



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων
και διατάξεων χαρακτηρισμού των,
με χρήση μαγνητικών φαινομένων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σπυρίδων Κ. Αγγελόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων
και διατάξεων χαρακτηρισμού των, με χρήση μαγνητικών φαινομένων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σπυρίδων Αγγελόπουλος

Συμβουλευτική επιτροπή: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Ιωάννης Γκόνος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Νοεμβρίου 2019.

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Γκόνος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημήτριος Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημήτριος Τσουκαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αφροδίτη Κτενά
Καθηγήτρια Ε.Κ.Π.Α.



Σπυρίδων Κ. Αγγελόπουλος

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

Copyright © Σπυρίδων Αγγελόπουλος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Οι μαγνητικοί αισθητήρες αποτελούν χρήσιμα εργαλεία, καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα ανίχνευσης ή και μέτρησης του μαγνητικού πεδίου. Συναντώνται σε πολλές εφαρμογές, σε τομείς όπως οι επιστήμες, η βιομηχανία και οι μεταφορές. Η σχεδίαση και η ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων ποικίλλουν αναλόγως των επιθυμητών χαρακτηριστικών και του πεδίου εφαρμογής. Όμως, απαραίτητο στάδιο σε κάθε περίπτωση αποτελεί η χρήση μιας διάταξης διακρίβωσης, με σκοπό την αρχική βαθμονόμηση των αισθητήρων, αλλά και τον μετέπειτα έλεγχο της ορθής λειτουργίας τους.

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, δημιουργήθηκε μία διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων, αποτελούμενη από μία τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου για την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου, ένα σύστημα επιβολής του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου και τέλος, τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά μέτρησης και τροφοδοσίας. Η αρχή λειτουργίας της αναπτυχθείσας διάταξης βασίζεται στη μέτρηση μιας φυσικής ποσότητας και συγκεκριμένα του χρόνου. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αποτελέσει δευτερεύον ή και πρωτεύον πρότυπο διακρίβωσης.

Στη συνέχεια, η διάταξη χρησιμοποιήθηκε για τη διακρίβωση μαγνητικών αισθητήρων που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν δύο μαγνητόμετρα τύπου Fluxgate διαφορετικών τοπολογιών, προσφέροντας υψηλή ευαισθησία κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Ακόμη, αναπτύχθηκαν δύο διατάξεις Μη Καταστροφικού Ελέγχου φερρομαγνητικών υλικών. Οι διατάξεις περιλαμβάνουν τα απαιτούμενα ηλεκτρονικά για τη διεξαγωγή των μετρήσεων και την αποστολή των δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία, ενώ μπορούν να είναι φορητές, ώστε να χρησιμοποιούνται για τον επί τόπου έλεγχο σε πραγματικό χρόνο.

Λέξεις-κλειδιά: Μαγνητικός αισθητήρας, Διακρίβωση μαγνητομέτρου, Αισθητήρας πύλης-ροής, Μη Καταστροφικός Έλεγχος, Σιδηρομαγνητικό υλικό.

Abstract

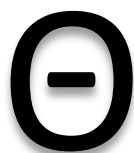
Magnetic sensors are useful tools, offering the ability to detect and measure the magnetic field. They can be found in many applications in the fields of sciences, industry and transport. The design and development of magnetic sensors vary according to the desired characteristics and applications. However, the use of a calibration device, in order to initially calibrate the sensors and verify their proper functionality, is a necessary step in any case.

As part of this PhD thesis, a magnetometer calibration device was developed, consisting of a magnetic field sensing element, an arrangement that produces the counter-acting magnetic field and finally, the required electronics for measurement and power supply. The operating principle of the developed device is based on measuring a physical quantity, in particular, time. In this way, it can be developed as a secondary, or even primary calibration standard.

Afterwards, the device was used to calibrate the magnetic sensors that were designed and developed. Specifically, two Fluxgate-type magnetometers of different topologies were developed, providing high-sensitivity magnetic field measurements. Two devices for Non-Destructive Testing of ferromagnetic materials have also been developed. The devices include the electronics required to perform the measurements and send the data for further processing. They can be portable, in order to be used for real-time on-field measurements.

Keywords: *Magnetic sensor, Magnetometer calibration, Fluxgate sensor, Non-Destructive Testing, Ferromagnetic material.*

Πρόλογος – Ευχαριστίες



Θέμα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής αποτέλεσε η σχεδίαση και η ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων, καθώς και της διάταξης που θα επιτρέπει την αποτελεσματική τους διακρίβωση. Η Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της ήταν η σχεδίαση και η ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων, καθώς και η ανάπτυξη μιας διάταξης για τη διακρίβωσή τους. Στόχος ήταν να δημιουργηθούν πλήρεις διατάξεις, με μικρό μέγεθος, αλλά και χαμηλό κόστος ανάπτυξης, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε ποικίλλες εφαρμογές.

Στο Κεφάλαιο 1 πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις υφιστάμενες τεχνικές μαγνητικής θωράκισης και αντιστάθμισης του μαγνητικού πεδίου, στοιχεία απαραίτητα για τη διακρίβωση των μαγνητικών αισθητήρων. Επίσης, αναλύονται οι υπάρχοντες τύποι μαγνητικών αισθητήρων, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Τέλος, περιγράφονται οι κύριες μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου που σχετίζονται με τα μαγνητικά υλικά, καθώς και οι τρόποι διεξαγωγής των μετρήσεων.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η ανάπτυξη της διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων που δημιουργήθηκε στο Εργαστήριο, με σκοπό τη χρήση της στους αναπτυχθέντες μαγνητικούς αισθητήρες ή και σε άλλους υφιστάμενους μαγνητικούς αισθητήρες. Περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο του τρόπου διεξαγωγής των μετρήσεων, η ανάπτυξη της κατάλληλης τοπολογίας ανίχνευσης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, η κατασκευή ενός σωληνοειδούς για την επιβολή του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου, καθώς και η διεξαγωγή δοκιμαστικών μετρήσεων. Στη συνέχεια, αναλύεται η σχεδίαση, η προσομοίωση και η κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, με σκοπό την αυτοματοποίηση της διαδικασίας διεξαγωγής μετρήσεων και επιβολής του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η σχεδίαση και η ανάπτυξη τεσσάρων διατάξεων μαγνητικών αισθητήρων, για τη διακρίβωση των οποίων χρησιμοποιήθηκε η αναπτυχθείσα διάταξη. Οι δύο πρώτες διατάξεις περιλαμβάνουν αισθητήρες τύπου Fluxgate διαφορετικών τοπολογιών. Η τρίτη διάταξη προσφέρει τη δυνατότητα καταγραφής του βρόχου υστέρησης μαγνητικών υλικών, με σκοπό την εύρεση των ιδιοτήτων τους. Τέλος, η τέταρτη διάταξη βασίζεται στο φαινόμενο Hall και έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της μαγνητικής διαπερατότητας των μαγνητικών υλικών και συνεπώς, την ανίχνευση των επιβαλλόμενων μηχανικών τάσεων.

Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή της Διδακτορικής Διατριβής, ενώ παρατίθενται και προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση των διατάξεων.

Τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την έρευνα γύρω από το αντικείμενο της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής, καθώς και οι προγραμματιστικοί κώδικες που αναπτύχθηκαν για την εκτέλεση των μετρήσεων και τον έλεγχο των δημιουργηθέντων αισθητήρων.

Για την ολοκλήρωση αυτής της Διδακτορικής Διατριβής θα ήθελα, κατ' αρχάς, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε, η βοήθεια που μου παρείχε, καθώς και ο χρόνος που αφιέρωσε για την καθοδήγησή μου και την παροχή πολύτιμων συμβουλών, υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της Διδακτορικής Διατριβής.

Ευχαριστώ, επίσης, τα μέλη της συμβουλευτικής και εξεταστικής επιτροπής για τις συμβουλές και υποδείξεις τους, οι οποίες συνέβαλαν στη βελτίωση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής.

Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητήριων του Ε.Μ.Π. για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλα αυτά τα έτη.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract	3
Πρόλογος – Ευχαριστίες	5
Πίνακας περιεχομένων	7
Ευρετήριο Σχημάτων.....	11
Ευρετήριο Πινάκων	17
Ευρετήριο ακρωνυμίων	19
<i>/</i> Βιβλιογραφική ανασκόπηση	21
1.1 Εισαγωγή	21
1.2 Μαγνητική θωράκιση	22
1.2.1 Εισαγωγή	22
1.2.2 Παθητική μαγνητική θωράκιση.....	22
1.2.3 Ενεργητική αντιστάθμιση πεδίου	25
1.3 Τύποι μαγνητικών αισθητήρων.....	29
1.3.1 Εισαγωγή	29
1.3.2 Αισθητήρες SQUID.....	30
1.3.3 Αισθητήρες Fluxgate.....	31
1.3.4 Αισθητήρες MDL.....	33
1.3.5 Αισθητήρες AMR και GMR	35
1.3.6 Αισθητήρες GMI	36
1.3.7 Αισθητήρες Hall	37
1.4 Μη Καταστροφικός Έλεγχος Υλικών.....	41
1.4.1 Εισαγωγή	41
1.4.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου μαγνητικών υλικών.....	42
1.4.3 Ηλεκτρονικά κυκλώματα μετρήσεων	49

2	Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων	51
2.1	Εισαγωγή	51
2.2	Αρχή λειτουργίας.....	52
2.3	Ανάπτυξη τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου.....	55
2.4	Θεωρητικοί υπολογισμοί	56
2.4.1	Σχέση χρονικής διαφοράς για ημιτονοειδές πεδίο.....	56
2.4.2	Σχέση χρονικής διαφοράς για τριγωνικό πεδίο	59
2.5	Κατασκευή σωληνοειδούς	63
2.6	Μετρήσεις μαγνητικού πεδίου	67
2.7	Ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών	68
2.7.1	Εισαγωγή.....	68
2.7.2	Σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης	68
2.7.3	Σχεδίαση πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης	70
2.7.4	Κατασκευή πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης.....	72
2.7.5	Ανάπτυξη αλγορίθμου.....	77
2.7.6	Διεξαγωγή μετρήσεων.....	78
2.8	Ανάπτυξη προσαρμοστικής διάταξης μέτρησης.....	83
2.8.1	Προσομοίωση λειτουργίας ηλεκτρονικού κυκλώματος	86
2.8.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	87
2.9	Πλακέτα ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	89
2.9.1	Κατασκευή της πλακέτας του ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	89
2.9.2	Δοκιμή του νέου ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	92
2.10	Σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου	97
2.10.1	Εισαγωγή	97
2.10.2	Ανάπτυξη αλγορίθμου αυτομάτου ελέγχου	98
2.10.3	Έλεγχος τροφοδοσίας συστήματος αντιστάθμισης	99
2.11	Χρήση της αναπτυχθείσας διάταξης διακρίβωσης	100
3	Ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων	105
3.1	Εισαγωγή	105
3.2	1 ^η τοπολογία μαγνητομέτρου Fluxgate	106

3.2.1	Ανάπτυξη 1 ^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate	106
3.2.2	Διακρίβωση 1 ^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate	107
3.3	2 ^η τοπολογία μαγνητομέτρου Fluxgate	110
3.3.1	Ανάπτυξη 2 ^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate	110
3.3.2	Διακρίβωση 2 ^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate	115
3.3.3	Ανάπτυξη ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης.....	118
3.3.4	Κατασκευή ανιχνευτή κορυφών.....	120
3.3.5	Διεξαγωγή μετρήσεων.....	121
3.4	Ανάπτυξη διάταξης καταγραφής βρόχου υστέρησης.....	125
3.4.1	Εισαγωγή	125
3.4.2	Σχεδίαση διάταξης καταγραφής βρόχου υστέρησης.....	126
3.4.3	Αρχή λειτουργίας.....	127
3.4.4	Σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	128
3.4.5	Ανάπτυξη διάταξης.....	130
3.4.6	Διεξαγωγή μετρήσεων.....	131
3.4.7	Σχολιασμός λειτουργίας της διάταξης	134
3.5	Ανάπτυξη διάταξης προσδιορισμού μαγνητικής διαπερατότητας	134
3.5.1	Εισαγωγή	134
3.5.2	Αρχή λειτουργίας.....	136
3.5.3	Σχεδίαση διάταξης.....	137
3.5.4	Κατασκευή στοιχείων διάταξης.....	143
3.5.5	Ανάπτυξη αλγορίθμων	148
3.5.6	Διεξαγωγή μετρήσεων.....	158
3.5.7	Αποτελέσματα	159
3.5.8	Ανάπτυξη διάταξης συγκομιδής ενέργειας.....	163
4	Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία	167
4.1	Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων.....	167
4.2	Ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων	170
5	Βιβλιογραφία	177

6	Παράρτημα	191
6.1	Αλγόριθμος υπολογισμού μαγνητικού πεδίου	191
6.2	Αλγόριθμος μέτρησης και αυτομάτου ελέγχου	192
6.3	Αλγόριθμος μέτρησης και εκπομπής διάταξης αισθητήρων Hall.....	195
6.4	Αλγόριθμος λήψης διάταξης αισθητήρων Hall.....	199
7	Extended Abstract.....	203
7.1	Design and Development of a New Magnetometer Calibration Device .	203
7.1.1	Introduction.....	203
7.1.2	Operating Principle.....	205
7.1.3	Development of the Magnetometer Calibration Device.....	206
7.1.4	Experimental Results and Discussion	209
7.1.5	Conclusions.....	212
7.2	Magnetic Permeability Device Based on Hall Effect.....	213
7.2.1	Introduction.....	213
7.2.2	Operating principle.....	215
7.2.3	The sensor	216
7.2.4	Measurements and Results	220
7.2.5	Conclusions.....	223
	Ανακοινώσεις σε Συνέδρια	225
	Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια	228
	Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά	228

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τρία ζεύγη πηνίων Helmholtz για εξάλειψη του μαγνητικού πεδίου σε τρεις διαστάσεις.	28
Σχήμα 1.2: Εμπορικός αισθητήρας SQUID [46].	31
Σχήμα 1.3: Τυπική τοπολογία αισθητήρα Orthogonal Fluxgate, στην οποία το ρεύμα διέρχεται από τον μαγνητικό πυρήνα [12].	33
Σχήμα 1.4: Αισθητήρας θέσης βασισμένος στη διάταξη MDL [74].	35
Σχήμα 1.5: Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) σε έναν αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα [86].	37
Σχήμα 1.6: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall [93].	38
Σχήμα 1.7: Διάταξη μέτρησης με χρήση yoke (Τροποποίηση από [127]).	46
Σχήμα 2.1: Σήμα πηνίου λήψης για μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.	54
Σχήμα 2.2: Σήμα πηνίου λήψης για εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.	54
Σχήμα 2.3: Η τοπολογία πηνίων της διάταξης διακρίβωσης.	55
Σχήμα 2.4: Λαμβανόμενο σήμα (δεξιά), για ημιτονοειδή διέγερση πλάτους 5V και συχνότητας 1kHz (αριστερά).	56
Σχήμα 2.5: Λαμβανόμενο σήμα (δεξιά), για ημιτονοειδή διέγερση πλάτους 5V με DC συνιστώσα +1V, συχνότητας 1kHz (αριστερά).	56
Σχήμα 2.6: Λαμβανόμενο σήμα (δεξιά), για ημιτονοειδή διέγερση πλάτους 5V με DC συνιστώσα -1V, συχνότητας 1kHz (αριστερά).	56
Σχήμα 2.7: Σήμα διέγερσης και ληφθέν σήμα.	57
Σχήμα 2.8: Μέτρηση απουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου ($\Delta t = 0$).	59
Σχήμα 2.9: Μέτρηση παρουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου ($\Delta t > 0$).	59
Σχήμα 2.10: Σήμα διέγερσης και ληφθέν σήμα από την αναπτυχθείσα τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου.	60
Σχήμα 2.11: Υπολογισμός κλίσης από το τριγωνικό σήμα διέγερσης.	62
Σχήμα 2.12: Σχέδιο εσωτερικού και εξωτερικού μέρους του σωληνοειδούς.	64

