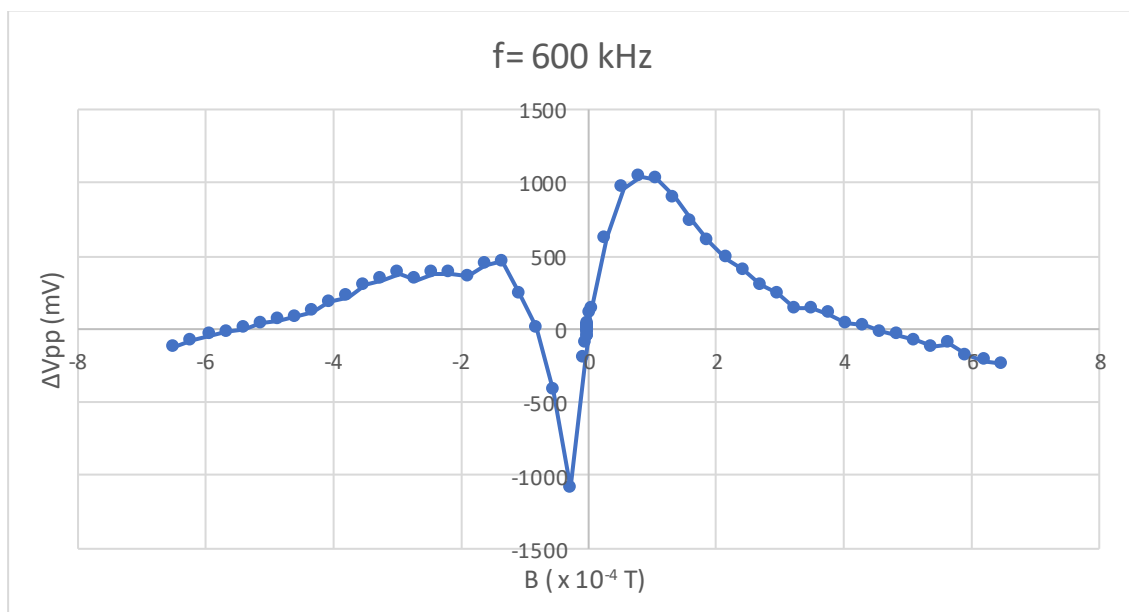
Εικόνα 68: Διάγραμμα ΔV -B για συχνότητα διέγερσης 400 kHz

Στην συνέχεια για τα 500 kHz, όπου αποτελεί και το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του αισθητήρα:



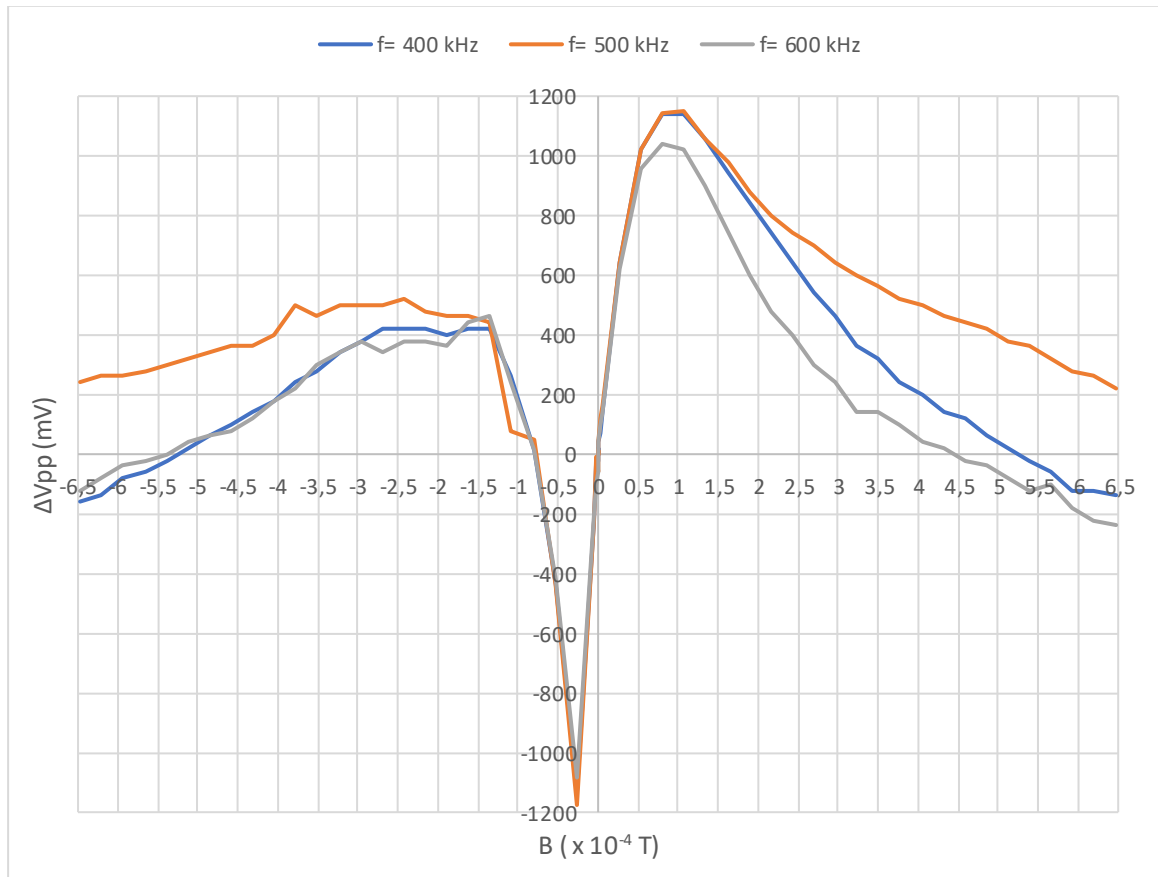
Εικόνα 69: Διάγραμμα ΔV - B για συχνότητα διέγερσης 500 kHz

