



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ

ΧΑΤΖΗΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος

ΑΘΗΝΑ, 2016

Περίληψη

Στις μέρες μας, η ανάγκη προσδιορισμού ενός μαγνητικού πεδίου με ακρίβεια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογικών εφαρμογών με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μέτρησή του είναι τόσο ακριβής όσο και ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίησή της. Όμως, η αποτελεσματική του χρήση απαιτεί τη σωστή μέθοδο διακρίβωσής του.

Αντικείμενο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η υλοποίηση μίας διάταξης για τη διακρίβωση μαγνητομέτρων. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει έναν αισθητήρα fluxgate, μέσω του οποίου θα μπορέσουμε να αντισταθμίσουμε το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, με στόχο την εύρεση του σημείου 0 στο εκάστοτε διάγραμμα διακρίβωσης του αισθητήρα (zero point of calibration).

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μια ιστορική αναδρομή στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εξέλιξη των αισθητήρων πεδίου, στις αρχές που τους διέπουν και στην παρούσα κατάστασή τους. Ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των βασικών μαγνητικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται και στην αρχή λειτουργίας τους, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στους αισθητήρες fluxgate. Στη συνέχεια, αναλύεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, και περιλαμβάνει την κατασκευή της διάταξης και τη λήψη των μετρήσεων. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα των πειραμάτων και οι προοπτικές χρήσης της διάταξης.

Abstract

Nowadays, the need to define a magnetic field with accuracy has led to the development of technological applications with satisfactory results. Its measurement is as accurate as the instrument that is used to make the measurement. However, the effective use of this instrument requires the right calibration technique.

The subject of this thesis is the implementation of a device for the calibration of magnetometers. This device includes a fluxgate sensor, through which we will be able to counterbalance the externally imposed magnetic field, with the aim of finding the zero point of calibration.

In the introduction of this study there is a history review of electromagnetism, of the evolution of field sensors and of the principles that govern them and their state of the art. What follows is a brief presentation of the basic magnetic sensors that are used and their operation principle, giving greater emphasis on fluxgate sensors. Subsequently, the experimental device that was used is analyzed, which includes the construction of the device and taking of measurements. Finally, conclusions, based on experimental data, are cited and there is an analysis of the future prospects of the device.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κατ' αρχάς τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την υπομονή, κατανόηση και καθοδήγησή του όλο αυτό το διάστημα, καθώς και για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την εργασία αυτή.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες του τμήματος Μεταλλουργών & Μηχανικών Μεταλλείων, κ. Κοσσυβάκη Δημήτριο και κ. Αγγελόπουλο Σπυρίδωνα για την άριστη συνεργασία μας και τις σημαντικές συμβουλές τους για αυτήν την εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ τη σύζυγο και τον μικρό μου υιό για την υπομονή, κατανόηση και αμέριστη συμπαράστασή τους όλο αυτό το διάστημα.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ABSTRACT.....	III
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	IV
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	IX
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	3
2.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΕΔΙΟΥ.....	3
2.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	4
2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ.....	5
2.4 Η ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΠΕΔΙΟΥ.....	8
3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	13
3.1 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.....	13
3.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	15
3.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	16
3.3.1 Πηνίο εντοπισμού επαγωγικής τάσης (<i>Search Coil magnetometer</i>).....	16
3.3.2 Μαγνητόμετρα <i>SQUID</i>	18
3.3.3 Μαγνητόμετρα ανιστροπικής μαγνητοαντίστασης (<i>AMR</i>).....	20
3.3.4 Μαγνητόμετρα μετάπτωσης πρωτονίου (<i>proton precession magnetometers</i>) ..	22
3.3.5 Μαγνητόμετρα οπτικής απορρόφησης (<i>optically pumped magnetometers</i>).....	23
3.3.6 Μαγνητόμετρο οπτικών ινών (<i>fiber optic magnetometer</i>).....	25
3.4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΙΣΧΥΡΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	26
3.4.1 Μαγνητόμετρα <i>Hall Effect</i>	26
3.4.2 Αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (<i>GMR</i>).....	28
3.4.3 Μαγνητοδίοδοι (<i>Magnetodiode</i>).....	30
3.4.4 Μαγνητοτρανζίστορ (<i>magnetotransistor</i>).....	31
3.5 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ (<i>FLUXGATE MAGNETOMETER</i>).....	32
3.5.1 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρων <i>Fluxgate</i>	32
3.5.2 <i>Fluxgate</i> παράλληλου τύπου.....	33
3.5.3 <i>Fluxgates</i> ορθογωνίου τύπου.....	36
3.5.4 <i>Fluxgate</i> δεύτερης αρμονικής, ύψους παλμού και θέσης παλμού.....	37
3.5.5 Υλικά κατασκευής πυρήνα.....	38
3.5.6 Σύγκριση με άλλους αισθητήρες.....	38
3.6 ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ.....	39
3.7 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ.....	40

4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	43
4.1	ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	43
4.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	45
4.3	ΛΗΦΘΕΙΣΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	46
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	59
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	59
5.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	59
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Το πρώτο αερομεταφερόμενο μαγνητόμετρο	4
Σχήμα 2-2 Μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη.....	6
Σχήμα 2-3 Κατάταξη μαγνητικών αισθητήρων	9
Σχήμα 3-1 Το μαγνητικό πεδίο της Γης	13
Σχήμα 3-2 Μαγνητικά πεδία παραγόμενα από διάφορες πηγές.....	14
Σχήμα 3-3 Μαγνητικοί αισθητήρες και περιοχή ανιχνεύσιμης πυκνότητας ροής	16
Σχήμα 3-4 Διατάξεις μαγνητόμετρου εντοπισμού επαγωγικής τάσης.....	17
Σχήμα 3-5 a) Διάταξη Josephson junction b) Σχέση τάσης (V) – ρεύματος (I)	19
Σχήμα 3-6 Μαγνητόμετρο DC SQUID	20
Σχήμα 3-7 Βασική διάταξη αισθητήρα Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης	21
Σχήμα 3-8 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρου NMR.....	22
Σχήμα 3-9 Τυπικό διάγραμμα μαγνητομέτρου NMR	23
Σχήμα 3-10 Καταστάσεις αλκαλικού μετάλλου	24
Σχήμα 3-11 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας μαγνητομέτρου οπτικών ινών.....	26
Σχήμα 3-12 Βασική διάταξη αισθητήρα Hall	27
Σχήμα 3-13 Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα Hall	28
Σχήμα 3-14 Φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης	29
Σχήμα 3-15 Βασικές δομές αντιστάσεων GMR a) sandwich b) multilayer c) spin valve	29
Σχήμα 3-16 Μαγνητοδίοδος	30
Σχήμα 3-17 Σχηματική παράσταση ενός μαγνητοτρανζίστορ.	31
Σχήμα 3-18 Βασική διάταξη αισθητήρα Fluxgate	33
Σχήμα 3-19 Διάφορες κυματομορφές αισθητήρα Fluxgate	34
Σχήμα 3-20 Fluxgates παράλληλου τύπου	36
Σχήμα 3-21 Fluxgates ορθογωνίου τύπου	37
Σχήμα 3-22 Πάνω: σωληνοειδές πηνίο, Κάτω αριστερά: πηνία Helmholtz, κάτω δεξιά: πηνία Helmholtz τριών αξόνων....	40
Σχήμα 3-23 Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου παρουσία στρώματος θωράκισης.....	42
Σχήμα 4-1 Διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων με χρήση αισθητήρα fluxgate	44
Σχήμα 4-2 Σωληνοειδές πηνίο	44
Σχήμα 4-3 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	45
Σχήμα 4-4 Ηλεκτρονικά όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν	46
Σχήμα 4-5 Σχέση ρεύματος διέγερσης και συχνότητας διέγερσης σωληνοειδούς	48
Σχήμα 4-6 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	49
Σχήμα 4-7 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	49
Σχήμα 4-8 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	49
Σχήμα 4-9 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	50
Σχήμα 4-10 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	50
Σχήμα 4-11 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	50
Σχήμα 4-12 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	51
Σχήμα 4-13 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	51
Σχήμα 4-14 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	51
Σχήμα 4-15 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	52
Σχήμα 4-16 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	52

Σχήμα 4-17 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	52
Σχήμα 4-18 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.	53
Σχήμα 4-19 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	53
Σχήμα 4-20 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	53
Σχήμα 4-21 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	54
Σχήμα 4-22 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	54
Σχήμα 4-23 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	54
Σχήμα 4-24 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	55
Σχήμα 4-25 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	55
Σχήμα 4-26 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	55
Σχήμα 4-27 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	56
Σχήμα 4-28 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	56
Σχήμα 4-29 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	56
Σχήμα 4-30 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	57
Σχήμα 4-31 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	57
Σχήμα 4-32 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	57
Σχήμα 4-33 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.....	58
Σχήμα 4-34 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα	58
Σχήμα 4-35 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.	58

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2—1 Χαρακτηριστικά μαγνητικών αισθητήρων	12
Πίνακας 3—1 Επιτρεπόμενες τιμές μαγνητικού αριθμού m	24
Πίνακας 4—1 Μετρηθέντα ζεύγη τιμών συχνότητας – ρεύματος διέγερσης	47

1 Εισαγωγή

Τα μαγνητικά πεδία έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη ιστορία, αρχής γενομένης από την εποχή της ανακάλυψης του μαγνητισμού στα χρόνια της αρχαιότητας.

Οι αισθητήρες πεδίου καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά των μαγνητικών αισθητήρων. Από αυτούς, περισσότερο χρησιμοποιούμενοι είναι οι αισθητήρες για τη μέτρηση χαμηλών μαγνητικών πεδίων, οι οποίοι στηρίζονται κυρίως στα φαινόμενα της μαγνητοαντίστασης, της μαγνητοεμπέδησης και σε επαγωγικές τεχνικές, όπως οι αισθητήρες fluxgate.

Στις μέρες μας, η εύρεση της τιμής ενός μαγνητικού πεδίου με μεγάλη ακρίβεια έχει χρήση σε πολλές εφαρμογές. Στη Γεωφυσική για την ανακάλυψη μεταλλευμάτων/ορυκτών και πετρελαίου, στη Βιοϊατρική για την ανίχνευση βιολογικών λειτουργιών στο ανθρώπινο σώμα, στην πλοήγηση, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στον έλεγχο συμπεριφοράς των διαστημικών σκαφών, στον ανθυποβρυχιακό πόλεμο και γενικότερα σε πολλές εφαρμογές που κάνουν την καθημερινότητά μας ευκολότερη, από τη μέτρηση ταχύτητας και πυκνότητας οχημάτων, έως την εύρεση θαμμένων αντικειμένων κάτω από το έδαφος (π.χ. σε αρχαιολογικούς χώρους) κ.α.

Η ανάπτυξη, όμως, των παραπάνω τεχνολογικών εφαρμογών έχει οδηγήσει στην ανάγκη προσδιορισμού μαγνητικών πεδίων με μεγάλη ακρίβεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια των οργάνων, τόσο περισσότερο επιτυχημένες θα είναι οι εφαρμογές. Ένα μέτρο επίτευξης της ακριβείας των οργάνων είναι η διακρίβωσή τους.

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι να εξεταστεί η δυνατότητα υλοποίησης μίας διάταξης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διακρίβωση μαγνητομέτρων. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, στη διάταξη που πραγματοποιήθηκε έγινε χρήση ενός αισθητήρα fluxgate (μαγνητομέτρου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής) παράλληλου τύπου, μονού διαμήκους πυρήνα, για τον εντοπισμό, υπολογισμό και αντιστάθμιση ενός εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Ο κύριος στόχος είναι η εύρεση του σημείου μηδέν στην αρχή των αξόνων του διαγράμματος διακρίβωσης ενός μαγνητομέτρου (zero point of calibration). Για να γίνει, όμως, αυτό εφικτό, πρέπει να προβούμε είτε σε μαγνητική θωράκιση του μαγνητομέτρου, είτε να βρούμε και να αντισταθμίσουμε το εξωτερικό μαγνητικό

πεδίο. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τη δεύτερη περίπτωση και με τον τρόπο που αυτό μπορεί να γίνει εφικτό, βασιζόμενοι στην αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα fluxgate.

1.2 Δομή εργασίας

Στο κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται το αντικείμενο και οι στόχοι της μεταπτυχιακής εργασίας. Περιγράφονται εν συντομία τα στάδια της εργασίας, καθώς και οι λόγοι για τους οποίους έγινε.

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις σημαντικές ανακαλύψεις για τον ηλεκτρομαγνητισμό και στην εξέλιξη των αισθητήρων πεδίου. Ακολουθεί εισαγωγή στους βασικούς νόμους του μαγνητισμού και τελειώνει με μια αναφορά στη σημερινή κατάσταση των αισθητήρων πεδίου.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3 αρχικά αναφέρονται οι πιθανοί λόγοι δημιουργίας και ύπαρξης ενός μαγνητικού πεδίου, ενώ έπειτα γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βασικών μαγνητικών αισθητήρων. Αυτοί χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, όπως περιγράφεται και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, στους αισθητήρες χαμηλού και στους αισθητήρες ισχυρού πεδίου. Έπειτα, περιγράφονται αναλυτικότερα οι αισθητήρες fluxgate (μαγνητόμετρα ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής) καθώς και ο τύπος του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Τελειώνοντας το κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά σε βασικές αρχές διακρίβωσης των μαγνητομέτρων

Στο κεφάλαιο 4 παρατίθεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε με έμφαση στην αρχή λειτουργίας της, περιλαμβάνοντας το κατασκευαστικό μέρος του αισθητήρα fluxgate και το κομμάτι λήψεως των μετρήσεων.

Στο πέμπτο και τελευταίο μέρος αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία, αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2 Στοιχεία θεωρίας

2.1 Εξέλιξη των αισθητήρων πεδίου

Σε αυτήν την παράγραφο θα αναφερθούμε στις βασικές ημερομηνίες που σημάδεψαν την εξέλιξη του μαγνητισμού και που οδήγησαν στη δημιουργία των πρώτων μαγνητικών αισθητήρων για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου.

Αν και η ιστορία του μαγνητισμού ανέρχεται στα αρχαία χρόνια (πρώτες επίσημες αναφορές έγιναν τον 5^ο αιώνα π.Χ.), η μελέτη των μαγνητικών πεδίων ξεκίνησε το 1269, όταν ο Γάλλος Petrus Peragrinus αποτύπωσε το μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια ενός σφαιρικού μαγνήτη χρησιμοποιώντας βελόνες σιδήρου. Παρατήρησε τότε ότι όλες οι γραμμές του πεδίου περνούσαν από δύο συγκεκριμένα σημεία, τα οποία ονόμασε πόλους σε αναλογία με τους πόλους της Γης και διατύπωσε την αρχή ότι όλοι οι μαγνήτες έχουν δύο πόλους, το νότιο και το βόρειο, ανεξάρτητα με το σχήμα και το μέγεθός τους. Περίπου τρεις αιώνες αργότερα, το 1600, ο William Gilbert, Άγγλος φυσικός, δουλεύοντας πάνω στο έργο του Peragrinus, δημοσίευσε ένα βιβλίο για το μαγνητισμό, που ήταν και το πρώτο βήμα για να καθιερωθεί ως επιστήμη. Μάλιστα, αυτός ήταν και ο πρώτος που χρησιμοποίησε τη λέξη "electricity" από την ελληνική λέξη ήλεκτρο. Το 1785, ο Γάλλος φυσικός Charles-Augustin Coulomb πειραματικά απέδειξε ότι ο Βόρειος και ο Νότιος πόλος δεν μπορούν να διαχωριστούν.

Η επανάσταση στον ηλεκτρομαγνητισμό ήρθε τον επόμενο αιώνα. Ξεκινώντας το 1820, ο Δανός Φυσικοχημικός Hans-Christian Oersted ανακάλυψε τυχαία την πραγματική σύνδεση μαγνητισμού και ηλεκτρισμού. Έδειξε ότι ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει περιφερειακό πεδίο ικανό να προκαλέσει την απόκλιση μαγνητικής βελόνας. Λίγες εβδομάδες αργότερα, ο Andre-Marie Ampere απέδειξε ότι όταν δύο παράλληλα σύρματα τροφοδοτηθούν με ρεύμα ίδιας κατεύθυνσης, τότε αυτά έλκονται. Τον ίδιο χρόνο, οι Biot και Savart συνέδεσαν με μαθηματικούς τύπους τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου με το ηλεκτρικό ρεύμα. Τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1824, ο Γάλλος μαθηματικός και φυσικός Poisson δημιούργησε και παρουσίασε το πρώτο επιτυχημένο μοντέλο ενός μαγνητικού πεδίου. Το 1825, ο Ampere δημοσίευσε το νόμο Ampere, ο οποίος, όπως και ο νόμος Biot-Savart, περιγράφει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ηλεκτρικό ρεύμα. Το 1831, ο Michael Faraday ανακάλυψε τον ηλεκτρομαγνητισμό. Συγκεκριμένα, βρήκε ότι ηλεκτρισμός θα μπορούσε να παραχθεί από το μαγνητισμό, μέσω της κίνησης ενός μαγνήτη.

Συνέπεια όλων των παραπάνω ήταν η δημιουργία του πρώτου μαγνητομέτρου το 1833. Ο Γερμανός μαθηματικός Gauss, επικεφαλής τότε του Γεωμαγνητικού Παρατηρητηρίου στο Gottingen, δημοσίευσε ένα έγγραφο σχετικά

με τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Συγκεκριμένα, περιέγραφε μία συσκευή η οποία αποτελούνταν από ένα μόνιμο ραβδόμορφο μαγνήτη κρεμασμένο οριζόντια από ίνες χρυσού. Η διαφορά στην ταλάντωση της ράβδου όταν ήταν μαγνητισμένη και όταν ήταν αμαγνήτιστη, επέτρεψε στον Gauss να υπολογίσει μια απόλυτη τιμή για το μαγνητικό πεδίο της Γης.

Συνεχίζοντας, το 1834 ο Emil Lenz διατυπώνει έναν κανόνα που προσδιορίζει την κατεύθυνση των επαγόμενων ρευμάτων. Προέβλεψε, δηλαδή, ότι αν κάποιος προσπαθούσε να ωθήσει έναν αγωγό σε ένα δυνατό μαγνητικό πεδίο, αυτός θα απωθούνταν. Ο Σκωτσέζος μαθηματικός James Clerk Maxwell, όμως, ανάμεσα στο 1861 και στο 1865, ήταν αυτός που θεμελίωσε θεωρητικά τον ηλεκτρομαγνητισμό, δημοσιεύοντας τις εξισώσεις του, οι οποίες εξηγούσαν και ενοποιούσαν όλο τον κλασικό ηλεκτρισμό και μαγνητισμό.

Στα χρόνια που ακολούθησαν, οι έρευνες επικεντρώθηκαν στην εξέλιξη των υλικών και στη δημιουργία μαγνητομέτρων που εκμεταλλεύονταν βασικές αρχές του μαγνητισμού. Οι νεότερες και πιο αξιόλογες συσκευές παρουσιάστηκαν τον 19^ο αιώνα, κάνοντας χρήση του φαινομένου Hall. Ακολούθησαν οι αισθητήρες fluxgate, ενώ όσο περνούσαν τα χρόνια, ακολούθησε η κατασκευή και άλλων αισθητήρων που εκμεταλλεύονταν άλλα μαγνητικά φαινόμενα.

Οι πρώτοι fluxgate αισθητήρες αναπτύχθηκαν από τους Aschenbrenner και Goubau το 1936, ενώ οι πρώτες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου έγιναν από κινούμενο αεροπλάνο το 1939, με πρωτοβουλία ιδιωτικής εταιρίας (Gulf Oil Company). Τα δικαιώματα του εγχειρήματος τα πήρε αμέσως ο Αμερικανικός στρατός και τα περιόρισε αποκλειστικά για στρατιωτική χρήση, κυρίως για τον εντοπισμό υποβρυχίων. Η εμπορική χρήση των μαγνητομέτρων fluxgate ήταν κυρίως για ανακάλυψη μεταλλευμάτων [1], [2].



Σχήμα 2-1 Το πρώτο αερομεταφερόμενο μαγνητόμετρο [www.uh.edu].

2.2 Δημιουργία Μαγνητικού πεδίου

Μία από τις θεμελιώδεις ιδέες του μαγνητισμού είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν σε μία περιοχή του χώρου δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, αυτό σημαίνει ότι στην περιοχή αυτή υπάρχει μία μεταβολή της ενέργειας. Αυτή η ενέργεια έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση δυνάμεων. Οι δυνάμεις που εμφανίζονται ανιχνεύονται με διάφορους τρόπους, όπως π.χ. από την επιτάχυνση

ενός ηλεκτρικού φορτίου που κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, από τη δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό, από τη στρέψη ενός μαγνητικού διπόλου, όπως ο ραβδόμορφος μαγνήτης ή ακόμη και από τον αναπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ηλεκτρονίων σε ορισμένους τύπους ατόμων.

Το μαγνητικό πεδίο είναι πάντα αποτέλεσμα της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων. Μαγνητικό πεδίο, όμως, παράγεται και από ένα μόνιμο μαγνήτη. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχουν συμβατικά ηλεκτρικά ρεύματα, αλλά η τροχιακή και περιστροφική κίνηση των ηλεκτρονίων, τα λεγόμενα ρεύματα Ampere, στο εσωτερικό του μόνιμου μαγνήτη, τα οποία οδηγούν στη μαγνήτιση του υλικού στο εσωτερικό του και στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στον εξωτερικό χώρο. Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις τόσο σε ρευματοφόρους αγωγούς, όσο και σε μόνιμους μαγνήτες.

Η αρχή δημιουργίας μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικό ρεύμα στηρίζεται στο Νόμο των Biot – Savart:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (2.1)$$

ο οποίος μας δίνει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής του πεδίου, συναρτήσει ενός στοιχειώδους σημείου $d\mathbf{l}$ που διαπερνάται από ρεύμα I [1].

2.3 Βασικές έννοιες μαγνητισμού

Για την κατανόηση της αρχής λειτουργίας των βασικότερων μαγνητικών αισθητήρων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια, θα αναφερθούν κάποιες βασικές έννοιες του μαγνητισμού.

Η πιο κοινή μορφή μαγνήτη είναι ο ραβδόμορφος μαγνήτης, στην περιοχή του οποίου η μαγνητική ροή που παράγεται ρέει από τη μία άκρη του έως την άλλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-2. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, για το οποίο πρέπει να οριστεί το μέτρο και η διεύθυνσή του. Τα άκρα του μαγνήτη στα οποία συγκλίνουν οι γραμμές ροής λέγονται πόλοι. Αν αφήσουμε τη ράβδο του μαγνήτη ελεύθερη, τότε θα ευθυγραμμιστεί με τη ροή του μαγνητικού πεδίου της Γης. Ο πόλος του μαγνήτη που έχει διεύθυνση προς το Βορρά ορίζεται ως θετικός πόλος και ο άλλος πόλος του μαγνήτη ορίζεται ως αρνητικός πόλος.

Η δύναμη μεταξύ δύο μαγνητικών πόλων, με μαγνητική ποσότητα m_1 και m_2 που απέχουν απόσταση r , δίνεται από τη σχέση:

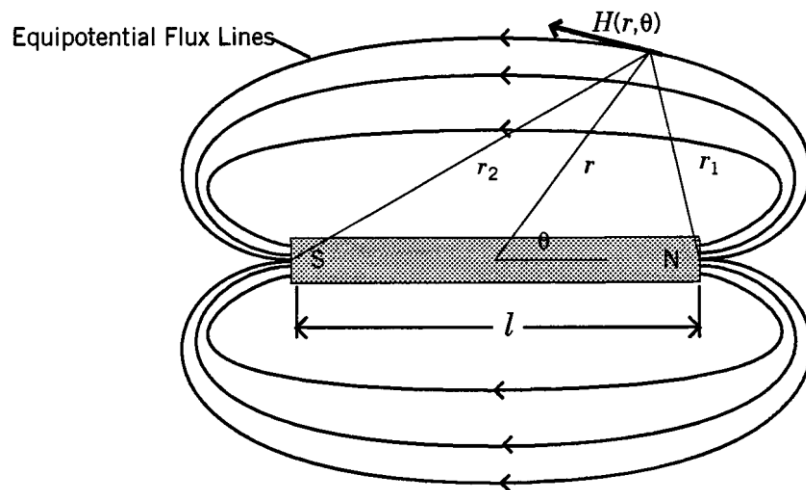
$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (2.2)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) που εξαρτάται από το υλικό που υπάρχει μεταξύ των δύο ποσοτήτων μαγνητισμού. Η μονάδα μέτρησης της δύναμης F είναι το Weber (Wb).

Η ύπαρξη μαγνητικής δύναμης F συνεπάγεται την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου έντασης H . Η τιμή αυτής της έντασης σε ένα σημείο που απέχει απόσταση r από έναν πόλο μαγνητικής ποσότητας m , ορίζεται ως η δύναμη που ασκήθηκε σε μοναδιαίο θετικό πόλο στο σημείο αυτό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$H = \frac{F}{m} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m}{r^2} \quad (2.3)$$

Η ένταση H ενός μαγνητικού πεδίου μετριέται σε A/m και δηλώνει το ποσό που χρειάζεται για να δημιουργηθεί το πεδίο.



Σχήμα 2-2 Μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη [4].

Σε αναλογία με το ηλεκτρικό πεδίο, έτσι και στο μαγνητικό, δημιουργείται μαγνητική ροή, της οποίας οι γραμμές ξεκινούν από το θετικό πόλο (Βόρειος) και καταλήγουν στον αρνητικό πόλο (Νότιος). Η μαγνητική ροή Φ αναφέρεται στον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που διαπερνούν μία περιοχή εμβαδού S και αντιστοιχεί στη δύναμη των μαγνητικών πόλων που δημιουργούν το πεδίο. Η τιμή της προκύπτει από τη σχέση:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.4)$$

όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική ροή μετριέται επίσης σε Weber (Wb).

Αφού οι μαγνητικοί πόλοι υπάρχουν πάντα σε ζεύγη, σε ένα μαγνητικό δίπολο υπάρχουν δύο πόλοι μαγνητικών ποσοτήτων $+m$ και $-m$ που απέχουν

μεταξύ τους απόσταση l . Τότε, η μαγνητική ροπή διπόλου (magnetic moment) \mathbf{M} , ορίζεται ως:

$$\mathbf{M} = m \cdot \mathbf{l} \quad (2.5)$$

και είναι διανυσματικό μέγεθος με διεύθυνση από τον αρνητικό προς το θετικό πόλο.

Ένα μαγνητικό σώμα παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου γίνεται μαγνητισμένο εξ επαγωγής. Η ένταση της μαγνήτισης (intensity of magnetization) I , είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου και έχει διεύθυνση αυτή του πεδίου. Ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου και έχει μονάδες το Wb/m^2 :

$$I = \frac{\mathbf{M}}{V} \quad (2.6)$$

Ο βαθμός που ένα σώμα μαγνητίζεται, εξαρτάται από τη μαγνητική επιδεκτικότητα (susceptibility) k , που ορίζεται ως:

$$k = \frac{J}{H} \quad (2.7)$$

όπου J είναι η μαγνήτιση του όγκου του σώματος.

Ένα μαγνητικό σώμα που έχει τοποθετηθεί σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης \mathbf{H} , έχει τους πόλους του ευθυγραμμισμένους με το πεδίο και παράγει ένα δικό του πεδίο \mathbf{H}' που αυξάνει το ολικό πεδίο μέσα στο σώμα. Η μαγνητική επαγωγή (magnetic induction) \mathbf{B} , είναι το ολικό πεδίο μέσα στο σώμα:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{H}' = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{J} \Rightarrow \mathbf{B} = (1 + 4\pi k)\mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.8)$$

όπου $\mu = 1 + 4\pi k$.

Στο απόλυτο κενό, η μαγνητική επαγωγή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογες, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} \quad (2.9)$$

Μονάδα της μαγνητικής επαγωγής είναι για το σύστημα SI το Tesla (T), ενώ για το σύστημα CGS το Gauss (G) (10^4 Gauss = 1 Tesla).

Η μαγνητική επιδεκτικότητα k είναι το μέτρο ευκολίας μαγνήτισης ενός σώματος.

- Για $k > 0$ έχουμε παραμαγνητικά υλικά, τα δίπολα των οποίων ευθυγραμμίζονται με ένα ομογενές πεδίο.
- Για $k < 0$ έχουμε διαμαγνητικά υλικά, τα δίπολα των οποίων είναι κάθετα με ένα ομογενές πεδίο.

- Για $k \gg 0$, δηλαδή για μεγάλες τιμές του k , έχουμε τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Τα δίπολα είναι παράλληλα στο πεδίο, έχοντας, όμως, πολύ υψηλή μαγνήτιση που δύναται να υφίσταται και με την απουσία του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τέτοια υλικά είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το νικέλιο.

