



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

Ανάπτυξη μαγνητομέτρων πύλης ροής - fluxgate

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Λεονάρντο Ντελακρούζ-Καρναβά

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

Ανάπτυξη μαγνητομέτρων πύλης ροής - fluxgate

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
του Λεονάρντο Ντελακρούζ-Καρναβά

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28 Φεβρουαρίου 2023

.....  
.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αφροδίτη Κτενά  
Καθηγήτρια Ε.Κ.Π.Α.

Σπυρίδων Αγγελόπουλος  
Μεταδιδακτορικός ερευνητής

Copyright © Λεονάρδος Ντελακρούς - Καρναβάς, 2023

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

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου παίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο σε πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας του 21ου αιώνα. Ο αισθητήρας τύπου fluxgate αποτελεί ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για την καλή του απόκριση και την εύκολη κατασκευή του.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητήρων κατασκευάστηκαν διάφοροι μαγνητικοί αισθητήρες fluxgate ορθογωνικής και τορροειδούς διάταξης. Στόχο της εργασίας αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση της τοπολογίας των αισθητήρων στη συμπεριφορά και απόκριση τους.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται μία περιγραφή τόσο των φυσικών μεγεθών, όπου σχετίζονται με το φαινόμενο της μαγνήτισης, όσο και στην διαδικασία της ίδιας της μαγνήτισης. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο βρόχο υστέρησης, τα χαρακτηριστικά του μεγέθη και στη συμπεριφορά του στα σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία παρουσίαση των βασικών μαγνητικών αισθητήρων, όπως του αισθητήρα Hall, AMR, GMR, SQUID καταλήγοντας (ή εστιάζοντας στον αισθητήρα fluxgate) στην ανάλυση του αισθητήρα fluxgate. Για όλους τους αισθητήρες παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας, ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές και εφαρμογές.

Στο κεφάλαιο 3 ακολουθεί ανάλυση των διαφορετικών τοπολογιών όπου έχουν αναπτυχθεί για τους αισθητήρες fluxgate. Οι διατάξεις όπου περιγράφονται είναι η παράλληλη, η ορθογωνική, η τορροειδής και η race track. Για κάθε μία από τις παραπάνω διατάξεις παρουσιάζεται η γεωμετρία της, η επίδραση αυτής σε βασικά φυσικά μεγέθη όπου χαρακτηρίζουν τον ελάχιστο μαγνητικό πυρήνα και τέλος οι διακριτικές ικανότητες όπου δίνει η κάθε μία.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι μαγνητικοί αισθητήρες όπου κατασκευάστηκαν, η μέθοδος, τα μαγνητικά υλικά καθώς και η διάταξη για τις μετρήσεις. Ξεκινώντας με τους αισθητήρες ορθογωνικής διάταξης και συνεχίζοντας με την τορροειδή διάταξη παρουσιάζεται η διαδικασία των μετρήσεων, οι μετρήσεις και τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

## Abstract

Magnetic field sensors play an increasingly important role in a variety of 21st century's technology applications. In particular, the fluxgate type sensor is of utmost interest, due to the fact that provides good response and easy construction.

For the purposes of the present study, a series of fluxgate magnetic sensors of orthogonal and toroidal arrangement are manufactured in the electronic sensors laboratory. The aim of this work is to draw conclusions about the effect of the topology of the sensors on their behavior and response.

In chapter 1, a description of both the physical quantities where they are related to the phenomenon of magnetization, as well as the process of magnetization itself are presented. Special mention is made on the hysteresis loop, its characteristic sizes and behavior in hard and soft magnetic materials.

In chapter 2, a presentation of the basic magnetic sensors, such as the Hall sensor, AMR, GMR, SQUID is included, leading up to a detailed presentation of the fluxgate sensor. The basic operating principle, characteristic values and applications are presented for all the aforementioned sensors.

Furthermore, in chapter 3, the different topologies, developed for fluxgate sensors are analyzed. The layouts described are the parallel, the orthogonal, the toroidal and the race track. The geometry for each and every configuration is presented, as well as the effect on basic physical quantities that characterize the respective magnetic core, and finally the resolution that each one gives.

In chapter 4, the magnetic sensors that were manufactured, the method, the magnetic materials as well as the setup for the measurements are presented. Getting started from the orthogonal fluxgate sensors and then continuing with the toroidal, the measurement process, the measurements and their results are presented.

Finally, in chapter 5 the results and the conclusions are discussed.

Key words: fluxgate sensor, toroid, orthogonal, hysteresis loop

## Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα και κύρια τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Πρώτα απ' όλους τον κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου (εποβλέποντα καθηγητή της εργασίας). Πρώτον για την ευαισθησία όπου μου έδωσε για τη συνεργασία για την εκπόνηση της εργασίας, δεύτερον για την πολύ καλή συνεργασία, αλλά και για τη συνεχή και ανιδιοτελή βοήθεια όπου μου παρείχε σε όλες τις προσπάθειες μου για μετεκπαίδευση. Δεν έχω τα λόγια να περιγράψω τις πολυάριθμες φορές όπου αποτέλεσαι χείρα βοηθείας στις αναζητήσεις μου. Η συνεχόμενη αφοπλιστική του βοήθεια για την εξερεύνηση των μελλοντικών μου στόχων ήταν πέραν του μέτρου. Τέλος θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την διαπαιδαγωγική του στάση μέσα από το αλύγιστο πνεύμα ενθουσιασμού για την τεχνολογία όπου μελετάει καθώς και την εύθυμη προσέγγιση με την οποία προάγει τη συνεργασία και τον αμοιβαίο αλληλοσεβασμό. Ο τρόπος με τον οποίο συναναστρέφεται με τους συνεργάτες του, αλλά και η σχέση του με τους συνεργάτες των τμημάτων όπου βρίσκονται υπό την ευθύνη του θα αποτελέσει παράδειγμα στις μελλοντικές μου δραστηριότητες.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω και την κυρία Αφροδίτη Κτενά για τη συμμετοχή της στη διπλωματική εργασία αλλά και στην διαδικασία της εξέτασης. Θα ήθελα να κάνω ειδική αναφορά, καθώς μου έδωσε μία από της βάσεις για να αγαπήσω ακόμα περισσότερο τον ερευνητικό κλάδο των μαγνητικών μετρήσεων, στην ικανότητα της να περιγράφει με εκπληκτικό τρόπο τις βαθύτερες εσωτερικές νομοτέλειες όπου διαπνέουν ένα φαινόμενο.

Τέλος ευχαριστώ τον μεταδιδασκτορικό ερευνητή Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο, τόσο για τη συμμετοχή του στη διαδικασία της εξέτασης, όσο και στη συνολικότερη βοήθεια καθ' όλη τη διαδικασία της έρευνας.

Στη συνέχεια και πριν από το συγγενικό και φιλικό μου περιβάλλον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου ηλεκτρονικών αισθητήρων, με τα οποία συνεργαζόμουν (Παναγιώτης, Γεωργία, Νεφέλη, Σπύρος) για το πολύ φιλικό κλίμα συνεργασίας που καλλιεργούσαν και την ανιδιοτελή βοήθεια όπου μου παρείχαν. Ιδιαίτερο ευχαρηστώ θα ήθελα να δώσω, συγκεκριμένα, στον υποψήφιο διδάκτωρα Παναγιώτη Πρίφτη για τον κύριο όγκο βοήθειας όπου μου παρείχε αλλά και τον άμεσο τρόπο καθοδήγησης στις μετρήσεις.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένεια μου. Πρώτα στους γονείς μου (Ειρήνη και Γκιγιέρμο) για την πολύ μεγάλη βοήθεια όπου μου δώσανε για να μπορώ να ακολουθήσω τους στόχους όπου έχω βάλει. Δυστυχώς ο δρόμος της ερευνητικής σπουδής με στόχο την εργασία στον κλάδο επιλογής όπου επιθυμεί ένας νέος το 2023 δεν είναι εύκολος και έχω να ευχαριστώ τους γονείς μου για τις συνεχόμενες θυσίες που κάνουν μέχρι τον τελικό μου στόχο. Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τον αδελφό μου Γκιγιέρμο για το παράδειγμα που μου έδωσε να μην συμβιβαστώ με τις δυσκολίες όπου προκύπτουν και να επιδιώξω τους στόχους μου. Τέλος ευχαριστώ τον αδελφό μου Ζαχαρία για το σύνολο της βοήθειας όπου μου έδωσε μέσα από τις καθημερινές μας επαφές αλλά και την κοινή μας πορεία όπου μου θύμιζε πως μπορώ να ανταπεξέλθω στις δυσκολίες των τελευταίων δύο 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 θα ήθελα να ευχαριστήσω του πολύ καλούς φίλους (και μελλοντικούς συνεργάτες) όπου έκανα κατά τη διάρκεια φοίτησης στο ΔΠΜΣ, τους Βαγγέλη, Στέλιο, Μαρίνα, Ζωή, Μικαέλα, Σωτήρη. Χωρίς αυτούς η φοίτηση μου θα ήταν πιο κενή. Μέσα από την συναναστροφή μας ενθουσιάστηκα ξανά για την ιδιότητα “φυσικός” και έχω να τους ευχαριστώ. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω δύο ομάδες φίλων όπου αυτοί ήταν οι κύριοι συνοδοιπόροι μου τα τελευταία δύο δύσκολα χρόνια. Από την πρώτη ομάδα φίλων, τους Αναστασία, Μιχάλη, Ματούλα, Γιώργο. Την Αναστασία γιατί υπήρξε κυριολεκτικό στήριγμα στο διάβασμα μου αλλά και για τη συνολική της συμβολή στη συνειδησιακή μου διαμόρφωση σε κάτι όχι λιγότερο από ερευνητή-επιστήμονα. Τον Μιχάλη για την, κάτω απ' όλες τις συνθήκες, όρεξη του για ζωή αλλά και για τη συνεχή υπενθύμιση πως η ζωή μας μπορεί γίνει τέτοια όπου να μην μας καταβροχθήσουν οι δυσκολίες.

Τη Ματούλα για τη συνεχή της παρουσία στο πλάι μου και για τη συνεχή της προσπάθεια αναβάθμισης της φιλίας μας και τον Γιώργο γιατί ξέρει αυτός. Στη δεύτερη ομάδα φίλων ευχαριστώ τους Κατερίνα, Θανάση, Ζωή, Πάνο για την πολύ καλή παρέα όπου κάναμε ιδιαίτερα στη δύσκολη περίοδο προσαρμογής και πίεσης στη διάρκεια του μεταπτυχιακού. Η δύσκολη καθημερινότητα σπουδής και δουλειάς 14ώρου φαινόταν πιο μικρή λόγω αυτών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συντρόφους μου στους κοινωνικούς αγώνες για την έμπνευση συνεχούς πάλης ενάντια σε κάθε μορφή αδικίας. Οι προβληματισμοί και οι δυσκολίες μου, στο βαθμό που δεν μένανε ατομική μου υπόθεση και συνδέονταν με τον αγώνα για την εξάλειψη όλων των αδικιών γινόντουσαν μικρή και ξεπερνιόντουσαν. Αυτός ο αγώνας μου δίνει την όρεξη όχι μόνο να θέλω να ακολουθήσω τον ερευνητικό κλάδο όπου μου αρέσει, αλλά και να πετύχω τους στόχους που βάζω.

# Ευρετήριο σχημάτων

1.1 Γεωμετρική αναπαράσταση του νόμου Biot-Savart.....	2
1.2 Σχηματική αναπαράσταση της δύναμης Lorentz σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο.....	3
1.3 Διάγραμμα της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_r$ κοινής δοκού χάλυβα συναρτήσει του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....	5
1.4 Η σχέση $H=\mu B$ σε ταυστική μορφή.....	5
1.5 Αναπαράσταση συμπεριφοράς της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα μαγνητικά υλικά.....	6
1.6 Τα θεμελιώδη φυσικά μεγέθη, οι μονάδες μέτρησής τους και η αντίστοιχη σταθερά ορισμού τους βάσει του διεθνούς συστήματος μονάδων SI.....	7
1.7 Αναπαράσταση δύο μαγνητικών περιοχών και του μαγνητικού τοιχώματος.....	9
1.8 Αναπαράσταση συμπεριφοράς μαγνητικών περιοχών με τη μείωση της έντασης εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.....	10
1.9 Αναπαράσταση διάταξης εντοπισμού και απόκρισης του φαινομένου Barkhausen.....	11
1.10 Καμπύλη μαγνήτισης μαγνητικών υλικών με την αντίστοιχη επίδραση στις μαγνητικές περιοχές τους.....	11
1.11 Τυπικός βρόχος υστέρησης μαγνητικών υλικών.....	12
1.12 Η οικογένεια βρόχων υστέρησης για διαφορετικά μέγιστα του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....	13
1.13 Τυπικός βρόχος υστέρησης μαλακού μαγνητικού υλικού.....	14
1.14 Τυπικός βρόχος υστέρησης σε σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά.....	15
2.1 Αναπαράσταση βασικής λειτουργίας αισθητήρων.....	17
2.2 Σύγκριση φασματικής πυκνότητας θορύβου για διαφορετικούς αισθητήρες.....	18
2.3 Διάγραμμα εύρων παρατήρησης διάφορων μαγνητικών αισθητήρων.....	19
2.4 Διάταξη αισθητήρα Hall.....	20
2.5 Εφαρμογές αισθητήρα Hall, από αριστερά προς τα δεξιά: αισθητήρας Hall όπως πωλείται στην αγορά, ως τμήμα στο τιμόνι αυτοκινήτου, στην αλλαγή ταχυτήτων οχημάτων.....	21
2.6 Αισθητήρας AMR σε διάταξη στήλης παραμπερη.....	22
2.7 Εφαρμογή του αισθητήρα AMR στην εγγραφή μαγνητικής πληροφορίας.....	22
2.8 Βασική διάταξη αισθητήρα GMR με ομοπαράλληλες και αντιπαράλληλες μαγνητίσεις.....	23
2.9 Διάταξη αισθητήρα GMR με στρώμα αναφοράς (spin valve).....	24
2.10 Αριστερά: Αισθητήρας GMR συνδεδεμένος με ανθρώπινη καρδιά, Δεξιά: Η απόκριση του αισθητήρα για το μαγνητοκαρδιογράφημα.....	24



2.11 Αριστερά: Διάταξη DC SQUID, Δεξιά: Αναμενόμενο διάγραμμα τάσης ενός αισθητήρα DC SQUID.....	25
2.12 Αισθητήρες fluxgate διαφόρων τοπολογιών.....	26
2.13 Διάγραμμα διάταξης συστήματος για την εύρεση της δεύτερης αρμονικής αισθητήρα fluxgate.....	27
2.14 Βασική αρχή της μεθόδου καθυστέρησης φάσης: (a) διεγείρον σήμα, (b) μαγνήτιση μαγνητικού υλικού, (c ) διάγραμμα μαγνητικής ροής, (d) σήμα λήψης.....	28
3.1 Μαγνητικός αισθητήρας fluxgate παράλληλης διάταξης.....	31
3.2 Παραλλαγές της παράλληλης διάταξης (από αριστερά προς τα δεξιά): απλή εκδοχή παράλληλης διάταξης με έναν μαγνητικό πυρήνα, παράλληλη διάταξη τύπου Vacquier με δύο μαγνητικούς πυρήνες, παράλληλη διάταξη τύπου Foerster με δύο μαγνητικούς πυρήνες .....	31
3.3 Ορθογωνικός αισθητήρας fluxgate με κυλινδρικό μαγνητικό πυρήνα.....	32
3.4 Ορθογωνικός αισθητήρας fluxgate με μαγνητικό πυρήνα σε μορφή σύρματος ή λωρίδας (ribbon).....	33
3.5 Διατομή μαγνητικού πυρήνα αποτελούμενο από σύρμα χαλκού έγκλειστο σε γυάλινη μόνωση, επιχρωσμένο, μέσα σε κέλυφος σιδηρομαγνητικού υλικού.....	33
3.6 Μαγνητικός πυρήνας σε σχήμα τόρου, τυλιγμένος με σύρμα.....	34
3.7 Αναπαραστάσεις αισθητήρων fluxgate, διάταξης race track.....	35
3.8 Αναπαράσταση αισθητήρα fluxgate,διάταξης race track, με μη συμμετρικό μαγνητικό πυρήνα. 1) Η πλευρά του μαγνητικού πυρήνα με ελαφρώς πιο αδύνατη πλευρά, 2) Η πλευρά του μαγνητικού πυρήνα με ελαφρώς πιο παχιά πλευρά, 3) Το πηνίο λήψης.....	35
3.9 Αναπαράσταση αισθητήρα fluxgate διάταξης race track με PCB.....	36
4.1 Ημιαυτοματοποιημένος μηχανισμός περιέλιξης σύρματος με τη χρήση ηλεκτρικού τρυπανιού.....	38
4.2 Ο ορθογωνικός αισθητήρας fluxgate απουσία του μαγνητικού πυρήνα.....	38
4.3 Αριστερά: Ο παλμογράφος όπου συνδέθηκε με το πηνίο λήψης, Δεξιά: Η γεννήτρια διέγερσης.....	39
4.4 Αριστερά: Ο ηλεκτρομαγνήτης όπου χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, Δεξιά: Η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος συνδεδεμένη σε αυτόν.....	39
4.5 Δεξιά: Ο αισθητήρας αναφορικά με τον προσανατολισμό του ως προς το μαγνητικό πεδίο της Γης. Αριστερά: Ο αισθητήρας σε σταθερή απόσταση από τον ηλεκτρομαγνήτη όπου δημιουργούσε το σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.....	40
4.6 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα σύρμα CoFeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	41
4.7 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα $f=10$ kHz. Αριστερά: χωρίς την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη, Δεξιά: Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη.....	42
4.8 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα λωρίδα (ribbon) CoFeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	42

4.9 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα $f=10$ kHz. Αριστερά: χωρίς την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη, Δεξιά: Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη.....	43
4.10 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα σύρμα FeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	43
4.11 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα $f=10$ kHz. Αριστερά: χωρίς την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη, Δεξιά: Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη.....	43
4.12 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα λωρίδα (ribbon) CoFeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	44
4.13 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα $f=10$ kHz.....	44
4.14 Ο μαγνητικός πυρήνας Π χωρίς και με το πηνίο διέγερσης.....	45
4.15 Αριστερά: το ψηφιακό μοντέλο όπου τυπώθηκε για την κατασκευή του πηνίου λήψης, Δεξιά: Το εκτυπωμένο πλαίσιο, τυλιγμένο με το πηνίο λήψης.....	46
4.16 Ο αισθητήρας fluxgate τορσειδούς διάταξης.....	46
4.17 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για πλάτος του σήματος $V=10V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	47
4.18 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.....	47
4.19 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για πλάτος του σήματος $V=15V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	48
4.20 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.....	48
4.21 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για πλάτος του σήματος $V=17V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	49
4.22 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.....	50
4.23 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για πλάτος του σήματος $V=10V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	51
4.24 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.....	51
4.25 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για πλάτος του σήματος $V=15V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	52
4.26 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.....	52

4.27 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για πλάτος του σήματος $V=17V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.....	53
4.28 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.....	53
4.29 Αριστερά: Τα πηνία Helmholtz, Δεξιά: Τα πηνία Helmholtz συνδεδεμένα με τη δεινήτρια διέγερσης.....	54
4.30 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ στον αισθητήρα τοροειδούς διάταξης για διέγερση πλάτους 5V. Κατά τη μέτρηση το $V_{offset}$ εναλλασσόταν ανάμεσα στις τιμές 0 ή 1,5 V.....	55
4.31 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ στον αισθητήρα τοροειδούς διάταξης για διέγερση πλάτους 5V. Κατά τη μέτρηση το $V_{offset}$ εναλλασσόταν ανάμεσα στις τιμές 0 ή 1,5 V.....	56
4.32 Μετρήσεις $\Delta V_{pp}$ για τον αισθητήρα τοροειδούς διάταξης για σήμα διέγερσης πλάτους 10 V και $V_{offset}=5 V$ . Οι μετρήσεις γίνανε υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου παραγόμενο από ηλεκτρομαγνήτη, τοποθετημένο σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αισθητήρα.....	57

## Ευρετήριο πινάκων

1.1 Τιμές σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_r$ και μαγνητικής διαπερατότητας διάφορων υλικών.....	4
1.2 Σχέση βασικών μαγνητικών μονάδων μέτρησης συναρτήσει του 1 A.....	8
1.3 Τιμές του συνεκτικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κορεσμού για διάφορα μαλακά μαγνητικά υλικά.....	15
1.4 Τιμές του συνεκτικού πεδίου, της μαγνητικής επαγωγής κορεσμού και της μέγιστης αποθηκευμένης ενέργειας για διάφορα σκληρά μαγνητικά υλικά.....	16
2.1 Αναμενόμενες τιμές φασματικής πυκνότητας θορύβων για διάφορους μαγνητικούς αισθητήρες.....	19
4.1 Οι διαστάσεις του μαγνητικού πυρήνα όπου χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του μαγνητικού αισθητήρα fluxgate τορροειδούς διάταξης.....	45

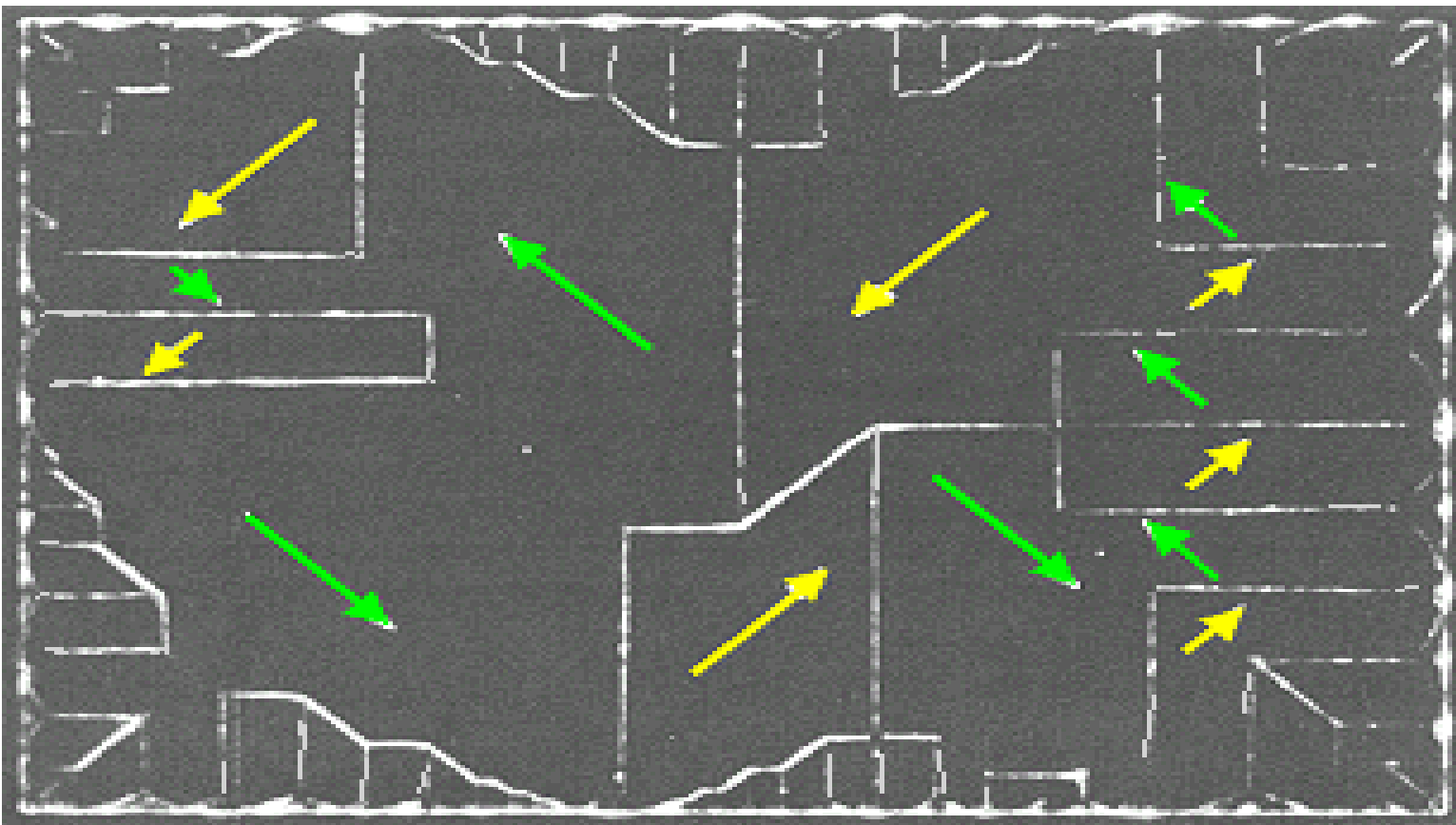
# Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1 Μαγνητικές ιδιότητες</b> .....	1
1.1 Τα βασικά μαγνητικά φυσικά μεγέθη.....	2
1.1.1 Το μαγνητικό πεδίο $H$ .....	2
1.1.2 Η μαγνητική ένταση $B$ .....	4
1.1.3 Η μαγνητική διαπερατότητα $\mu$ .....	4
1.1.4 Η μαγνήτιση $M$ .....	6
1.1.5 Η μαγνητική πόλωση $J$ .....	7
1.1.6 Η μαγνητική επιδεικτικότητα $\chi$ .....	7
1.1.7 Οι μονάδες μέτρησεις Gauss/CGS-EMU.....	7
1.2 Η διαδικασία μαγνήτισης.....	9
1.2.1 Οι μαγνητικές περιοχές και ο θόρυβος Bloch.....	9
1.2.2 Η καμπύλη μαγνήτισης.....	11
1.2.3 Ο βρόχος υστέρησης.....	12
1.2.3.1 Γενικά.....	12
1.2.3.2 Ο βρόχος υστέρησης στα μαλακά μαγνητικά υλικά.....	14
1.2.3.3 Ο βρόχος υστέρησης στα σκληρά μαγνητικά υλικά.....	15
1.2.4 Ο ρόλος της ανισοτροπίας στη μαγνητική συμπεριφορά.....	16
<b>Κεφάλαιο 2 Μαγνητικοί αισθητήρες</b> .....	17
2.1 Εισαγωγή.....	18
2.2 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες.....	20
2.2.1 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες.....	21
2.2.2 Αισθητήρας Hall.....	21
2.2.3 Αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (Anisotropic Magnetoresistance – AMR).....	22
2.2.4 Αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Giant Magnetoresistance – GMR).....	24
2.2.5 Αισθητήρας SQUID.....	25
2.3 Ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate.....	27

<b>Κεφάλαιο 3 Τοπολογία μαγνητικών αισθητήρων fluxgate.....</b>	<b>31</b>
3.1 Παράλληλη διάταξη.....	32
3.2 Ορθογωνική διάταξη.....	33
3.3 Τοροειδής διάταξη.....	35
3.4 Race track .....	36
<b>Κεφάλαιο 4 Οι αισθητήρες του εργαστηρίου και οι επιδόσεις τους.....</b>	<b>38</b>
4.1 Οι ορθογωνικοί αισθητήρες.....	39
4.1.1 Εργαστηριακή-πειραματική διάταξη.....	39
4.1.2 Οι μαγνητικοί πυρήνες - Η διαδικασία της μέτρησης.....	41
4.1.3 Μετρήσεις-αποτελέσματα.....	42
4.2 Ο τοροειδής αισθητήρας.....	45
4.2.1 Εργαστηριακή πειραματική διάταξη.....	45
4.2.2 Η διαδικασία της μέτρησης.....	47
4.2.3 Μετρήσεις-αποτελέσματα.....	47
4.2.3.1 Η μέτρηση $M_{21}$ .....	47
4.3.2.2 Η μέτρηση $M_{22}$ .....	54
4.2.4 Μετρήσεις σε περιοχή συχνοτήτων πέραν του φαινομένου fluxgate.....	55
<b>Κεφάλαιο 5 Συζήτηση των αποτελεσμάτων.....</b>	<b>56</b>

# Κεφάλαιο 1

## Μαγνητικές ιδιότητες των υλικών



1.1 Τα βασικά μαγνητικά φυσικά μεγέθη

1.2 Η διαδικασία της μαγνήτισης

## 1.1 Τα βασικά μαγνητικά φυσικά μεγέθη

### 1.1.1 Το μαγνητικό πεδίο H

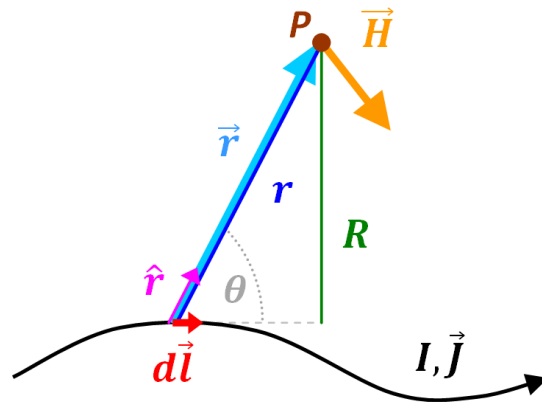
Ως μαγνητικό πεδίο ορίζεται ο χώρος στον οποίο όταν εισέλθει ένα σώμα το οποίο έχει τη ιδιότητα της μαγνήτισης του ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Οι μαγνητικές ιδιότητες στα υλικά είναι αποτέλεσμα της ιδιαίτερης κίνησης και διάταξης των ηλεκτρονίων στα άτομα και τις δομές τους.

Το 1820 οι Jean-Baptiste Biot και ο Felix Savart μελετήσανε το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο ( $\delta H$ ) που δημιουργείται γύρω από αγωγό στοιχειώδους μήκους  $d\mathbf{l}$  το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρονίων και φορτίων) έντασης ( $I$ ) και το υπολόγισαν<sup>[1]</sup> ως:

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

όπου  $r$  είναι η ακτινική απόσταση από τον αγωγό και  $\mathbf{r}$  το μοναδιαίο διάνυσμα στην ακτινική διεύθυνση.

Ο παραπάνω νόμος είναι γνωστός ως ο νόμος Biot-Savart.



Σχήμα 1.1 Γεωμετρική αναπαράσταση νόμου Biot-Savart.

Έτσι η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:  $\delta H = \frac{1}{4\pi} I \int_c \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2}$  και μπορεί εύκολα να αποδειχθεί, για παράδειγμα, πως στο κέντρο κυκλικού αγωγού η ένταση είναι ίση με  $H = \frac{I}{2r}$ . Η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου ορίζεται το  $1H = 1 \text{ A/m}$ . Επίσης το 1826 ο Andre-Marie Ampere κατέληξε στον τύπο υπολογισμού της έντασης του μαγνητικού πεδίου για  $n$  κυκλικούς αγωγούς οι οποίοι διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $I$ :  $\int H d\mathbf{l} = nI$ .

<sup>1</sup> Μπορούμε να πούμε πως το μαγνητικό πεδίο έντασης  $1 \text{ A/m}$  παράγεται στο κέντρο ενός κυκλικού βρόγχου διαμέτρου  $1 \text{ m}$  όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $1 \text{ A}$ .

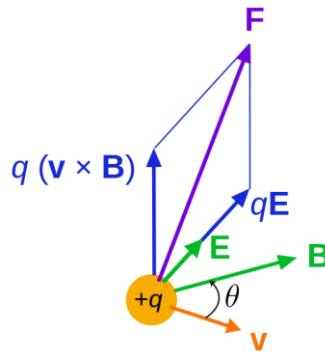


Το 1892 ο Hendrik Lorentz έδειξε<sup>2</sup> πως υπό την παρουσία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ένα ηλεκτρικό φορτίο  $q$  το οποίο κινείται με ταχύτητα  $v$  θα δέχεται δύναμη μέτρου:

$$F = q(E + v \times (1,2566 \cdot 10^{-6} H)) \quad (2)$$

$$F = q(E + v \times \mu_0 H) \quad (3)$$

όπου ορίσαμε ως  $\mu_0$  την ποσότητα  $1,2566 \cdot 10^{-6}$  με μονάδες  $N/A^2$  με την ονομασία μαγνητική διαπερατότητα του κενού. (Αναλυτική περιγραφή και ορισμός θα γίνει στην υποενοότητα “1.2.3 Η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$ ”)



Σχήμα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση της δύναμης Lorentz σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο.

Φαίνεται ότι τη δύναμη που δέχεται το κινούμενο φορτίο μπορούμε να την αναλύσουμε στο τμήμα που οφείλεται από το ηλεκτρικό πεδίο ( $F_{\eta\lambda} = qE$ ) και στο τμήμα που οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο ( $F_{\mu\alpha\gamma\eta} = qv \times \mu_0 H$ ).