Και για συχνότητα $f = 600$ kHz:



Εικόνα 70: Διάγραμμα ΔV - B για συχνότητα διέγερσης 400 kHz

Τέλος, παρατίθενται τα διαγράμματα ΔV - B των συχνοτήτων που εξετάστηκαν, σε κοινούς άξονες:



Εικόνα 71: Τα διαγράμματα ΔV - B , σε κοινούς άξονες

Από το παρουσιαζόμενο γράφημα, καταγράφονται τα εξής συμπεράσματα για τον αισθητήρα και τον πυρήνα:

1. Μέγιστη Απόδοση του Αισθητήρα

Η καμπύλη για τα 500 kHz παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, αφού φτάνει τη μεγαλύτερη κορυφή τάσης, υποδεικνύοντας πως σε αυτή τη συχνότητα ο αισθητήρας λειτουργεί με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για τη συγκεκριμένη διάταξη. Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην συχνότητα διέγερσης 600 kHz έχει μικρότερη απόκριση (μικρότερη κορυφή τάσης) συγκριτικά με αυτή των 500 kHz, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση της συχνότητας πέρα από ένα σημείο μειώνει την ευαισθησία του αισθητήρα. Αντίστοιχα, η καμπύλη των 400 kHz παρουσιάζει μικρότερη απόκριση, δείχνοντας ότι σε χαμηλότερες συχνότητες η ευαισθησία επίσης μειώνεται.

Παρατηρείται επίσης, πως για υψηλότερες τιμές επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και οι τρεις καμπύλες εξομαλύνονται, όμως η καμπύλη των 500 kHz διατηρεί υψηλότερες τιμές τάσης από τις άλλες δύο, δείχνοντας ότι η συχνότητα αυτή είναι πιο αποδοτική σε μεγαλύτερες εντάσεις εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

2. Συμμετρική Συμπεριφορά γύρω από το $B = 0$ T

Το διάγραμμα είναι συμμετρικό γύρω από το $B = 0$ T, κάτι που υποδεικνύει την αμφίδρομη ευαισθησία του αισθητήρα σε θετικά και αρνητικά μαγνητικά πεδία.

3. Κορεσμός του Μαγνητικού Πυρήνα

Στις ακραίες τιμές του B (τόσο σε θετικές όσο και σε αρνητικές τιμές), παρατηρείται μείωση του ΔV_{pp} . Αυτή η μείωση μπορεί να συνδέεται με τον κορεσμό του μαγνητικού πυρήνα, όπου το υλικό δεν μπορεί να αυξήσει περαιτέρω την μαγνητική ροή του παρά την αύξηση του εξωτερικού πεδίου. Η μείωση αυτή είναι πιο αισθητή στη συχνότητα των 500 kHz, η οποία δείχνει ότι το μέγιστο πεδίο συμβαίνει νωρίτερα συγκριτικά με τις άλλες συχνότητες.