Σχήμα 2.13: Διαστάσεις σωληνοειδούς.	64
Σχήμα 2.14: Εσωτερική κατασκευή τοποθέτησης μαγνητομέτρου.	65
Σχήμα 2.15: Συρόμενο τμήμα κατασκευής τοποθέτησης μαγνητομέτρου.	65
Σχήμα 2.16: Πλάγια όψη συρόμενου τμήματος.....	65
Σχήμα 2.17: Συνολική εικόνα διάταξης.	66
Σχήμα 2.18: Τελική αναπτυσθίσα διάταξη σωληνοειδούς.	66
Σχήμα 2.19: Συρόμενη βάση στήριξης του μαγνητομέτρου.	66
Σχήμα 2.20: Διάγραμμα χρονικής διαφοράς Δt συναρτήσει του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.	67
Σχήμα 2.21: Το κύκλωμα προς υλοποίηση.....	69
Σχήμα 2.22: Σήμα εισόδου (κίτρινο χρώμα), ενισχυμένο σήμα (κόκκινο χρώμα) και σήμα εξόδου (πράσινο χρώμα).	69
Σχήμα 2.23: Σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος στο λογισμικό Eagle.....	70
Σχήμα 2.24: Σχεδίαση πλακέτας του ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	71
Σχήμα 2.25: Τυπική δομή φωτοευαίσθητης πλακέτας.	72
Σχήμα 2.26: Τελική μάσκα προς εκτύπωση.....	73
Σχήμα 2.27: Στάδιο έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία.	75
Σχήμα 2.28: Στάδιο εμφάνισης (απομάκρυνση φωτοευαίσθητου στρώματος)..	75
Σχήμα 2.29: Στάδιο αποχάλκωσης (απομάκρυνση στρώματος χαλκού).	75
Σχήμα 2.30: Στάδιο καθαρισμού (απομάκρυνση φωτοευαίσθητου στρώματος).	75
Σχήμα 2.31: Διάγραμμα διαδικασίας κατασκευής πλακέτας.	76
Σχήμα 2.32: Α' όψη τελική πλακέτας.	77
Σχήμα 2.33: Β' όψη τελικής πλακέτας.	77
Σχήμα 2.34: Διάγραμμα διαδικασίας μέτρησης.....	79
Σχήμα 2.35: Χρήση της τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου & του ηλεκτρονικού κυκλώματος και εμφάνιση των σημάτων στον παλμογράφο.	79
Σχήμα 2.36: Ληφθέν σήμα κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ($V_{AC} = 5V$, $f = 1kHz$, $V_{DC} = -80mV$).	80
Σχήμα 2.37: Ληφθέν σήμα για μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ($V_{AC} = 5V$, $f = 1kHz$, $V_{DC} = 0V$).	81

Σχήμα 2.38: Ληφθέν σήμα κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ($V_{AC} = 5V, f = 1kHz, V_{DC} = +80mV$).....	81
Σχήμα 2.39: Μεγέθυνση περιοχής, στην οποία φαίνεται η δημιουργία του παλμού βάσει του ελαχίστου και του μεγίστου του σήματος.....	81
Σχήμα 2.40: Συγκριτικό διάγραμμα εμπορικού μαγνητομέτρου και αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου.....	82
Σχήμα 2.41: Σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος προσαρμοστικού συγκριτή τύπου Schmitt trigger.	84
Σχήμα 2.42: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για ημιτονοειδές σήμα εισόδου.....	87
Σχήμα 2.43: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για τριγωνικό σήμα εισόδου.	88
Σχήμα 2.44: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για ασύμμετρο τριγωνικό σήμα εισόδου.....	88
Σχήμα 2.45: Α΄ όψη πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος.	89
Σχήμα 2.46: Β΄ όψη πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος.	90
Σχήμα 2.47: Συνολική εικόνα πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος.	90
Σχήμα 2.48: Διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	91
Σχήμα 2.49: Α΄ όψη πλακέτας.....	92
Σχήμα 2.50: Β΄ όψη πλακέτας.....	92
Σχήμα 2.51: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 5%.	93
Σχήμα 2.52: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 10%.	93
Σχήμα 2.53: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 50%.	93
Σχήμα 2.54: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 90%.	94
Σχήμα 2.55: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 95%.	94
Σχήμα 2.56: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου ομόρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.	95
Σχήμα 2.57: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.	95
Σχήμα 2.58: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), απουσία επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....	96
Σχήμα 2.59: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου ομόρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.	96

Σχήμα 2.60: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.	96
Σχήμα 2.61: Ηλεκτρονική πλακέτα ρυθμιζόμενης τροφοδοσίας.	100
Σχήμα 2.62: Συνολική διάταξη για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου.	101
Σχήμα 2.63: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και ηλεκτρονικού κυκλώματος (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου ομόρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.	102
Σχήμα 2.64: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και ηλεκτρονικού κυκλώματος (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.	102
Σχήμα 2.65: Η συνολική διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων.	103
Σχήμα 3.1: Σχέδιο της τοπολογίας που χρησιμοποιήθηκε.	106
Σχήμα 3.2: Άνω όψη του μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate.	106
Σχήμα 3.3: Πλάγια όψη του μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate.	107
Σχήμα 3.4: Το αισθητήριο (με κίτρινο χρώμα).	107
Σχήμα 3.5: Σχέση χρονικής διαφοράς παλμών και έντασης ρεύματος τροφοδοσίας σωληνοειδούς.	108
Σχήμα 3.6: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και χρονικής διαφοράς κορυφών.	108
Σχήμα 3.7: Σχέση θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης.	109
Σχήμα 3.8: Σχέση χρονικής διαφοράς παλμών και μαγνητικής επαγωγής.	109
Σχήμα 3.9: Σχέδιο της τοπολογίας που αναπτύχθηκε.	111
Σχήμα 3.10: Το μαγνητόμετρο τύπου Fluxgate.	112
Σχήμα 3.11: Το εσωτερικό του μαγνητομέτρου.	112
Σχήμα 3.12: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 5^\circ$	113
Σχήμα 3.13: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 45^\circ$	113
Σχήμα 3.14: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 90^\circ$	113
Σχήμα 3.15: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 270^\circ$	114
Σχήμα 3.16: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 315^\circ$	114
Σχήμα 3.17: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 355^\circ$	114
Σχήμα 3.18: Σχέση παρεχόμενης έντασης ρεύματος στα πηνία Helmholtz και της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου.	116

Σχήμα 3.19: Σχέση παρεχόμενης μαγνητικής επαγωγής από τα πηνία Helmholtz και της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου.	117
Σχήμα 3.20: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ασταθούς πολυδονητή.....	119
Σχήμα 3.21: Αποτέλεσμα προσομοίωσης σήματος εξόδου ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης.....	120
Σχήμα 3.22: Σήμα εξόδου ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης.	120
Σχήμα 3.23: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών.	121
Σχήμα 3.24: Σήμα εξόδου ανιχνευτή κορυφών (κόκκινο) για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης.....	121
Σχήμα 3.25: Σήμα εξόδου μαγνητομέτρου απουσία μαγνήτη.....	122
Σχήμα 3.26: Σήμα εξόδου μαγνητομέτρου παρουσία μαγνήτη.	122
Σχήμα 3.27: Νέο σήμα εξόδου μαγνητομέτρου απουσία μαγνήτη.	123
Σχήμα 3.28: Νέο σήμα εξόδου μαγνητομέτρου παρουσία μαγνήτη.....	123
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα λειτουργίας διάταξης κλειστού βρόχου.....	123
Σχήμα 3.30: Σήμα εξόδου για μηδενική ένταση ρεύματος στο πηνίο λήψης. ..	124
Σχήμα 3.31: Σήμα εξόδου για ένταση ρεύματος 0.5mA στο πηνίο λήψης.....	125
Σχήμα 3.32: Σήμα εξόδου για ένταση ρεύματος 1mA στο πηνίο λήψης.....	125
Σχήμα 3.33: Αισθητήρια διάταξη καταγραφής βρόχου υστέρησης (με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται το κλειστό μαγνητικό κύκλωμα).	126
Σχήμα 3.34: Τα στάδια διεξαγωγής μέτρησης.	128
Σχήμα 3.35: Σχέδιο ηλεκτρονικού κυκλώματος καταγραφής βρόχου υστέρησης.	129
Σχήμα 3.36: Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος.....	130
Σχήμα 3.37: Σχέδιο πλακέτας καταγραφής βρόχου υστέρησης.	130
Σχήμα 3.38: Το αισθητήριο της διάταξης καταγραφής βρόχου υστέρησης.....	131
Σχήμα 3.39: Η αναπτυχθείσα πλακέτα καταγραφής του βρόχου υστέρησης. ..	131
Σχήμα 3.40: Τα στάδια καταγραφής του βρόχου υστέρησης ενός υλικού.....	132
Σχήμα 3.41: Ενδεικτικός βρόχος υστέρησης πρώτου δείγματος χάλυβα.....	133
Σχήμα 3.42: Ενδεικτικός βρόχος υστέρησης δεύτερου δείγματος χάλυβα.....	133
Σχήμα 3.43: Το αισθητήριο της προτεινόμενης διάταξης.....	136
Σχήμα 3.44: Τα στάδια διεξαγωγής μέτρησης.	137

