



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ»

Μελέτη και κατασκευή Μαγνητομέτρου Πύλης Ροής

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ανδρέας Α. Κρίτσας

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος

Αθήνα ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ»

Μελέτη και κατασκευή Μαγνητομέτρου Πύλης Ροής

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ανδρέας Α. Κρίτσας

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 17/7/2015

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής(Υπογραφή)

Νικόλαος Θεοδώρου, Καθηγητής(Υπογραφή)

Παναγιώτης Τσαραμπάρης, Λέκτορας(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

Copyright © Κρίτσας Αντρέας, 2015

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή του Ε.Μ.Π κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την συμπαράστασή του και τη βοήθειά του στη κατανόηση του θέματος των αισθητήρων. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο και συμφοιτητή Κωνσταντόπουλο Χρήστο για τη συνεχή αρωγή του καθώς και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Νεοκλή Χατζηγεωργίου για την επιστημονική του βοήθεια αλλά και την επίβλεψή του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Πολεμικό Ναυτικό για την ευκαιρία που μου έδωσε να φοιτήσω στο συγκεκριμένο ΔΠΜΣ και για την παροχή όλων των απαιτούμενων διευκολύνσεων κατά την διάρκεια της φοίτησής μου.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την διαρκή υποστήριξή τους αλλά και την υπομονή που επέδειξαν σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Αυτή η εργασία αφιερώνεται στην Βικτώρια και στον Αναστάσιο-Αντώνιο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ηλεκτρομαγνήτη τύπου πύλης-ροής για την καλύτερη κατανόηση αυτού, με ταυτόχρονη μελέτη της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου και πως επηρεάζει τον αισθητήρα

Λέξεις κλειδιά: Αισθητήρας πύλης-ροής, μαγνητικοί αισθητήρες, μεταβολή μαγνητικού πεδίου, HMC2003

ABSTRACT

This study deals with the design and the construction of an Orthogonal Fluxgate. The aim is the better understanding how this type of sensor works, how the magnetic field is varied and how this variation affects on our magnetometer.

Key words: Fluxgate, magnetometer, magnetic sensors, magnetic field, HMC2003

Περιεχόμενα

1^ο Κεφάλαιο

1	Εισαγωγή.....	14
2	Αισθητήρες Πεδίου.....	15
2.1	Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου.....	15
2.1.1	Αισθητήρες Επαγωγής.....	15
2.1.2	SQUID (Superconductive Quantum Inference Devices).....	18
2.2	Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου Γής.....	23
2.2.1	Αισθητήρες Πύλης-ροής (FluxGate).....	24
2.2.2	Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης.....	27
2.2.3	Αισθητήρες AMR.....	27
2.3	Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου.....	30
2.3.1	Αισθητήρες GMR.....	30
2.3.1	Αισθητήρες LVDT.....	33
2.3.2	Αισθητήρες MDL.....	35
2.3.3	Αισθητήρες Hall.....	36
2.3.4	Μαγνητοοπτικοί αισθητήρες.....	37
2.4	Πως κατασκευάζεται το άμορφο ribbon.....	39
3	Πειραματική διαδικασία.....	43
4	Βιβλιογραφία.....	59
5	Υπόμνημα.....	61
5.1	Ο αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης AMR HMC 2003.....	61
5.2	Περιγραφή πηνίου HELMHOLTZ.....	64

5.3	Εφαρμογές Αισθητήρων	66
5.3.1	Βιομηχανικές Εφαρμογές	66
5.3.2	Βιοϊατρικοί Αισθητήρες	67
5.3.3	Στρατιωτικές Εφαρμογές	67
5.3.4	Περιβαλλοντικές εφαρμογές	68
5.3.5	Εφαρμογές στον Αυτοματισμό	69
5.3.6	Εργαστηριακοί Αισθητήρες	69

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Κίνηση φωνονίων.	18
Σχήμα 2: Μαγνητόμετρο Squid.....	19
Σχήμα 3: Φαινόμενο Meisner.....	20
Σχήμα 4: Πίνακας υπεραγώγιμων Υλικών.	21
Σχήμα 5: Κβάντωση Μαγνητικής Ροής.	22
Σχήμα 6: Φαινόμενο Josephson.	23
Σχήμα 7: Βασική σχηματική απεικόνιση ενός αισθητήρα Fluxgate.	24
Σχήμα 8: Πυρήνας σε κορεσμό. Μη είσοδος δυναμικών γραμμών στον αισθητήρα.	25
Σχήμα 9: Πυρήνας όχι σε κορεσμό. Είσοδος δυναμικών γραμμών στον αισθητήρα.	25
Σχήμα 10: Απλοποιημένες κυματομορφές:(Πάνω) σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο και (κάτω) σε εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο H_0	26
Σχήμα 11: Σχηματικό κύκλωμα αισθητήρα AMR.	28
Σχήμα 12: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση μιας μαγνητικής περιοχής λεπτού υμενίου.	29
Σχήμα 13: Απεικόνιση των spin σε δύο φερρομαγνητικές στρώσεις (FM) που διαχωρίζονται από μία μη- μαγνητική στρώση.	32
Σχήμα 14: Ο κύριος βρόχος απόκρισης όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο παράλληλο στο εύκολο άξονα μαγνήτισης των μαλακών και των σκληρών μαγνητικών επιπέδων.....	33
Σχήμα 15: Διέγερση της αντίστασης με χαμηλό πεδίο. Μόνο το μαλακό μαγνητικό επίπεδο μεταβάλλεται.....	33
Σχήμα 16: Σχηματική αναπαράσταση ενός αισθητήρα LVDT.	34
Σχήμα 17: Η διάταξη ενός αισθητήρα MDL.(1:Κινούμενο πηνίο διέγερσης 2:MDL 3:Κινούμενο πηνίο λήψης).	36
Σχήμα 18: Αναπαράσταση μέσω μαγνητικού αισθητήρα ενός σειριακού αριθμού που είχε αφαιρεθεί.	38
Σχήμα 19: Σύγκριση μαγνητικών αισθητήρων	39
Σχήμα 20: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής ribbon.....	40

Σχήμα 21: (α) Οι αισθητήρες του Orthogonal Fluxgate. (β) Σήμα εξόδου του αισθητήρα. (γ) Η FFT ανάλυση με 50 Gsamples/sec. (δ) Η FFT ανάλυση σε dB με 50 Gsamples/sec.....	44
Σχήμα 22: Γραφική παράσταση περιττών αρμονικών	45
Σχήμα 23: Γραφική παράσταση άρτιων αρμονικών.....	45
Σχήμα 24: Μεγίστη τιμή παλμογράφου για το αρνητικό πεδίο (ρεύμα διέγερσης -0,3mA)	46
Σχήμα 25: Τιμή παλμογράφου για περίπου μηδενικό πεδίο (ρεύμα διέγερσης <0,001mA).....	46
Σχήμα 26: Μεγίστη τιμή παλμογράφου για θετικό πεδίο (ρεύμα διέγερσης 0,3mA).....	47
Σχήμα 27: Απόκριση Αιθητήρα AMR HMC 2003.	51
Σχήμα 28: Τάση εξόδου P1 σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης.	52
Σχήμα 29: Τάση εξόδου P2 σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης.	52
Σχήμα 30: Άθροισμα P1 και P2 στο πεδίο του ρεύματος ειδοδού.	53
Σχήμα 31: Άθροισμα P1 και P2 στο πεδίο του μαγνητικού πεδίου.	53
Σχήμα 32: Διάγραμμα χρονικής υστέρησης.	54
Σχήμα 33: Χρονική καθυστέρηση της θετικής κορυφής του C1 με το C2.	55
Σχήμα 34: Απόκριση εξόδου του αισθητήρα.	57
Σχήμα 35: Διάγραμμα καθυστέρησης φάσης μεταξύ παλμού εξόδου και παλμού εισόδου. ...	58
Σχήμα 36: Μαγνητοαντίσταση σε διάταξη γέφυρας Wheatstone.....	62
Σχήμα 37: Αισθητήρας AMR HMC 2003 της Honeywell.....	63
Σχήμα 38: Σύγκριση ενός πηνίου Helmholtz όσον αφορά τη σταθερότητα του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα.	65

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας Μετρήσεων 48

Πίνακας 2: Πίνακας Μετρήσεων με Μεταβολή Εξωτερικού Πεδίου..... 56

1^ο Κεφάλαιο

Θεωρητικό Μέρος

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πιο σύγχρονοι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου, επιτρέπουν τη ναυσιπλοία στην ανοιχτή θάλασσα, με την ανίχνευση των μαγνητικών πόλων της γης. Η ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου της γης έχει επεκταθεί πάρα πολύ, καθώς η βιομηχανία έχει προσαρμόσει μια ποικιλία από μαγνητικούς αισθητήρες για να ανιχνεύουν την παρουσία, την ένταση και την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, όχι μόνο της γης, αλλά και των μόνιμων μαγνητών, την μαγνητική διαταραχή που προκαλείται από οχήματα, τα κύματα εγκεφαλικής δραστηριότητας και πεδίων που δημιουργούνται από ηλεκτρικά ρεύματα. Οι μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν αυτές τις ιδιότητες χωρίς φυσική επαφή και έχουν γίνει τα «μάτια» πολλών βιομηχανιών και συστημάτων ελέγχου πορείας.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι σε χρήση εδώ και 2.000 χρόνια. Οι πρώτες εφαρμογές τους ήταν για την εύρεση κατεύθυνσης και για την ναυσιπλοία (πυξίδες). Σήμερα οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ακόμα κυρίως για την ναυσιπλοία αλλά έχουν αναπτυχθεί και πολλές άλλες χρήσεις τους. Η τεχνολογία των μαγνητικών αισθητήρων βελτιώθηκε πολύ από την ανάγκη για αυξημένη ευαισθησία, μικρότερο μέγεθος και για λόγους συμβατότητας με άλλα ηλεκτρονικά συστήματα και εξοπλισμό. Παρακάτω θα παρουσιαστούν διάφοροι τύποι μαγνητικών αισθητήρων και των εφαρμογών τους και θα δοθεί έμφαση στους αισθητήρες Πύλης Ροής (Fluxgates). Γενικά κατά τη χρήση μαγνητικών αισθητήρων, η άμεση μέτρηση του μαγνητικού πεδίου δεν είναι το ζητούμενο. Σκοπός είναι η μέτρηση κάποιου άλλου μεγέθους όπως η ταχύτητα περιστροφής, η παρουσία ενός μαγνητικού μελανιού, η ανίχνευση οχήματος ή ο προσδιορισμός της ενδείξεως μιας πυξίδας. Αυτά τα μεγέθη δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα, αλλά μπορούν να εξαχθούν από αλλαγές ή διαταραχές στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα σε ένα καλώδιο, γύρω από ένα μόνιμο μαγνήτη ή τις μεταβολές του γήινου μαγνητικού πεδίου.

2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

2.1 Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου

Οι αισθητήρες ασθενούς μαγνητικού πεδίου είναι αυτοί που μπορούν να μετρήσουν ασθενή μαγνητικά πεδία. Ως ασθενή πεδία στην περίπτωση μας θεωρούμε τα πεδία που είναι μικρότερα από 1μ gauss. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται δύο τύποι αισθητήρων:

- τα πηνία ανίχνευσης (search coils), τα οποία ανήκουν στους επαγωγικούς αισθητήρες και
- τα μαγνητόμετρα SQUIDS

2.1.1 Αισθητήρες Επαγωγής

Οι αισθητήρες επαγωγής βασίζονται στο νόμο του Faraday. Σύμφωνα με τον ορισμό της, η μαγνητική ροή που διέρχεται από μία επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους. Πρώτον, αυτό μπορεί να γίνει αν μεταβληθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου εντός του οποίου βρίσκεται η επιφάνεια. Δεύτερον, σε ένα μη μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί αν αλλάξει ο προσανατολισμός της επιφάνειας σε σχέση με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Αντίστοιχα, εντοπίζονται δύο δυνατότητες προκειμένου να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής: Είτε μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου στα σημεία της επιφάνειας που ορίζει ο αγωγός, είτε μετακινώντας τον αγωγό εντός του μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε περίπτωση, στα άκρα του αγωγού αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στην οποία έχει, λόγω της προέλευσής της, αποδοθεί η ονομασία επαγωγική τάση ή τάση από επαγωγή.

Στην περίπτωση που τα άκρα του αγωγού είναι συνδεδεμένα με αγώγιμο υλικό, οπότε δημιουργείται κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα, το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής εκφράζεται με την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) στο κύκλωμα.

Σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής (ή νόμο του Φαραντέι), η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής:

$$V_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d N \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(t) \cdot H(t)}{dt} \quad (1)$$

Όπου:

V_i = η επαγόμενη τάση στα άκρα του πηνίου

N = ο αριθμός των σπειρών

Φ = η μαγνητική ροή που περνά από το πηνίο

A = η κάθετη διατομή του πηνίου

$H(t)$ = το μαγνητικό πεδίο

μ_0 = μαγνητική διαπερατότητα του αέρα.

$\mu_r(t)$ = η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα σε σχέση με την μ_0 .

Η εξίσωση (1) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$V_i = \frac{d\Phi}{dt} = N A \mu_0 \mu_r \frac{dH(t)}{dt} + N \mu_0 \mu_r \frac{dA(t)}{dt} + N A \mu_0 H \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (2)$$

Τα πηνία ανίχνευσης (search coils) βασίζονται στον πρώτο όρο. Ο μεσαίος όρος περιγράφει τα περιστρεφόμενα πηνία, όπου ο όρος $A(t)$ είναι η ωφέλιμη περιοχή του επιπέδου κάθετα στο μετρούμενο πεδίο. Ο τρίτος όρος είναι η εξίσωση που διέπει τα μαγνητόμετρα πύλης ροής (fluxgate).

Ένα σωληνοειδές επαγωγικό πηνίο μαγνητομέτρου αποτελείται από πολλά επίπεδα σπειρών. Τα πηνία ανίχνευσης χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Τα πηνία που βασίζονται σε πυρήνα αέρα και σε αυτά με πυρήνα σιδηρομαγνητικό. Τα πηνία με σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά είναι λιγότερα σταθερά από αυτά χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τέτοιου είδους πηνία πρέπει να είναι μακριά και λεπτά και να έχουν χαμηλή απομαγνήτιση. Οι επαγωγικοί αισθητήρες είναι παθητικού τύπου και πρέπει να διαχωριστούν από τους αισθητήρες μέτρησης επαγωγής, οι οποίοι απαιτούν κυκλώματα διέγερσης για τη λειτουργία τους. Τους αισθητήρες μέτρησης επαγωγής θα τους δούμε στην κατηγορία GMI.

Συνοπτικά για τα πηνία «ανίχνευσης» μπορούμε να πούμε ότι χρησιμοποιούνται σε αρκετούς τομείς. Στη γεωφυσική για να μετρούν αδύνατους παλμούς του πεδίου της γης και για συχνότητες στο εύρος (1mHz έως 1Hz). Στο εύρος ακουστικών συχνοτήτων μπορεί να λειτουργούν σαν μικρόφωνο, όπως επίσης για καταγραφή και ανάγνωση μαγνητικών ταινιών. Στη μεταλλουργική χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση-μελέτη των δευτερευόντων μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται μετά από διέγερση, όπως για παράδειγμα τη μέτρηση του θορύβου Barkhausen.

Τα πηνία με πυρήνα αέρα σε συνδυασμό με μαγνητόμετρα πύλης ροής (Fluxgate) χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη DC συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Αυτό γίνεται με την αφαίρεση από τη μέτρηση του fluxgate της μέτρησης από τα πηνία ανίχνευσης.

Η απόκριση συχνότητας των πηνίων «ανίχνευσης» είναι γραμμική για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, το οποίο εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Τα πηνία πολλών τυλιγμάτων εμφανίζουν κατανομημένες χωρητικότητες και με την υψηλή επαγωγή τους προκαλούν συντονισμό στις χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, στις υψηλές συχνότητες η έξοδος των πηνίων «ανίχνευσης» είναι μη γραμμική. Η παρασιτική αυτή χωρητικότητα επηρεάζεται από τη συχνότητα και κατά συνέπεια η απόκριση συχνότητας αλλάζει με τη θερμοκρασία, παρόλο που είναι προβλέψιμη η μεταβολή με τη θερμοκρασία. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη με τη συχνότητα, το δε ρεύμα εξόδου έχει μια επίπεδη απόκριση για συχνότητες $f \gg \frac{R}{2\pi L}$. Με την αύξηση της διατομής του πηνίου η ευαισθησία αυξάνεται. Ο παράγοντας $\frac{R}{L}$ εξαρτάται από την ποσότητα του χαλκού, τον αριθμό των σπειρών και τη διατομή του, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή. Όπως για παράδειγμα να ανταποκρίνεται στο θόρυβο εισόδου του ενισχυτή^[1].

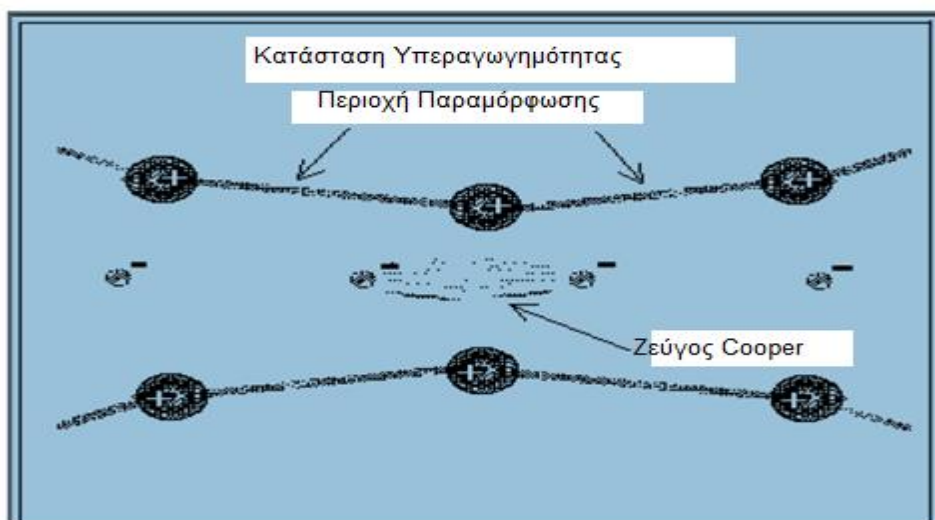
2.1.2 SQUID (Superconductive Quantum Inference Devices)

Τα μαγνητόμετρα SQUIDs βασίζονται στο φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, δηλαδή, όταν συγκεκριμένα υλικά παρουσιάζουν δραματική μείωση της ειδικής τους αντίστασης, η οποία μηδενίζεται σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν το απόλυτο μηδέν ^[2]. Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τον Ολλανδό φυσικό Heike Kamerlingh Onnes το 1911. Ο ίδιος μαζί με έναν από τους φοιτητές του ανακάλυψαν ότι κάτω από τη θερμοκρασία των $4,15\text{K}^\circ$ η ειδική αντίσταση του Υδραργύρου μηδενίζεται ^[3].

Αναπτύχθηκε γύρω στο 1962 με τη βοήθεια του έργου του Brian J. Josephson. Ο B. Josephson ανέπτυξε την ένωση επαφής σημείου με σκοπό την μέτρηση εξαιρετικά χαμηλών ρευμάτων.