4. Γραμμική Περιοχή Λειτουργίας

Στο διάγραμμα παρατηρείται μια γραμμική περιοχή απόδοσης, όπου το ΔV_{pp} αυξάνεται ή μειώνεται σταθερά με την αύξηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (περίπου στο διάστημα -50 έως 50 μ T). Αυτή η περιοχή αντιπροσωπεύει την πιο αξιόπιστη ζώνη λειτουργίας του αισθητήρα, όπου η τάση εξόδου ανταποκρίνεται γραμμικά στο εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

6.4 Συμπεράσματα

Σχετικά με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για πυρήνες, από τα πειράματα που διεξήχθησαν, το υλικό CoFeSiB αποδείχθηκε το πιο κατάλληλο για μαγνητομετρία στις γεωμετρίες που χρησιμοποιήθηκαν. Ανεξαρτήτως την διάταξη fluxgate στην οποία δοκιμάστηκε, το CoFeSiB εμφάνισε την υψηλότερη ευαισθησία και την πιο γραμμική συμπεριφορά. Αντίθετα, τα υπόλοιπα υλικά, FeSiB , CoSiB και DCST UNITIKA, παρουσίασαν χαμηλότερη ευαισθησία και απόκριση. Το FeSiB συγκεκριμένα, αποδείχθηκε να έχει την χειρότερη απόδοση από τους υπό εξέταση πυρήνες, εμφανίζοντας ελάχιστη ευαισθησία. Παρόλο που θεωρητικά έχει την καλύτερη επιδεκτικότητα, η αυξημένη μαγνητοσυστολή του προκαλεί θόρυβο και παραμορφώσεις στο μαγνητικό πεδίο, μειώνοντας έτσι την απόδοση του πυρήνα. Γι' αυτό τα υλικά με λιγότερη μαγνητοσυστολή, όπως το CoFeSiB , τείνουν να έχουν καλύτερες επιδόσεις σε τέτοιες εφαρμογές, παρά την ελαφρώς χαμηλότερη επιδεκτικότητα, λόγω του ότι παράγουν πιο καθαρά και σταθερά σήματα.

Όσον αφορά τις διατάξεις fluxgate που εξετάστηκαν, η ορθογωνική διάταξη προσέφερε ένα διευρυμένο εύρος λειτουργίας, συνδυάζοντας φαινόμενα μαγνητομετρίας όπως το fluxgate, τη μαγνητοεμπέδηση (MI) ή/και την γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση (GMI), καθιστώντας την ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα για περαιτέρω μελέτη. Η racetrack διάταξη, ενώ έδωσε καλά αποτελέσματα, έδειξε ότι τα άμορφα wire δεν αποτελούν τον ιδανικό πυρήνα, καθώς συνήθως χρησιμοποιούνται ribbon για τέτοιες εφαρμογές.

6.5 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Για μελλοντικές μελέτες, προτείνεται η περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς των πυρήνων σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων και μαγνητικών πεδίων. Επιπλέον, η αντικατάσταση των άμορφων wire με ribbon στην racetrack διάταξη μπορεί να προσφέρει βελτιωμένα αποτελέσματα. Επίσης, η διερεύνηση συνδυασμών διαφορετικών υλικών και γεωμετριών μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτικές διατάξεις μαγνητομετρίας, με στόχο την αύξηση της ευαισθησίας και της γραμμικότητας στις μετρήσεις.

Τέλος, προτείνεται να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη της εμπέδησης του πυρήνα σε συνάρτηση με τη συχνότητα διέγερσης. Αυτή η παράμετρος είναι κρίσιμη για την κατανόηση και τον ακριβή χαρακτηρισμό των μεγεθών του φαινομένου της Γιγαντιαίας Μαγνητοεμπέδησης (GMI), το οποίο παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία όσο οι συχνότητες διέγερσης αυξάνονται.