Σχήμα 3.45: Απεικόνιση της μαγνητικής επαγωγής, όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.....	138
Σχήμα 3.46: Ακροδέκτες αισθητήρα Hall.	139
Σχήμα 3.47: Συνδεσμολογία διάταξης αισθητήρα Hall.....	140
Σχήμα 3.48: Σχέση τάσης εξόδου αισθητήρα Hall και έντασης ρεύματος τροφοδοσίας σωληνοειδούς.	141
Σχήμα 3.49: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και έντασης ρεύματος τροφοδοσίας σωληνοειδούς.....	141
Σχήμα 3.50: Σχέση πειραματικών & θεωρητικών τιμών μαγνητικής επαγωγής με την ένταση ρεύματος τροφοδοσία του σωληνοειδούς.	142
Σχήμα 3.51: Σχέση τάσης εξόδου αισθητήρα Hall και μαγνητικής επαγωγής...	142
Σχήμα 3.52: Σύνδεση μερών συσκευής μέτρησης και εκπομπής.	144
Σχήμα 3.53: Συνολικό διάγραμμα των ηλεκτρονικών μερών.	145
Σχήμα 3.54: Τελικό σχέδιο της ηλεκτρονικής πλακέτας.	145
Σχήμα 3.55: Η διάταξη της τελικής συσκευής μέτρησης και εκπομπής.	146
Σχήμα 3.56: Η τελική συσκευή μέτρησης και εκπομπής.....	146
Σχήμα 3.57: Σύνδεση μερών συσκευής λήψης.	147
Σχήμα 3.58: Η διάταξη της τελικής συσκευής λήψης.	148
Σχήμα 3.59: Η τελική συσκευή λήψης.....	148
Σχήμα 3.60: Τα στάδια των αλγορίθμων.....	149
Σχήμα 3.61: Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής.	158
Σχήμα 3.62: Συνολική εικόνα της διάταξης κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων.	159
Σχήμα 3.63: Αποτελέσματα μετρήσεων μαγνητικής επαγωγής τριών δοκιμών.	160
Σχήμα 3.64: Η διάταξη μέτρησης μηχανικών τάσεων.....	161
Σχήμα 3.65: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και εφελκυστικών τάσεων.	162
Σχήμα 3.66: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και θλιπτικών τάσεων.	162
Σχήμα 3.67: Σχέδιο διάταξης συγκομιδής ενέργειας.	165
Σχήμα 3.68: Η διάταξη συγκομιδής ενέργειας.	166

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά πηνίων Helmholtz.....	115
Πίνακας 2: Σύγκριση χαρακτηριστικών των μαγνητομέτρων.	117
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά παραγόμενου παλμικού σήματος.....	119
Πίνακας 4: Παραγόμενο μαγνητικό πεδίο πηνίου λήψης.	124
Πίνακας 5: Τυπικά χαρακτηριστικά αισθητήρα Hall SS49E.....	139

Ευρετήριο ακρωνυμίων

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AMR	<i>Anisotropic MagnetoResistance</i>
BNC	<i>Bayonet Neill-Concelman</i>
CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
DPDT	<i>Double-Pole, Double-Throw</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FEM	<i>Finite Element Methods</i>
GMI	<i>Giant MagnetoImpedance</i>
GMR	<i>Giant MagnetoResistance</i>
HC MOS	<i>High-speed CMOS</i>
HTS	<i>High Temperature Sensors</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LTS	<i>Low Temperature Sensors</i>
MCG	<i>MagnetoCardioGraphy</i>
MDL	<i>Magnetostrictive Delay Lines</i>
MEG	<i>MagnetoEncephaloGraphy</i>
MRI	<i>Magnetic Resonance Imaging</i>
ND	<i>Neutron Diffraction</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PID	<i>Proportional–Integral–Derivative</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SMD	<i>Surface-Mount Device</i>
SQUID	<i>Superconducting Quantum Interference Device</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
YBCO	<i>Yttrium Barium Copper Oxide</i>



Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Ενας μαγνητικός αισθητήρας μπορεί να εντοπιστεί τόσο σε προϊόντα καθημερινής χρήσης, όσο και σε προηγμένο εργαστηριακό εξοπλισμό. Οι μαγνητικοί αισθητήρες αποτελούν μία σημαντική κατηγορία αισθητήρων, λόγω της ικανότητάς τους να αντιλαμβάνονται και να μετρούν το μαγνητικό πεδίο, είτε αυτό προέρχεται από τη Γη, είτε από κάποια άλλη πηγή. Συνεπώς, οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι απαραίτητοι σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, οι οποίες ανήκουν σε τομείς όπως οι επιστήμες, οι μεταφορές και η βιομηχανία.

Οι υπό χρήση μαγνητικοί αισθητήρες πρέπει να προσφέρουν την επιθυμητή ακρίβεια και επαναληψιμότητα κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να εκτελούνται διεργασίες συντήρησης και διακρίβωσής τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα, αναλόγως των εφαρμογών και των συνθηκών λειτουργίας τους. Η διακρίβωση των μαγνητομέτρων απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού και τη χρήση ειδικών διατάξεων. Ο χώρος διεξαγωγής των μετρήσεων και της διακρίβωσης πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένος και να δημιουργεί τις απαιτούμενες ειδικές συνθήκες. Όμως, οι υφιστάμενες διατάξεις είναι συχνά ογκώδεις και προσφέρουν τη δυνατότητα μέτρησης σε ένα περιορισμένο εύρος τύπων μαγνητομέτρων, ενώ και το κόστος τους κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα.

Στόχος της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η ανάπτυξη μιας διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων, η οποία θα βασίζεται στην εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των μαγνητικών υλικών, για τη μέτρηση μιας θεμελιώδους ποσότητας, όπως είναι ο χρόνος, με σκοπό την ανίχνευση και αντιστάθμιση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, με κατάλληλες βελτιώσεις, παρέχεται η δυνατότητα χρήσης της διάταξης ως ένα πρωτεύον πρότυπο για τη διακρίβωση μαγνητομέτρων.

Ένας, ακόμη, στόχος της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων για ποικίλες εφαρμογές. Η διακρίβωση αυτών των αισθητήρων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης της αναπτυχθείσας διάταξης.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι υφιστάμενες μέθοδοι διακρίβωσης μαγνητομέτρων, καθώς και οι συνήθεις τύποι μαγνητικών αισθητήρων, με έμφαση στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο υλικών.

1.2 Μαγνητική θωράκιση

1.2.1 Εισαγωγή

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τις διατάξεις διακρίβωσης είναι, φυσικά, το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο της Γης, ή οι τυχόν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από γειτονικές εγκαταστάσεις, ανήκουν στην κατηγορία του περιβαλλοντικού θορύβου που θα πρέπει να εξαλειφθεί, ώστε να διεξαχθούν αρτίως οι μετρήσεις. Η εξάλειψη αυτών των παρεμβολών γίνεται εφικτή μέσω της χρήσης τεχνικών παθητικής μαγνητικής θωράκισης ή ενεργητικής αντιστάθμισης πεδίου [1]–[5].

1.2.2 Παθητική μαγνητική θωράκιση

Η παθητική μαγνητική θωράκιση είναι απαραίτητη σε πολλές βιοϊατρικές εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται η ανίχνευση εξαιρετικά ασθενών μαγνητικών πεδίων, όπως στις περιπτώσεις της παρακολούθησης της δραστηριότητας του

εγκεφάλου (Μαγνητοεγκεφαλογραφία – MEG) ή της καρδιάς (Μαγνητοκαρδιογραφία – MCG) [6]–[9]. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτές τις εφαρμογές, είναι ο αισθητήρας SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), η ευαισθησία του οποίου φθάνει στα 10^{-15}T [9]. Συνεπώς, είναι προφανές ότι καθίσταται αδύνατη η χρήση ενός αισθητήρα SQUID για μετρήσεις σε μη μαγνητικά θωρακισμένο χώρο, στον οποίο επιδρούν πολύ πιο ισχυρά μαγνητικά πεδία, όπως είναι οι διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου της Γης και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος σε έναν βαθμό, δημιουργούνται ειδικά διαμορφωμένοι χώροι, τα τοιχώματα των οποίων επενδύονται καταλλήλως με συγκεκριμένα υλικά. Αυτοί οι χώροι κατασκευάζονται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση από την εμβέλεια επίδρασης των τυπικών επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων.

Το είδος, οι ιδιότητες, καθώς και η γεωμετρία των χρησιμοποιηθέντων υλικών κατασκευής, αποτελούν το πρώτο σύνολο παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση της μαγνητικής θωράκισης. Για την εξάλειψη των επιβαλλόμενων συνεχών μαγνητικών πεδίων ή πεδίων πολύ χαμηλών συχνοτήτων, χρησιμοποιούνται φερρομαγνητικά υλικά με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, όπως είναι το NiFe (Mumetal), με τιμή μαγνητικής διαπερατότητας $50 \times 10^3 - 100 \times 10^3$. Λόγω της υψηλής τους μαγνητικής διαπερατότητας, η μαγνητική ροή συγκεντρώνεται σε αυτά τα υλικά, δημιουργώντας έναν κλωβό που περικλείει τον χώρο διεξαγωγής των μετρήσεων και αποτρέπει τη διέλευση των ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του [10], [11].