Το μαγνητικό πεδίο<sup>2</sup>  $H$  σε μία επιφάνεια έκτασης  $A$  δημιουργεί αυτό που ονομάζουμε μαγνητική ροή  $\Phi$  με τύπο υπολογισμού  $\Phi = \mu_0 A H$ . Η μέτρηση της μαγνητικής ροής ορίστηκε το  $1Wb = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2 A$  (ή όπως θα παρατεθεί παρακάτω  $1Wb = 1Vs$ )

### 1.1.2 Η μαγνητική επαγωγή $B$

Η μαγνητική επαγωγή  $B$  (αλλιώς ονομαζόμενη και μαγνητική πυκνότητα δυναμικών γραμμών) ορίζεται ως εξής:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (4)$$

και εισαγάγωντας τον τύπο της μαγνητικής ροής, η μαγνητική επαγωγή παίρνει τη μορφή:

<sup>2</sup> Μπορούμε να πούμε ότι το μαγνητικό πεδίο είναι η σχετικιστική διόρθωση του ηλεκτρικού πεδίου.

$$B = \mu_0 H \quad (5)$$

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής ορίζεται το  $1 \text{ T} = 1 \text{ N s} / \text{C s} = 1 \text{ Wb/m}^2$ .<sup>3</sup>

### 1.1.3 Η μαγνητική διαπερατότητα $\mu$

Ως μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  ορίζουμε<sup>[3]</sup> τη σχέση αναλογίας μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κατά τη σχέση:

$$B = \mu H \quad (6)$$

Στο κενό η μαγνητική διαπερατότητα είναι  $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ H/m} = 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ , ενώ η τιμή της μέσα από ένα υλικό έχει τιμή  $\mu = \mu_r \mu_0$ , όπου  $\mu_r$  ονομάζουμε τη σχετική διαπερατότητα όπου έχει κάποιο σώμα. Έτσι εναλλακτικά γράφεται:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (7)$$

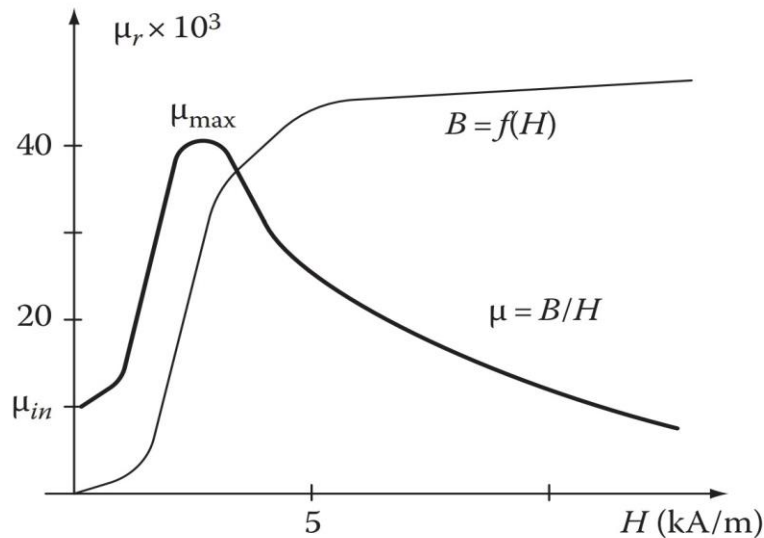
Υλικό	Σχετική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$	Μαγνητική διαπερατότητα $\mu$	Σχόλια
Κενό	1	$1,2566 \cdot 10^{-6}$	
Σίδηρος	5000	$6,3 \cdot 10^{-3}$	
Φερίτης	350-20.000	$4,4 \cdot 10^{-4} - 2,51 \cdot 10^{-2}$	$\mu_e B = 0,25 \text{ mT}, 100 \text{ Hz} - 4 \text{ MHz}$
Λευκόχρυσος	1,000265	$1,25697 \cdot 10^{-6}$	
Αλουμίνιο	1,000022	$1,256665 \cdot 10^{-6}$	
Αέρας	1,00000037	$1,25663753 \cdot 10^{-6}$	
Ξύλο	1,00000043	$1,25663760 \cdot 10^{-6}$	
Στερεό τσιμέντο	1		
Νερό	0,999992	$1,256627 \cdot 10^{-6}$	
Υπεραγωγός	0	0	

Πίνακας 1.1 Τιμές σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r$  και μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$

Γενικά θεωρείται πως η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  είναι το ιδανικό φυσικό μέγεθος για να χαρακτηρίσει τις μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού καθώς ενημερώνει άμεσα για τη σχέση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής. Παρόλαυτα η ακριβής εύρεση καθίσταται δύσκολη για τους εξής λόγους:

<sup>3</sup> Συγκεκριμένα η μαγνητική επαγωγή έντασης 1T αναπτύσσει δύναμη 1N (κάθετη στη μαγνητική ροή) για κάθε 1m αγωγού το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 1A.

- Η σχέση μεταξύ της έντασης του μαγνητικού πεδίου με την ένταση της μαγνητικής επαγωγής είναι σχεδόν πάντα μη γραμμική κι έτσι η μαγνητική διαπερατότητα είναι μία ποσότητα η οποία εξαρτάται από το σημείο και δεδομένα της μέτρησης. Για παράδειγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3 η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού για πολύ μικρές και πολύ μεγάλες τιμές μαγνητικής επαγωγής είναι αρκετά μικρή, άρα μια συγκεκριμένη τιμή της δεν μπορεί από μόνη της να δώσει αρκετές πληροφορίες αν δεν συνδιαστεί και με άλλες τιμές άλλων φυσικών μεγεθών. Μπορεί να δώσει μόνο για την συγκεκριμένη τιμή της.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_r$  κοινής δοκού χάλυβα συναρτήσει επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ .

- Οι μαγνητικές ιδιότητες ενός σώματος καθορίζονται και από το σχήμα του.
- Τα περισσότερα μαγνητικά υλικά είναι ανισοτροπικά δηλαδή έχουν διαφορετικές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$  για διαφορετικές διευθύνσεις της μαγνήτισης. (όπως και μια σειρά άλλων φυσικών μεγεθών). Πιο σωστά, αντί της σχέσης (6) η μαγνητική διαπερατότητα θα έπρεπε να περιγράφεται ως τανυστής.

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}$$

Σχήμα 1.4 Η σχέση  $B=\mu H$  με τη μαγνητική διαπερατότητα σε τανυστική μορφή.

- Εξαρτάται κι από μία σειρά άλλους παράγοντες η συχνότητα, η παρουσία αρμονικών κ.α. Για παράδειγμα για μεγάλες συχνότητες η μαγνητική διαπερατότητα προσεγγίζει όλο και περισσότερο τη μιγαδική της έκφρασης  $\mu = \mu' + i\mu''$ .

### 1.1.4 Η μαγνήτιση M

Σε ατομικό επίπεδο, οι εσωτερικές μαγνητικές ροπές σχετίζονται με την περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους, καθώς και με την τροχιακή κίνησή τους γύρω από τον πυρήνα. Μαγνήτιση (M) ονομάζεται το φαινόμενο της σύνδεσης των διακριτών μαγνητικών ροπών των ατόμων, όταν αυτά συνδέονται επιλεκτικά σε ένα στερεό, πιθανώς υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και ισούται με τη μαγνητική ροπή του υλικού ανά μονάδα όγκου:

$$\mathbf{M} = \frac{\Sigma m_i}{V} \quad (8)$$

Η μαγνήτιση αυξάνει συναρτήσει του αριθμού των παραλληλιζόμενων ηλεκτρονιακών μαγνητικών ροπών σε μια κατεύθυνση. Όταν οι μαγνητικές ροπές σε ένα στερεό παραλληλιζούνται σε μια διεύθυνση, η μαγνήτιση δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο και ονομάζεται μαγνήτιση κόρου

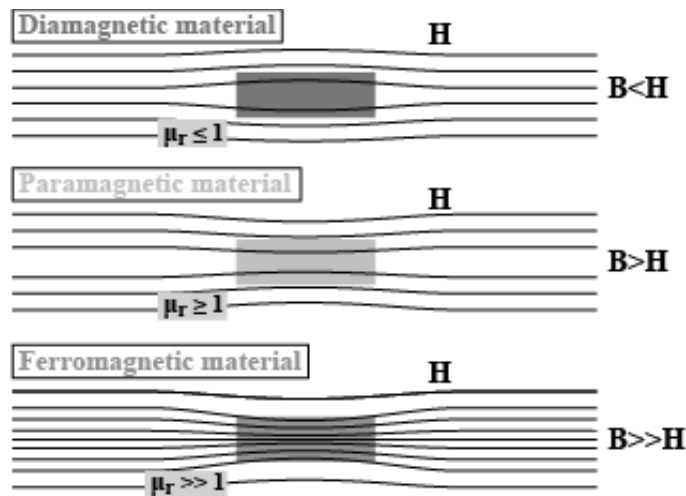
Για καθένα πιθανό υλικό, άρα, η σχέση (5), στο κενό, μπορεί να γραφεί ως εξής<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (8)$$

όπου M ονομάζουμε το διανυσματικό φυσικό μέγεθος της μαγνήτισης. Στη σχέση αυτή ο όρος  $\mu_0 \mathbf{H}$  αναπαριστά τη συνεισφορά από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ενώ ο όρος  $\mu_0 \mathbf{M}$  τη συνεισφορά της ίδιας της μαγνήτισης του υλικού.

Με βάση τη μαγνήτιση μπορούμε να διακρίνουμε τα υλικά στις εξής κατηγορίες:

- Διαμαγνητικά υλικά: Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση απομακρύνεται από τη διεύθυνση του κι έτσι η μαγνητική επαγωγή B μειώνεται.
- Παραμαγνητικά υλικά: Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση προσανατολίζεται στη διεύθυνση του κι έτσι ενισχύεται η μαγνητική επαγωγή B.
- Σιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά υλικά: Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση μπορεί να είναι πολύ πιο μεγάλη και στην κατεύθυνση του.



Σχήμα 1.5 Αναπαράσταση συμπεριφοράς μαγνητικής επαγωγής B σε διαφορετικά μαγνητικά υλικά.

### 1.1.5 Η μαγνητική πόλωση J

Η μαγνητική πόλωση εκφράζει τη μαγνητική ροή μαγνητικού πεδίου η οποία πηγάζει από το ίδιο το σώμα κι όχι από εξωγενή παράγοντα. (Αλλιώς ονομάζεται και ένταση της μαγνήτισης). Ορίζεται ως εξής:

$$J = B - \mu_0 H \quad (8)$$

Και άρα ισούται με:

$$J = \mu_0 M \quad (9)$$

Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής πόλωσης είναι το 1T.

### 1.1.6 Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ

Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ είναι το φυσικό μέγεθος το οποίο περιγράφει τη σχέση της μαγνήτισης και τους μαγνητικού της πεδίου:

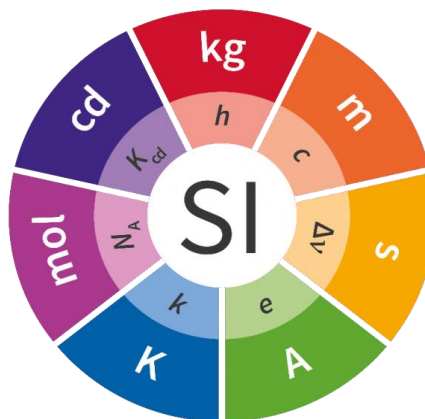
$$M = \chi H \quad (10), \quad \chi = \mu_r - 1$$

### 1.1.7 Οι μονάδες Gauss/CGS-EMU

Πριν από την εγκαθίδρυση του διεθνούς συστήματος μονάδων SI, το 1960, όπου όρισε τα θεμελιώδη φυσικά μεγέθη να είναι τα: χρόνος, μήκος, μάζα, θερμοκρασία, συγκέντρωση ποσότητας, ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, φωτεινότητα, η επιστημονική κοινότητα ανά τον κόσμο χρησιμοποίησε είτε για ιστορικούς λόγους είτε για άλλους, διαφορετικά μεγέθη για τη μέτρηση διαφόρων φυσικών μεγεθών ή και διαφορετικές μονάδες μέτρησης.

Από την εισαγωγή του συστήματος μονάδων SI μέχρι και σήμερα τα φυσικά μεγέθη και οι μονάδες μέτρησής τους ορίζονται, θεμελιωδώς, συναρτήσει των παραπάνω. Συγκεκριμένα για τα φυσικά μεγέθη του ηλεκτρομαγνητισμού, σύνθετες είναι να ορίζονται βάσει του 1 A.

QUANTITY	UNIT	SYMBOL
Length	Meter	m
Mass	Kilogram	kg
Time	Second	s
Electric current	Ampere	A
Temperature	Kelvin	K
Luminous intensity	Candela	cd
Amount of substance	Mole	mol



Σχήμα 1.6 Τα θεμελιώδη φυσικά μεγέθη, οι μονάδες μέτρησής τους και η αντίστοιχη σταθερά ορισμού, βάσει του διεθνούς συστήματος μονάδων SI.

Φυσικό Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρικό φορτίο $q$	$1 \text{ C} = 1 \text{ Am}$
Μαγνητικό πεδίο $H$	$1 \text{ H} = 1 \text{ A/m}$
Μαγνητική επαγωγή $B$	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ N/Am} = 1 \text{ kg/As}^2$
Μαγνητική ροή $\Phi$	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} = 1 \text{ kgm}^2/\text{As}^2$
Μαγνητική διαπερατότητα $\mu$	$\text{Am}^2$

Πίνακας 1.2 Σχέση βασικών μαγνητικών μονάδων μέτρησης συναρτήσει του 1 A.

Βέβαια πριν από το 1960 χρησιμοποιούνταν ευρέως οι Γκαουσιανές μονάδες μέτρησης οι οποίες αποτελούσαν διαμόρφωση του συστήματος μονάδων CGS (centimetre-gram-second)<sup>4</sup>.

Η χρήση τους είχε ιστορική προέλευση και βασίστηκε στη πρακτική να ερμηνεύεται κάθε φυσικό μέγεθος ως αναλογία κάποιας δύναμης, καθώς αυτή ήταν η ιστορική συνειρμική πρακτική. Για παράδειγμα πολλοί επιστήμονες του 19<sup>ου</sup> αιώνα αναφέρονταν στην ορμή ως “δύναμη κίνησης”<sup>[4]</sup>, στην κινητική ενέργεια ως “ζωντανή δύναμη”<sup>[4]</sup>, αλλά έκδηλη είναι και η ονομασία της Ηλεκτρεργετικής δύναμης ΗΕΔ. Η χρήση και κατάληξη στην αποκλειστική περιγραφή μίας μονάδας μέτρησης μόνο με τα centimetre, gram, second είναι απόρροια της σχέσης τους στον 2<sup>ο</sup> νόμο του Νεύτωνα ( $1\text{N} = 1\text{kg m/s}^2$ )<sup>5</sup>.

Στις Γκαουσιανές μονάδες μέτρησης:

<sup>4</sup> Πιο συγκεκριμένα για τα φυσικά μεγέθη των ιδιοτήτων του ηλεκτρομαγνητισμού το σύστημα μονάδων αναφερόταν ως CGS-EMU (centimetre-gram-second-electromagnetism-units).

<sup>5</sup> Ενώ αυτή είναι η κατεύθυνση που ακολουθήθηκε, οι οποιοσδήποτε αλλαγές, από το 1862 όπου πρωτοχρησιμοποιήθηκαν από τη Βρετανική Βασιλική Ακαδημία έως και το 1960 με τη χρήση του διεθνούς συστήματος μονάδων, αφορούσαν το αν θα χρησιμοποιούνταν χιλιοστά αντί εκατοστών, κιλά αντί γραμμαρίων κοκ.

- Το 1 G (Gauss) είναι η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής B. Η μονάδα ορίζεται ως εξής  $1G = \frac{\sqrt{gr}}{\sqrt{cms}}$  και η αντιστοιχία της με το 1T είναι  $1T = 10^4G$ .
- Το 1 Oe (Oersted) είναι η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου H. Η μονάδα μέτρησής της ορίζεται ως εξής  $1Oe = \frac{\sqrt{gr}}{\sqrt{cms}}$  και η αντιστοιχία της με το 1 H είναι  $1Oe = \frac{1000}{4\pi}H$ .
- Το 1 Mx (Maxwell) είναι η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής Φ. Η μονάδα ορίζεται ως  $1Mx = \frac{\sqrt{cm^3gr}}{s}$  και η αντιστοιχία της με το 1Wb είναι  $1Mx = 10^{-8}Wb$ .

Αν και δεν χρησιμοποιούνται πλέον από την ευρεία επιστημονική κοινότητα, το γεγονός πως “στρογγυλεύουν”, από μια ανθρώπινη σκοπιά, τιμές γνωστών καταστάσεων, τις κάνει να αναφέρονται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία πχ η ένταση της μαγνητικής επαγωγής της Γης είναι 0,25-0,6G, αντί 0,25-0,6μΤ.

## 1.2 Η διαδικασία της μαγνήτισης

### 1.2.1 Τα συνήθη μαγνητικά υλικά

Ως μαγνητικά υλικά ονομάζονται αυτά όπο χωρίς την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, έχουν μαγνήτιση. Τα βασικά μαγνητικά χημικά στοιχεία είναι:

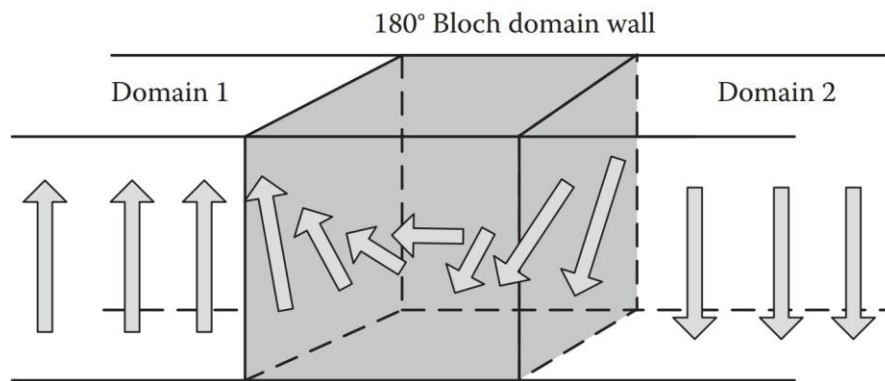
1. Η ομάδα Fe-Co-Ni, δηλαδή τα χημικά στοιχεία Σιδηρος, Κοβάλτιο, Νικέλιο.
2. Το Χρώμιο (Cr) και το Μαγνήσιο (Mg).
3. Διάφορες σπάνιες γαίες.

Το φαινόμενο όπου δίνει σε αυτά τα υλικά τις μαγνητικές τους ιδιότητες οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις βραχείας και μακράς κλίμακας.

Οι αλληλεπιδράσεις βραχείας κλίμακας αναφέρονται στις αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονίων με γειτονικά άτομα. Για παράδειγμα στον σίδηρο, όπου έχει 56 ηλεκτρόνια, τα τελευταία 6 κατανέμονται στη στιβάδα 3d της οποίας τα όρια είναι πολύ μακριά και λόγω της πλεγματικής του δομής (bcc) φτάνουν έως τα άκρα του ατόμου. Έτσι όταν δύο άτομα σιδήρου είναι δίπλα-δίπλα τα ηλεκτρόνια αυτών θα αλληλεπιδράσουν. Σε τέτοια περίπτωση τα ηλεκτρόνια καθενός ατόμου θα προτιμήσουν να μεταπηδήσουν σε ανώτερες στιβάδες για να είναι με παράλληλα σπιν, αφού αυτό απαιτεί λιγότερη ενέργεια από το να μένανε στη θέση τους. Για αυτό και είναι παραμαγνητικό υλικό ο σίδηρος. Αντίστοιχα για το κοβάλτιο (με hex δομή) και νικέλιο (με fcc δομή). Εν αντιθέσει, για παράδειγμα, ο χαλκός αφού έχει συμπληρωμένη την 3d στιβάδα δεν θα αλληλεπιδράσει, άρα για αυτό δεν έχει μαγνητικές ιδιότητες. Η αντίστοιχα το μαγγάνιο όπου λόγω της πλεγματικής του δομής η στιβάδα 3d δεν επικαλύπτει την αντίστοιχη από διπλανό άτομο μαγγανίου.

Οι αλληλεπιδράσεις μακράς κλίμακας αναφέρονται στη μαγνητική συμπεριφορά πολλών ατόμων μαζί, δηλαδή μίας μαγνητικής γειτονιάς ή μαγνητικής περιοχής. Σε τέτοια κλίμακα το υλικό δεν θα επιλέξει να έχει παράλληλες τις μαγνητίσεις των ατόμων αλλά θα επιλέξει, όσο μπορεί, να τις έχει με τρόπο όπου να περιορίζεται η μαγνητική ροή σε περιοχές έξω από το μαγνητικό υλικό, μειώνοντας έτσι τη μαγνητοστατική ενέργεια όπου έχει.

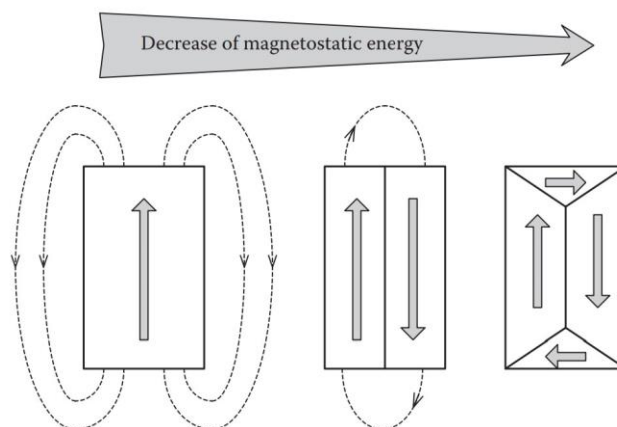
Η συνύπαρξη δυο γειτονικών μαγνητικών περιοχών με αντίθετους προσανατολισμούς θα απαιτούσε να έχουν πολύ μεγάλη εσωτερική ενέργεια όπου θα δημιουργούσε μηχανική θραύση στο υλικό. Έτσι επιλέγει να κάνει μία μεταβατική μετάπτωση στους προσανατολισμούς της μαγνήτισης δύο μαγνητικών περιοχών. Η περιοχή μετάβασης ονομάζεται μαγνητικό τοίχωμα ή τοίχωμα Bloch. Οι διαστάσεις των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι συγκριτικά μικρότερες από αυτές των μαγνητικών περιοχών, μικρότερες των 10μm. Ο προσανατολισμός της μαγνήτισης των διάφορων μαγνητικών περιοχών ονομάζεται προτιμητέως άξονας μαγνήτισης.



Σχήμα 1.7 Αναπαράσταση δύο μαγνητικών περιοχών και του μαγνητικού τοιχώματος.

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, κατά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να αλλάξει τη μαγνητική διεύθυνση όλων των μαγνητικών περιοχών κι άρα αρκείται να επηρεάσει το μαγνητικό τοίχωμα, η αλλαγή του οποίου εμφανίζεται ως μετατόπιση του. Αν στη πορεία του το μαγνητικό τοίχωμα συναντήσει κάποιο εμπόδιο (διαστάσεων συγκρίσιμων του πάχους του) τότε το “αγκαλιάζει” κουλουριάζοντάς το και σε κάποιο κριτικό σημείο έχει τόση ενέργεια όπου αλλάζει τον μαγνητικό προσανατολισμό της επόμενης μαγνητικής περιοχής δίνοντας την αίσθηση ότι συνεχίζει την πορεία του.

Σε μακροσκοπικό επίπεδο αν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο στη φορά μαγνήτισης μίας μαγνητικής περιοχής τότε το μαγνητικό υλικό θα μαγνητιστεί προς αυτήν την μαγνητική διεύθυνση.



Σχήμα 1.8 Αναπαράσταση συμπεριφοράς μαγνητικών περιοχών με τη μείωση της έντασης εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

## 1.2.2 Η καμπύλη μαγνήτισης



Με τον όρο καμπύλη μαγνήτισης αναφερόμαστε στη σχέση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου  $H$  όπου εφαρμόζεται σε ένα υλικό και της μαγνητικής επαγωγής  $B^6$  όπου επιδεικνύει, μέσω γραφήματος.

Η διαδικασία της μαγνήτισης ενός υλικού, με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, μπορεί να αναλυθεί στα παρακάτω στάδια. Έστω ένα μη μαγνητισμένο υλικό.

#### Εφαρμογή μαγνητικού πεδίου μικρής έντασης (αντιστρεπτή διαδικασία)

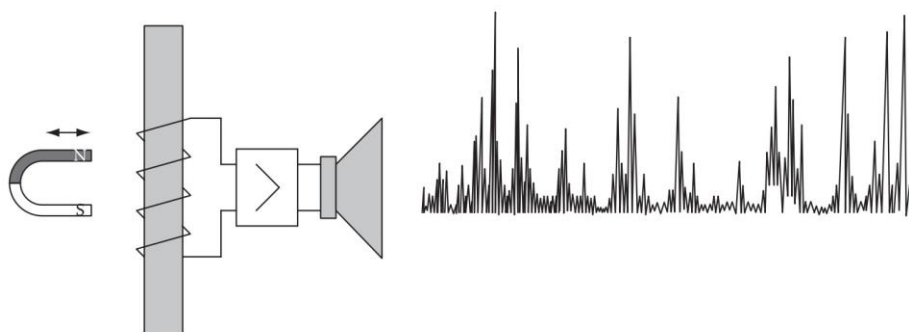
Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου μικρής έντασης παρατηρούμε τις μαγνητικές περιοχές του υλικού οι οποίες είναι αρχικά κοντα στον προσανατολισμό του μαγνητικού πεδίου να ευθυγραμμίζονται με αυτό, έτσι να μεγαλώνει σε έκταση η μαγνητική περιοχή που “κοιτάει” στον προσανατολισμό του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Μπορούμε, υπό μία έννοια, να πούμε πως τα μαγνητικά τείχη μετακινούνται ελαφρώς (αυξάνοντας την έκταση της ευθυγραμμισμένης μαγνήτισης και μειώνοντας την έκταση των υπολοίπων)

Για τέτοιες, μικρές, τιμές του μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές περιοχές θα μπορούσαν να ξαναγυρίσουν στον αρχικό τους προσανατολισμό αν σταματήσει να εφαρμόζεται.

#### Εφαρμογή μαγνητικού πεδίου μεγαλύτερης έντασης (μη αντιστρεπτή διαδικασία - υστέρηση)

Καθώς αυξάνουμε την ένταση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου η διαδικασία αποκτά όλο και πιο μη αντιστρεπτό χαρακτήρα, καθώς τα μαγνητικά τοιχώματα δεν θα επανέλθουν στην αρχική τους θέση, θα υπάρχει δηλαδή υστέρηση. Πρακτικά με την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων θα επέλθει εξαφάνιση κάποιων μαγνητικών περιοχών κι έτσι θα υπάρξει παραμένουσα μαγνήτιση στο σώμα, ακόμα κι αν δεν ενεργεί πάνω του το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων μπορούμε να την παρατηρήσουμε μέσω του φαινομένου Barkhausen<sup>7</sup>. Αν περιελίξουμε σύρμα γύρω από ένα μαγνητικό υλικό (πηνίο) και εφαρμόσουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αυξάνοντάς τό, τότε επειδή η μεταπήδηση των τοιχωμάτων γίνεται πολύ γρήγορα κι έτσι η εναλλαγή της μαγνήτισης παράγει στο πηνίο παλμούς. Αυτοί οι παλμοί συνιστούν τον θόρυβο Barkhausen.



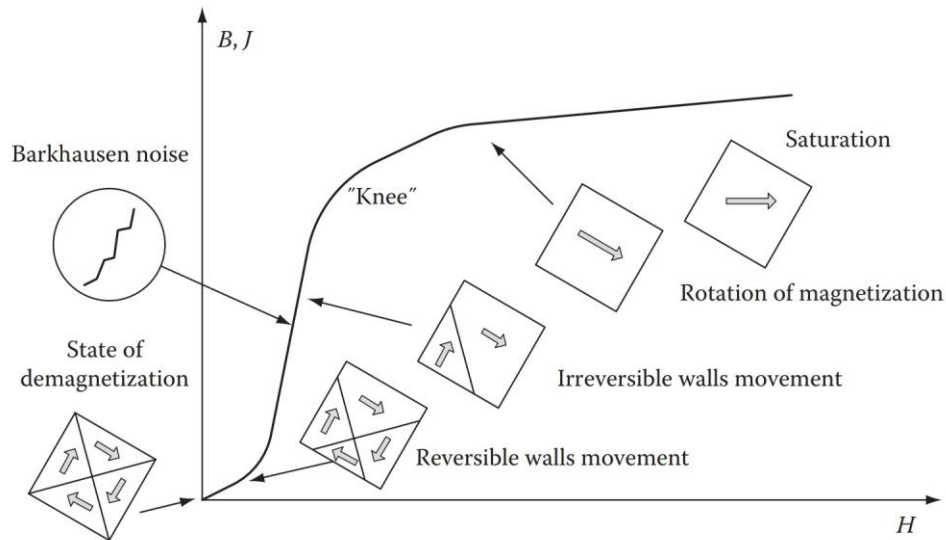
Σχήμα 1.9 Αναπαράσταση διάταξης εντοπισμού και απόκρισης του φαινομένου Barkhausen.

#### Εφαρμογή μαγνητικού πεδίου αρχικά μεγάλης έντασης

<sup>6</sup> Ενίοτε αντί για την μαγνητική επαγωγή  $B$ , παρατίθεται η μαγνητική πόλωση  $J$ .

<sup>7</sup> Το φαινόμενο Barkhausen ανακαλύφθηκε το 1919 από τον Heinrich Barkhausen.

Με την εφαρμογή μαγνητικών πεδίων αρκετά μεγάλης έντασης (ως προς τις ιδιότητες του υλικού) αποκτάμε ενιαίο προσανατολισμό στις μαγνητικές περιοχές, άρα δεν υπάρχουν πλέον μαγνητικά τοιχώματα. Η μαγνήτιση του υλικού θα προσπαθεί να προσανατολιζείται στην κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου όπου του επιβάλλεται.



Σχήμα 1.10 Καμπύλη μαγνήτισης ενός μαγνητικού υλικού με την αντίστοιχη επίδραση στις μαγνητικές περιοχές του.

### Απομαγνήτιση

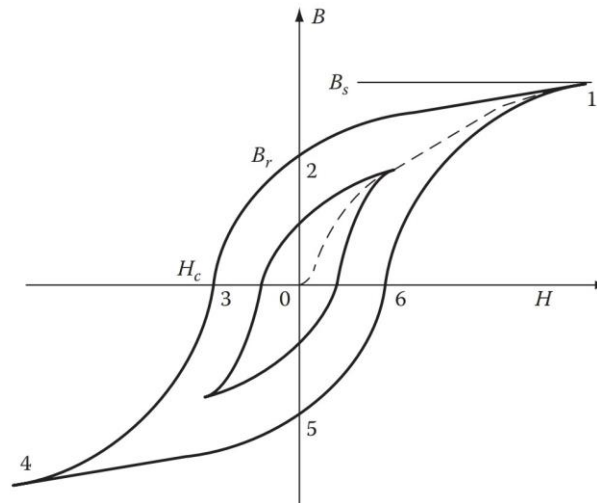
Για την απομαγνήτιση ενός υλικού, μετά την παραπάνω διαδικασία, εφαρμόζουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αντίστοιχα μεγάλης έντασης, αλλά αντίθετου προσανατολισμού από τη μαγνήτιση. Στη συνέχεια χαμηλώνουμε με αργό σταθερό ρυθμό την ένταση έως το μηδέν.<sup>8</sup>

## 1.2.3 Ο βρόχος υστέρησης

### 1.2.3.1 Γενικά

Ο βρόχος υστέρησης είναι ένα χαρακτηριστικό όπου έχουν ολά τα σιδηρομαγνητικά υλικά και έχει αναχθεί ως σήμα κατατεθέν της μελέτης του μαγνητισμού. Πρακτικά είναι η χαρακτηριστική καμπύλη και σχέση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου σε υλικό και της μαγνητικής επαγωγής για όλη τη διαδικασία της μαγνήτισης, μαγνητικού κορεσμού, απομαγνήτισης κοκ. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρουσιάζεται στο διάγραμμα στο "Σχήμα 1.10".

<sup>8</sup> Για πολύ καλή απομαγνήτιση, το υλικό μπορεί να θερμανθεί σε θερμοκρασία ελαφρώς πάνω από τη θερμοκρασία Curie του και να ψύχεται με σταθερό αργό ρυθμό. Τέτοια διαδικασία ενδέχεται να μεταβάλει τις ιδιότητες του υλικού.



Σχήμα 1.11 Τυπικός βρόχος υστέρησης μαγνητικών υλικών.