Η δύναμη της μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και εξαφανίζεται στη θερμοκρασία Curie¹. Επάνω από αυτήν τη θερμοκρασία, οι αποστάσεις των ατόμων μεγαλώνουν τόσο, ώστε να αποκλείουν τη σύνδεση, οπότε τα υλικά συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά.

Όταν ένα υλικό βρίσκεται σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο, κάποιες περιοχές του παρουσιάζουν μόνιμη μαγνήτιση, ακόμη και όταν το πεδίο παύει να υφίσταται. Σε πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία, όλο το υλικό παρουσιάζει πλέον κορεσμένη μόνιμη μαγνήτιση [1], [3], [4].

2.4 Η υφιστάμενη κατάσταση των αισθητήρων πεδίου

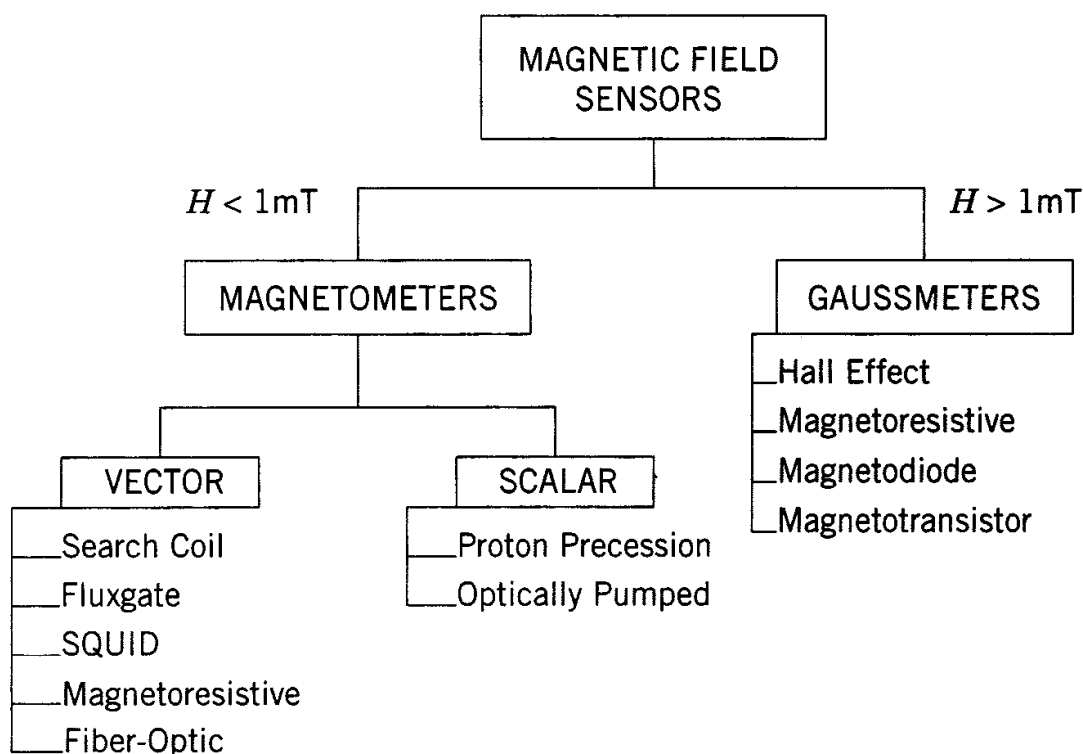
Η μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου είναι ένα φυσικό μέγεθος που χρησιμοποιείται σε ποικίλες τεχνολογίες. Κάθε τεχνική μέτρησης έχει και έναν καθορισμένο τρόπο (μοναδική ιδιότητα) που την καθιστά κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές. Αυτές οι εφαρμογές μπορεί να απαιτούν από μία απλή διαπίστωση ύπαρξης ή μεταβολής μαγνητικού πεδίου, έως και τον ακριβή προσδιορισμό του μεγέθους του.

Οι αισθητήρες για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σε αυτούς που μετρούν μεγάλα μαγνητικά πεδία (μεγαλύτερα του 1 mT) και ονομάζονται μετρητές Gauss (gaussmeters) και στους αισθητήρες για μικρά μαγνητικά πεδία (μικρότερα του 1 mT) που ονομάζονται μαγνητόμετρα (magnetometers). Από αυτούς, τα μαγνητόμετρα χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: Σε αυτούς που μπορούν να διακρίνουν τις διανυσματικές συνιστώσες του πεδίου και σε αυτούς που μετρούν μόνο βαθμωτά μεγέθη. Στο σχήμα 2-3 φαίνονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό [4].

Μεταξύ όλων των αισθητήρων μέτρησης μαγνητικού πεδίου, οι αισθητήρες SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) είναι οι πιο ευαίσθητοι, επιτυγχάνοντας ευκρίνεια ανάλυσης, δηλαδή ελάχιστο ανιχνεύσιμο μαγνητικό πεδίο, ακόμη και της τάξης των μερικών aT. Έχουν κατανάλωση μερικών Watt και η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στα φαινόμενα Meissner και Josephson στις περιπτώσεις υπεραγώγιμων υλικών. Αυτού του είδους οι αισθητήρες

¹ Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, όταν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία μετάβασης από τη σιδηρομαγνητική στην παραμαγνητική συμπεριφορά ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Πάνω από τη θερμοκρασία αυτή, η διαπερατότητα του υλικού μειώνεται απότομα, ενώ το συνεκτικό πεδίο και η παραμένουσα μαγνήτιση μηδενίζονται.

χρησιμοποιούνται κυρίως στο νευρομαγνητισμό, στο μαγνητικό τομογράφο και σε εφαρμογές στη Γεωλογία. Δυστυχώς, η εμπορική τους χρήση είναι ακόμα περιορισμένη, λόγω του υψηλού τους κόστους, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις υπερκαλύπτει τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με άλλους μαγνητικούς αισθητήρες. Επιπλέον, οι αισθητήρες SQUID λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (κοντά στο απόλυτο μηδέν) και έχουν υψηλή ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, με αποτέλεσμα να απαιτούν ειδικές υποδομές (ειδικά συστήματα ψύξης με υγρό ήλιο, ηλεκτρομαγνητική θωράκιση κ.α.), γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές τους.



Σχήμα 2-3 Κατάταξη μαγνητικών αισθητήρων [4].

Από την άλλη πλευρά, οι αισθητήρες που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Hall, είναι οι πιο παλιοί και οι περισσότερο χρησιμοποιούμενοι για τη μέτρηση υψηλών μαγνητικών πεδίων. Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και χρησιμοποιούνται ευρέως σαν αισθητήρες θέσης (μέτρηση γραμμικής θέσης, γωνιακής θέσης, ταχύτητας, ταχύτητα περιστροφής) και δύναμης, καθώς επίσης και σε μαγνητικούς διακόπτες. Γενικά, η ευαισθησία τους κυμαίνεται από 1 έως 100 mT και έχουν κατανάλωση μεταξύ των 100 και 200 mW. Οι αισθητήρες Hall μπορούν να μετρήσουν είτε σταθερά, είτε μεταβλητά μαγνητικά πεδία και λειτουργούν ικανοποιητικά σε θερμοκρασίες από -100°C έως $+100^{\circ}\text{C}$.

Τα μαγνητόμετρα εντοπισμού επαγωγικής τάσης (search coils) βασίζονται στο νόμο επαγωγής του Faraday και μπορούν να μετρήσουν μόνο μεταβλητά

μαγνητικά πεδία. Γενικά, η ευαισθησία τους είναι πάνω από 20 fT, με δυνατότητα αύξησής της χρησιμοποιώντας φερρομαγνητικό πυρήνα με υψηλή διαπερατότητα εντός του πηνίου. Συνηθισμένα μεγέθη πηνίου είναι από 0,05 έως και 1,3 μέτρα και έχουν κατανάλωση ισχύος που κυμαίνεται από 1 έως 10 mW. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν ενεργό φάσμα συχνοτήτων από 1 Hz έως 1 MHz και έχουν χρήση στη Γεωφυσική για τη μέτρηση μικροπαλμών στο μαγνητικό πεδίο της Γης, στη ναυσιπλοΐα και στις επικοινωνίες (υποβρύχια, τρένα), σε συσκευές ελέγχου κυκλοφορίας κ.α.

Οι αισθητήρες fluxgate μετρούν στατικά ή χαμηλών συχνοτήτων μαγνητικά πεδία από 10^{-2} έως 10^7 nT με ευκρίνεια ανάλυσης 100 pT. Είναι οι πιο διαδεδομένοι μαγνητικοί αισθητήρες σε συστήματα πλοήγησης με πυξίδα, αλλά επίσης χρησιμοποιούνται και στον εντοπισμό υποβρυχίων, στη Γεωφυσική, σε μαγνητική χαρτογράφηση πεδίων και στη μέτρηση ηλεκτρικού ρεύματος. Στα αρνητικά τους συγκαταλέγονται η σύνθετη κατασκευή του μαγνητικού πυρήνα και του πηνίου, η μεγάλη μάζα τους, καθώς και η υψηλή κατανάλωση. Στην περίπτωση μείωσης του μεγέθους και της κατανάλωσής τους, μειώνεται αυτόματα η ευαισθησία και η σταθερότητά τους. Η απόκριση συχνότητας του αισθητήρα περιορίζεται από το πεδίο διέγερσης και το χρόνο απόκρισης του φερρομαγνητικού υλικού του πυρήνα. Μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι τα 100 kHz, το μέγεθός τους είναι μερικά χιλιοστά και έχουν κατανάλωση περίπου 100 mW.

Οι αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) μπορούν να επιτύχουν ευαισθησία από 10^{-1} έως 10^7 nT και μια τυπική ανάλυση της τάξης των 10 nT. Το μέγεθός τους είναι μερικών χιλιοστών και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μεταβολή της ωμικής αντίστασης ενός υλικού, συναρτήσει της διεύθυνσης και της έντασης του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου. Η λειτουργία τους οφείλεται στο φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης που εξηγείται από την αλλαγή της σκέδασης των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από ένα μαγνητικό δίπολο. Η αλλαγή αυτή σχετίζεται με τον προσανατολισμό του διανύσματος της μαγνήτισης του δίπολου και υπακούει στο νόμο του Lorentz. Οι αισθητήρες AMR έχουν μικρή αντοχή σε μηχανικές τάσεις και κατανάλωση μερικών mW. Έχουν χρήση σε πολλές εφαρμογές, όπως στην καταμέτρηση της κυκλοφορίας, ως αισθητήρες πεδίου, ως ηλεκτρονικές πυξίδες και στο σύστημα ABS των αυτοκινήτων. Αυτοί οι αισθητήρες φθάνουν στον κορεσμό με μικρά μαγνητικά πεδία (μερικά mT) και έχουν χαμηλή επαναληψιμότητα. Επίσης, η ευαισθησία τους μειώνεται όταν μειώνεται και η κατανάλωσή τους. Μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες άνω των $+200^{\circ}\text{C}$, αλλά η εμπορική τους χρήση περιορίζεται μέχρι τους $+150^{\circ}\text{C}$.

Τα μαγνητόμετρα γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) βασίζονται στο ίδιο φαινόμενο, με τη διαφορά ότι έχουν μεγάλες μεταβολές στην ηλεκτρική τους αντίσταση, όταν τα λεπτά στρώματα των φερρομαγνητικών και των μη μαγνητικών

υλικών βρίσκονται σε μαγνητικό πεδίο. Γενικά, εντοπίζουν πεδία από 10 έως 10^8 nT και έχουν μέγεθος όχι μικρότερο του 1 mm. Οι αισθητήρες GMR λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των $+225^{\circ}\text{C}$, παρόλο που η ευαισθησία τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία, σε αντίθεση με τους αισθητήρες AMR. Επίσης, τα μεγάλα μαγνητικά πεδία (κοντά στο 1 T) μπορεί να τους καταστρέψουν. Τα μαγνητόμετρα GMR χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές προσδιορισμού του διανύσματος μαγνητικού πεδίου, σε τεχνικές ανάγνωσης πληροφορίας σε σκληρούς δίσκους, σε προσδιορισμό θέσης αξόνων και ταχύτητας οχημάτων και τέλος, σε αθόρυβους μηχανισμούς κλειδώματος.

Τα μαγνητόμετρα οπτικών ινών (fiber optic) εκμεταλλεύονται το φαινόμενο μαγνητοσυστολής για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, σύμφωνα με το οποίο οι διαστάσεις του μαγνητοσυστολικού υλικού μεταβάλλονται όταν αυτό τοποθετείται εντός μαγνητικού πεδίου. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν εύρος μέτρησης από 10^{-2} έως 10^6 nT και είναι απρόσβλητοι από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Το πρόβλημα αυτών των μαγνητομέτρων είναι η ενσωμάτωση υλικών μεγάλης μαγνητοσυστολής μέσα στην οπτική ίνα. Επιπλέον, η θερμοκρασία και οι μεταβολές στην πίεση επηρεάζουν τη λειτουργία τους.

Ο αισθητήρας μετάπτωσης πρωτονίου (proton precession magnetometer) είναι ο πιο δημοφιλής αισθητήρας για τη μέτρηση της απόλυτης τιμής ενός μαγνητικού πεδίου. Οι κυριότερες εφαρμογές του είναι οι γεωλογικές εξερευνήσεις και η χαρτογράφηση του γεωμαγνητικού πεδίου. Εφόσον η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στις βασικές αρχές των ατόμων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διακρίβωση μαγνητομέτρων. Τα μαγνητόμετρα proton precession έχουν πολύ μικρό ρυθμό δειγματοληψίας, της τάξης του 1 έως 3 δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο, γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για μετρήσεις γρήγορων αλλαγών ενός μαγνητικού πεδίου. Τέλος, το μαγνητόμετρο οπτικής απορρόφησης (optically pumped magnetometer) έχει μεγαλύτερο αριθμό δειγματοληψίας και μεγαλύτερη ευαισθησία απ' ό,τι το proton precession, αλλά είναι πιο ακριβό και όχι τόσο ανθεκτικό και αξιόπιστο.

Πρόσφατα αναπτύχθηκε και η τεχνολογία μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS), προσφέροντας πολλά πλεονεκτήματα, όπως το μικρό μέγεθος, μικρό βάρος, χαμηλή κατανάλωση και καλύτερη ευαισθησία και ευκρίνεια. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν δομές συντονισμού, οι οποίες εκμεταλλεύονται την αρχή της δύναμης Lorentz για τον εντοπισμό μαγνητικού πεδίου. Γενικά, μετρούν τη μετατόπιση των δομών αυτών που είναι εκτεθειμένες σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μέσω της χωρητικότητας, της πιεζοαντίστασης και τεχνικών οπτικής ανίχνευσης [4], [5], [6].

Στον παρακάτω πίνακα, στην πρώτη στήλη φαίνονται συγκεντρωτικά οι βασικότεροι μαγνητικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, στη δεύτερη το εύρος

μέτρησής τους, στην τρίτη η ανάλυσή τους και στην τέταρτη το εύρος μετρήσεών τους.

Instrument	Range (mT)	Resolution (nT)	Bandwidth (Hz)	Comment
Induction coil	10^{-10} to 10^6	Variable	10^{-1} to 10^6	Cannot measure static fields
Fluxgate	10^{-4} to 0.5	0.1	dc to 2×10^3	General-purpose vector magnetometer
SQUID	10^{-9} to 0.1	10^{-4}	dc to 5	Highest sensitivity magnetometer
Hall effect	0.1 to 3×10^4	100	dc to 10^8	Best for fields above 1T
Magnetoresistance	10^{-3} to 5	10	dc to 10^7	Good for mid-range applications
Proton precession	0.02 to 0.1	0.05	dc to 2	General-purpose scalar magnetometer
Optically pumped	0.01 to 0.1	0.005	dc to 5	Highest resolution scalar magnetometer

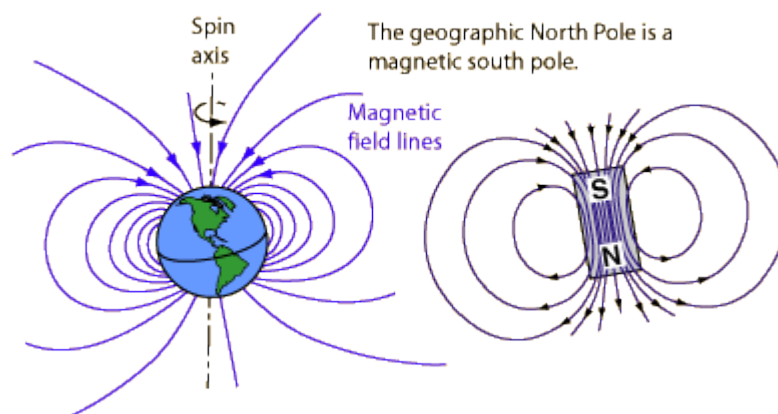
Πίνακας 2—1 Χαρακτηριστικά μαγνητικών αισθητήρων [4].

3 Μετρήσεις μαγνητικών πεδίων

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε συνοπτικά στις κυριότερες μεθόδους μέτρησης της έντασης μαγνητικών πεδίων, της μαγνητικής επαγωγής και της μαγνήτισης. Θα δούμε τους σημαντικότερους τύπους αισθητήριων διατάξεων, καθώς και τις εφαρμογές αυτών.

3.1 Φυσικά και τεχνητά μαγνητικά πεδία

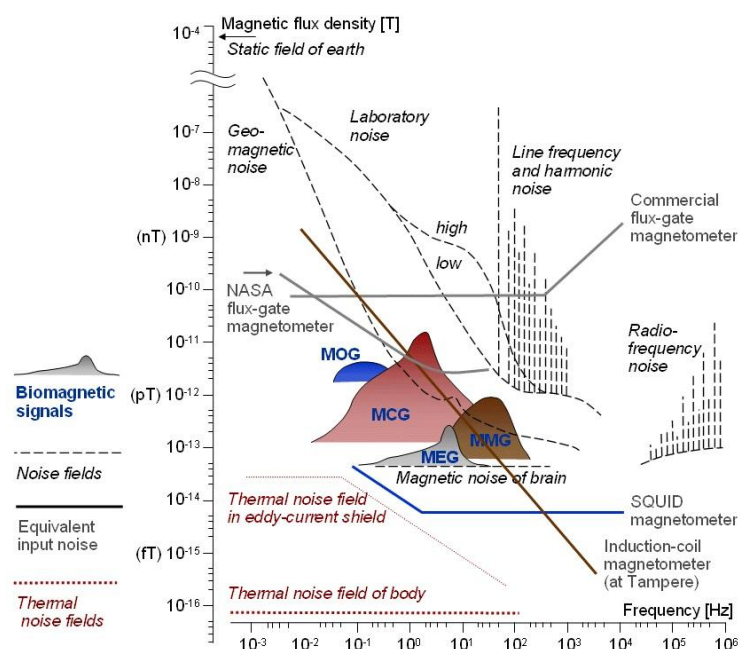
Ο πιο γνωστός και διαδεδομένος φυσικός μαγνήτης δεν είναι άλλος από τη Γη. Το μαγνητικό της πεδίο είναι ένα αυτοδιατηρούμενο μαγνητικό πεδίο που μοιάζει με ένα μαγνητικό δίπολο, με το ένα άκρο του κοντά στο γεωγραφικό Βόρειο Πόλο της Γης και το άλλο κοντά στο γεωγραφικό Νότιο Πόλο. Οι δυναμικές γραμμές του διαγράφουν στο χώρο τεράστιες καμπύλες και καταλήγουν στους γήινους μαγνητικούς πόλους. Το δυναμικό αυτό πεδίο λέγεται γήινο μαγνητικό πεδίο και η γωνία ανάμεσα στο γεωγραφικό και το μαγνητικό άξονα της Γης ονομάζεται μαγνητική απόκλιση. Το γήινο μαγνητικό πεδίο οφείλεται στην κυκλοφορία ηλεκτρικών ρευμάτων στον υγρό εξωτερικό πυρήνα της Γης. Στο σχήμα 3-1 φαίνεται η σχηματική απεικόνιση των γραμμών του γήινου μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 3-1 Το μαγνητικό πεδίο της Γης
[www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu].

Η ισχύς αυτού του μαγνητικού πεδίου ποικίλλει στην επιφάνεια ολόκληρης τη Γης και κυμαίνεται από 0.3 Gauss στη Νότια Αμερική έως 0.6 Gauss στο Βόρειο Καναδά. Ο δε ισημερινός της Γης, αντίθετα, συνιστά την ουδέτερη μαγνητική ζώνη με τη μικρότερη ένταση μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι δυναμικό μέγεθος και μεταβάλλεται με το χρόνο από μερικά δευτερόλεπτα, έως και σε βάθος εκατομμυρίων χρόνων. Οι σύντομες χρονικά μεταβολές γίνονται εξαιτίας των ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Ο μέσος όρος του πεδίου σε διάστημα

ενός χρόνου είναι περίπου ίσος με το μηδέν (<1 nT), αλλά κατά τη διάρκεια μίας ημέρας μπορεί να έχει αξιοσημείωτες μεταβολές. Αυτό το φαινόμενο εντοπίστηκε πρώτη φορά το 1825 σε ταυτόχρονες μετρήσεις που έγιναν στο Παρίσι και στο Καζάν, πόλεις που απέχουν περίπου 4000 km. Από αυτή την παρατήρηση εμπνεύστηκε ο Gauss και δημιούργησε ένα δίκτυο δεδομένων από πενήντα μαγνητικά παρατηρητήρια σε διαφορετικές πόλεις. Από αυτά, μετρούσε το μέγεθος και την κατεύθυνση του πεδίου της Γης, ελπίζοντας ότι με τα στοιχεία που θα συγκέντρωνε θα κατάφερνε να προσδιορίσει την προέλευσή του. Το μεγαλύτερο κέρδος από αυτές τις μετρήσεις ήταν η διαπίστωση ότι το πεδίο της Γης κυμαίνεται από 30 έως 60 μT σε διαφορετικά γεωγραφικά μήκη και πλάτη, με το μέσο όρο αυτών να ανέρχεται στα 40 μT . Έπειτα, το 1831, ακολούθησε η ανακάλυψη του μαγνητικού Βορρά, ενώ το 1852 ο Edward Sabine παρατήρησε ότι η ένταση της διακύμανσης του μαγνητικού πεδίου ακολουθούσε τον 11-χρόνων ηλιακό κύκλο. Στις μέρες μας, το Διεθνές Δίκτυο Μαγνητικών Παρατηρητηρίων (International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET)), που λειτουργεί εδώ και 200 χρόνια έχοντας 108 παρατηρητήρια σε πέντε ηπείρους, καταγράφει το μαγνητικό πεδίο της Γης, κάνοντας χρήση αισθητήρων fluxgate και μαγνητομέτρων πρωτονίου [1].



Σχήμα 3-2 Μαγνητικά πεδία παραγόμενα από διάφορες πηγές² [7].

² α) Βιομαγνητικά σήματα: MCG=μαγνητοκαρδιογράφημα, MMG=μαγνητομυογράφημα, MEG=μαγνητοεγκεφαλογράφημα, MOG=μαγνητοοφθαλμογράφημα.

β) Πεδία θορύβου: στατικό μαγνητικό πεδίο της Γης, γεωμαγνητικές διακυμάνσεις, θόρυβος εργαστηρίου, θόρυβος ραδιοσυχνοτήτων.

γ) Θερμικοί μαγνητικοί θόρυβοι: θωράκιση διανορρευσμάτων, ανθρώπινο σώμα.

Δεύτερη σημαντική κατηγορία φυσικών μαγνητικών πεδίων αποτελούν τα βιομαγνητικά πεδία, τα οποία προέρχονται από την καρδιακή και εγκεφαλική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού. Η ύπαρξη των ασθενών αυτών πεδίων αποτελεί τη βάση για ένα μεγάλο αριθμό διαγνωστικών μεθόδων, όπως το ηλεκτροκαρδιογράφημα. Η μέτρησή τους γίνεται με αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας, όπως fluxgate και SQUIDs. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-2, η ένταση τέτοιων πεδίων κυμαίνεται στην περιοχή των picoTesla.

Όσον αφορά τα τεχνητά μαγνητικά πεδία, αυτά κυρίως απαντώνται σε περιοχές κοντά σε μετασχηματιστές και ηλεκτρικούς κινητήρες. Επίσης, ισχυρά μαγνητικά πεδία προκαλούνται από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, καθώς και από ηλεκτροδοτούμενες γραμμές τρένων, τραμ κ.λπ. Τέλος, στατικά τεχνητά πεδία προκαλούνται από μόνιμους μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες. Η επίδραση των πεδίων αυτών, με τη μορφή παρεμβολών σε άλλες διατάξεις, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με χρήση κατάλληλης γεωμετρίας στη σχεδίαση των μαγνητικών πυρήνων και κυκλωμάτων.

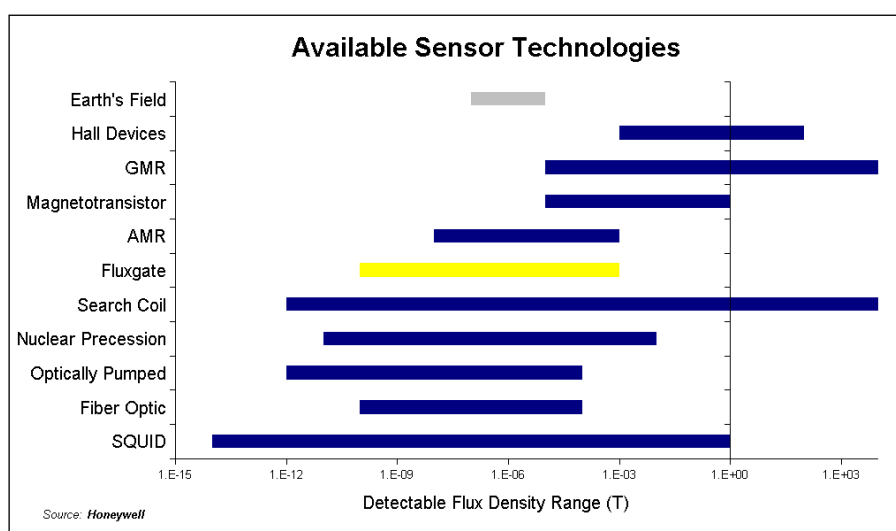
3.2 Αισθητήρες μέτρησης μαγνητικών πεδίων

Η διαφορά των μαγνητικών αισθητήρων με τα υπόλοιπα είδη αισθητήρων είναι ότι δεν έχουν άμεση επαφή με το μετρούμενο μέγεθος. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται για την έμμεση μέτρηση του μεγέθους που μας ενδιαφέρει. Οι μαγνητικοί αισθητήρες αντλαμβάνονται μεταβολές ή διακυμάνσεις σε μαγνητικά πεδία, από τις οποίες υπολογίζουν την κατεύθυνση, την περιστροφή ή τη γωνία της πηγής διατάραξης, σε σχέση με τον άξονα ευαισθησίας τους.

Η γενική αρχή των αισθητήρων πεδίου είναι η εκμετάλλευση ενός μαγνητικού φαινομένου για τη μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου. Οι χρήσεις τους είναι πάρα πολλές και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά επιστημονικά πεδία. Όπως, για παράδειγμα, στις μαγνητικές κεφαλές στους σκληρούς δίσκους και στις δισκέτες ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επίσης, στις μαγνητικές συσκευές των φωτοαντιγραφικών μηχανημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν μελάνι που αποδίδει μαγνητικές ιδιότητες στο χαρτί. Ένα άλλο πεδίο χρήσης τους είναι η πλοήγηση πλοίων και αεροσκαφών, με σκοπό την αύξηση της ασφάλειάς τους ως μέσα μεταφοράς. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών, με σκοπό την ορθή λειτουργία συσκευών και διατάξεων και απώτερο αποτέλεσμα την υψηλή παραγωγικότητα, εξαιτίας της υψηλής διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας των συσκευών. Η λειτουργία των περισσοτέρων μαγνητικών αισθητήρων βασίζεται στη στενή σχέση μεταξύ των μαγνητικών και ηλεκτρικών φαινομένων. Στο σχήμα 3-3 φαίνεται η κατάταξη των αισθητήρων με βάση το εύρος μέτρησής τους. Με γκρι χρώμα ξεχωρίζει το μαγνητικό πεδίο της Γης και με κίτρινο η περιοχή μέτρησης των αισθητήρων fluxgate. Στα παρακάτω κεφάλαια περιγράφεται συνοπτικά η αρχή

λειτουργίας των έντεκα πιο διαδεδομένων μαγνητικών αισθητήρων. Περισσότερη έμφαση δίνεται στους αισθητήρες fluxgate, λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις της παρούσης εργασίας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το σήμα εξόδου των αισθητήρων μέτρησης μαγνητικού πεδίου απαιτεί επεξεργασία για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Το γεγονός αυτό καθιστά δυσκολότερη τη χρήση τους, όμως τα παραγόμενα δεδομένα είναι ακριβή και αξιόπιστα, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη φυσικής επαφής με το μετρούμενο αντικείμενο.