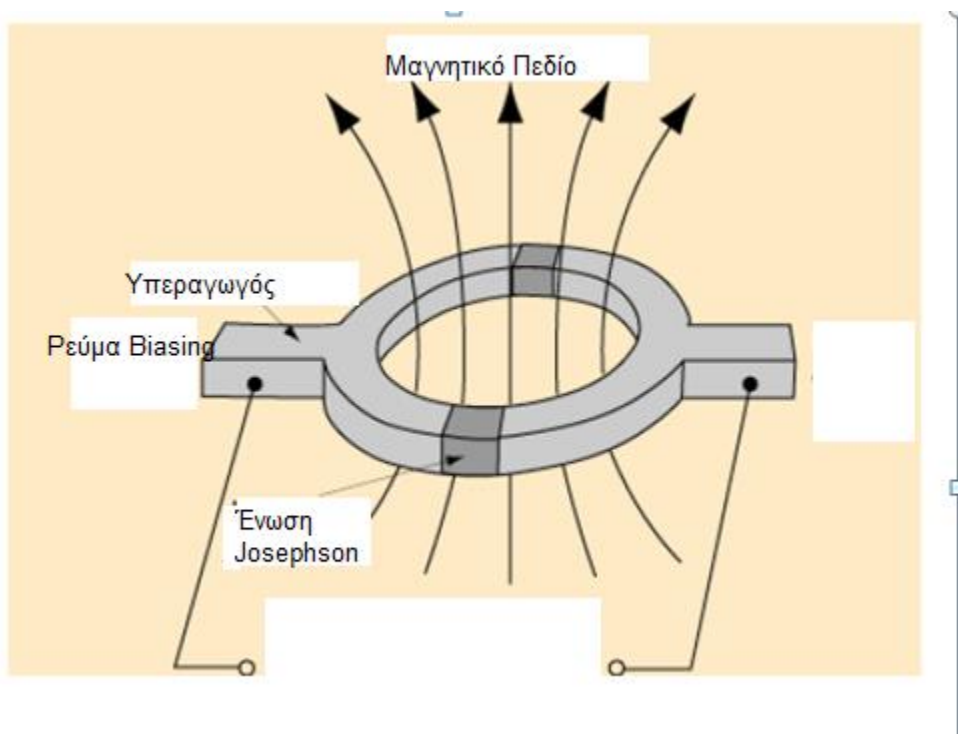
Ο μηχανισμός που επιτρέπει αυτήν την υπεραγωγιμότητα είναι η ανταλλαγή φωνονίων (phonon) μεταξύ των ζευγών ηλεκτρονίων (Cooper pairs), σύμφωνα με τη θεωρία των Bardeen- Cooper- Schriber (BCS) ^[2].

Τα φωνόνια δημιουργούν έναν ιδανικό «κινούμενο» χώρο ανάμεσα στα άτομα του πλέγματος που ταξιδεύει με την ταχύτητα του ήχου μέσα στον κρύσταλλο. Μέσα στο χώρο αυτό τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν ανά δύο και ταξιδεύουν με τρόπο που να μην εμφανίζεται η ιδιότητα της ιδιοστροφορμής (spin) του καθενός ^[4].



Σχήμα 1: Κίνηση φωνονίων.

Τα SQUID μαγνητόμετρα έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν πεδίο στην κλίμακα από μερικά fempto Tesla μέχρι 9 Tesla. Αυτό είναι το κλειδί για την ιατρική χρήση, αφού το νευρομαγνητικό πεδίο είναι μόλις μερικές δεκάδες fempto Tesla. Η τιμή αυτή του μαγνητικού πεδίου είναι 10-8 φορές πιο κάτω από την τιμή του γήινου μαγνητικού πεδίου. Τα μαγνητόμετρα SQUID χρησιμοποιούνται σε πολλά ερευνητικά κέντρα και σε πολλά πανεπιστήμια, για τον χαρακτηρισμό των μαγνητικών υλικών.



Σχήμα 2: Μαγνητόμετρο Squid.

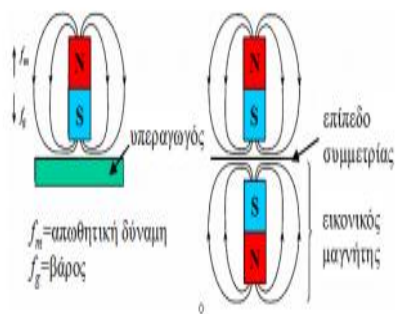
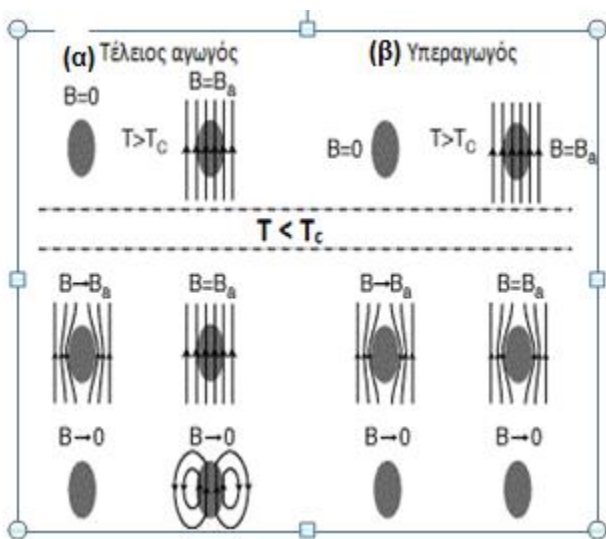
2.1.2.1 Φαινόμενο Meissner

Υπεραγωγιμότητα είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε μερικά υλικά, σύμφωνα με το οποίο, όταν αυτά ψυχθούν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία T_c αυτά εμφανίζουν τις εξής δύο ιδιότητες:

- Μηδενική ηλεκτρική αντίσταση
- Τέλειο διαμαγνητισμό (φαινόμενο Meissner)

Μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σημαίνει ότι δεν δαπανάται καθόλου ενέργεια ως θερμότητα όταν το υλικό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Μια σημαντική ιδιότητα των υπεραγωγών, είναι ότι κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία τους απωθούν το μαγνητικό πεδίο σαν να ήταν μια τέλεια διαμαγνητική ουσία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Meissner. Όταν το υλικό βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από την κρίσιμη, οι γραμμές της μαγνητικής ροής διαπερνούν το υλικό, όπως ήταν αναμενόμενο και για κάθε μέσο με χαμηλό μ_r . Όταν όμως η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται ο υπεραγωγός είναι χαμηλότερη της κρίσιμης, τότε απωθεί όλο το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του δημιουργώντας ένα επιφανειακό ρεύμα. Αυτό συμβαίνει σαν συνέπεια των εξισώσεων Maxwell, στις οποίες δεν μπορεί να υπάρξει διαφορά δυναμικού πεδίου στον υπεραγωγό.



Σχήμα 3: Φαινόμενο Meissner.

Υπεραγωγοί

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1A	1	H	2	He	0																												
	3	Li	4	Be		5	6	7	8	9	10																						
	11	Na	12	Mg		13	14	15	16	17	18																						
	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	24	V	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36										
	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	42	Nb	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54										
	55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	74	Ta	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86										
	87	Fr	88	Ra	89	+Ac	104	Rf	105	106	Ha	106	107	108	109	110	111	112															

SUPERCONDUCTORS.ORG

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Σχήμα 4: Πίνακας υπεραγωγίμων Υλικών.

2.1.2.2 Κβαντισμός της μαγνητικής ροής

Η παγιδευμένη μαγνητική ροή έχει κάποιες ασυνήθιστες ιδιότητες. Αυτό που μας ενδιαφέρει πρώτα από όλα δεν μπορούμε να αλλάξουμε με συνεχές τρόπο την μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή είναι ένα κβαντισμένο φαινόμενο. Το μικρότερο κβάντο ροής ισούται με $h/2e$ ή με $2.0679 \times 10^{-15} \text{ Wb}(\text{T}\cdot\text{m}^2)$. Κατά συνέπεια η αλλαγή της μαγνητικής ροής συμβαίνει μόνο σε διακριτά επίπεδα, και είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του ελάχιστου κβάντου ροής,

$$\Phi = n \frac{h}{2e} \quad (3)$$



Σχήμα 5: Κβάντωση Μαγνητικής Ροής.

2.1.2.3 Το φαινόμενο Josephson

Η ένωση Josephson ανακαλύφθηκε το 1962 και είναι η ένωση δύο υπεραγωγών οι οποίοι ανάμεσά τους χωρίζονται από ένα λεπτό μονωτή με πάχος ορισμένων νανομέτρων. Λόγω του λεπτού πάχους του φράγματος, υπάρχει η πιθανότητα ένα ζεύγος Cooper να διασχίσει την ένωση λόγω του φαινομένου σήραγγας “tunneling”. Για μικρά μήκη, μικρότερα του συνεκτικού μήκους και για ρεύματα μικρότερα του κρίσιμου ρεύματος I_c , το ρεύμα διαπερνά το φράγμα χωρίς πτώση τάσης. Για ένα υπεραγωγό βρόχο, ο οποίος διακόπτεται με μία ασθενή επαφή Josephson, η μαγνητική ροή δημιουργεί ένα ρεύμα στο βρόχο. Όταν το ρεύμα είναι κάτω από το κρίσιμο ρεύμα, ο βρόχος συμπεριφέρεται ως κανονικός υπεραγωγός. Οποιαδήποτε αλλαγή στην μαγνητική ροή προκαλεί ένα ρεύμα θωράκισης, το οποίο στην συνέχεια δημιουργεί ένα μικρό μαγνητικό πεδίο το οποίο τείνει να αντισταθμίσει την αλλαγή στην μαγνητική ροή.

Η επαφή βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο Dewar και σε θερμοκρασία ίση περίπου με $4,2^\circ$ K και το περιβάλλον μέσο είναι υγρό λίθιο. Τα δοχεία Dewar είναι δοχεία στα οποία μπορούμε να διατηρήσουμε για μεγάλο διάστημα ένα υγρό σε σταθερή θερμοκρασία, υψηλότερη ή χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο αέρας μεταξύ των τοιχωμάτων έχει αφαιρεθεί για να αποφεύγεται η διαρροή θερμότητας λόγω θερμικής αγωγιμότητας και μεταφοράς. Επειδή οι καττοπτρικές επιφάνειες δεν εκπέμπουν θερμότητα, οι εσωτερικές επιφάνειες του δοχείου επαργυρώνονται

Η σχέση που διέπει αυτή την διάταξη είναι η ακόλουθη:

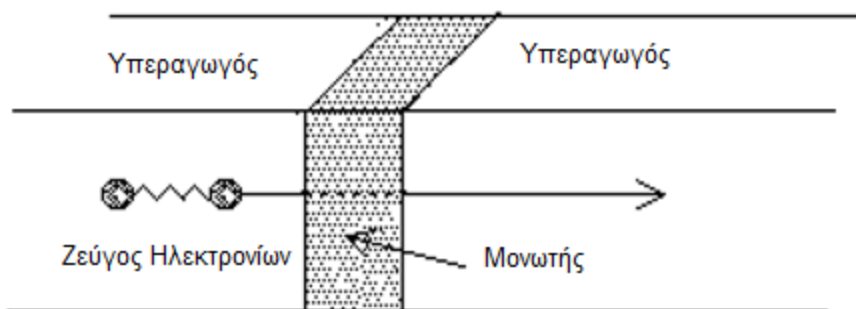
$$V_j = n \cdot f / K_{j-90} \quad (4)$$

Όπου V_j η τάση επαφής

f συχνότητα σε GHz

K_{j-90} 483.597,9 GHz/V

n ένας θετικός ή αρνητικός συντελεστής



Σχήμα 6: Φαινόμενο Josephson.

Τα μαγνητόμετρα SQUID χρησιμοποιούν το φαινόμενο Josephson για να μετρούν τις εξαιρετικά μικρές μεταβολές στην μαγνητική ροή.

2.2 Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου Γής

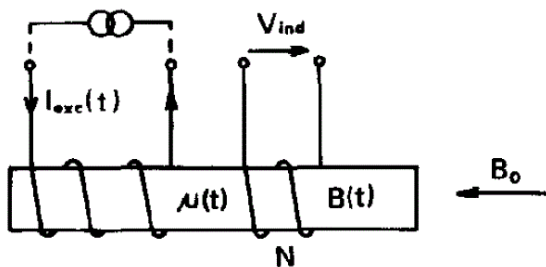
Οι μαγνητικοί αισθητήρες αυτού του τύπου συχνά χρησιμοποιούν το πεδίο της γης. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν το πεδίο αυτής ως αναφορά για τον καθορισμό της πορείας αλλά και τον εντοπισμό ανωμαλιών που προκαλούν μεταλλικά αντικείμενα στο πεδίο αυτής. Στην κατηγορία των αισθητήρων αυτών ανήκουν οι αισθητήρες:

- Αισθητήρες Πύλης-Ροής (Fluxgate).
- Αισθητήρες Μαγνητοεμπέδησης.
- Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης {AMR (Anisotropic Magnetic Resistance)}.

2.2.1 Αισθητήρες Πύλης-ροής (FluxGate)

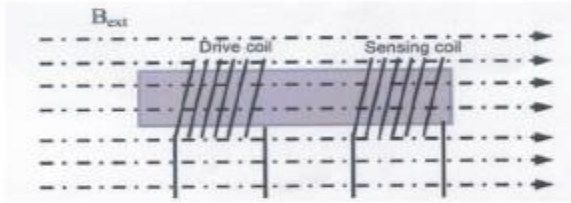
Οι αισθητήρες Fluxgate είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως απαιτητικές εφαρμογές. Το μαγνητόμετρο πύλης-ροής είναι ένα υψηλής ευαισθησίας μαγνητόμετρο. Υπάρχουν δύο τύποι σε αυτή την κατηγορία: τα parallel fluxgate και τα orthogonal fluxgate (OFG). Τα parallel fluxgate χρησιμοποιούν δύο πηνία. Το πρώτο είναι το πηνίο διέγερσης και δεύτερο το πηνίο λήψης, και στηρίζεται στην δεύτερη αρμονική της τάσης κατά τη ανίχνευσης πηνίου. Τα «Parallel fluxgates» κατασκευασμένα με πυρήνα δακτυλίου, έχουν χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις που απαιτούν υψηλή ανάλυση, όπως για την μακροχρόνια παρατήρηση του γεωμαγνητικού πεδίου καθώς επίσης και σε διαστημικές αποστολές.

Οι αισθητήρες τύπου fluxgate είναι μια συμπαγής συσκευές που έχουν τη δυνατότητα μέτρησης τόσο του πλάτους όσο και τη διεύθυνση μαγνητικού πεδίου συνεχούς ρεύματος ή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ευαισθησία τους είναι υψηλή και μπορούν να μετρήσουν πεδία από 10^{-10}T έως και 10^{-4}T . Η βασική αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στην παρακάτω Σχήμα.

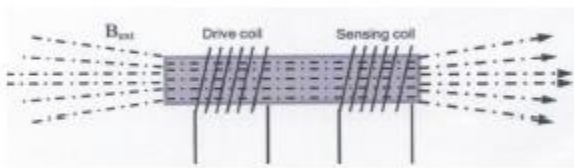


Σχήμα 7: Βασική σχηματική απεικόνιση ενός αισθητήρα Fluxgate.

Το μαλακό μαγνητικό υλικό του πυρήνα του αισθητήρα είναι περιοδικά κορεσμένο σε αμφότερες τις πολικότητες από το πεδίο διέγερσης AC, το οποίο δημιουργείται από το ρεύμα διέγερσης I_{exc} μέσω του πηνίου διέγερσης. Εξ αιτίας αυτού, η διαπερατότητα του πυρήνα αλλάζει και η ροή dc που συνδέεται με το μετρούμενο DC μαγνητικό πεδίο B_0 διαμορφώνεται. Η πύλη (gating) της ροής που λαμβάνει χώρα όταν ο πυρήνας είναι κορεσμένος έδωσε το όνομα στη συσκευή.



Σχήμα 8: Πυρήνας σε κορεσμό. Μη είσοδος δυναμικών γραμμών στον αισθητήρα.



Σχήμα 9: Πυρήνας όχι σε κορεσμό. Είσοδος δυναμικών γραμμών στον αισθητήρα.

Στο σχήμα 10 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου. Η έξοδος της συσκευής είναι συνήθως η τάση V_1 η οποία επάγεται στο αισθητήριο πηνίο στη δεύτερη ή και ανωτέρας τάξης αρμονική της συχνότητας διέγερσης. Η τάση αυτή είναι ανάλογη του μετρούμενου πεδίου.

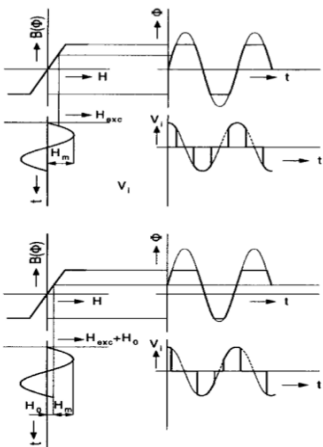
Η πρώτη πατέντα σε αισθητήρες fluxgate καταχωρήθηκε από τον H.P. Thomas το 1931. Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο για την ανίχνευση υποβρυχίων και αργότερα για γεωφυσικές εφαρμογές. Αισθητήρες Fluxgate απαντιούνται και σε διαστημικές εφαρμογές και μπορούν να λειτουργήσουν επίσης και στο φεγγάρι αλλά και στο μακρινό διάστημα. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή των fluxgate είναι για να μετρούν χαμηλής έντασης ρεύματα ή να συγκρίνουν δύο ρεύματα μεταξύ τους.

Η ανάλυση των Fluxgate μπορεί να φθάσει τα 10pTesla και 1nTesla για σταθερότητα μακράς διάρκειας. Η απόκλιση που μπορεί να προκληθεί λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι περίπου $0.1\text{nTesla}/^\circ\text{C}$. Το επίπεδο θορύβου είναι συγκρίσιμο με αυτό των SQUID υψηλών θερμοκρασιών, αλλά με μεγαλύτερο δυναμικό εύρος.

2.2.1.1 Αρχή λειτουργίας

Έστω ότι έχουμε ένα ιδανικό βρόχο υστέρησης του ενός μισού του αισθητήρα ($F1 Vs$). Η διέγερση είναι ίδια με τα χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών. Εφόσον το μαγνητικό κύκλωμα είναι κλειστό, όπως φαίνεται στο σχήμα 10 (πάνω). Όταν το εξωτερικό πεδίο DC εφαρμόζεται, η χαρακτηριστική καμπύλη του βρόχου παραμορφώνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 10 (κάτω). Για μερικές κρίσιμες τιμές του H διέγερσης, το μισό του πυρήνα, στο οποίο το πεδίο διέγερσης έχει την ίδια διεύθυνση με το μετρούμενο πεδίο, γίνεται κορεσμένο. Τη στιγμή αυτή η χαλάρωση (reluctance) του μαγνητικού κυκλώματος αυξάνεται πολύ γρήγορα, επειδή η ροή περιορίζεται από την πύλη (flux is “gated”). Η διαπερατότητα του άλλου μισού πυρήνα μειώνεται. Επιπλέον, η χαρακτηριστική καμπύλη μετατοπίζεται από το εξωτερικό πεδίο κατά μήκος του άξονα H .

Η χαρακτηριστική του δεύτερου μισού του πυρήνα είναι συμμετρική ως προς τον Φ άξονα. Με την άθροιση των δύο βρόχων παρατηρούμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς του Φ ως προς την H διέγερση χαρακτηριστική. Το πλάτος της συνάρτησης μεταφοράς (το οποίο αντιστοιχεί σε αλλαγές κορυφής ως προς κορυφή του πηνίου λήψης) αυξάνεται με το μετρούμενο πεδίο. Αναφορικά με την εξάρτηση, αυτή είναι γραμμική μέχρι που η ένταση του πεδίου να είναι υψηλή και ολόκληρος ο αισθητήρας να κορεστεί ^[5].



Σχήμα 10: Απλοποιημένες κυματομορφές:(Πάνω) σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο και (κάτω) σε εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο H_0 .

2.2.2 Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης βασίζονται στο φαινόμενο της σκέδασης των ηλεκτρονίων, η οποία εξαρτάται από τη διεύθυνση της στροφορμής (spin) ως προς το στιγμιαίο (spontaneous) μαγνητισμό των φερρομαγνητικών υλικών. Την κατηγορία αυτή μπορούμε να τη χωρίσουμε σε τρεις υποκατηγορίες. Η πρώτη υποκατηγορία είναι οι αισθητήρες με ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR), οι οποίες μαγνητοαντιστάσεις κατασκευάζονται σε λεπτά υμένα. Η δεύτερη υπό-κατηγορία είναι οι αντιστάσεις γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR), οι οποίες βασίζονται στο φαινόμενο της ανταλλαγής σύζευξης (coupling) στα υπέρλεπτα μαγνητικά και μη μαγνητικά επίπεδα (superlattices). Η τρίτη υποκατηγορία αφορά τους αισθητήρες τύπου κολοσσιαίας μαγνητοαντίστασης (CMR).