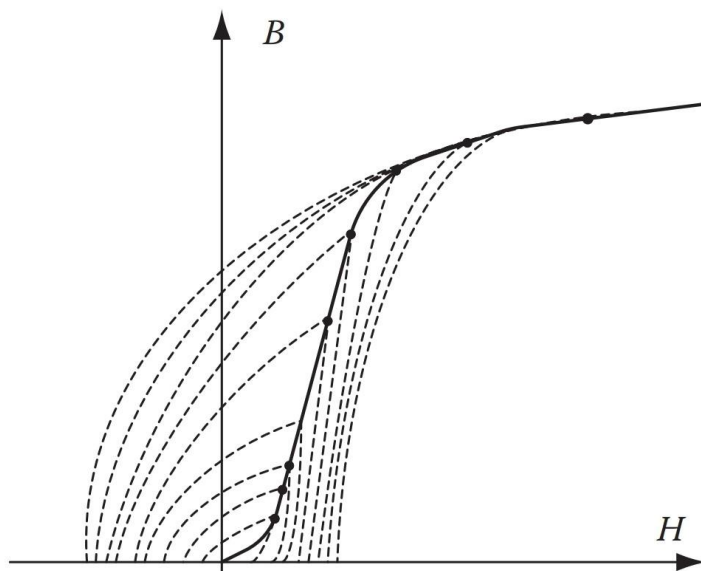
Ξεκινώντας από ένα μη μαγνητισμένο υλικό, αν του επιβάλλουμε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, η συμπεριφορά της μαγνητικής επαγωγής είναι αυτή της πορείας  $0 \rightarrow 1$  (όπως περιγράψαμε στην υποπαράγραφο 1.3.2). Αν μειώσουμε, πλέον, το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, πορεία  $1 \rightarrow 2$ , παρατηρούμε πως η καμπύλη δεν ακολουθεί την ίδια πορεία, λόγω της μη αντιστρεπτής αλλαγής των μαγνητικών περιοχών. Έτσι όταν σταματήσουμε να εφαρμόζουμε το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο θα υπάρχει στο υλικό παραμένουσα μαγνητική επαγωγή  $B_r$  (Remanent flux density B).

Για να αποκτήσει ξανά το σώμα μηδενική μαγνητική επαγωγή θα πρέπει να εφαρμόσουμε μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη, από προηγούμενα, διεύθυνση. Η τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου για το οποίο συμβαίνει αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο  $H_c$  (Coercivity magnetic field H) και στο διάγραμμα είναι η πορεία  $2 \rightarrow 3$ .

Αυξάνοντας τη μαγνητική διέγερση, προς την ίδια αρνητική “κατεύθυνση” η μαγνήτιση ακολουθεί όμοια, με πριν πορεία, φτάνοντας σε κόρρο. Πορεία  $3 \rightarrow 4$ . Η μαγνητική επαγωγή κατά την οποία συναντάμε κορεσμό ονομάζεται μαγνητική επαγωγή αρνητικού κορεσμού  $B_s$  (Negative saturation flux density B).

Στη συνέχεια αν μεταβάλλουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου με κατεύθυνση προς θετικές τιμές το διάγραμμα δεν θα ξαναγυρίσει στο σημείο 0, αλλά στο σημείο 1 (Πορεία  $4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 1$ ).

Τέλος αν μαγνητίζουμε το μαγνητικό υλικό με αρμονικό μαγνητικό πεδίο θα έχουμε μία συνεχή επανάληψη του βρόχου υστέρησης. Για διαφορετικές μέγιστες τιμές του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου θα έχουμε και διαφορετικούς βρόγχους υστέρησης, όπως φαίνεται στο “Σχήμα 1.11”.

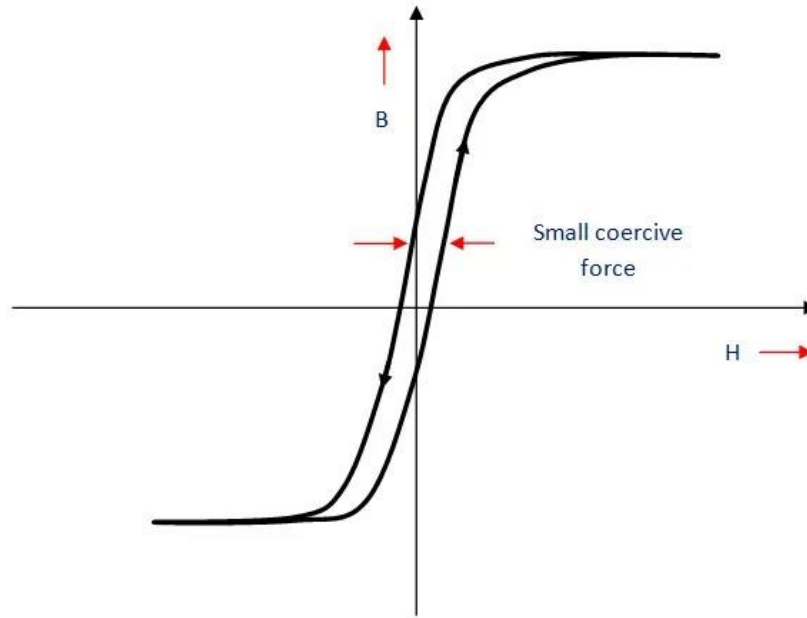


Σχήμα 1.12 Η οικογένεια βρόχων υστέρησης για διαφορετικά μέγιστα του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Στον χαρακτηρισμό και τις εφαρμογές των μαγνητικών υλικών θα παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο τα μεγέθη τα οποία σχετίζονται με τον βρόγχο υστέρησης. Το εμβαδόν που περιλαμβάνεται ανάμεσα στα δύο μεγέθη αναπαριστά το μέτρο των απωλειών ενέργειας σε έναν πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης του υλικού. Σημαντικό ρόλο, όπως θα εξηγήσουμε καλύτερα στα επόμενα υποκεφάλαια, παίζουν και το συνεκτικό πεδίο  $H_c$  και η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή  $B_r$  (και η αντίστοιχη παραμένουσα μαγνήτιση).

### 1.2.3.2 Ο βρόχος υστέρησης στα μαλακά μαγνητικά υλικά

Ως μαλακά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζουμε εκείνα τα οποία έχουν μικρή τιμή συνεκτικού πεδίου  $H_c$ . Η μικρή τιμή του συνεκτικού πεδίου σημαίνει πως το υλικό έχει και λιγότερες απώλειες ενέργειας κατά τη μαγνήτιση και απομαγνήτιση, αφού το εμβαδό του βρόγχου είναι μικρότερο.



Σχήμα 1.13 Τυπικός βρόχος υστέρησης μαλακού μαγνητικού υλικού.

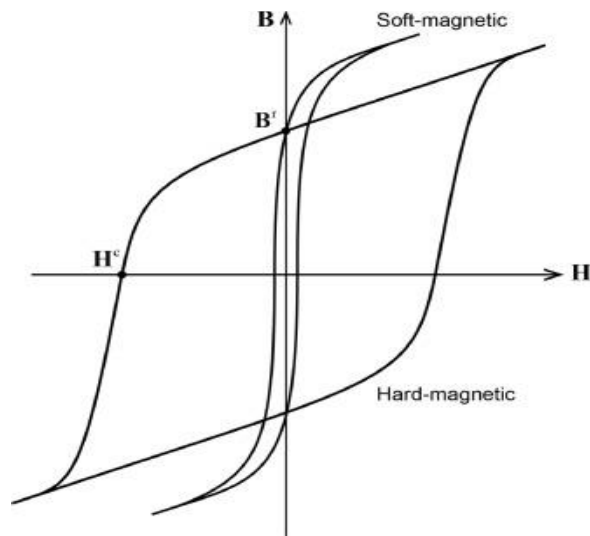
Το γεγονός ότι τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν μικρή τιμή συνεκτικού πεδίου  $H_c$ , σημαίνει πως μπορούμε σχετικά εύκολα να τα απομαγνητίσουμε και μαγνητίσουμε κατὰ το δοκούν. Άρα είναι τα κατάλληλα υλικά για εφαρμογές όπως ηλεκτρομαγνήτες, μετασχηματιστές, κινητήρες κ.α.

Υλικό	Συνεκτικό πεδίο $H_c$ (A/m)	Μαγνητική επαγωγή κορεσμού $B_s$ (T)
Σίδηρος	70	2,16
Silicon-Iron (non oriented)	40	1,95
Silicon-Iron (oriented)	12	2,01
Permalloy 78Ni-22Fe	4	1,05
Supermalloy 79Ni-16Fe-5Mo	0,15	0,79
Amorphous Metglas Fe40-Ni38-Mo4-B18	8	8

Πίνακας 1.3 Τιμές συνεκτικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής κορεσμού για διάφορα μαλακά μαγνητικά υλικά.

### 1.2.3.3 Ο βρόχος υστέρησης στα σκληρά μαγνητικά υλικά

Ως σκληρά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται αυτά όπου έχουν μεγάλη τιμή συνεκτικού πεδίου  $H_c$ . Έτσι είναι δύσκολο να απομαγνητιστούν, δηλαδή χρειάζεται εφαρμογή μαγνητικού πεδίου μεγάλης τιμής. Επίσης αφού ο βρόχος καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια, αυτό σημαίνει πως είναι μεγαλύτερα τα ποσα ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν κι έτσι είναι τα κατάλληλα υλικά για αποθήκευση πληροφορίας και μαγνητική εγγραφή. Επίσης χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες.



Σχήμα 1.14 Τυπικοί βρόχοι υστέρησης σε σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά.

Υλικό	Συνεκτικό πεδίο $H_c$ (kA/m)	Μαγνητική επαγωγή κορεσμού $B_s$ (T)	$(BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )
Ferrite $BaFe_{12}O_{19}$	144	0,35	26
Alnico $FeCoNiAl$	52	1,30	44
$SmCo_5$	690	0,92	200
$Sm(CoFeCuZr)$	560	1,12	240
$NdFeB$	780	1,35	320

Πίνακας 1.4 Τιμές συνεκτικού πεδίου, μαγνητικής επαγωγής κορεσμού και μέγιστης αποθηκευμένης ενέργειας για διάφορα σκληρά μαγνητικά υλικά.

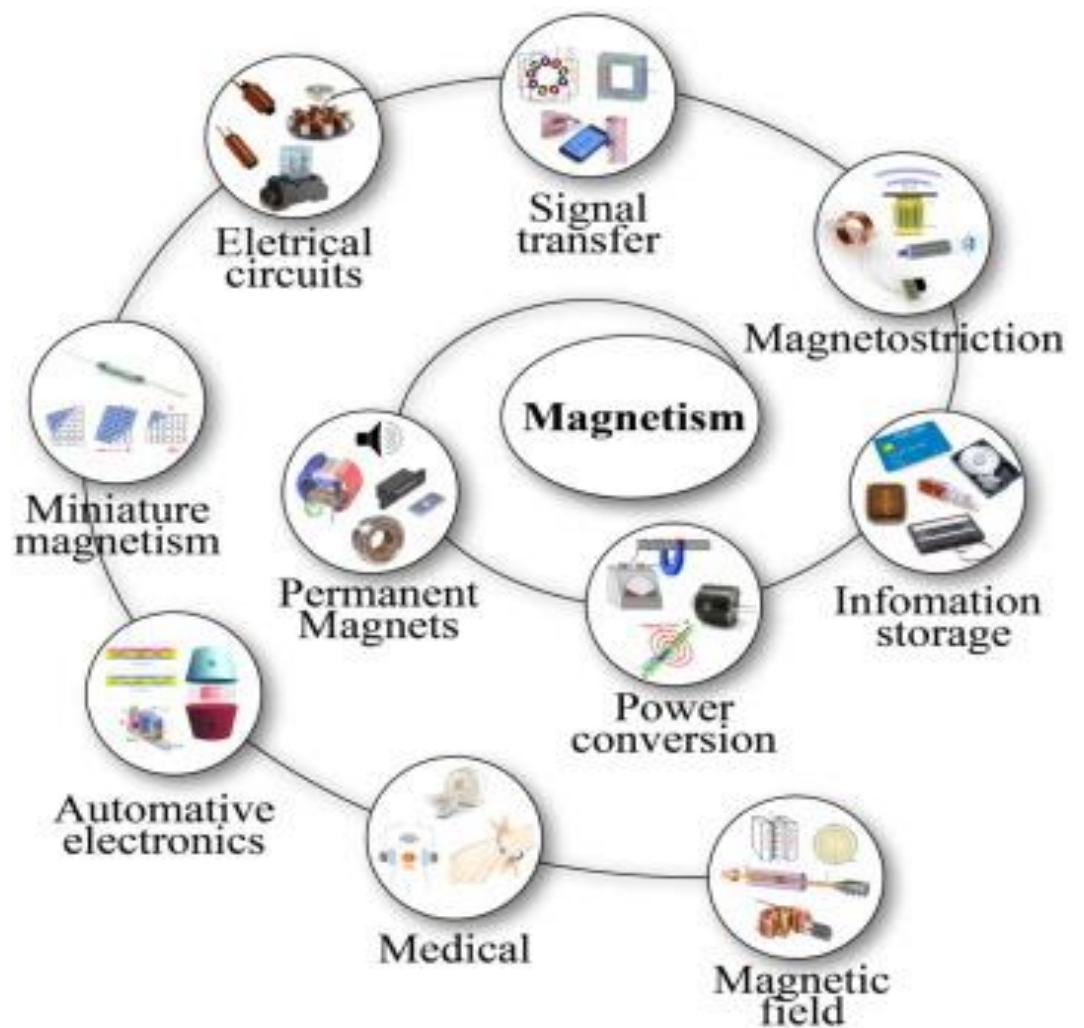
### 1.2.4 Ο ρόλος της ανισοτροπίας στη μαγνητική συμπεριφορά

Ανισοτροπία ονομάζεται η ιδιότητα κατά την οποία οι ιδιότητες ενός υλικού αλλάζουν υπό διαφορετικές διεθύνσεις, για παράδειγμα στα μαγνητικά υλικά οι μαγνητικές ιδιότητες εξαρτώνται από τη διεύθυνση της μαγνήτισης.<sup>9</sup> Η ανισοτροπία σε ένα υλικό μπορεί να είναι εγγενής ιδιότητα του υλικού πχ λόγω της κρυσταλλικής του δομής, είτε να αποκτηθεί από άλλους “εξωτερικούς” λόγους πχ μετά από πλαστική παραμόρφωση, ανόπτηση κ.α. είτε να αποκτηθεί κατά την παρασκευή του υλικού. Ακόμα κι ένα αμιγώς ιστροπικό υλικό, μπορεί να συμπεριφέρεται ανισοτροπικά λόγω του σχήματός του.

Τα περισσότερα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι πολυκρυσταλλικά κι έχουν μεγάλη μαγνητική ανισοτροπία η οποία οφείλεται στην αλληλεπίδραση του σπιν των η

<sup>9</sup> Σε αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή οι ιδιότητες ενός υλικού παραμένουν αναλλοίωτες στις διαφορετικές διευθύνσεις, λέγονται ιστροπικά υλικά.

## Κεφάλαιο 2 Μαγνητικοί αισθητήρες



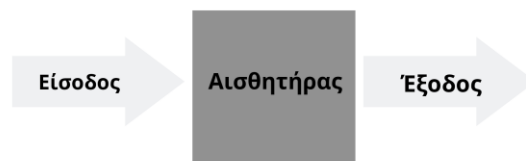
2.1 Εισαγωγή

2.2 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες

## 2.3 Ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate

### 2.1 Εισαγωγή

Αισθητήρα ονομάζουμε την οποιαδήποτε συσκευή λαμβάνει ένα ερέθισμα (είσοδος), μέσω της δράσης ή μεταβολής ενός φυσικού μεγέθους και παράγει μία αντίστοιχη αντίδραση (έξοδος). Ένα παράδειγμα ενός απλοϊκού αισθητήρα αποτελεί το θερμόμετρο υδραργύρου, όπου λαμβάνοντας τη μέτρηση της θερμοκρασίας τη μετατρέπει σε διαστολή του υδραργύρου εντός του βαθμονομημένου σωλήνα.



Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση βασικής λειτουργίας αισθητήρων.

Πλέον οι αισθητήρες είναι ηλεκτρονικοί, αυτό σημαίνει πως οποιαδήποτε είσοδος θα μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα και αυτό θα μεταφραστεί ως έξοδος.

Οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι στην πράξη αισθητήρες μαγνητικής επαγωγής  $B$  ή μαγνητικής ροής  $\Phi$ , με μια μικρή μερίδα να μετράει κι άλλα φυσικά μεγέθη, πχ αισθητήρες πίεσης μέσω της μαγνητοεμπέδησης. Στην συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούμε στους αισθητήρες μαγνητικού πεδίου (Magnetic Field Sensors – MFS).

Δεν πρέπει να κατανοηθεί πως η σχέση εισόδου-εξόδου είναι μία απλή διαδικασία, καθώς δεν έχουν άμεση σχέση, πόσω μάλλον αν συμπεριλάβουμε τη συνθετότητα που ενσωματώνεται μέσω των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Κάποιες σημαντικές, επακόλουθοι, παράμετροι είναι: ο θόρυβος, η ευαισθησία, το εύρος συχνοτήτων, η επίδραση της θερμοκρασίας, η υστέρηση, το κόστος και η κατασκευή (Αναλυτικότερα για διάφορα, από τα παραπάνω, μεγέθη θα αναφερθούμε στο υποκεφάλαιο “3.3 Ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate”, ώστε να αναδειχθούν καλύτερα τα χαρακτηριστικά μόνο του αισθητήρα fluxgate).

Μια πολύ σημαντική παράμετρος, που χαρακτηρίζει κάθε μαγνητικό αισθητήρα, είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (Power Spectral Density – PSD), αφού ανάλογα την ευκρίνεια του σήματος μπορεί να οδηγήσει σε αχρηστία του αισθητήρα.

Ως προς τον θόρυβο υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες θορύβων: ο εγγενής (θεμελιώδης) και ο εξωγενής. Ο εγγενής χωρίζεται κι αυτός σε δύο κατηγορίες: στον θερμικό θόρυβο Johnson ( $V_{nT}$ ) και στον θόρυβο βολής (shot noise). Ο πρώτος έχει να κάνει με τη θερμική κίνηση σε έναν αντιστάτη κι έτσι θεωρούμε πως κάθε αντιστάτης έχει θόρυβο. Ο δεύτερος εξαρτάται από την κβαντική φύση των φορέων ή του φωτός πχ υπάρχουν πειράματα τα οποία δεν θέλουμε να έρχονται σε επαφή με το φως. Στους μαγνητικούς



αισθητήρες σημαντικό ρόλο παίζει ο θερμικός θόρυβος Johnson και άρα αυτόν θα εννοούμε παρακάτω όταν αναφερόμαστε στον θόρυβο.

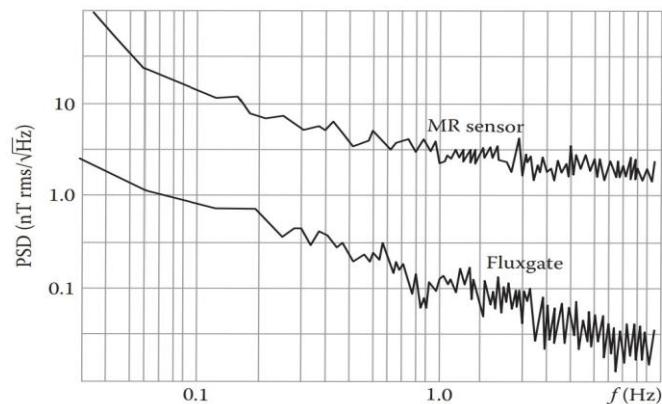
Η παράμετρος, που σχετίζεται με τον θόρυβο στους μαγνητικούς αισθητήρες, είναι η PSD. Η PSD δίνεται από τη σχέση:

$$S(f) = \frac{V_{nT}^2}{\Delta f} = \left( \frac{V_{nT}}{\sqrt{\Delta f}} \right)^2 \quad (2.1)$$

όπου  $V_{nT} = \sqrt{4kTR\Delta f}$  και  $k$  την σταθερά του Boltzmann,  $\Delta f$  το εύρος συχνοτήτων. Έτσι μπορούμε να λέμε ότι το αντίστοιχο της “μονάδας θορύβου” είναι το  $1 \frac{V}{\sqrt{\text{Hz}}}$  ή το ισοδύναμο για τα μαγνητικά πεδία θα είναι το  $1 \frac{nT}{\sqrt{\text{Hz}}}$ .

	$S(f)$	Resolution
SQUID	5 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
High $T_c$ SQUID	100 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Air coil	0.3 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 20 Hz	
Ferromagnetic core coil	2.5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz	
Fluxgate	2 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ –5 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
AMR	15 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Hall	0.5 $\mu\text{T}$ / $\sqrt{\text{Hz}}$	
Optically pumped		1 pT
Overhauser		10 pT
Proton precession		100 pT

Πίνακας 2.1 Πίνακας με αναμενόμενες τιμές φασματικής πυκνότητας θορύβων για διάφορους μαγνητικούς αισθητήρες.



Σχήμα 2.2 Σύγκριση φασματικής πυκνότητας θορύβων για διαφορετικούς αισθητήρες.

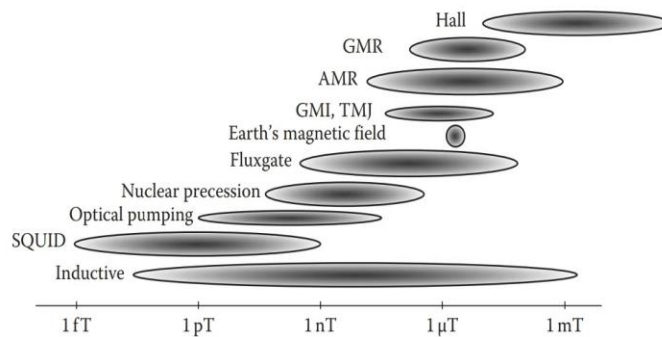
Για τον πρόσθετο θόρυβο όπου συνεισφέρει το σύνολο του ηλεκτρολογικού κυκλώματος μπορούμε να τον αντιμετωπίσουμε μέσω τεχνικών επεξεργασίας σήματος. Μια γνωστή μέθοδος είναι η χρήση του lock-in Amplifier.

## 2.2 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες

### 2.2.1 Οι επικρατέστεροι μαγνητικοί αισθητήρες

Η βιομηχανία και έρευνα των μαγνητικών αισθητήρων είναι αρκετά μεγάλη καθώς περιλαμβάνει ένα πάρα πολύ μεγάλο εύρος ερευνητικών, βιομηχανικών και πρακτικών εφαρμογών. Παρόλο το μεγάλο εύρος θα αρκεστούμε, για τις ανάγκες αυτής της εργασίας, να σταθούμε σε κάποιους παραδειγματικούς του τομέα και πιο διαδεδομένους.

Για αρκετά ασθενή μαγνητικά πεδία τα οποία συνήθως σχετίζονται με βιοεφαρμογές χαρακτηριστικός είναι ο SQUID. Για πάνω από 0,1nT οι πιο διαδεδομένοι είναι ο fluxgate και ο resonance. Ο resonance αισθητήρας αν και παρέχει αρκετά καλή ακρίβεια, είναι αρκετά μεγάλος και αντιλαμβάνεται μόνο το μέτρο του μαγνητικού πεδίου. Για αυτόν τον λόγο αξιοποιούνται αρκετά σε γεωφυσικές εφαρμογές και αποστολές στο διάστημα.<sup>[1]</sup> Ο fluxgate αισθητήρας είναι πιο ευέλικτος και εν αντιθέσει με τον resonance, αντιλαμβάνεται και τον προσανατολισμό του μαγνητικού πεδίου, αλλά θέλει πολύ μεγάλη προσοχή στην παραγωγή του μαγνητικού υλικού όπου χρησιμοποιεί. Κοντά στην ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης καλή επιλογή, εκτός των παραπάνω, λόγω του χαμηλού τους κόστους, αποτελούν οι μαγνητικοί αισθητήρες AMR και GMR. Για πιο μεγάλα μαγνητικά πεδία η χρήση των αισθητήρων Hall είναι σχεδόν αποκλειστική.<sup>[5]</sup>

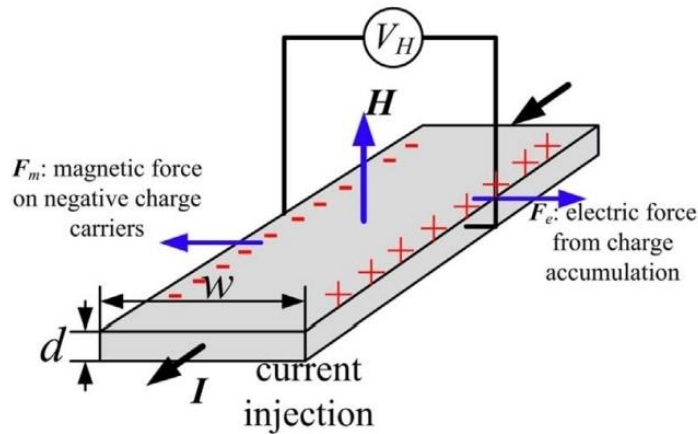


Σχήμα 2.3 Διάγραμμα εύρων παρατήρησης διάφορων μαγνητικών αισθητήρων.

### 2.2.2 Αισθητήρας Hall

Ο αισθητήρας Hall στηρίζεται στην εφαρμογή του φαινομένου Hall<sup>10</sup>. Κατά το φαινόμενο, δημιουργείται διαφορά δυναμικού (τάση Hall) σε αγωγό, στην κάθετη διεύθυνση διέλευσης ρεύματος και αυτά κάθετα σε επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

<sup>10</sup> Ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Edwin Herbert Hall.



Σχήμα 2.4 Διάταξη αισθητήρα Hall.

Σε έναν στερεό αγωγό υπό τη επίδραση μαγνητικού πεδίου με επαγωγή  $B$ , η δύναμη (μαγνητική δύναμη Lorentz) την οποία θα δέχεται ένα ηλεκτρικό φορτίο  $q$  έχει τιμή  $F = qv \times B$ , όπου  $v$  είναι το διάνυσμα της ταχύτητας ολίσθησης του φορτίου και είναι ίση με  $v = \frac{I}{nqwd}$ , με  $I$  την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος όπου εφαρμόζουμε,  $w, d$  το πλάτος και πάχος του αγωγού αντίστοιχα. Όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμοστεί σε κάθετη κατεύθυνση από αυτήν του ηλεκτρικού ρεύματος, η μαγνητική δύναμη Lorentz προκαλεί την εκτροπή του. Ως αποτέλεσμα δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού κάθετη στη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτή τη διαφορά δυναμικού ονομάζουμε τάση Hall  $V_H$ . Σε κατάσταση ισορροπίας έχουμε:

$$F_m = F_e \quad (2.2)$$

$$qv \times B = E_H q \quad (2.3)$$

$$qv \times B = \frac{V_H}{w} q \quad (2.4)$$

$$V_H = \frac{IB}{nqd} \quad (2.5)$$

όπου έχει χρήση και των παραπάνω τύπων.

Έτσι ο αισθητήρας Hall, αξιοποιώντας αυτό το φαινόμενο, όταν ανιληφθεί την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου κάθετο στη μία του διάσταση, παράγει τάση  $V_H$ . Ανάλογα την τιμή της μαγνητικής επαγωγής παίρνουμε και αντίστοιχα τάση.

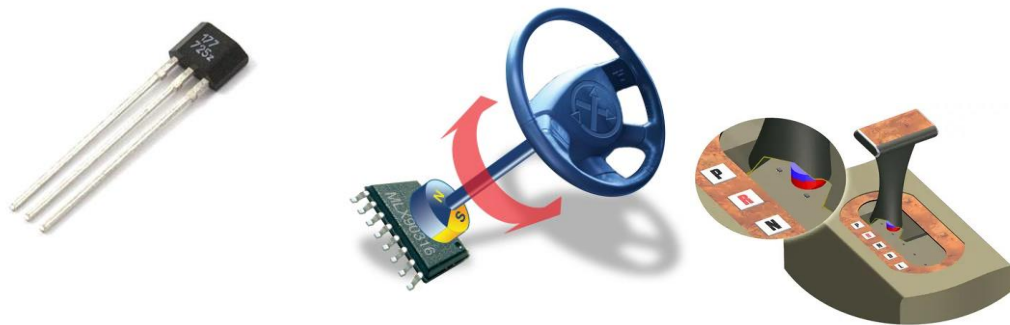
Ένας τυπικός αισθητήρας Hall πυριτίου έχει ευαισθησία  $100-1000 \frac{V}{AT}$ , ευκρίνεια θορύβου/ευαισθησία  $1000 \frac{nT}{\sqrt{Hz}}$ <sup>11</sup>, ενώ νέες μελέτες δείχνουν πως οι αισθητήρες γραφενίου δείχνουν εκπληκτικά αποτελέσματα ευαισθησίας  $5700 \frac{V}{AT}$  και ευκρίνειας θορύβου  $50 \frac{nT}{\sqrt{Hz}}$ .<sup>[6] [7] [8] [9] [10]</sup>

Ενώ οι αισθητήρες Hall έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως απλή αρχιτεκτονική, χαμηλό κόστος, ένταξη τους σε συστήματα CMOS, γραμμική απόκριση και έχουν και αρκετά μειονεκτήματα όπως αλλοίωση απόκρισης λόγω θερμοκρασίας, ασθενές σήμα εξόδου, συγκριτικά με άλλους αισθητήρες και. Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες αυτές χρειάζεται η ενίσχυση ενός καλά σχεδιασμένου

<sup>11</sup> Υπάρχουν και αισθητήρες καλύτερων προδιαγραφών  $>1000 \frac{V}{AT}$ ,  $\sim 100 \frac{nT}{\sqrt{Hz}}$ .

ηλεκτρονικού κυκλώματος όπου θα παρέχουν συνεχές ηλ. Ρεύμα, θα ενισχύουν την τάση εξόδου, θα εκτελούν επεξεργασία σήματος και θα προλαμβάνουν όλες τις υπόλοιπες πιθανές αποκλίσεις.

Οι αισθητήρες Hall συναντώνται σε δύο κατηγορίες, τους αισθητήρες γραμμικής απόκρισης (linear output hall sensor) και τους ψηφιακής απόκρισης (digital output Hall effect sensors)<sup>12</sup>. Οι αισθητήρες γραμμικής απόκρισης δίνουν απόκριση η οποία είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου όπου αντιλαμβάνονται και συναντώνται στους σκληρούς δίσκους, στα διαφράγματα πιέσεως, μετρητές ροής κα.<sup>[11]</sup> Οι ψηφιακής απόκρισης λειτουργούν ως ψηφιακοί διακόπτες, ξεινούν δηλαδή από μια OFF κατάσταση όταν δεν αντιλαμβάνονται την παρουσία μαγνητικού πεδίου και όταν την αντιληφθούν αλλάζουν σε ON κατάσταση. Τέτοιοι αισθητήρες συναντώνται στους μηχανισμούς αλλαγής ταχύτητας των οχημάτων, κλειδαριές θυρών, ανιχνευτές εγγύτητας, αισθητήρες θέσης φακών κα<sup>[12]</sup>



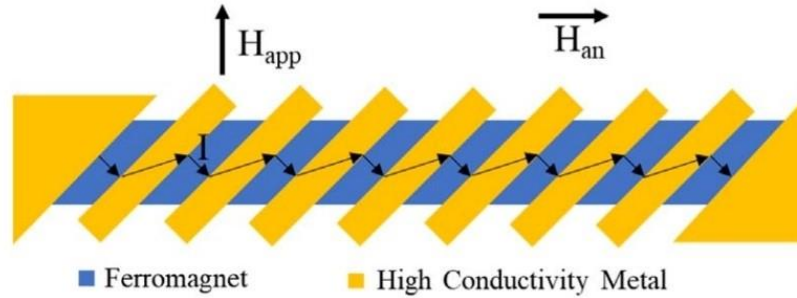
Σχήμα 2.5 Εφαρμογές αισθητήρα Hall, από αριστερά προς τα δεξιά: αισθητήρας Hall όπως πωλείται στην αγορά, ως τμήμα στο τιμόνι αυτοκινήτου, στην αλλαγή ταχυτήτων οχημάτων.

### 2.2.3 Αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης ( Anisotropic Magnetoresistance – AMR)

Η αντίσταση κάποιων υλικών εξαρτάται από τη γωνία ανάμεσα στη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος και της μαγνήτισης των καθεαυτών υλικών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (Anisotropic Magnetoresistance – AMR) και ανακαλύφθηκε από τον λόρδο Κέλβιν το 1856, όταν παρατήρησε πως τα σιδηρομαγνητικά υλικά Fe, Ni παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση όταν το ρεύμα όπου τα διαπερνούσε εφαρμοζόταν παράλληλα στη μαγνήτιση τους και ελάχιστη όταν εφαρμοζόταν κάθετα.

Παρόλο που το φαινόμενο παρατηρείται σε όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, η απόκριση σε αυτά και στις περισσότερες δομές στις οποίες μπορούν να βρισκονται, δεν είναι γραμμική, αναφορικά με την ένταση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και επίσης για ασθενώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο η ευαισθησία είναι πολύ χαμηλή. Μία μέθοδος για να ξεπεραστούν τέτοιες δυσκολίες είναι η χρήση διατάξεων όπου θα αλλάζουν τον προσανατολισμό του ηλ. ρεύματος κατά 45° ως προς τον εύκολο άξονα του μαγνητικού υλικού. Έτσι επιτυγχάνουμε γραμμικοποίηση του φαινομένου. Δύο γνωστές διατάξεις όπου επιστρατεύουν αυτή τη μέθοδο είναι η διάταξη σχήματος “V” ή η διάταξη “στήλης μαπαρμπέρη” (barber-pole structure).