Στη συνέχεια, ακολουθεί σύντομη περιγραφή των μαγνητικών αισθητήρων, ανάλογα με την τιμή της έντασης του πεδίου που μπορούν να μετρήσουν.



Σχήμα 3-3 Μαγνητικοί αισθητήρες και περιοχή ανιχνεύσιμης πυκνότητας ροής [www.honeywell.com].

3.3 Μαγνητικοί αισθητήρες χαμηλού πεδίου

Οι αισθητήρες αυτοί είναι συνήθως ογκώδεις και ακριβοί σε σύγκριση με τους αισθητήρες των άλλων κατηγοριών. Κατά τη χρήση τους, πρέπει να συνυπολογίζεται η επιρροή του γήινου μαγνητικού πεδίου, το οποίο με τις καθημερινές του διακυμάνσεις είναι πιθανό να οδηγήσει τον αισθητήρα εκτός του δυνατού εύρους μετρήσεων.

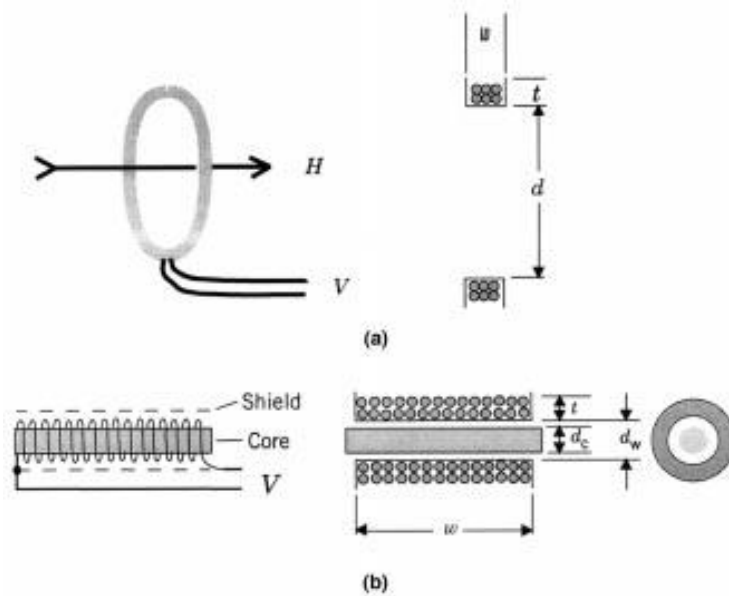
3.3.1 Πηνίο εντοπισμού επαγωγικής τάσης (Search Coil magnetometer)

Τα μαγνητόμετρα εντοπισμού επαγωγικής τάσης με πηνίο (search coil) συγκαταλέγονται στους πιο απλούς μαγνητικούς αισθητήρες και η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο νόμο του Faraday για την επαγωγή. Σύμφωνα με αυτόν, αν η μαγνητική ροή Φ διαμέσου ενός σπειροειδούς αγωγού αλλάζει, ένα ρεύμα προκαλείται στη σπείρα και εμφανίζεται μία τάση ανάλογη του μεγέθους της αλλαγής της ροής ανάμεσα στον αγωγό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

Η ροή ανάμεσα στις σπείρες θα αλλάξει αν η σπείρα βρίσκεται σε μεταβαλλόμενο με το χρόνο μαγνητικό πεδίο ή αν η σπείρα κινείται μέσα σε ένα ανομοιογενές πεδίο. Τυπικά μία ράβδος από φερρομαγνητικό υλικό με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα εισάγεται μέσα στη σπείρα για να συγκεντρώσει το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο και να αυξήσει τη ροή.

Οι δύο πιο συνηθισμένες διατάξεις επαγωγικών μαγνητομέτρων είναι ο ραβδόμορφος αισθητήρας (rod antenna) και ο αισθητήρας βρόχου με πυρήνα αέρα (air core loop antenna), όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3-4 Διατάξεις μαγνητόμετρου εντοπισμού επαγωγικής τάσης
α) air core loop antenna β) rod antenna [4].

Στην πρώτη περίπτωση, τα μαγνητόμετρα είναι σταθερά και γραμμικά, αλλά έχουν περιορισμένη ευαισθησία. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η ευαισθησία τους είναι μεγαλύτερη, αλλά είναι λιγότερο σταθερά.

Η αρχή λειτουργίας όλων των τύπων των search coils είναι η ίδια. Η ευαισθησία του μαγνητομέτρου εξαρτάται από τη διαπερατότητα του υλικού στον πυρήνα, τις γεωμετρικές διαστάσεις (επιφάνεια σπείρας, αριθμός σπειρών) και το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής διαμέσου του πηνίου. Η συχνότητα που ανταποκρίνεται στον αισθητήρα περιορίζεται από την ακτίνα του πηνίου, η αντίσταση του οποίου καθορίζει το χρόνο που χρειάζεται το επαγόμενο ρεύμα ώστε να διαχυθεί, όταν το εξωτερικό πεδίο απομακρύνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η επαγωγή, τόσο πιο αργά διαχέεται το ρεύμα και όσο μικρότερη είναι η αντίσταση, τόσο γρηγορότερα αυτό διαχέεται. Στην πράξη, η τάση που δίνουν τα ηλεκτρονικά

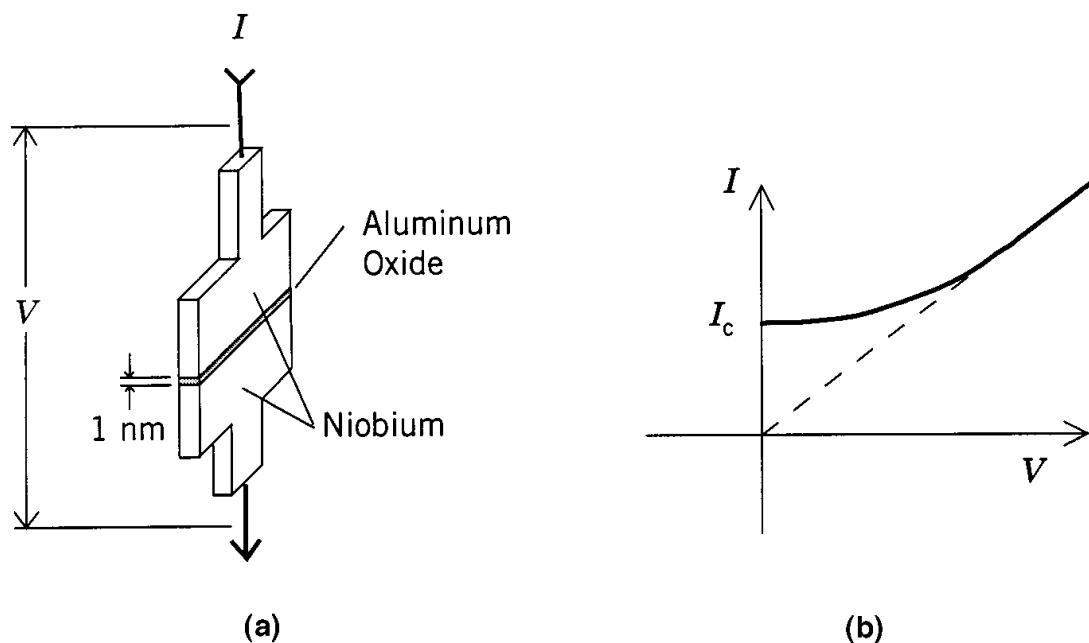
μπορεί να περιορίζει την ευαισθησία και την απόκριση της συχνότητας του αισθητήρα. Αισθητήρες αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύσουν πεδία ασθενή της τάξης των 10^{-12} T, ενώ δεν υπάρχει άνω όριο στην κλίμακα ευαισθησίας τους. Η συνήθης συχνότητά τους είναι από 1Hz έως 1MHz και οι διαστάσεις τους μπορεί να είναι από 2 in έως 50 in. Για τη μέτρηση της εξόδου ενός search coil μαγνητομέτρου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας ενισχυτής ρεύματος ή τάσης. Το σήμα εξόδου του ενισχυτή τάσης είναι ανάλογο με το μέγεθος και τη συχνότητα του πεδίου.

Τα πηνία εντοπισμού επαγωγικής τάσης λειτουργούν μόνο όταν τοποθετηθούν σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο ή κατά την κίνησή τους σε ένα πεδίο σταθερής έντασης. Λόγω του γεγονότος αυτού, δεν είναι σε θέση να αντληφθούν στατικά ή αργά μεταβαλλόμενα πεδία. Βασικές εφαρμογές τους είναι: στη Γεωφυσική για τη μέτρηση μικροπαλμών του μαγνητικού πεδίου της Γης (συχνότητα 1 mHz – 1 Hz), στις διαστημικές εφαρμογές, στη ναυσιπλοΐα, σε συστήματα επικοινωνίας (υποβρύχια, τρένα κ.α.) και σε συσκευές ελέγχου κυκλοφορίας. Τέλος, μια από τις κυριότερες χρήσεις τους είναι η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου στις γραμμές μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος (συχνότητα 50 ή 60 Hz) και στις οικιακές συσκευές [4].

3.3.2 Μαγνητόμετρα SQUID

Τα μαγνητόμετρα SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) βασίζονται σε ένα φαινόμενο που παρατηρείται όταν δυο υπεραγώγιμα υλικά που χωρίζονται μεταξύ τους με μια πολύ λεπτή επιφάνεια, διαπερνώνται από ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό έχει άμεση σχέση με το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει στους δύο υπεραγωγούς. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρήθηκε πρώτα το 1962 από τον Brian D. Josephson και γι' αυτό η παραπάνω διάταξη ονομάστηκε "Josephson junction". Στο σχήμα 3-5 φαίνεται η γενική δομή της ανωτέρω διάταξης και η σχέση τάσης – ρεύματος (V-I).

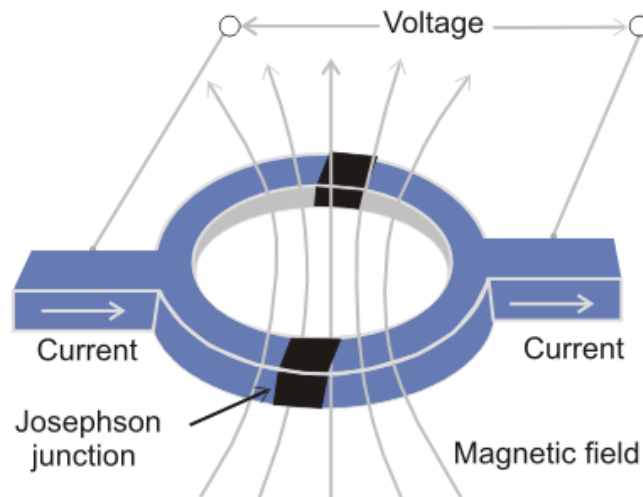
Οι δύο υπεραγωγοί, συνήθως φτιαγμένοι από νιόβιο, είναι χωρισμένοι από πολύ λεπτό μονωτικό υλικό (οξειδίο του αλουμινίου). Το πάχος αυτού του μονωτικού στρώματος είναι συνήθως 1 nm. Όταν η θερμοκρασία στην παραπάνω διάταξη γίνει χαμηλότερη από τους -269° C ($4,2^{\circ}$ K), ηλεκτρικό ρεύμα θα διαρρέψει τους δύο υπεραγωγούς, ακόμα και με 0 V διαφορά δυναμικού στα άκρα τους. Το ρεύμα αυτό λέγεται κρίσιμο ρεύμα (I_c) και είναι μια περιοδική συνάρτηση της μαγνητικής ροής στους δύο υπεραγωγούς.



Σχήμα 3-5 α) Διάταξη Josephson junction β) Σχέση τάσης (V) – ρεύματος (I) [4].

Τα μαγνητόμετρα SQUID είναι τα πιο ευαίσθητα μαγνητόμετρα για τη μέτρηση μαγνητικού πεδίου. Μετρούν τη μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου σε σχέση με κάποιο αυθαίρετα ορισμένο πεδίο και όχι την απόλυτη τιμή του. Απαιτούν ψύξη στη θερμοκρασία του ηλίου υγρής φάσης (4°K), γίνεται, όμως, έρευνα για την ανάπτυξη συσκευών που θα λειτουργούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η διακριτική ικανότητά τους είναι της τάξης των μερικών fT, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για βιοϊατρικές εφαρμογές, αφού για παράδειγμα το νευρομαγνητικό πεδίο του ανθρώπινου εγκεφάλου έχει ένταση της τάξεως των μερικών fT. Άλλη χρήση τους είναι για τη μέτρηση απομείναντος μαγνητισμού σε πετρώματα.

Τα μαγνητόμετρα SQUID χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα DC-SQUIDS και στα RF-SQUIDS. Στην πρώτη κατηγορία τα μαγνητόμετρα αποτελούνται από έναν δακτύλιο με δύο ημικύκλια, με μία επαφή μονωτικού σε κάθε πλευρά, ο οποίος πολώνεται με DC ρεύμα. Στη δεύτερη περίπτωση, τα μαγνητόμετρα αποτελούνται από τον υπεραγωγίμο δακτύλιο με μία μόνο επαφή μονωτικού υλικού. Τα DC-SQUIDS υπερτερούν των RF-SQUIDS επειδή παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερα επίπεδα θορύβου στην έξοδο. Το μειονέκτημά τους είναι η δυσκολία κατασκευής εντελώς όμοιων ημιδακτυλίων [4].

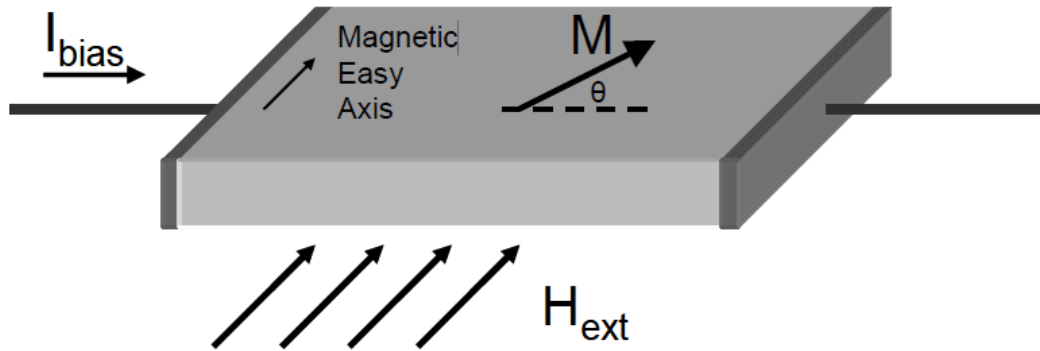


Σχήμα 3-6 Μαγνητόμετρο DC SQUID [8].

3.3.3 Μαγνητόμετρα ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR)

Η μεταβολή της αντίστασης στα φερρομαγνητικά μέταλλα, λόγω διακυμάνσεων του μαγνητικού πεδίου, παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1986 από τον William Thompson και αργότερα από τον Λόρδο Κέλβιν. Η ανακάλυψη αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία αισθητήρα, όταν εμφανίστηκε η τεχνολογία εναπόθεσης λεπτών στρωμάτων (thin film technology), περίπου 100 χρόνια αργότερα.

Το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή ότι στα περισσότερα αγωγικά μαγνητικά υλικά η επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί μεταβολή της ωμικής τους αντίστασης, είναι γνωστό ως μαγνητοαντίσταση και μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων, εφόσον είναι γνωστή η σχέση που συνδέει την ωμική αντίσταση με την ένταση του πεδίου. Γενικά, η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι μία αύξουσα μη γραμμική συνάρτηση. Το ποσό της αλλαγής της αντίστασης εξαρτάται από το μέγεθος της μαγνήτισης και από τη διεύθυνση προς την οποία ρέει το ρεύμα που χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η ειδική αντίσταση. Οι αισθητήρες AMR είναι ικανοί να μετρήσουν τόσο τη γραμμική, όσο και τη γωνιακή απόκλιση από το γήινο μαγνητικό πεδίο. Συνήθως αποτελούνται από λεπτά στρώματα κράματος νικελίου-σιδήρου, τα οποία εναποτίθενται σε ένα δισκίο πυριτίου.



Σχήμα 3-7 Βασική διάταξη αισθητήρα Ανιστροπικής Μαγνητοαντίστασης [9].

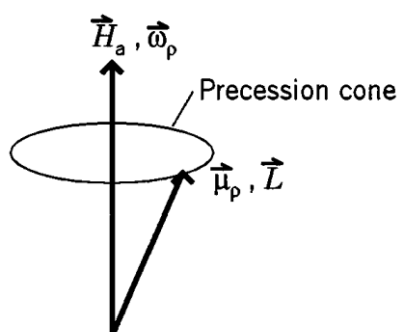
Στο σχήμα 3-7 φαίνεται η βασική διάταξη ενός αισθητήρα ανιστροπικής μαγνητοαντίστασης. Κατασκευαστικά, το στοιχείο είναι μια λεπτή ορθογώνια επιφάνεια που αποτελείται από κράματα νικελίου και σιδήρου (80% Ni και 20% Fe - permalloy) και παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αλλαγή στην ειδική αντίσταση (περίπου 3%). Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος του στοιχείου για να το μαγνητίσει και να ορίσει τον “εύκολο άξονα μαγνήτισης”, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το ρεύμα που περνά διαμέσου του στοιχείου σχηματίζει γωνία 45° με τον “εύκολο άξονα μαγνήτισης”. Το μαγνητικό πεδίο που θα εφαρμοστεί σε ορθή γωνία ως προς αυτόν τον άξονα προκαλεί περιστροφή στη διεύθυνση του M και αλλαγή στη μαγνητοαντίσταση του υλικού.

Ένα από τα μειονεκτήματα των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης είναι η εξάρτηση της ωμικής αντίστασης από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Παρόλα αυτά, καθώς η μέτρηση της αντίστασης είναι μία γενικά απλή διαδικασία, οι αισθητήρες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε περιπτώσεις που η θερμοκρασία μπορεί να ελέγχεται και να διατηρείται σταθερή. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάγνωση μαγνητικών δίσκων δεδομένων, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυσιπλοΐα και την αεροπλοΐα, στους ανιχνευτές οχημάτων και στους αισθητήρες ρεύματος.

Οι αισθητήρες AMR κατασκευάζονται σε δίσκια πυριτίου και παράγονται σε μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, γεγονός που καθιστά εύκολη τη διασύνδεσή τους με άλλα κυκλώματα και συσκευές. Διακρίνονται, επίσης, από την υψηλή ευαισθησία τους (από 10⁻² G έως 50 G), το μικρό μέγεθος και την ανοχή σε θόρυβο. Οι αισθητήρες αυτοί απαιτούν ισχύ μεταξύ 0.1-0.5 mW και μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από -55° C έως 200° C [9], [10].

3.3.4 Μαγνητόμετρα μετάπτωσης πρωτονίου (proton precession magnetometers)

Τα μαγνητόμετρα μετάπτωσης πρωτονίου που λέγονται και μαγνητόμετρα πυρηνικού συντονισμού (NMR), βασίζονται στο φαινόμενο δυναμικής περιστροφής του διανύσματος των αξόνων περιστροφής (spin) των πρωτονίων γύρω από το διάνυσμα της έντασης ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Τα μαγνητόμετρα NMR χρησιμοποιούν ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο για να πολώσει τα πρωτόνια σε έναν υδρογονάνθρακα και έπειτα να ανιχνεύσουν τη συχνότητα μετάπτωσης των πρωτονίων, ενώ αυτά οδηγούνται πάλι σε μη πολωμένη κατάσταση, μετά την απομάκρυνση του πεδίου. Η συχνότητα μετάπτωσης των πρωτονίων είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου που θα έχει παραμείνει μετά την απομάκρυνση του πεδίου πόλωσης. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή ότι όταν ένας περιστρεφόμενος πυρήνας με στροφορμή L και μαγνητική ροπή μ_p υποβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο H_a , οι άξονες περιστροφής των πρωτονίων του πυρήνα παραλληλίζονται με το εφαρμοζόμενο πεδίο H_a .



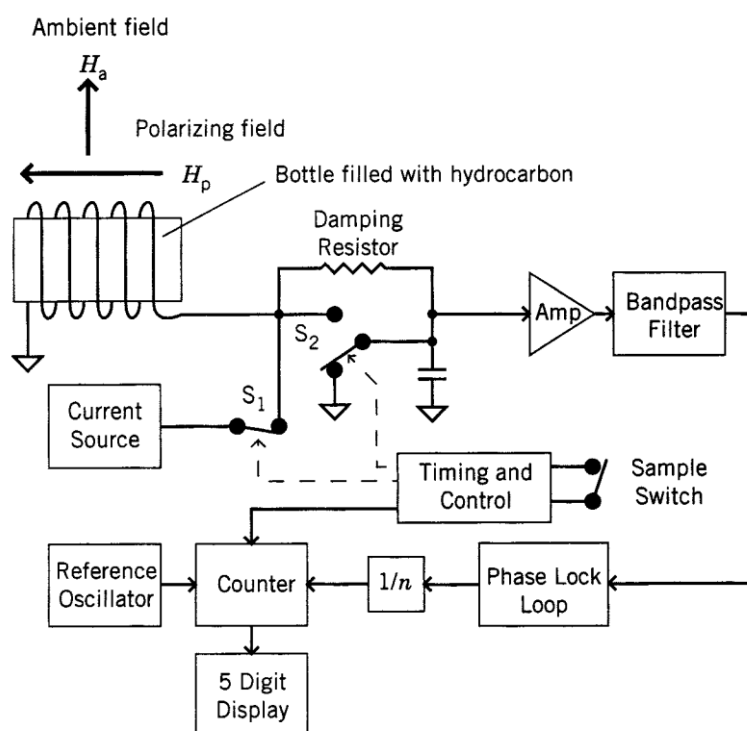
Σχήμα 3-8 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρου NMR [4].

Στο σχήμα 3-9 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα ενός μαγνητομέτρου NMR. Όπως φαίνεται, υπάρχει ένα φιαλίδιο που περιέχει έναν υδρογονάνθρακα που είναι πλούσιος σε υδρογόνο (συνήθως κηροζίνη ή βενζίνη). Όταν το μαγνητόμετρο δεν λειτουργεί, οι άξονες περιστροφής των πρωτονίων είναι τυχαία προσανατολισμένοι με αποτέλεσμα το υλικό να είναι μαγνητικά ουδέτερο. Ένα πηνίο είναι τυλιγμένο εξωτερικά από το φιαλίδιο και με μια διάταξη διακοπών μπορούμε να επιτρέψουμε τη διέλευση ρεύματος μέσα από το πηνίο, ώστε να δημιουργήσουμε μαγνητικό πεδίο στο υλικό που είναι μέσα στο φιαλίδιο. Τότε, οι πυρήνες των ατόμων του υλικού που περιέχεται στο φιαλίδιο προσανατολίζονται σύμφωνα με το πεδίο που δημιουργεί το πηνίο. Μόλις το ρεύμα που περνά από το πηνίο διακοπεί, ο άξονας περιστροφής των πρωτονίων αρχίζει να παλινδρομεί με μια συχνότητα, η οποία μπορεί να μετρηθεί και είναι ανάλογη με την ένταση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου. Το πηνίο είναι συνδεδεμένο με μια σειρά ενισχυτών και

φίλτρων, ώστε όταν διακοπεί το ρεύμα να είναι δυνατή η μέτρηση της παραπάνω συχνότητας [4].

Τα μαγνητόμετρα NMR έχουν περιορισμένο εύρος μέτρησης (20 μT έως 100 μT), ενώ έχουν και περιορισμένες δυνατότητες προσδιορισμού της κατεύθυνσης του πεδίου H. Ένα άλλο μειονέκτημά τους είναι η αδυναμία μείωσης των διαστάσεων και του κόστους τους.

Λόγω της εξάρτησής τους από ατομικές σταθερές, τα μαγνητόμετρα NMR χρησιμοποιούνται για διακρίβωση συστημάτων και μαγνητομέτρων, καθώς και για τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων [4], [10].

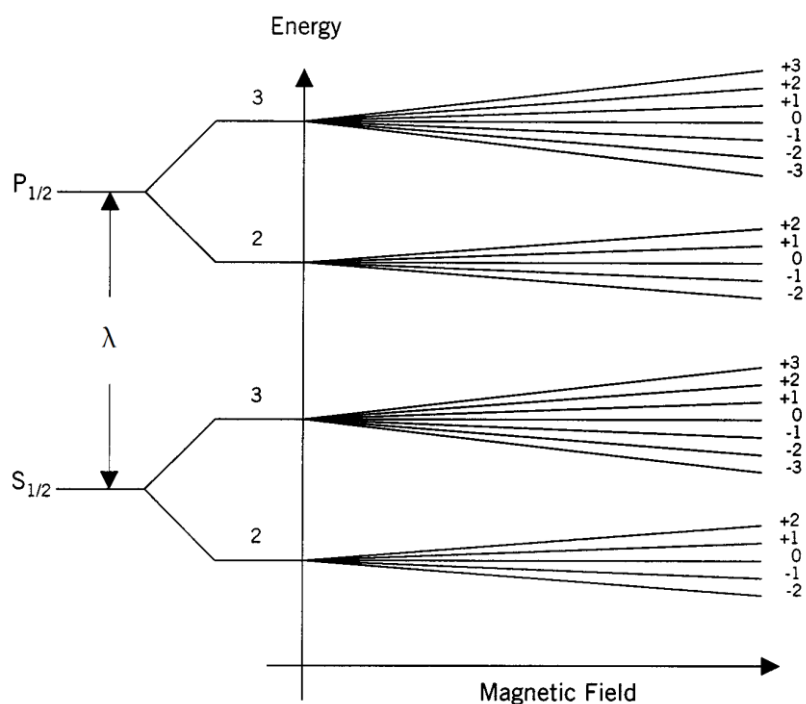


Σχήμα 3-9 Τυπικό διάγραμμα μαγνητομέτρου NMR [4].

3.3.5 Μαγνητόμετρα οπτικής απορρόφησης (optically pumped magnetometers)

Τα μαγνητόμετρα οπτικής απορρόφησης, ή αλλιώς μαγνητόμετρα ηλεκτρονικού συντονισμού, βασίζονται στο φαινόμενο Zeeman, σύμφωνα με το οποίο κατά την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου B, τα ενεργειακά επίπεδα των ατόμων, των ιόντων και των μορίων διαχωρίζονται σε περισσότερα από ένα επίπεδα. Αυτό αναγκάζει τις φασματικές γραμμές εκπομπής να διαχωριστούν επίσης σε περισσότερες από μια γραμμές, με τον αριθμό των διαχωρισμών να είναι ανάλογος με την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό στα αλκαλικά μέταλλα (Ρουβίδιο, Λίθιο, Καίσιο, Νάτριο, Κάλιο), τα οποία στη βασική

τους κατάσταση έχουν $S=1/2$. Στο σχήμα 3–10 φαίνονται σε γενική μορφή οι καταστάσεις ενός αλκαλικού μετάλλου.



Σχήμα 3-10 Καταστάσεις αλκαλικού μετάλλου [4].

Μεταβάσεις συμβαίνουν μεταξύ διαφόρων τιμών του μαγνητικού αριθμού m^3 και ακολουθούν τον κανόνα ότι η αλλαγή του μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές $-1, 0, +1$. Στον πίνακα 3-1 φαίνεται η σχέση ανάμεσα στην πόλωση του φωτός που διεγείρει τη μετάβαση και στην αλλαγή του m .

Πόλωση	Δm
Αριστερόστροφη	-1
Παράλληλη	0
Δεξιόστροφη	+1

Πίνακας 3—1 Επιτρεπόμενες τιμές μαγνητικού αριθμού m [4].

Όταν δεν υπάρχει οπτική διέγερση, τότε η ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων σθένους θα είναι, σύμφωνα με τον Boltzman, σε κατάσταση ισορροπίας. Όταν τα ηλεκτρόνια διεγερθούν με δεξιόστροφα πολωμένη δέσμη φωτός, τότε μεταπηδούν από τη βασική στην πρώτη διεγερμένη στάθμη. Εφόσον η δέσμη φωτός είναι δεξιόστροφα πολωμένη, θα επιτρέπονται οι μεταβάσεις για τις

³ Ο κβαντικός μαγνητικός αριθμός m είναι ο τρίτος από ένα σύνολο κβαντικών αριθμών οι οποίοι περιγράφουν την κατάσταση ενός ηλεκτρονίου και δείχνει τα διαθέσιμα ενεργειακά επίπεδα εντός ενός υποφλοιού. Δεν επηρεάζει την ενέργεια του ηλεκτρονίου, αλλά επηρεάζει το *σύννεφο πιθανότητας*, την περιοχή, δηλαδή, όπου μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο.