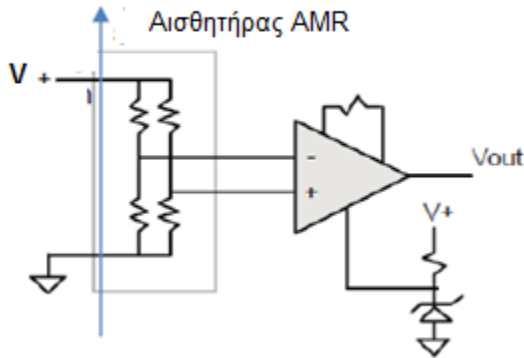
Το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης ανακαλύφθηκε το 1857 από τον Thomson, αλλά μόνο τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έρευνας και ανάπτυξης έχει καταστεί δυνατή η εφαρμογή τους στην βιομηχανία των αισθητήρων καθώς και στην δημιουργία κεφάλων ανάγνωσης-καταγραφής δεδομένων. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί βασίζεται στην εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας και στις απαιτήσεις για μείωση του μεγέθους.

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης είναι κατάλληλοι για μέσης τάξης πεδία, όπως αυτά του μαγνητικού πεδίου της γης και σε εφαρμογές μέτρησης θέσης. Μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνικές μικροηλεκτρονικής, ώστε να είναι μικρού μεγέθους και υψηλής ακρίβειας, αλλά συνάμα χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, στους σκληρούς δίσκους υπάρχει μια κεφαλή GMR σε κάθε βελόνα ανά μία επιφάνεια δίσκου.

2.2.3 Αισθητήρες AMR

Οι πρώτοι που παρατήρησαν την επίδραση του μαγνητικού πεδίου στην αντίσταση φερομαγνητικών μετάλλων ήταν οι W. Thomson και Lord Kelvin το 1856. Η ανακάλυψη όμως αυτή έπρεπε να περιμένει περισσότερο από 100 χρόνια πριν κατασκευαστεί ένας λειτουργικός αισθητήρας με την τεχνολογία λεπτών στρωμάτων (thin film technology). Οι μαγνητικοί αισθητήρες αυτού του τύπου βρίσκουν εφαρμογές σε υψηλής πυκνότητας κεφαλές ανάγνωσης μαγνητικών μέσω, όπως ταινιών και δίσκων. Διάφορες εφαρμογές

τους είναι στη ναυσιπλοία, στην ανίχνευση οχημάτων, στη μέτρηση ταχύτητας περιστροφής, στην ανίχνευση ρεύματος και πολλές άλλες.

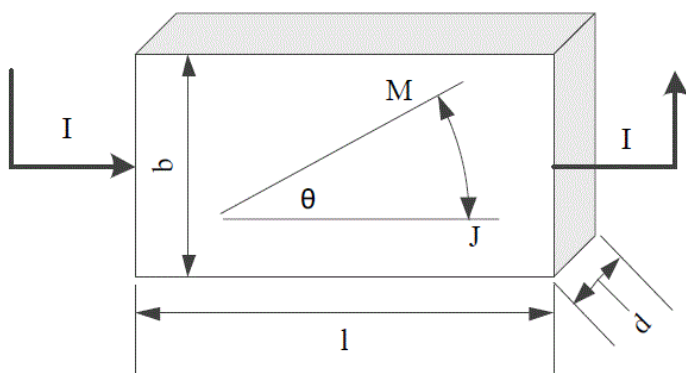


Σχήμα 11: Σχηματικό κύκλωμα αισθητήρα AMR.

Το φαινόμενο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης βασίζεται στον ανισοτροπικό σκεδασμό των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας, με ασύζευκτα ηλεκτρόνια στην ζώνης σθένους, π.χ. το 3d τροχιακό των στοιχείων μετάπτωσης Fe, Co, και Ni. Η ενέργεια των δύο καταστάσεων της στροφορμής της μαγνητικής ροπής ($\pm\mu_B$) διαφέρει κατά την κβαντική μηχανική από την ενέργεια ανταλλαγής. Αυτά τα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση φερρομαγνητισμού και φερριμαγνητισμού.

Η θεωρητική ανάλυση των AMR δίνεται από τους «όρους» στάθμη Fermi και το διάγραμμα πυκνότητας ηλεκτρονίων της κατάστασης. Η δυσκολία είναι ότι το ανισοτροπικό μέρος της αντίστασης εξαρτάται από το ακριβές τρισδιάστατο σχήμα της επιφάνειας Fermi (της 3d πτυχής της στάθμης Fermi), η οποία δεν είναι γνωστή με ακρίβεια εκτός από πολύ λίγα μαγνητικά υλικά. Ως εκ τούτου, οι θεωρητικοί δεν έχουν καταφέρει να υπολογίσουν το φαινόμενο περισσότερο από το ένα δέκατο του πλάτους. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι όλα τα δεδομένα για τα υλικά θα πρέπει να βρεθούν εμπειρικά. Το πλάτος και το πρόσημο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) δεν μπορούν να προβλεφθούν με ευκολία.

Παρόλα αυτά, τα περισσότερα υλικά έχουν θετική σταθερά ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, το οποίο σημαίνει ότι η υψηλή αντίσταση εμφανίζεται όταν τα διαστήματα που περιγράφουν την αυθόρμητη μαγνήτιση M_s και την πυκνότητα ρεύματος J είναι παράλληλα. Στο σχήμα 12 απεικονίζεται μια μαγνητική περιοχή ενός φερρομαγνητικού λεπτού υμενίου. Το φαινόμενο AMR μπορεί να περιγραφεί απλά στον δισδιάστατο χώρο. Όπως φαίνεται οι διαστάσεις του ορθογωνίου λεπτού φερρομαγνητικού υμενίου είναι: l το μήκος, b το πλάτος, και d το πάχος. Επίσης φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων. Ένα εφαρμοζόμενο πεδίο κατά τον x άξονα H_y περιστρέφει το M_s κατά γωνία θ από τον εύκολο άξονα μαγνήτισης στο δύσκολο άξονα της ομοαξονικής ανισοτροπίας^[1].



Σχήμα 12: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση μιας μαγνητικής περιοχής λεπτού υμενίου.

Η παρακάτω εξίσωση δίνει την εξάρτηση της σταθεράς ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τη γωνία $\theta = \varphi - \psi$.

$$\rho(\theta) = \rho_0 + (\rho_p - \rho_0) \cdot \cos^2(\theta) = \rho_0 + \Delta\rho \cdot \cos^2(\theta) \quad (5)$$

Όπου $\rho = \rho_p$ για M_s παράλληλο με το ρεύμα J και $\rho = \rho_0$ για M_s κάθετο με το ρεύμα J .

Το πηλίκο $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ είναι η σταθερά μαγνητοαντίστασης.

Η εξίσωση που δίνει η αντίσταση είναι $R(\theta) = \rho(\theta) \frac{l}{bd} = R + \Delta R \cos^2(\theta)$ (6)

2.3 Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιείται ένας μόνιμος μαγνήτης για να δημιουργήσει το πεδίο του οποίου η μεταβολή ανιχνεύεται στη συνέχεια από έναν αισθητήρα. Οι αισθητήρες του τύπου αυτού είναι κατάλληλοι για τέτοιες εφαρμογές. Η χρήση του εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, συνήθως μεγαλύτερου από το πεδίο της γης, δεν πρέπει να επηρεάζει μόνιμα τον αισθητήρα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται δύο αισθητήρες:

- Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης (GMR).
- Αισθητήρες Hall.

2.3.1 Αισθητήρες GMR

Οι αισθητήρες GMR ανακαλύφθηκαν το 1988 ανεξάρτητα από τις ομάδες των Albert Fert του πανεπιστημίου του Paris-Sud, της Γαλλίας, και Peter Grünberg του Forschungszentrum Julich, της Γερμανίας. το 2007 ο Fert και ο Grünberg βραβεύτηκαν με Nobel Φυσική για την πρακτική σημασία πειραματική ανακάλυψή τους.

Οι αισθητήρες GMR βασίζονται στις μεγάλες αλλαγές της αντίστασης, από το επιβαλλόμενο πεδίο, που μπορούν να επιτευχθούν σε αλληπάλληλα στρώματα μαγνητικού και μη μαγνητικού υλικού, κατασκευασμένα με την τεχνολογία λεπτών στρωμάτων (thin film technology). Η αλλαγή στην αντίσταση, σε σχέση με το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι της τάξης του 70%.

Πιο συγκεκριμένα ο αισθητήρας GMR είναι το αποτέλεσμα της κβαντομηχανικής μαγνητοαντίστασης που παρατηρήθηκε σε δομές thin-film με τη χρήση εναλλασσόμενων, φερρομαγνητικών και μη, μαγνητικά αγώγιμων στρώσεων.

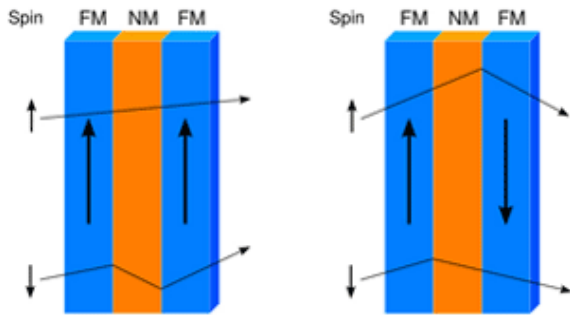
Το φαινόμενο παρατηρήθηκε ως μία σημαντική αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση ανάλογα με το αν η μαγνήτιση των γειτονικών σιδηρομαγνητικών στρώσεων είναι σε παράλληλη ή σε αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση, Η συνολική αντίσταση που

παρατηρείται είναι σχετικά χαμηλή για την παράλληλη ευθυγράμμιση και σχετικά υψηλή για την αντιπαράλληλη. Η κατεύθυνση της μαγνήτισης μπορεί να ελέγχεται, για παράδειγμα, με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η επίδραση βασίζεται στην εξάρτηση της σκέδασης των ηλεκτρονίων με τον προσανατολισμό του spin.

Η κύρια εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες GMR είναι για την ανάγνωση δεδομένων από σκληρούς δίσκους, σε βιοαισθητήρες, σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), και άλλες συσκευές. Οι GMR με πολύστρωματικές δομές χρησιμοποιούνται επίσης σε μνήμες μαγνητοαντίστασης τυχαίας προσπέλασης (MRAM) ως κύτταρα που αποθηκεύουν ένα bit πληροφορίας.

Στη βιβλιογραφία, ο όρος γιγάντιας μαγνητοαντίστασης (GMR) μερικές φορές συγχέεται με την κολοσσιαία μαγνητοαντίσταση σιδηρομαγνητικών και αντισιδηρομαγνητικού ημιαγωγών (CMR), η οποία δεν έχει σχέση με την πολυστρωματική δομή^[6].

Ένας απλοϊκός τρόπος να κατανοήσουμε το φαινόμενο GMR είναι να κοιτάξουμε τις μεταβολές της αντίστασης της απλούστερης δομής GMR. Ο προσανατολισμός του διανύσματος των spin σε μια δομή που αποτελείται από επαλληλίες στρωμάτων-επιπέδων φερρομαγνητικού (FM) και μη (NF) υλικού. Κάθε φερρομαγνητικό επίπεδο χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα μαγνητικού διπόλου. Για περισσότερη απλοποίηση των μαγνητικών φαινομένων, ένα από τα φερρομαγνητικά επίπεδα τοποθετείται με ένα παρακείμενο αντιφερρομαγνητικό επίπεδο, έτσι ώστε ένα από τα δύο μαγνητικά στρώματα να είναι ελεύθερο να ανταποκριθεί στο εξωτερικό επιβαλλόμενο πεδίο. Τα επίπεδα αυτά έχουν πάχη της τάξης των νανομέτρων και το πάχος ολόκληρης της στοίβας των επιπέδων κυμαίνεται από 10nm έως 20nm. Η αντίσταση μεταξύ των επιπέδων είναι η μικρότερη όταν τα μαγνητικά δίπολα είναι παράλληλα, ενώ στην περίπτωση των αντιπαράλληλων μαγνητικών διπόλων εμφανίζεται η μεγαλύτερη αντίσταση .



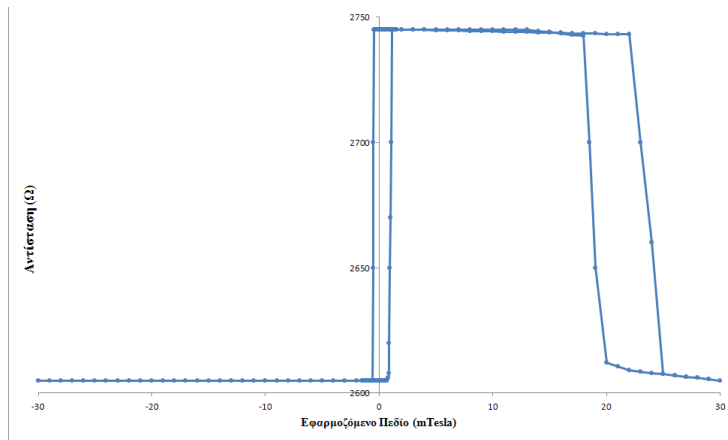
Σχήμα 13: Απεικόνιση των spin σε δύο φερρομαγνητικές στρώσεις (FM) που διαχωρίζονται από μία μη μαγνητική στρώση.

Η αντίσταση που έχει ο GMR σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του πεδίου, όπως τη σχέση που έχει το B με το βρόχο H ενός «ασύνδετου» (unpinned) FM επιπέδου. Στα σχήματα 14 και 15 φαίνονται οι βρόχοι αυτού. Εάν στα μαλακά μαγνητικά υλικά ο μαγνητισμός περιστρέφεται πάνω στο επίπεδο του φιλμ αντί να αναστρέφεται, η αντίσταση των προσκείμενων επιπέδων μεταβάλλεται. Εάν υποθέσουμε ότι κάθε μαγνητικό επίπεδο μπορεί να είναι ομοιόμορφο, η εξάρτηση της αντίστασης και της γωνίας του μαγνητισμού είναι:

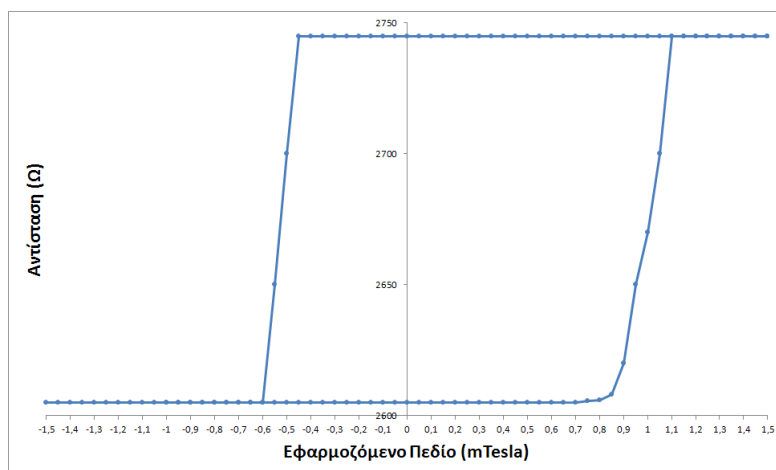
$$R(\theta) = R_{par} + \frac{\Delta R}{2} (1 - \cos(\theta)) \quad (7)$$

Εδώ ο όρος είναι το μέτρο της μέγιστης μεταβολής καθώς η γωνία θ περιστρέφεται από παράλληλα σε αντιπαράλληλα μεταξύ των δύο επιπέδων FM. Δηλαδή και είναι οι αντιστάσεις, όταν τα επίπεδα είναι παράλληλα και αντιπαράλληλα.

$$\Delta R = R_{anti} - R_{par} = R_{max} - R_{min} \quad (8)$$



Σχήμα 14: Ο κύριος βρόχος απόκρισης όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο παράλληλο στο εύκολο άξονα μαγνήτισης των μαλακών και των σκληρών μαγνητικών επιπέδων.

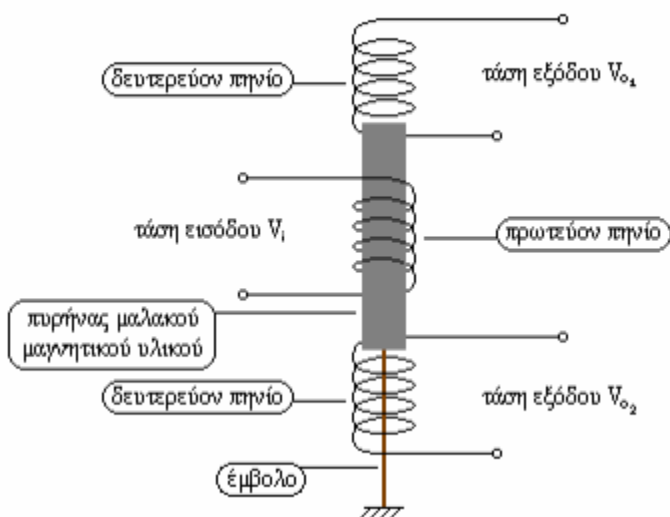


Σχήμα 15: Διέγερση της αντίστασης με χαμηλό πεδίο. Μόνο το μαλακό μαγνητικό επίπεδο μεταβάλλεται.

2.3.1 Αισθητήρες LVDT

Ένας αισθητήρας LVDT (**L**inear **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer – Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής) μπορεί να μετρήσει τη γραμμική μετατόπιση ενός υλικού.

Αποτελείται από ένα πρωτεύον πηνίο, το οποίο τροφοδοτείται με ημιτονοειδές σήμα σταθερού πλάτους και δύο δευτερεύοντα πηνία, στα οποία επάγεται εναλλασσόμενο ρεύμα. Στο εσωτερικό του πρωτεύοντος πηνίου και χωρίς να έρχεται σε επαφή με αυτό, τοποθετείται ένας φερρομαγνητικός πυρήνας (Σχήμα 16). Όταν ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο του αισθητήρα, η συνολική τάση εξόδου είναι μηδενική, αφού τα σήματα των δευτερευόντων πηνίων και του πρωτεύοντος αλληλοαναιρούνται. Όταν ο πυρήνας μετακινηθεί από το κέντρο, τότε η μαγνητική ροή αλλάζει και παράγεται ένα σήμα εξόδου. Η παραγόμενη τάση στην έξοδο είναι ανάλογη της μετατόπισης. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί η μετακίνηση του φερρομαγνητικού πυρήνα, αλλά και να εντοπιστεί η κατεύθυνση της κίνησής του, που προκύπτει από τη γωνία φάσης μεταξύ της τάσης εισόδου και εξόδου.



Σχήμα 16: Σχηματική αναπαράσταση ενός αισθητήρα LVDT.

Οι αισθητήρες LVDT δεν προκαλούν φθορές, αφού δεν έρχονται σε επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Η υστέρηση είναι αμελητέα, ενώ δεν επηρεάζονται πολύ από το θόρυβο του περιβάλλοντος και από άλλες παρεμβολές. Εκτός από αμιγείς εφαρμογές

μετατόπισης, οι αισθητήρες LVDT χρησιμοποιούνται και σε διατάξεις εφελκυσμού, σε αισθητήρες θερμοκρασίας, δύναμης, πίεσης και ταχύτητας.

2.3.2 Αισθητήρες MDL

Οι αισθητήρες MDL (**M**agnetostrictive **D**elay **L**ines – Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης) βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Σύμφωνα με αυτό, το μέγεθος των φερρομαγνητικών υλικών μεταβάλλεται όταν ένα μαγνητικό πεδίο ασκηθεί σε αυτά. Η μαγνητοσυστολή δίδεται ως κλασματική μεταβολή από τον τύπο:

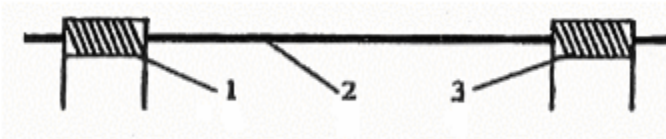
$$\lambda = \Delta L / L \quad (9)$$

όπου L είναι το μετρούμενο μέγεθος του υλικού και ΔL η διαφορά μεταξύ του μετά της μαγνήτισης μεγέθους και του αρχικού.