Παράρτημα

Πίνακας μετρήσεων της παράλληλης διάταξης του αισθητήρα fluxgate για όλους τους πυρήνες

IH (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} CoSiB	ΔV_{pp} FeSiB	ΔV_{pp} CoFeSiB	ΔV_{pp} UNITIKA
50	2,697	0,74	0,68	1,82	0,73
45	2,427	0,7	0,64	1,5	0,69
40	2,158	0,62	0,5	1,3	0,51
35	1,889	0,48	0,44	1,1	0,41
30	1,618	0,4	0,32	0,93	0,33
25	1,348	0,36	0,2	0,68	0,25
20	1,079	0,24	0,2	0,5	0,21
15	0,809	0,22	0,18	0,22	0,09
10	0,539	0,16	0,14	0,06	0,05
5	0,269	0,04	0,02	0,04	0,02
0	0	0	0	0	0

Πίνακας μετρήσεων της ορθογωνικής διάταξης του αισθητήρα fluxgate για τους πυρήνες CoFeSiB και CoSiB

IH (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} CoFeSiB	ΔV_{pp} CoSiB
50	2,697	0,832	0,188
45	2,427	0,776	0,152
40	2,158	0,72	0,128
35	1,889	0,656	0,116
30	1,618	0,592	0,104
25	1,348	0,512	0,064
20	1,079	0,408	0,06
15	0,809	0,328	0,048
10	0,539	0,208	0,028
5	0,269	0,128	0,016
0	0	0	0

Πίνακας μετρήσεων της ορθογωνικής διάταξης του αισθητήρα fluxgate για τους πυρήνες UNITIKA και FeSiB

IH (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} UNITIKA	ΔV_{pp} FeSiB
120	6,464	0,032	0,019
100	5,395	0,032	0,009
90	4,855	0,022	0,007
80	4,316	0,02	0,007
70	3,776	0,02	0,007
60	3,237	0,02	0,007
50	2,697	0,016	0,007
40	2,158	0,02	0,007
30	1,618	0	0,007
20	1,079	0,012	0,007
10	0,539	0,006	0,007
0	0	0	0

Πίνακας μετρήσεων της race-track διάταξης του αισθητήρα fluxgate για όλους τους πυρήνες

IH (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} CoSiB	ΔV_{pp} FeSiB	ΔV_{pp} CoFeSiB	ΔV_{pp} UNITIKA	ΔV_{pp} FeSiB(ribbon)
50	2,697	5,9	1,2	2,74	5,558	9,416
45	2,427	5,79	1,2	2,62	5,556	9,288
40	2,158	5,64	1	2,244	5,536	9,1
35	1,889	5,42	0,8	0,44	5,502	8,76
30	1,618	4,74	0,6	14,94	5,444	8,06
25	1,348	3,24	0,4	20,54	5,324	5,56
20	1,079	2,1	0,2	23,35	5,016	0,28
15	0,809	6,56	0,2	25,35	4,6	3,8
10	0,539	5,68	0,2	24,75	3,7	6,2
5	0,269	8,8	0,2	8,54	2,2	6,2
4	0,216	7,2	0,2	4,94	1,64	6,44
3	0,162	5	0,2	1,44	1,32	2,6
2	0,108	0,8	0,1	1,5	1,08	0,1
1	0,054	2,4	0,1	2,428	0,4	2,36
0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας μετρήσεων της ορθογωνικής διάταξης του αισθητήρα fluxgate με πυρήνα CoFeSiB, για ευρος συχνοτήτων και DC offset.

f(kHz)	ΔV_{pp} (mV) 0V offset	ΔV_{pp} (mV) 0,5V offset	ΔV_{pp} (mV) 1V offset	ΔV_{pp} (mV) 1,5V offset	ΔV_{pp} (mV) 2V offset	ΔV_{pp} (mV) 2,5V offset
5	156	184	170	178	178	174
10	272	327	278	282	276	269
15	343	418	350	350	346	348
20	374	480	388	393	394	392
25	410	528	418	422	430	432
30	432	562	440	440	446	446
35	442	596	458	456	460	474
40	456	622	468	470	468	490
45	470	650	470	474	472	492
50	474	668	484	488	486	500
55	476	690	494	496	500	508
60	480	696	494	506	504	506
65	482	718	496	508	506	506
70	484	720	520	510	510	504
75	494	742	518	512	512	508
80	486	748	524	512	512	534
85	484	752	536	518	510	530
90	490	756	538	516	514	534
95	490	762	534	520	536	540
100	490	770	534	520	546	536

Πίνακας μετρήσεων της ορθογωνικής διάταξης του αισθητήρα fluxgate με πυρήνα CoFeSiB, για μεγαλύτερο ευρος συχνοτήτων και DC offset 0,5 V.

f(kHz)	ΔV_{pp} (mV)
50	380
100	500
150	520
200	530
250	570
300	700
350	730
400	900
450	980
500	1050
550	1000
600	910
650	840
700	840

Πίνακας μετρήσεων για την δημιουργία των διαγραμμάτων $\Delta V-I(B)$, για συχνότητες διέγερσης 400 kHz, 500 kHz, 600 kHz.