Η επόμενη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση της μαγνητικής θωράκισης είναι το πάχος του χρησιμοποιούμενου υλικού. Σύμφωνα με το επιδερμικό φαινόμενο, η επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό οδηγεί στην εμφάνιση των λεγόμενων δινορρευμάτων. Αποτέλεσμα των δινορρευμάτων είναι η δημιουργία μαγνητικού πεδίου με κατεύθυνση αντίθετη ως προς αυτή του επιβαλλόμενου. Συνεπώς, αναλόγως των δινορρευμάτων, μεταβάλλεται και το βάθος διείσδυσης δ του μαγνητικού πεδίου στο υλικό, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.1)$$

όπου:

- f : η συχνότητα του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου
- μ : η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού διάδοσης
- σ : η αγωγιμότητα του υλικού.

Η αντιμετώπιση των δινορρευμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλών λεπτών φύλλων υλικού, αντί της επιλογής ενός συμπαγούς τμήματος μεγάλου πάχους. Γενικά, η θωράκιση είναι πιο αποδοτική στην περίπτωση της επιβολής μαγνητικών πεδίων που είναι κάθετα σε αυτήν. Η απόδοση μειώνεται στην περίπτωση των παράλληλων πεδίων και φυσικά είναι ακόμα πιο μικρή όταν υπάρχουν οπές ή άλλου είδους κενά. Επίσης, με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης τιμής μαγνητικής διαπερατότητας, προτιμάται η ανόπτηση του υλικού που δημιουργεί τη θωράκιση. Ένας συνήθης κύκλος ανόπτησης για υλικό τύπου NiFe περιλαμβάνει τη θέρμανσή του στους 1100°C για αρκετές ώρες, ακολουθούμενη από την αργή ψύξη του.

Η παραμένουσα μαγνήτιση των υλικών είναι ένα ακόμα στοιχείο που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Γι' αυτόν τον σκοπό, πρέπει να πραγματοποιηθεί απομαγνήτιση των υλικών που αποτελούν τη μαγνητική θωράκιση. Τυπικές διατάξεις απομαγνήτισης αποτελούνται από αρκετά στρώματα NiFe πάχους 1mm, τα οποία δημιουργούν έναν κύλινδρο με εσωτερική διάμετρο 15-20 cm και μήκος 0.6-1 m [12]. Ως πηνίο απομαγνήτισης χρησιμοποιείται ένα ισχυρό πηνίο, τέτοιο ώστε να έχει την ικανότητα να επηρεάσει μαγνητικά όλα τα στρώματα NiFe. Το πηνίο απομαγνήτισης τοποθετείται στο εσωτερικό του κυλίνδρου και μετακινείται με χαμηλή ταχύτητα προς τα έξω, οδηγώντας στην απομαγνήτιση του εσωτερικού χώρου.

Για την περίπτωση των υψηλότερων συχνοτήτων, το αλουμίνιο αποτελεί συνήθη επιλογή υλικού μαγνητικής θωράκισης, λόγω των ισχυρότερων δινορρευμάτων που δημιουργούνται σε αυτό. Λόγω του επιδερμικού φαινομένου, προτιμάται η τοποθέτηση πλακών αλουμινίου πάχους περίπου 50mm, οι οποίες θα πρέπει να καλύψουν εξωτερικά όλο τον χώρο. Φυσικά, για την όσο το δυνατόν καλύτερη

μαγνητική θωράκιση ενός χώρου, συχνά προτιμάται ο συνδυασμός υλικών, ώστε να είναι δυνατή η εξάλειψη μαγνητικών πεδίων στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων.

Σε κάθε περίπτωση, μειονέκτημα της παθητικής θωράκισης αποτελεί το γεγονός ότι έχει υψηλό κόστος εγκατάστασης, χωρίς ωστόσο να διασφαλίζει την πλήρη εξάλειψη των πεδίων όλων των συχνοτήτων [13]–[15]. Τα καλύτερα επίπεδα παθητικής μαγνητικής θωράκισης που έχουν επιτευχθεί φθάνουν στην εξάλειψη μαγνητικών πεδίων της τάξεως των 0.5nT [16].

1.2.3 Ενεργητική αντιστάθμιση πεδίου

Η ενεργητική αντιστάθμιση πεδίου αποτελεί τη δεύτερη τεχνική εξάλειψης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Βασίζεται στη δυναμική επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου, το οποίο έχει ως σκοπό την εξουδετέρωση των μαγνητικών πεδίων που υφίστανται στην περιοχή όπου διεξάγονται οι μετρήσεις ή και τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων προσαρμοσμένης τιμής και κατεύθυνσης, ώστε να διεξαχθεί η διακρίβωση των μαγνητομέτρων.

Μια συνήθης διάταξη ενεργητικής αντιστάθμισης μαγνητικού πεδίου περιλαμβάνει τη χρήση μαγνητομέτρων, πηνίων αντιστάθμισης, καθώς και των απαραίτητων ηλεκτρονικών μέτρησης και τροφοδοσίας [17]–[27]. Τα μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται με σκοπό την ανίχνευση και μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται στον χώρο όπου θα διεξαχθούν οι εργασίες διακρίβωσης των υπό εξέταση μαγνητικών αισθητήρων. Τα μαγνητόμετρα SQUID που αναφέρθηκαν και παραπάνω, είναι αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως για αυτόν το σκοπό [8], [28]–[34]. Βασιζόμενα στο φαινόμενο Josephson, μπορούν να προσφέρουν υψηλή ακρίβεια κατά τις μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Όμως, η λειτουργία τους προϋποθέτει την ύπαρξη συστήματος ψύξης, κάτι που δυσχεραίνει τη χρήση τους και αυξάνει το κόστος τους, καθώς και το μέγεθος της συνολικής διάταξης. Επίσης, η γεωμετρία τους και κυρίως οι μικρές τους διαστάσεις, αυξάνουν την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και οδηγούν στη δημιουργία μεγαλύτερων σφαλμάτων, λόγω της δυσκολίας ευθυγράμμισής τους ως προς τον υπό διακρίβωση αισθητήρα.

Ο απλούστερος τρόπος επιβολής μαγνητικού πεδίου γνωστής τιμής είναι η χρήση ενός σωληνοειδούς. Το υπό εξέταση μαγνητόμετρο τοποθετείται στο κέντρο του σωληνοειδούς, με αποτέλεσμα να δέχεται μαγνητικό πεδίο γνωστής τιμής. Ο υπολογισμός της θεωρητικής τιμής μαγνητικού πεδίου H στο κέντρο του σωληνοειδούς, με ανεξάρτητη μεταβλητή την τιμή έντασης παρεχόμενου ρεύματος, προκύπτει από την παρακάτω σχέση, όταν μπορεί να θεωρηθεί ότι η ακτίνα r του σωληνοειδούς είναι πολύ μικρότερη από το μήκος του l ($l \gg r$):

$$H = \frac{N \cdot I}{2l} \quad (1.2)$$

όπου:

- N : ο αριθμός των περιελίξεων του σωληνοειδούς
- I : η ένταση του παρεχόμενου ρεύματος
- l : το μήκος του σωληνοειδούς.

Στην συνηθέστερη περίπτωση που η ακτίνα του σωληνοειδούς είναι συγκρίσιμη με το μήκος του, το μαγνητικό πεδίο H δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$H = \frac{N \cdot I}{2\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + r^2}} \quad (1.3)$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας τη Σχέση 1.3, είναι δυνατός ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται στον υπό διακρίβωση αισθητήρα, που είναι τοποθετημένος στο κέντρο του σωληνοειδούς. Προϋπόθεση για την επιτυχή διακρίβωση είναι να έχει εξαλειφθεί το περιβάλλον μαγνητικό πεδίο από τον χώρο της διεξαγωγής των μετρήσεων.

Όμως, παρά την ευκολία υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που προσφέρει ένα σωληνοειδές, σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολη η τοποθέτηση του υπό διακρίβωση μαγνητομέτρου στο εσωτερικό του, λόγω του περιορισμένου χώρου που προσφέρει. Σαν αποτέλεσμα, η συνήθης μέθοδος που τελικά χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ομογενούς μαγνητικού πεδίου σε μεγαλύτερο χώρο, είναι η χρήση ζευγών πηνίων Helmholtz [22], [35]–[37]. Το κάθε ζεύγος πηνίων Helmholtz

αποτελείται από δύο όμοια, αντιδιαμετρικώς τοποθετημένα πηνία. Το ιδανικό σχήμα των πηνίων είναι το κυκλικό, αλλά λόγω του περιορισμένου εσωτερικού χώρου που προσφέρει, πολλές φορές προτιμάται το τετραγωνικό. Το χαρακτηριστικό των πηνίων Helmholtz είναι ότι η μεταξύ τους απόσταση d είναι ίση με την ακτίνα τους r , κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ομογενούς μαγνητικού πεδίου στον χώρο που περικλείουν. Η μαγνητική επαγωγή B στο μέσο, μεταξύ δύο πηνίων Helmholtz, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 B &= B\left(\frac{r}{2}\right) + B\left(-\frac{r}{2}\right) = 2B\left(\frac{r}{2}\right) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow B = \mu_0 \cdot \frac{r^2 \cdot N \cdot I}{\left(r^2 + \frac{r^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow B = \mu_0 \cdot \frac{8 \cdot N \cdot I}{5\sqrt{5} \cdot r} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow B = 8.99 \times 10^{-7} \cdot \frac{N \cdot I}{r} \tag{1.4}
 \end{aligned}$$

όπου:

- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$: η μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- N : ο αριθμός των περιελίξεων των πηνίων
- I : η ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας
- r : η ακτίνα των πηνίων.