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής βασίζεται στη δομή των φερρομαγνητικών υλικών. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών στο εσωτερικό του υλικού μετακινούνται, ώστε να διαταχθούν καταλλήλως, προκαλώντας αλλαγές στις διαστάσεις του.

Για την κατασκευή των αισθητήρων MDL χρησιμοποιούνται υλικά όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο, καθώς και τα κράματά τους. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες έχουν συνήθως τη μορφή σύρματος, ώστε να είναι ευκολότερη η καταγραφή των αλλαγών των διαστάσεών τους. Το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα με τη μορφή παλμών και συνεπώς λειτουργεί ως κυματοδηγός. Ένας μαγνήτης θέσης που είναι προσαρτημένος σε κάποιο μηχανικό ή υδραυλικό σύστημα κίνησης, μετακινείται γύρω από τον κυματοδηγό. Αρχικά, αποστέλλεται ένας παλμός στον κυματοδηγό για να προσδιοριστεί η θέση του μαγνήτη και ταυτόχρονα ξεκινά η χρονομέτρηση. Ο παλμός δημιουργεί ένα κύμα που διαδίδεται μέσω του κυματοδηγού. Όταν το κύμα φτάσει στο τέλος, η χρονομέτρηση σταματά. Έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ του μαγνήτη θέσης

και του φερρομαγνητικού υλικού, γνωρίζοντας τη χρονική διάρκεια της μετακίνησης και πως η ταχύτητά της είναι ίση με την ταχύτητα του ήχου.



Σχήμα 17: Η διάταξη ενός αισθητήρα MDL.(1:Κινούμενο πηνίο διέγερσης 2:MDL 3:Κινούμενο πηνίο λήψης).

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας θέσης δεν φθείρεται, αλλά και δεν προκαλεί φθορές στο εξεταζόμενο υλικό, αφού δεν έρχεται σε επαφή με αυτό. Επίσης, το μήκος του εξεταζόμενου υλικού μπορεί να είναι μεγάλο, ακόμα και 60 m, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές ^[9]. Έτσι, οι αισθητήρες MDL χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτοκινήτων και γενικότερα σε μέρη μηχανών, όπως είναι οι υδραυλικοί κύλινδροι, ώστε να παρακολουθείται και να ελέγχεται η θέση τους και συνεπώς η λειτουργία τους.

2.3.3 Αισθητήρες Hall

Οι μαγνητικοί αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Hall είναι πιθανόν οι πιο διαδεδομένοι παγκοσμίως. Είναι ενδιαφέρον, ότι ο μαγνητικός αισθητήρας Hall, σχετικά σπάνια χρησιμοποιείται για να μετρήσει μόνο ένα μαγνητικό πεδίο. Είναι πολύ πιο χρησιμοποιείται ως βασικό συστατικό σε αισθητήρες επαφές για γραμμική θέση, γωνιακή θέση, ταχύτητα, περιστροφή, και το ηλεκτρικό ρεύμα. Η πρώτη εφαρμογή εκτός εργαστηρίου ήταν στα 1950 σαν αισθητήρας ισχύος σε φούρνους μικροκυμάτων. Το 1968 έγινε η πρώτη εφαρμογή αισθητήρων σε πληκτρολόγια ^[1].

Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον Dr. Edwin Hall 1879, όταν ακόμα ήταν υποψήφιος διδάκτορας στο πανεπιστήμιο του «Johns Hopkins» της Βαλτιμόρης. Ο Hall προσπαθούσε να επιβεβαιώσει τη θεωρία για τη ροή ηλεκτρονίων, το οποίο είχε πρωτοειπωθεί από τον Kelvin τριάντα χρόνια νωρίτερα. Ο Hall βρήκε ότι όταν τοποθετήσουμε ένα μαγνήτη, έτσι ώστε η μαγνητική ροή να περνά κάθετα στην

επιφάνεια ενός φύλλου χρυσού το οποίο διαπερνά ρεύμα, εμφανίζεται μία διαφορά τάσης στα απέναντι άκρα. Βρήκε επίσης ότι η τάση αυτή είναι ανάλογη του ρεύματος που διαπερνά τον αγωγό και ανάλογη της μαγνητικής ροής που διαπερνά κάθετα τον αγωγό.

2.3.3.1 Φαινόμενο Hall.

Το φαινόμενο Hall είναι συνέπεια της δύναμης Lorentz στα ημιαγωγίμα υλικά. Όταν μια τάση εφαρμόζεται μεταξύ των ακμών ενός τεμαχίου ημιαγωγού, οι φορείς των φορτίων αρχίζουν να κινούνται. Αν ταυτόχρονα βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, το οποίο εφαρμόζεται κάθετα στο τεμάχιο αυτό, τότε θα εκτραπούν από την ευθύγραμμη πορεία τους και ακολουθώντας καμπύλη τροχιά, θα χτυπήσουν στα τοιχώματα του τεμαχίου.

Το φαινόμενο Hall λαμβάνει χώρα όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται εντός ενός μαγνητικού πεδίου το οποίο είναι κάθετο στο ρεύμα. Οι φορείς του φορτίου στον αγωγό εκτρέπονται από την αρχική τους πορεία λόγω του μαγνητικού πεδίου και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο (πεδίο Hall) το οποίο έχει τη διεύθυνσή κάθετη στο ηλεκτρικό ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο. Αν πυκνότητα ρεύματος J_x είναι στην διεύθυνση x , και το μαγνητικό πεδίο B_z είναι στη διεύθυνση z , τότε το πεδίο Hall θα έχει φορά είτε προς $+y$ είτε προς $-y$, ανάλογα με την πολικότητα των φορέων φορτίου του υλικού.

2.3.4 Μαγνητοοπτικοί αισθητήρες

Οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες βασίζονται στο φαινόμενο Faraday, σύμφωνα με το οποίο το μαγνητικό πεδίο που επιδρά σε ένα υλικό είναι ικανό να τροποποιήσει τις οπτικές του ιδιότητες. Το μαγνητικό πεδίο προκαλεί στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός, όταν αυτό διέρχεται από ένα μαγνητοοπτικό μέσο. Η γωνία στροφής της πόλωσης δίνεται από τον τύπο [10]:

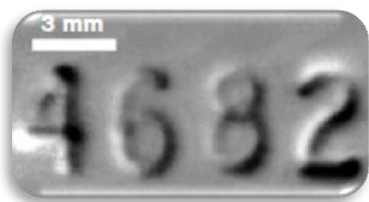
$$\beta = v \cdot d \cdot B \quad (10)$$

όπου V είναι η λεγόμενη σταθερά Verdet που εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός και το δείκτη διάθλασης του συγκεκριμένου υλικού, d είναι η απόσταση που διανύει το φως μέσα στο μαγνητοοπτικό μέσο και B είναι η ένταση του εξωτερικού

μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, γνωρίζοντας την παραπάνω γωνία είναι δυνατός ο υπολογισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μαγνητοοπτικών αισθητήρων είναι κυρίως κρυσταλλικά. Συχνά χρησιμοποιούμενοι κρύσταλλοι είναι οι TGG (Terbium Gallium Garnet), CdMnTe και CdMnHgTe. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά Verdet ενός υλικού, τόσο πιο ακριβή αποτελέσματα προκύπτουν από τον αισθητήρα.

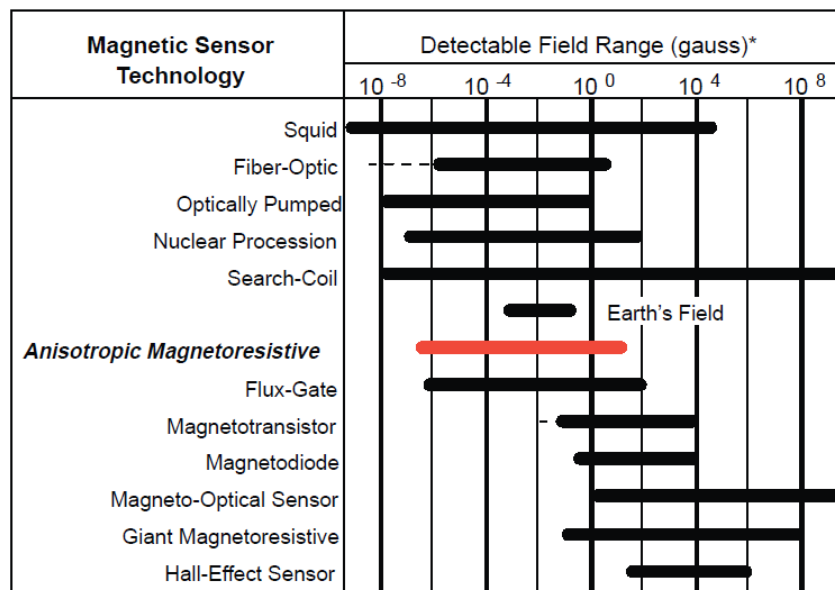
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αισθητήρες, οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες δεν βασίζονται σε ηλεκτρικά φαινόμενα, αλλά σε οπτικά. Εκτός από την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου, είναι δυνατή και η ψηφιακή απεικόνισή του μέσω κατάλληλου λογισμικού σε πραγματικό χρόνο. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως μέσα ανάλυσης και χαρακτηρισμού άλλων μαγνητικών προϊόντων, όπως είναι οι μόνιμοι μαγνήτες, τα κράματα χάλυβα, οι μαγνητικές κάρτες και οι μαγνητικοί κωδικοποιητές. Μία, επίσης, ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η χρήση των μαγνητοοπτικών αισθητήρων από εργαστήρια, σε περιπτώσεις ανάγκης ανάκτησης κατεστραμμένης πληροφορίας από μεταλλικά αντικείμενα ή μαγνητικά μέσα. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η ανάκτηση του εντυπωμένου αριθμού πλαισίου ενός οχήματος ή του σειριακού αριθμού ενός όπλου, ακόμη και αν αυτός έχει αφαιρεθεί μέσω λείανσης (Σχήμα 18). Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας αντιλαμβάνεται τις παραμορφώσεις στη δομή του μαγνητικού υλικού που είχε αρχικά προκαλέσει η εγχάραξη και τις απεικονίζει μέσω κατάλληλου λογισμικού.



Σχήμα 18: Αναπαράσταση μέσω μαγνητικού αισθητήρα ενός σειριακού αριθμού που είχε αφαιρεθεί.

Πίνακας σύγκρισης των μαγνητικών αισθητήρων

Στο παρακάτω σχήμα απαριθμούνται οι διάφορες τεχνολογίες μαγνητικών αισθητήρων και προσδιορίζεται η ευαισθησία του καθενός στα μαγνητικά πεδία.

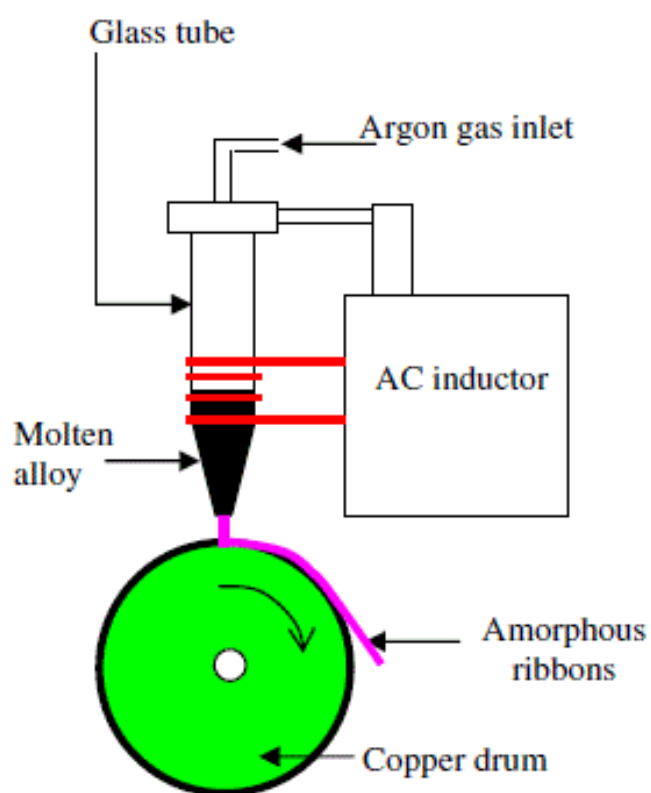


Σχήμα 19: Σύγκριση μαγνητικών αισθητήρων ^[11]

2.4 Πως κατασκευάζεται το άμορφο ribbon

Λόγω της ευκολίας κατασκευής, η «μονοκύλινδρος με κλώση τήγματος» είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή μακρούς και συνεχούς ribbon σε μορφή μεταλλικού γυαλιού. Οι Chen και Miller σχεδίασαν μία μονοκύλινδρη μεταλλική συσκευή, χρησιμοποιώντας για μεταλλικό στοιχείο του κυλίνδρου ένα κράμα (Cu-Be) με εύρος φάσματος περιστροφής 300-1800 rpm. Κατά τη διαδικασία, αυτή το τήγμα προσπίπτει στην εξωτερική μεριά του τυμπάνου του τροχού σε μια κυρτή επιφάνεια. Τα ribbons με το που παγώσουν απομακρύνονται από τον κύλινδρο με την ενέργεια της φυγόκεντρης δύναμης. Τα άμορφα ribbons που παράγονται με αυτή τη μέθοδο είναι συνήθως πλάτους 0,5 mm πάχους 20 μm, και μέχρι 100 m μήκος. Μία σχηματική απεικόνιση της μεθόδου αυτής εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα. Το υγρό μετατρέπεται σε συνεχή ταινία λόγω της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας του τυμπάνου η οποία φτάνει τα 10^6 - 10^8 K/s. Με τη συγκεκριμένη συσκευή, είναι δυνατόν να παραχθούν

κορδέλες με πλάτος έως αρκετά δεκατόμετρα. Μια ευρεία ποικιλία μεταλλικών υλικών (π.χ., Fe, Co, Ni, και τα κράματά τους) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή άμορφων ταινιών με τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής. Έχει αποδειχθεί ότι η θερμοκρασία τήξης επηρεάζει το πάχος του ribbon και ως εκ τούτου επηρεάζει την κατανομή μεγέθους του τελικού νανοκρυστάλλου καθ' όλη τη διάρκεια σχηματισμού μετά την νανοκρυστάλλωση.



Σχήμα 20: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου παραγωγής ribbon.

2ο Κεφάλαιο

Πειραματικό μέρος

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων δημιουργήθηκαν δύο αισθητήρες τύπου fluxgate. Και τα δύο αποτελούνταν ξεχωριστά από έναν γυάλινο σωλήνα μικρής διαμέτρου. Γύρω από αυτόν τυλίχτηκαν δύο πηνία. Το πρώτο αποτελούνταν από 30 σπείρες ενώ το δεύτερο πηνίο από 60 σπείρες (2 σειρές των 30). Η διάμετρος του σύρματος χαλκού που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των πηνίων είναι 0,1mm. Οι πυρήνες του αισθητήρα αποτελούνταν από άμορφο μαγνητικό υλικό σε μορφή σύρματος.

Επιπρόσθετα και για της ανάγκες ελέγχου γραμμικότητας του μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας AMR HMC 2003

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Μετά την κατασκευή των αισθητήρων, μετρήθηκε η μαγνητική τους ευαισθησία με τη βοήθεια τρισδιάστατων πηνίων Helmholtz. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν διαδοχικά στο κέντρο των πηνίων. Λόγω της ευαισθησίας τους και για την αποφυγή μέτρησης της συχνότητας του δικτύου, καλύφθηκαν εξ ολοκλήρου με φύλλα χαλκού.

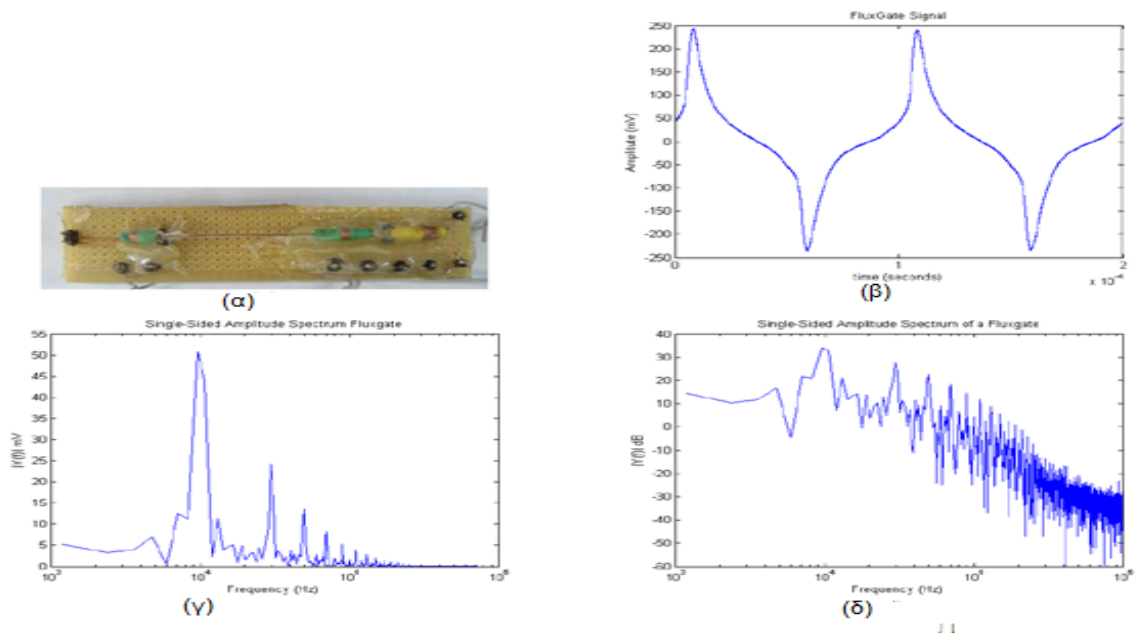
Το εξωτερικό πεδίο μεταβαλλόταν με τη χρήση διαφόρων μεταλλικών μαγνητικών εξαρτημάτων, όπως μικρά μεταλλικά αντικείμενα μέχρι κατσαβίδια αλλά και μικρούς μαγνήτες.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, το σήμα εξόδου ήταν πολλαπλάσιο του σήματος εισόδου (διέγερση), και ως αποτέλεσμα δημιουργούνταν μία καθυστέρηση φάσης μεταξύ των δύο σημάτων η οποία μπορούσε να μετρηθεί.

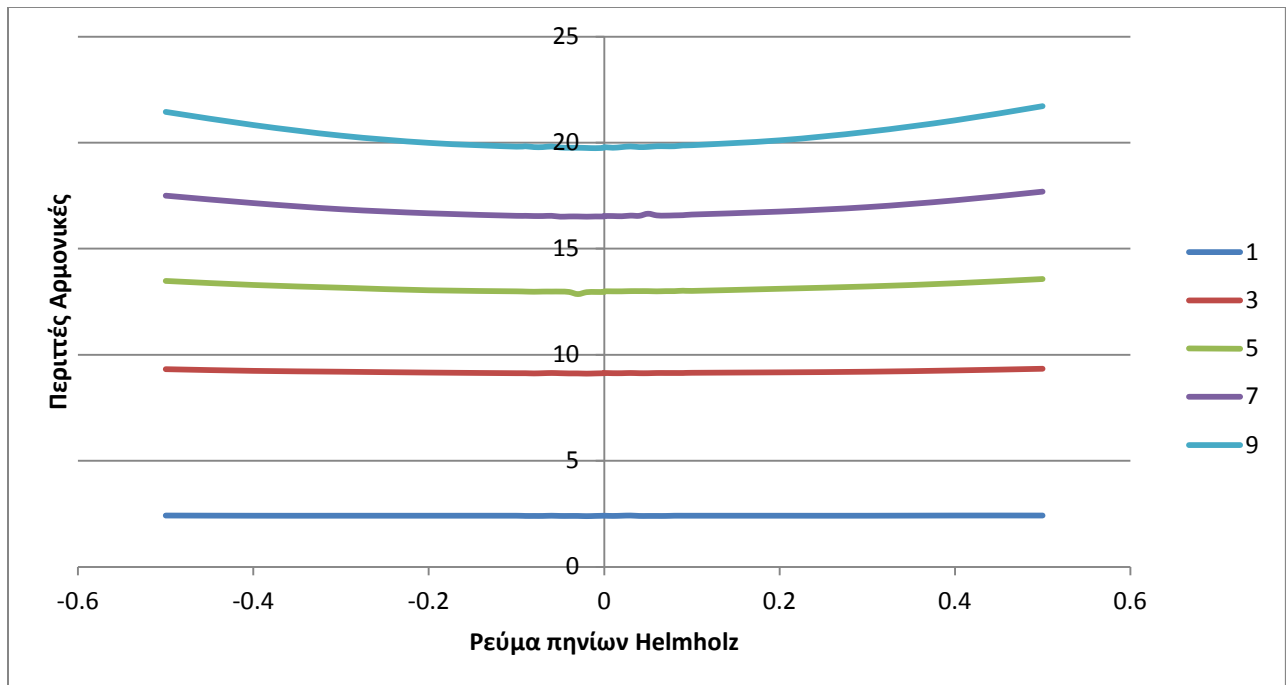
Έπειτα το σήμα εξόδου μετασχηματίζονταν με Fast Fourier Transformation (FFT), και το αποτέλεσμα που προέκυπτε ήταν το γνωστό διάγραμμα Fourier. Κατά τη μελέτη των διαγραμμάτων παρατηρήθηκε ότι οι περιπτές αρμονικές περιελάμβαναν την πληροφορία του H_c (συνεκτικό πεδίο) του υλικού, το εξωτερικό πεδίο και στην περίπτωση που το διεγείραμε με τριγωνικό παλμό, εμφανιζόταν και ο τριγωνικός παλμός στις αρμονικές.