Για τα 400 kHz

I_H (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} (mV)	I_H (mA)	ΔV_{pp} (mV)
-0,01	-0,001	10	0,01	10
-0,02	-0,001	20	0,02	20
-0,05	-0,003	20	0,05	20
-0,1	-0,005	-10	0,1	20
-0,2	-0,011	-20	0,2	40
-0,5	-0,027	-20	0,5	70
-1	-0,054	-220	1	140
-5	-0,27	-1134	5	640
-10	-0,539	-428	10	1020
-15	-0,809	10	15	1140
-20	-1,079	260	20	1140
-25	-1,349	420	25	1060
-30	-1,618	420	30	940
-35	-1,888	400	35	840

-40	-2,158	420	40	740
-45	-2,428	420	45	640
-50	-2,697	420	50	540
-55	-2,967	380	55	460
-60	-3,237	340	60	360
-65	-3,507	280	65	320
-70	-3,776	240	70	240
-75	-4,046	180	75	200
-80	-4,316	140	80	140
-85	-4,586	100	85	120
-90	-4,855	60	90	60
-95	-5,125	20	95	20
-100	-5,395	-20	100	-20
-105	-5,665	-60	105	-60
-110	-5,934	-80	110	-120
-115	-6,204	-140	115	-120
-120	-6,474	-160	120	-140

Για τα 500 kHz

I_H (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} (mV)	I_H (mA)	ΔV_{pp} (mV)
-0,01	-0,001	10	0,01	10
-0,02	-0,001	-20	0,02	20
-0,05	-0,003	-20	0,05	20
-0,1	-0,005	-40	0,1	40
-0,2	-0,011	-60	0,2	40
-0,5	-0,027	-10	0,5	120
-1	-0,054	-220	1	160
-5	-0,27	-1176	5	640
-10	-0,539	-440	10	1020
-15	-0,809	50	15	1120
-20	-1,079	30	20	1120
-25	-1,349	440	25	1040
-30	-1,618	460	30	980
-35	-1,888	460	35	880
-40	-2,158	480	40	800
-45	-2,428	520	45	740
-50	-2,697	500	50	700
-55	-2,967	500	55	640
-60	-3,237	500	60	600
-65	-3,507	460	65	560
-70	-3,776	500	70	520

-75	-4,046	400	75	500
-80	-4,316	360	80	460
-85	-4,586	360	85	440
-90	-4,855	340	90	420
-95	-5,125	320	95	380
-100	-5,395	300	100	360
-105	-5,665	280	105	320
-110	-5,934	260	110	280
-115	-6,204	260	115	260
-120	-6,474	240	120	220

Για τα 600 kHz

I_H (mA)	B ($\times 10^{-4}$ T)	ΔV_{pp} (mV)	I_H (mA)	ΔV_{pp} (mV)
-0,01	-0,001	-10	0,01	10
-0,02	-0,001	-20	0,02	20
-0,05	-0,003	-20	0,05	20
-0,1	-0,005	-60	0,1	20
-0,2	-0,011	-60	0,2	40
-0,5	-0,027	-100	0,5	100
-1	-0,054	-200	1	140
-5	-0,27	-1084	5	620
-10	-0,539	-420	10	960
-15	-0,809	10	15	1040
-20	-1,079	240	20	1020
-25	-1,349	460	25	900
-30	-1,618	440	30	740
-35	-1,888	360	35	600
-40	-2,158	380	40	480
-45	-2,428	380	45	400
-50	-2,697	340	50	300
-55	-2,967	380	55	240
-60	-3,237	340	60	140
-65	-3,507	300	65	140
-70	-3,776	220	70	100
-75	-4,046	180	75	40
-80	-4,316	120	80	20
-85	-4,586	80	85	-20
-90	-4,855	60	90	-40
-95	-5,125	40	95	-80
-100	-5,395	0	100	-120

-105	-5,665	-20	105	-100
-110	-5,934	-40	110	-180
-115	-6,204	-80	115	-220
-120	-6,474	-120	120	-240