οποίες θα ισχύει $m=+1$. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια αποδιηγείρονται σε χαμηλότερες καταστάσεις και κατανέμονται με την ίδια πιθανότητα σε όλες τις καταστάσεις με διαφορετικό m . Τελικά όμως, όλα τα άτομα προσανατολίζονται, δηλαδή καταλήγουν σε κατάσταση με τη μεγαλύτερη προβολή spin (κβαντικός αριθμός m). Αν επιβάλουμε ένα προς μέτρηση εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, μπορούμε να προκαλέσουμε έναν μερικό αποπροσανατολισμό της ατομικής πόλωσης. Κατά συνέπεια, μπορούμε να συμπεράνουμε την παρουσία μαγνητικών πεδίων, εάν βλέπουμε στο φάσμα το διαχωρισμό Zeeman και μπορούμε να μετρήσουμε την ισχύ του πεδίου, μέσω της μέτρησης της ποσότητας των γραμμών λόγω του φαινομένου Zeeman.

Οι εφαρμογές των μαγνητομέτρων οπτικής απορρόφησης είναι παρόμοιες με αυτές των υπεραγώγιμων συναγωνιστών τους, των SQUID. Οι κυριότερες από αυτές αφορούν το βιομαγνητισμό και συγκεκριμένα, την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων που παράγουν βιολογικά όργανα, όπως η καρδιά και ο εγκέφαλος.

Η ευαισθησία και η δυναμική εμβέλεια ενός optically pumped μαγνητομέτρου, όπως και στα περισσότερα μαγνητόμετρα, καθορίζονται από τις ηλεκτρονικές ενδείξεις εξόδου. Τυπικές ευαισθησίες για το καίσιο και το ήλιο είναι 700 kHz/G και 2,8 MHz/G, αντίστοιχα. Αυτό ερμηνεύεται στην κλίμακα ευαισθησίας από 10^{-8} G έως 1 G. Αυτός ο αισθητήρας είναι σχετικά μεγάλος και έχει υψηλή κατανάλωση ισχύος [4].

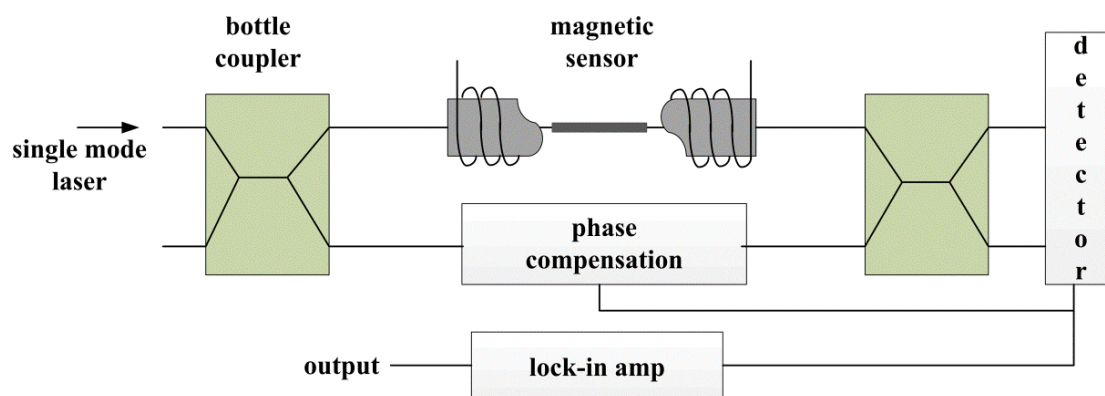
3.3.6 Μαγνητόμετρο οπτικών ινών (fiber optic magnetometer)

Τα μαγνητόμετρα οπτικών ινών είναι αισθητήρες που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτοί που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ενός μαγνητικού πεδίου εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής που δημιουργεί μια μηχανική τάση σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, όταν αυτό τοποθετείται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Αν και υπάρχουν πολλές παραλλαγές στη λειτουργία τους και στις μέρες μας έχουμε φτάσει σε σύνθετες κατασκευές, ένα αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που αναφέρεται παρακάτω.

Η μέτρηση μικρών αλλαγών στο μήκος της οπτικής διαδρομής μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση ενός συμβολομέτρου διαμόρφωσης φάσης March-Zender. Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο γυάλινες ίνες που τοποθετούνται έτσι ώστε να διαμορφώνουν το συμβολόμετρο March-Zender (Σχήμα 3-11). Φως από πηγή laser περνά διαμέσου ενός διαχωριστή δέσμης μέσα στις δύο ίνες, κινείται κατά μήκος των ινών, ανασυγκροτείται σε ένα συγκεντρωτή δέσμης και καταλήγει σε ένα φωτοανιχνευτή, στο τέλος κάθε ίνας. Μία από τις ίνες είτε τυλίγεται γύρω, είτε επικαλύπτεται με ένα μαγνητοσυστολικό υλικό, που είναι ένα υλικό του οποίου οι διαστάσεις εξαρτώνται από τη διεύθυνση και το βαθμό μαγνήτισής του. Όταν το

μαγνητοσυστολικό υλικό μαγνητίζεται από ένα περιβάλλον πεδίο, το μήκος της ίνας αλλάζει. Ως εκ τούτου, το φως αυτού του σκέλους διανύει μεγαλύτερο μήκος από αυτό που δεν περιλαμβάνει το μαγνητοσυστολικό υλικό και επομένως, το φως από τα δύο σκέλη στην έξοδο δεν θα έχει την ίδια φάση.



Σχήμα 3-11 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας μαγνητομέτρου οπτικών ινών [12].

Τα fiber optic μαγνητόμετρα έχουν κλίμακα ευαισθησίας μεταξύ 10^{-7} G έως 10 G. Οι συσκευές είναι ευαίσθητες στον προσανατολισμό των γραμμών του πεδίου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν την καμπυλότητα των γραμμών του πεδίου, όπως επίσης και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρούν, είτε σταθερά πεδία, είτε πεδία που μεταβάλλονται με συχνότητες κάτω των 60 kHz. Το μέγεθός τους εξαρτάται από την απαιτούμενη ευαισθησία [11], [12].

3.4 Μαγνητικοί αισθητήρες ισχυρού πεδίου

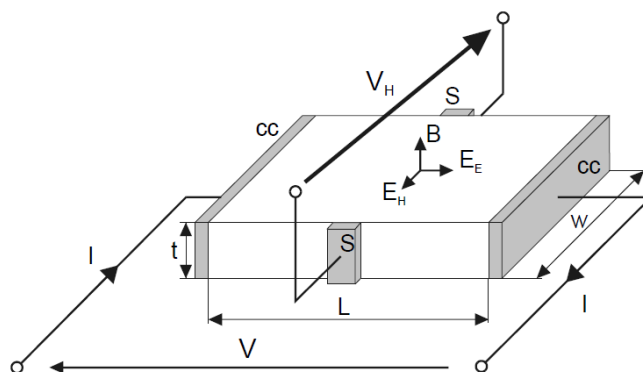
Στους μαγνητικούς αισθητήρες ισχυρού πεδίου ανήκουν οι περισσότεροι βιομηχανικοί αισθητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως πηγή μαγνητικού πεδίου μόνιμους μαγνήτες, που μαγνητίζουν ή πολώνουν φερρομαγνητικά υλικά που βρίσκονται κοντά τους. Οι αισθητήρες πρέπει να μετρούν το συνολικό πεδίο που δημιουργείται γύρω τους, το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό της Γης, χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος να καταστραφούν ή να απορρυθμιστούν. Οι αισθητήρες που έχουν αυτήν τη δυνατότητα είναι οι αισθητήρες Hall, οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (Gigantic Magnetoresistive, GMR sensors), οι μαγνητοдиодοι (magnetodiode) και τα μαγνητοτρανζίστορ (magnetotransistor).

3.4.1 Μαγνητόμετρα Hall Effect

Τα μαγνητόμετρα Hall είναι οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες για τη μέτρηση υψηλών μαγνητικών πεδίων και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο Hall που ανακαλύφθηκε από τον Edwin H. Hall το 1897. Το φαινόμενο Hall είναι

επακόλουθο της δύναμης Lorentz, που είναι η δύναμη που δέχεται ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτή η δύναμη είναι κάθετη, τόσο κατά μήκος της διεύθυνσης της κίνησης, όσο και κατά τη διεύθυνση του πεδίου [4].

Στο σχήμα 3-12 περιγράφεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα Hall. Κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από ένα αγώγιμο υλικό, εφαρμόζεται ένα εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στο σχήμα. Κατά συνέπεια, οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου εκτρέπονται, λόγω της δύναμης Lorentz που ασκείται σε αυτούς από το πεδίο. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου και από την ένταση του διερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και κατά συνέπεια, από την ταχύτητα των φορέων. Αποτέλεσμα της δράσης της δύναμης Lorentz είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο ένα άκρο του αγωγού και οπών στο άλλο. Καθώς η συγκέντρωση φορέων στα δύο άκρα αυξάνεται, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που στο σχήμα συμβολίζεται με E_H και κατά συνέπεια, είναι δυνατή η μέτρηση της τάσης Hall (V_H), η οποία μπορεί να δώσει ένα μέτρο της τιμής του εφαρμοζόμενου πεδίου.

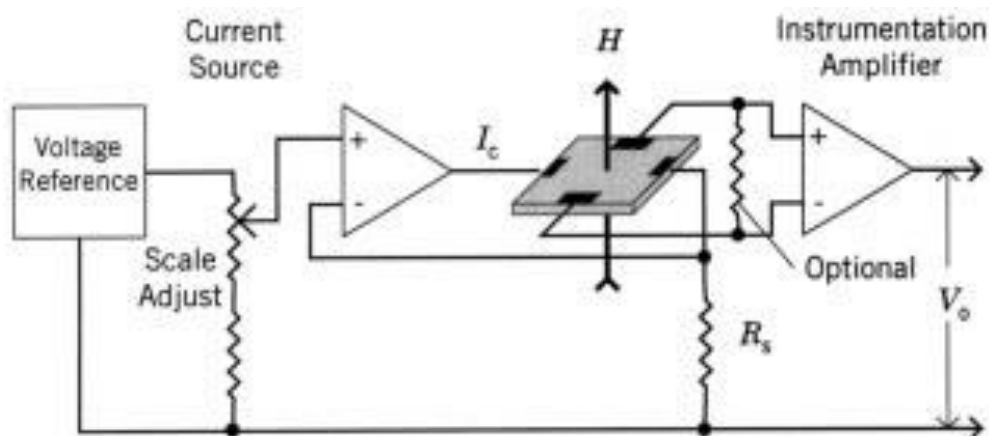


Σχήμα 3-12 Βασική διάταξη αισθητήρα Hall [13].

Για την κατασκευή αισθητήρων Hall μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικοί αγωγοί, όπως για παράδειγμα ο χαλκός (Cu), όμως προτιμώνται καλύτερα οι ημιαγωγοί, όπως το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), το αντιμονιούχο ίνδιο (InSb) και το αρσενικούχο ίνδιο (InAs). Από τα παραπάνω, αυτό που χρησιμοποιείται κυρίως είναι το αρσενικούχο ίνδιο, λόγω της καλής του ευαισθησίας και της χαμηλής του αντίστασης [13].

Στο σχήμα 3-13 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός αισθητήρα Hall. Η τάση αναφοράς, ο τελεστικός ενισχυτής και η αντίσταση R_s σχηματίζουν μια πηγή ρεύματος για τον έλεγχο του ρεύματος (I_c) στον αισθητήρα Hall. Για την καλύτερη λειτουργία του αισθητήρα, η τάση αναφοράς και η αντίσταση R_s πρέπει να έχουν μεγάλη σταθερότητα. Η τάση Hall που παράγεται ενισχύεται από έναν ενισχυτή με μεγάλη αντίσταση εισόδου και είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου.

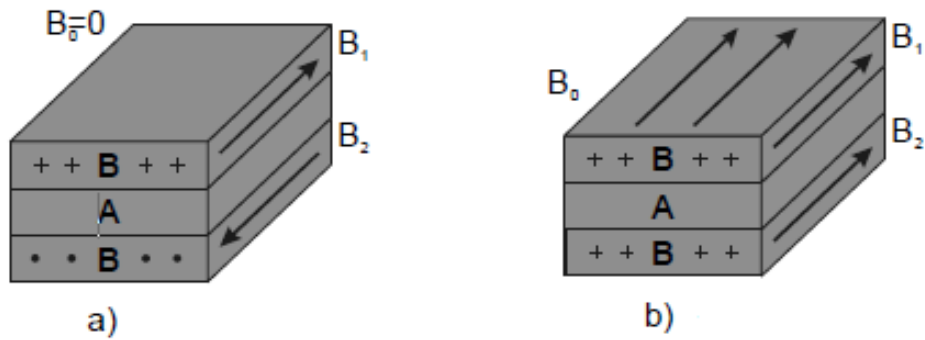
Τυπικές τιμές ρεύματος ελέγχου για τους αισθητήρες Hall είναι τα 100 mA. Η ευαισθησία τους κυμαίνεται από 10 mV/T έως 1 V/T. Οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου λαμβάνουν τιμές από 1 Ω έως 3 Ω. Οι διαστάσεις τους είναι πολύ μικρές (σε ένα τετράγωνο 10mm x 10mm, πάχους 0,5mm) και έχουν εύρος μέτρησης από 50 μT έως 30 T. Η απαιτούμενη ισχύς για τη λειτουργία τους είναι μεταξύ 0,1 W και 0,2 W και μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά ευρεία κλίμακα θερμοκρασίας [4].



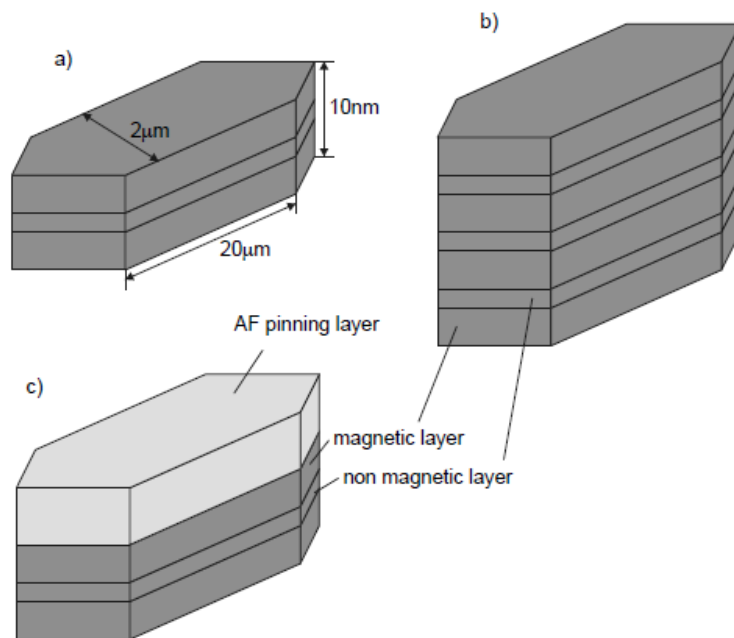
Σχήμα 3-13 Σχηματικό διάγραμμα αισθητήρα Hall [4].

3.4.2 Αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR)

Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης παρατηρήθηκε πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και βασίζεται στην αρχή σκέδασης του spin των ηλεκτρονίων. Όταν δύο λεπτά στρώματα φερρομαγνητικού υλικού διαχωρίζονται από στρώματα λεπτών υμενίων μη μαγνητικού αγωγίσιμου υλικού και αν το πάχος της συνολικής κατασκευής είναι μικρότερο από τη μέση ελεύθερη διαδρομή ενός ηλεκτρονίου (10-20 nm), συμβαίνει σκέδαση των ηλεκτρονίων ανάμεσα στα φερρομαγνητικά στρώματα, η οποία εξαρτάται από τον προσανατολισμό των μαγνητικών φορέων από τους οποίους αποτελούνται τα φερρομαγνητικά υλικά. Όταν δύο στρώματα έχουν παράλληλους φορείς, τότε περιέχουν λιγότερα διασκορπισμένα στοιχεία και κατά συνέπεια, οι ελεύθερες διαδρομές για τους φορείς ρεύματος είναι μεγαλύτερες και ισοδύναμα η αντίσταση που παρουσιάζουν είναι μικρότερη. Στρώματα με αντίρροπους φορείς παρουσιάζουν μεγαλύτερο διασκορπισμό στα δομικά τους στοιχεία και συνεπώς, μεγαλύτερη αντίσταση (σχήμα 3-14). Οι κύριοι τύποι των αντιστάσεων GMR είναι τρεις: οι αντιστάσεις “spin valve”, οι αντιστάσεις “sandwich” και οι αντιστάσεις “multilayer” (σχήμα 3-15).



Σχήμα 3-14 Φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης α) στρώματα με αντίρροπους φορείς – μεγάλη αντίσταση β) στρώματα με παράλληλους φορείς – μικρή αντίσταση [13].



Σχήμα 3-15 Βασικές δομές αντιστάσεων GMR α) sandwich β) multilayer γ) spin valve [13].

Στους αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) είδαμε ότι η τιμή της αντίστασης μπορεί να αλλάξει έως και 3% παρουσία μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση των γιγαντιαίων μαγνητοαντιστάσεων, η μεταβολή είναι δυνατόν να φτάσει ακόμα και στο 70%.

Τα διανυσματικά μαγνητόμετρα GMR χρησιμοποιούνται εναλλακτικά των AMR, καθώς παρουσιάζουν καλύτερη επαναληψιμότητα συνάρτησης μεταφοράς και μεγαλύτερη ευαισθησία. Μία βασική εφαρμογή τους είναι η χρήση τους σε κεφαλές ανάγνωσης μαγνητικών δίσκων και στην κατασκευή της ηλεκτρονικής μνήμης MRAM [9], [10].

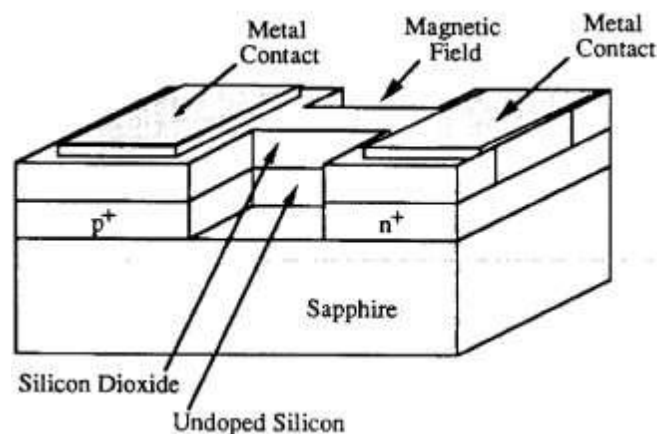
3.4.3 Μαγνητοδίοδοι (Magnetodiode)

Η μαγνητοδίοδος είναι βασικά μια δίοδος ημιαγωγού, δηλαδή μια p-n επαφή. Οι τρεις κυριότερες κατηγορίες μαγνητοδίοδων που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους είναι: SOI (πυρίτιο σε μονωτή), SOS (πυρίτιο σε ζαφείρι) και MOS (οξείδιο μετάλλου σε ημιαγωγό). Στις μέρες μας, η περισσότερο χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την κατασκευή αισθητήρων είναι η SOS. Σε αυτήν, οι δύο περιοχές της διόδου δεν ενώνονται μεταξύ τους, αλλά υπάρχει μια περιοχή πυριτίου (Si) ανάμεσά τους. Πάνω από το πυρίτιο υπάρχει ένα στρώμα από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και κάτω από αυτό υπάρχει ζαφείρι (Al_2O_3), που είναι το υπόστρωμα πάνω στο οποίο κατασκευάζεται ο αισθητήρας (σχήμα 3-16).

Αν μια μεταλλική επαφή συνδεθεί με την p-περιοχή της διόδου, θα δίνει ένα θετικό δυναμικό, ενώ μια μεταλλική επαφή συνδεδεμένη με την n-περιοχή δίνει αρνητικό δυναμικό. Οπές από την p-περιοχή και ηλεκτρόνια από την n-περιοχή θα εκχυθούν στην περιοχή του καθαρού πυριτίου.

Αν η δίοδος πολωθεί θετικά, τότε το ρεύμα που θα περνά από τη δίοδο είναι το άθροισμα το ρεύματος των οπών και του ρεύματος των ηλεκτρονίων, επειδή οι αντίθετα φορτισμένοι φορείς κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις.

Μερικοί φορείς, ειδικά αυτοί που είναι κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του SiO_2 ή κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του ζαφειριού, θα ανασυζευχθούν. Η απώλεια φορτισμένων φορέων αυξάνει την αντίσταση του υλικού. Απουσία πεδίου, η ανασύζευξη στις δύο διεπιφάνειες συνεισφέρει στην αντίσταση. Ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των φορτισμένων φορέων τα εκτρέπει είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, γεγονός που εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου.



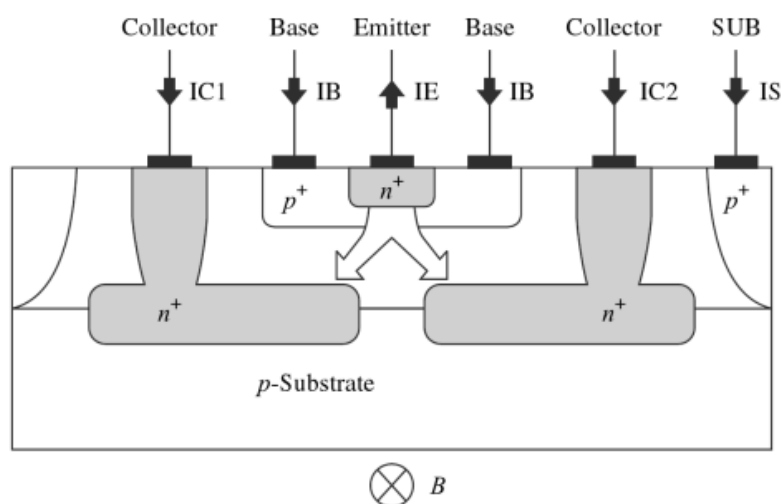
Σχήμα 3-16 Μαγνητοδίοδος
[www.scholar.lib.vt.edu].

Τόσο τα ηλεκτρόνια, όσο και οι οπές εκτρέπονται προς την ίδια διεύθυνση. Φορτισμένοι φορείς κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του ζαφειριού έχουν μεγαλύτερη τάση να ανασυζευχθούν από αυτούς κοντά στη διεπιφάνεια μεταξύ του Si και του SiO₂. Έτσι, αν ένα μαγνητικό πεδίο εκτρέπει τους φορτισμένους φορείς προς τα κάτω, η αντίσταση του υλικού είναι μεγαλύτερη από την κανονική, ενώ αν τα εκτρέπει προς τα πάνω η αντίσταση γίνεται μικρότερη της κανονικής. Η ευαισθησία μιας μαγνητοδιόδου είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή που έχει ένας αισθητήρας Hall και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά της στοιχεία και από παθητικές παραμέτρους, όπως η μαγνητοαντίσταση [14].

3.4.4 Μαγνητοτρανζίστορ (magnetotransistor)

Αυτοί οι αισθητήρες είναι συσκευές που έχουν δύο συλλέκτες, δύο ακροδέκτες βάσης και έναν εκπομπό. Αν η μαγνητοδιόδος είναι μία τύπου p-n επαφής, το μαγνητοτρανζίστορ είναι μία μορφή ενός n-p-n τρανζίστορ.

Το τρανζίστορ αυτού του τύπου έχει έναν n-εκπομπό που χωρίζεται από έναν n-συλλέκτη με μία p-βάση. Η διαφορά με τη μαγνητοδιόδο είναι ότι υπάρχουν δύο συλλέκτες αντί για έναν. Στο σχήμα 3-17 φαίνεται παραστατικά ένα μαγνητοτρανζίστορ. Η κατασκευή του είναι τέτοια που αν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, τότε προς τους δύο συλλέκτες φτάνει ίσος αριθμός φορτισμένων φορέων.



Σχήμα 3-17 Σχηματική παράσταση ενός μαγνητοτρανζίστορ.

Αν υπάρχει μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση κίνησης των φορτισμένων φορέων, αυτοί εκτρέπονται προς τον ένα ή τον άλλο συλλέκτη, γεγονός που εξαρτάται από τη διεύθυνση του πεδίου. Οι τάσεις των δύο συλλεκτών τροφοδοτούνται από διαφορετικούς ενισχυτές, των οποίων η απόδοση είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Το μαγνητοτρανζίστορ είναι πολύ πιο ευαίσθητο από μία μαγνητοδίοδο και μία συσκευή Hall-effect και βασίζεται σε πιο απλές τεχνολογίες παραγωγής π.χ. χρησιμοποιείται υπόστρωμα πυριτίου Si που είναι φθηνό, αντί του ζαφειριού που χρειάζονται οι μαγνητοδίοδοι [14].

3.5 Μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής (fluxgate magnetometer)

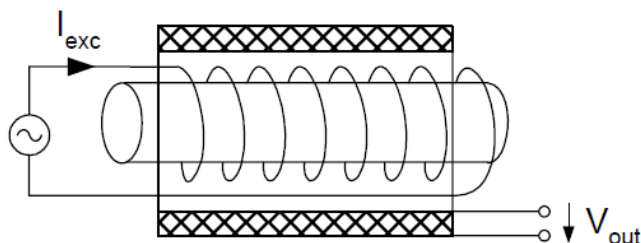
Οι αισθητήρες fluxgate αναπτύχθηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1930 για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης. Στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, χρησιμοποιήθηκαν για ανθυποβρυχιακό πόλεμο, αλλά και από υποβρύχια προς εντοπισμό χαμηλά υπτάμενων αεροσκαφών. Μετ' έπειτα, η χρήση τους διευρύνθηκε και σε διαστημικές αποστολές σε γήινη τροχιά και στη Σελήνη. Οι σύγχρονες εφαρμογές τους περιλαμβάνουν γεωμαγνητικές παρατηρήσεις, αναζήτηση ορυκτών, μετρήσεις στο εξώτερο διάστημα, ανίχνευση υποβρυχίων, μαγνητική προστασία πλοίων, καθώς και εφαρμογές σε μεταλλογραφικές συσκευές προς ανίχνευση ανωμαλιών ή δομικών κενών σε μεταλλικά υλικά. Τέλος, υπάρχουν και ιδιαίτερες διατάξεις fluxgate, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα μέτρησης περισσοτέρων από μία συνιστωσών ενός μαγνητικού πεδίου [15].

Είναι, ίσως, οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων μικρότερων του 1 mT και οι κυριότεροι λόγοι είναι η αξιοπιστία τους, η γραμμικότητά τους, η μικρή κατανάλωση ενέργειας, η θερμοκρασιακή τους ευστάθεια και το ικανοποιητικό εύρος ζώνης (από DC έως μερικά kHz). Είναι κατάλληλοι για μέτρηση της απόλυτης τιμής της έντασης μαγνητικού πεδίου, καθώς και για τη μέτρηση της διαφοράς μεταξύ δύο σημείων εντός μαγνητικού πεδίου. Η τεχνολογία fluxgate είναι η μόνη που μπορεί σήμερα να δώσει διανυσματικά μαγνητόμετρα ικανά να προσδιορίσουν την ένταση μίας μόνο συνιστώσας πεδίου, χωρίς οι ενδείξεις τους να επηρεάζονται καθόλου από τις δύο εγκάρσιες συνιστώσες. Μπορούν να μετρήσουν εντάσεις ασθενούς μαγνητικού πεδίου της τάξης από 10^{-10} έως 10^{-4} T, με διακριτική ικανότητα που μπορεί να πλησιάσει τα 100 pT και ακρίβεια 10 nT [10].

3.5.1 Αρχή λειτουργίας μαγνητομέτρων Fluxgate

Βασικό χαρακτηριστικό των αισθητήρων Fluxgate είναι η ύπαρξη ενός πεδίου αναφοράς με το οποίο συγκρίνεται το προς μέτρηση πεδίο. Το πεδίο αναφοράς είναι συνήθως ένα εναλλασσόμενο ημιτονικό, τετραγωνικό ή τριγωνικό σήμα, το οποίο επιβάλλεται σε έναν πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού με χρήση ενός πηνίου διέγερσης και οδηγεί περιοδικά τον πυρήνα σε κορεσμό. Το

αποτέλεσμα της σύγκρισης που βασίζεται στη μαγνητική επαγωγή στο σιδηρομαγνητικό πυρήνα, εκτιμάται μέσω του πηνίου λήψης που τυλίγεται γύρω από αυτόν. Έτσι, το αισθητήριο τμήμα ενός fluxgate περιλαμβάνει συνήθως το μαγνητικό πυρήνα, το πηνίο διέγερσης του πυρήνα και το πηνίο μέτρησης του εξωτερικού πεδίου (σχήμα 3-18).



Σχήμα 3-18 Βασική διάταξη αισθητήρα Fluxgate [13].