<sup>12</sup> Αλλιώς ονομάζονται και διακόπτες Hall (Hall effect switches).



Σχήμα 2.6 Αισθητήρας AMR σε διάταξη στήλης μπαρμπέρη.

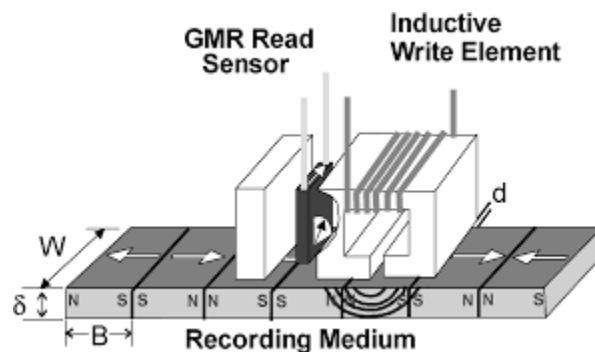
Στη διάταξη στήλης μπαρμπέρη εναποθέτουμε λωρίδες αγωγού καλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σιδηρομαγνητικό υλικό, υπό γωνία 45°. Επειδή το ηλεκτρικό ρεύμα προτιμάει να τσαξιδεύει μέσω του αγωγού, παρά του σιδηρομαγνητικού, έτσι ο προσανατολισμός του ηλεκτρικού ρεύματος στρέφεται κατά 45° ως προς το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η αντίσταση, συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου, δίνεται από τη σχέση:

$$R = R_o + \Delta R \frac{H_{app}}{H_{an}} \sqrt{1 - \left(\frac{H_{app}}{H_{an}}\right)^2} \quad (2.6)$$

όπου  $H_{app}$  είναι η τιμή της έντασης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου,  $H_{an}$  είναι το μέσο μαγνητικό, ανισοτροπικό, πεδίο,  $\Delta R$  η διαφορά ανάμεσα στη μέγιστη πιθανή αντίσταση ενός μαγνητικού υλικού και στην ελάχιστη, δηλαδή  $\Delta R = R_{max} - R_{min}$ .

Το πιο διαδεδομένο υλικό στην κατασκευή αισθητήρων AMR είναι τα κράματα σιδήρου και νικελίου. Συγκεκριμένα το  $Ni_{0,81}Fe_{0,19}$  είναι αρκετά δημοφιλές αφού διακρίνεται για τη μηδαμινή του μαγνητοαντίσταση και την χαμηλή τιμή συνεκτικού πεδίου όπου έχει.<sup>[13]</sup> Παρόλο που οι αισθητήρες έχουν μικρότερη ευαισθησία από άλλους πχ GMR, TMR, είναι πιο εύκολη στην παρασκευή, προσαρμόζονται καλύτερα ως υποσυστήματα ευρύτερων συσκευών και έχουν πολύ καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο.<sup>[14] [15] [16]</sup>

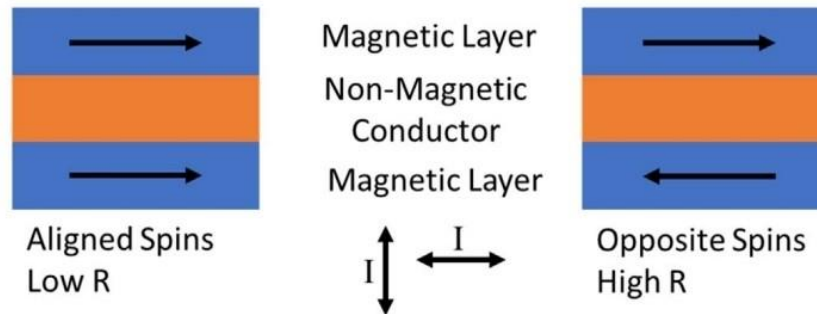
Εφαρμογές τους AMR αισθητήρα συναντώνται στις μεθόδους μαγνητικής εγγραφής και αποθήκευσης μαγνητικής πληροφορίας, στην ανίχνευση οξυγόνου<sup>[17]</sup>, συστήματα ευθυγράμμισης (linear potioting systems)<sup>[18] [19]</sup> κ.



Σχήμα 2.7 Εφαρμογή του αισθητήρα AMR στην εγγραφή μαγνητικής πληροφορίας.

## 2.2.4 Αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Giant Magnetoresistance – GMR)

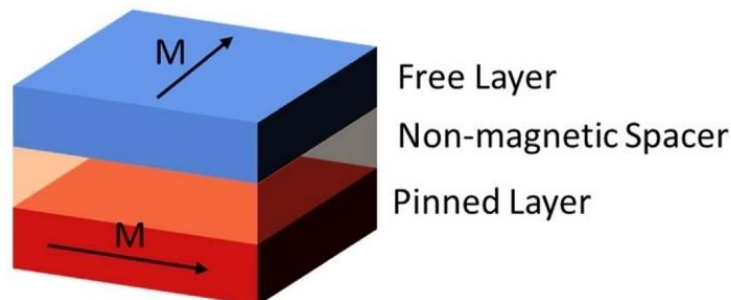
Έστω μία διάταξη στρώσεων με δύο μαγνητικά στρώματα να εναγκαλιζούν ένα μη μαγνητικό μέταλλο σε δομή sandwich. Η αντίσταση της διάταξης μεταβάλλεται όσο αλλάζουμε τη γωνία ανάμεσα στις μαγνητίσεις των δύο μαγνητικών υλικών.



Σχήμα 2.8 Βασική διάταξη αισθητήρα GMR, με ομοπαράλληλες και με αντιπαράλληλες μαγνητίσεις.

Αυτό οφείλεται στη διάχυση των ηλεκτρονίων η οποία είναι συνάρτηση του σπιν. Όταν οι μαγνητίσεις των δυο μαγνητικών υλικών έχουν την ίδια κατεύθυνση μόνο ηλεκτρόνια με σπιν πάνω ή σπιν κάτω μπορούν να ταξιδεύσουν-διαχυθούν, ελαχιστοποιώντας την αντίσταση της διάταξης. Αντίθετα, όταν οι μαγνητίσεις των υλικών έχουν αντίθετο προσανατολισμό, τότε μπορούν και τα ηλεκτρόνια σε κατάσταση με σπιν πάνω και σπιν κάτω να διέλθουν, άρα η διάταξη έχει μέγιστη αντίσταση. Το φαινόμενο αυτό λέγεται γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση (Giant Magnetoresistance – GMR)<sup>13</sup>. Το φαινόμενο μπορεί να εμφανιστεί σε μία τέτοια διάταξη είτε κατακόρυφα είτε κατά μήκος ανάμεσα στις στρώσεις.

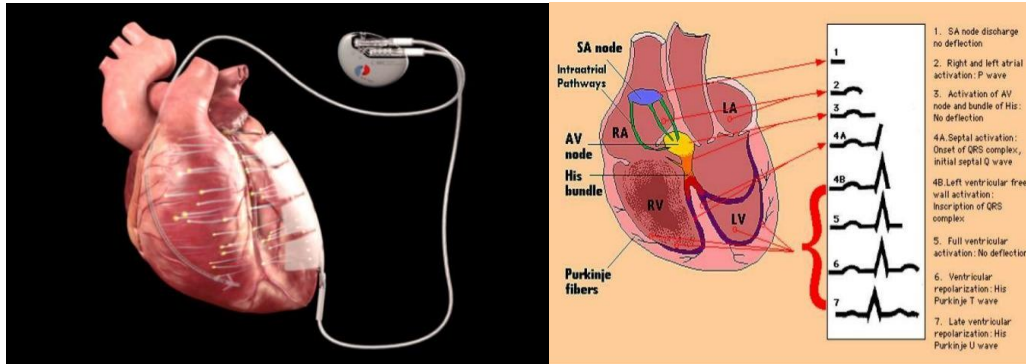
Η πιο συνήθης διάταξη είναι να δοθεί σε μία από τις δύο στρώσεις συγκεκριμένος προσανατολισμός ο οποίος παραμένει αμετάβλητος (στρώση αναφοράς) και η άλλη να μπορεί να μεταβάλλει τον προσανατολισμό του βάσει του επιβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (ελεύθερη στρώση). Ο αισθητήρας τέτοιων προδιαγραφών ονομάζεται spin valve. Η ελεύθερη στρώση κατασκευάζεται από μαλακό μαγνητικό υλικό, πχ CoFeB, NiFe. Η αντίσταση ενός GMR αισθητήρα είναι ανάλογη του ημίτονου της μεταβαλλόμενης γωνίας του προσανατολισμού της ελεύθερης στρώσης, υπό την επίδραση εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Για ασθενή μαγνητικά πεδία, το ημίτονο της γωνίας έχει σχέση ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού. Αυτή η ιδιότητα αποτελεί το γόητρο αυτού του αισθητήρα.<sup>[20]</sup>



<sup>13</sup> Οι Albert Fert και Peter Grunberg βραβεύτηκαν το 2007 με το νόμπελ φυσικής για την ανακάλυψη του φαινομένου, αυτόνομα ο ένας από τον άλλον.

Σχήμα 2.9 Διάταξη GMR αισθητήρα με στρώμα αναφοράς (spin valve).

Μερικές εφαρμογές του GMR αισθητήρα αξιοποιούν την ικανότητα του να αντιλαμβάνονται το μαγνητικό πεδίο της Γης, άρα χρησιμοποιείται σε συστήματα πλοήγησης, προσανατολισμού του κα. Τοποθετώντας τρεις αισθητήρες κάθετους μεταξύ τους δημιουργούμε μαγνητόμετρα τριών διαστάσεων.<sup>[21]</sup> Επίσης μπορούν να αξιοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της δραστηριότητας της καρδιάς.<sup>[22]</sup> Η μέθοδος ονομάζεται μαγνητοκαρδιογράφημα. Άλλη εφαρμογή βρίσκεται στον ανέπαφο μη καταστροφικό έλεγχο των εντάσεων των ρευμάτων σε καλώδια και φορείς όπως οχήματα, κτήρια κα.<sup>[23] [24]</sup>

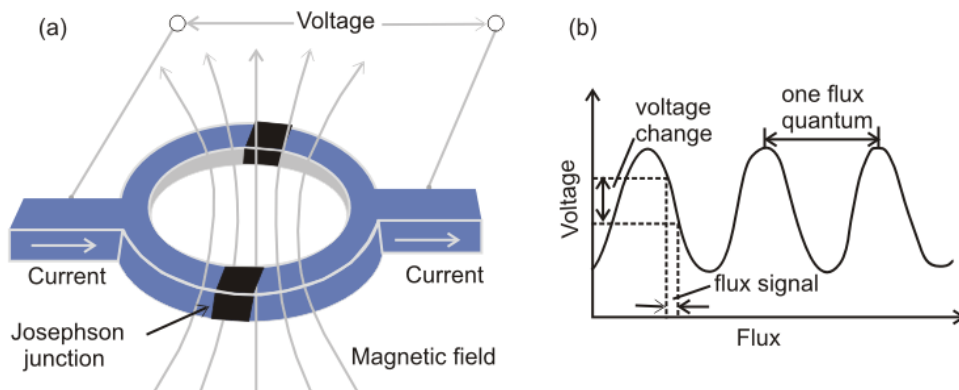


Σχήμα 2.10 Αριστερά: Αισθητήρας GMR, συνδεδεμένος με ανθρώπινη καρδιά, Δεξιά: Η απόκριση του αισθητήρα για το μαγνητοκαρδιογράφημα.

## 2.2.5 Αισθητήρας SQUID

Οι συσκευές υπεραγωγικής κβαντικής διεπαφής (Superconducting QUantum Interface Device – SQUID) αποτελούν από τους πλέον ευαίσθητους αισθητήρες μαγνητικού πεδίου φτάνοντας μέχρι και τα  $3 \frac{fT}{\sqrt{Hz}}$  φασματικής πυκνότητας θορύβου. Στηρίζονται σε υπεραγωγίσιμους βρόγχους οι οποίοι έχουν ενσωματωμένες επαφές Josephson. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αισθητήρων SQUID, οι DC και οι RF.

Οι αισθητήρες DC SQUID έχουν δύο επαφές Josephson παράλληλες μεταξύ τους, αντιδιαμετρικά στον βρόγχο.



Σχήμα 2.11 Αριστερά: Διάταξη DC SQUID, Δεξιά: Αναμενόμενο διάγραμμα τάσης ενός αισθητήρα DC SQUID.

Χωρίς την παρουσία μαγνητικού πεδίου το ηλεκτρικό ρεύμα  $I$  το οποίο θα διαπερνά τον αισθητήρα αναλύεται σε δύο ίσες συνιστώσες, διανύοντας τις διαδρομές του. Αν εφαρμόσουμε ασθενές μαγνητικό πεδίο, για να ακυρωθεί η “παραπινίση” μαγνητική ροή θα αρχίσει να ρέει ρεύμα  $I_S$ , δημιουργώντας ενίσχυση του φαινομένου Josephson, ανάλογο της μαγνητικής ροής. Το παραγόμενο αυτό ρεύμα είναι ομόρροπο του αρχικού στον έναν κλάδο και αντίρροπο στον άλλον. Όταν οποιοσδήποτε κλάδος ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή ρεύματος  $I_c$  χαρακτηριστική για κάθε επαφή θα αναπτυχθεί διαφορά δυναμικού στη διάταξη.

Για τιμές του μαγνητικού πεδίου όπου δημιουργούν μαγνητική ροή η οποία υπερβαίνει το ήμισυ της στοιχειώδους μαγνητικής ροής<sup>14</sup>, παρατηρείται το εξής φαινόμενο: αφού η μαγνητική ροή όπου αναπαράγεται από τον ημιαγωγίμο βρόγχο πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της στοιχειώδους μαγνητικής ροής, ο SQUID θα προτιμήσει, ενεργειακά, να αυξήσει την αναπαράγouσα μαγνητική ροή του σε  $\Phi_0$ . Έτσι το συνολικό ηλεκτρικό ρεύμα ρέει τώρα προς την αντίθετη κατεύθυνση<sup>15</sup>.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μειώνεται καθώς αυξάνουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου, μηδενίζεται όταν η τιμή της μαγνητικής ροής είναι  $\Phi_0$ , αλλάζει κατεύθυνση όταν ξεπεράσουμε την τιμή αυτή. Κι αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται περιοδικά κάθε φορά όπου η μαγνητική ροή αυξάνεται κατά ακέραια πολλαπλάσια του μισού της στοιχειώδους  $\Phi_0/2$  μαγνητικής ροής, με μέγιστα κάθε περιττά πολλαπλάσια του  $\Phi_0/2$  και μηδενίζεται κάθε ζυγά πολλαπλάσια του.

Για τιμές της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος μελύτερες του  $I_c$ , τάση όπου θα αναπτύσσεται θα είναι ανάλογη του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και η περίοδος θα είναι ίση με  $\Phi_0$ . Λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος τοποθετούμε έναν αντιστάτη  $R$ . Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\Delta V = R \Delta I \quad (2.7)$$

$$2 \Delta I = 2 \frac{\Delta \Phi}{L} \quad (2.8)$$

$$\Delta V = \frac{R}{L} \Delta \Phi \quad (2.9)$$

Οι αισθητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος RF SQUID (Radio Frequency SQUID) έχουν μία επαφή Josephson και στηρίζονται στο φαινόμενο Josephson εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ακρίβεια τους δεν είναι τόσο καλή όσο των DC SQUID αλλά κατασκευάζονται πολύ πιο εύκολα και πιο φθηνά.

Παρόλο της ικανότητας για πολύ καλή ακρίβεια, το βασικό μειονέκτημα των αισθητήρων SQUID είναι πως για τη λειτουργία τους, αφού αξιοποιεί υπεραγώγιμα φαινόμενα καθύσταται ακριβή και ογκώδης η διαδικασία συνεχούς ψύξης των υλικών.

## 2.3 Ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate

Οι μαγνητικοί αισθητήρες fluxgate αποτελούν εφαρμογή του νόμου του Φάραντεϊ<sup>16</sup>. Η λειτουργία τους στηρίζεται στον περιοδικό κορεσμό της μαγνήτισής τους. Χρησιμοποιώντας ένα μαλακό μαγνητικό υλικό (όπου μπορεί εύκολα να διεγείρεται και να

<sup>14</sup> Κβάντο μαγνητικής ροής ή στοιχειώδη μαγνητική ροή ονομάζουμε τη στοιχειώδη μαγνητική ροή που αναπαράγεται από μαγνητικό πεδίο  $B$  σε επιφάνεια στοιχειώδους βρόγχου  $S$  και υπολογίζεται από τον τύπο  $\Phi=BS$ . Για υπεραγώγιμο βρόγχο  $\Phi_0=h/2e=2,067833 \cdot 10^{-15}Wb$ .

<sup>15</sup> Για να αντιτίθεται, με αυτόν τον τρόπο, στη μαγνητική ροή  $\Delta\Phi=\Phi_0-\Phi_0/2$ .

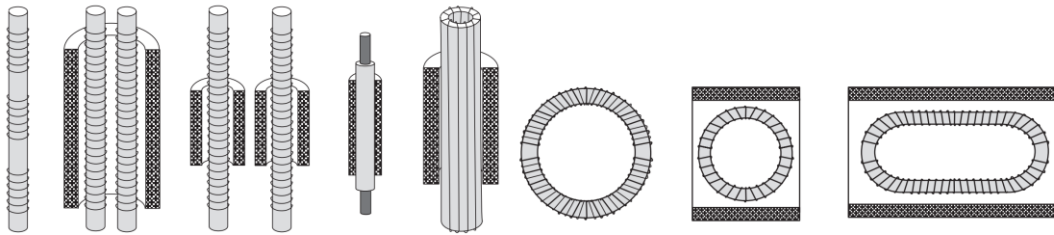
<sup>16</sup> Το φαινόμενο της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει.



αποδιεγείρεται, υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου) του τυσλίγουμε δύο πηνία. Το πρώτο θα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, μεταβάλλοντας έτσι τη μαγνητική ροή γύρω από τον μαγνητικό πυρήνα. Για αυτό το πρώτο πηνίο ονομάζεται πηνίο διέγερσης. Διεγείρωμας έτσι τον μαγνητικό πυρήνα, το δεύτερο πηνίο λαμβάνει τη μεταβολή στη μαγνητική ροή και αναπτύσσει δυναμικό στα άκρα του. Το δεύτερο πηνίο ονομάζεται πηνίο λήψης. (Σε κάποιους τύπους αισθητήρων fluxgate διαπερνάμε καταυθείαν τον μαγνητικό πυρήνα με ηλ. ρεύμα και έχουμε, άρα, μόνο ένα πηνίο, της λήψης).

Για να εξασφαλίσουμε πολύ καλές ιδιότητες ενός τέτοιου αισθητήρα απαιτούμε:

- μικρή υστέρηση από το μαγνητικό υλικό
- πολύ καλή συμμετρικότητα και μεγάλη κλίση του βρόγχου υστέρησης (Για την καλή συμμετρικότητα του βρόγχου υστέρησης του μαγνητικού υλικού θα πρέπει να δοθεί βάση στην παρασκευή του υλικού ώστε να κατασκευαστεί χωρίς μηχανικές τάσεις.)
- μη γραμμική σχέση του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής μετά το σημείο κορεσμού
- χαμηλός θόρυβος



Σχήμα 2.12 Αισθητήρες fluxgate διαφόρων τοπολογιών.

Άνευ παρουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, όταν διεγείρουμε το μαγνητικό υλικό με εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, ο κορεσμός συμβαίνει συμμετρικά για τις θετικές και αρνητικές τιμές της διέγερσης, με τη συνολική μαγνητική ροή από τον “κύκλο” της διέγερσης να αθροίζει μηδέν. Το σήμα όπου λαμβάνει το πηνίο λήψης περιέχει μονές αρμονικές.

Υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, αν διεγείρουμε το πηνίο διέγερσης με τον ίδιο τρόπο, το μαγνητικό υλικό κορενεται μη συμμετρικά και η μαγνητική ροή, πλέον, δεν βγαίνει αθροιστικά μηδέν στον έναν “κύκλο”. Το πηνίο λήψης, έτσι, αντιλαμβάνεται και ζυγές αρμονικές του σήματος.

Το επιβαλλόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο συσχετίζεται με δύο μεγέθη όπου μπορούν να καταγραφούν από έναν αισθητήρα fluxgate: α) τη μεταβολή στο πλάτος του σήματος από κορυφή σε κορυφή ( $V_{pp}$  - peak-to-peak) χωρίς και με την επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, β) με την τιμή του πλάτους της δεύτερης αρμονικής.

Το πλάτος της τάσης  $V_{pp}$  είναι ανάλογο της έντασης του εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου κι έτσι η καταγραφή της μεταβολής του δίνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου όπου επιβάλλεται. Για αυτόν τον λόγο συνήθως μετράται αυτή η τιμή, αφού έχει καλή ακρίβεια για αυτό και αρκεί αυτή η μέτρηση για τις συνήθεις εφαρμογές του αισθητήρα. Στην παρούσα εργασία το σύνολο των μετρήσεων έγιναν στη μεταβολή του  $\Delta V_{pp}$ .

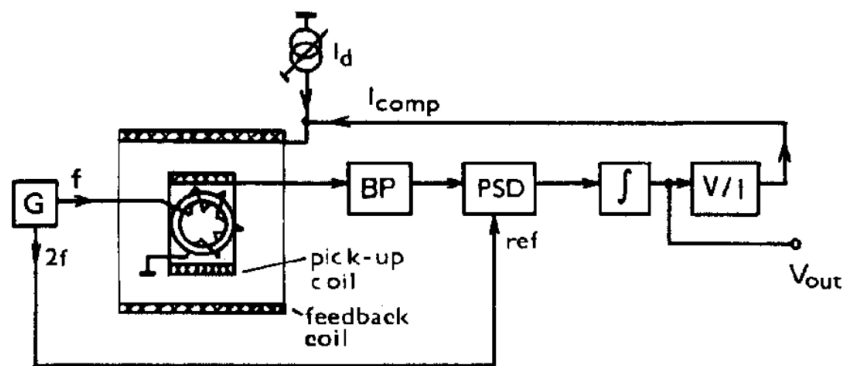
Από την άλλη το πλάτος της δεύτερης αρμονικής είναι ανάλογο του τετραγώνου της έντασης τους μαγνητικού πεδίου, έτσι μπορούν να καταγραφούν και μαγνητικά πεδία χαμηλής έντασης και δείχνει και συνήθως και τα όρια της ευαισθησίας ενός αισθητήρα fluxgate. Χρησιμοποιείται, συνήθως, σε μετρήσεις μαγνητικών πεδίων χαμηλής έντασης ή υψηλής ακρίβειας, όπως βιοεφαρμογές και

Ο διαχωρισμός των δεύτερων αρμονικών από το σήμα λήψης αποτελεί μία ιδιαίτερη διαδικασία καθώς στο σήμα λήψης περιλαμβάνονται κι άλλες συνιστώσες.

Μία μέθοδος εύρεσης της δεύτερης αρμονικής στους αισθητήρες παράλληλης διάταξης είναι να χρησιμοποιηθούν δύο μαγνητικοί πυρήνες ο καθένας με τα δικά του πηνία διέγερσης και λήψης οι οποίοι δημιουργούν αντίθετης κατεύθυνσης μαγνητικά πεδία, έτσι το εξωτερικό, σταθερό, μαγνητικό πεδίο προστίθεται στο ένα και αφαιρείται από το άλλο. Στα πηνία λήψης, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά, οι μονές αρμονικές ακυρώνονται, ενώ οι ζυγές προστίθενται. Το σήμα εξόδου έχει διπλάσια συχνότητα από την αρχική.

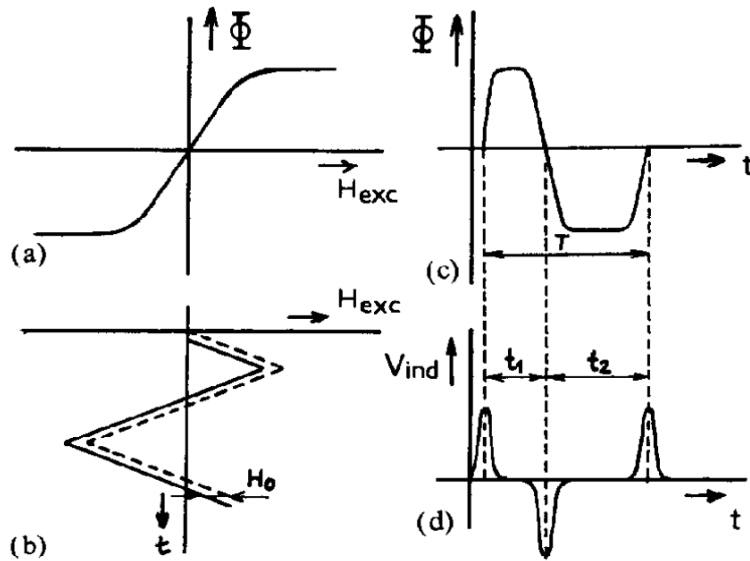
Γενικά όμως (για κάθε τοπολογία αισθητήρα) η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την εύρεση της δεύτερης αρμονικής είναι η μέθοδος ανίχνευσης ευαισθησίας φάσης (Phase Sensitive Detection – PSD). Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται μέσω ενός Lock-in Amplifier (LIA). Η μέθοδος λειτουργεί ως εξής:

Από τη γεννήτρια σημάτων διεγείρεται ο αισθητήρας με σήμα συχνότητας  $f$ . Επειδή το σήμα όπου αναπαράγει ο αισθητήρας είναι αρκετά υψηλό για τον PSD χρειάζεται να απενισχυθεί (pre-amplification) και να φιλτραρισθεί ώστε να διαπερνούν συγκεκριμένες συχνότητες (band-pass filter) κι έτσι να καταλήξουν στον PSD. Παράλληλα από τη γεννήτρια σημάτων τροφοδοτείται, ο PSD, με σήμα διπλάσιας συχνότητας ως αναφορά. Το σήμα εξόδου του PSD περνάει από ολοκληρωτή και δίνεται ως σήμα εξόδου. Παράλληλα σήμα από τον ολοκληρωτή περνάει μέσα από ενισχυτή τάσης-ρεύματος και ξανακαταλήγει σε πηνίο ανάδρασης (feedback coil).



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα διάταξης συστήματος για την εύρεση της δεύτερης αρμονικής αισθητήρα fluxgate.

Μία ακόμη μέθοδος είναι η μέθοδος καθυστέρησης φάσης (Phase Delay Method – PDM) η οποία αξιοποιεί το φαινόμενο όπου κατά την εφαρμογή όλο και αυξανόμενου εξωτερικού πεδίου η μία κορυφή του σήματος εξόδου αυξάνει σε τιμή, ενώ η δεύτερη μειώνει. Παράλληλα ο χρόνος που απαιτείται για την “αυξημένη” κορυφή μειώνεται, ενώ αυτή όπου “μειώνεται” αυξάνει σε χρόνο. Από τη χρονική διαφορά των κορυφών προκύπτουν τα επιθυμητά συμπεράσματα.



Σχήμα 2.14 Βασική αρχή της μεθόδου καθυστέρησης φάσης: (α) διεγείρον σήμα, (β) μαγνήτιση μαγνητικού υλικού, (γ) διάγραμμα μαγνητικής ροής, (δ) σήμα λήψης.

Στη βιβλιογραφία<sup>[25]</sup>, ίσως και λίγο πειραματικά, αποδεικνύεται πως για τους πυρήνες λωρίδας (ribbon) η ευαισθησία όπου αναπτύσσεται στο πηνίο λήψης, ως προς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, είναι  $E \cong 2nf\mu_0 l^2 H_x$  ενώ για δακτύλιο πυρήνα  $E \cong 0,5nfA^{0,2}\mu_0 d^{1,6}H_x$ . (Στην πρώτη περίπτωση  $H_x$  είναι το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο,  $f$  η συχνότητα του σήματος διεγέρσης,  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό,  $l$  το μήκος της λωρίδας (ribbon),  $n$  ο αριθμός των σπειρών στο πηνίο λήψης. Στη δεύτερη σχέση  $d$  είναι η διάμετρος του δακτύλιου,  $A$  η επιφάνεια όπου καταλαμβάνει ο δακτύλιος, ενώ οι υπόλοιποι όροι είναι αντιστοιχοί). Παρόλαυτα και από τις δύο περιπτώσεις μπορεί να εξαχθεί ότι το σήμα όπου λαμβάνουμε, άρα και η ευαισθησία εξαρτάται από:

- Τον αριθμό  $n$  των περιελίξεων του πηνίου λήψης.
- Τη συχνότητα του διεγείροντος σήματος.
- Το μήκος  $l$  ή τη διάμετρο  $d$  του μαγνητικού πυρήνα.

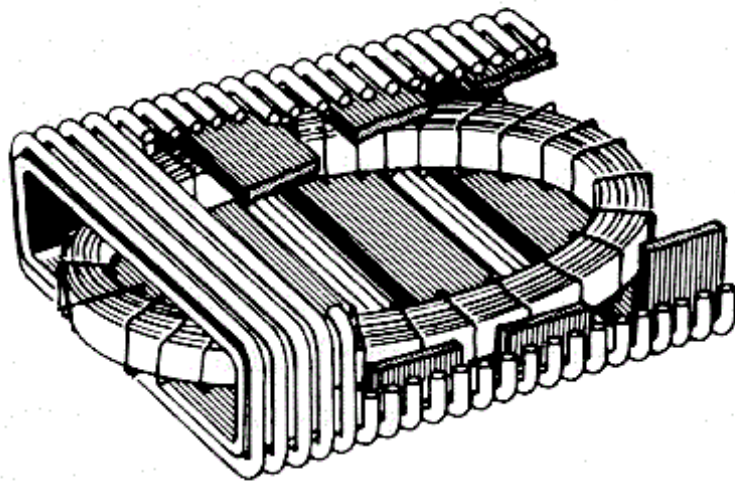
Συμπερασματικά ένας εύκολος τρόπος να αυξήσουμε την ευαισθησία είναι να αυξήσουμε το μήκος  $l$  ή τη διάμετρο του εκάστοτε πυρήνα. Η φασματική πυκνότητα θορύβου όπου παρατηρείται κυμένεται από τα  $\frac{nT}{\sqrt{Hz}}$  έως τα  $\frac{\mu T}{\sqrt{Hz}}$ .

Εφαρμογές των μαγνητικών αισθητήρων fluxgate συναντάται σε πληθώρα εφαρμογών με πιο χαρακτηριστικές:

- Γεωφυσικές μελέτες, όπου μετρώντας το μαγνητικό πεδίο της Γης και εντοπίζοντας τυχόν ανωμαλίες στο υπέδαφος όπως αποθέματα ορυκτών και αρχαιολογικούς χώρους.
- Χαρτογράφηση μαγνητικών πεδίων
- Διαστημική εξερεύνηση, όπου χρησιμοποιούνται στις διαστημικές αποστολές για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου πλανητών, δορυφόρων, κομητών κα.
- Βιοιατρικές εφαρμογές, για τη μέτρηση των ασθενών μαγνητικών πεδίων όπου παράγονται από το ανθρώπινο σώμα.
- Μη καταστροφικός έλεγχος για της εύρεση παραμένουσων τάσεων, ατελειών κα

## Κεφάλαια 3

### Τοπολογία μαγνητικών αισθητήρων fluxgate



3.1 Παράλληλη διάταξη

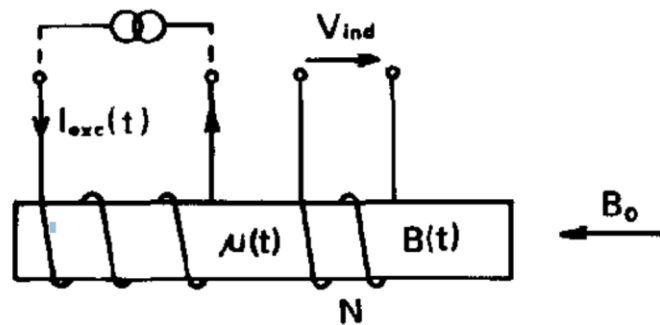
### 3.2 Ορθογωνική διάταξη

### 3.3 Τοροειδής διάταξη (δακτυλίου)

### 3.4 Race track

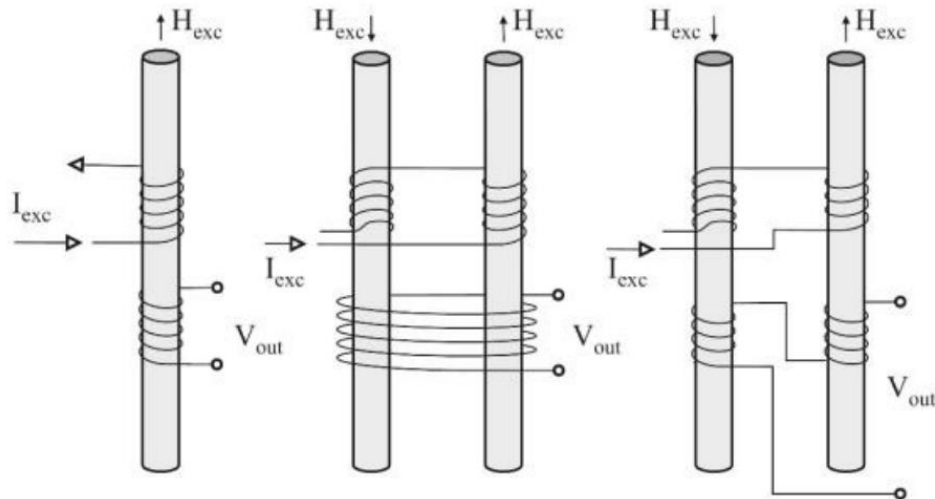
### 3.1 Παράλληλη διάταξη

Παράλληλη διάταξη στους αισθητήρες fluxgate είναι αυτή κατά την οποία τα πηνία διέγερσης και λήψης τοποθετούνται σε σειρά γύρω από το υλικό παράγοντας παράλληλου προσανατολισμού μαγνητικά πεδία. Η πιο γνωστή εκδοχή της φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το μαγνητικό υλικό διεγείρεται από εναλλασσόμενο ηλ. ρεύμα έντασης  $I_{exc}$  το οποίο διαπερνά το πηνίο διέγερσης κι έτσι η μαγνητική διαπερατότητα διαμορφώνεται με διπλάσια συχνότητα από της διέγερσης. Έτσι λαμβάνουμε τάση  $V_{ind}$  στο πηνίο λήψης.