Για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούνταν από τα πηνία Helmholtz χρησιμοποιήθηκε ένας AMR αισθητήρας και συγκεκριμένα ο αισθητήρας AMR-HMC 2003.

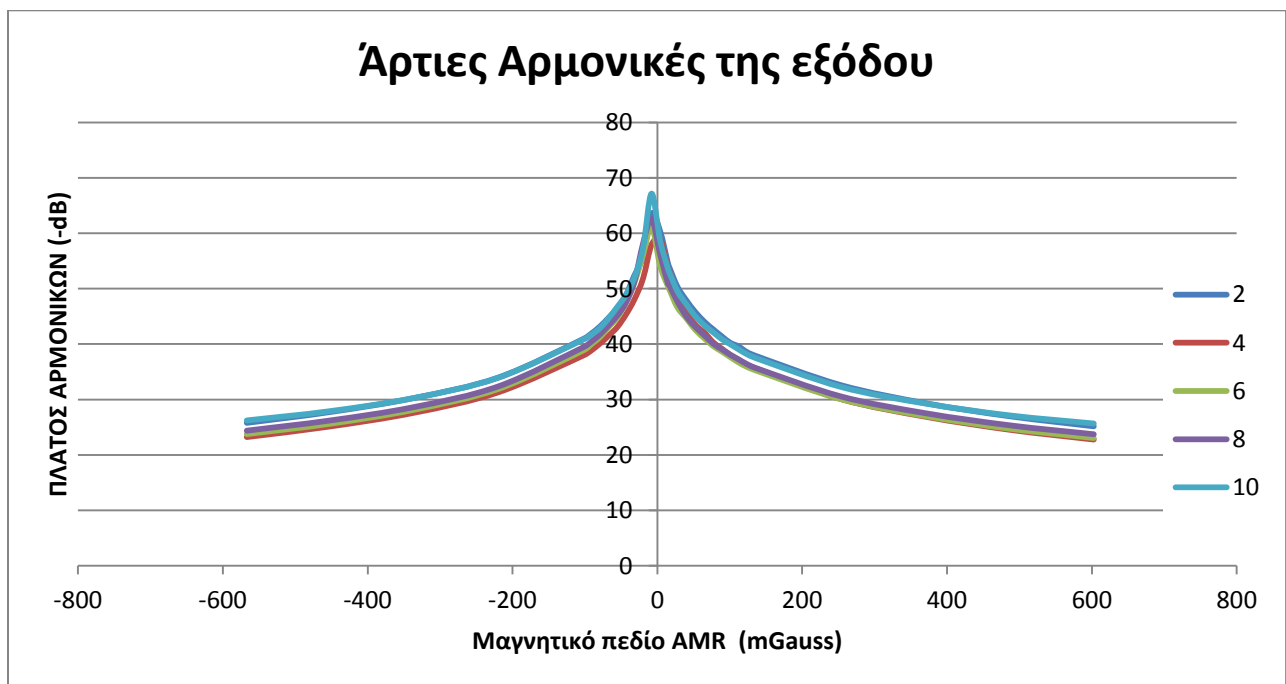
Από την άλλη πλευρά, οι άρτιες αρμονικές περιελάμβαναν την πληροφορία του εξωτερικού πεδίου και λιγότερο το H_c (συνεκτικό πεδίο) του υλικού. Γι αυτό το λόγο, όταν είχαμε μεταβολή του εξωτερικού πεδίου, οι διαφορές μεταξύ των αρμονικών του διαγράμματος Fourier μπορούσαν να παρατηρηθούν πιο συχνά στις άρτιες αρμονικές παρά στις περιπτές, όπου δεν εμφάνιζαν σχεδόν καμία αλλαγή όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα 21, 22, 23.



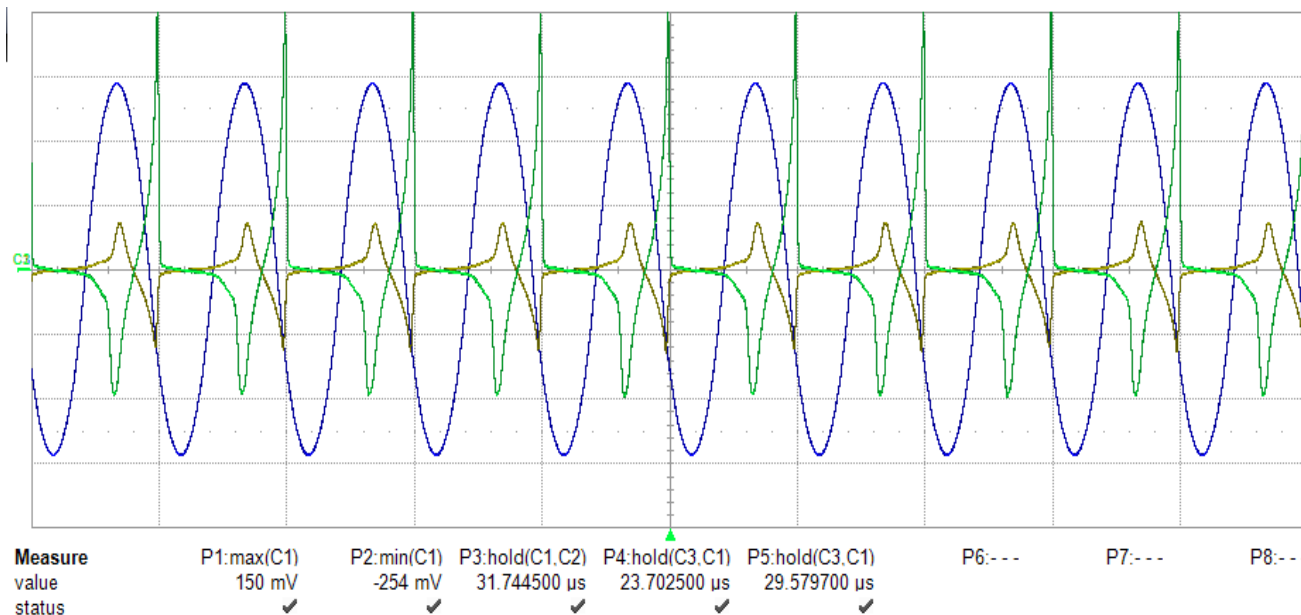
Σχήμα 21: (α) Οι αισθητήρες του Orthogonal Fluxgate. (β) Σήμα εξόδου του αισθητήρα. (γ) Η FFT ανάλυση με 50 Gsamples/sec. (δ) Η FFT ανάλυση σε dB με 50 Gsamples/sec.



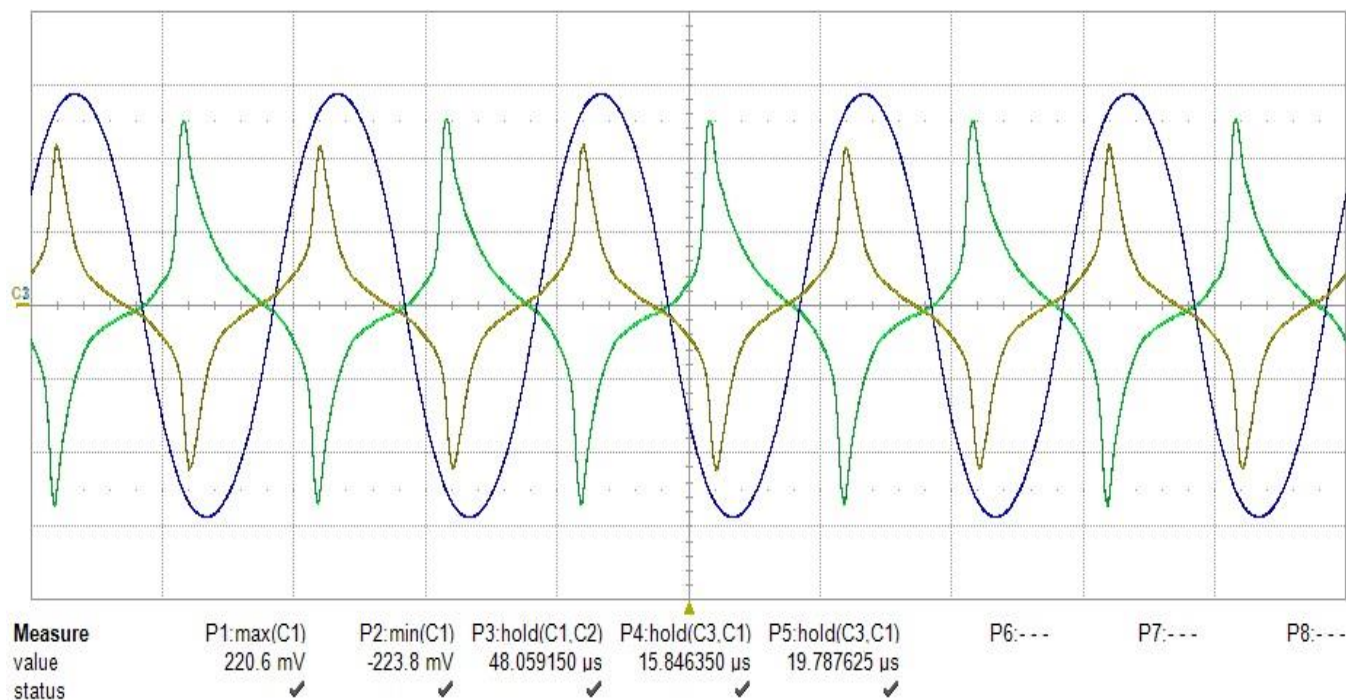
Σχήμα 22: Γραφική παράσταση περιττών αρμονικών



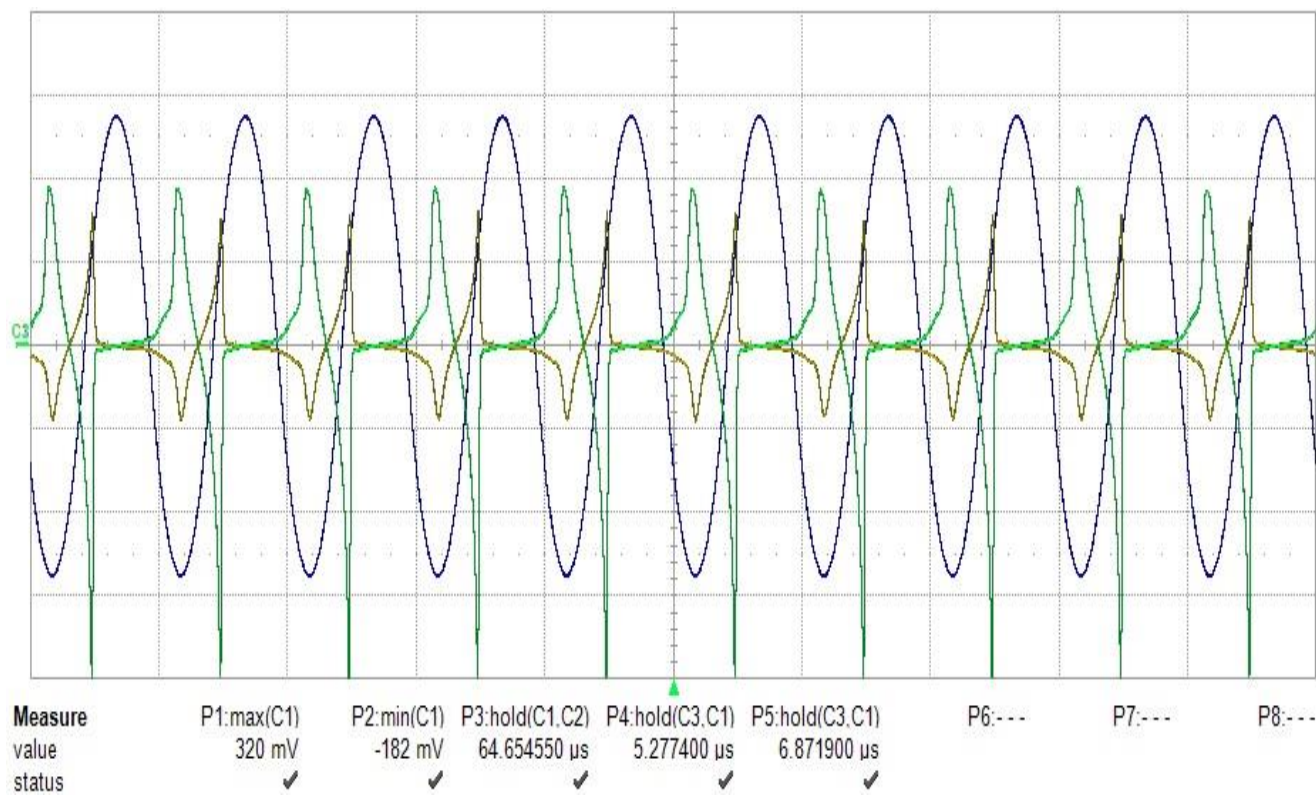
Σχήμα 23: Γραφική παράσταση άρτιων αρμονικών



Σχήμα 24: Μεγίστη τιμή παλμογράφου για το αρνητικό πεδίο (ρεύμα διέγερσης $-0,3\text{mA}$)



Σχήμα 25: Τιμή παλμογράφου για περίπου μηδενικό πεδίο (ρεύμα διέγερσης $<0,001\text{mA}$)



Σχήμα 26: Μεγίστη τιμή παλμογράφου για θετικό πεδίο (ρευμα διέγερσης 0,3mA)

Πίνακας 1: Πίνακας Μετρήσεων

I (mA)	Πεδίο X (mGauss)	P1 (maxC1) (mV)	P2 (minC1) (mV)	P3 (C1,C2) (μs)	P4 (C3,C1) (μs)	P5 (C3, C1neg) (μs)	P4-P5 (μs)	P5-P4 (μs)	P1+P2 (μs)
-0.3	-325.76	142	-237	30.65	24.36	30.31	-5.95	5.95	-95
-0.29	-314.14	149	-247	31.76	23.6	29.73	-6.13	6.13	-98
-0.28	-302.35	161	-270	32.77	23.58	29.11	-5.53	5.53	-109
-0.27	-290.97	170	-262	33.71	22.9	28.64	-5.74	5.74	-92
-0.26	-279.19	179	-296	34.63	22.56	27.69	-5.13	5.13	-117
-0.25	-267.69	186	-302	35.29	22.26	27.21	-4.95	4.95	-116
-0.24	-255.88	189	-311	36.19	21.85	26.64	-4.79	4.79	-122
-0.23	-244.36	199	-310	37.22	21.34	26.18	-4.84	4.84	-111
-0.22	-232.5	202	-329	37.96	21.18	25.73	-4.55	4.55	-127
-0.21	-220.84	205	-330	38.21	20.91	25.63	-4.72	4.72	-125
-0.2	-209.27	211	-340	39.69	20.51	25.03	-4.52	4.52	-129
-0.19	-197.49	219	-351	40.71	20.13	24.43	-4.3	4.3	-132
-0.18	-185.82	223	-363	41.5	19.67	24.26	-4.59	4.59	-140
-0.17	-174.17	223	-364	42.14	19.65	24.1	-4.45	4.45	-141
-0.16	-162.21	231	-374	43.01	19.41	23.76	-4.35	4.35	-143
-0.15	-150.69	230	-377	44.04	19.04	23.65	-4.61	4.61	-147
-0.14	-138.71	237	-381	44.96	18.68	23.29	-4.61	4.61	-144
-0.13	-127.24	240	-396	46.3	18.23	22.76	-4.53	4.53	-156
-0.12	-115.34	242	-395	47.34	17.92	22.27	-4.35	4.35	-153
-0.11	-103.86	243	-396	47.97	17.8	22.12	-4.32	4.32	-153
-0.1	-92.01	245	-387	48.36	17.7	22.08	-4.38	4.38	-142
-0.095	-86.33	248	-391	48.54	17.38	21.75	-4.37	4.37	-143
-0.09	-80.57	254	-395	48.22	17.24	21.62	-4.38	4.38	-141
-0.085	-74.73	257	-391	48.29	17.19	21.5	-4.31	4.31	-134
-0.08	-68.76	251	-382	48.36	17.13	21.4	-4.27	4.27	-131
-0.075	-63.04	253	-381	48.25	17.07	21.33	-4.26	4.26	-128
-0.07	-57.13	260	-385	48.21	17.02	21.05	-4.03	4.03	-125
-0.065	-51.06	259	-382	48.36	16.62	20.96	-4.34	4.34	-123
-0.06	-45.36	258	-368	48.81	16.42	20.49	-4.07	4.07	-110
-0.055	-39.54	264	-367	48.78	16.36	20.39	-4.03	4.03	-103
-0.05	-33.53	263	-357	48.82	16.23	20.18	-3.95	3.95	-94
-0.045	-27.73	263	-345	49.01	16.06	19.97	-3.91	3.91	-82
-0.04	-21.69	261	-330	48.76	15.82	19.59	-3.77	3.77	-69
-0.035	-15.87	267	-311	48.85	15.63	19.35	-3.72	3.72	-44
-0.03	-10.26	272	-294	49.01	15.64	18.8	-3.16	3.16	-22
-0.025	-8.03	266.3	-267.8	49.43	15.33	19.06	-3.73	3.73	-1.5
-0.024	-6.71	264.3	-267	49.36	15.48	19.13	-3.65	3.65	-2.7
-0.023	-5.47	269.3	-263.6	49.41	15.24	18.94	-3.7	3.7	5.7
-0.022	-4.54	266.9	-261.2	49.5	15.44	19.16	-3.72	3.72	5.7
-0.021	-3.26	266.8	-260.9	49.64	15.27	18.9	-3.63	3.63	5.9
-0.02	-2.44	265.7	-256.4	49.59	15.03	18.74	-3.71	3.71	9.3
-0.019	-1.24	260.4	-253.2	49.56	15.13	18.77	-3.64	3.64	7.2
-0.018	-0.19	259.3	-247.3	49.64	14.86	18.75	-3.89	3.89	12