Η τοποθέτηση τριών ζευγών πηνίων Helmholtz, που είναι ανά δύο κάθετα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των μαγνητικών πεδίων και στις τρεις διαστάσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη διακρίβωση μαγνητομέτρων τριών αξόνων.

Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο τριαξονικές διατάξεις πηνίων Helmholtz, διαφορετικών διαστάσεων [38]–[40]. Η μεγαλύτερη διάταξη, με όγκο περίπου 1m^3 , περικλείει τη μικρότερη, η οποία έχει όγκο περίπου 0.25m^3 . Οι δύο διατάξεις

τοποθετούνται σε χώρο όσο το δυνατόν πιο μακριά από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ο χώρος πρέπει να είναι μαγνητικά θωρακισμένος, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές παθητικής μαγνητικής θωράκισης που έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα. Επίσης, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος της θερμοκρασίας, με σκοπό τη διόρθωση των μετρήσεων, καθώς πολλοί από τους μαγνητικούς αισθητήρες επηρεάζονται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Τελικά, το υπό διακρίβωση μαγνητόμετρο τοποθετείται στο εσωτερικό των διατάξεων διακρίβωσης και δέχεται μόνο τα επιθυμητά μαγνητικά πεδία.



Σχήμα 1.1: Τρία ζεύγη πηνίων Helmholtz για εξάλειψη του μαγνητικού πεδίου σε τρεις διαστάσεις.

Βεβαίως, τα παραπάνω προϋποθέτουν την παροχή τροφοδοσίας με ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο, για τη δημιουργία του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που θα επιτρέπουν τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου μέσω της άμεσης προσαρμογής της τροφοδοσίας των πηνίων.

Επίσης, για την ανίχνευση και μέτρηση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται άλλα μαγνητόμετρα ως πρότυπα, τα οποία πρέπει προφανώς να έχουν καλύτερη ευαισθησία σε σχέση με το εξεταζόμενο. Οι συνήθεις τύποι τέτοιων μαγνητομέτρων είναι οι αισθητήρες SQUID, οι αισθητήρες Fluxgate και οι αισθητήρες AMR, που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Για την αποφυγή πρόκλησης παρεμβολών, αυτά τα μαγνητόμετρα τοποθετούνται σε απόσταση από το υπό διακρίβωση μαγνητόμετρο. Τα πρότυπα μαγνητόμετρα δημιουργούν τα δεδομένα εισόδου των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των πηνίων αντιστάθμισης του μαγνητικού πεδίου. Μεγάλο τμήμα της μελέτης των

διατάξεων διακρίβωσης αποτελεί ο βέλτιστος τρόπος υλοποίησης των αλγορίθμων αυτοματοποίησης των παραπάνω διεργασιών, δηλαδή της μέτρησης του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου, της αντιστάθμισής του και τελικά, της διακρίβωσης των μαγνητομέτρων σε έναν ή περισσότερους άξονες.

Όμως, σε μερικές περιπτώσεις απαιτείται η ταχεία διακρίβωση ενός μαγνητομέτρου, χωρίς τη χρήση ειδικών διατάξεων, θυσιάζοντας φυσικά τον βαθμό ακρίβειας. Παράδειγμα τέτοιων περιπτώσεων αποτελεί η διακρίβωση ενός μαγνητομέτρου που χρησιμοποιείται στα κινητά τηλέφωνα. Για την εύκολη διακρίβωσή του, ζητείται από τους χρήστες να μετακινήσουν την τηλεφωνική συσκευή στο χώρο, μετακινώντας της στο σχήμα του αριθμού 8. Με αυτόν τον τρόπο, το μαγνητόμετρο αντιλαμβάνεται τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου στο χώρο, εκμεταλλεύόμενο και δεδομένα που προέρχονται από άλλους αισθητήρες της συσκευής (γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο κ.λπ.). Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις βασίζονται στα παραπάνω δεδομένα και χρησιμοποιούν κατάλληλα μοντέλα για τον υπολογισμό των συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου που δέχεται το μαγνητόμετρο. Αντίστοιχες διεργασίες ταχείας διακρίβωσης για βελτίωση στην ακρίβεια του μαγνητομέτρου διεξάγονται σε μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται σε πλοία, αεροπλάνα και αυτόνομα οχήματα [38], [41]–[44].

1.3 Τύποι μαγνητικών αισθητήρων

1.3.1 Εισαγωγή

Η απόδοση των μαγνητικών αισθητήρων ποικίλλει λόγω διαφόρων παραμέτρων, με κύριο παράγοντα διαφοροποίησης την αρχή λειτουργίας τους. Τα μαγνητόμετρα έχουν τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται την επιβολή μαγνητικού πεδίου σε μία ή περισσότερες διαστάσεις και να αποδίδουν ένα ανάλογο σήμα εξόδου. Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα ανά εφαρμογή καθορίζεται κυρίως από την επιθυμητή ευαισθησία και από το εύρος μέτρησης. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται

τα χαρακτηριστικά και η αρχή λειτουργίας των πιο διαδεδομένων μαγνητικών αισθητήρων.

1.3.2 Αισθητήρες SQUID

Οι αισθητήρες SQUID (**S**uperconducting **Q**uantum **I**nterference **D**evice), βασίζονται στη χρήση υπεραγώγιμων υλικών, δηλαδή υλικών των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση πρακτικά μηδενίζεται όταν βρεθούν σε θερμοκρασία χαμηλότερη κάποιας κρίσιμης τιμής. Οι αισθητήρες SQUID, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους LTS και τους HTS. Οι αισθητήρες χαμηλής θερμοκρασίας (**L**ow **T**emperature **S**ensors – LTS) λειτουργούν σε θερμοκρασίες -270°C και κατασκευάζονται από νιόβιο ή κράματα μολύβδου και χρυσού. Για τη λειτουργία τους απαιτείται ψύξη με υγρό ήλιο, κάτι που τους καθιστά πιο δύσχρηστους. Αντιθέτως, οι αισθητήρες υψηλής θερμοκρασίας (**H**igh **T**emperature **S**ensors – HTS) μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως και περίπου -130°C . Κατασκευάζονται από YBCO (**Y**ttrium **B**arium **C**opper **O**xide) και ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο είναι πιο εύχρηστο σε σχέση με το υγρό ήλιο, ενώ έχει και χαμηλότερο κόστος [45], [46].

Η λειτουργία των αισθητήρων SQUID βασίζεται στο κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson, σύμφωνα με το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο μη υπεραγώγιμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγώγιμων υλικών. Έστω ένας αισθητήρας SQUID σε σχήμα δακτυλίου. Όταν αυτός ψυχθεί στην κατάλληλη θερμοκρασία, δημιουργείται μια σταθερή μαγνητική ροή. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου με μαγνητική ροή Φ_{ex} , η εσωτερική ροή Φ_{in} αλλάζει στιγμιαία, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Phi_{in} = \Phi_{ex} - LI_c \sin \frac{2\pi\Phi_{in}}{\Phi_0} \quad (1.5)$$

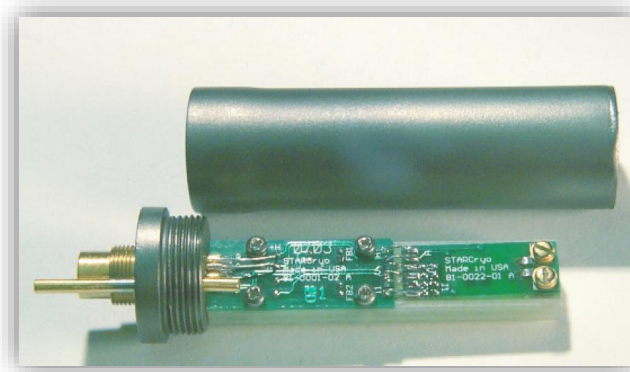
όπου:

- L : η αυτεπαγωγή του δακτυλίου
- I_c : μία κρίσιμη τιμή έντασης ρεύματος

- $\Phi_0 = 2.068 \times 10^{-15} \text{ Wb}$: το κβάντο μαγνητικής ροής.