Βιβλιογραφία

- [1] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*. Boca Raton, FL: Crc, 2010.
- [2] Slawomir Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*. CRC Press, 2016.
- [3] “Magnetic dipole | physics,” *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/magnetic-dipole>
- [4] “Maxwell’s equations | physics,” *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/Maxwells-equations>
- [5] F. Fiorillo, *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. Academic Press, 2004.
- [6] “Helmholtz coil [Encyclopedia Magnetica - magnetism, electromagnetism, electromagnetic fields, phenomena, devices, and more...],” *e-magnetica.pl*. https://e-magnetica.pl/doku.php/helmholtz_coil
- [7] E. Ramsden, *Hall-Effect Sensors: Theory and Application*. Newnes, 2011.
- [8] G. Schubert, *Treatise on geophysics*.
- [9] Α. Μαγούλας, *Ηλεκτρομαγνητισμός και εφαρμογές*, 2013
- [10] “Classification of Magnetic Materials.” Available: <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/metallurgy/research/Magnetic-Materials-Background/Magnetic-Materials-Background-4-Classification-of-Magnetic-Materials.pdf>
- [11] Τσαλαμέγκας, Α. Ι., & Ρουμελιώτης, Α. Ι. *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τόμος Β*
- [12] Ananya Renuka Balakrishna, Richard D. James, *A tool to predict coercivity in magnetic materials*.
- [13] Ives, Libby. (2016), *Magnetic mineralogy and fabrics of small-scale glacial flutes*, Iceland
- [14] J. Lenz and S. Edelstein, "Magnetic sensors and their applications," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, June 2006.
- [15] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers, Second Edition*. Artech House, 2021.
- [16] Σπυρίδων Αγγελόπουλος, *Διακρίβωση μαγνητικού αισθητήρα Hall*, Αθήνα 2022
- [17] P. P. Freitas *et al.*, “Magnetoresistive DNA chips,” pp. 331–386, Jan. 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/b978-012088487-2/50008-x>.

- [18] M. Vazquez, "Giant Magneto Impedance and Applications." Accessed: Sep. 13, 2024. [Online]. Available: <https://magnetism.eu/esm/2007-cluj/slides/vazquez-slides.pdf>
- [19] B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunnelling," *Physics Letters*, vol. 1, no. 7, pp. 251–253, Jul. 1962, doi: [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(62\)91369-0](https://doi.org/10.1016/0031-9163(62)91369-0).
- [20] J. Clarke and A. I. Braginski, *The SQUID Handbook, 1 : Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems*. Weinheim: Wiley-Vch, 2004.
- [21] P. Ripka and A. Tipek, *Master Book On Sensors*. 2003.
- [22] W. Göpel, J. Hesse, and J. N. Zemel, *Sensors: A Comprehensive Survey*. 2008.
- [23] A. Baschiroto, E. Dallago, P. Malcovati, M. Marchesi, and G. Venchi, "Development and Comparative Analysis of Fluxgate Magnetic Sensor Structures in PCB Technology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 6, pp. 1670–1680, Jun. 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2006.873306>.
- [24] Ken Evans, *Fluxgate Magnetometer Explained*. 2006.
- [25] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers, Second Edition*. Artech House, 2021.
- [26] V. Petrucha and M. Butta, "Race-track fluxgate sensor scaling versus noise," *2021 IEEE Sensors*, Sydney, Australia, 2021, pp. 1-4, doi: [10.1109/SENSOR47087.2021.9639560](https://doi.org/10.1109/SENSOR47087.2021.9639560).
- [27] M. Butta, "Orthogonal Fluxgate Magnetometers," *Smart sensors, measurement and instrumentation*, pp. 63–102, Sep. 2016, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8_3.
- [28] Ozge Zorlu, "Orthogonal fluxgate type magnetic microsensors with wide linear operation range," Jan. 2008, doi: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-4039>.
- [29] Q. Abdullah and A. Aldulaim, "Magnetic and Mechanical Properties of Magnetostrictive FeGaSiB Films," 2018. Accessed: Sep. 17, 2024.
- [30] K. Kawashima, T. Kohzawa, M. Takagi, K. Mohri, M. Kanoh and L. V. Panina, "Mechanism of Matteucci Effect Using Amorphous Magnetic Wires," in *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, vol. 8, no. 5, pp. 318-325, May 1993,
- [31] G. Caposciutti, A. Spalletta, M. Marracci, B. Tellini, C. Trigona and S. Baglio, "Force sensing utilizing a CoFeSiB microwire: a preliminary experimental study," *2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 1-6, doi: [10.1109/I2MTC53148.2023.10175927](https://doi.org/10.1109/I2MTC53148.2023.10175927).