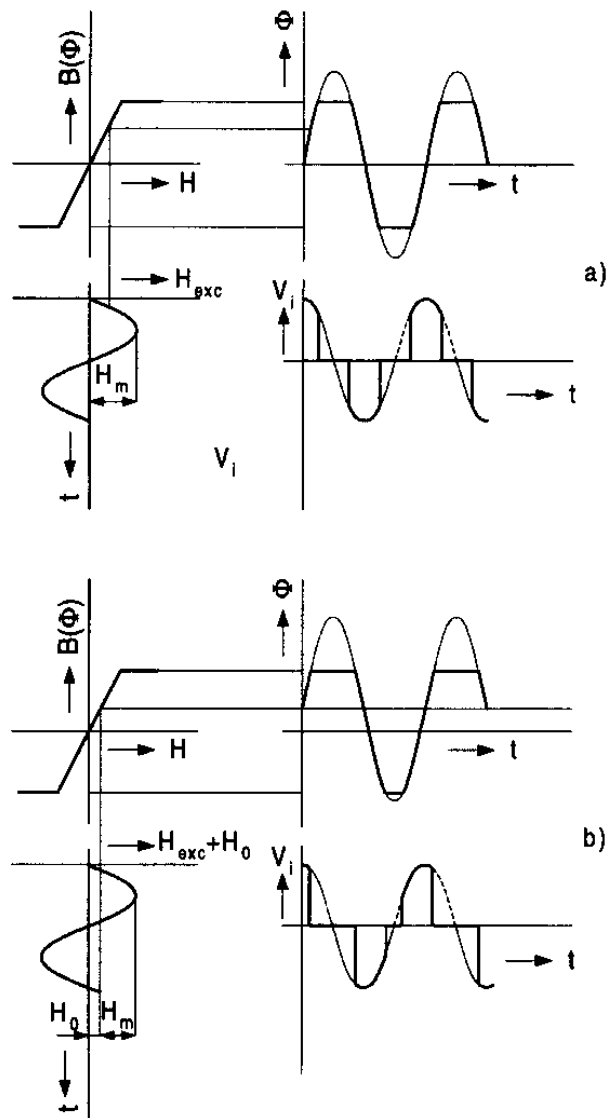
Σχετικά με την αρχή λειτουργίας του, όπως ειπώθηκε παραπάνω, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διαμέσου του πηνίου διέγερσης προκαλεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο οδηγεί περιοδικά σε κορεσμό τον πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Καθώς ο πυρήνας εισέρχεται στον κορεσμό, η μαγνητική του διαπερατότητα παύει να αυξάνεται. Κατά συνέπεια, η μαγνητική ροή που σχετίζεται με το υπό μέτρηση πεδίο σταθεροποιείται. Ο περιορισμός αυτός της πυκνότητας της μαγνητικής ροής διαμέσου του σιδηρομαγνητικού πυρήνα που λαμβάνει χώρα όταν ο πυρήνας οδηγείται σε μαγνητικό κορεσμό καλείται “gating effect” και από αυτόν τον όρο προέρχεται η ονομασία fluxgate. Με την παρουσία εξωτερικού πεδίου H_0 , η τάση που επάγεται στο πηνίο λήψης περιέχει συνιστώσες στη δεύτερη αρμονική, αλλά και σε υψηλότερες άρτιες αρμονικές της συχνότητας διέγερσης. Τα πλάτη των αρμονικών αυτών της επαγόμενης τάσης εξαρτώνται από το πεδίο H_0 και αποτελούν το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και διατάξεις fluxgate οι οποίες λειτουργούν με μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο λήψης. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το μειονέκτημα της απαίτησης για χαμηλής ωμικής αντίστασης δευτερεύον πηνίο και κατά συνέπεια, μειωμένο αριθμό σπειρών.

3.5.2 Fluxgate παράλληλου τύπου

Ένας βασικός διαχωρισμός των αισθητήρων fluxgates είναι βάσει του τρόπου κατασκευής της αισθητήριας διάταξης. Ως fluxgates παράλληλου τύπου ορίζονται οι αισθητήρες εκείνοι στους οποίους το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.

Η πιο απλή διάταξη αισθητήρα fluxgate είναι ο αισθητήρας διαμήκους πυρήνα που φαίνεται στο σχήμα 3-20 (α). Στη διάταξη αυτή, το εναλλασσόμενο

πεδίο διέγερσης οδηγεί περιοδικά το σιδηρομαγνητικό πυρήνα σε κορεσμό. Όταν δεν υπάρχει εξωτερικό πεδίο, ο πυρήνας έρχεται στον κορεσμό για τιμές της έντασης μαγνητικού πεδίου που αντιστοιχούν στα μέγιστα και στα ελάχιστα της διεγείρουσας κυματομορφής. Η αναστροφή της πολικότητας της μαγνήτισης λαμβάνει χώρα για τιμές του πεδίου που αντιστοιχούν στο συνεκτικό πεδίο του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Έτσι, η καμπύλη μαγνήτισης τοποθετείται συμμετρικά γύρω από το σημείο 0 και οι δύο ακραίες φάσεις (θετική και αρνητική μαγνήτιση κορεσμού) απέχουν μισή περίοδο (σχήμα 3-19a).



Σχήμα 3-19 Διάφορες κυματομορφές αισθητήρα Fluxgate α) με μηδενικό εξωτερικό πεδίο β) με μη μηδενικό πεδίο H_0 [10].

Από την άλλη, αν ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας βρεθεί εντός μαγνητικού πεδίου με διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του πυρήνα, η παραπάνω κατάσταση θα αλλάξει. Στη θετική ημιπερίοδο του κύκλου μαγνήτισης, ο κορεσμός

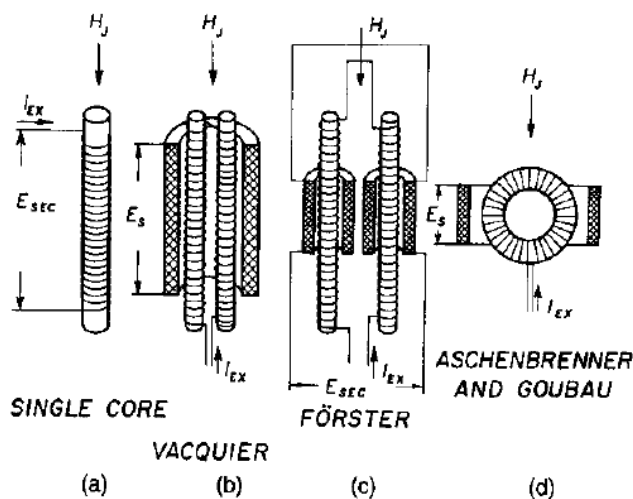
θα υφίσταται λίγο νωρίτερα, καθώς αυτός εξαρτάται από το συνολικό πεδίο (πεδίο διέγερσης και εξωτερικό πεδίο ομόρροπα). Στην αρνητική ημιπερίοδο, ο κορεσμός θα υφίσταται λίγο αργότερα, αφού το συνολικό πεδίο είναι η υπέρθεση δύο αντίρροπων μαγνητικών πεδίων. Άρα, βλέπουμε ότι η εφαρμογή εξωτερικού πεδίου προκαλεί μεταβολή στην χρονική απόσταση μεταξύ της εμφάνισης δύο διαδοχικών καταστάσεων κορεσμού αντίθετης πολικότητας. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία του fluxgate διαμήκους πυρήνα.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην παραπάνω διάταξη είναι το μεγάλο πλάτος της συνιστώσας που αντιστοιχεί στη συχνότητα διέγερσης και είναι παρούσα στο πηνίο λήψης, καθώς αυτό την κάνει να δρα ως μετασχηματιστής. Για τη λύση αυτού του προβλήματος προτιμάται η διάταξη του σχήματος 3-20b.

Σε αυτήν τη διάταξη, που αλλιώς ονομάζεται και Vacquier, χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι σιδηρομαγνητικοί πυρήνες, τοποθετημένοι παράλληλα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Το πηνίο λήψης τυλίγεται γύρω από τους δύο πυρήνες, ενώ το πηνίο διέγερσης τυλίγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα πεδία διέγερσης των σιδηρομαγνητών να έχουν διαφορά φάσης 180° . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση δύο πηνίων διέγερσης, είτε με ανάστροφη περιέλιξη, είτε με όμοια περιέλιξη, αλλά τροφοδοτούμενων από αντίρροπα ρεύματα. Απουσία μαγνητικού πεδίου, το δευτερεύον πηνίο δίνει πάντα μηδενική έξοδο, καθώς η συνολική μαγνητική ροή διαμέσου αυτού είναι μηδέν. Αν όμως εφαρμοσθεί πεδίο παράλληλα με τον άξονα, τότε ενισχύεται η μαγνητική επαγωγή προς τη μία κατεύθυνση και έτσι στο πηνίο λήψης επάγεται μετρήσιμη τάση που είναι ανάλογη της έντασης H του εξωτερικού πεδίου.

Παρόμοια διάταξη είναι και αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3-20c (διάταξη Forster). Σε αυτήν, ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος σε σειρά με δύο πηνία λήψης, ένα για κάθε πυρήνα. Η χρήση αυτής της διάταξης προτιμάται λόγω της μεγάλης ευαισθησίας και αντίστασης σε κατακόρυφα μαγνητικά πεδία, ενώ κυριότερο μειονέκτημα αποτελεί ο θόρυβος, η υψηλότερη κατανάλωση και η δυσκολία του πυρήνα να φτάσει σε κορεσμό, σε σχέση με άλλες διατάξεις αισθητήρων fluxgate.

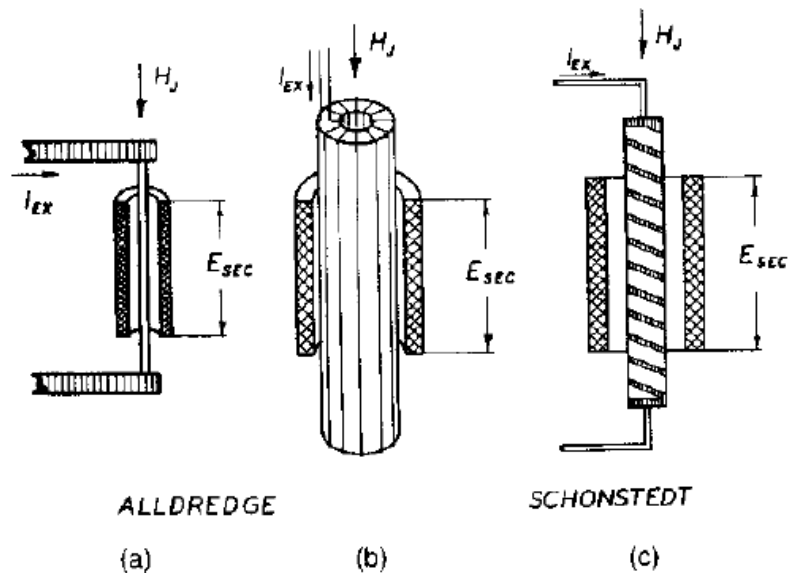
Τέλος, μια άλλη κατηγορία παράλληλου τύπου αισθητήρα fluxgate είναι η διάταξη δακτυλιοειδούς πυρήνα (σχήμα 3-20d). Σε αυτήν, το πηνίο διέγερσης τυλίγεται γύρω από το δακτυλιοειδή πυρήνα, ο οποίος έχει προσανατολισμό τέτοιο ώστε το προς μέτρηση πεδίο να είναι παράλληλο με τη διάμετρο του δακτυλίου. Στο μισό δακτύλιο το πεδίο, λόγω του ρεύματος διέγερσης, είναι παράλληλο με το εξωτερικό πεδίο και στο άλλο μισό αντιπαράλληλο. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από πολλές σπείρες λεπτής ταινίας, από μαλακό μαγνητικό υλικό. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ο χαμηλός θόρυβος [10], [13].



Σχήμα 3-20 Fluxgates παράλληλου τύπου [10].

3.5.3 Fluxgates ορθογωνίου τύπου

Ως fluxgate ορθογωνίου τύπου ορίζονται οι αισθητήρες στους οποίους το πεδίο διέγερσης είναι κάθετο ως προς τη μετρούμενη συνιστώσα μαγνητικού πεδίου. Εμφανίζονται σε τρεις βασικές διατάξεις, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-20. Πιο συγκεκριμένα, για το σχήμα 3-20a η διέγερση παρέχεται από ρεύμα που περνά μέσα από τον πυρήνα με σιδηρομαγνητικό υλικό και παράγει κυκλικό μαγνητικό πεδίο στο επίπεδο εγκάρσιας τομής του πυρήνα. Η διάταξη στο σχήμα 3-20b είναι παρόμοια με αυτή του δακτυλιοειδούς πυρήνα παράλληλου τύπου, με ένα σωληνωτό πυρήνα και με το πηνίο διέγερσης τοροειδώς τυλιγμένο γύρω από αυτό. Και οι δύο αυτές διατάξεις είναι ευαίσθητες σε μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του φερρομαγνητικού πυρήνα, ενώ τα πηνία γύρω από αυτόν χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του σήματος. Τέλος, μια μεικτή κατάσταση λειτουργίας προτάθηκε από τον Schonstedt (σχήμα 3-20c). Αυτή η διάταξη χρησιμοποιεί έναν ελικοειδή φερρομαγνητικό πυρήνα που είναι τυλιγμένος γύρω από μη μαγνητικό αγωγικό υλικό. Η διέγερση επιτυγχάνεται με το εφαπτομενικό πεδίο, το οποίο παράγει ρεύμα που διαρρέει το μη μαγνητικό υλικό. Οι αισθητήρες ορθογωνίου τύπου έχουν το βασικό πλεονέκτημα, ότι δεν χρειάζονται πηνίο διέγερσης [9].



Σχήμα 3-21 Fluxgates ορθογωνίου τύπου [10].

3.5.4 Fluxgate δεύτερης αρμονικής, ύψους παλμού και θέσης παλμού

Είδαμε προηγουμένως ότι τα μαγνητόμετρα fluxgate με βάση τον τρόπο κατασκευής τους χωρίζονται σε παράλληλου και ορθογωνίου τύπου. Με βάση την αρχή λειτουργίας τους, χωρίζονται σε μαγνητόμετρα δεύτερης αρμονικής, ύψους παλμού και θέσης παλμού.

Τα fluxgates δεύτερης αρμονικής αποτελούν, ακόμη και σήμερα, τον πιο δημοφιλή τύπο που χρησιμοποιείται στην πράξη. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται σε μια διάταξη που περιλαμβάνει ένα σιδηρομαγνητικό πυρήνα με υψηλή μαγνήτιση κορεσμού και δύο, τουλάχιστον, πηνία. Το πηνίο λήψης μετρά συνεχές πεδίο ή χαμηλής συχνότητας συνιστώσες του εξωτερικού πεδίου, ενώ το πηνίο διέγερσης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του πεδίου αναφοράς.

Στα μαγνητόμετρα ύψους παλμού ο προσδιορισμός του εξωτερικού πεδίου γίνεται μέσω της εκτίμησης των μέγιστων και ελάχιστων τιμών της επαγόμενης στο πηνίο λήψης τάσης. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται υψηλή μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα και χρήση ημιτονοειδούς διέγερσης, η οποία οδηγεί το σιδηρομαγνητικό πυρήνα στον κορεσμό. Αυτό σημαίνει ότι τέτοιου τύπου αισθητήρες χρειάζονται αρκετά ισχυρό πεδίο αναφοράς και κατά συνέπεια, ισχυρό ρεύμα διέγερσης.

Στα μαγνητόμετρα θέσης παλμού η αρχή λειτουργίας τους έγκειται στη σύγκριση του υπό μέτρηση μαγνητικού πεδίου με ένα πεδίο αναφοράς. Το ρεύμα διέγερσης συνήθως παράγεται από γεννήτρια προμαγνήτισης, η οποία αποτελεί τμήμα του συστήματος. Το πεδίο αναφοράς μπορεί να είναι είτε τριγωνική, είτε ημιτονοειδής κυματομορφή. Πιο αναλυτικά, η γεννήτρια προμαγνήτισης παράγει το τριγωνικό ή ημιτονικό ρεύμα που οδηγείται στο πρωτεύον πηνίο και ωθεί περιοδικά

τον πυρήνα σε κορεσμό. Το σήμα εξόδου του πηνίου λήψης οδηγείται στο παθητικό διαφορικό στοιχείο και εν συνεχεία, στο συγκριτή τάσης. Βασικό τους πλεονέκτημα αποτελεί η μορφή του σήματος εξόδου, το οποίο μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε δυαδική ακολουθία ψηφίων [16].

3.5.5 Υλικά κατασκευής πυρήνα

Τα υλικά κατασκευής του πυρήνα είναι δύσκολο να επιλεγούν, λόγω του ότι αυτά εξαρτώνται και από τον τύπο, τη γεωμετρία του αισθητήρα, το σήμα εξόδου, ακόμα και από το εύρος μέτρησης. Σε γενικές γραμμές, πάντως, τα προαναφερθέντα υλικά πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Υψηλή διαπερατότητα.
- Χαμηλή ένταση συνεκτικού πεδίου.
- Χαμηλός συντελεστής μαγνητοσυστολής.
- Αναστροφή ροής με στροφή της μαγνήτισης, αντί με κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων.
- Μικρή συγκέντρωση κρυσταλλικών διαταραχών στον πυρήνα.
- Ομοιόμορφη διατομή σε όλο το μήκος του πυρήνα.
- Χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Στις μέρες μας, οι δημοφιλέστεροι πυρήνες κατασκευάζονται σε μορφή λεπτού υμενίου από permalloy. Αυτό χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για την κατασκευή ενός μαγνητομέτρου από τη NASA για αεροδιαστημικές εφαρμογές και αποτελεί ακόμα και σήμερα το περισσότερο χρησιμοποιούμενο υλικό, κυρίως λόγω του χαμηλού θορύβου του [10].

3.5.6 Σύγκριση με άλλους αισθητήρες

Οι αισθητήρες fluxgate έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα από τους άλλους τύπους μαγνητομέτρων σε συγκεκριμένο εύρος μέτρησης έντασης μαγνητικών πεδίων.

Είναι πέντε φορές περισσότερο ευαίσθητοι από τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης ή τους αισθητήρες Hall. Προσφέρουν δυναμικό εύρος της τάξης των 80 dB, που είναι το μεγαλύτερο, συγκρινόμενο με κάθε άλλη τεχνολογία εκτός της SQUID, από την οποία υπερτερούν στο ότι προσφέρουν πολύ μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας. Σε σχέση με τις τεχνολογίες της μαγνητοαντίστασης (AMR, GMR) υπερτερούν λόγω της δυνατότητας που παρέχουν για κατασκευή μικροηλεκτρονικών ολοκληρωμένων μαγνητομέτρων με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Δεν έχουν κινούμενα μέρη, σε αντίθεση με το rotation coil και είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε δονήσεις και θερμοκρασιακές καταπονήσεις, σε αντίθεση με τα

μαγνητόμετρα οπτικών ινών. Τέλος, οι αισθητήρες fluxgate είναι πολύ πιο φθηνοί από τους SQUID και δεν χρειάζονται ειδική διάταξη για την ψύξη τους.

Στις μέρες μας, τα πεδία χρήσης των μαγνητομέτρων fluxgate βρίσκουν ευρέως εφαρμογή στην ενεργό μαγνητική θωράκιση και στους μη καταστροφικούς ελέγχους, στους οποίους περιλαμβάνεται η ανίχνευση προσμίξεων σιδηρομαγνητικών υλικών στις γραμμές παραγωγής τροφίμων και η αναγνώριση μαγνητικών σωματιδίων.

3.6 Διακρίβωση μαγνητόμετρων

Για να διακριβωθεί με ακρίβεια ένα σύστημα από αισθητήρες μαγνητόμετρων, απαιτείται μια μέθοδος που θα παρέχει γνωστές τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου για κάθε άξονα αισθητήρα. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι διακρίβωσης:

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί τα λεγόμενα πηνία διακρίβωσης (calibration coils). Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιούνται πηνία συγκεκριμένων διαστάσεων και πηγές ρεύματος. Τα πιο γνωστά πηνία που χρησιμοποιούνται είναι το σωληνοειδές και τα πηνία Helmholtz (σχήμα 3-22).

Ο τύπος που μας δίνει την ένταση του πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο ενός σωληνοειδούς είναι:

$$H = \frac{NI}{2\sqrt{R^2 + l^2}} \quad (3.2)$$

όπου l είναι το μήκος του πηνίου, R η ακτίνα του, N είναι ο αριθμός των σπειρών του και I το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο.

Τα πηνία Helmholtz αποτελούνται από δύο όμοια και με ίδιο αριθμό σπειρών πηνία, με κοινό άξονα, συνδεδεμένα σε σειρά και με ίδια φορά περιέλιξης. Η απόσταση μεταξύ των πηνίων είναι ίση με την κοινή τους ακτίνα. Στην περίπτωση αυτή, η αξονική συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στο μέσο της απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{1,6 \cdot NI}{\sqrt{5} \cdot R} \cong 0,7155 \frac{NI}{R} \quad (3.3)$$

όπου R η κοινή ακτίνα και N ο αριθμός σπειρών κάθε πηνίου.

Τα ζεύγη πηνίων Helmholtz χρησιμοποιούνται για να εξουδετερωθεί το μαγνητικό πεδίο της Γης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που το μετρούμενο πεδίο είναι κατά πολύ ασθενέστερο του πεδίου της. Πρωταρχικός σκοπός των πηνίων αυτών είναι να θέτουν ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο, ίσο και αντίθετο με το μαγνητικό πεδίο της Γης, ώστε να το εκμηδενίζουν και το τελευταίο να μην επηρεάζει τις μετρήσεις.

Η δεύτερη μέθοδος διακρίβωσης για τα μαγνητόμετρα, που είναι γνωστή ως μέθοδος swing, περιλαμβάνει την περιστροφή του αισθητήρα γύρω από ένα γνωστό άξονα και την καταγραφή των μετρήσεων. Ενώ η μέθοδος αυτή μπορεί να φαίνεται απλούστερη και πιο οικονομική από ένα σύστημα με πηνία Helmholtz, ωστόσο απαιτεί πολύ στενό έλεγχο στις μαγνητικές διαταραχές, που οφείλονται στα γύρω αντικείμενα που προκαλούν μαγνητικά πεδία. Η ύπαρξη οποιασδήποτε διαταραχής του μαγνητικού πεδίου θα δημιουργήσει μόνιμα σφάλματα στη διαδικασία διακρίβωσης. Η εξασφάλιση ενός πεδίου ελεύθερου από επιπρόσθετα μαγνητικά πεδία ενδέχεται να απαιτεί το κόστος ενός ζεύγους πηνίων Helmholtz [10].



Σχήμα 3-22 Πάνω: σωληνοειδές πηνίο, Κάτω αριστερά: πηνία Helmholtz, κάτω δεξιά: πηνία Helmholtz τριών αξόνων.

3.7 Μαγνητική θωράκιση

Στις σύγχρονες εφαρμογές (κυρίως ιατρικές, διαστημικές και στρατιωτικές) η δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου απομονωμένου από περιβαλλοντολογικές αλλαγές είναι απαραίτητη, κυρίως για τα ευαίσθητα όργανα, όπως τα μικροσκόπια υψηλής ευκρίνειας, ή για τη μέτρηση πολύ ασθενών μαγνητικών πεδίων, όπως αυτά που προέρχονται από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η μαγνητική θωράκιση έχει και άλλες εφαρμογές, στις οποίες περιλαμβάνονται από τη θωράκιση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ευαίσθητων πειραμάτων, έως τη θωράκιση δωματίων για τη μελέτη μαγνητικών πεδίων που παράγουν βιολογικοί οργανισμοί. Στην περίπτωση διακρίβωσης μαγνητομέτρων, η μαγνητική θωράκιση είναι απαραίτητη για να

ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, ιδιαίτερα στην περιοχή κάτω του 1 fT.

Υπάρχουν δύο τρόποι εξάλειψης αυτών των χαμηλών συχνοτήτων μαγνητικών πεδίων. Η παθητική και η ενεργητική μαγνητική θωράκιση. Η παθητική τεχνική αφορά στην περιστοίχιση του αισθητήρα με μία γεωμετρική κατασκευή, φτιαγμένη από υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. permalloy, τα οποία έχουν την ικανότητα να εκτρέπουν τη μαγνητική ροή του εξωτερικού πεδίου. Επίσης, σε μικρούς χώρους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπεραγώγιμα υλικά, τα οποία δεν επιτρέπουν την παραμικρή αλλαγή της μαγνητικής ροής στο χώρο που περιβάλλουν. Από την άλλη πλευρά, για την ενεργητική θωράκιση απαιτείται ένας αισθητήρας ο οποίος θα εντοπίζει μία συνιστώσα του πεδίου, η οποία θα αντισταθμίζεται από ένα ζεύγος πηνίων Helmholtz που θα διαρρέονται από ρεύμα. Τρία ορθοκανονικά ζεύγη είναι αρκετά για να εξουδετερώσουν εντελώς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και στις τρεις διαστάσεις. Τέλος, για υψηλές συχνότητες (≥ 100 kHz) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο κλωβός Faraday [1].

Ως παράγοντας θωράκισης ορίζεται ο λόγος του μαγνητικού πεδίου εκτός θωράκισης, προς το λόγο του μαγνητικού πεδίου εντός της θωρακισμένης περιοχής:

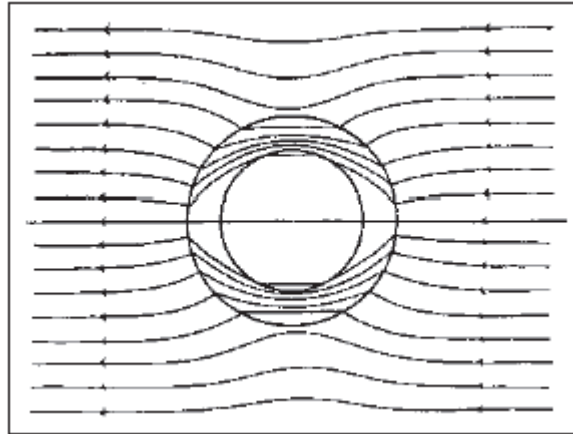
$$S = \frac{\mathbf{B}_{\text{out}}}{\mathbf{B}_{\text{in}}} \quad (3.4)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι πάντοτε ισχύει $S > 1$. Για μια διάταξη κυλινδρικής μαγνητικής θωράκισης με ένα μόνο στρώμα θωράκισης, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου θα έχουν τη μορφή του σχήματος 3-23.

Για αυτή τη γεωμετρία, ο παράγοντας θωράκισης είναι:

$$S = \frac{\mu t}{2R} \quad (3.5)$$

όπου R η ακτίνα του κυλίνδρου, t το πάχος του και μ η σχετική μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού που χρησιμοποιείται. Στην πράξη, για να είναι πιο αποτελεσματική η μαγνητική θωράκιση, περιλαμβάνει περισσότερα του ενός στρώματα [10].



Σχήμα 3-23 Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου παρουσία στρώματος θωράκισης
[www.physics111.lib.berkeley.edu].

4 Πειραματική διάταξη

Το εργαστηριακό μέρος της μεταπτυχιακής εργασίας περιλαμβάνει αρχικά την υλοποίηση μιας απλής διάταξης για τη μέτρηση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου. Η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν αισθητήρα fluxgate παράλληλου τύπου, διαμήκους πυρήνα. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη σύγκριση του υπό μέτρηση μαγνητικού πεδίου με ένα πεδίο αναφοράς.

Το δεύτερο εργαστηριακό σκέλος αποτελεί η συλλογή μετρήσεων στην έξοδο της διάταξης (πηνίο λήψης του αισθητήρα fluxgate). Σκοπός είναι η εύρεση της τιμής του ρεύματος με το οποίο απαιτείται να τροφοδοτηθεί το πρωτεύον πηνίο της διάταξης, ώστε να αντισταθμίσει το πεδίο που παράγεται από το σωληνοειδές σε συγκεκριμένη συχνότητα.

4.1 Δομή της διάταξης – Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

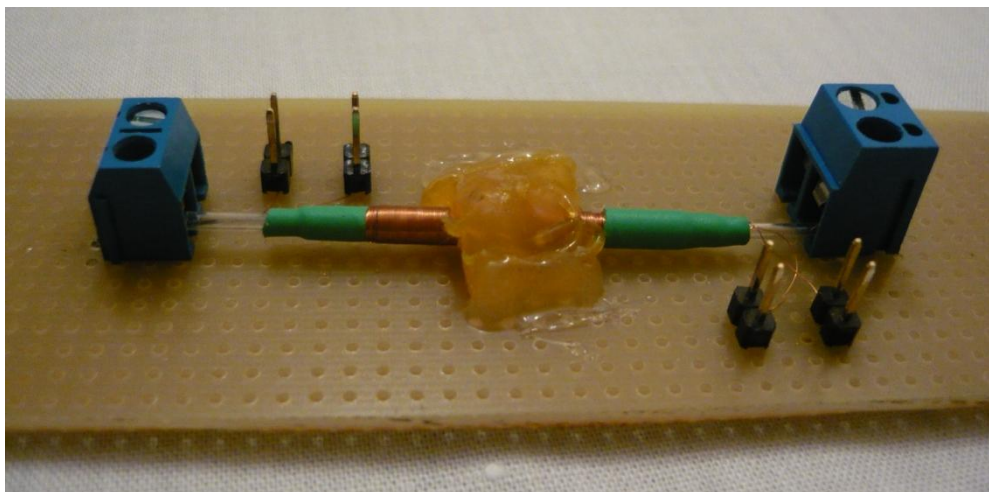
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το κύριο μέρος της διάταξης διακρίβωσης που μελετάμε αποτελείται από έναν αισθητήρα fluxgate παράλληλου τύπου με χρήση μονού διαμήκους πυρήνα. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού μίας DC συνιστώσας ή μιας χαμηλής συχνότητας μαγνητικού πεδίου. Η υπό μέτρηση συνιστώσα είναι συγγραμμική με το πεδίο διέγερσης του αισθητήρα, δηλαδή συγγραμμική με τον άξονα του σωληνοειδούς διέγερσης.