Συνεπώς, βάσει της μέτρησης της μεταβολής της μαγνητικής ροής, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας τους, αλλά και των ειδικών εργαστηριακών συνθηκών που απαιτεί η λειτουργία τους, οι αισθητήρες SQUID δεν χρησιμοποιούνται σε καταναλωτικά προϊόντα, αλλά κυρίως σε ερευνητικό εξοπλισμό (μικροσκόπιο SQUID [47]) και στη Βιοϊατρική (MRI [7]). Ένας εμπορικός αισθητήρας SQUID παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2:



Σχήμα 1.2: Εμπορικός αισθητήρας SQUID [46].

1.3.3 Αισθητήρες Fluxgate

Τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής ή μαγνητόμετρα Fluxgate αποτελούν μία σημαντική κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, προσφέροντας υψηλή ευαισθησία, χωρίς όμως να απαιτούν ειδικές συνθήκες λειτουργίας, όπως συμβαίνει με τους αισθητήρες SQUID. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες προσδιορισμού θέσης και ταχύτητας, αλλά και σε όργανα πλοήγησης ή μέτρησης μαγνητικού πεδίου [48]–[56]. Η ακρίβεια αυτών των αισθητήρων κυμαίνεται από 0.1 έως 10 nT, ενώ χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μαγνητικών πεδίων στο εύρος 10^{-10} έως 10^{-4} T [57].

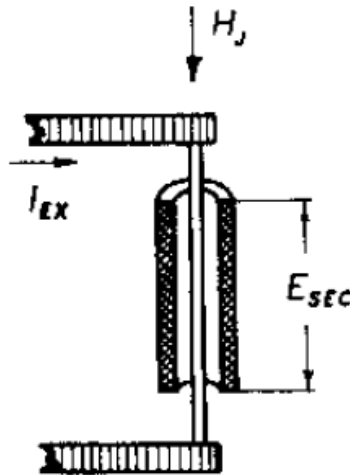
Οι πρώτοι αισθητήρες Fluxgate κατασκευάστηκαν το 1936 και χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό της μαγνητικής υπογραφής υποβρυχίων. Ένας τυπικός αισθητήρας Fluxgate αποτελείται από δύο πηνία, στο εσωτερικό των οποίων υπάρχει ένας φερρομαγνητικός πυρήνας. Το ένα αποτελεί το πηνίο διέγερσης και το

άλλο το πηνίο λήψης. Εναλλασσόμενο σήμα τροφοδοτεί το πηνίο διέγερσης, δημιουργώντας μαγνητική ροή που διαδίδεται μέσω του μαγνητικού πυρήνα. Εάν το μαγνητικό πεδίο διέγερσης είναι αρκετό, ώστε να οδηγεί στον περιοδικό κορεσμό του υλικού του μαγνητικού πυρήνα, τότε λαμβάνεται μέσω του πηνίου λήψης ένα σήμα που είναι ανάλογο της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής ως προς τον χρόνο. Μελετώντας το λαμβανόμενο σήμα ως προς διάφορες παραμέτρους που μεταβάλλονται (πλάτος, χρονική διαφορά κορυφών κ.λπ.), είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την ένταση και την κατεύθυνση του ανιχνευόμενου μαγνητικού πεδίου.

Σημαντική παράμετρο για τους αισθητήρες Fluxgate αποτελεί το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως μαγνητικός πυρήνας. Το υλικό θα πρέπει να εμφανίζει χαμηλή υστέρηση και υψηλή ευαισθησία. Συνήθως επιλέγονται άμορφα μαγνητικά υλικά, όπως τα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB σε μορφή σύρματος ή ταινίας, τα οποία εμφανίζουν τα παραπάνω επιθυμητά χαρακτηριστικά [58]–[61].

Δύο παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τις μετρήσεις είναι η ασυμμετρία της διάταξης και η επίδραση του σήματος διέγερσης στο πηνίο λήψης. Η επιλογή της τοπολογίας πηνίων που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Η χρήση μαγνητικού πυρήνα σχήματος δακτυλίου μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της ασυμμετρίας, ενώ η χρήση δύο παράλληλων πηνίων διέγερσης (τοπολογία racetrack) μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της επίδρασης του σήματος διέγερσης στο σήμα λήψης.

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης είναι η αποφυγή χρήσης πηνίου διέγερσης, μέσω της διέλευσης του σήματος απευθείας από τον μαγνητικό πυρήνα (Σχήμα 1.3). Με αυτή την τοπολογία, που ονομάζεται Orthogonal Fluxgate, μπορεί να μειωθεί και το συνολικό μέγεθος του αισθητήρα, έχοντας όμως σαν μειονέκτημα τη δημιουργία ασθενέστερου μαγνητικού πεδίου διέγερσης, αφού αυτό παράγεται από τον ίδιο τον πυρήνα και όχι από ένα πηνίο αρκετών περιελίξεων [62]–[65].



Σχήμα 1.3: Τυπική τοπολογία αισθητήρα *Orthogonal Fluxgate*, στην οποία το ρεύμα διέρχεται από τον μαγνητικό πυρήνα [12].

Με χρήση της τεχνολογίας λεπτών υμενίων (*thin film*) είναι δυνατή η «εκτύπωση» ενός αισθητήρα *Fluxgate* σε πλακέτα, δηλαδή η εναπόθεση κατάλληλων υλικών με την επιθυμητή τοπολογία, σε αυτήν [66]–[69]. Έτσι, είναι ευκολότερη η ενσωμάτωση του αισθητήρα σε μία πλήρη διάταξη, η οποία θα περιλαμβάνει και τα ηλεκτρονικά λήψης και επεξεργασίας του σήματος. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί να κατασκευαστεί και διάταξη που θα περιλαμβάνει περισσότερους από έναν αισθητήρες *Fluxgate*, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους για ταυτόχρονες μετρήσεις σε περισσότερες διαστάσεις. Ο προφανής τρόπος υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης είναι η τοποθέτηση τριών καθέτων αισθητήρων, ο καθένας εκ των οποίων θα μετρά μία από τις τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου. Όμως και σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται το πρόβλημα της επίδρασης του κάθε αισθητήρα στο σήμα που λαμβάνεται από τους γειτονικούς του, το οποίο πρέπει να επιλυθεί μέσω της κατάλληλης επιλογής τοπολογίας και διαστάσεων των τριών αισθητήρων.

1.3.4 Αισθητήρες MDL

Οι αισθητήρες MDL βασίζονται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (**M**agnetostrictive **D**elay **L**ines – MDL) [70]–[73]. Σύμφωνα με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής, η επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητικό υλικό οδηγεί στη μεταβολή του μήκους του, η οποία εκφράζεται από τον παρακάτω λόγο:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.6)$$

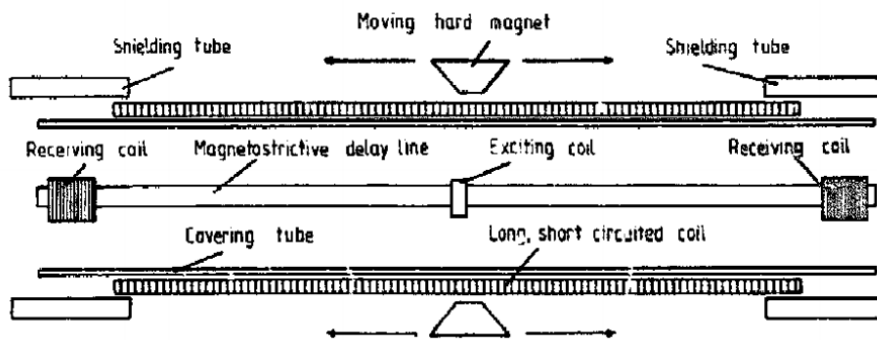
όπου:

- Δl : η μεταβολή του μήκους του υλικού κατά την επιβολή του μαγνητικού πεδίου
- l : το αρχικό του μήκος.

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής συμβαίνει λόγω της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, η οποία πραγματοποιείται κατά την επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου στα φερρομαγνητικά υλικά. Η μαγνητοσυστολή μπορεί να μελετηθεί μέσω της χρήσης άμορφων μαγνητικών υλικών που λαμβάνουν το ρόλο κυματοδηγού, διαρρεόμενα από παλμικό ρεύμα.

Μια τυπική διάταξη MDL αποτελείται ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένας κυματοδηγός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Μέσω του πηνίου διέγερσης, δημιουργείται παλμικό μαγνητικό πεδίο που διαδίδεται μέσω του άμορφου μαγνητικού σύρματος ή ταινίας που έχει το ρόλο του κυματοδηγού. Λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, αυτό το υλικό παραμορφώνεται τοπικά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας ελαστικός παλμός, ο οποίος διαδίδεται μέσω του κυματοδηγού. Τελικά, το σήμα λαμβάνεται από το πηνίο λήψης που είναι τοποθετημένο στο άλλο άκρο του κυματοδηγού.