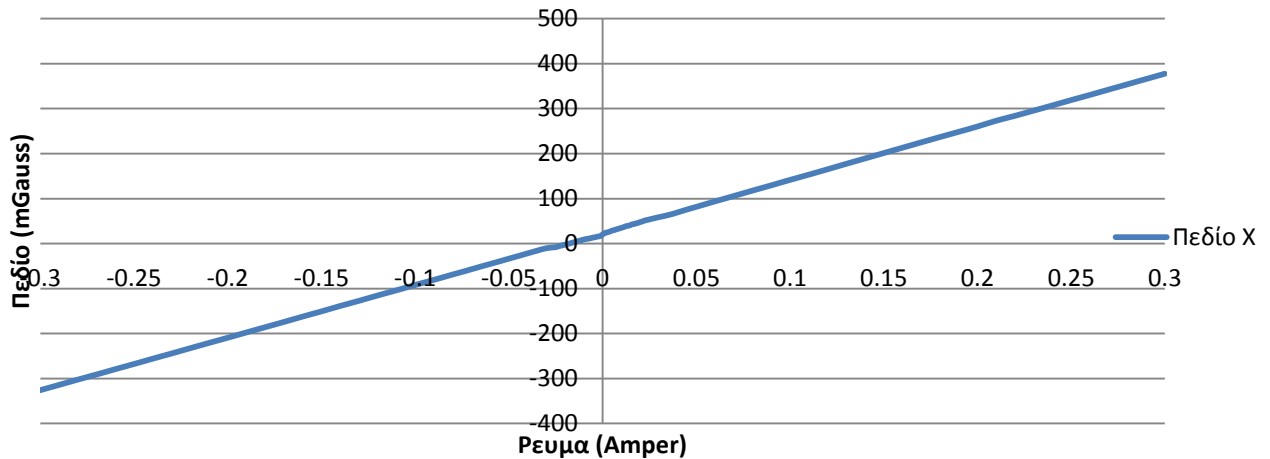
Πίνακας Μετρήσεων(συν.)-

-0.017	0.93	259.4	-246.3	49.73	14.67	18.71	-4.04	4.04	13.1
-0.016	2.12	257.8	-245.3	49.68	14.64	18.76	-4.12	4.12	12.5
-0.015	3.15	253.5	-243.7	49.84	14.55	18.62	-4.07	4.07	9.8
-0.014	4.52	249.4	-243.3	49.94	14.58	18.71	-4.13	4.13	6.1
-0.013	5.63	251.8	-240.7	49.9	14.48	18.67	-4.19	4.19	11.1
-0.012	6.68	249.9	-242.4	49.47	14.43	18.57	-4.14	4.14	7.5
-0.011	7.93	251.1	-239.7	49.71	14.5	18.6	-4.1	4.1	11.4
-0.01	8.96	244.7	-236.4	49.97	14.33	18.59	-4.26	4.26	8.3
-0.009	10.09	244.9	-237.1	49.61	14.24	18.39	-4.15	4.15	7.8
-0.008	10.55	233.4	-234.3	50.07	14.26	18.93	-4.67	4.67	-0.9
-0.007	11.46	224.9	-235.6	49.64	14.48	18.75	-4.27	4.27	-10.7
-0.006	12.34	220.6	-234.6	49.5	14.24	18.45	-4.21	4.21	-14
-0.005	13.46	223.6	-235.5	49.43	14.55	18.51	-3.96	3.96	-11.9
-0.004	14.08	220.4	-235.8	49.37	14.54	18.35	-3.81	3.81	-15.4
-0.003	15.28	234.1	-236.7	49.13	13.62	18.47	-4.85	4.85	-2.6
-0.002	15.95	242.8	-239.7	48.75	14.35	18.03	-3.68	3.68	3.1
-0.001	17.2	246.7	-237.8	48.7	14.16	17.85	-3.69	3.69	8.9
0.001	23.17	220.8	-225.1	47.94	15.72	19.47	-3.75	3.75	-4.3
0.002	24.34	217.3	-226.3	47.91	15.91	19.74	-3.83	3.83	-9
0.003	25.56	219.8	-226.4	48.06	15.97	19.94	-3.97	3.97	-6.6
0.004	26.84	216.9	-224.3	47.73	15.91	20.14	-4.23	4.23	-7.4
0.005	28.86	217.4	-225.4	47.58	16.21	20.39	-4.18	4.18	-8
0.006	29.72	226.4	-239.3	47.35	16.67	21.06	-4.39	4.39	-12.9
0.007	31.15	227.6	-239.3	47.42	16.43	20.95	-4.52	4.52	-11.7
0.008	32.39	230.7	-239.5	47.29	16.54	20.97	-4.43	4.43	-8.8
0.009	33.72	233.2	-234.7	47.05	16.53	20.93	-4.4	4.4	-1.5
0.01	34.94	229.6	-232.3	46.89	16.75	21	-4.25	4.25	-2.7
0.011	36.22	232.5	-226.2	46.86	16.97	20.52	-3.55	3.55	6.3
0.012	37.8	235.9	-227.5	46.9	17.04	20.79	-3.75	3.75	8.4
0.013	39.22	231.7	-228.5	46.94	16.85	20.92	-4.07	4.07	3.2
0.014	39.83	233.4	-227.2	47.05	17.17	21.04	-3.87	3.87	6.2
0.015	41.43	234.5	-229.4	47.11	17.22	21.12	-3.9	3.9	5.1
0.016	43.11	232.4	-226.5	46.32	17.43	21.74	-4.31	4.31	5.9
0.017	43.66	238.2	-227.6	46.84	17.77	21.54	-3.77	3.77	10.6
0.018	45.11	237.2	-227.9	46.74	17.36	21.48	-4.12	4.12	9.3
0.019	46.03	238.3	-224.5	46.78	17.57	21.64	-4.07	4.07	13.8
0.02	47.74	236.7	-221.5	46.87	17.77	21.61	-3.84	3.84	15.2
0.021	48.94	236.7	-217.2	46.51	17.96	21.78	-3.82	3.82	19.5
0.022	50.45	239.1	-218.8	46.69	17.84	21.91	-4.07	4.07	20.3
0.023	51.83	236.5	-213.5	46.53	17.94	22.21	-4.27	4.27	23
0.024	52.68	237.7	-221.8	46.27	18.43	22.32	-3.89	3.89	15.9
0.025	53.73	235.2	-223.3	46.33	18.14	22.64	-4.5	4.5	11.9
0.03	58.73	247.2	-234.3	46.64	18.45	23.23	-4.78	4.78	12.9
0.035	63.31	256.5	-236.4	46.34	18.54	23.17	-4.63	4.63	20.1
0.04	69.28	276.6	-236.4	46.09	18.96	23.12	-4.16	4.16	40.2

Πίνακας Μετρήσεων(συν.)-

0.045	75.74	260.5	-259.2	47.73	16.67	22.02	-5.35	5.35	1.3
0.05	81.66	265.4	-255.3	47.69	16.73	22.05	-5.32	5.32	10.1
0.055	87.78	272.8	-256.7	47.63	16.94	21.96	-5.02	5.02	16.1
0.06	93.86	294.1	-260.3	47.37	17.54	21.98	-4.44	4.44	33.8
0.065	99.76	313.7	-259.2	47.13	17.64	21.65	-4.01	4.01	54.5
0.07	105.69	337.9	-258.7	47.06	17.97	21.43	-3.46	3.46	79.2
0.075	111.79	360.1	-257.3	47.02	17.96	20.93	-2.97	2.97	102.8
0.08	117.71	364.3	-258.7	47.13	17.83	20.59	-2.76	2.76	105.6
0.085	123.62	376	-258.5	47.31	17.49	20.13	-2.64	2.64	117.5
0.09	129.47	389.7	-256.8	47.52	17.39	19.76	-2.37	2.37	132.9
0.095	135.56	409.2	-255.4	47.62	17.24	19.43	-2.19	2.19	153.8
0.1	141.53	419.6	-253.9	48.02	17.18	19.19	-2.01	2.01	165.7
0.11	153.17	433.3	-251.2	49.93	16.46	18.28	-1.82	1.82	182.1
0.12	165.11	447.3	-251	49.86	15.83	17.23	-1.4	1.4	196.3
0.13	177.27	441	-250	50.92	15.1	16.48	-1.38	1.38	191
0.14	189.16	448	-248	51.89	14.44	15.75	-1.31	1.31	200
0.15	201.16	447	-248	52.94	13.72	15.04	-1.32	1.32	199
0.16	213.09	445	-244	53.58	13.15	14.37	-1.22	1.22	201
0.17	224.98	436	-239	54.47	12.49	13.73	-1.24	1.24	197
0.18	236.78	434	-234	55.39	11.87	12.96	-1.09	1.09	200
0.19	248.42	419	-229	56.21	11.22	12.45	-1.23	1.23	190
0.2	260.17	402	-224	57.1	10.63	11.98	-1.35	1.35	178
0.21	273.04	394	-226	57.92	10.01	11.52	-1.51	1.51	168
0.22	283.97	385	-214	58.92	9.47	10.79	-1.32	1.32	171
0.23	295.51	377	-213	58.64	9.03	10.49	-1.46	1.46	164
0.24	307.13	365	-214	58.01	8.52	9.94	-1.42	1.42	151
0.25	318.92	354	-207	61.03	7.76	9.38	-1.62	1.62	147
0.26	330.45	347	-202	61.79	7.21	8.75	-1.54	1.54	145
0.27	342.28	343	-197	62.83	6.57	8.12	-1.55	1.55	146
0.28	354.03	338	-192	63.58	5.81	7.39	-1.58	1.58	146
0.29	365.83	323	-183	64.45	5.32	6.87	-1.55	1.55	140
0.3	377.54	314	-175	65.34	4.7	6.12	-1.42	1.42	139

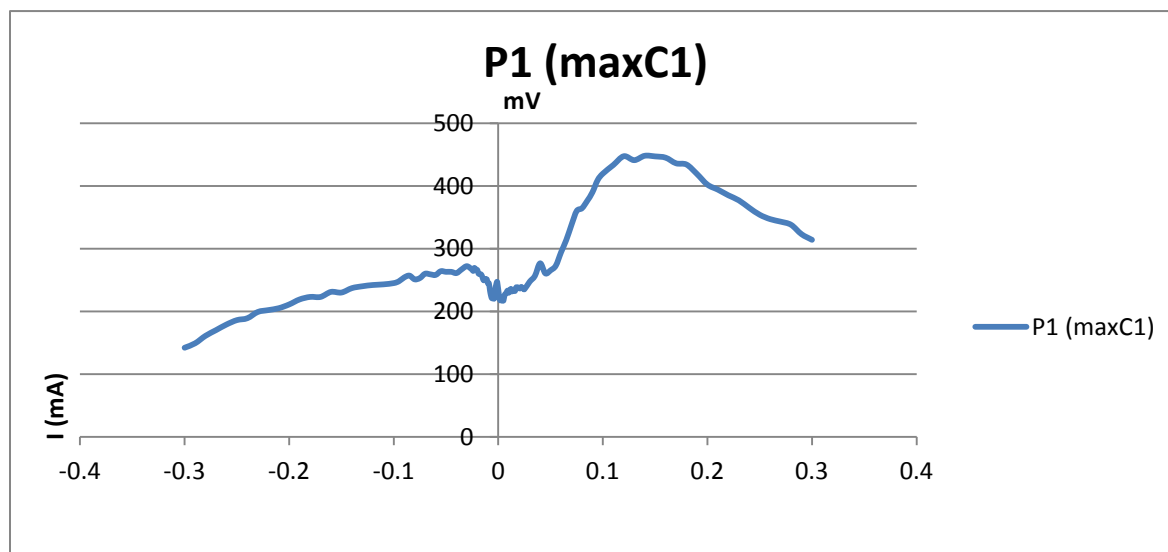
Απόκριση αισθητήρα AMR HMC 2003



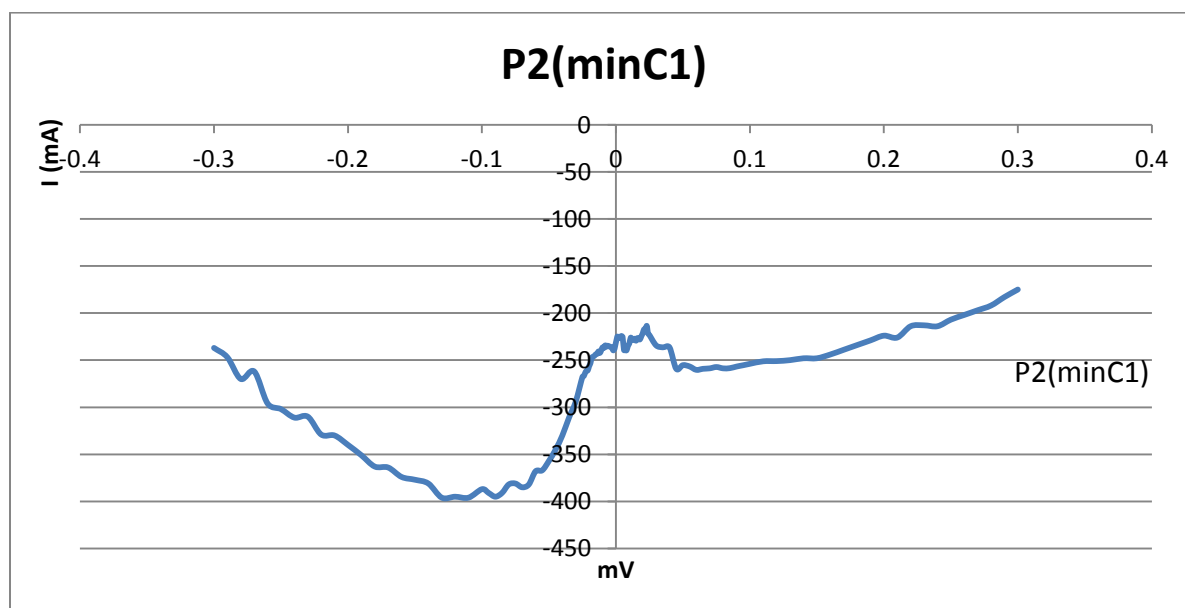
Σχήμα 27: Διάγραμμα Απόκρισης Αιθητήρα AMR HMC 2003.

Το παραπάνω διάγραμμα είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης του πεδίου από τον αισθητήρα AMR-HMC 2003 κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε ένα μικρό offset κοντά στην περιοχή του μηδέν που οφείλεται στην επίδραση από το μαγνητικό πεδίο της γης.

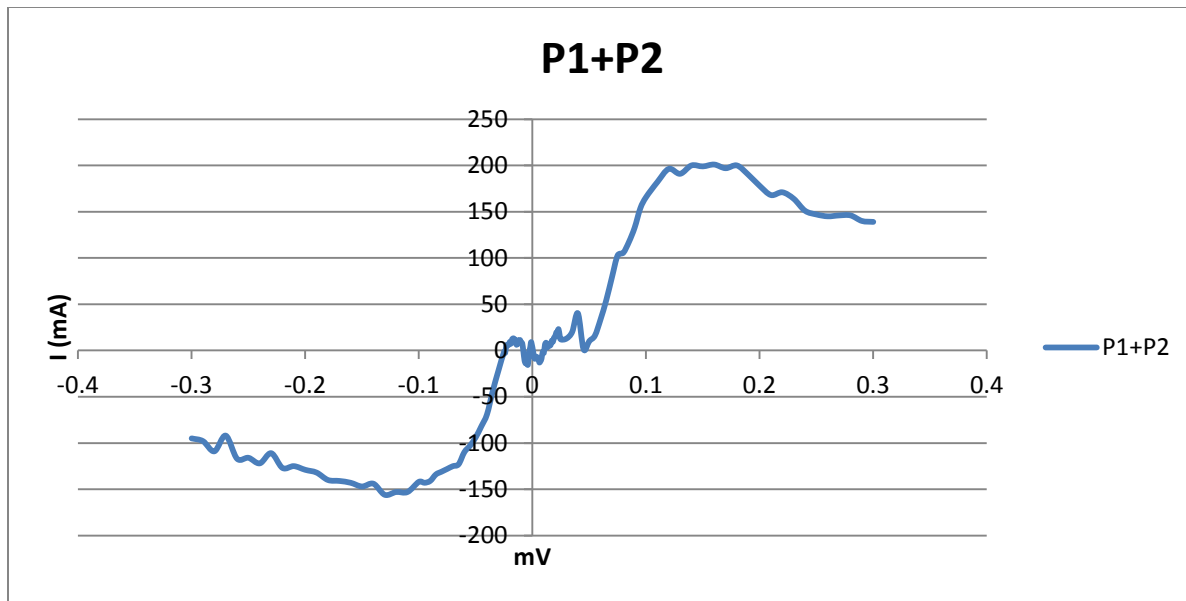
Από τον παραπάνω πίνακα (Σχήμα 27) δημιουργήθηκαν επίσης τα παρακάτω διαγράμματα



Σχήμα 28: Διάγραμμα τάσης εξόδου P1 σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης.



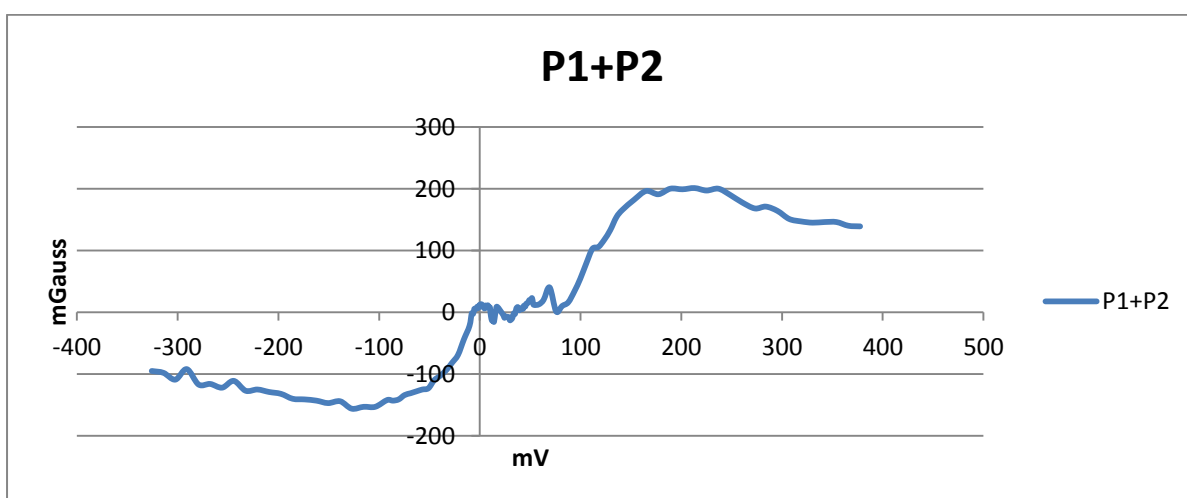
Σχήμα 29: Διάγραμμα τάσης εξόδου P2 σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης.



Σχήμα 30: Άθροισμα P1 και P2 στο πεδίο του ρεύματος ειόδου.

Από το άθροισμα των πινάκων (P1) και (P2) παρατηρούμε ότι το καινούργιο διάγραμμα που προκύπτει παρουσιάζει σιγμοειδή μορφή. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο peaks του πλάτους του πεδίου είναι συμμετρικά όταν αυτό μηδενίζεται.

Τα άκρα και από τις δύο πλευρές (θετικά και αρνητικά) παρουσιάζουν μια μικρή καμπύλη. Αυτό συμβαίνει στο μέγιστο πλάτος του πεδίου λόγω κορεσμού του αισθητήρα.



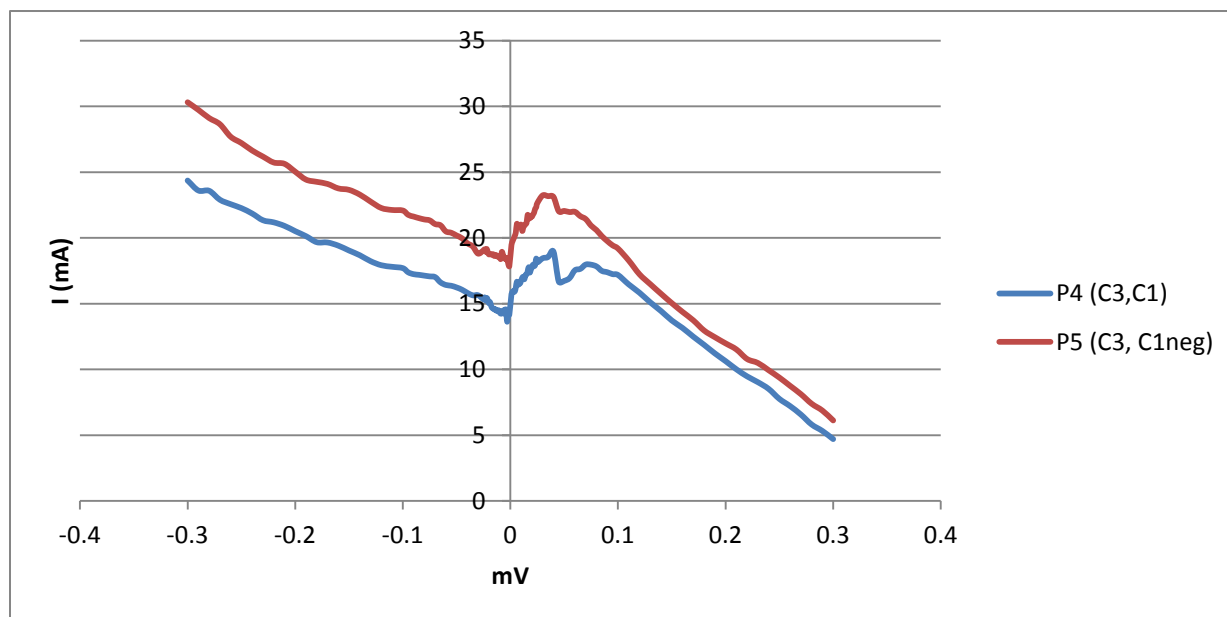
Σχήμα 31: Άθροισμα P1 και P2 στο πεδίο του μαγνητικού πεδίου.