Ο fluxgate αισθητήρας αποτελείται από δύο πηνία και από ένα μικρό γυάλινο σωλήνα, ο οποίος στο εσωτερικό του έχει για πυρήνα λεπτό υμένιο ($\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$) (simple ribbon). Το πρωτεύον πηνίο ή πηνίο διέγερσης έχει τη μορφή πολυστρωματικού σωληνοειδούς. Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε σύρμα χαλκού πάχους 0,1 mm και μήκους περίπου 2,5 m. Αποτελείται από 580 σπείρες και έχει εσωτερική διάμετρο 1,4 mm. Το δε μήκος του είναι περίπου 3,4 cm. Σε τέτοιου τύπου πηνία, προτιμάται η αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου με την αύξηση του αριθμού περιελίξεων, παρά με την αύξηση του ρεύματος διέγερσης, προκειμένου να αποφευχθούν υψηλές ωμικές απώλειες με τη μορφή θερμότητας.

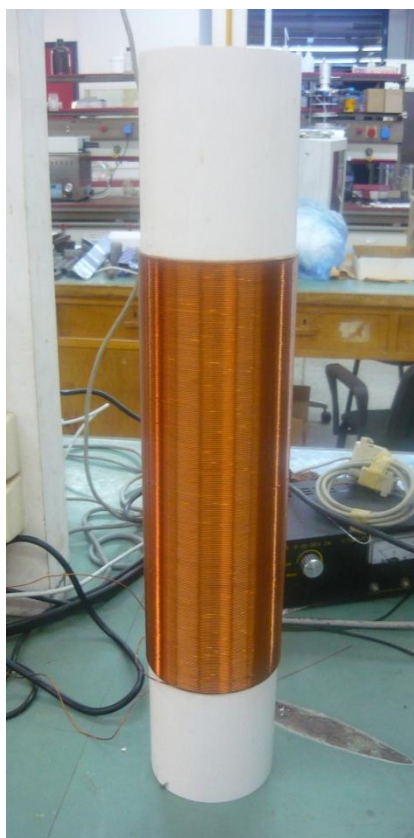
Το πηνίο λήψης είναι τοποθετημένο εξωτερικά του πηνίου διέγερσης και έχει παρόμοιες διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, το πηνίο λήψης αποτελείται από 580 σπείρες και έχει εσωτερική διάμετρο 1,5 mm. Το δε μήκος του είναι περίπου 3,4 cm. Όμοια με το προηγούμενο πηνίο, το σύρμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν χάλκινο με πάχος 0,1 mm. Ο αριθμός περιελίξεων στο πηνίο λήψης πρέπει να είναι μεγάλος για την επίτευξη μέγιστης ευκρίνειας της τάσης εξόδου, αλλά και γενικότερα για την αύξηση της ευαισθησίας του αισθητήρα.

Ο παραπάνω αισθητήρας τοποθετήθηκε σε διάτρητη πλακέτα για καλύτερες και ακριβέστερες μετρήσεις (σχήμα 4-1).

Η εφαρμογή της συνεχούς συνιστώσας μαγνητικού πεδίου έγινε με χρήση σωληνοειδούς πηνίου, ώστε να εξασφαλίζεται η ύπαρξη ομογενούς DC πεδίου σε όλον τον όγκο που καταλαμβάνει το πηνίο λήψης. Το σωληνοειδές αποτελείται από σύρμα χαλκού πάχους 1 mm, τυλιγμένο σε δύο σειρές σπειρών με διαφορά φάσης 180° . Κάθε σειρά αποτελείται από περίπου 290 σπείρες με μήκος 35 cm και ακτίνα 10 cm (σχήμα 4-2). Η ένταση δε του μαγνητικού πεδίου στο μέσο του πηνίου δίνεται από τη σχέση (3-1).



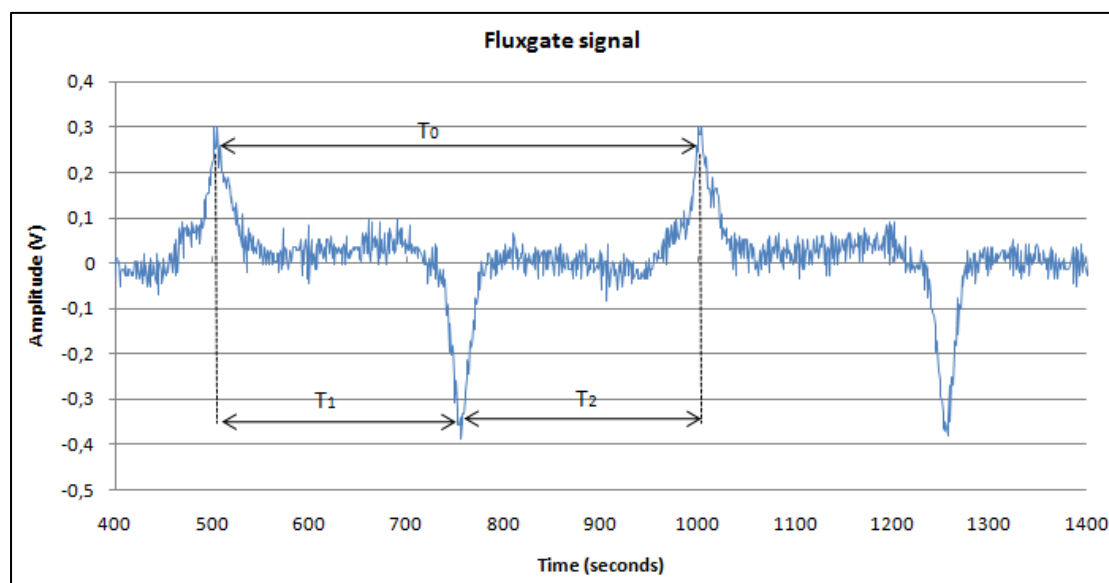
Σχήμα 4-1 Διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων με χρήση αισθητήρα fluxgate.



Σχήμα 4-2 Σωληνοειδές πηνίο.

4.2 Αρχή λειτουργίας της διάταξης

Η διαδικασία ανίχνευσης μαγνητικού πεδίου της διάταξης που μελετάμε περιλαμβάνει τον απ' ευθείας εντοπισμό του ρεύματος στο πηνίο διέγερσης, που απαιτείται για την παραγωγή πεδίου ίσου και αντίθετης φοράς με αυτό που παράγεται από το σωληνοειδές.



Σχήμα 4-3 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

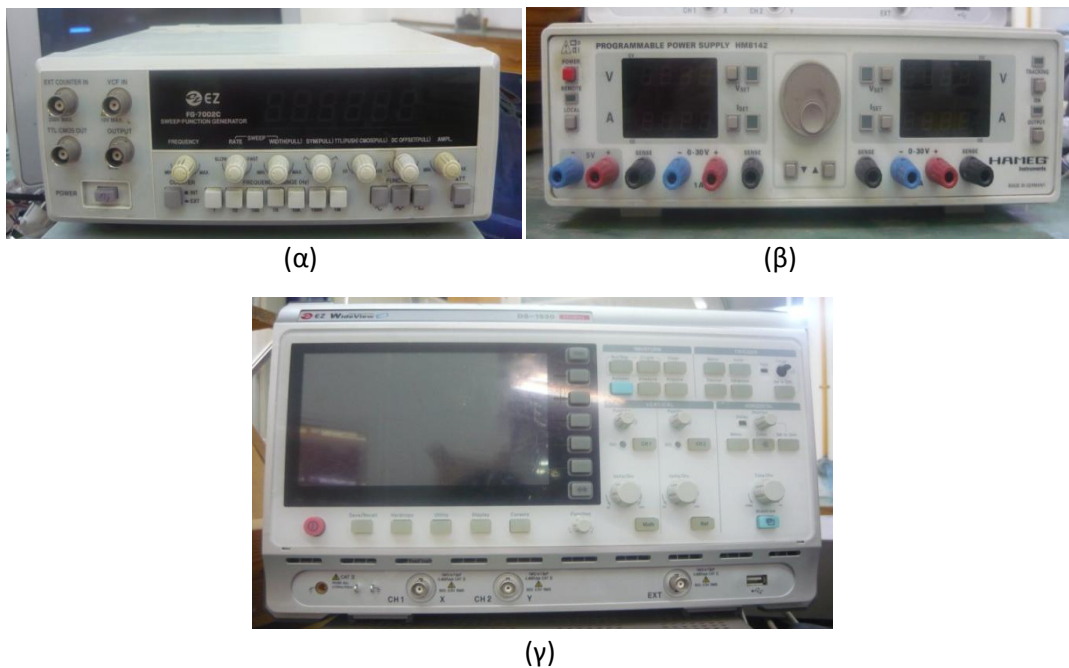
Η αρχή λειτουργίας της διάταξης είναι συγκεκριμένη και εναπόκειται στο σήμα εξόδου του πηνίου λήψης (σχήμα 4-3). Αρχικά, τροφοδοτούμε το σωληνοειδές με ημιτονοειδές ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας. Αυτό, όπως προαναφέρθηκε, δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που είναι και το πεδίο αναφοράς μας. Έπειτα, τοποθετώντας τον αισθητήρα fluxgate στο κέντρο του σωληνοειδούς, λαμβάνουμε στο πηνίο λήψης μια κυματομορφή, όπως αυτή του σχήματος 4-3. Με την τροφοδότηση του πηνίου διέγερσης με συνεχές ρεύμα κατορθώνουμε να “μετακινήσουμε” τις κορυφές του σήματος σε τέτοια απόσταση ώστε $T_1=T_2=T_0/2$. Τότε, θα έχουμε επιτύχει το μηδενισμό του συνολικού πεδίου κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, δηλαδή θα έχουμε αντισταθμίσει το πεδίο του σωληνοειδούς.

Στην παραπάνω καμπύλη, ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει την τάση εξ επαγωγής στο πηνίο λήψης. Το ύψος των κορυφών εξαρτάται από το μέγεθος του κορεσμού που έχει περιέλθει το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα. Η υπέρθεση ενός DC, συγγραμμικού με τη διέγερση, πεδίου προκαλεί μετατόπιση των κορυφών της κυματομορφής. Έτσι, καταλαβαίνουμε ότι όσο το σήμα αναφοράς θα γίνεται ισχυρότερο, θα πρέπει να ενισχύεται και η DC συνιστώσα. Επομένως, για να αυξήσουμε την ευαισθησία του μαγνητομέτρου, πρέπει να διατηρήσουμε σε όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές την ένταση του μαγνητικού πεδίου διέγερσης.

Επίσης, το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα είναι συγκεκριμένο. Ο αισθητήρας, δηλαδή, δεν μπορεί να προσδιορίσει DC συνιστώσες με τιμή μεγαλύτερη από το μέτρο του πεδίου διέγερσης.

4.3 Ληφθείσες μετρήσεις

Για τη συλλογή των μετρήσεων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια συχνότητας «EZ digital FG-7002C sweep function generator» για την τροφοδότηση του σωληνοειδούς, το τροφοδοτικό «HAMEG HM 8142 arbitrary power supply» για την τροφοδοσία του πηνίου διέγερσης της διάταξης και ο παλμογράφος «EZ digital DS-1530 digital storage oscilloscope» για τη λήψη των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4-4 Ηλεκτρονικά όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν: α) γεννήτρια συχνότητας β) τροφοδοτικό γ) παλμογράφος.

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας μετρήσεων που περιλαμβάνει τις τιμές του ρεύματος τροφοδότησης του πηνίου διέγερσης για διάφορες συχνότητες διέγερσης του σωληνοειδούς. Η υπολογιζόμενη τιμή του ρεύματος αντιστοιχεί στην τιμή εκείνη η οποία απαιτείται για τη δημιουργία ενός ίσου και αντίθετου πεδίου με το πεδίο του σωληνοειδούς.

Συχνότητα τροφοδότησης του σωληνοειδούς (kHz)	Ρεύμα διέγερσης (DC) του fluxgate (mA)
100	66
90	60
80	60
70	70
60	70
50	66
40	62
30	60
20	55
10	50
9	46
8	38
7	32
6	28
5	24
4	20
3	16

Πίνακας 4—1 Μετρηθέντα ζεύγη τιμών συχνότητας – ρεύματος διέγερσης.

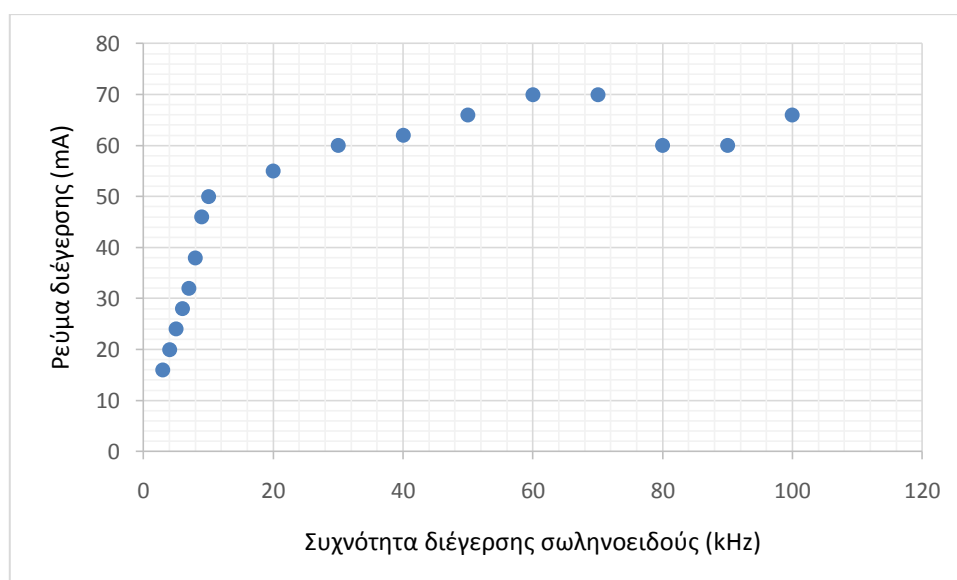
Εάν παραστήσουμε γραφικά τις παραπάνω τιμές, θα προκύψει η εικόνα που φαίνεται στο σχήμα 4-5. Από αυτό καταλαβαίνουμε ότι ανάλογα με την εφαρμοζόμενη συχνότητα στο υλικό του πυρήνα έχουμε δύο συμπεριφορές των μαγνητικών ιδιοτήτων.

Στην πρώτη περιοχή, περίπου μέχρι τα 10 kHz, σύμφωνα με τη θεωρία της μαγνητικής δομής των σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως είναι και το λεπτό υμένιο, έχουμε κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων του μαγνητικού υλικού. Η κίνηση των τοιχωμάτων μέσα στο μαγνητικό υλικό είναι το πρώτο στάδιο μαγνήτισης του υλικού. Με την επιβολή εξωτερικού πεδίου, τα δίπολα των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι τα πρώτα που αλλάζουν διεύθυνση, λόγω της χαμηλής ενέργειας που χρειάζονται. Μια μικρή μεταβολή της ενέργειας μπορεί να αλλάξει την ισορροπία, με αποτέλεσμα τη μικρή περιστροφή των μαγνητικών διπόλων. Από την άλλη πλευρά, στο εσωτερικό του κύριου σώματος των μαγνητικών περιοχών, τα μαγνητικά δίπολα αποκτούν μία συγκεκριμένη διεύθυνση, η οποία δεν αλλάζει με μικρές μεταβολές ενέργειας [17].

Στη δεύτερη περιοχή, μετά τα 10 kHz, η μετάδοση των τοιχωμάτων του μαγνητικού υλικού έχει ολοκληρωθεί και η διαδικασία μαγνήτισής του συνεχίζεται με την περιστροφή των μαγνητικών περιοχών. Μια μαγνητική περιοχή αποτελείται από μαγνητικά δίπολα. Οι περισσότερες μαγνητικές περιοχές έχουν διεύθυνση

παράλληλη με τη διεύθυνση του εύκολου άξονα μαγνήτισης, αλλά η φορά τους είναι τέτοια ώστε, όταν δεν υπάρχει εξωτερικό πεδίο, η μαγνήτιση του υλικού να είναι μηδενική. Η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών μπορεί να είναι αντιστρεπτή ή μη αντιστρεπτή διαδικασία, ανάλογα με τη συμπεριφορά των μαγνητικών περιοχών [17].

Επίσης, σε αυτή την περιοχή αναπτύσσονται και δινορρέυματα (Eddy currents). Αυτά οφείλονται στην ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής στο υλικό και έχουν τέτοια φορά, ώστε να αντιτίθενται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής. Τα δινορρέυματα εξαρτώνται από την ταχύτητα διάδοσης των μαγνητικών τοιχωμάτων.

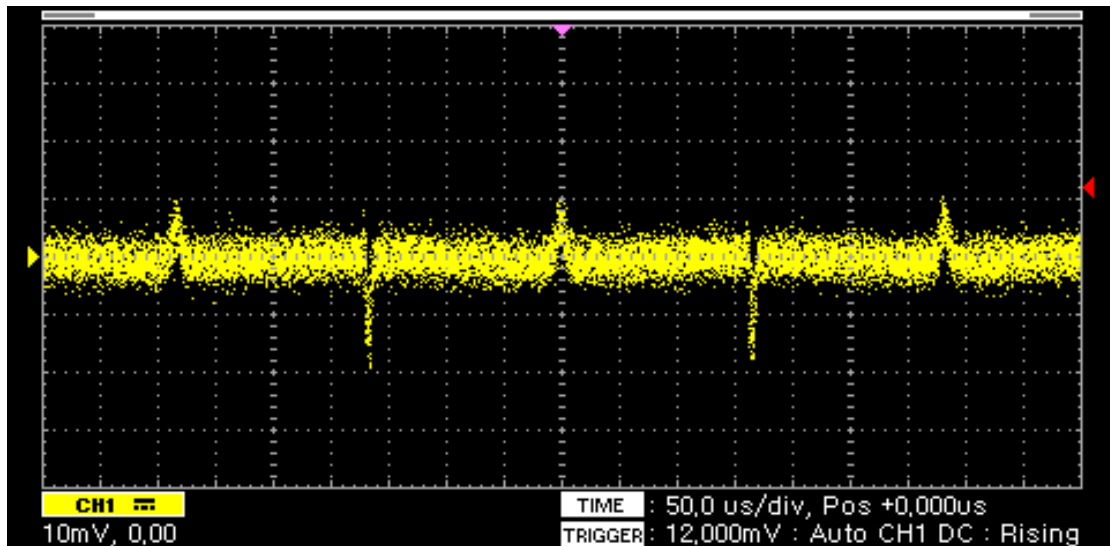


Σχήμα 4-5 Σχέση ρεύματος διέγερσης και συχνότητας διέγερσης σωληνοειδούς.

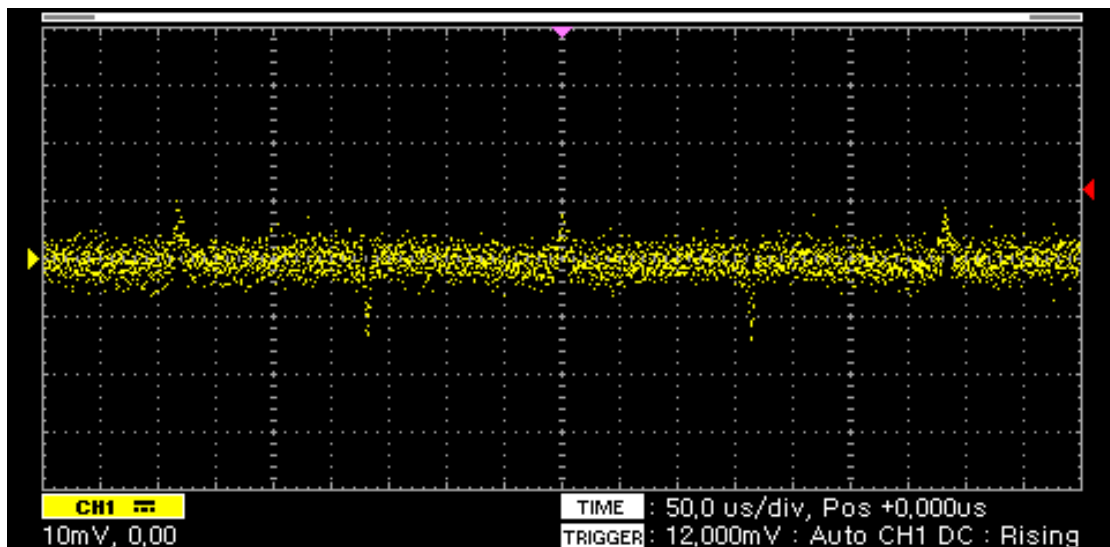
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν από τον παλμογράφο και απεικονίζουν το σήμα εξόδου του πηνίου λήψης της διάταξης με την εφαρμογή ή μη της DC συνιστώσας. Τα γραφήματα που παρουσιάζονται δεν είναι ακριβώς τα αναμενόμενα και περιέχουν αποκλίσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως σε ορισμένες παραδοχές που έγιναν. Υποθέσαμε ότι τα πηνία διέγερσης και λήψης είναι ακριβώς ίδια σε διαστάσεις και ότι αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό σπειρών. Επίσης, η τοποθέτηση του αισθητήρα και άρα των πηνίων, στο κέντρο του σωληνοειδούς, δεν μπορεί να είναι ακριβώς κατακόρυφη με το πεδίο, καθώς θα υπάρχει έστω και μία ανεπαίσθητη απόκλιση από τον κατακόρυφο άξονα, με αποτέλεσμα τα πηνία να δέχονται και κάθετες μαγνητικές δυναμικές γραμμές με διαφορετική πυκνότητα.

Από τα μετρηθέντα ζεύγη τιμών του Πίνακα 4-1, παρουσιάζονται αυτά που έχουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, δηλαδή μέχρι τη συχνότητα των 10 kHz. Ενδεικτικά αναφέρονται και για συχνότητες διέγερσης 50 και 80 kHz.