Σχήμα 3.1 Μαγνητικός αισθητήρας fluxgate παράλληλης διάταξης.

Το βασικό μειονέκτημα της βασικής εκδοχής είναι ο μεγάλος θόρυβος λόγω επαγωγής (μονές αρμονικές). Για την απαλειφή του αξιοποιούμε τη διαδικασία όπου συζητήθηκε στο υποκεφάλαιο “3.3 Ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate” αξιοποιώντας δύο μαγνητικού πυρήνες και δύο ζεύγη πηνίων (διάταξη Vacquier, Foerster). Οι παραλλαγές φαίνονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 3.2 Παραλλαγές της παράλληλης διάταξης (από αριστερά προς τα δεξιά): απλή εκδοχή παράλληλης διάταξης με έναν μαγνητικό πυρήνα, παράλληλη διάταξη τύπου Vacquier με δύο μαγνητικούς πυρήνες, παράλληλη διάταξη τύπου Foerster με δύο μαγνητικούς πυρήνες

Παρόλο που οι αισθητήρες παράλληλης διάταξης εμφανίζουν σχετικά μεγαλύτερο θόρυβο σε σχέση με άλλες ( $150 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$  στα 1Hz για κράμα στη μορφή σύρματος<sup>[1]</sup>,  $25 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$  στα 1Hz για άμορφο σύρμα<sup>[26]</sup>) και μεγαλύτερη κατανάλωση, αφού το ευθύγραμμο μη μαγνητικό υλικό κορένεται, μαγνητικά, πιο δύσκολα, εμφανίζουν αρκετά καλή διακριτική ικανότητα στις κινήσεις του περιβάλλοντα χώρου τους<sup>[28]</sup> <sup>[29]</sup> κι έτσι αξιοποιούνται αρκετά στον εντοπισμό μικρών αντικειμένων. Ένας παράγοντας που βοηθάει αυτήν την ιδιότητα είναι πως ο άξονας στον οποίο λαμβάνουν είναι και ο άξονας του μαγνητικού πυρήνα και όχι των πηνίων. Επιπρόσθετα έχουν αρκετά χαμηλό παράγοντα απομαγνήτισης<sup>[28]</sup>, η υψηλή ευαισθησία (μέχρι και  $120 \frac{\mu V}{nT}$ )<sup>[26]</sup> τους δίνει την ευκαιρία να είναι πιο μικρός σε μήκος ο μαγνητικός πυρήνας και το ανισότροπο σχήμα τους τους δίνει μικρό “crossfield error”.<sup>[27]</sup> <sup>[26]</sup>

Σε καθεμιά από τις παραπάνω περιπτώσεις τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μαγνητικός πυρήνας μπορούν να είναι είτε κράματα μαγνητικών υλικών πχ  $Ni_{78}Fe_{15}Cu_4Mo_3$ <sup>[30]</sup>, είτε άμορφα υλικά.<sup>[26]</sup>

### 3.2 Ορθογωνική διάταξη

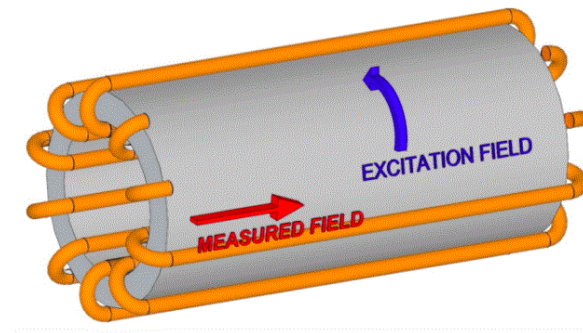
Ορθογωνική διάταξη ονομάζουμε αυτήν όπου τα πηνία διέγερσης και λήψης τοποθετούνται κάθετα το ένα ως προς το άλλο με τρόπο όπου τα μαγνητικά πεδία διέγερσης και λήψης να είναι συνεχώς κάθετα μεταξύ τους. Αν και αρχικά εφευρέθηκαν ταυτόχρονα με τα μαγνητόμετρα fluxgate παράλληλης διάταξης, σχετικά γρήγορα σταμάτησε η χρήση τους, καθώς η παράλληλη διάταξη επέφερε καλύτερα αποτελέσματα. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια, με την ανάγκη για όλο και πιο μικρές και απλές διατάξεις έχει ξανάρθει στο προσκήνιο η έρευνα αυτής της διάταξης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ορθογωνική διάταξη είναι αυτή όπου το μαγνητικό πεδίο στη λήψη, συνήθως στη διεύθυνση του μαγνητικού υλικού, στη διεύθυνση ευαισθησίας του, είναι συνεχώς κάθετο στο μαγνητικό πεδίο από τη διέγερση. Να τονίσουμε εδώ πέρα πως μία “ασάφεια” ως προς τον χαρακτηρισμό “πηνίο λήψης” και “πηνίου διέγερσης” είναι σκόπιμη καθώς σε πολλές περιπτώσεις η διάταξη δίνει την ευκαιρία να μην χρησιμοποιούμε πηνίο διέγερσης.

Οι βασικές κατηγορίες ορθογωνικών fluxgate αισθητήρων χωρίζονται βάσει της γεωμετρίας ή του είδους του μαγνητικού υλικού:

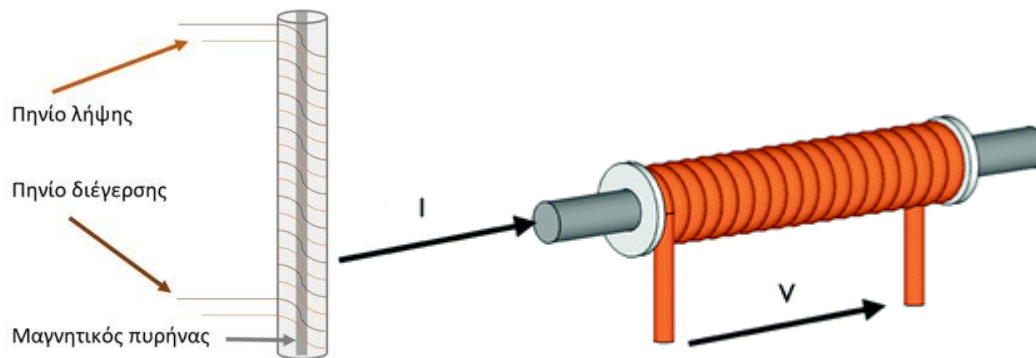
- Κυλινδρικός πυρήνας: Η πρώτη, ιστορικά, μορφή ορθογωνικού αισθητήρα fluxgate είναι αυτή με τον μαγνητικό πυρήνα σε μορφή κυλίνδρου όπου διεγείρεται από καλώδιο και το πηνίο λήψης έχει τοποθετηθεί με τρόπο όπως φαίνεται Σχήμα 4.4.

Μία μεγάλη αδυναμία αυτής της μορφής της διάταξης είναι ο δύσκολος τρόπος τυλίγματος του πηνίου λήψης, παρόλαυτα αν επιτευχθεί μεγάλος αριθμός περιελίξεων τότε μπορεί να παραχθεί και μεγάλη διέγερση.



Σχήμα 3.3 Ορθογωνικός αισθητήρας fluxgate με κυλινδρικό μαγνητικό πυρήνα.

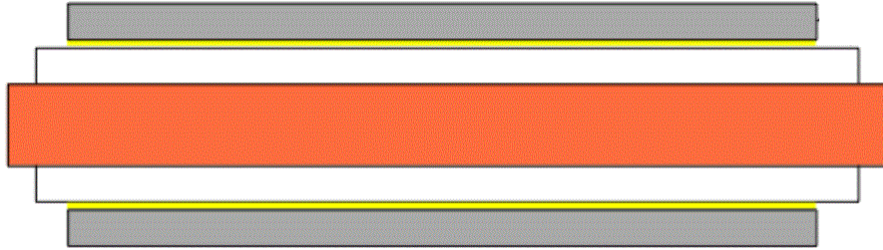
- Πυρήνας σε μορφή σύρματος ή λωρίδας (ribbon): Χρησιμοποιώντας μαγνητικό πυρήνα από σύρμα ή λωρίδα (ribbon) υλικού μπορούμε να διεγείρουμε το υλικό χωρίς τη χρήση πηνίου διέγερσης, αλλά απευθείας. Το πηνίο λήψης περιελίσσεται γύρω από τον πυρήνα. Αυτή η απλοποίηση αποτελεί πολύ σημαντικό βήμα για την miniaturization των μαγνητικών αισθητήρων καθώς μπορούν να παραχθούν πυρήνες με διάμετρο 10-100μm.<sup>[26]</sup> Η διέγερση, εδώ, δεν είναι τόσο μεγάλη όσο αυτής του κυλινδρικού πυρήνα.



Σχήμα 3.4 Ορθογωνικός αισθητήρας fluxgate με μαγνητικό πυρήνα σε μορφή σύρματος ή λωρίδας (ribbon).

- Πυρήνας από σύνθετο υλικό σε μορφή σύρματος: Λόγω των απλουστεύσεων όπου επέφερε η διάταξη με πυρήνα σε μορφή σύρματος έγινε αρκετά διαδεδομένη. Παρόλαυτα έχει ένα πολύ βασικό μειονέκτημα όπου δεν μπορεί να μην παρθεί υπόψη: Το κέντρο του σύρματος συνήθως είναι μη κορεσμένο. Αυτό συμβαίνει καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα, κατά τη διέλευσή του, έχει την τάση, τμήματά του, να μετατοπίζονται προς τα όρια του σύρματος, κατά τη μετακίνηση (skin effect). Έτσι καταλήγουν τμήματα του σύρματος να μην έχουν κορεστεί πλήρως κι έτσι αυτό μεταφέρεται ως θόρυβος στο σήμα λήψης. Για αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο έχει προταθεί<sup>[31]</sup> <sup>[32]</sup> να χρησιμοποιηθεί σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από πυρήνα χαλκού μέσα σε περίβλημα κράματος νικελίου-σιδήρου. Λόγω της χαμηλότερης αντίστασης του χαλκού έναντι του

κράματος το ηλ. ρεύμα προτιμάει να διέρχεται μέσα από τον χαλκό περιορίζοντας έτσι το φαινόμενο. Για αρκετά μεγάλες διεγέρσεις το σύνθετο υλικό πρέπει να είναι άλλο για να περιορίσει περισσότερο αυτόν τον θόρυβο, έτσι τοποθετούμε σύρμα χαλκού σε περίβλημα γαλιού. Στη συνέχεια η διάταξη επιχρυσώνεται και κλείνεται μέσα σε σιδηρομαγνητικό κέλυφος.

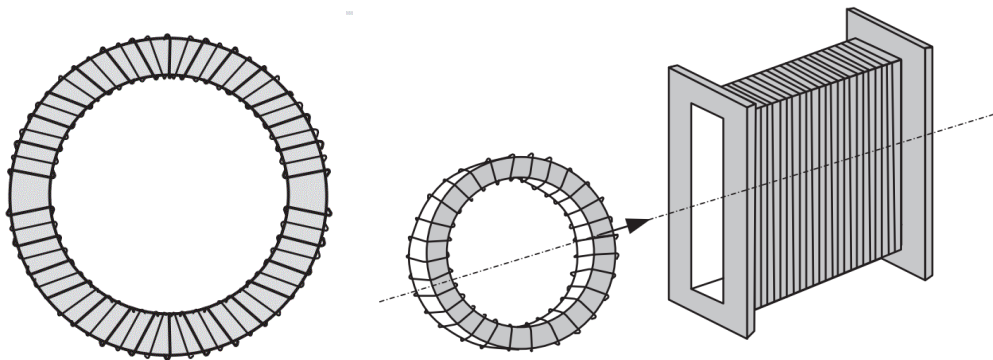


Σχήμα 3.5 Διατομή μαγνητικού πυρήνα αποτελούμενο από σύρμα χαλκού έγκλειστο σε γυάλινη μόνωση, επιχρυσωμένο, μέσα σε κέλυφος σιδηρομαγνητικού υλικού.

- Πυρήνας πολλαπλών συρμάτων: Για να ξεπεραστεί η χαμηλή ευαισθησία συγκριτικά με άλλες διατάξεις έχει παρατηρηθεί πως η ευαισθησία ενός αισθητήρα αυξάνεται πολλαπλασιαστικά όταν χρησιμοποιούνται παραπάνω σύρματα ως πυρήνες. Για παράδειγμα σε αισθητήρα παρατηρήθηκε πως η ευαισθησία 65πλασιάστηκε με την χρήση 16 συρμάτων αντί ενός.<sup>[33] [34]</sup>

### 3.3 Τορροειδής διάταξη (δακτυλίου)

Τορροειδή διάταξη ονομάζουμε αυτήν όπου το μαγνητικό υλικό βρίσκεται σε μορφή δακτυλίου (Σχήμα 3.6)



Σχήμα 3.6 Μαγνητικός πυρήνας σε σχήμα τόρου, τυλιγμένος με σύρμα.

Η γεωμετρία των μαγνητικών αισθητήρων fluxgate τορροειδούς διάταξης αποτελεί την πιο ταιριαστή για χαμηλό θόρυβο.<sup>[35]</sup> Κατα βάση οι παράγοντες όπου επιδρούν σε αυτό είναι:

- Η απουσία ελεύθερων άκρων (όπως πχ στη παράλληλη ή ορθογωνική διάταξη). Συνήθως αυτές οι περιοχές σχετίζονται με αυξημένα ποσοστά θορύβου.
- Στην πιθανότητα παραμένουσας τάσης στον μαγνητικό πυρήνα, αυτή κατανέμεται ομοιόμορφα.
- Λόγω της κυκλικής τους μορφής εξαλείφονται ασυμμετρίες λόγω περιστροφής κατά τις μετρήσεις.



Επίσης, όμως, η γεωμετρία παίζει και πολύ σημαντικό ρόλο στη ευαισθησία του αισθητήρα. Ο γενικός κανόνας που φαίνεται να ισχύει είναι πως όσο μεγαλύτερη η διάμετρος του δακτυλίου, τόσο καλύτερη η ευαισθησία.<sup>[36]</sup> Βάσει τις εκάστοτε διαμέτρου οι υπόλοιπες χωρικές μεταβλητές τους μαγνητικού πυρήνα θα πρέπει να βρεθούν πειραματικά.<sup>[37]</sup>

Για παράδειγμα σε μαγνητικό αισθητήρα δοσμένης σύνθεσης<sup>[38]</sup> για όλο και μεγαλύτερη διάμετρο του δακτυλίου παρατηρούνταν όλο και καλύτερη ευαισθησία, αλλά και μικρότερος θόρυβος. Συγκεκριμένα για διαμέτρους 20mm, 15mm, 10mm παρατηρήθηκε θόρυβος  $1 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$ ,  $2 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$ ,  $10 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$  αντίστοιχα.

Βέβαια θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως καταρχήν λόγω της γεωμετρίας του δακτυλίου θα υπάρχει μεγαλύτερη απομαγνήτιση (συγκριτικά με τις άλλες διατάξεις) έτσι η ευαισθησία ξεινάνει από χαμηλότερες τάξεις.<sup>[39]</sup>

Βάσει μαθηματικών μοντέλων με πολύ καλή πειραματική αντιστοίχιση μπορούμε να βρούμε την ευαισθησία ενός τορροειδούς fluxgate αισθητήρα<sup>[38]</sup> όταν διαρρέεται από ημιτονοειδές ηλεκτρικό ρεύμα από τη σχέση:

$$S = \frac{V_{2f}}{|H_a|} = \frac{16NAfM_S}{H_k - H_c + 3,66M_S \frac{A}{d^2}} \sqrt{\mathcal{F}(H_0, H_k, H_c)}$$

(Δίνονται:  $V_{2f}$  είναι η τάση όπου μετράμε στα άκρα του πηνίου λήψης η οποία είναι διπλάσιος συχνότητας από την αρχική,  $H_a$  το επιβαλλόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο,  $N$  ο αριθμός των σπειρών,  $d$  η διάμετρος του δακτυλίου,  $A$  η επιφάνεια όπου καλύπτει,  $M_S$  η μαγνήτιση κορεσμού του μαγνητικού υλικού,  $H_c$  η τιμή του συνεκτικού πεδίου του,  $H_k$  η τιμή του μαγνητικού πεδίου του όταν έχει κορεστεί μαγνητικά και  $H_0$  το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ηλεκτρό ρεύμα. Ο όρος  $\mathcal{F}$  αποτελεί απλώς έναν αριθμητικό παράγοντα όπου εξαρτάται μόνο από τις τιμές  $H_0$ ,  $H_k$ ,  $H_c$ .)

Ο όρος  $3,66M_S \frac{A}{d^2}$  στον παρονομαστή εκφράζει το μαγνητικό πεδίο απομαγνήτισης όπως προκύπτει<sup>[40]</sup> από τον παράγοντα απομαγνήτισης  $H_{\text{απομαγνήτισης}} = D\mu H_{\text{εσωτερικά}}$ , με  $D = 2 \cdot 1,83 \frac{A}{d^2} = 3,66 \frac{A}{d^2}$  να είναι ο παράγοντα απομαγνήτισης. Στην τορροειδή διάταξη ο συντελεστής απομαγνήτισης είναι μεγαλύτερος συγκριτικά με άλλες διατάξεις όπως πχ την παράλληλη.<sup>[1]</sup>

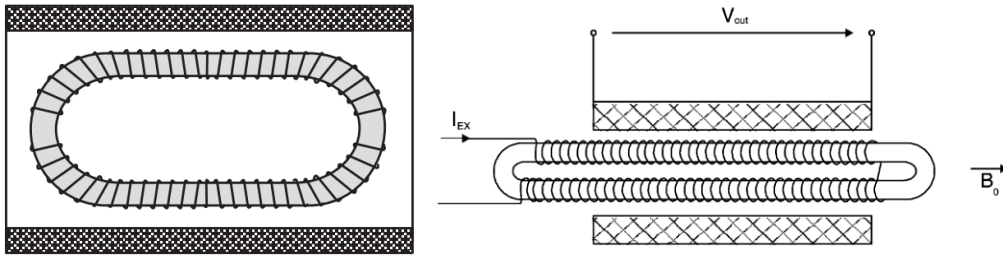
Επιβεβαιώνεται από τα παραπάνω η εξάρτηση της ευαισθησίας καταρχήν από τις ιδιότητες του μαγνητικού υλικού (μέσω των τιμών  $H_c$ ,  $H_k$ ,  $M_S$ ) και από τις διαστάσεις του δακτυλίου (αφού  $D=3,66A/d^2$ ).

Τέλος, αναφορικά με την επίδραση της γεωμετρίας, οι αισθητήρες fluxgate με τορροειδή διάταξη έχουν μικρότερη κατανάλωση από τις υπόλοιπες καθώς πιο εύκολα φέρνουν τον μαγνητικό πυρήνα σε κατάσταση κορεσμού.<sup>[41]</sup>

Όσον αφορά τα μαγνητικά υλικά με τα οποία κατασκευάζουμε τέτοιες διατάξεις, αυτά μπορούν να είναι είτε οι δακτύλιοι καθαυτοί να είναι άμορφοι<sup>[1]</sup>, είτε αξιοποιούμε κράματα σύνθεσης  $Co$ <sup>[42]</sup> <sup>[43]</sup>, (πχ  $CoFeSiB$ ,  $FeSiB$  κα) ή και του γνωστού κράματος 6-81 (με 6%  $Mo$ , 81,3%  $Ni$  και το υπόλοιπο  $Fe$ )<sup>[44]</sup> συνήθως στη μορφή λωρίδων (ribbon) τυλιγμένο σε κυλινδρική βάση στήνοντας, έτσι, το σχήμα δακτυλίου.

### 3.4 Race track

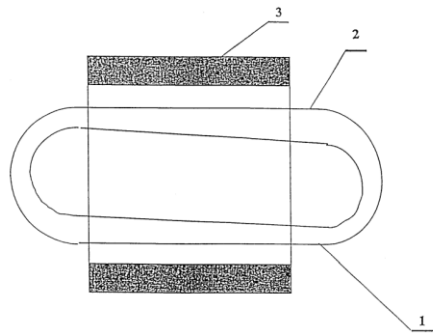
Λόγω του μεγάλου συντελεστή απομαγνήτισης στους πυρήνες σε σχήμα δακτυλίου, προτάθηκε η race track διάταξη. Η συγκεκριμένη διάταξη βρίσκει τον μαγνητικό πυρήνα σε μορφή οβάλ<sup>[45]</sup> με το πηνίο διέγερσης να περιελίσσεται πάνω στον πυρήνα και το πηνίο λήψης να το εγκλωβίζει. Σχήμα 4.8



Σχήμα 3.7 Αναπαραστάσεις αισθητήρων fluxgate, διάταξης race track.

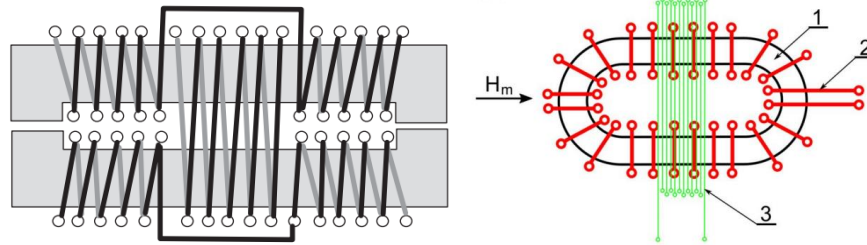
Η race track διάταξη λειτουργεί με τις ίδιες αρχές λειτουργίας με την τορσειδή.<sup>[46]</sup> Από τα βασικά της πλεονεκτήματα είναι πως έχει πάρα πολύ καλή ευαισθησία,<sup>[47]</sup> με χαμηλή ευαισθησία στα κάθετα πεδία λόγω της μικρότερης τιμής του παράγοντα απομαγνήτισης.<sup>[48]</sup> Η κλειστού τύπου δομή του πυρήνα κληρονομεί στις race track διατάξεις αρκετά χαμηλό θόρυβο, μέχρι και  $6 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$  (για άμορφο πυρήνα 65mm, στα 1Hz)<sup>[49]</sup> ή  $10 \frac{pT}{\sqrt{Hz}}$  (για άμορφο πυρήνα 70mm).<sup>[50]</sup>

Ένα κύριο μειονέκτημα της διάταξης αυτής είναι ότι για μικρά σήματα (minimum feedthrough) δεν είναι αξιόπιστη καθώς στο σήμα εξόδου συναντάται ένα ψευδοσήμα το οποίο περιορίζει την χρησιμότητά της<sup>[51]</sup>. Για να ξεπεραστεί αυτή η αδυναμία ο Pavel Ripka πρότεινε μία διαμόρφωση στη γεωμετρία του μαγνητικού πυρήνα.<sup>[52]</sup> Ο διαμορφωμένος πυρήνας (πατέντα διεθνούς εμβέλειας) είναι ελαφρώς πιο παχύς στη μία πλευρά του μεγάλου άξονα και ελαφρώς πιο αδύνατος στην άλλη πλευρά. Η ελαφρά μη συμμετρικότητα του σχήματος φαίνεται να ξεπερνάει τη δυσκολία προσαρμογής.



Σχήμα 3.9 Αναπαράσταση αισθητήρα fluxgate, διάταξης race track, με μη συμμετρικό μαγνητικό πυρήνα. 1) Η πλευρά του μαγνητικού πυρήνα με ελαφρώς πιο αδύνατη πλευρά, 2) Η πλευρά του μαγνητικού πυρήνα με ελαφρώς πιο παχιά πλευρά, 3) Το πηνίο λήψης.

Επειδή το τύλιγμα του πηνίου αποτελεί, συνήθως, χειροκίνητη, χρονοβόρα και δύσκολη δουλειά, τα τελευταία χρόνια αξιοποιείται η χρήση της εκτύπωσης ηλεκτρολογικών πλακετών (Printed Circuit Board – PCB).<sup>[53]</sup>

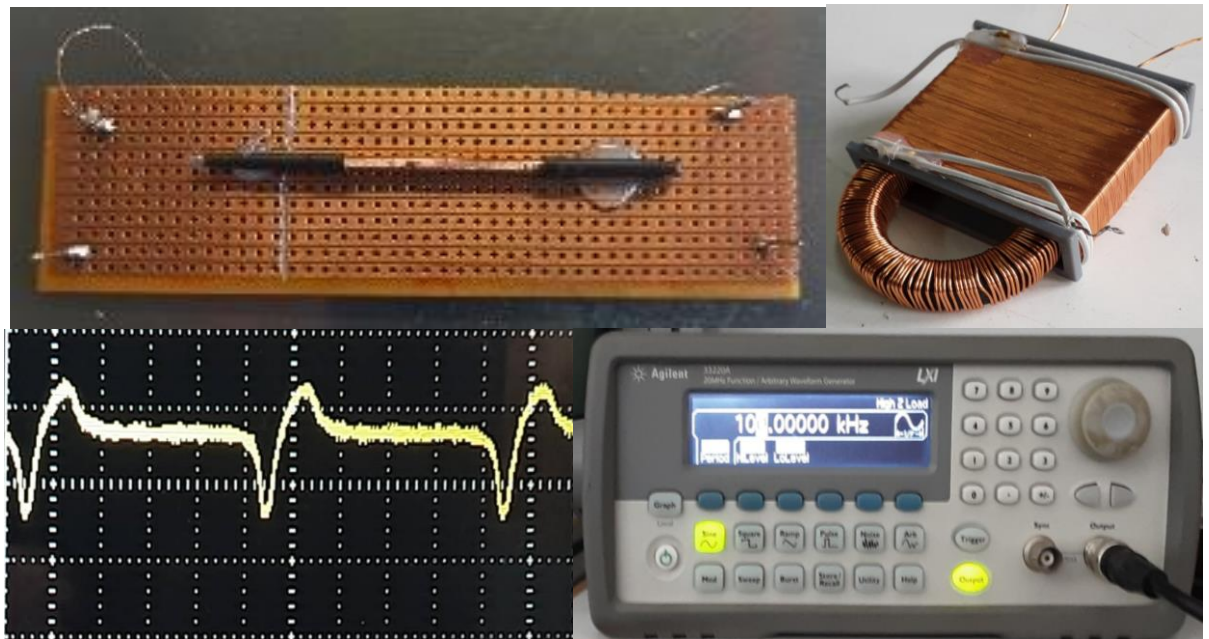


Σχήμα 3.10 Αναπαράσταση αισθητήρα fluxgate, διάταξης race track, με PCB.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του μαγνητικού πυρήνα είναι άμορφα, συνήθως κράματα Κοβαλτίου (Vitrokon 8116:  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ , Vitrovac 6025<sup>[53]</sup> κλπ)

## Κεφάλαιο 4

### Οι αισθητήρες του εργαστηρίου και οι επιδόσεις τους



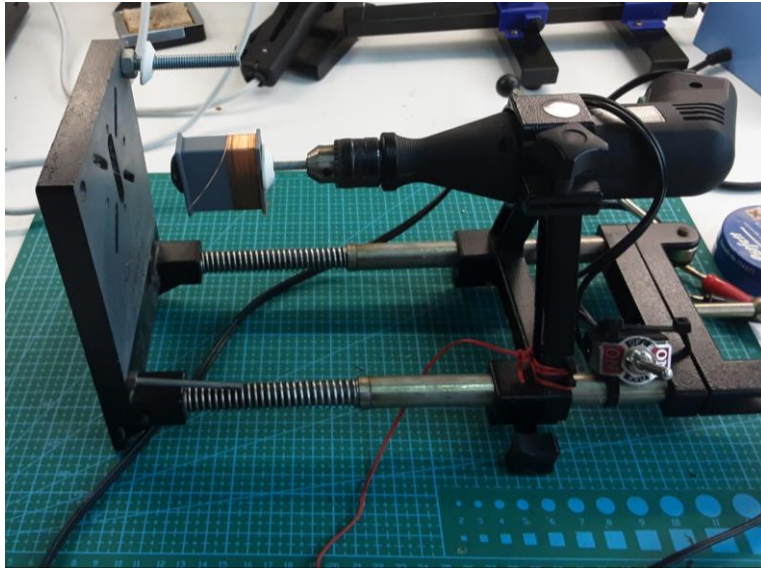
4.1 Οι ορθογωνικοί αισθητήρες

4.2 Ο τορροειδής αισθητήρας

### 4.1 Οι ορθογωνικοί αισθητήρες

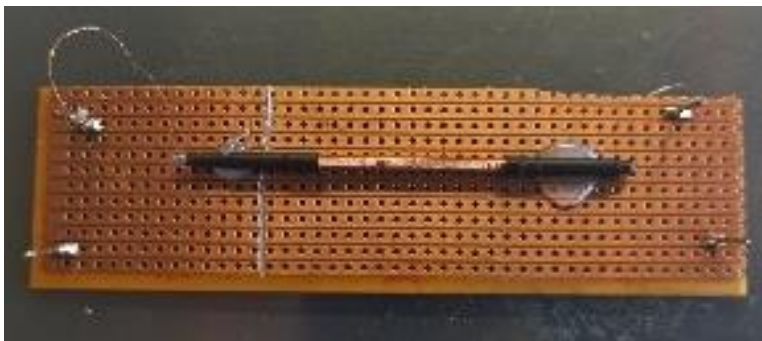
#### 4.1.1 Εργαστηριακή-πειραματική διάταξη

Για τη δημιουργία του αισθητήρα χρησιμοποιήσαμε γυάλινο σωλήνα 4cm πολύ μικρής διατομής στον οποίο τυλίξαμε σύρμα χαλκού διαμέτρου 0,1mm κάνοντας πέντε στρώσεις περιελίξεων. Οι περιλήξεις του πηνίου έγιναν με τη βοήθεια εργαστηριακού εξοπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1



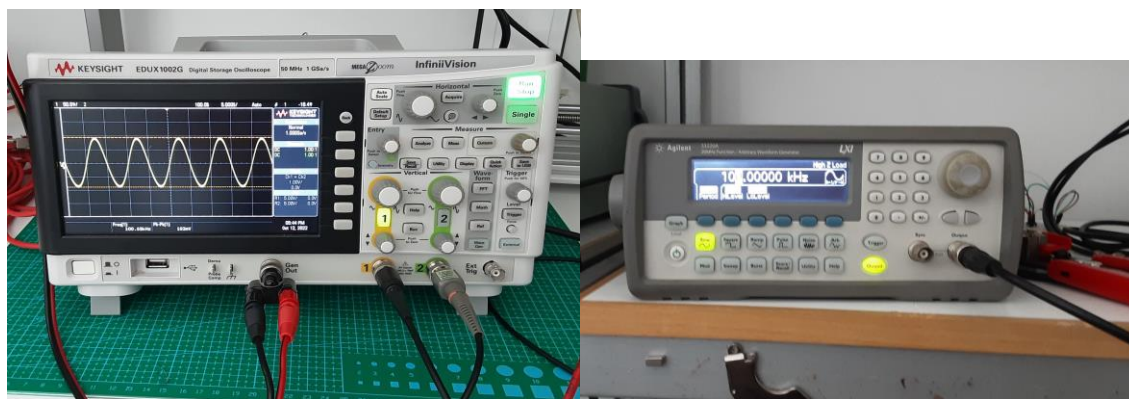
Σχήμα 4.1 Ημιαυτοματοποιημένος μηχανισμός περιέλιξης σύρματος με τη χρήση ηλεκτρικού τρυπανιού.