Κατασκευάζοντας στη συνέχεια το ίδιο διάγραμμα σε σχέση με το πεδίο, γίνεται αντιληπτή η μετατόπιση του πάνω στον άξονα των x' , λόγω της παρουσίας εξωτερικού πεδίου όπως αυτό της Γης, καθώς επίσης και της κίνησης αντικειμένων στο χώρο μέτρησης.

Οι περαιτέρω μικρό-μεταβολές που παρουσιάζονται γύρω από τη σιγμοειδή καμπύλη οφείλονται σε δύο λόγους:

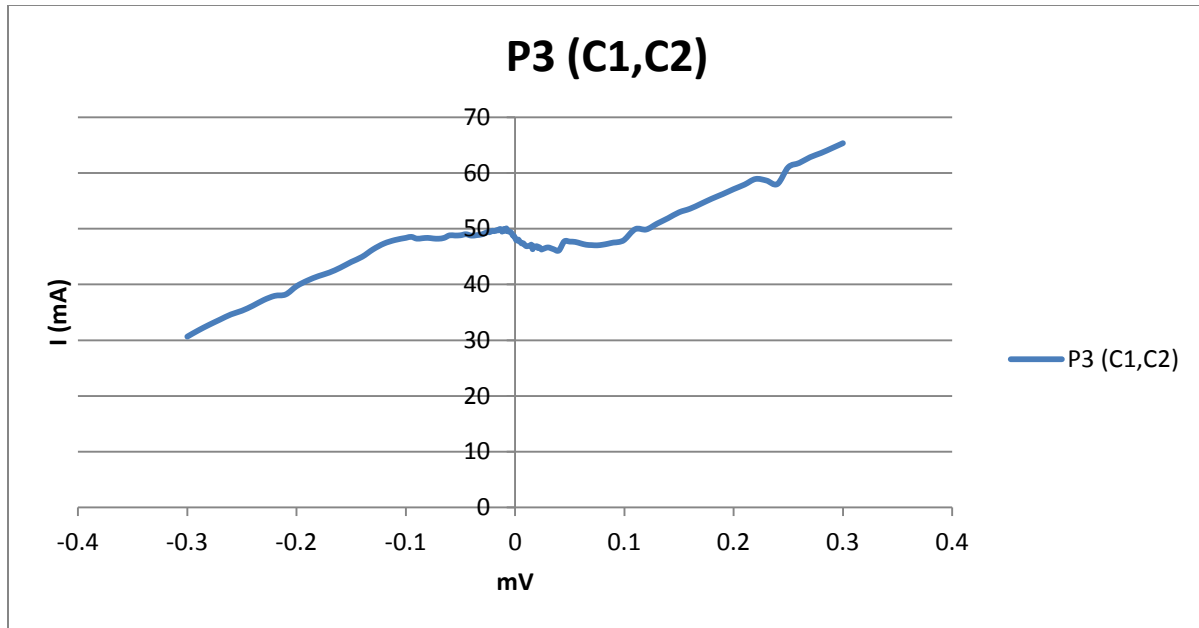
1. Μικρής μεταβολής του ρεύματος εξόδου της τροφοδοσίας
2. Λόγω απουσίας μαγνητικής θωράκισης του χώρου

Επιπλέον κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα του P4 και του P5 σε σχέση με το $I(\text{mA})$ σε ένα ενιαίο διάγραμμα. Αυτό έγινε λόγω του ότι το P4 είναι μέτρηση της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των θετικών κορυφών του C3 και του C1, ενώ το P5 μετράει την χρονική καθυστέρηση της θετικής κορυφής του C3 και της αρνητικής κορυφής του C1.



Σχήμα 32: Διάγραμμα χρονικής υστέρησης.

Ακόμα κατασκευάστηκε και το διάγραμμα του P3 στο οποίο εμφανίζεται η χρονική καθυστέρηση της θετικής κορυφής του C1 με το C2.



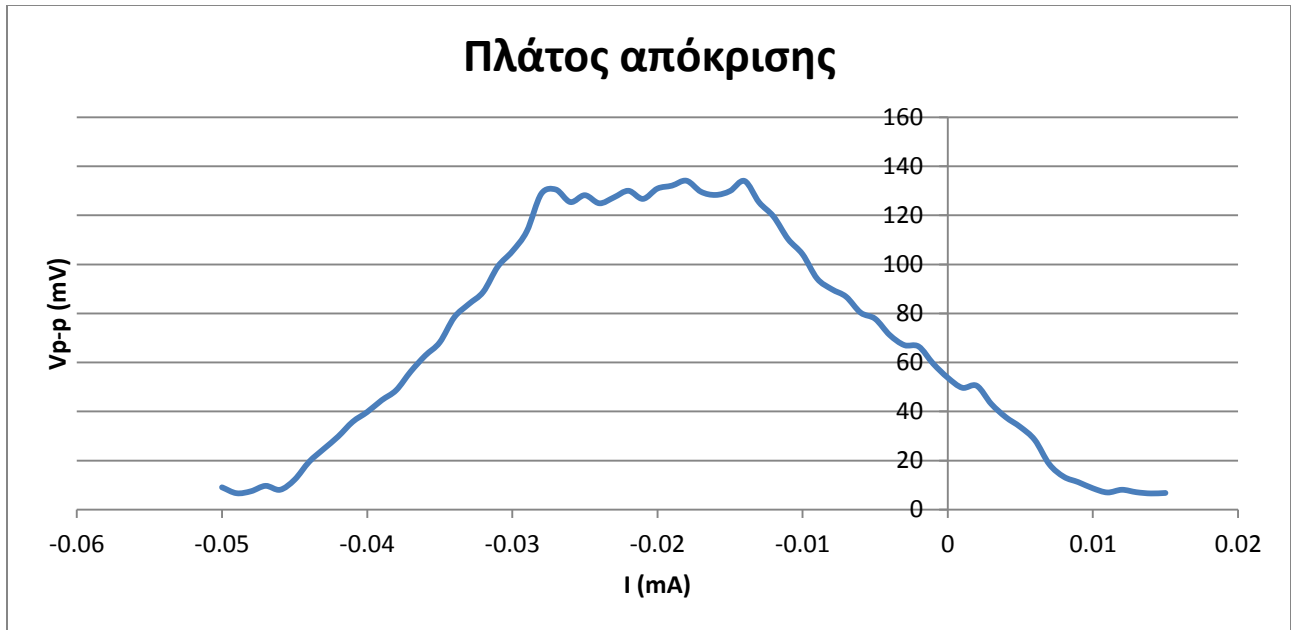
Σχήμα 33: Χρονική καθυστέρηση της θετικής κορυφής του C1 με το C2.

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτή μια μικρή μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, σαν ένα σημείο αλλαγής της καμπυλότητας του γραφήματος. Η συγκεκριμένη ανωμαλία αν και εμφανίστηκε στο διάγραμμα πεδίου του AMR ήταν τόσο μικρή η οποία πέρασε σχεδόν απαρατήρητη. Αυτό συνέβη γιατί η ευαισθησία του Orthogonal Fluxgate είναι μεγαλύτερη της ευαισθησίας του AMR.

Πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειράματα ώστε να διαπιστωθεί η απόκριση του αισθητήρα σε σχέση με τη μεταβολή του εξωτερικού πεδίου, τόσο για το πλάτος της τάσης εξόδου, όσο και για την χρονική καθυστέρηση του παλμού εξόδου σε σχέση με τον παλμό εισόδου όπου και ελήφθησαν οι ακόλουθες μετρήσεις του Πίνακα 2:

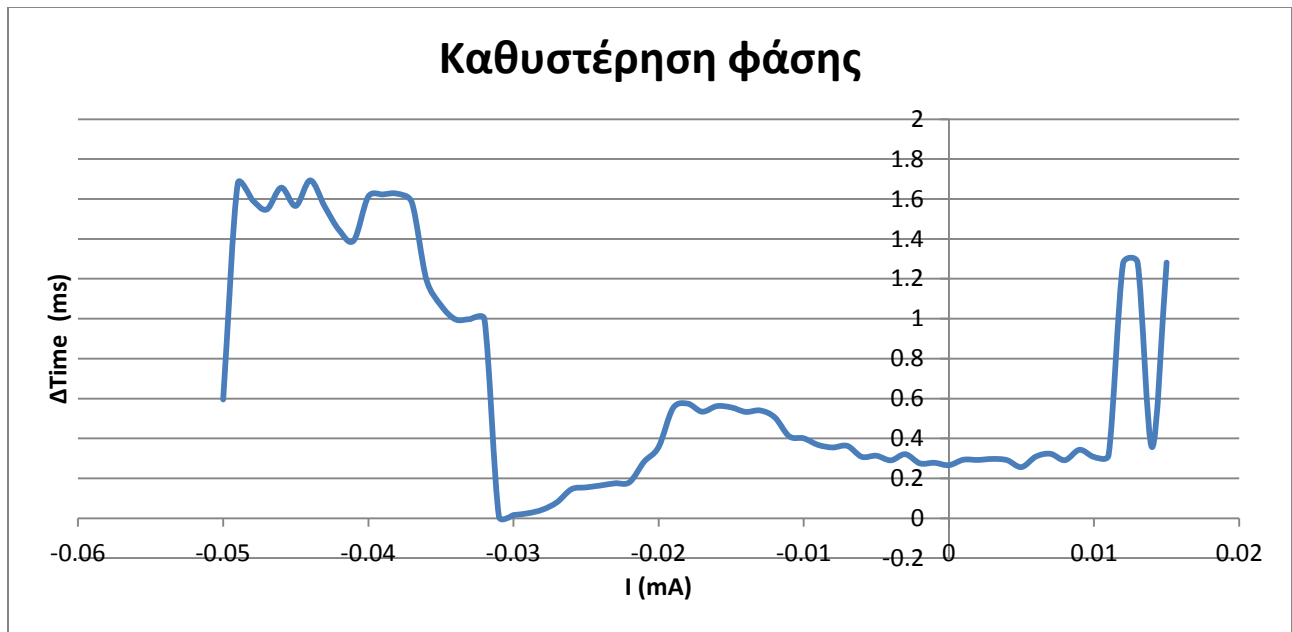
Πίνακας 2: Πίνακας Μετρήσεων με Μεταβολή Εξωτερικού Πεδίου.

mA	V p-p	Δtime (ms)	mA	V p-p	Δtime (ms)
0.015	6.8	1.2816427	-0.018	134.1	0.5745751
0.014	6.6	0.3562996	-0.019	132.1	0.5528285
0.013	7.1	1.2821724	-0.02	130.9	0.3572451
0.012	8.1	1.27696006	-0.021	126.7	0.2831785
0.011	7	0.3159046	-0.022	130	0.180826
0.01	8.7	0.3073851	-0.023	127.3	0.1753416
0.009	11.2	0.343181	-0.024	124.9	0.1643095
0.008	13.4	0.2912231	-0.025	128.2	0.1547369
0.007	18.5	0.3230809	-0.026	125.4	0.1455858
0.006	28.4	0.309387	-0.027	130.5	0.0802718
0.005	33.7	0.2565244	-0.028	128.8	0.0430516
0.004	37.7	0.2912776	-0.029	113.5	0.0249944
0.003	43.1	0.2972984	-0.03	105.3	0.0161441
0.002	50.5	0.2922683	-0.031	99.1	0.0082997
0.001	49.7	0.2932801	-0.032	88.8	0.9976653
-0.001	59.5	0.2780883	-0.034	78.4	0.9968383
-0.002	66.5	0.2751362	-0.035	68.2	1.0674027
-0.003	67.1	0.3209775	-0.036	62.8	1.1969485
-0.004	71.2	0.290299	-0.037	56.3	1.5825589
-0.005	77.8	0.3134345	-0.038	48.7	1.6263494
-0.006	80.3	0.3079597	-0.039	44.6	1.6228355
-0.007	86.8	0.3628182	-0.04	39.8	1.6122281
-0.008	89.9	0.3548077	-0.041	35.8	1.3924631
-0.009	94.2	0.3673622	-0.042	29.8	1.4428797
-0.01	104.1	0.4006269	-0.043	24.7	1.5617872
-0.011	110.3	0.410725	-0.044	19.5	1.693363
-0.012	119.5	0.5059677	-0.045	12.2	1.5653904
-0.013	125.3	0.5402477	-0.046	8.1	1.6570881
-0.014	134	0.5331034	-0.047	9.7	1.547501
-0.015	129.9	0.5558461	-0.048	7.5	1.5955833
-0.016	128.3	0.5619227	-0.049	6.7	1.6763086



Σχήμα 34: Απόκριση εξόδου του αισθητήρα.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε γύρω από το σημείο μηδέν ότι το πλάτος του αισθητήρα είναι μέγιστο. Η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί το βέλτιστο σημείο για την πραγματοποίηση μετρήσεων, λόγω της γραμμικής απόκρισης του αισθητήρα. Για την ίδια μεταβολή του εξωτερικού πεδίου παρατηρούμε ότι, στο σημείο όπου εμφανίζεται η γραμμικότητα του αισθητήρα η μεταβολή της καθυστέρησης φάσης παρουσιάζει μια υπερβολική συμπεριφορά σε σχέση με την υπόλοιπη συμπεριφορά του αισθητήρα (Παρακάτω σχήμα 35).



Σχήμα 35: Διάγραμμα καθυστέρησης φάσης μεταξύ παλμού εξόδου και παλμού εισόδου.

4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Boston, London: ARTECH HOUSE, INC, 2001.
- [2] Χ. Ευάγγελος, *Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα "Ηλεκτρονικά Υλικά"*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.
- [3] S. O. Kasap, *Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων*, 2 επιμ., Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2004.
- [4] Λ. Λάμπρου, *ΕΠΑΦΗ JOSEPHSON*, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΑΠΘ, ΜΑΙΟΣ 2013.
- [5] P. Ripka, «Review of fluxgate sensor,» *Sensors and Actuators*, p. 13, 25 February 1992.
- [6] E. L. Nagaev, «Lanthanum manganites and other giant-magnetoresistance magnetic conductors,» *Soviet Physics Uspekhi*, August 1996.
- [7] S. M. a. R. Huang, «Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and practical applications,» 2008.
- [8] M. K. a. M. Linder, «Magneto-optical sensors accurately analyze magnetic field of magnetic materials,» *Advance Materials & processes*, αρ. 170, February 2012.
- [9] M. C. a. L. Withanawasam, «Vehicle Detection and Compass Applications using AMR magnetic Sensors».
- [10] Ε. Χριστοφόρου, *Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα "Αισθητήρες"*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004..
- [11] «Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications,» *Science Direct*, May

2007.

[12] H.-X. P. Manh- Huong Phan, «Giant magnetoimendace materials: Fundamentals and applications,» *Science Direct*, p. 97, 1 5 2007.

[13] «How Magnetistrictive Sensors Works,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://sensors-actuators-info.blogspot.gr/2009/08/magnetostriction-is-property-of.html..>

[14] «Single Instruments Intoduction to LVDT Basic Principles,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.singer-instruments.com/products/tutorials/lvdt/introduction..>

[15] NTUA, *Σημειώσεις Μαθήματος Αισθητήρων*, 2014.

5 ΥΠΟΜΝΗΜΑ

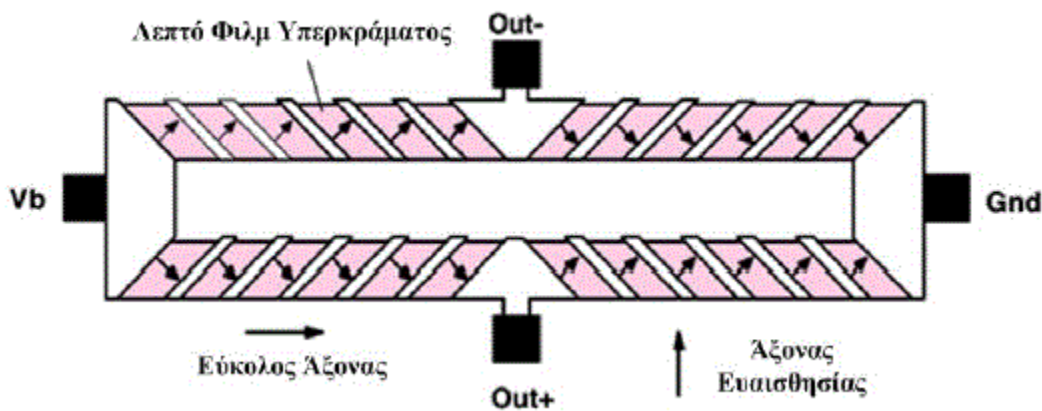
5.1 Ο αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης AMR HMC 2003.

Ο αισθητήρας AMR HMC 2003 είναι ένας υβριδικός αισθητήρας της Honeywell, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μετρά το μαγνητικό πεδίο στις τρεις διαστάσεις. Αποτελείται από δύο αισθητήρες μαγνητοαντίστασης υψηλής ευαισθησίας. Ο πρώτος αισθητήρας HMC1001, ο οποίος είναι κολλημένος κάθετα στον HMC2003, μετρά τη συνιστώσα Z και ο δεύτερος αισθητήρας HMC1002 μετρά τις X και Y συνιστώσες. Επιπλέον, ο αισθητήρας αυτός έχει τρεις ενισχυτές οργάνων (instrumentation amplifiers), οι οποίοι παρουσιάζουν χαμηλό θόρυβο καθώς και ενεργό βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 1KHz.

Ο αισθητήρας AMR αποτελείται από τέσσερεις απλές AMR σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. Η διάταξη αυτή μας επιτρέπει να μετρούμε με μεγαλύτερη ακρίβεια μικρές μεταβολές των αντιστάσεων. Με μία απλή εφαρμογή τάσης στα άκρα της γέφυρας, ο αισθητήρας μετατρέπει το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο σε διαφορική τάση εξόδου. Ο αισθητήρας μαγνητοαντίστασης αποτελείται από μια λεπτή επίστρωση Ni-Fe (permalloy) πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Si) διαμορφωμένη έτσι ώστε να αποτελεί στοιχείο αντίστασης υπό μορφή ταινίας. Η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στη μεγάλη πλευρά του φιλμ προκαλεί περιστροφή του διανύσματος μαγνήτισης και αλλαγή της γωνίας του. Αυτό με τη σειρά του θα προκαλέσει μια αλλαγή της τιμής της αντίστασης κατά ΔR και κατά συνέπεια θέτει τη γέφυρα Wheatstone εκτός ισορροπίας, οπότε αντίστοιχα μεταβάλλεται και η τάση στην έξοδό της. Κατά την κατασκευή, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης (προτιμώμενη διεύθυνση για το μαγνητικό πεδίο) τίθεται σε έναν άξονα κατά μήκος του φιλμ. Αυτό επιτρέπει τη μεγιστοποίηση των αλλαγών στην αντίσταση με την επιβολή πεδίου στο υπερκράμμα Ni-Fe του φιλμ.