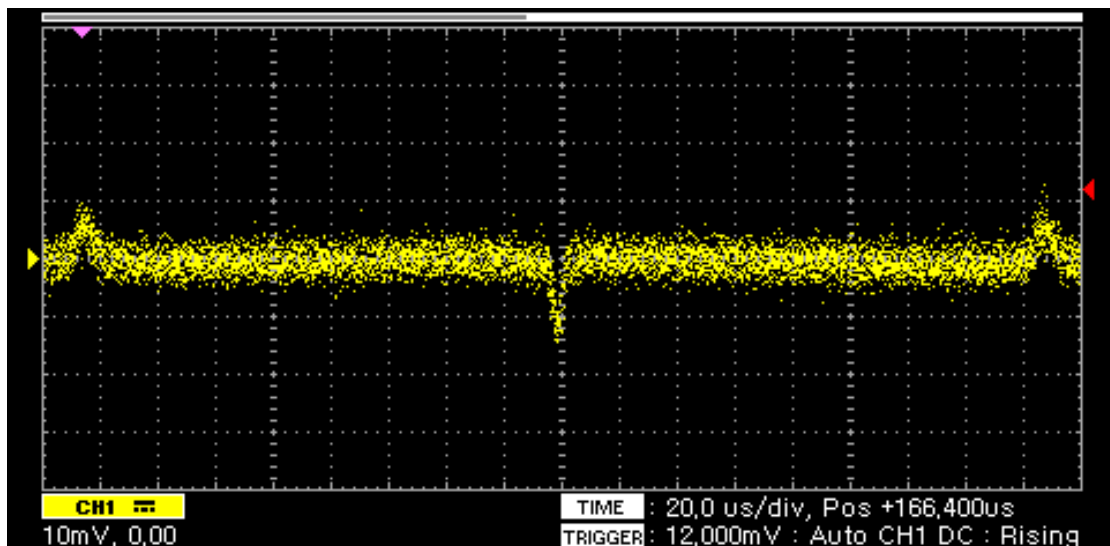
Συχνότητα διέγερσης 3 kHz



Σχήμα 4-6 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

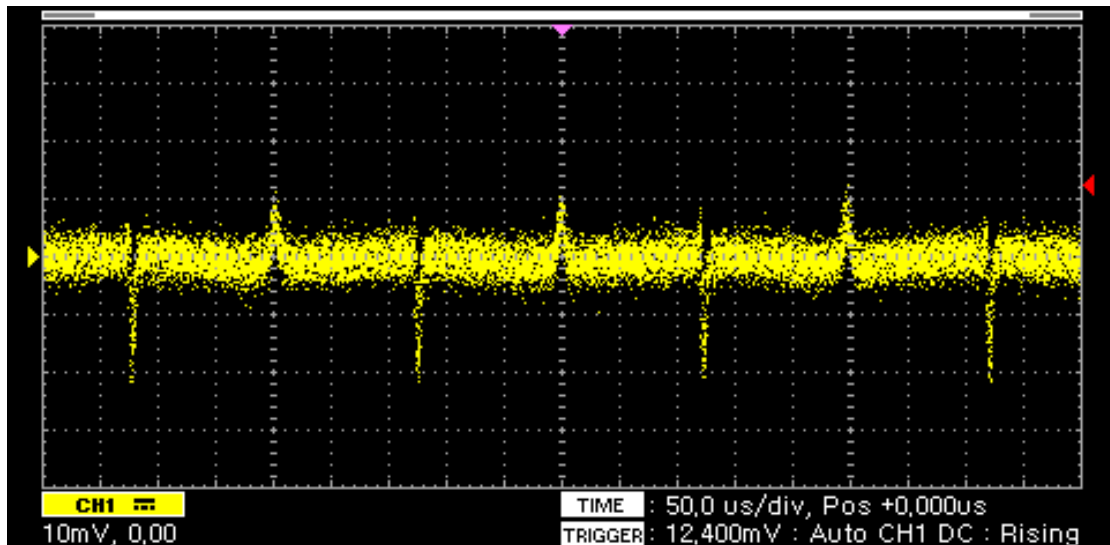


Σχήμα 4-7 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

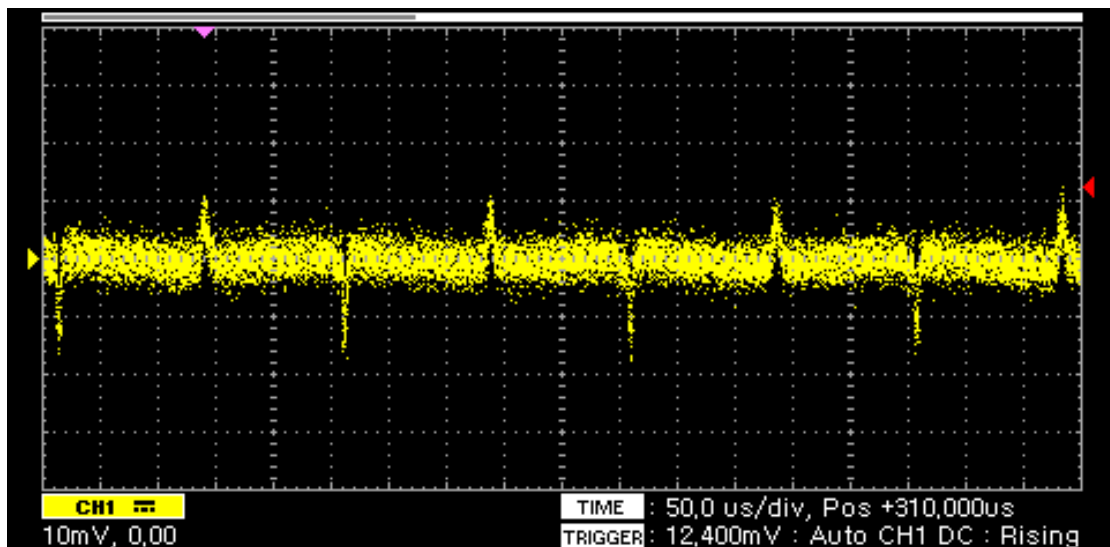


Σχήμα 4-8 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

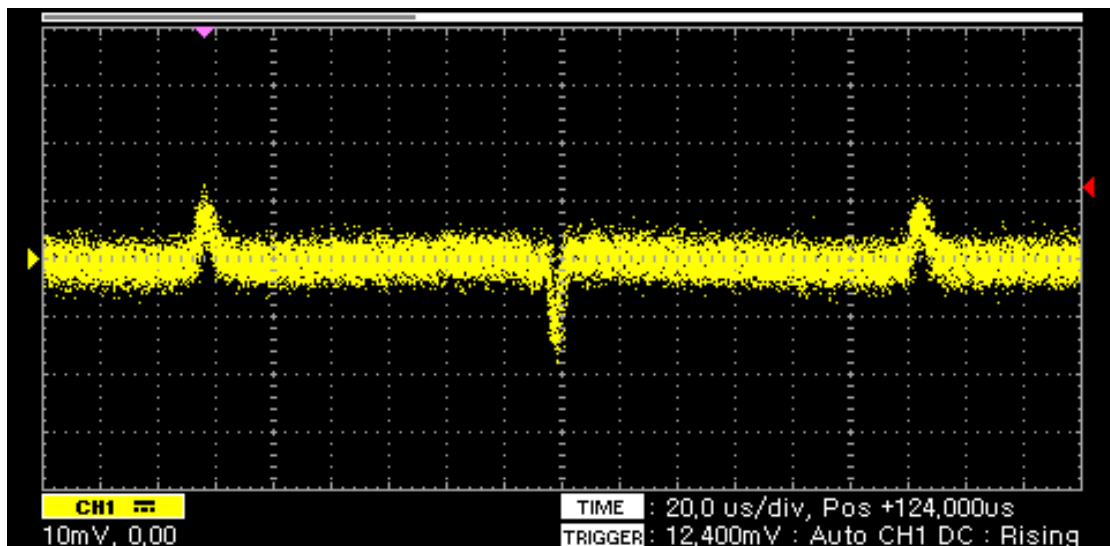
Συχνότητα διέγερσης 4 kHz



Σχήμα 4-9 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

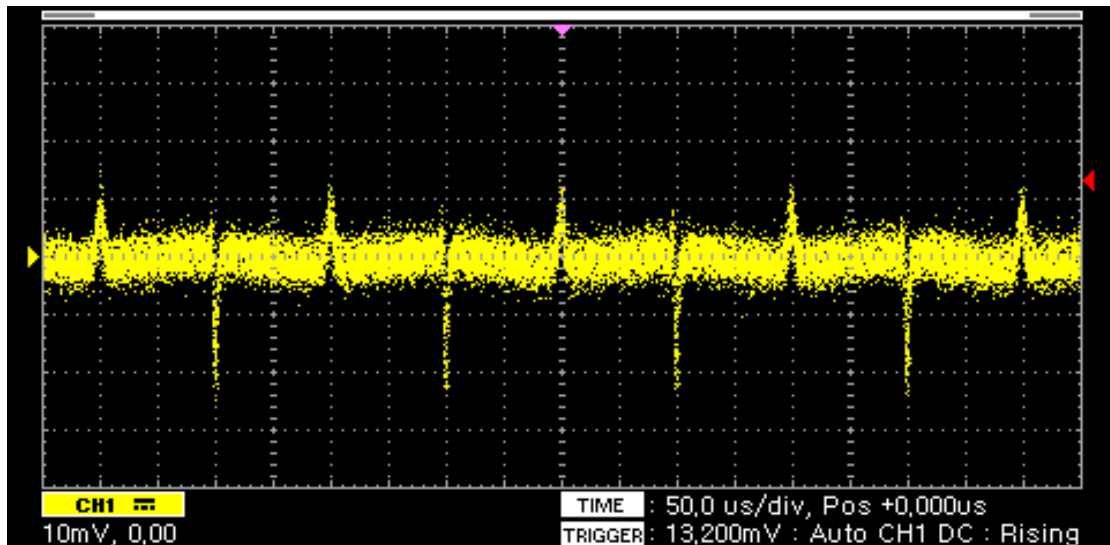


Σχήμα 4-10 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

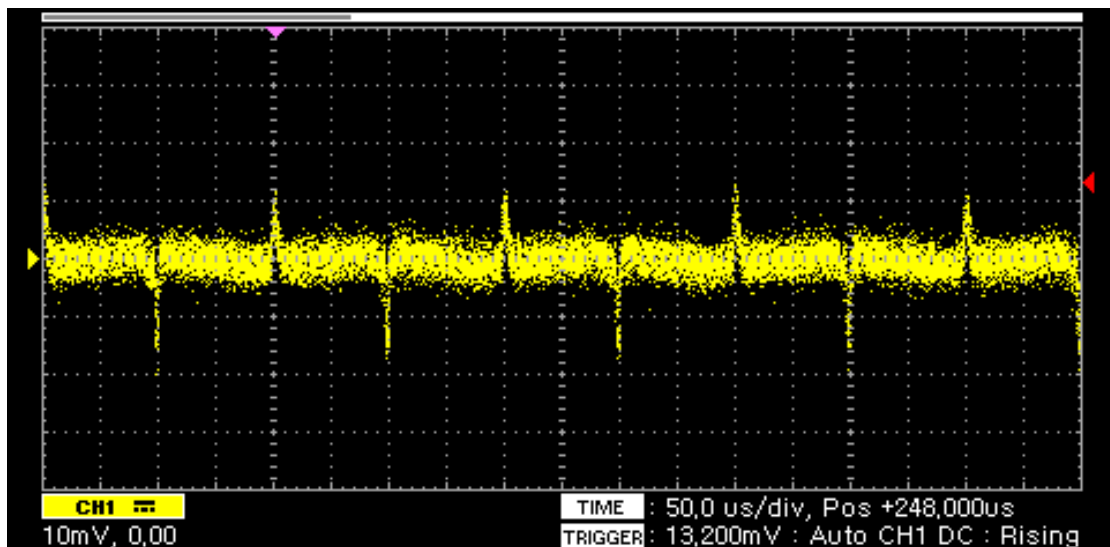


Σχήμα 4-11 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

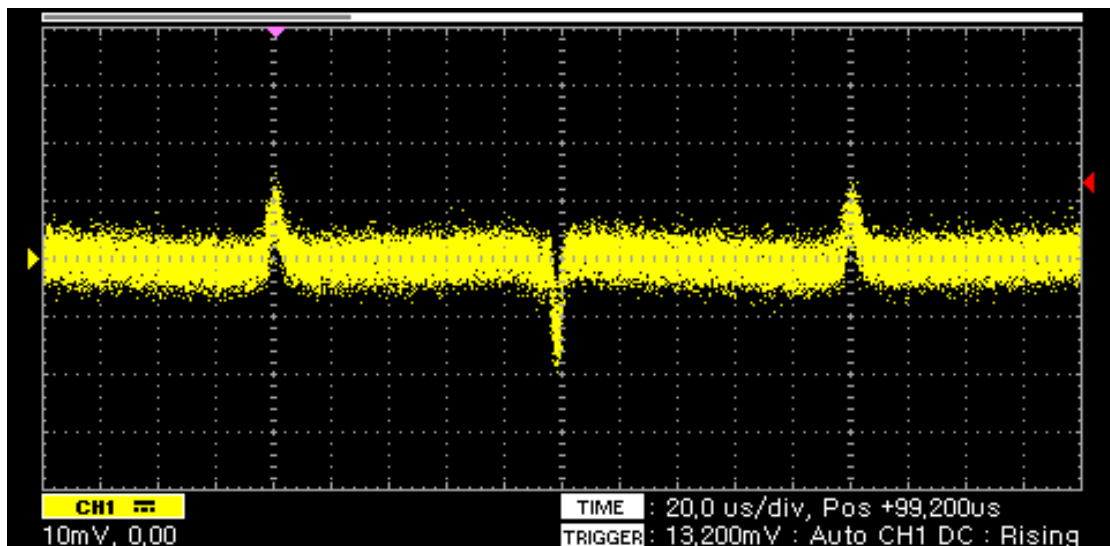
Συχνότητα διέγερσης 5 kHz



Σχήμα 4-12 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

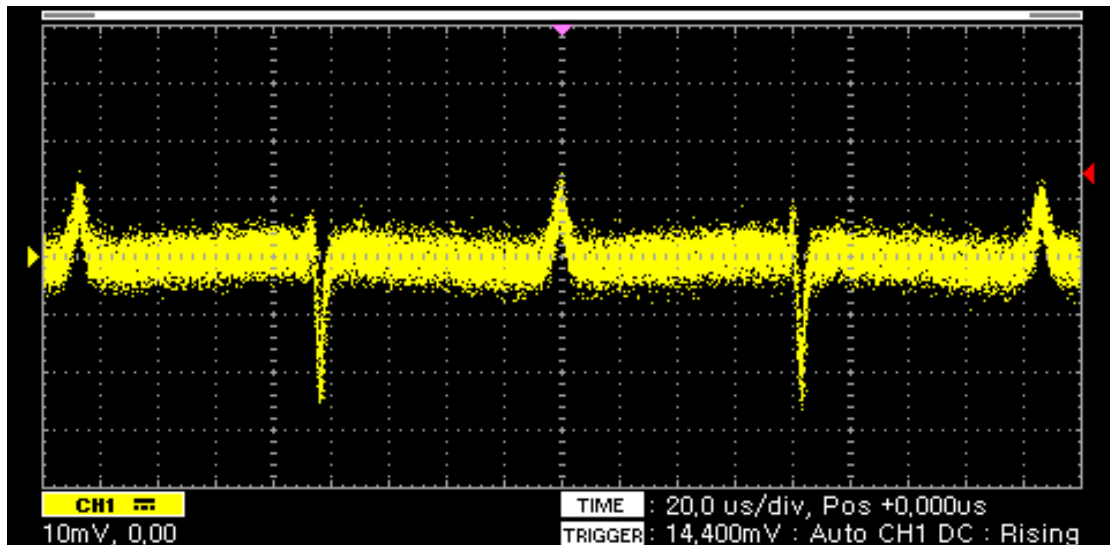


Σχήμα 4-13 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

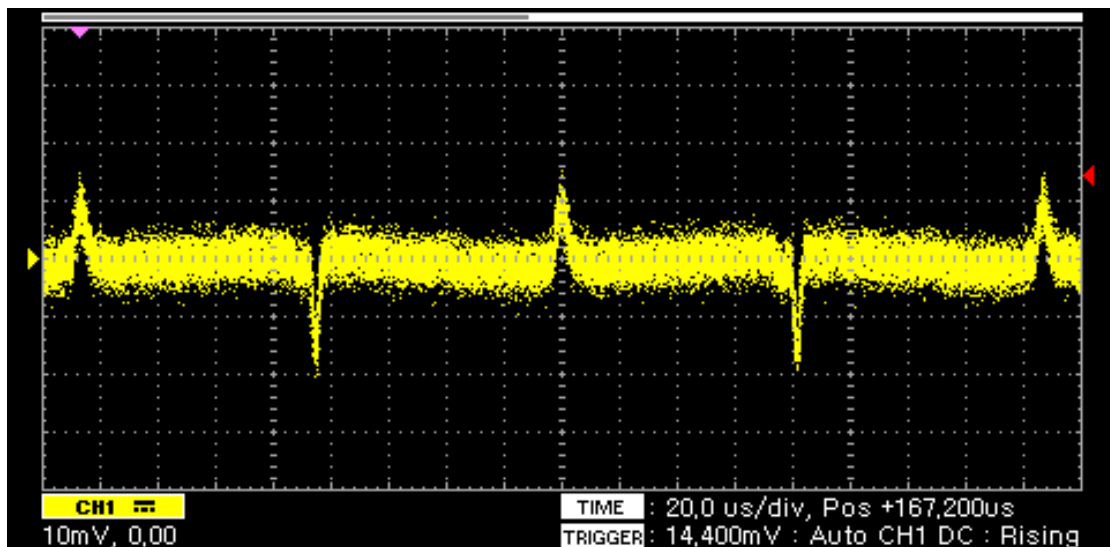


Σχήμα 4-14 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

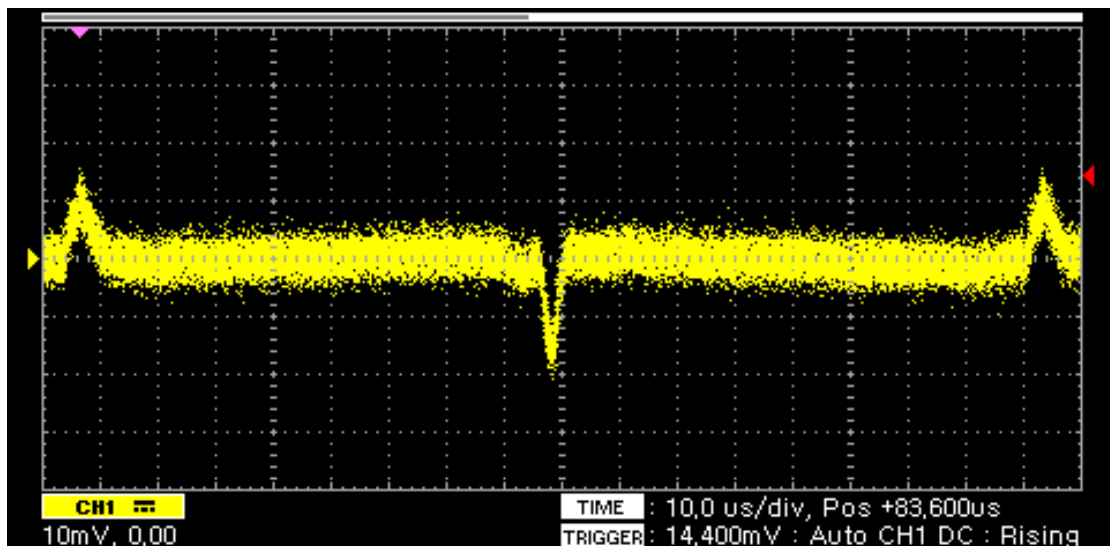
Συχνότητα διέγερσης 6 kHz



Σχήμα 4-15 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

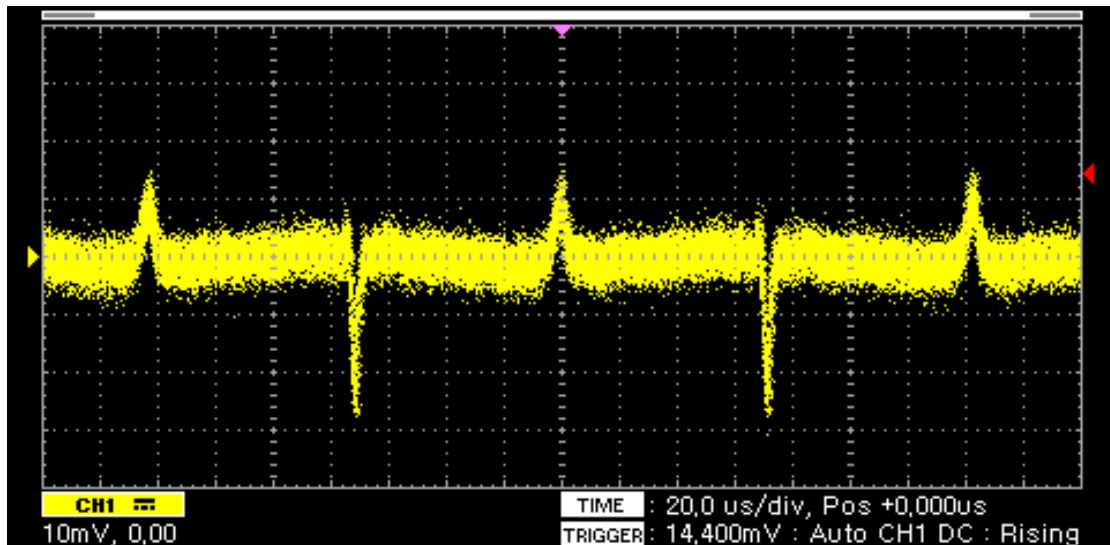


Σχήμα 4-16 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

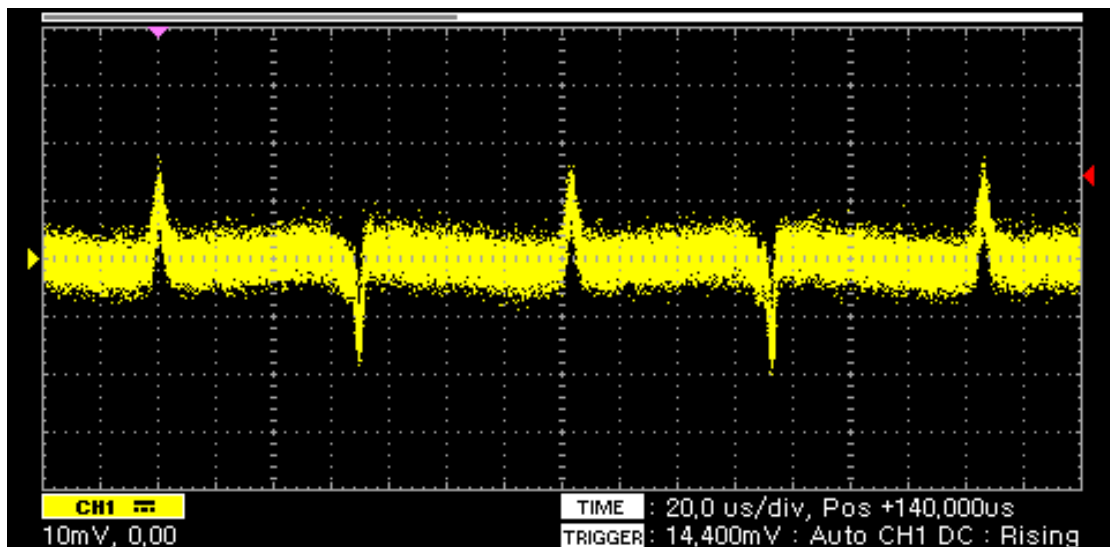


Σχήμα 4-17 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

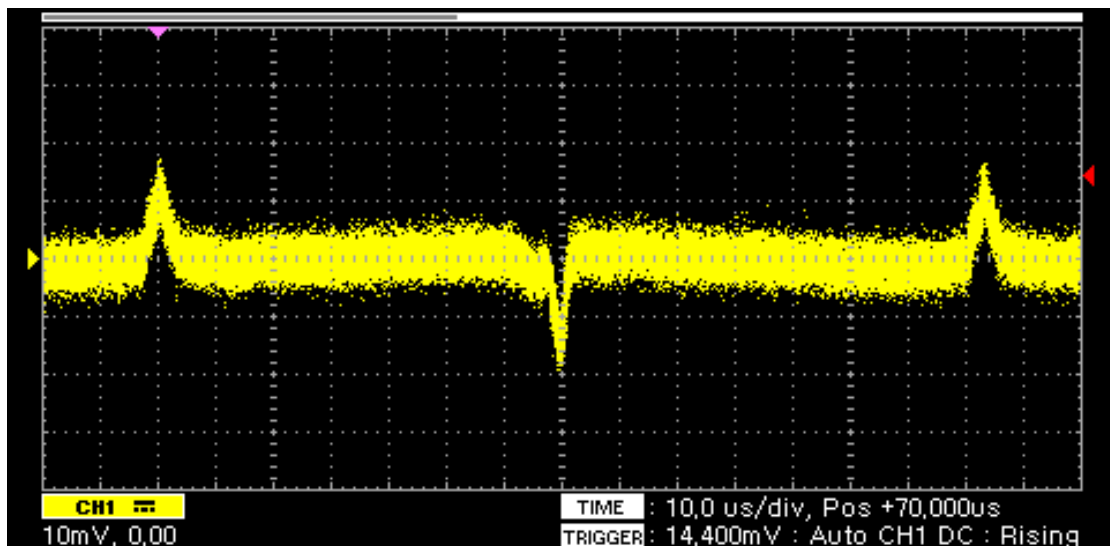
Συχνότητα διέγερσης 7 kHz



Σχήμα 4-18 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

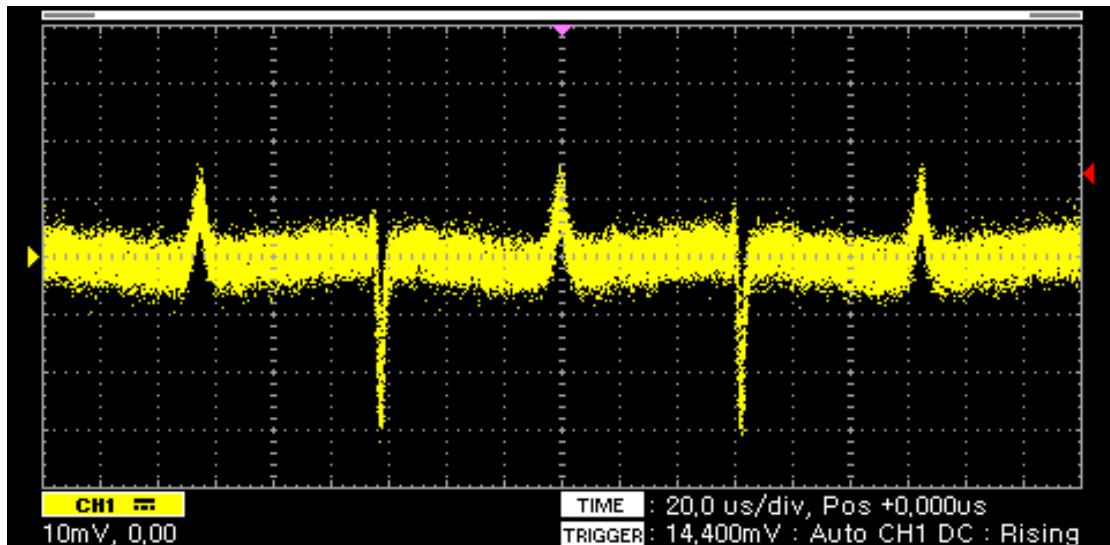


Σχήμα 4-19 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

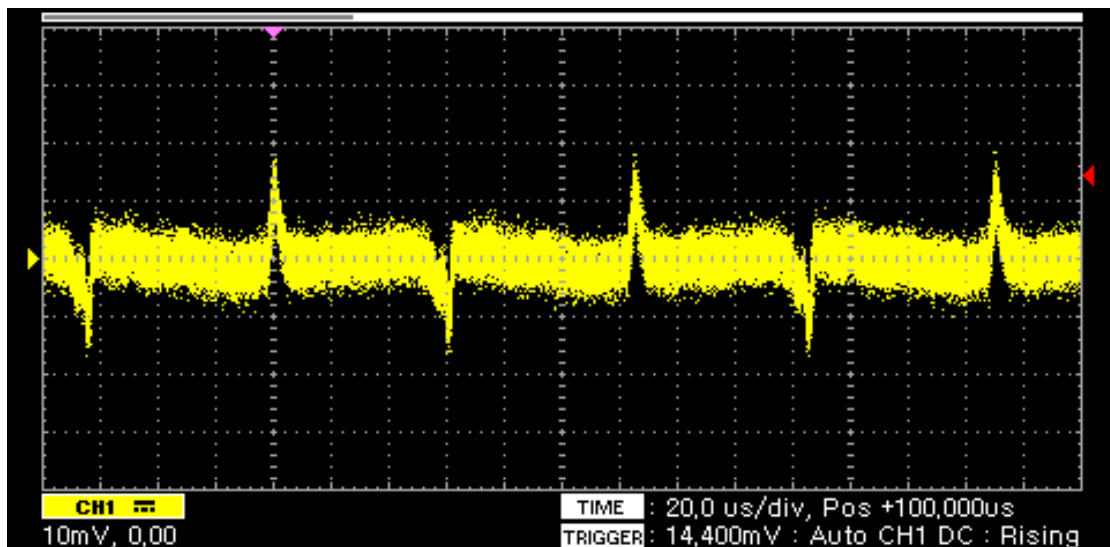


Σχήμα 4-20 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

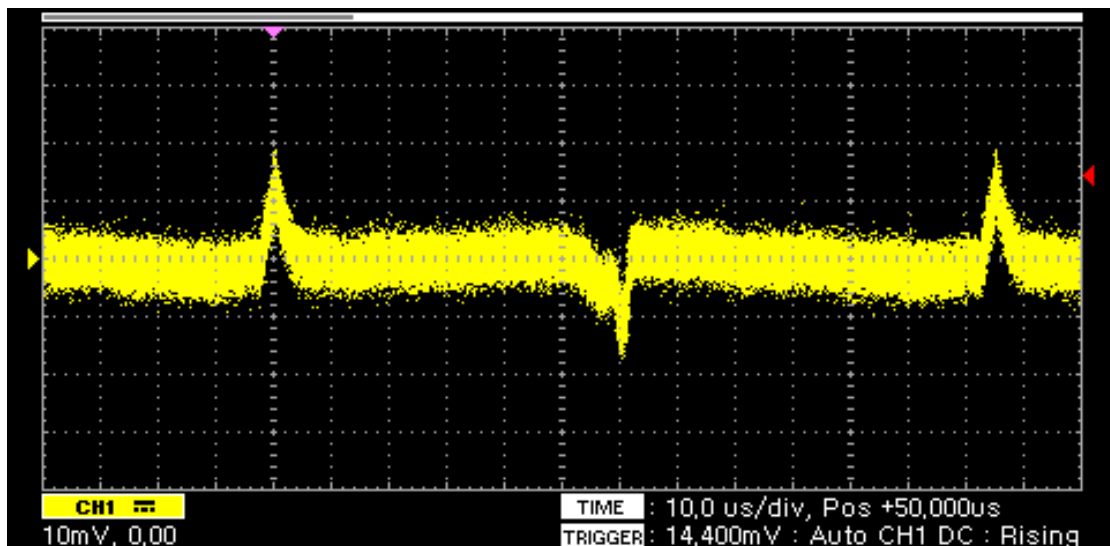
Συχνότητα διέγερσης 8 kHz



Σχήμα 4-21 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

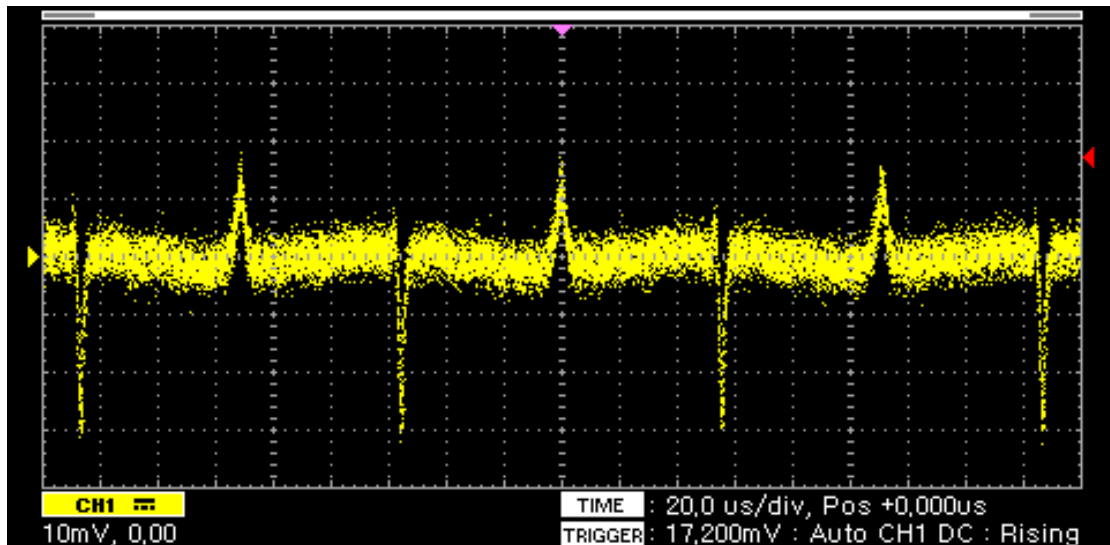


Σχήμα 4-22 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

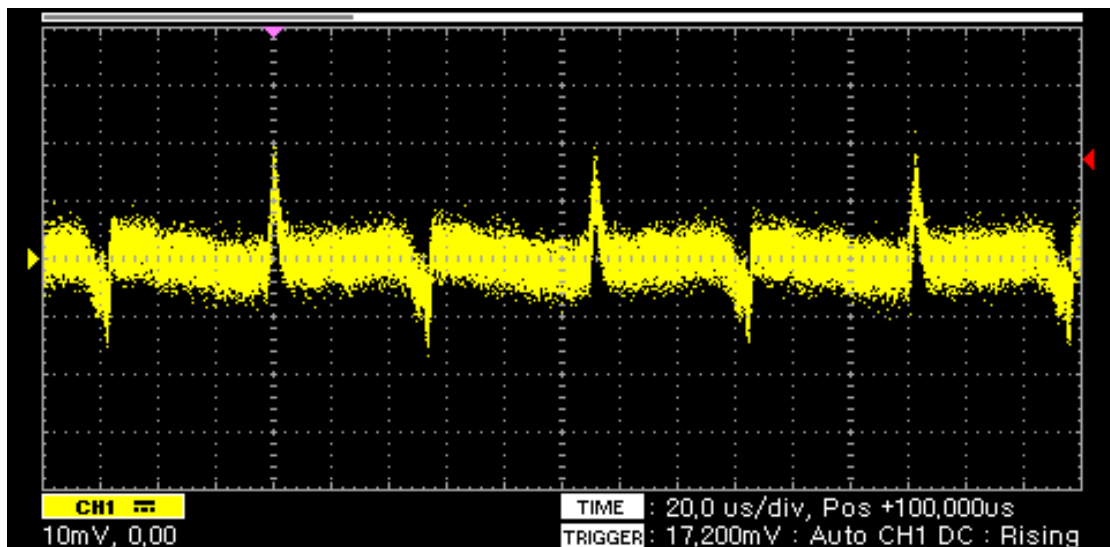


Σχήμα 4-23 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

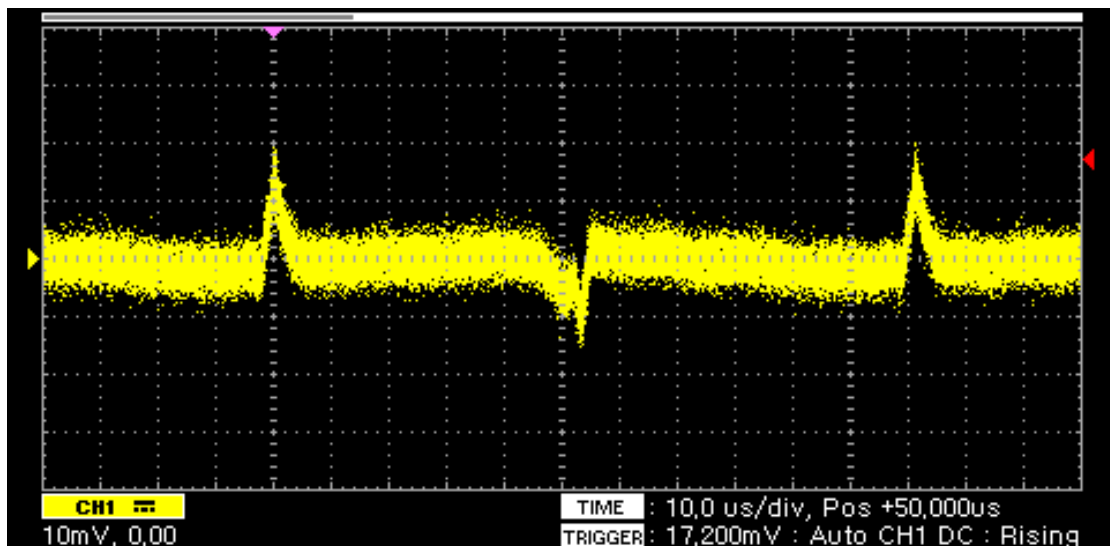
Συχνότητα διέγερσης 9 kHz



Σχήμα 4-24 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

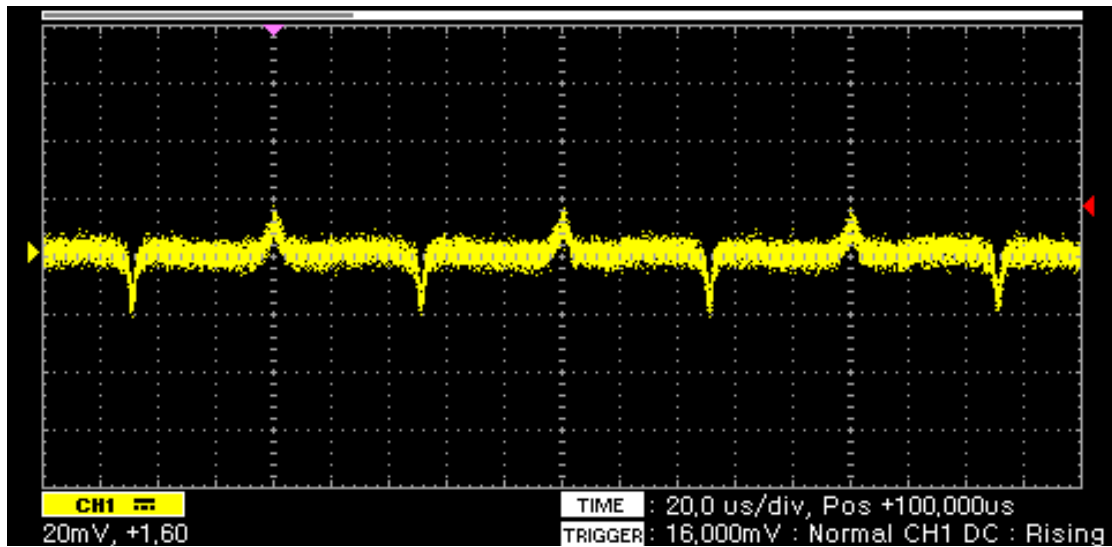


Σχήμα 4-25 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

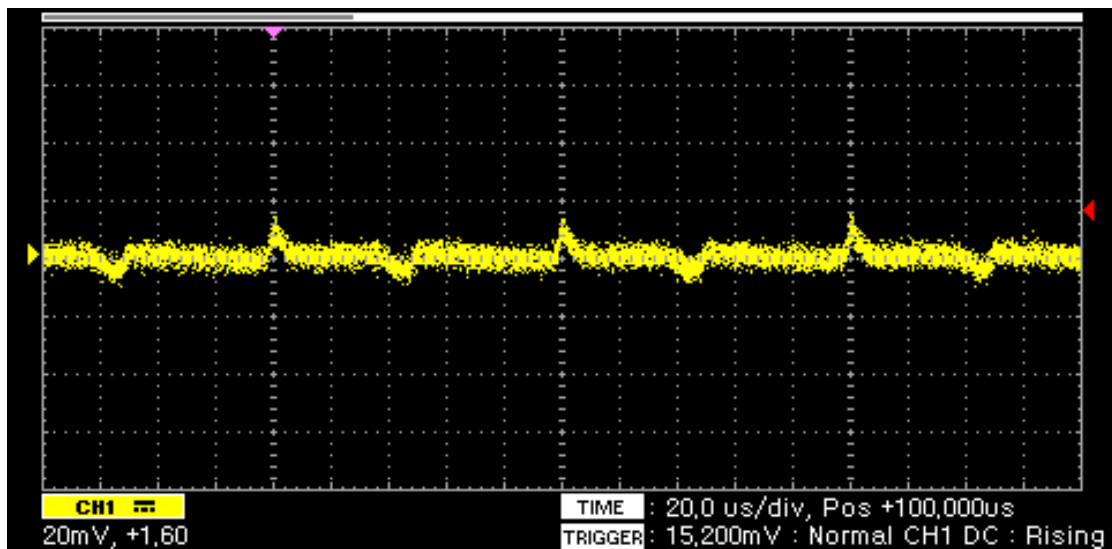


Σχήμα 4-26 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

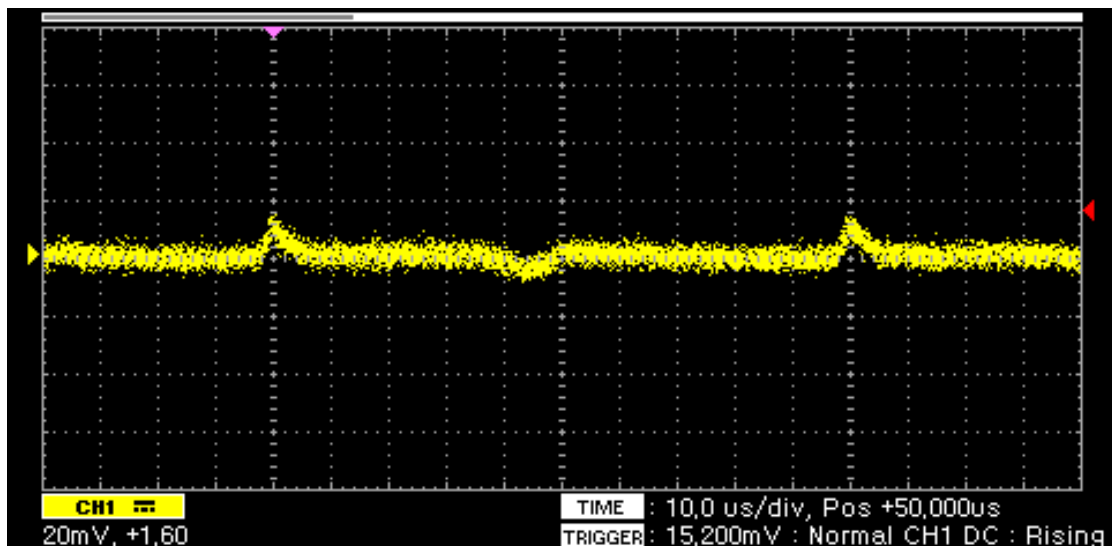
Συχνότητα διέγερσης 10 kHz



Σχήμα 4-27 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

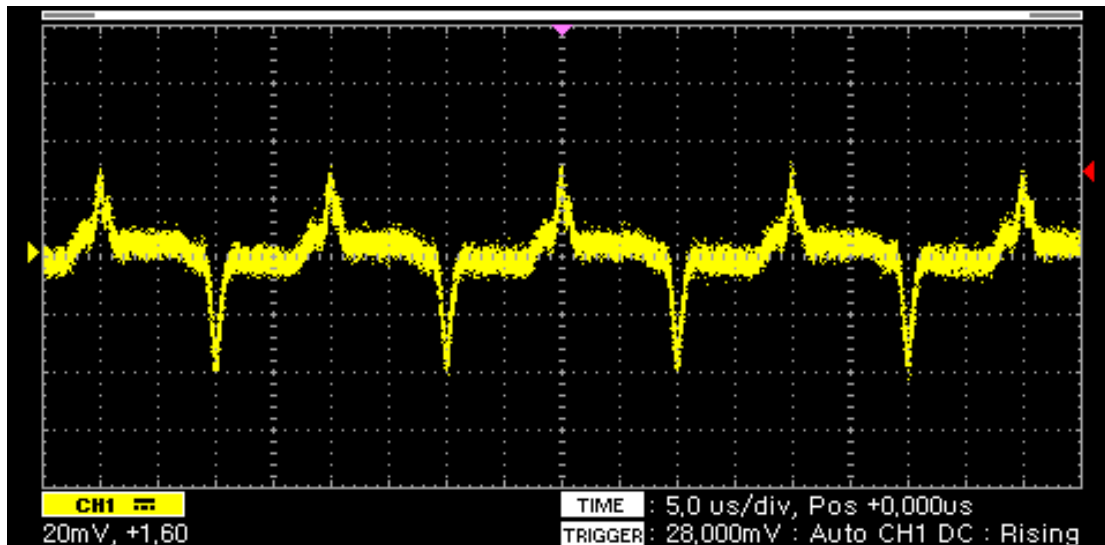


Σχήμα 4-28 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

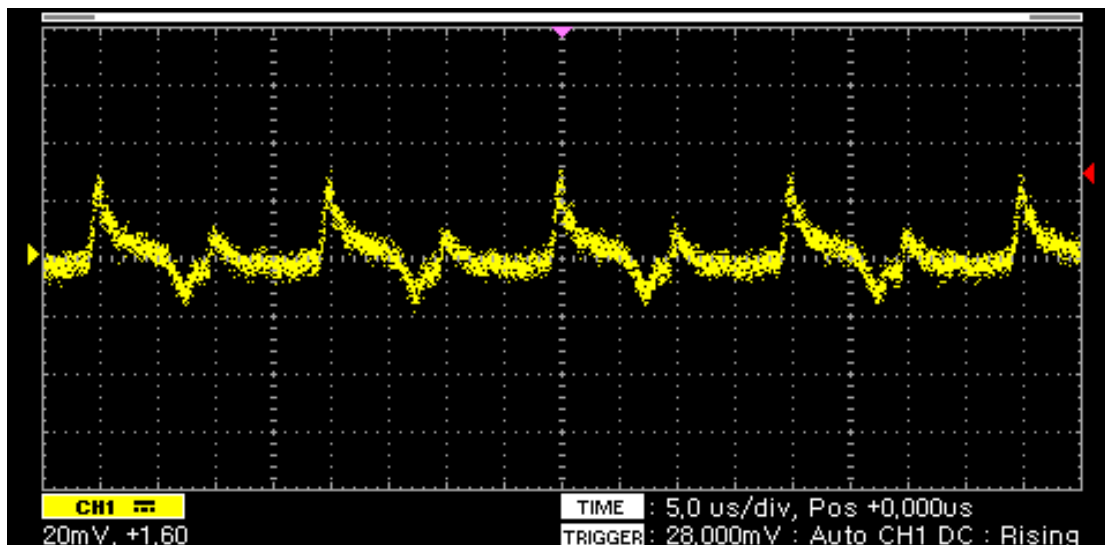


Σχήμα 4-29 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

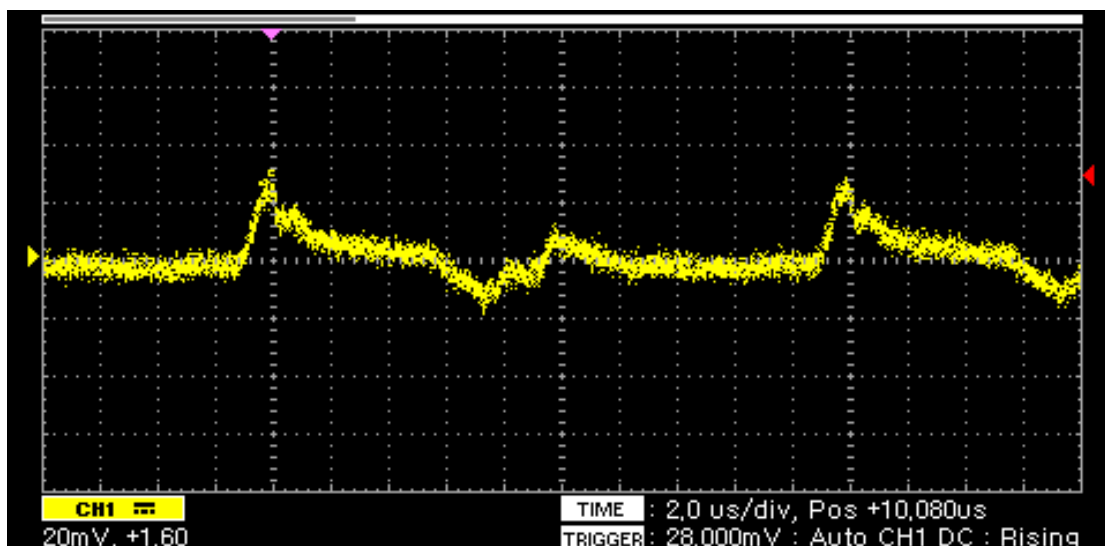
Συχνότητα διέγερσης 50 kHz



Σχήμα 4-30 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.

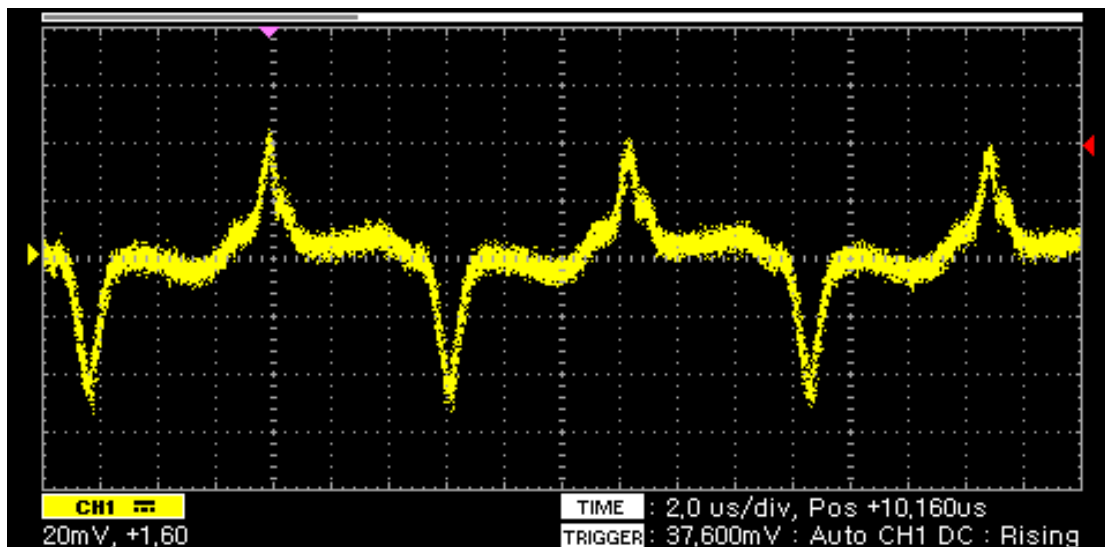


Σχήμα 4-31 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.

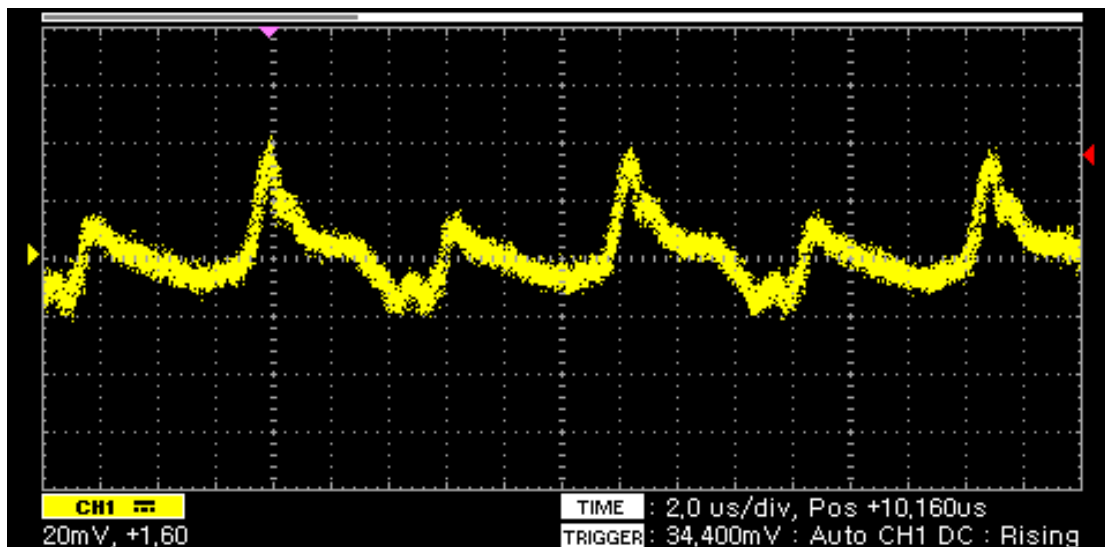


Σχήμα 4-32 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

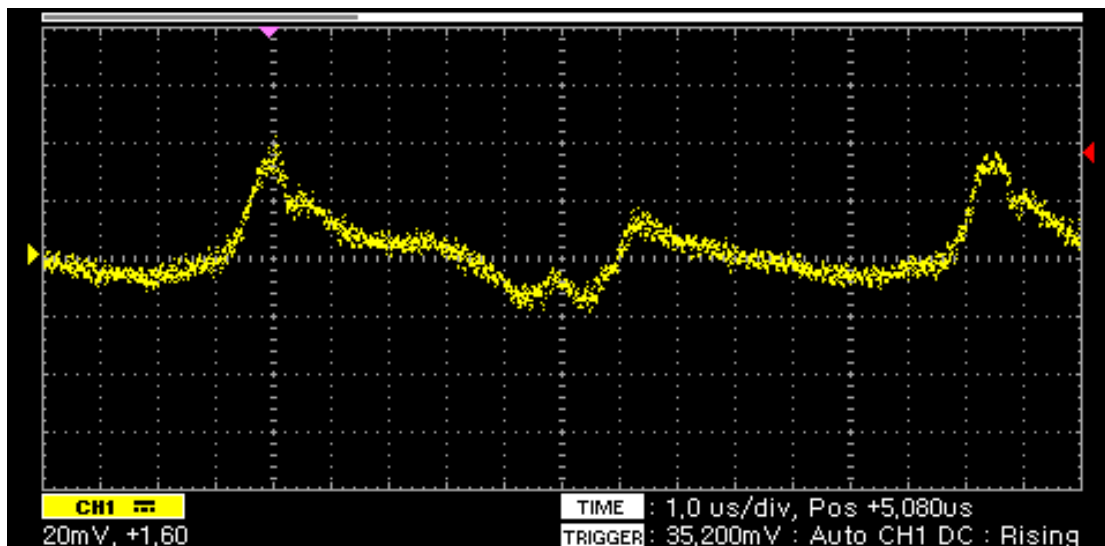
Συχνότητα διέγερσης 80 kHz



Σχήμα 4-33 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης.



Σχήμα 4-34 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα.



Σχήμα 4-35 Σήμα εξόδου πηνίου λήψης με εφαρμοζόμενη DC συνιστώσα σε μεγέθυνση.

5 Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, από τις εργαστηριακές μετρήσεις που έλαβαν μέρος, η διάταξη που υλοποιήθηκε μπορεί να ικανοποιήσει το σκοπό της, δηλαδή τη διακρίβωση μαγνητομέτρων

Η διαδικασία των μετρήσεων που διεξήχθησαν αποτελεί ουσιαστικά μία αρχή για τη διακρίβωση μαγνητικών αισθητήρων. Αποδείξαμε, ότι με την επιβολή κατάλληλης DC συνιστώσας μπορούμε να αντισταθμίσουμε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (κατά την κατακόρυφη διεύθυνση άρα κατ' επέκταση και στις τρεις συνιστώσες με κατάλληλη διάταξη), και επομένως να υπολογίσουμε το μέγεθός του. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια το σημείο 0 στην αρχή των αξόνων του διαγράμματος διακρίβωσης (zero point of calibration).

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι για τη διακρίβωση ενός μαγνητομέτρου δεν απαιτείται η μαγνητική του θωράκιση για την “απομόνωση” από τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, παρά μόνο ο εντοπισμός τους και ο υπολογισμός της έντασής τους.

Τέλος, βασικό μειονέκτημα της υλοποιηθείσας διάταξης είναι η ύπαρξη θορύβου και κατ' επέκταση η έλλειψη ενίσχυσης. Ο θόρυβος, σε γενικές γραμμές, αναφέρεται στην αστάθεια του σήματος εξόδου σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας και μπορεί να προέρχεται από το ίδιο το ηλεκτρονικό κύκλωμα (κατασκευαστικά χαρακτηριστικά), καθώς και από το μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται. Λόγω του ότι τα σήματα εξόδου των αισθητήρων είναι συνήθως ασθενή, η ύπαρξη θορύβου μπορεί να περιορίσει αρκετά την ευκρίνειά τους. Στις δοκιμές που εκτελέστηκαν, χαρακτηριστικό είναι ότι το σήμα κάτω από τα 3 kHz γινόταν πολύ ασθενές, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολη η λήψη σωστών μετρήσεων.