Για να μην χαλαρώσουν οι δακτύλιοι του πηνίου, όταν σχηματίστηκαν οι επιθυμητές στρώσεις περιλήξεων, τα άκρα συγκρατήθηκαν με θερμοσυστελώμενο υλικό. Η διάταξη κολλήθηκε με υγρή κόλλα σε πλακέτα ώστε να μην αποσπάται. (Σχήμα 4.2)



Σχήμα 4.2 Ο ορθογωνικός αισθητήρας fluxgate απουσία του μαγνητικού πυρήνα.

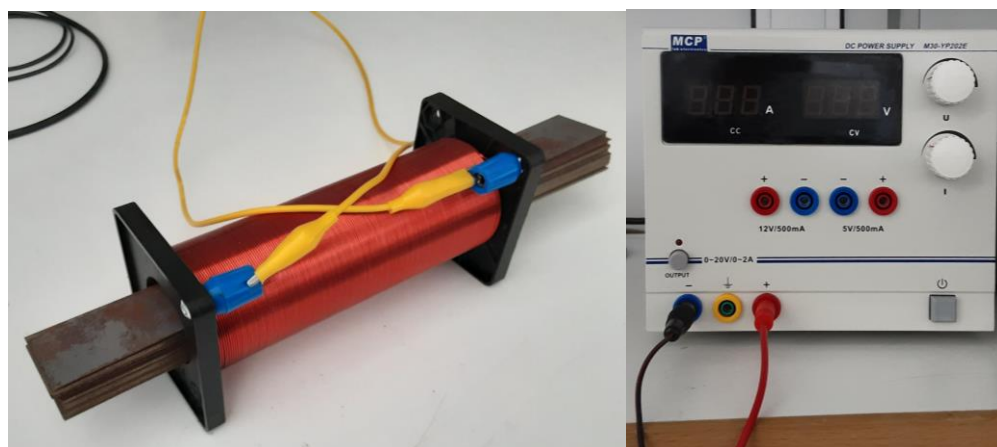
Στην πλακέτα έγινε ειδικό χάραγμα ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος βραχυκυκλώματος. Τα άκρα του πηνίου συνδέονται με ακίδες οι οποίες βρίσκονται στην ίδια πλευρά της πλακέτας (οι πάνω ακίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2), ενώ το μαγνητικό υλικό, το οποίο θα διέλθει του γυάλινου σωλήνα θα συνδεθεί με τις άλλες δύο ακίδες για τη διέγερση. Τα άκρα του πηνίου λήψης συνδέθηκαν με παλμογράφο (Σχήμα 4.3 Αριστερά) και τα άκρα διέγερσης συνδέθηκαν με τη γεννήτρια διέγερσης (Σχήμα 4.3 Δεξιά).



Σχήμα 4.3 Αριστερά: Ο παλμογράφος όπου συνδέθηκε με το πηνίο λήψης, Δεξιά: Η γεννήτρια διέγερσης.

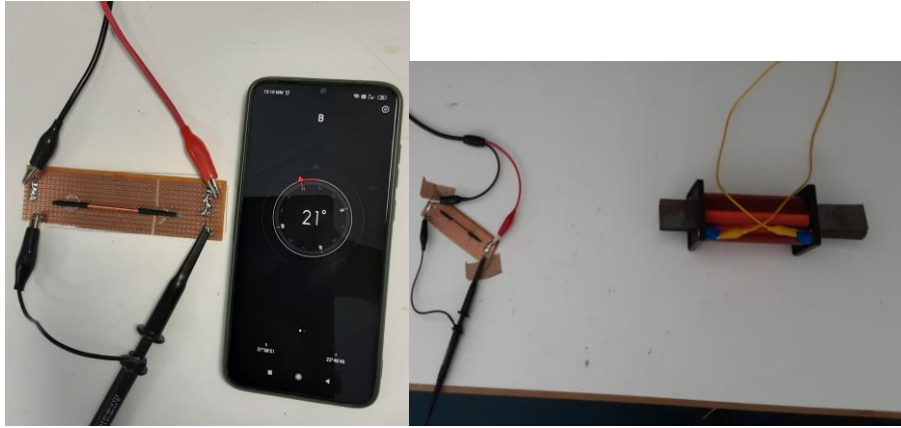
Φαίνεται πως ο αισθητήρας παραμένει αναλλοίωτος, ανεξάρτητα από τον μαγνητικό πυρήνα όπου θα φιλοξενεί στις μετρήσεις. Για καθένα διαφορετικό μαγνητικό υλικό, απλά αφαιρούμε το προηγούμενο και τοποθετούμε το καινούργιο μέσα στο πηνίο συνδέοντας τον στα άκρα διέγερσης.

Η διάταξη, τέλος, τοποθετήθηκε κοντά σε ηλεκτρομαγνήτη όπου βρισκόταν εναλλάξ σε ενεργή και μη ενεργή κατάσταση, δημιουργώντας έτσι στο σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 4.4 Αριστερά: Ο ηλεκτρομαγνήτης όπου χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, Δεξιά: Η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος συνδεδεμένη σε αυτόν.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι μετρήσεις γινόντουσαν στο ίδιο συγκεκριμένο σημείο με το ίδιο προσανατολισμό (ως προς το μαγνητικό πεδίο της Γης), στις 21° ως προς τον Βορρά και στη ίδιο απόσταση ως προς τον ηλεκτρομαγνήτη όπου παρήγαγε το σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Επίσης η πολικότητα της τάσης διέγερσης ήταν η ίδια σε όλες τις μετρήσεις. Τα παραπάνω παρήγαξαν υπόψη για να μπορεί να είναι πιο άμεση η συσχέτιση ανάμεσα στους διαφορετικούς μαγνητικούς πυρήνες και να ελαχιστοποιήσουμε περιττά σφάλματα.



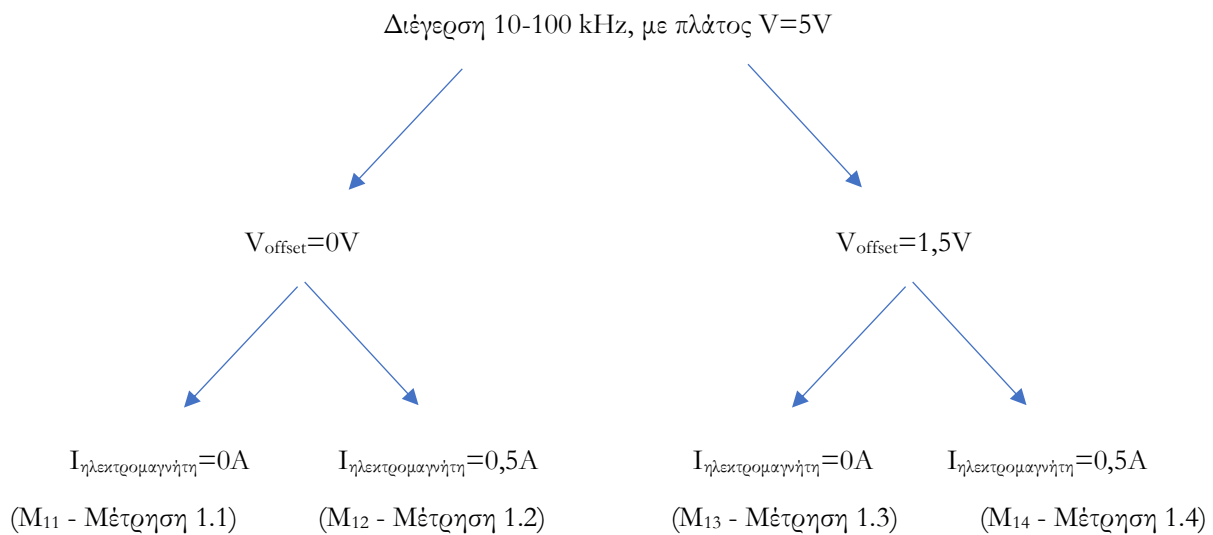
Σχήμα 4.5 Δεξιά: Ο αισθητήρας αναφορικά με τον προσανατολισμό του ως προς το μαγνητικό πεδίο της Γης. Αριστερά: Ο αισθητήρας σε σταθερή απόσταση από τον ηλεκτρομαγνήτη όπου δημιουργούσε το σταθερό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

#### 4.1.2 Οι μαγνητικοί πυρήνες - Η διαδικασία της μέτρησης.

Έγιναν μετρήσεις σε τέσσερις διαφορετικούς αισθητήρες με μαγνητικούς πυρήνες: α) σύρμα CoFeSiB ( $\Delta_1$  - Δείγμα 1), β) λωρίδα (ribbon) CoFeSiB ( $\Delta_2$  - Δείγμα 2), γ) σύρμα FeSiB ( $\Delta_3$  - Δείγμα 3), δ) λωρίδα (ribbon) FeSiB ( $\Delta_4$  - Δείγμα 4) .

Η γεννήτρια διέγερσης παράγαγε αρμονικά σήματα από τα 10 έως τα 100 kHz με βήμα 5 kHz πλάτους 5V. Πάρθηκαν δύο σαι μετρήσεων, ένα με  $V_{\text{offset}}=0$  και ένα με  $V_{\text{offset}}=1,5V$ . Για καθένα από τα προηγούμενα σαι πάρθηκαν πάλι σε ζεύγη, μία φορά χωρίς τη επίδραση σταθερού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και μία υπό την επίδρασή του. Το σταθερό μαγνητικό πεδίο δημιουργήθηκε όταν διερχόταν από τον ηλεκτρομαγνήτη ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $I_{\text{ηλεκτρομαγνήτη}}=0,5A$ .

Οπότε καταλήγουμε σε τέσσερα σαι μετρήσεων:

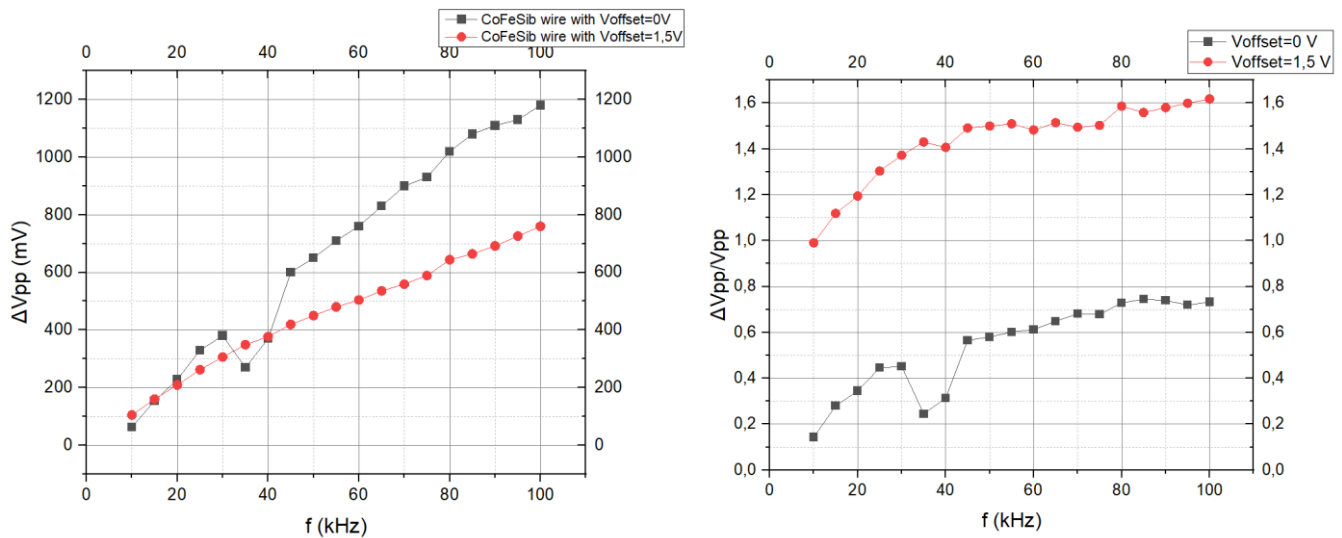


Το φυσικό μέγεθος όπου μετρήθηκε ήταν το πλάτος της τάσης όπου αναπτυσσόταν από τη μία θετική κορυφή του σήματος λήψης έως την αρνητική κορυφή ( $V_{pp} - V_{\text{peak to peak}}$ ). Οι μετρήσεις βρίσκονται αναλυτικά στο παράρτημα. Έτσι μπορεί να υπολογισθεί η διαφορά  $\Delta V_{pp}$  χωρίς και με την επόδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σταθερής έντασης.

### 4.1.3 Μετρήσεις-αποτελέσματα

Παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Για το σύρμα CoFeSiB



Σχήμα 4.6 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα σύρμα CoFeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.

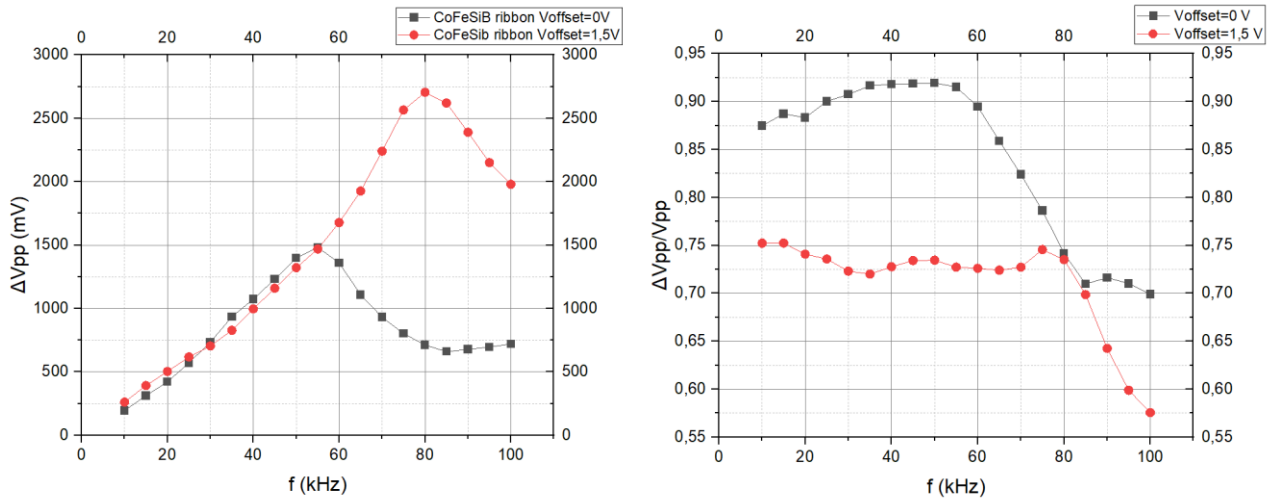


Σχήμα 4.7 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητας  $f=10$  kHz. Αριστερά: χωρίς την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη, Δεξιά: Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη.



Παρατηρείται αρκετά καλή απόκριση του μαγνητικού υλικού καθώς παρατηρείται πως ενεργοποιείται και χωρίς τη χρήση τάσης  $V_{offset}$ . Επίσης έχει αρκετά καλή γραμμικότητα στα αποτελέσματα. Η απόκλιση μίας μέτρησης όπου παρατηρείται μπορούμε να υποθέσουμε πως ανήκει στη σφαίρα των σφαλμάτων.

Για τη λωρίδα (ribbon) CoFeSiB



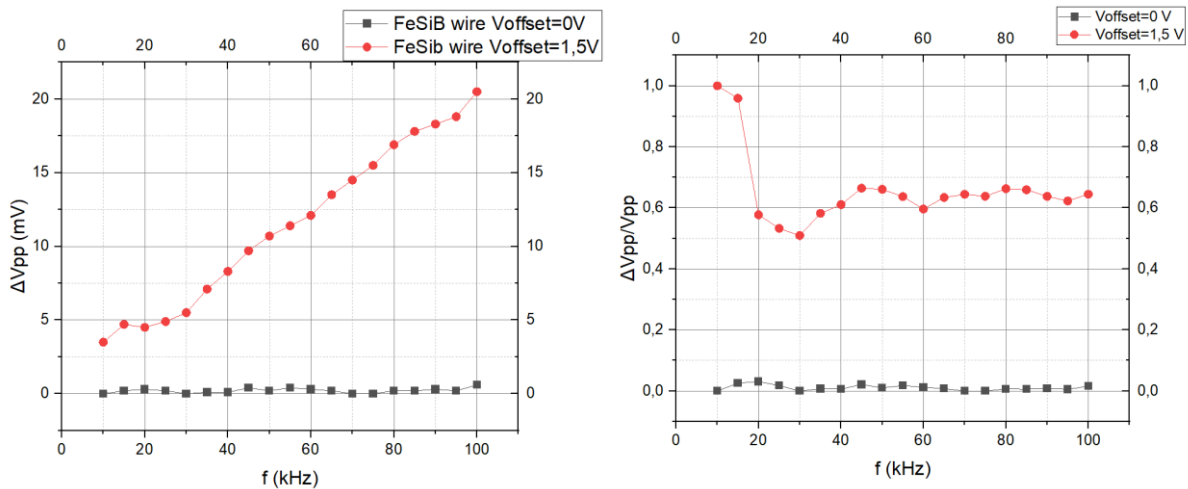
Σχήμα 4.8 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα λωρίδα (ribbon) CoFeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



Σχήμα 4.9 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα  $f=10$  kHz. Αριστερά: χωρίς την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη, Δεξιά: Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη.

Για την περιοχή συχνοτήτων όπου παρατηρούμε το φαινόμενο fluxgate παρατηρείται αρκετά όμοια συμπεριφορά είτε με τη χρήση  $V_{offset}$  είτε χωρίς, με σταθερό σήμα λήψης.

Για το σύρμα FeSiB



Σχήμα 4.10 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα σύρμα FeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



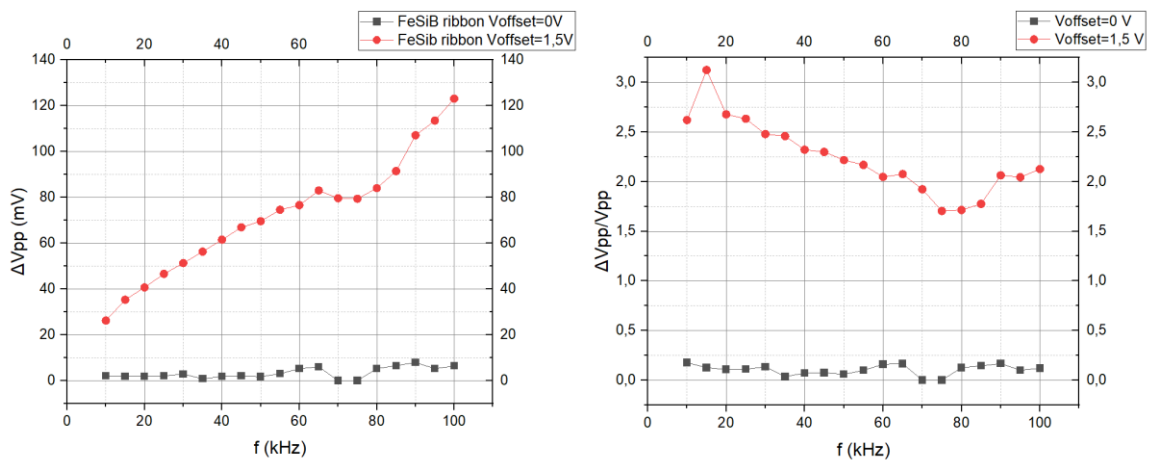
Σχήμα 4.11 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα  $f=10$  kHz. Αριστερά: χωρίς την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη, Δεξιά: Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνήτη.

Για το σύρμα FeSiB μπορεί άμεσα να παρατηρηθεί πως η θολή αναπαράσταση στον παλμογράφο σημαίνει πως το σήμα έχει αρκετό θόρυβο (Σχήμα 4.11) και δεδομένου ότι ο αισθητήρας λειτουργεί στις ίδιες συνθήκες με τους προηγούμενους (άρα δεν είναι ελαττωματικό κάποιο μέρος της διάταξης) ήδη συμπερένουμε ότι η χρήση τέτοιου υλικού σε μορφή σήματος είναι μειονεκτική.

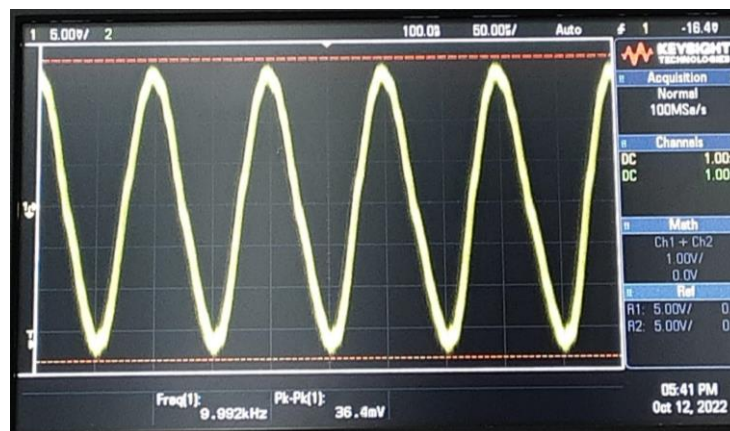
Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός πως στα προηγούμενα μαγνητικά υλικά υπήρχε η παρουσία του Κοβαλτίου, το οποίο είναι γνωστό για τη συμβολή του στη μείωση των μαγνητοσυστολικών φαινομένων, τα οποία παράγουν θόρυβο, αφού με τη χρήση Κοβαλτίου το μαγνητικό υλικού προσεγγίζει τα χαρακτηριστικά μαλακού μαγνητικού υλικού.

Πρέπει να αναφερθεί επίσης πως το μαγνητικό υλικό δεν παρουσιάζει απόκριση παρά μόνο με τη χρήση τάσης  $V_{\text{offset}}$ .

Για τη λωρίδα (ribbon) FeSiB



Σχήμα 4.12 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  στον αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα λωρίδα (ribbon) FeSiB με σήμα διέγερσης 5V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



Σχήμα 4.13 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, για σήμα διέγερσης πλάτους 5V και συχνότητα  $f=10$  kHz.

Για το ribbon FeSib παρατηρούνται όμοια αποτελέσματα με το σύρμα, με τη διαφορά ότι στο βαθμό όπου ανταποκρίνεται ο αισθητήρας, έχει πιο καλή απόκριση.

## 4.2 Ο τοροειδής αισθητήρας

### 4.2.1 Εργαστηριακή-πειραματική διάταξη

Σε αντίθεση με τη ορθογωνική διάταξη όπου ο αισθητήρας κατασκευάστηκε ανεξάρτητα των μαγνητικών υλικών και στη συνέχεια τους φιλοξενούσε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ο μαγνητικός αισθητήρας fluxgate τοροειδούς διάταξης δεν έχει αυτήν την πολυτέλεια.

Ο μαγνητικός άμορφος πυρήνας Metglass (δεν κατασκευάστηκε στο εργαστήριο) είναι κυλινδρικής μορφής με κάποιο πάχος (Πίνακας 4.1).

	Μαγνητικός πυρήνας (Π)
Ύψος (mm)	7,05
Εξωτερική διάμετρος (mm)	35,44
Εσωτερική διάμετρος (mm)	25,04
Πάχος (mm)	5,20

Πίνακας 4.1 Οι διαστάσεις του μαγνητικού πυρήνα όπου χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του μαγνητικού αισθητήρα fluxgate τοροειδούς διάταξης.

Ο πυρήνας τυλίχθηκε στο χέρι, χωρίς τη βοήθεια μηχανής. Κατά τη διάρκεια της περιλήξης του σύρματος, διαμέτρου 0,5mm δόθηκε πολύ μεγάλη προσοχή σε δύο πράγματα. Πρώτον να μην επικαλύπτονται οι δακτύλιοι του πηνίου (θα αποτελέσει το πηνίο διέγερσης) και δεύτερον, τουλάχιστον στην εσωτερική καμπύλη πλευρά του μαγνητικού πυρήνα, οι σπείρες να είναι όσο πιο πυκνές γίνεται.

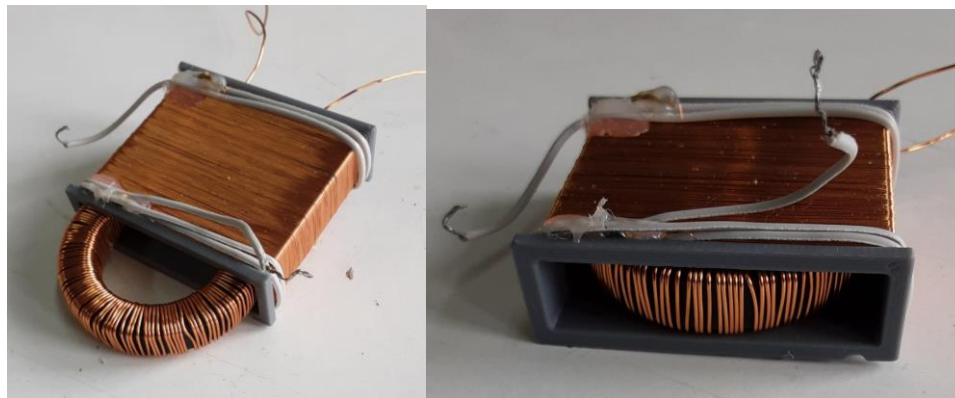


Σχήμα 4.14 Ο μαγνητικός πυρήνας Π με το πηνίο διέγερσης.

Για τη δημιουργία του πηνίου λήψης επιστρατεύθηκε η χρήση 3D printer όπου σχεδιάστηκε πλαίσιο όπου θα μπορούσε να φιλοξενήσει τον μαγνητικό πυρήνα, στις νέες διαστάσεις που έχει πλέον λόγω του πάχους του σύρματος του πηνίου διέγερσης.



Σχήμα 4.15 Αριστερά: το ψηφιακό μοντέλο όπου τυπώθηκε για την κατασκευή του πηνίου λήψης, Δεξιά: Το εκτυπωμένο πλαίσιο, τυλιγμένο με το πηνίο λήψης.



Σχήμα 4.16 Ο αισθητήρας fluxgate τοροειδούς διάταξης.

Η υπόλοιπη εργαστηριακή διάταξη είναι όμοια με αυτήν για τους ορθογωνικούς αισθητήρες.

## 4.2.2 Η διαδικασία της μέτρησης

Μετά τη μελέτη της συμπεριφοράς της διάταξης για διάφορες τιμές διέγερσης έγιναν πειραματικές μετρήσεις σε διαστήματα τα οποία παρουσίαζαν τις καλύτερες συμπεριφορές. Για τον Π υπό την επίβλεψη του πηνίου λήψης έγιναν οι παρακάτω μετρήσεις:

1. Μέτρηση του  $\Delta V_{pp}$  χωρίς και με την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου για μεταβλητή τάση  $V_{offset}$  (από τα 200 έως τα 1500 mV). Οι μετρήσεις γίνανε για τιμές του πλάτους του σήματος διέγερσης στα 10V, 15, 17V, το καθένα για συχνότητα 1, 10, 15 kHz. Τέτοιου είδους μέτρηση έγινε δύο φορές: η μία με το πηνίο λήψης να καταγράφει παράλληλα στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και μία κάθετα. (Μέτρηση  $M_{21}$ )

2. Τοποθετήθηκε ο αισθητήρας στο κέντρο μίας διάταξης πηνίων Helmholtz όπου τα διέρρεε ηλεκτρικό ρεύμα έντασης ( $I_H$ ). Έγινε η μέτρηση του  $\Delta V_{pp}$  χωρίς και με την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μεταβάλλοντας το  $I_H$ . Η μεταβολή έγινε με δύο τρόπους: α) από 0,1 έως 1 mA με βήμα 0,1mA και β) 0,01 έως 2,00 mA με βήμα 0,01mA. Οι συνθήκες διέγερσης του μαγνητικού υλικού βασίστηκαν στις βέλτιστες επιδόσεις της μέτρησης  $M_{21}$ . (Μέτρηση  $M_{22}$ )

Οι μετρήσεις αυτές, όπου μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα, γίνανε με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας του αισθητήρα ώστε μελλοντικά να ενταχθεί σε συγκεκριμένο ηλεκτρονικό σύστημα, αλλά και την εύρεση ευαισθησίας του.

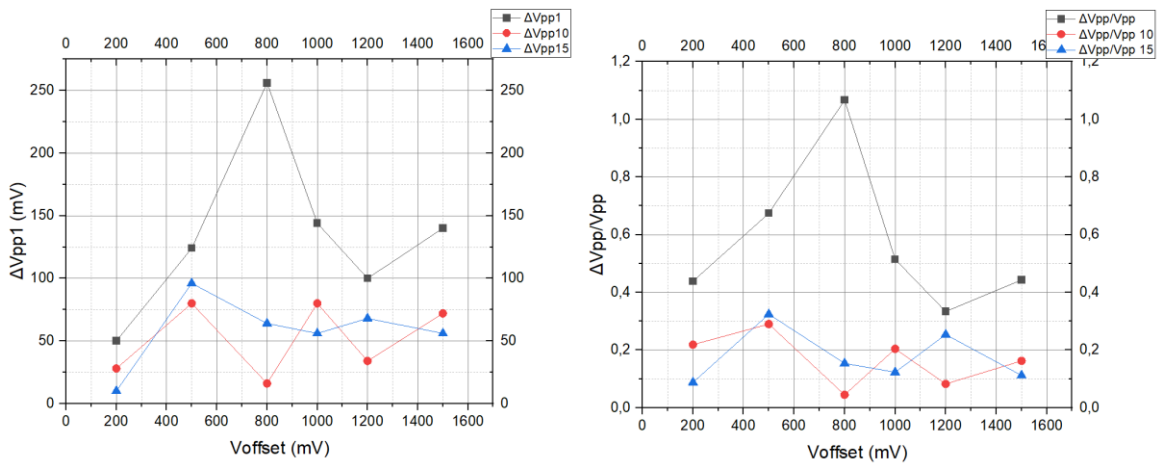
## 4.2.3 Μετρήσεις-αποτελέσματα

### 4.2.3.1 Η μέτρηση $M_{21}$

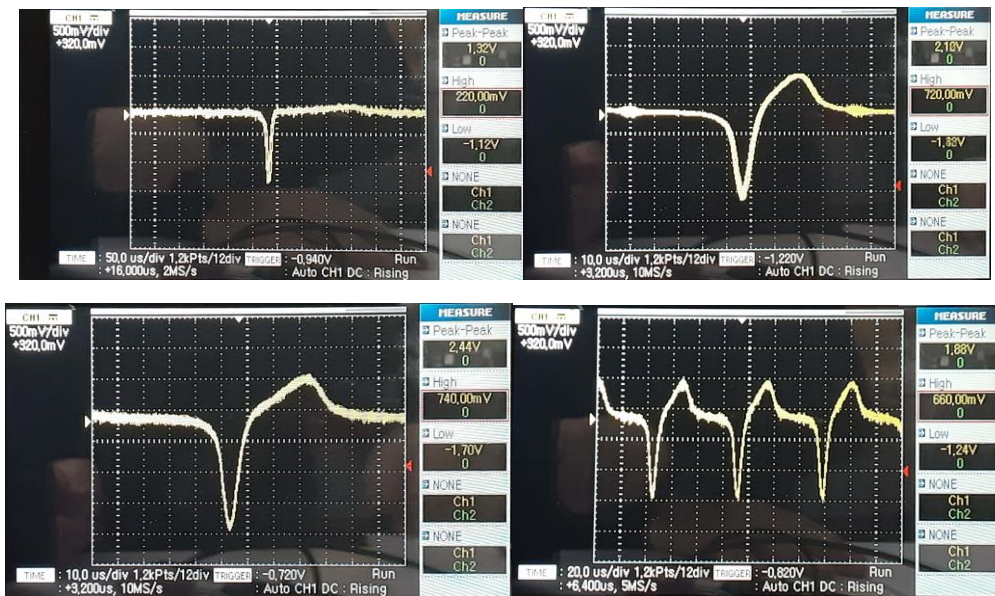
Για όλα τα διαγράμματα όπου παρατίθενται παρακάτω, οι ενδείξεις στα υπομνήματα  $\Delta V_{pp}$  1,  $\Delta V_{pp}$  10,  $\Delta V_{pp}$  15 και  $\Delta V_{pp}/V_{pp}$  1,  $\Delta V_{pp}/V_{pp}$  10,  $\Delta V_{pp}/V_{pp}$  15 αντιστοιχούν στις τιμές των μεγεθών όπως έχουν ήδη οριστεί για συχνότητα διέγερσης 1, 10, 15 kHz αντίστοιχα

Παράλληλα στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο:

Για πλάτος τάσης  $V=10$  V και συχνότητα σήματος 1, 10, 15 kHz ακολουθούν τα Σχήμα 4.17, 4,18



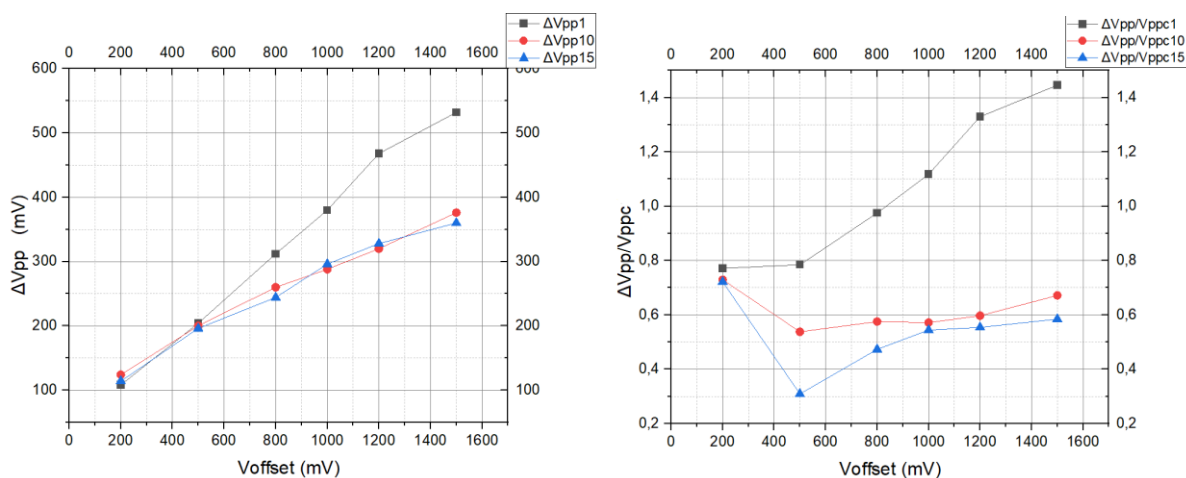
Σχήμα 4.17 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για πλάτος του σήματος  $V=10$ V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



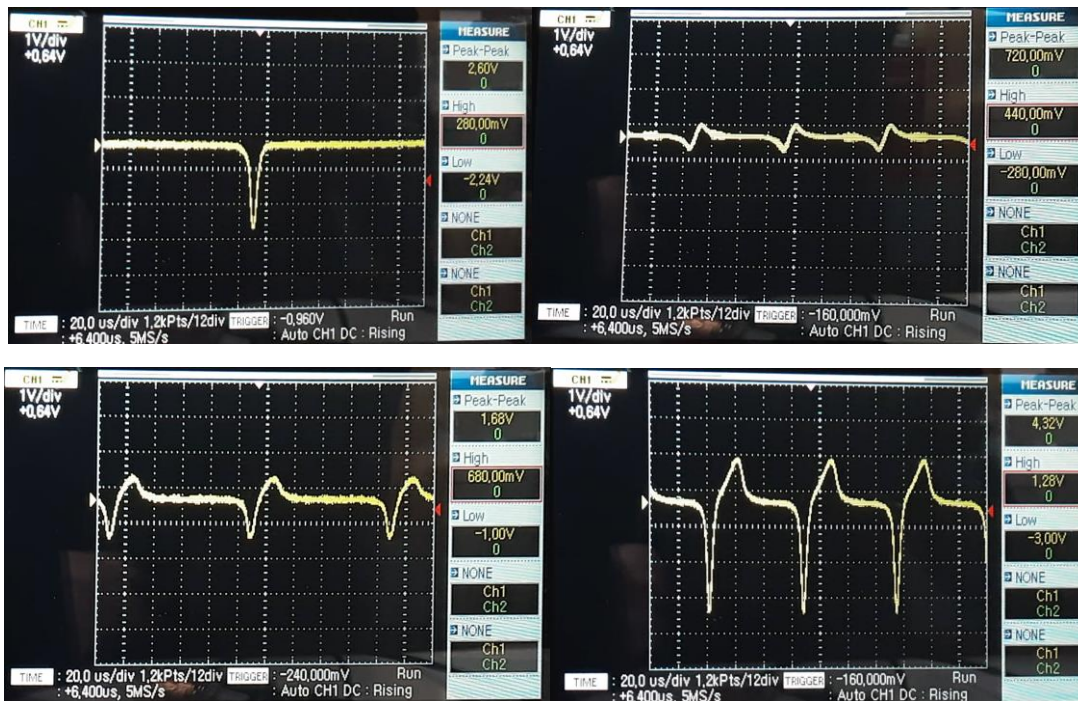
Σχήμα 4.18 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης, με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.