Παρόλα αυτά, η επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου, μεγαλύτερου από 10 gauss κατά μήκος του εύκολου άξονα, μπορεί να διαταράξει ή ακόμη και να αντιστρέψει την

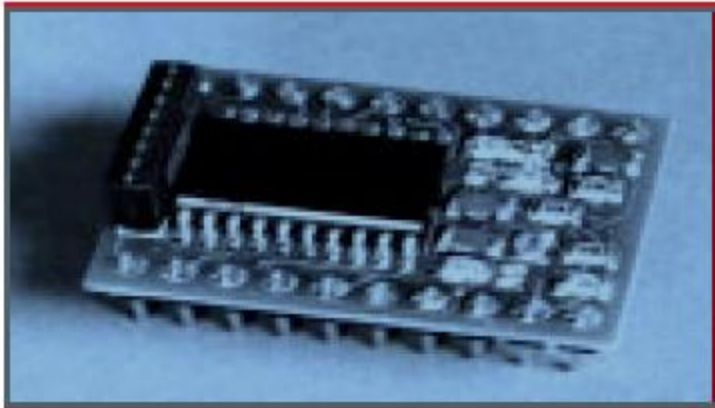
πολικότητα μαγνήτισης του φιλμ, το οποίο έχει ως επακόλουθο την αλλαγή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα. Μετά από μια τέτοια διαταραχή χρειάζεται να εφαρμοστεί ένα ισχυρό στιγμιαίο μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε να τοποθετηθούν ή να επανατοποθετηθούν οι μαγνητικές περιοχές και μαζί τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Οι αντιστάσεις είναι ευθυγραμμισμένες κατά τρόπο ώστε να έχουν έναν κοινό άξονα ευαισθησίας και με την εφαρμογή αύξησης του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση ευαισθησίας δίνουν θετική μεταβολή στην τάση. Επειδή μόνον η έξοδος είναι ανάλογη προς το μονοδιάστατο άξονα (αρχή ανισοτροπίας) και προς το μέγεθός του, επιπρόσθετες γέφυρες αισθητήρα τοποθετημένες σε ορθογώνιες κατευθύνσεις επιτρέπουν ακριβή μέτρηση της κατεύθυνσης του αυθαίρετου πεδίου. Το γεγονός ότι ο αισθητήρας μετρά μόνο σε μία διάσταση μας αναγκάζει να τοποθετήσουμε αισθητήρες σε τρεις ορθογώνιους άξονες ώστε να μετρήσουμε το διανυσματικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου. Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται το αισθητήριο στοιχείο μαγνητοαντίστασης.



Σχήμα 36: Μαγνητοαντίσταση σε διάταξη γέφυρας Wheatstone.

Γύρω από κάθε αισθητήρα AMR υπάρχουν δύο πηνία: το ένα για 'set/reset' και το άλλο για αντιστάθμιση.

HMC2003



Σχήμα 37: Αισθητήρας AMR HMC 2003 της Honeywell.

Sensitivity 1V/Gauss
Field Resolution 40 mGauss
Field Range ± 2 Gauss
Linearity ± 0.5 -1% full Scale
Output Voltage 2.5 ± 2 Volts
Bandwidth 1 KHz

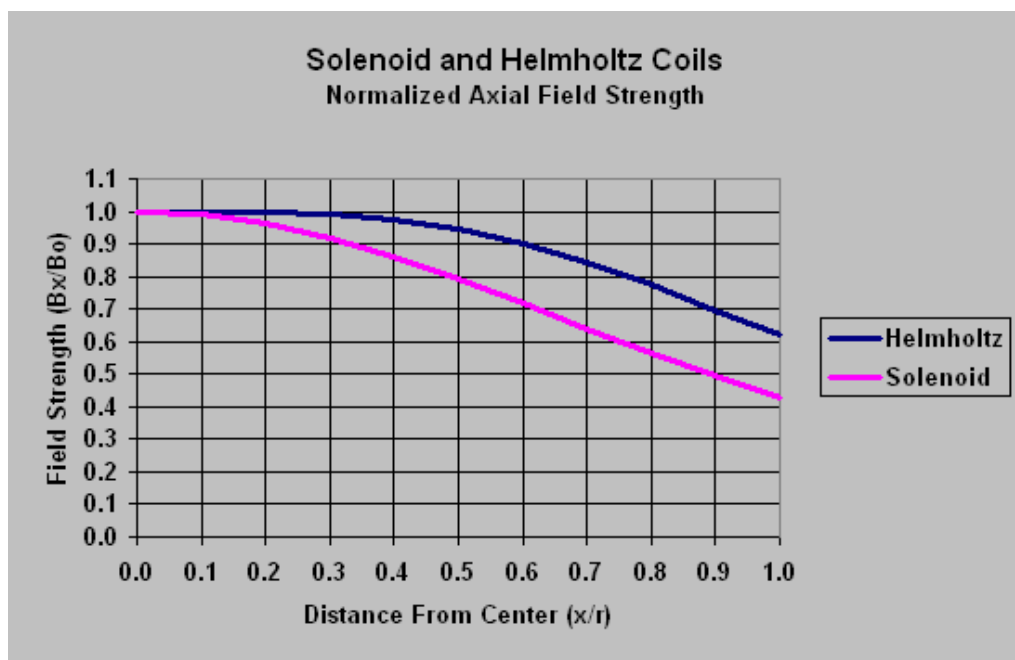
5.2 Περιγραφή πηνίου HELMHOLTZ

Το πηνίο Helmholtz πήρε το όνομά του από τον Γερμανό φυσικό Hermann von Helmholtz (1821-1894), που ήταν ο πρώτος που το σχεδίασε και ανέπτυξε. Το πηνίο Helmholtz υπήρξε ο πιο κλασσικός και ενδεδειγμένος τρόπος μέτρησης χαμηλών μαγνητικών πεδίων για περισσότερο από έναν αιώνα. Αποτελείται από δυο κυκλικά πηνία που απέχουν μεταξύ τους όσο η μέση ακτίνα του κάθε πηνίου, είναι συνδεδεμένα σε σειρά, κάθε πηνίο έχει τον ίδιο αριθμό σπειρών και βρίσκονται πάνω στον ίδιο άξονα.

Στις μέρες μας, συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή σχετικά χαμηλών και ομοιόμορφων μαγνητικών πεδίων συγκεκριμένης έντασης, κάτι που βοηθάει επιστήμονες και μηχανικούς να εκτελέσουν πειράματα και μετρήσεις που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια. Ακόμη, μπορούμε να μετρήσουμε με καλά αποτελέσματα διάφορες μαγνητικές ιδιότητες υλικών, όπως για παράδειγμα τη μαγνητική επιδεκτικότητα, την αποτελεσματικότητα υλικών που χρησιμοποιούνται για μαγνητική προστασία. Επιπρόσθετα, μεγάλη εφαρμογή των πηνίων Helmholtz συναντάμε σε όργανα ναυσιπλοίας σε διάφορες βιομαγνητικές μελέτες και μας παρέχουν την δυνατότητα να βαθμονομήσουμε συσκευές μαγνητικών μετρήσεων. Επίσης αν συνδέσουμε το συγκεκριμένο πηνίο με έναν ολοκληρωτικό ροομετρητή, λειτουργεί ως μαγνητικός αισθητήρας και έτσι μπορούμε να καθορίσουμε την καμπύλη ανοιχτού κυκλώματος ενός μόνιμου μαγνήτη. Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα αντιστάθμισης του γήινου μαγνητικού πεδίου της γης, κάτι που μπορούμε να πετύχουμε κάλλιστα χρησιμοποιώντας ένα τριαξονικό πηνίο Helmholtz που θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Ανάλογα με την τροφοδοσία, αν παρέχουμε στο πηνίο εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση, θα πάρουμε αντίστοιχα ένα εναλλασσόμενο ή συνεχές μαγνητικό πεδίο σταθερής έντασης και ομοιομορφίας.

Ο λόγος κατασκευής ενός πηνίου Helmholtz προέρχεται από την ανάγκη δημιουργίας ενός σταθερού και ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου, κάτι που έχει πολλές και σημαντικές εφαρμογές όπως προαναφέραμε. Είναι γνωστό πως στο εσωτερικό ενός συνηθισμένου σωληνοειδούς η ένταση κατά μήκος του άξονα διαφέρει σε σχέση με

κάποια απόσταση r από το κέντρο του. Επίσης μεταβάλλεται η μαγνητική ένταση αρκετά όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα αλλά και η ομοιομορφία του πεδίου.



Σχήμα 38: Σύγκριση ενός πηνίου Helmholtz όσον αφορά τη σταθερότητα του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα.

5.3 Εφαρμογές Αισθητήρων ^[10]

5.3.1 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Το βασικό πεδίο των βιομηχανικών εφαρμογών αναφέρεται στη διεξαγωγή μη καταστρεπτικών δοκιμών και τους σχετικούς υπολογισμούς. Σε τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται αισθητήρες ανίχνευσης μικρής έντασης πεδίου με περισσότερο χρησιμοποιούμενους τους αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Hall. Οι αισθητήρες Hall έχουν ευαισθησία της τάξης του 0.1mT, εκείνοι που βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητο-αντίστασης (MR) 1μT ενώ σε διατάξεις τύπου μαγνητο-εμπέδησης η ευαισθησία κυμαίνεται στα 10-100pT. (Στην ορολογία των αισθητήρων η τιμή της ευαισθησίας, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του αισθητήρα να ανιχνεύει μικρές διακυμάνσεις μετρούμενου μεγέθους). Έχουν επίσης προταθεί και αισθητήρια στοιχεία τύπου MDL που πραγματοποιούν ικανοποιητικές μετρήσεις. Το δεύτερο πιο σημαντικό πεδίο βιομηχανικών εφαρμογών είναι εκείνο των ελεγκτών θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης/δόννησης. Πρόκειται στην πλειοψηφία τους για διακόπτες θέσης που στηρίζονται στο φαινόμενο της γιγάντιας μαγνητο-αντίστασης (“giant” MR) και έχουν επαναληψιμότητα καλύτερη από 10^{12} , με κόστος περίπου 1 €/αισθητήρα. Ανάλογα με την απαιτούμενη ευαισθησία χρησιμοποιούνται και κατάλληλα είδη αισθητήρων θέσης. Λόγου χάρη, όταν απαιτείται καλή ευαισθησία, της τάξης του 1μm, χρησιμοποιούνται διαφορικοί αισθητήρες θέσης τύπου μαγνητικής ταινίας με μόνιμους μαγνEuro/αισθητήρα. Γενικά η τεχνική του MDL –με κόστος περίπου 100 Euro/αισθητήρα- προτιμάται όταν η επιθυμητή ευαισθησία είναι της τάξης των 1-10μm. Όσον αφορά τους αισθητήρες μάζας όπως οι κυψελίδες φορτίου, οι μετρητές ροπής στρέψης και οι μετρητές πίεσης (pressure gauges), στις βιομηχανικές τους εφαρμογές βασίζονται σε αγώγιμα ή ημιαγώγιμα υλικά. Οι μετρητές μηχανικής τάσης (strain gauges), είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες για μετρήσεις φορτίου. Κάποιες νέες τεχνικές που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης και την τεχνική της μαγνητοσυστολικής γραμμής καθυστέρησης έδωσαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα όσον αφορά την ευαισθησία των μετρητών φορτίου και παράγωγων μεγεθών. Στην περίπτωση αυτών των τεχνικών αν και η ευαισθησία που έχουν οι διατάξεις αυτές είναι καλύτερη από εκείνη των μετρητών μηχανικής τάσης το βασικό

πρόβλημα παραμένει η μικρή διάρκεια ζωής τους, η οποία είναι περίπου 108 ενώ εκείνη των μετρητών μηχανικής τάσης είναι περίπου 10¹².

5.3.2 Βιοϊατρικοί Αισθητήρες

Οι πιο γνωστοί μαγνητικοί αισθητήρες, σ' αυτό το πεδίο εφαρμογών είναι οι εγκεφαλογράφοι. Πρόκειται για διατάξεις αισθητήρων ανίχνευσης πεδίου της τάξης του 0.1-1μΤ. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες διατάξεις για τέτοιες εφαρμογές είναι τα μαγνητόμετρα SQUID, ευαισθησίας 1-10fT και κόστους 1,000,000 Euro/αισθητήρα. Σε τέτοιες εφαρμογές έχει χρησιμοποιηθεί και το φαινόμενο της μαγνητο-εμπέδησης. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν κόστος περίπου 10,000 Euro/αισθητήρα, αλλά και το μειονέκτημα της χαμηλής ευαισθησίας (τάξης 10-100pT), γεγονός που δεν τους καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικούς. Εκτός από τον εγκεφαλογράφο ένα άλλο είδος μαγνητικού αισθητήρα είναι ο νέος τύπος καρδιογράφου ο οποίος είναι απλούστερος στη λειτουργία και πιο φθηνός από τους κλασικούς ηλεκτροκαρδιογράφους. Βέβαια οι ηλεκτροκαρδιογράφοι πραγματοποιούν μετρήσεις που δεν είναι δυνατό να ληφθούν από το νέο μοντέλο το οποίο συνίσταται από διατάξεις τύπου μαγνητο-εμπέδησης, με κόστος περίπου 1,000 €/αισθητήρα. Τα τελευταία χρόνια και εξαιτίας του μεγάλου ενδιαφέροντος για τον προσδιορισμό του DNA, αναπτύχθηκαν αισθητήρες πεδίου, που παρουσιάζουν χωρική διακριτική ικανότητα (resolution) της τάξης του 1mm και κόστος 100€. Οι διατάξεις αυτές κυρίως βασίζονται στο φαινόμενο της μεγάλης μαγνητο-αντίστασης αν και τελευταία για την ίδια εφαρμογή, γίνονται δοκιμές με αισθητήρες τύπου μαγνητο-εμπέδησης.

5.3.3 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Από τις σπουδαιότερες εφαρμογές των αισθητήρων αυτής της κατηγορίας είναι τα συστήματα εντοπισμού ναρκών (anti-mining control system). Μέχρι στιγμής οι αισθητήρες για τέτοια συστήματα βασίζονται σε συσκευές ανίχνευσης μικρών πεδίων ή μαγνητικής ανωμαλίας. Φυσικά, όσο πιο πολύ εξελίσσονται τα μοντέλα των ναρκών, τόσο λιγότερο σίδηρο περιέχουν και συνεπώς τόσο πιο ευαίσθητοί και ακριβείς αισθητήρες πεδίου απαιτούνται για τον εντοπισμό τους. Για το σκοπό αυτό έχουν ήδη δοκιμαστεί πολλά είδη αισθητήρων, από επαγωγικές διατάξεις ως αισθητήρες τύπου

μαγνητο-αντίστασης και μαγνητο-εμπέδησης. Η ευαισθησία των τωρινών αισθητήρων κυμαίνεται από 10-100pT. Μια εφαρμογή που χρησιμοποιείται και για οικιακές χρήσεις είναι τα συστήματα μαγνητικής ταυτοποίησης (magnetic signature). Σύμφωνα με τα συστήματα αυτά, τα στρατιωτικά, και όχι μόνο, οχήματα είναι εξοπλισμένα με πηνία που εφοδιάζονται με ρεύμα συγκεκριμένης -συνήθως και κωδικοποιημένης- κυματομορφής. Η ανίχνευση του πεδίου που παράγεται από τέτοιο ρεύμα οδηγεί σε αναγνώριση του συγκεκριμένου τύπου οχήματος. Από τα πιο εξελιγμένα συστήματα πλοήγησης πυραύλων είναι αυτά που βασίζονται σε γυροσκοπία ελέγχου αδρανούς μάζας ή σε παγκόσμια συστήματα συντεταγμένων (GPS). Παράλληλα έχει αρχίσει η προσπάθεια για ανάπτυξη και χρησιμοποίηση αισθητήρων πεδίου. Η αρχή λειτουργίας αισθητήρων τύπου μαγνητο-αντίστασης και τύπου μαγνητο-εμπέδησης που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό βασίζεται στη μέτρηση της διακύμανσης του πεδίου και τις απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις, εξαιτίας του γήινου πεδίου.

5.3.4 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, η προστασία του περιβάλλοντος αναδεικνύεται σε θέμα ζωτικής σημασίας. Αυτό που δύναται να προσφέρει η επιστήμη των αισθητήρων προς αυτή την κατεύθυνση είναι η μέτρηση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την περιβαλλοντική κατάσταση. Μείζονος σημασίας ζήτημα είναι η ανίχνευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ανίχνευση αυτή πραγματοποιείται με χρήση αισθητήρων πεδίου. Το εύρος των μετρήσεων εκτείνεται από συνεχή πεδία μέχρι εναλλασσόμενα πεδία συχνότητας 30GHz. Η ευαισθησία των μετρήσεων που λαμβάνονται, κυμαίνεται από μερικά pT ως μερικά mT και οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν κυριολεκτικά κατακτήσει το συγκεκριμένο τομέα (επαγωγικές διατάξεις και αισθητήρες πεδίου τύπου μαγνητο-εμπέδησης). Τέλος γίνεται χρήση αισθητήρων και σε εφαρμογές που σχετίζονται με την απαρίθμηση των εν κινήσει οχημάτων σε κατοικημένες περιοχές με στόχο την ανάπτυξη διορθωτικών ενεργειών στην κυκλοφοριακή σηματοδότηση.

5.3.5 Εφαρμογές στον Αυτοματισμό

Στα καινούρια οχήματα υπάρχει η τάση για χρησιμοποίηση όλο και περισσότερων αισθητήρων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στα αυτοκίνητα που παράγονται σήμερα χρησιμοποιούνται περισσότεροι από 1500 αισθητήρες. Οι μαγνητικοί αισθητήρες κυριαρχούν σε πολλές αισθητήριες εφαρμογές αυτού του χώρου, με σημαντικότερο και πιο γνωστό τον γωνιακό μαγνητικό αισθητήρα θέσης που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του συστήματος ABS στα φρένα των αυτοκινήτων. Ο τρόπος λειτουργίας του έχει σχέση με την περιστροφή ενός δακτυλίου που φέρει οδόντες από μόνιμο μαγνήτη κατά την κίνηση του τροχού. Οποιαδήποτε ξαφνική και αναπάντεχη εμπλοκή των τροχών κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος ενεργοποιεί το σύστημα anti-block (ABS) ανακουφίζοντας έτσι για απειροστά του δευτερολέπτου την πίεση από το φρενάρισμα. Άλλη μια εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων στα οχήματα, είναι οι αισθητήρες ροπής στρέψης οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο πηδάλιο διεύθυνσης του τροχού και στην παρακολούθηση της λειτουργίας της ατράκτου. Αν και βρίσκονται σε στάδιο εργαστηριακής ανάπτυξης αναμένεται ότι πολύ σύντομα, θα ξεκινήσει η βιομηχανική παραγωγή τους. Επιπλέον δοκιμαστικά έχουν χρησιμοποιηθεί αισθητήρες, προκειμένου να διευκολύνουν τη διαδικασία οδήγησης, είτε μέσω της ενημέρωσης που παρέχουν στον οδηγό σχετικά με την κατάσταση της πορείας του αυτοκινήτου ή ακόμη και μέσω της αντίδρασης που προβάλλουν σε μια λανθασμένη απόφαση του οδηγού.

5.3.6 Εργαστηριακοί Αισθητήρες

Όσον αφορά τον τομέα των εργαστηριακών αισθητήρων, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε ό,τι αφορά την επιστήμη της μετρολογίας. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη εφαρμογή είναι αυτή που σχετίζεται με τον προσδιορισμό των δευτερευόντων προτύπων βαθμονόμησης πεδίου (secondary standards), διαδικασία που βασίζεται σε ακριβείς αισθητήρες πεδίου. Και σε αυτή την εφαρμογή κυριαρχούν οι επαγωγικές διατάξεις. Μια άλλη εφαρμογή είναι ο χαρακτηρισμός δομής και ο μαγνητικός χαρακτηρισμός με τα μικροσκόπια ατομικής δύναμης (AFM), μαγνητικής δύναμης (MFM) και το μικροσκόπιο διέλευσης- σάρωσης (STM). Με τέτοια μικροσκόπια, προσδιορίζεται λεπτομερώς η τοπογραφία μιας επίπεδης επιφάνειας. Στα

προαναφερόμενα μικροσκόπια, μια ακίδα που δονείται στην κορυφή της επιφάνειας, δημιουργεί δυνάμεις (Van der Waals για το AFM, μαγνητικές δυνάμεις για το MFM και ηλεκτρικές δυνάμεις για το STM) ανάλογα με την τοπογραφία της εξεταζόμενης επιφάνειας.