5.2 Μελλοντική εργασία

Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της διάταξης της παρούσας εργασίας είναι απαραίτητη η προσθήκη ηλεκτρονικών ελέγχου. Η ενίσχυση του σήματος εξόδου (τάσης εξόδου) μπορεί να γίνει με την προσθήκη ενός ενισχυτή υψηλών συχνοτήτων. Επίσης, η χρήση ενός ηλεκτρονικού φίλτρου μπορεί να μειώσει το θόρυβο, αποκόποντας τις μη απαραίτητες αρμονικές του σήματος. Τέλος, ένας μικροεπεξεργαστής, εκτός από τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (AD converter) και τη μέτρηση χρόνου (η ακρίβεια των μετρήσεων της διάταξης εξαρτάται από την ταχύτητα του κυκλώματος κωδικοποίησης χρόνου), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη διαδικασία της αυτοδιακρίβωσης.

Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να αποτελέσει πρότυπη διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων. Κάτι τέτοιο, όμως, προϋποθέτει τη χρήση πρότυπων συστημάτων για την ακριβή μέτρηση του χρόνου, την ακρίβεια ρεύματος και τη μέτρηση συχνότητας. Το Εθνικό πρότυπο μέτρησης του χρόνου είναι το δευτερόλεπτο (s) και ορίζεται ως η διάρκεια 9.192.631.770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη μετάβαση μεταξύ των δύο υπέρλεπτων επιπέδων της θεμελιώδους στάθμης ενέργειας του ατόμου του Καισίου 133. Η μέτρηση του χρόνου και της συχνότητας γίνεται μέσω κβαντικών φαινομένων, με τη χρήση τριών ατομικών πρωτευόντων προτύπων ρολογιών καισίου. Η ακρίβεια του χρόνου είναι της τάξης των 10 ns. Για τη συχνότητα, υφίστανται πρότυπα σήματα συχνότητας 1, 5 και 10 MHz, με βεβαιότητα της τάξης του 10^{-14} [18, 19]. Για τη μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού ρεύματος, ισχύει ότι το αμπέρ (A) είναι το σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα που εάν διαρρέει δύο ευθείς παράλληλους αγωγούς απείρου μήκους και αμελητέας κυκλικής διατομής, οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση ενός μέτρου ο ένας από τον άλλο, στο κενό, παράγει μεταξύ τους μια δύναμη ίση με $2 \cdot 10^{-7}$ N ανά μέτρο μήκους. Λόγω της δυσκολίας να κατασκευαστεί η πειραματική διάταξη που θα υλοποιούσε με μεγάλη ακρίβεια το αμπέρ, εφαρμόζονται έμμεσες μέθοδοι υλοποίησής του, που βασίζονται στα κβαντικά φαινόμενα της μονάδας μέτρησης της ηλεκτρικής τάσης (V) (Πρότυπο Τάσης Josephson, τιμές 1V και 10V) και στη μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης (Ω) (κβαντικό φαινόμενο Hall) με αβεβαιότητα 1×10^{-7} [18, 19].

Βιβλιογραφία

- [1] J.M.D.Coe, "*Magnetism and Magnetic Materials*," Trinity College, Dublin: Cambridge University Press, 2009.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field
- [3] E.Hristoforou, "*Magnetic Effects in Sensing Applications*," NTUA, Athens, pp. 4-9.
- [4] Steven A.Macintyre, "*Magnetic Field Measurement*," 2009
<http://engineering.dartmouth.edu/dartmag/docs/macintyre.pdf>
- [5] Πέτρου Ιωάννης (2009), Διδακτορική Διατριβή: "*Ανάπτυξη, χαρακτηρισμός και βελτιστοποίηση μαγνητικών λεπτών υμενίων για εφαρμογή σε αισθητήρα μαγνητικού πεδίου υψηλής ευαισθησίας*" ΕΜΠ, Αθήνα
- [6] A.L.Herrera-May, L.A.Aguilera-Corres, P.J.Garcia-Ramirez, E.Manjarrez (2009), Resonant Magnetic Field Sensors Based on MEMs Technology "*Sensors 2009,9*" pp 7786-7788, www.mdpi.com/journal/sensors
- [7] J.Malmivuo, R.Plonsey, "*Bioelectromagnetism*" New York, Oxford University Press, 1995, <http://www.bem.fi/book/12/12x/1201x.htm>
- [8] P.K.Muduli "Ex situ SQUID magnetometry" Paul-Drude-Institute for solid state electronics, Berlin, Germany,
http://www.geocities.ws/pranab_muduli/squid.html
- [9] Ozge Zorlu (2008), Διδακτορική Διατριβή: "*Orthogonal Fluxgate Type Magnetic Microsensors with Wide Linear Operation Range*" EPFL, Lausanne
- [10] Pavel Ripka, "*Magnetic Sensors and Magnetometers*", Boston, Artech House, 2001.
- [11] M.Yang, J.Dai, C.Zhou, D.Jiang (2009), "*Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials*", OSA Publishing, Optics Express, vol 17, No 23, pp 20777-20782.
- [12] R.M.Silva, H.Martins, I.Nascimento, J.M.Baptista, A.L.Ribeiro, J.L.Santos, P.Jorge, O.Fraza (2012), "*Optical Current Sensors for High Power Systems: A Review*", Applied Sciences, vol 2, No 3, pp 602-628.
- [13] Pavel Ripka, Alois Tipek (2007), "*Modern Sensors Handbook*", London UK, ISTE.
- [14] Jan G.Korvink, Oliver Paul (2006), "*MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*", Norwich NY, USA, William Andrew Publishing, pp 484-494.
- [15] Pavel Ripka (1992), "*Review of Fluxgate Sensors*", Sensors and Actuators, vol A, No 33, pp 129-141.
- [16] Παναγιώτης Δημητρόπουλος (2001), Διδακτορική Διατριβή: "*Μικροαισθητήρες Fluxgate: σχεδιασμός, βελτιστοποίηση και εφαρμογές*", ΕΜΠ, Αθήνα.

- [17] E. Hristoforou (2002), "*Magnetic effects in physical sensor design and development*", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, pp 245-260
- [18] <http://www.eim.gr/μετρολογία/μονάδες-μέτρησης>
- [19] BIPM, "*practical realization of the definition of the unit of time*", 2013,
"*Practical realization of units for electrical quantities*", 2013
<http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>