Καταρχάς παρατηρείται αρκετά καλή απόκριση για συχνότητα 1 kHz. Δεύτερον είναι αξιόλογο να αναφερθεί και να συγκρατηθεί για μελλοντική χρήση η πολύ μεγάλη τιμή του  $\Delta V_{pp}$  για  $V_{offset}=800mV$ . Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το σήμα λήψης ήταν πολύ σταθερό.

Για πλάτος τάσης  $V=15 V$  και συχνότητα σήματος 1, 10, 15 kHz ακολουθούν τα Σχήμα 4.19, 4.20



Σχήμα 4.19 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για πλάτος του σήματος  $V=15V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



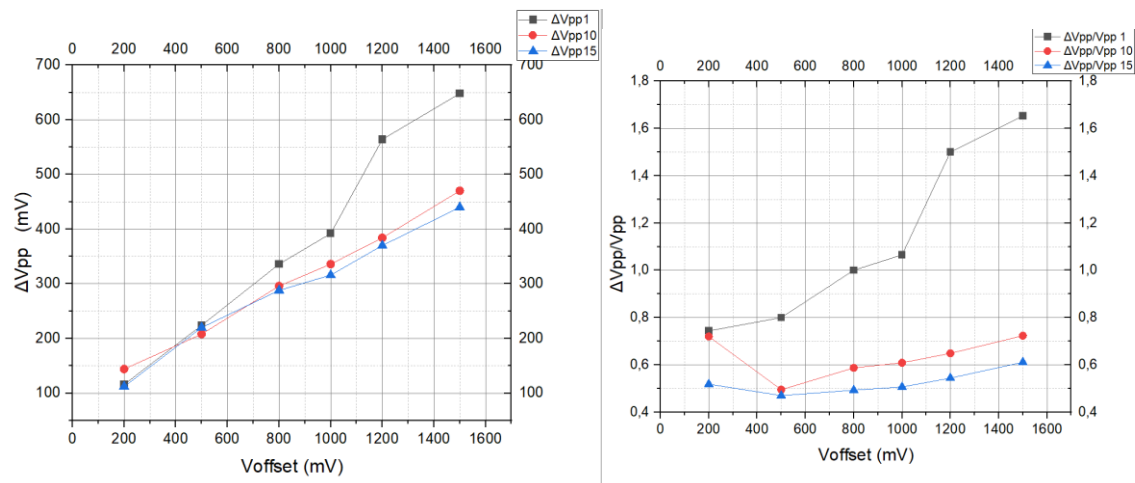
Σχήμα 4.20 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 15 V.

Η πολύ καλή απόκριση για συχνότητα 1 kHz συνεχίζει να φαίνεται και εδώ και μάλιστα με καλύτερη γραμμικότητα από την προηγούμενη τιμή του πλάτους του διεγείροντος σήματος. Το γεγονός ότι έχει αύξουσα πορεία η καμπύλη μας υποδεικνύει ότι οι μετρήσεις θα μπορούσαν να συνεχιστούν για ακόμα μεγαλύτερες τιμές του Voffset, παρόλαυτα η γεννήτρια σήματος όπου χρησιμοποιήθηκε δεν είχε τη δυνατότητα αυτή. Μελλοντικά θα χρειαστεί να εξερευνηθεί και αυτή η περιοχή τάσεων.

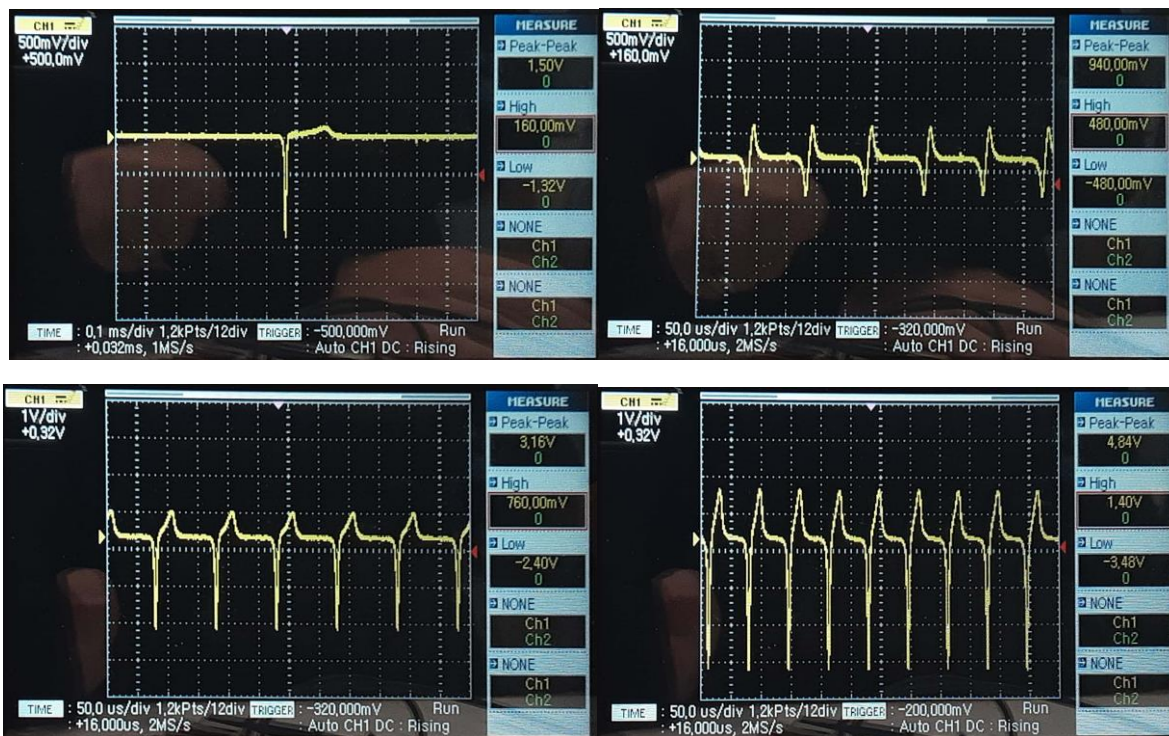
Το σήμα λήψης και σε αυτές τις μετρήσεις ήταν σταθερό.

Για πλάτος τάσης  $V=17\text{ V}$  και συχνότητα σήματος 1, 10, 15 kHz ακολουθούν τα Σχήμα 4.21, 4.22





Σχήμα 4.21 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για πλάτος του σήματος  $V=17V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



Σχήμα 4.22 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 17 V.

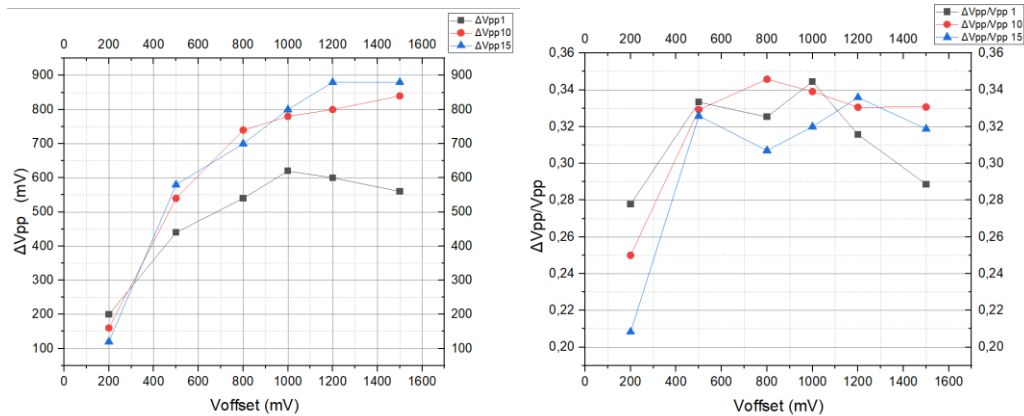
Παρατηρούμε αντίστοιχα συμπεράσματα όπως και για πλάτος σήματος 15V. Το γεγονός ότι είναι ακόμη καλύτερα τα αποτελέσματα έχει να κάνει με το ελαφρώς μεγαλύτερο πλάτος του σήματος.

Από τα παραπάνω συμπερένουμε πως η καλύτερη συμπεριφορά εντοπίζεται για συχνότητα διέγερσης  $f=1$  kHz, αφού όλες οι μετρήσεις είναι και κατά απόλυτη τιμή και ποσοστιαία μεγαλύτερες από τις άλλες, και για πλάτος σήματος  $V=15-17$  V καθώς έχουν σταθερώς μεγαλύτερες τιμές  $\Delta V_{pp}$ .

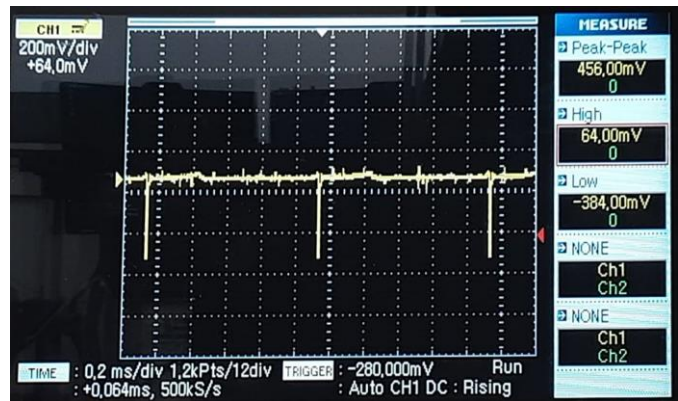
Για πλάτος σήματος 10V φαίνεται πως η τιμή  $V_{offset}=800$  mV είναι η ιδανικότερη, ενώ για μεγαλύτερα πλάτη όσο μεγαλύτερο είναι το  $V_{offset}$  τόσο καλύτερη είναι και η απόκριση του αισθητήρα.

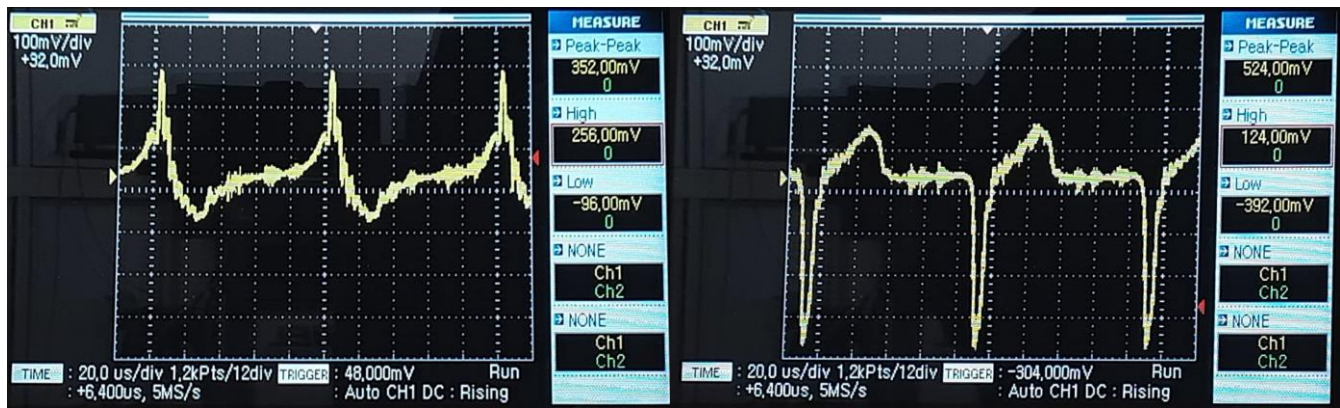
Κάθετα στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο:

Για πλάτος τάσης  $V=10$  V και συχνότητα σήματος 1, 10, 15 kHz ακολουθούν τα Σχήμα 4.23, 4.24



Σχήμα 4.23 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για πλάτος του σήματος  $V=10$ V. Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.

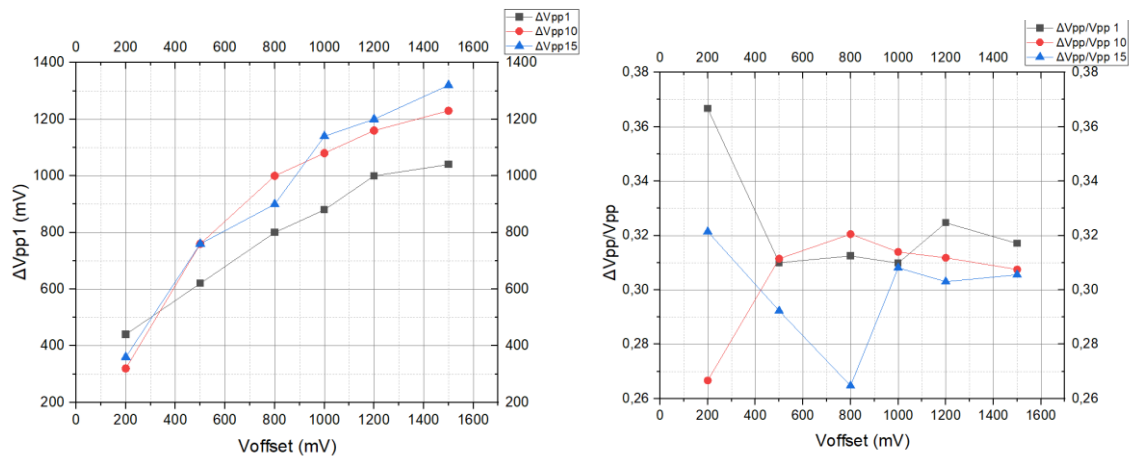




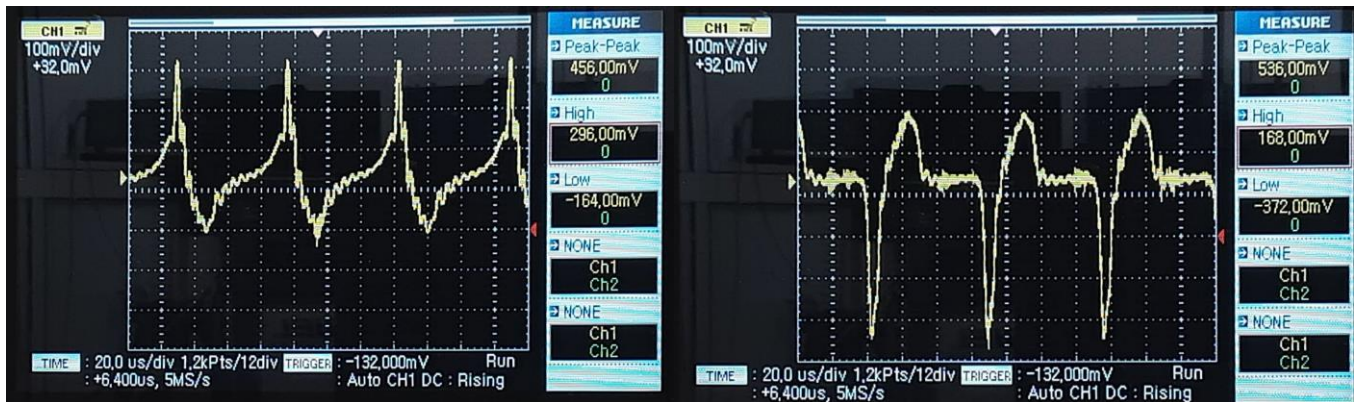
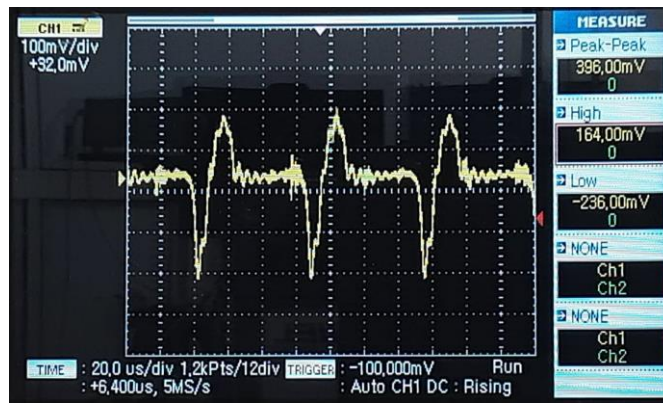
Σχήμα 4.24 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 10 V.

Σε αντίθεση με προηγούμενα εδώ φαίνεται να δίνουν καλύτερη και σχετικά όμοια απόκριση οι συχνότητες διέγερσης 10, 15 kHz. Το σήμα λήψης ήταν αρκετά σταθερό.

Για πλάτος τάσης  $V=15\text{ V}$  και συχνότητα σήματος 1, 10, 15 kHz ακολουθούν τα Σχήμα 4.25, 4.26



Σχήμα 4.25 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για πλάτος του σήματος  $V=15\text{V}$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.

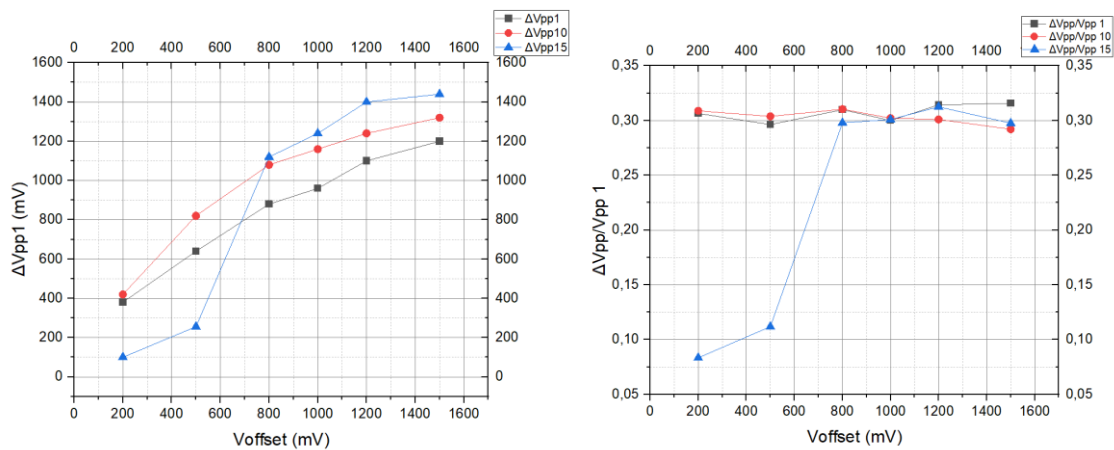


Σχήμα 4.26 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 15 V.

Για το συγκεκριμένο πλάτος σήματος παρατηρείται μία όμοια συμπεριφορά για καθεμία συχνότητα, με μία υπερχή για τα 10, 15 kHz. Παρόλαυτα φαίνεται πως για όσο μεγαλύτερο  $V_{offset}$  υπάρχει και πιο δυνατή απόκριση.

Αφού η συμπεριφορά του αισθητήρα έχει για ακόμα μεγαλύτερες τιμές του  $V_{offset}$ , όλο και μεγαλύτερη απόκριση, θα πρέπει μελλοντικά να εξερευνηθεί η συμπεριφορά του για  $V_{offset} > 1,5V$ . Το σήμα λήψης ήταν σταθερό.

Για πλάτος τάσης  $V=17 V$  και συχνότητα σήματος 1, 10, 15 kHz ακολουθούν τα Σχήμα 4.27, 4.28



Σχήμα 4.27 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για πλάτος του σήματος  $V=17V$ . Αριστερά: Η μεταβολή κατά απόλυτη τιμή. Δεξιά: Η μεταβολή κανονικοποιημένη.



Σχήμα 4.28 Το σήμα λήψης, όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου, σε διάφορα στιγμιότυπα της μέτρησης με σήμα διέγερσης πλάτους πλάτους 17 V.

Σε αυτές τις συνθήκες παρατηρείται πως ενώ για τα 1, 10 kHz υπάρχει μία όμοια συμπεριφορά, στα 15 kHz υπάρχει ένα άλμα στις τιμές του  $\Delta V_{pp}$  μετά από  $V_{offset}=500$  mV.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως η καλύτερη συμπεριφορά εντοπίζεται για συχνότητα διέγερσης  $f=15$  kHz. Αν και για 10 kHz παρατηρούμε συγκρίσιμη συμπεριφορά αλλά όχι βέλτιστη. Φαίνεται πως για όσο μεγαλύτερο πλάτος του σήματος διέγερσης, αλλά και συχνότητα, τόσο καλύτερη απόκριση του αισθητήρα έχουμε.

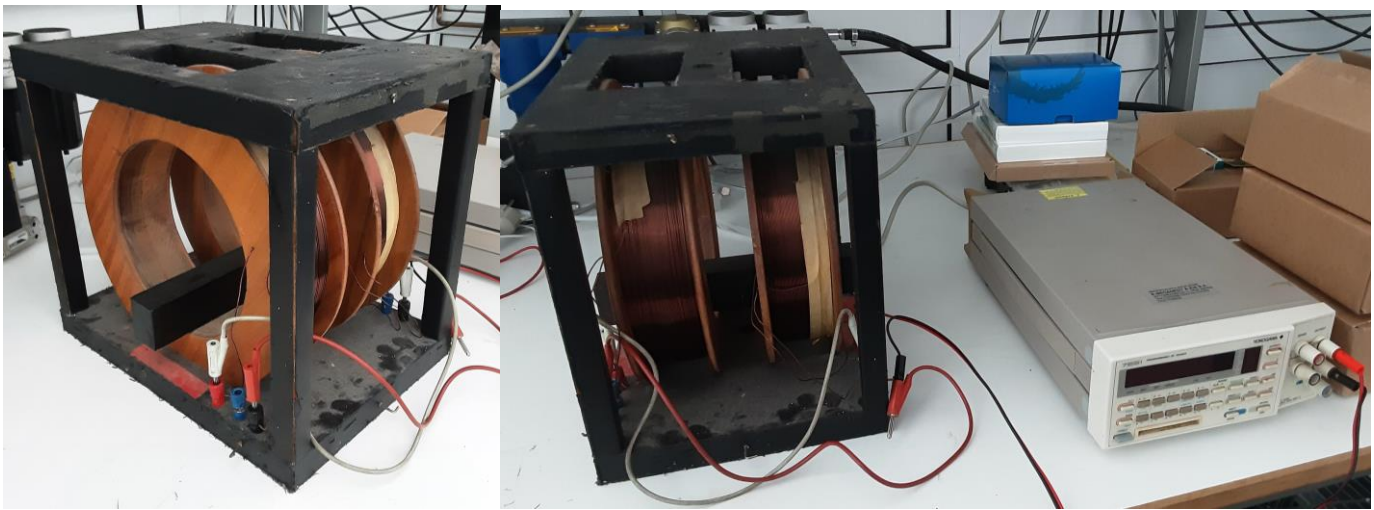
Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις φαίνεται πως η τοροειδής διάταξη δίνει πολύ μεγαλύτερη διαφορά στα πλάτη των σημάτων, στην περιοχή συχνοτήτων όπου αφορά τους αισθητήρες fluxgate με σταθερό σήμα λήψης.

#### 4.2.3.2 Η μέτρηση $M_{22}$

Όπως αναφέρθηκε, για τις ανάγκες αυτής της μέτρησης, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο μιας διάταξης πηνίων Helmholtz. Τα πηνία όπου χρησιμοποιήθηκαν έχουν ακτίνα  $R=100$  mm, απόσταση ανάμεσα στα πηνία  $L=100$  mm και  $N=600$  σπείρες. Η διάταξη διεγείρονταν από γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος σταθερής έντασης. Για μία τέτοια διάταξη η μαγνητική επαγωγή, ωρίζεται από τη βιβλιογραφία. Στο κέντρο της δίνεται από τον τύπο:

$$B = \mu_0 \frac{8NI}{5\sqrt{5}R} \quad (4.1)$$

$$B = 8,99 \cdot 10^{-7} \frac{NI}{R} \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.29 Αριστερά: Τα πηνία Helmholtz, Δεξιά: Τα πηνία Helmholtz συνδεδεμένα με τη γεννήτρια διέγερσης.

Από τις μετρήσεις όπου έγιναν για τον εντοπισμό μαγνητικού πεδίου στο κέντρο των πηνίων Helmholtz με μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος όπου τα διαρρέει, από 0,1 έως 1 mA με βήμα 0,1 mA (Παράρτημα: Μέτρηση  $M_{22}$  - Πίνακας 1). Με βάση τις μετρήσεις όπου έγιναν προηγούμενα (μέτρηση  $M_{21}$ ) Επιλέχθηκε να οι συνθήκες λειτουργίας του αισθητήρα να είναι οι εξής: συχνότητα σήματος  $f=1$  kHz, πλάτος τάσης σήματος  $V=17$  V,  $V_{offset}=1,5$  V.

Φάνηκε πως η απόκριση μεταβαλλόταν διακριτά για όλα τα βήματα, έτσι στη συνέχεια έγινε πιο αναλυτική μέτρηση στην περιοχή από 0,01 έως 0,2 mA με βήμα 0,01 mA (Παράρτημα: Μέτρηση  $M_{22}$  - Πίνακας 2). Εκεί φάνηκε πως η ελάχιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου των πηνίων όπου μετέβαλλε (ευκρινώς, με βάση τη συσκευή αναγνώρισης όπου χρησιμοποιήθηκε) την απόκριση του σήματος αντιστοιχούσε σε ένταση  $B \cong 10$  nT. Η συγκεκριμένη παρατήρηση επιβεβαιώθηκε και για άλλες συνθήκες μέτρησης (Παράρτημα: Μέτρηση  $M_{22}$  - Πίνακας 3). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί για μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος κατά 0,02 mA.

#### 4.2.4 Μετρήσεις σε περιοχή συχνοτήτων πέραν του φαινομένου fluxgate

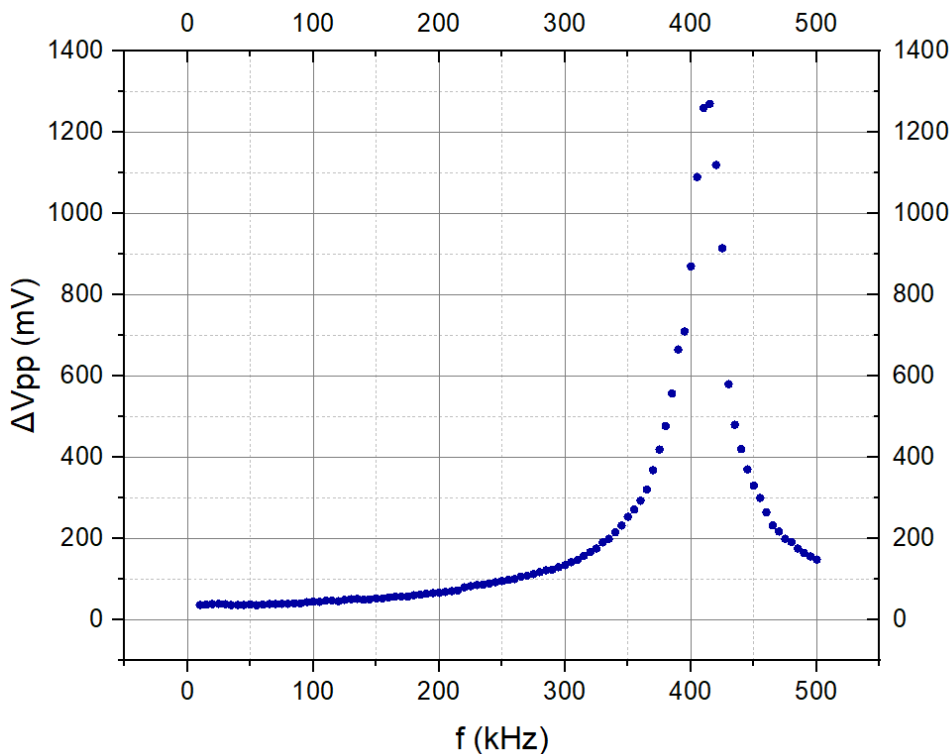
Με σκοπό την αξιοποίηση δεδομένων για μελλοντική μελέτη (όπου δεν αφορούν το πλαίσιο αυτής της εργασίας και απλώς παρατίθενται επιγραμματικά) πάρθηκαν σειρές μετρήσεων οι οποίες δεν εντάσσονται στη σφαίρα της συμπεριφοράς των αισθητήρων fluxgate.

Συγκεκριμένα στους ορθογωνικούς αισθητήρες πάρθηκαν μετρήσεις οι οποίες φτάναν μέχρι συχνότητα σήματος 100 kHz (Σχήματα 4.6, 4.8, 4.10, 4.12, Παράρτημα: Μετρήσεις για  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta_4$ ). Από τις μετρήσεις αυτές μπορούμε να συμπαιράνουμε ότι οι αισθητήρες fluxgate με πυρήνες FeSiB δίνουν γραμμικά αποτελέσματα μόνο με τη χρήση τάσης  $V_{offset}$ , συνεχίζοντας να υπάρχει θόρυβος κατά τη μέτρηση.

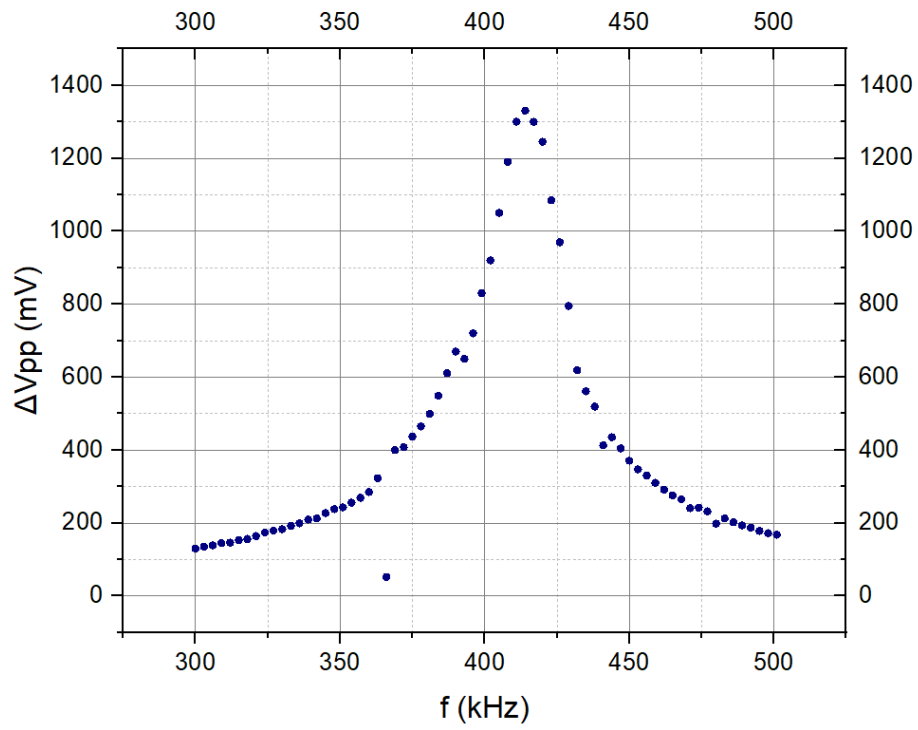
Όσον αφορά την τορροειδή διάταξη έγιναν οι παρακάτω μετρήσεις (οι οποίες βρίσκονται αναλυτικά στο παράρτημα):

1. Χωρίς τη παρουσία του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έντασης: η γεννήτρια παράγαγε σήματα συχνότητας από 10 έως 500 kHz με βήμα 5 kHz και πλάτους 5V. Μία φορά με  $V_{offset}=0V$  και μία με  $V_{offset}=1,5V$ . (M<sub>31</sub> - Μέτρηση 3.1)
2. Όμοια με τη προηγούμενη διαδικασία για σήματα συχνοτήτων 300-501 kHz με βήμα 3 kHz. (M<sub>32</sub> - Μέτρηση 3.2)
3. Υπό την παρουσία του εξωτερικού μαγνητικού πεδίο σταθερής έντασης: Τα σήματα της γεννήτρια είχαν πλάτος 10V με  $V_{offset}=5V$  για συχνότητες 10 και από 50 έως 500 kHz με βήμα 50 kHz. Ο ηλεκτρομαγνήτης τοποθετούνταν σε σταθερή απόσταση σε τέσσερα σημεία, σχηματίζοντας γωνία 90°, 180°, 270° ως προς τη αρχική θέση (0°). Μετρήσεις γίνανε και χωρίς να διαπερνάται ο ηλεκτρομαγνήτης από ηλεκτρικό ρεύμα αλλά και όταν διαπερνούνταν από ρεύμα έντασης 0,5A. (M<sub>33</sub> - Μέτρηση 3.3)

Το πιο αξιόλογο συμπέρασμα το οποίο χρήζει επισήμανσης είναι το γεγονός ότι παρατηρείται βέλτιστη απόκριση για συχνότητα στην περιοχή των 400 kHz (Σχήμα 4.30) το οποίο οφείλεται στο φαινόμενο της μαγνητοεμπέδησης.

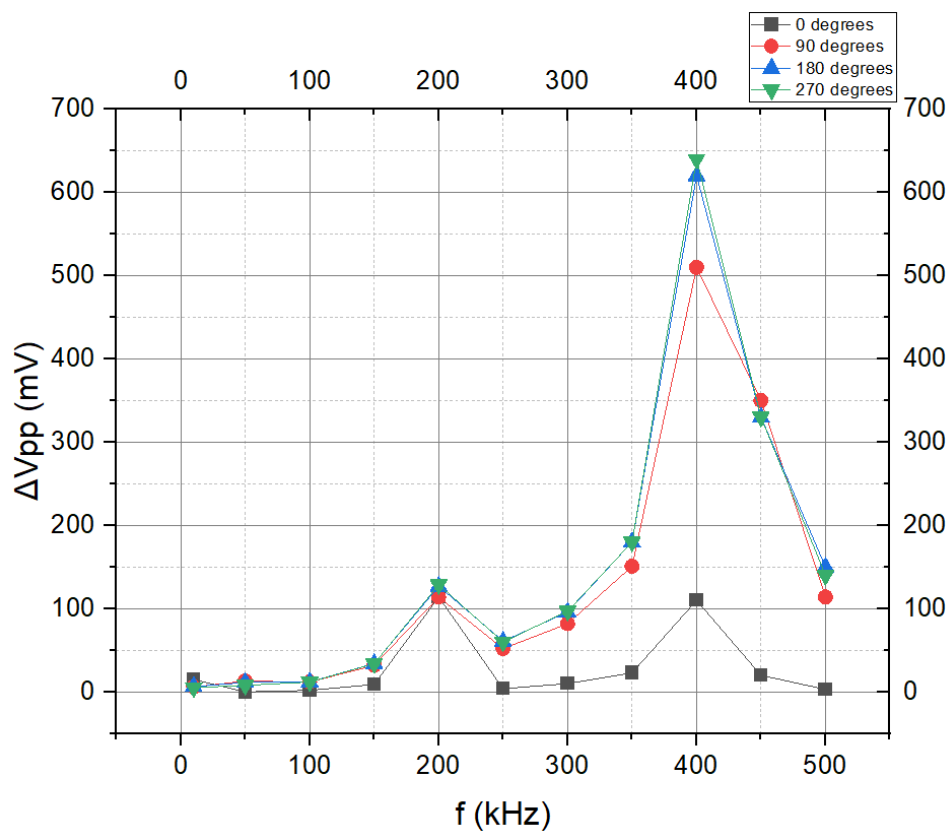


Σχήμα 4.30 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  στον αισθητήρα τορροειδούς διάταξης για διέγερση πλάτους 5V. Κατά τη μέτρηση το  $V_{offset}$  εναλλασσόταν ανάμεσα στις τιμές 0 ή 1,5 V



Σχήμα 4.31 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  στον αισθητήρα τορροειδούς διάταξης για διέγερση πλάτους 5V. Κατά τη μέτρηση το  $V_{offset}$  εναλλασσόταν ανάμεσα στις τιμές 0 ή 1,5 V





Σχήμα 4.32 Μετρήσεις  $\Delta V_{pp}$  για τον αισθητήρα τοροειδούς διάταξης για σήμα διέγερσης πλάτους 10 V και  $V_{offset}=5$  V. Οι μετρήσεις γίνανε υπό την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου παραγόμενο από ηλεκτρομαγνήτη, τοποθετημένο σε διάφορες θέσεις γύρω από τον αισθητήρα.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα-συζήτηση

Από την συζήτηση και τα αποτελέσματα όπου προηγήθηκαν μπορούν να εξαχθούν μερικά σημαντικά συμπεράσματα.

1. Φαίνεται πως συνολικά η τορροειδής διάταξη για έναν μαγνητικό αισθητήρα fluxgate είναι πιο επικερδής έναντι της ορθογωνικής. Αυτό παρατηρείται για διάφορους λόγους:

- Το σήμα λήψης στους ορθογωνικούς αισθητήρες (αν και όχι σε όλες τις περιπτώσεις με τον ίδιο τρόπο) δεν ήταν όσο σταθερό της τορροειδούς διάταξης και είχαν τακτικά περισσότερο θόρυβο (θολή απεικόνιση στον παλμογράφο).
- Ο αισθητήρας τορροειδούς διάταξης εμφάνιζε πιο μεγάλες μεταβολές  $\Delta V_{pp}$  (και κατά μέτρο και ποσοστιαία) απ' ότι στους αισθητήρες ορθογωνικής διάταξης.

Παρόλαυτα θα πρέπει να παρθούν υπόψη δύο σημαντικές αδυναμίες στους αισθητήρες τορροειδούς διάταξης έναντι αυτών ορθογωνικής. Η πρώτη είναι πως παρόλο που είναι πιο αξιόπιστη και ακριβής έχει δυσκολότερο τρόπο παρασκευής καθώς για να τυλιχθεί το πηνίο γύρω από το μαγνητικό υλικό καταναλώνεται περισσότερος χρόνος και ασχολία. Συνήθως στα περισσότερα εργαστήρια η περιλίξη θα γίνει χειροκίνητα, ενώ η ορθογωνική διάταξη μπορεί να επιτευχθεί αυτοματοποιημένα. Η δεύτερη αδυναμία εμφανίζεται στο γεγονός πως λόγω της λειτουργίας των αισθητήρων ορθογωνικής διάταξης (πχ δεν χρειάζονται πηνίο διέγερσης κα) είναι πιο εύκολη η μικροποίηση (miniaturization) τους και άρα η ένταξη τους σε όλο και μικρότερες ηλεκτρολογικές δομές. Κάτι αντίστοιχο στους αισθητήρες fluxgate τορροειδούς διάταξης δεν ισχύει καθώς η διάμετρός τους επηρεάζει την ευαισθησία τους.

2. Αναφορικά με τη χρήση των αισθητήρων fluxgate ορθογωνικής διάταξης:

- Για την οικογένεια δειγμάτων όπου δοκιμάστηκαν ως μαγνητικά υλικά φαίνεται απαραίτητη η χρήση κοβαλτίου στη σύνθεση καθώς σε αντίθετη περίπτωση ο αισθητήρας δεν είναι αξιόπιστος.
- Επίσης στους αισθητήρες με μαγνητικά υλικά με απουσία κοβαλτίου δεν είναι δυνατή η χρήση τους χωρίς την εφαρμογή τάσης  $V_{offset}$ .
- Πιο καλή απόκριση (σταθερότερο σήμα, χαμηλότερο θόρυβο, μεγαλύτερες τιμές  $\Delta V_{pp}$ ) είχαν οι αισθητήρες με μαγνητικό υλικό σε μορφή λωρίδας (ribbon).

3. Παρατηρούνται τα εξής συμπεράσματα για τις συνθήκες λειτουργίας για τον αισθητήρα τορροειδούς διάταξης:

- Ο αισθητήρας, από τις δοκιμές και μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο, δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς την εφαρμογή τάσης  $V_{offset}$ .

- Για πλάτος σήματος 15-17 V με  $V_{\text{offset}}=1200-1500$  mV (ιδανικά  $V=17$  V και  $V_{\text{offset}}=1500$  mV). Ως προς τη συχνότητα του διεγείροντος σήματος φαίνεται να χρειάζεται περισσότερη έρευνα καθώς φαίνεται πως στα δύο πειράματα της μέτρησης  $M_{21}$  τότε λειτουργεί καλύτερα ο αισθητήρας τα 1 kHz και τότε στα 15 kHz.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζουν οι συνθήκες  $V=10$  V,  $f=1$  kHz,  $V_{\text{offset}}=800$  mV. Χρειάζεται στο μέλλον να ερευνηθεί αυτή η περιοχή συνθηκών λειτουργίας του αισθητήρα.
- Από τη μέτρηση  $M_{22}$  συμπερένεται πως η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος όπου μπορεί να ανιληφθεί ο αισθητήρας ανέρχεται στα 0,02mA ή τιμή έντασης μαγνητικής επαγωγής  $\sim 10$ nT.

## Παράρτημα

Για το  $\Delta_1$  ακολουθούν με τη σειρά οι  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{14}$

f (kHz)	$V_{PP}$ (mV) $V_{offset}=0V, I=0A$	$V_{PP}$ (mV) $V_{offset}=0V, I=0,5A$	$V_{PP}$ (mV) $V_{offset}=1,5V, I=0A$	$V_{PP}$ (mV) $V_{offset}=1,5V,$ $I=0,5A$
10	440	503	106	211
15	550	704	143	303
20	660	888	175	384
25	740	1070	201	463
30	840	1220	223	529
35	1100	1370	244	593
40	1180	1550	268	645
45	1060	1660	281	700
50	1120	1770	300	750
55	1180	1890	318	798
60	1240	2000	340	844
65	1280	2110	354	890
70	1320	2220	374	933
75	1370	2300	392	981
80	1400	2420	406	1050
85	1450	2530	426	1090
90	1500	2610	438	1130
95	1570	2700	454	1180
100	1610	2790	470	1230

Για το  $\Delta_2$  ακολουθούν με τη σειρά οι  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{14}$

f (kHz)	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=0V, I=0A$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=0V, I=0,5A$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=1,5V, I=0A$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=1,5V,$ $I=0,5A$
10	223	27,9	348	86,2
15	352	39,7	521	129
20	478	55,8	679	176
25	635	63,4	840	222
30	810	75	975	270
35	1020	85	1150	322
40	1170	96	1370	373
45	1340	109	1580	420
50	1520	122,5	1800	478
55	1620	137,5	2020	551
60	1520	160	2310	633
65	1290	182	2660	734
70	1130	199	3080	840
75	1020	218	3440	875
80	960	248	3680	975
85	930	270	3750	1130
90	945	268	3720	1330
95	980	284	3590	1440
100	1030	310	3440	1460

Για το  $\Delta_3$  ακολουθούν με τη σειρά οι  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{14}$

f (kHz)	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=0V, I=0A$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=0V, I=0,5A$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=1,5V, I=0A$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=1,5V,$ $I=0,5A$
10	6	6	3,5	7
15	7,8	7,6	4,98	9,6
20	9,8	9,5	7,8	12,3
25	11,4	11,2	9,2	14,1
30	12,8	12,8	10,8	16,3
35	14,5	14,6	12,2	19,3
40	17	17,1	13,6	21,9
45	18,9	18,5	14,6	24,3
50	20,3	20,5	16,2	26,9

55	22,3	22,7	17,9	29,3
60	25	24,7	20,3	32,4
65	26,5	26,7	21,3	34,8
70	28	28,3	22,5	37
75	30,2	30,2	24,3	39,8
80	32	31,8	25,5	42,4
85	33,6	33,8	27	44,8
90	35,5	35,8	28,7	47
95	37,4	37,6	30,2	49
100	39	39,6	31,8	52,3

Για το Δ<sub>4</sub> ακολουθούν με τη σειρά οι M<sub>11</sub>, M<sub>12</sub>, M<sub>13</sub>, M<sub>14</sub>

f (kHz)	V <sub>pp</sub> (mV) V <sub>offset</sub> =0V, I=0A	V <sub>pp</sub> (mV) V <sub>offset</sub> =0V, I=0,5A	V <sub>pp</sub> (mV) V <sub>offset</sub> =1,5V, I=0A	V <sub>pp</sub> (mV) V <sub>offset</sub> =1,5V, I=0,5A
10	11,3	13,3	10	36,2
15	14,2	16	11,3	46,6
20	16,7	18,5	15,2	55,9
25	19	21,1	17,7	64,3
30	20,8	23,7	20,7	72
35	23,7	24,5	22,9	79,2
40	24,7	26,5	26,5	88
45	26,7	28,7	29,1	96
50	28,7	30,4	31,4	101
55	30,2	33,2	34,4	109
60	32,4	37,6	37,4	114
65	36,2	42,2	40	123
70	40	42,2	41,4	121
75	40,6	45,4	46,6	126
80	41,4	46,6	49	133
85	45	51,5	51,5	143
90	47,2	55,1	51,9	159
95	51,5	56,7	55,5	169
100	53,5	59,9	57,9	181

Για το Π ακολουθεί η μέτρηση M<sub>21</sub> (Αισθητήρας παράλληλα στο εξ. μαγνητικό πεδίο)

Για πλάτος σήματος διέγερσης V=10V

$V_{\text{offset}}$ (mV)	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz
200	720	200	640	160	576	120
500	1320	440	1640	540	1780	580
800	1660	540	2140	740	2280	700
1000	1800	620	2300	780	2500	800
1200	1900	600	2420	800	2640	880
1500	1940	560	2540	840	2760	880

Για πλάτος σήματος διέγερσης  $V=15V$

$V_{\text{offset}}$ (mV)	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz
200	1200	440	1200	320	1120	360
500	2000	620	2440	760	2600	760
800	2560	800	3120	1000	3400	900
1000	2840	880	3440	1080	3700	1140
1200	3080	1000	3720	1160	3960	1200
1500	3280	1040	4000	1230	4320	1320

Για πλάτος σήματος διέγερσης  $V=17V$

$V_{\text{offset}}$ (mV)	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz
200	1240	380	1360	420	1200	100
500	2160	640	2700	820	2560	256
800	2840	880	3480	1080	3760	1120
1000	3200	960	3840	1160	4120	1240
1200	3500	1100	4120	1240	4480	1400
1500	3800	1200	4520	1320	4840	1440

Για το Π ακολουθεί η μέτρηση  $M_{21}$  (Αισθητήρας κάθετα στο εξ. μαγνητικό πεδίο)

Για πλάτος σήματος διέγερσης  $V=10V$

$V_{\text{offset}}$ (mV)	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=1 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=10 kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) f=15 kHz
200	114	50	128	28	114	10
500	184	124	276	80	296	96
800	240	256	356	16	416	64
1000	280	144	392	80	456	56
1200	300	100	412	34	468	68
1500	316	140	444	72	500	56



Για πλάτος σήματος διέγερσης  $V=15V$

$V_{\text{offset}}$ (mV)	$V_{\text{pp}}$ (mV) $f=1$ kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) $f=1$ kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) $f=10$ kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) $f=10$ kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) $f=15$ kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) $f=15$ kHz
200	140	108	170	124	158	114
500	260	204	372	200	408	186
800	320	312	452	260	516	244
1000	340	380	504	288	544	296
1200	352	468	536	320	592	328
1500	368	532	560	376	616	360

Για πλάτος σήματος διέγερσης  $V=17V$

$V_{\text{offset}}$ (mV)	$V_{\text{pp}}$ (mV) $f=1$ kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) $f=1$ kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) $f=10$ kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) $f=10$ kHz	$V_{\text{pp}}$ (mV) $f=15$ kHz	$\Delta V_{\text{pp}}$ (mV) $f=15$ kHz
200	156	116	200	144	216	420
500	280	224	420	208	468	210
800	336	336	504	296	584	288
1000	368	392	552	336	624	316
1200	376	564	592	384	680	370
1500	392	648	650	470	720	440

Για το Π ακολουθεί η μέτρηση  $M_{22}$

Πίνακας 1

$I_H$ (mA)	$V_{\text{pp}}$ (V)
0,0	2,70
0,1	2,65
0,2	2,62
0,3	2,59
0,4	2,57
0,5	2,52
0,6	2,50
0,7	2,47
0,8	2,45
0,9	2,42
1,0	2,37

Πίνακας 2

$I_H$ (mA)	$V_{\text{pp}}$ (V)
------------	---------------------

0,0	2,70
0,01	2,69
0,02	2,68
0,03	2,68
0,04	2,67
0,05	2,66
0,06	2,66
0,07	2,66
0,08	2,65
0,09	2,65
0,10	2,65
0,11	2,65
0,12	2,64
0,13	2,64
0,14	2,64
0,15	2,64
0,16	2,64
0,17	2,64
0,18	2,63
0,19	2,63
0,20	2,62

Πίνακας 3

	$V_{pp}$ (V) $f=1$ kHz	$I_H$ (mA)	$V_{pp}$ (V) $f=10$ kHz	$I_H$ (mA)	$V_{pp}$ (V) $f=15$ kHz	$I_H$ (mA)
V=10 V $V_{offset}=1,5V$	1,49	0	1,77	0	1,88	0
	1,09	1	1,41	1	1,50	1
	1,33	0.05	1,74	0.05	1,87	0.05
	1,40	0,02	1,76	0,02	1,88	0,02
V=15 V $V_{offset}=1,5V$	2,62	0	2,86	0	3,02	0
	2,10	1	2,28	1	2,39	1
	2,59	0.05	2,82	0.05	2,97	0.05
	2,61	0,02	2,85	0,02	3,00	0,02
V=17 V $V_{offset}=1,5V$	3,23	0	3,29	0	3,50	0
	2,59	1	2,60	1	2,77	1
	3,20	0.05	3,25	0.05	3,47	0.05
	3,23	0,02	3,26	0,02	3,40	0,02

Για τον Π ακολουθεί η μέτρηση  $M_{31}$

f (kHz)	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=0V$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=1,5V$
10	67	31
15	72	35,4
20	75	36,6
25	76	37
30	76	38
35	75	39
40	76	40
45	76	40
50	76	39
55	76	40,5
60	77	40
65	78	39,5
70	79	40,8
75	80	41
80	81	42,2
85	83	43
90	84	44,2
95	88	45
100	90	46
105	92	48
110	95	48,5
115	96	49,3
120	96	51
125	100	51,5
130	102	52,3
135	104	53,1
140	105	56
145	108	58
150	111	59
155	113	61
160	117	62,3
165	120	63,5
170	122	65,5
175	125	68,5
180	130	70
185	133	71,6
190	137	73
195	141	76

200	146	80
205	150	82
210	154	84
215	158	86
220	167	88
225	172	90
230	177	92
235	182	96
240	190	101
245	196	104
250	203	108
255	210	112
260	216	116
265	226	120
270	233	125
275	242	130
280	252	135
285	263	142
290	274	151
295	286	157
300	300	166
305	315	174
310	329	182
315	348	191
320	368	202
325	389	214
330	417	227
335	442	243
340	474	259
345	511	279
350	555	302
355	599	328
360	653	360
365	720	400
370	810	442
375	915	496
380	1040	563
385	1200	643
390	1420	755
395	1600	890
400	1910	1040
405	2270	1180

410	2520	1260
415	2480	1210
420	2190	1070
425	1830	915
430	1360	780
435	1160	680
440	1010	590
445	890	520
450	800	470
455	720	420
460	650	386
465	588	356
470	545	328
475	507	308
480	472	281
485	440	265
490	414	250
495	392	236
500	372	224

Για τον Π ακολουθεί η μέτρηση  $M_{32}$

f (kHz)	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=0V$	$V_{pp}$ (mV) $V_{offset}=1,5V$
300	296	166
303	306	171
306	313	174
309	325	180
312	333	187
315	345	192
318	356	200
321	370	206
324	386	212
327	400	221
330	412	229
333	430	238
336	446	247
339	466	257
342	482	269

345	507	280
348	531	293
351	551	308
354	579	323
357	615	346
360	647	362
363	687	364
366	430	378
369	780	380
372	840	432
375	905	468
378	970	505
381	1050	551
384	1150	601
387	1270	659
390	1400	730
393	1470	820
396	1640	920
399	1840	1010
402	2030	1110
405	2240	1190
408	2420	1230
411	2510	1210
414	2480	1150
417	2350	1050
420	2150	905
423	1940	855
426	1740	770
429	1490	695
432	1250	631
435	1140	579
438	1050	531
441	905	492
444	895	460
447	835	430
450	775	404
453	725	378
456	683	353
459	645	335
462	611	320
465	579	303
468	555	290

471	519	278
474	507	265
477	487	255
480	444	246
483	450	237
486	430	228
489	414	220
492	400	213
495	386	208
498	372	200
501	362	194

Για τον Π ακολουθεί η μέτρηση  $M_{33}$

f (kHz)	$V_{pp}$ (mV) I=0A 0°	$V_{pp}$ (mV) I=1,5A 0°	$V_{pp}$ (mV) I=0A 90°	$V_{pp}$ (mV) I=1,5A 90°	$V_{pp}$ (mV) I=0A 180°	$V_{pp}$ (mV) I=1,5A 180°	$V_{pp}$ (mV) I=0A 270°	$V_{pp}$ (mV) I=1,5A 270°
10	50	65	51	45	48,2	41,8	48,2	43
50	80	80	85	72	78	66,7	77	69
100	92	90	96	84	92	80	92	80
150	123	114	127	95	126	92	125	91
200	284	170	300	186	293	166	293	164
250	210	206	223	171	220	159	219	159
300	320	310	338	256	334	238	334	237
350	603	580	637	486	630	450	630	450
400	2110	2000	2230	1720	2230	1610	2230	1590
450	1060	1080	1110	760	1110	780	1110	780
500	463	460	496	382	540	390	540	400

# Βιβλιογραφία

- [1] S. Tumanski, *Handbook of magnetic measurements*. London, England: CRC Press, 2019.
- [2] E. Purcell, *Electricity and Magnetism*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2011.
- [3] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2021.
- [4] F. Engels, *Dialectics of Nature*. International, 1940.
- [5] M. Blagojevic, M. Kayal, M. Gervais, and D. Venuto, “SOI Hall-sensor front end for energy measurement IEEE,” *IEEE Sensors J*, vol. 6, pp. 1016–1021, 2006.
- [6] M.-A. Paun, “Three-dimensional simulations in optimal performance trial between two types of Hall sensors fabrication technologies],” *Magn. Magn. Mater*, vol. 391, pp. 122–128, 2015.
- [7] H. Xu, “Batch-fabricated high-performance graphene Hall elements Sci,” *Hall elements Sci. Rep*, vol. 3, 2013.
- [8] D. Izci, C. Dale, N. Keegan, and J. Hedley, “The construction of a graphene hall effect magnetometerIEEE,” *Sensors J*, vol. 18, pp. 9534–9541, 2018.
- [9] M.-K. Joo, J. Kim, G. Lee, H. Kim, Y. H. Lee, and D. Suh, “Feasibility of ultra-sensitive 2D layered Hall elements,” *2d Mater.*, vol. 4, no. 2, p. 021029, 2017.
- [10] L. Huang, Z. Zhang, B. Chen, X. Ma, H. Zhong, and L.-M. Peng, “Ultra-sensitive graphene Hall elements Appl,” *Appl. Phys. Lett*, vol. 104, 2014.
- [11] E. Ramsden, *Hall-Effect Sensors: Theory And Application*. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [12] M. Akhter, D. Mapps, M. Tan, Y. Petford-Long, and A. Doole, “Thickness and grain-size dependence of the coercivity in permalloy thin films],” *Appl. Phys*, vol. 81, pp. 4122–4124, 1997.
- [13] P. Freitas, “Magnetoresistive DNA chips Magnetolectronics,” *Magnetoresistive DNA chips Magnetolectronics*, pp. 331–386, 2004.
- [14] A. Grosz, V. Mor, S. Amrusi, I. Faivinov, E. Paperno, and L. Klein, “A high-resolution planar Hall effect magnetometer for ultra-low frequenciesIEEE,” *Sensors J*, vol. 16, pp. 3224–3230, 2016.
- [15] A. Grosz *et al.*, “Planar hall effect sensors with subnanotesla resolution,” *IEEE Magn. Lett.*, vol. 4, pp. 6500104–6500104, 2013.
- [16] König F and Müller J (ed) 2010 A novel micro paramagnetic oxygen sensor based on an anisotropic magneto resistance-device Sensors (IEEE) 2010: IEEE
- [17] P. Dimitrova, S. Andreev, and L. Popova, “Thin film integrated AMR sensor for linear position measurements,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 147, no. 2, pp. 387–390, 2008.
- [18] W. Kwiatkowski, B. Baranowski, and S. Tumanski, “Application of the thin film permalloy magnetoresistive sensors in electrical measurements,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 20, no. 5, pp. 966–968, 1984.



- [19] D. Heim, R. Fontana, C. Tsang, V. Speriosu, B. Gurney, and M. Williams, "Design and operation of spin valve sensors IEEE Trans," *Trans. Magn*, vol. 30, pp. 316–321, 1994.
- [20] C.-Y. Chiang, J.-T. Jeng, B.-L. Lai, and V. Luong, "Tri-axis magnetometer with in-plane giant magnetoresistance sensors for compass application J," *J. Appl. Phys*, vol. 117, pp. 17A – 321, 2015.
- [21] M. Pannetier-Lecoecur, L. Parkkonen, N. Sergeeva-Chollet, H. Polovy, C. Fermon, and C. Fowley, "Magnetocardiography with sensors based on giant magnetoresistance Appl," *Appl. Phys. Lett*, vol. 98, 2011.
- [22] Y. Ouyang, J. He, J. Hu, and S. X. Wang, "A current sensor based on the giant magnetoresistance effect: design and potential smart grid applications Sensors 12," vol. 12, pp. 15520–15541, 2012.
- [23] O. Mareschal, C. Cordier, C. Dolabdjian, and P. Finkel, "Aluminum alloy sensitization evaluation by using eddy current techniques based on igmr-magnetometer head IEEE Trans," *IEEE Trans. Magn*, vol. 55, 2018.
- [24] P. Ripka, D. Hrakova, V. Grim, and M. Mirzaei, "Multiwire Parallel Fluxgate Sensors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 2, pp. 1–5, 2022.
- [25] "169981: Sensitivity and noise of parallel fluxgate sensor with amorphous wire cores Diana Hrakova," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 563, 2022.
- [26] L. Guo, Z. Yang, S. Zhi, Z. Feng, C. Lei, and Y. Zhou, "Sensitive detection of cardiac troponin T based on superparamagnetic bead-labels using a flexible micro-fluxgate sensor," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 82, pp. 52327–52336, 2017.
- [27] C. Lei *et al.*, "Detection of Dynabeads in small bias magnetic field by a micro fluxgate-based sensing system," *J. Appl. Phys.*, vol. 116, no. 15, p. 154701, 2014.
- [28] P. Ripka and S. W. Billingsley, "Crossfield effect at fluxgate," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 81, no. 1–3, pp. 176–179, 2000.
- [29] M. Butta, "Orthogonal Fluxgate Magnetometers," in *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 63–102.
- [30] Ripka, P.; Li, X.P. & Jie, F. Orthogonal fluxgate effect in electroplated wires. 2005 IEEE Sensors
- [31] X.P.Li, Z.J. Zhao, T.B. Oh, H.L. Seet, B.H. Neo, S.J. Koh, "Current driven magnetic permeability interference sensor using NiFe/Cu composite wire with a signal pick-up LC circuit," *Phys. stat. sol. (a)* Vol. 201 (2004), pp. 1992–1995
- [32] X. P. Li, J. Fan, J. Ding, H. Chiriac, X. B. Qian, and J. B. Yi, "A design of orthogonal fluxgate sensor," *Article number 08B313*, vol. 99, 2006.
- [33] X. P. Li, J. Fan, J. Ding, and X. B. Qian, "Multi-core orthogonal fluxgate sensor," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 300, no. 1, pp. e98–e103, 2006.
- [34] D. Gordon and R. Brown, "Recent advances in fluxgate magnetometry," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 8, no. 1, pp. 76–82, 1972.
- [35] *Sensors and Actuators A*, 33 (1992) 129- 141
- [36] *Sensors and Actuators A*, 33 (1992) 129- 141

- [37] Sensors and Actuators A 106 (2003) 8–14
- [38] L. Pérez, I. Lucas, C. Aroca, P. Sánchez, and M. Carmen Sánchez, “Analytical model for the sensitivity of a toroidal fluxgate sensor,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 130–131, pp. 142–146, 2006.
- [39] G. Singh, “Design of Fluxgate Magnetometer Sensors,” *IJEDR*, vol. 5, 2017.
- [40] “Design of Fluxgate Magnetometer Sensors,” *IJEDR*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [41] Sensors and Actuators A 255 (2017) 94–103
- [42] M. David *et al.*, “Low-Noise Permalloy Ring-Cores for Fluxgate Magnetometers, Geosci,” *Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss.*, 2019.
- [43] Gordon *et al.* 1965, 1968, Ripka 2000
- [44] A. Tipek, P. Ripka, T. O’Donnell, J. Kubik, *Sens. Actuat. A* 115, 286 (2004).
- [45] C. Carr and J. Macfarlane, “The performance of fluxgate magnetometers for non-destructive evaluation,” *Insight*, vol. 41, pp. 20–24, 1999.
- [46] Sensors and Actuators A 106 (2003) 8–14
- [47] C. Hinrichs, C. Pels, H. Schilling, Noise and linearity of a fluxgate magnetometer in racetrack geometry, *J. Appl. Phys.* 87 (2000) 7085– 7087
- [48] Sensors and Actuators A, 37-38 (1993) 417-421
- [49] Sensors and Actuators 85 2000 227–231
- [50] P. Ripka, Race-track fluxgate sensor, *Int. pat. appl.* PCTrCZ00r 00005.
- [51] Dezaury *et al* 1999, 2000, Kubik *et al* 2007
- [52] Sensors and Actuators A 115 (2004) 286–292
- [53] Sensors and Actuators A, 37-38 (1993) 417-421