Το μήκος του κυματοδηγού μπορεί να είναι μεγάλο, προσφέροντας τη δυνατότητα ανέπαφης ανίχνευσης της θέσης μαγνητικών αντικειμένων σε σχέση με τη διάταξη. Μετρώντας τη χρονική διαφορά μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων ή και τις μεταβολές του πλάτους τους, είναι δυνατός ο προσδιορισμός διαφόρων μεγεθών, όπως είναι η θέση, η απόσταση και η επιβαλλόμενη δύναμη. Συνεπώς, ένας τέτοιος αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία, αλλά και σε δίκτυα «έξυπνων πόλεων» [74]–[77].



Σχήμα 1.4: Αισθητήρας θέσης βασισμένος στη διάταξη MDL [74].

1.3.5 Αισθητήρες AMR και GMR

Αυτές οι δύο κατηγορίες αισθητήρων, ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (**Anisotropic MagnetoResistance – AMR**) και γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (**Giant MagnetoResistance – GMR**), στηρίζονται στο φαινόμενο της αλλαγής της αντίστασης που εμφανίζεται κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου σε διάφορα υλικά. Αν και αυτό το φαινόμενο γενικά παρατηρείται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν κατηγορίες υλικών, όπως είναι τα φερρομαγνητικά, στα οποία εμφανίζεται σε θερμοκρασία δωματίου. Στην περίπτωση της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή της αντίστασης του υλικού διαφοροποιείται μεταξύ της διαμήκους και της εγκάρσιας διάδοσης του ρεύματος σε αυτό.

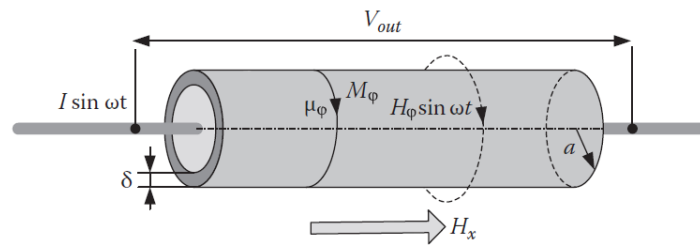
Αντίστοιχα, στην περίπτωση της γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης, οι αισθητήρες αποτελούνται από δομές λεπτών υμενίων κατασκευασμένων από φερρομαγνητικά υλικά, ανάμεσα στα οποία τοποθετείται ένα υπέρλεπτο αγώγιμο, αλλά μη μαγνητικό, στρώμα, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από χαλκό. Ο χαλκός, αν και αγώγιμο υλικό, σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, λόγω του πολύ μικρού πάχους του και συνεπώς της αυξημένης σκέδασης των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του. Μεταξύ των φερρομαγνητικών υμενίων πραγματοποιείται αντιφερρομαγνητική σύζευξη, δηλαδή παρατηρείται αντίθετος προσανατολισμός των μαγνητικών τους διπόλων. Όμως, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου κατάλληλης διεύθυνσης, η σύζευξη παύει να ισχύει και τα μαγνητικά δίπολα διατάσσονται σύμφωνα με αυτό, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανίχνευση του συγκεκριμένου μαγνητικού πεδίου [78]–[82].

Τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM), καθώς και σε βιοαισθητήρες. Η ανακάλυψη των αισθητήρων GMR οδήγησε στην απονομή του βραβείου Nobel στους ερευνητές Albert Fert και Peter Grünberg το 2007 [83].

Γενικά, οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης ενσωματώνονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα σε τοπολογία γέφυρας Wheatstone. Τοποθετούνται σε ρομποτικές διατάξεις, αλλά και σε μεταφορικά μέσα, κυρίως ως αισθητήρες προσανατολισμού [84]. Επίσης, έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες ώστε να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για την ανίχνευση βιομορίων, με σκοπό την αντικατάσταση της χρήσης μεθόδων φθορισμού σε διαγνωστικές εξετάσεις. Αντί των φθοριζουσών ουσιών, έχει δοκιμαστεί η εισαγωγή καταλλήλων μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία είναι ικανά να ανιχνεύονται από τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης [85].

1.3.6 Αισθητήρες GMI

Οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (**Giant MagnetImpedance – GMI**) εμφανίζουν πολύ καλές επιδόσεις, χωρίς όμως να έχουν ακόμη εμφανιστεί σε διαδεδομένες εμπορικές εφαρμογές. Βάσει του ομώνυμου φαινομένου, η διάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας μέσω ενός φερρομαγνητικού σύρματος, οδηγεί στην εμφάνιση κυκλικής ανισοτροπίας, η οποία επηρεάζεται από τα συνεχή ή χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία που επιδρούν στο υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, λόγω του επιδερμικού φαινομένου, εμφανίζεται ένα εξωτερικό στρώμα πάχους δ , που αντιστοιχεί στο βάθος διείσδυσης. Υπενθυμίζεται ότι το βάθος διείσδυσης εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα, όσο και από τη μαγνητική διαπερατότητα, σύμφωνα με τη Σχέση 1.1. Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Το φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI) σε έναν αγωγό που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα [86].

Επειδή το βάθος διείσδυσης δ είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, είναι προφανές ότι για χαμηλές συχνότητες οι αλλαγές στην εμπέδηση είναι μικρές. Αντιθέτως, στις υψηλές συχνότητες, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου είναι ισχυρή, με αποτέλεσμα να υπάρχουν και αντίστοιχες μεταβολές στην εμπέδηση. Για καλύτερα αποτελέσματα, απαιτείται η χρήση υλικών με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή ειδική αντίσταση. Συνήθη τέτοια υλικά είναι τα άμορφα σύρματα που περιέχουν κοβάλτιο (CoSiB, CoFeSiB) [86].

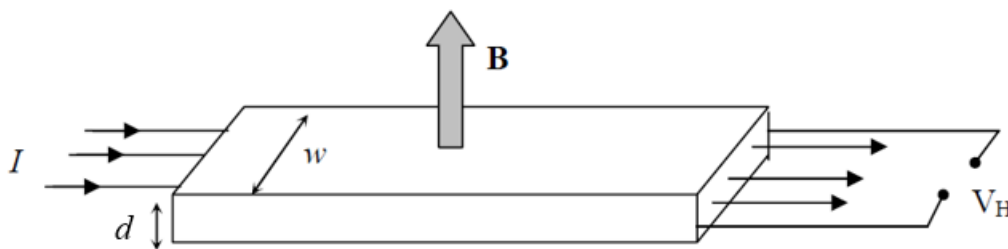
Οι εφαρμογές των αισθητήρων GMI περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη μέτρηση ρεύματος, γωνιακής ταχύτητας και δύναμης [87]. Η ευαισθησία τους μπορεί να φτάσει και τα 0.3nT, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασία δωματίου, παρουσιάζοντας χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση [88], [89].

1.3.7 Αισθητήρες Hall

Οι αισθητήρες Hall αποτελούν μια πολύ διαδεδομένη κατηγορία μαγνητικών αισθητήρων, λόγω της εύκολης χρήσης τους, του μικρού μεγέθους τους και του χαμηλού κόστους τους. Χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές και μπορούν, για παράδειγμα, να βρεθούν στα αυτοκίνητα και στα κινητά τηλέφωνα [90].

Η λειτουργία του μαγνητικού αισθητήρα Hall βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο, που ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Edwin Hall. Βάσει αυτού, όταν ένα ρεύμα διαρρέει μία πλάκα και ταυτοχρόνως στο υλικό εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος, τότε εμφανίζεται μια τάση, η οποία είναι κάθετη τόσο στο ρεύμα, όσο και στο μαγνητικό πεδίο και οφείλεται στη δύναμη

Lorentz που επιδρά στα κινούμενα φορτία (Σχήμα 1.6). Αυτή η τάση ονομάζεται τάση Hall (V_H) [91], [92].



Σχήμα 1.6: Αρχή λειτουργίας αισθητήρα Hall [93].

Όταν η δύναμη Lorentz F_L επιδρά σε ένα σωματίδιο με φορτίο q που κινείται με ταχύτητα v , υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου E και μαγνητικού πεδίου B , τότε ισχύει η σχέση:

$$F_L = q(E + v \times B) \quad (1.7)$$

Απουσία μαγνητικού πεδίου, η ταχύτητα v_p και η πυκνότητα ρεύματος J των σωματιδίων δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$v_p = m_p E \quad (1.8)$$

$$J = q m_p D_p E \quad (1.9)$$

όπου:

- m_p : η κινητικότητα των σωματιδίων
- D_p : η πυκνότητά τους.

Κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου, τα σωματίδια σκεδάζονται κάθετα ως προς αυτό, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο E_H που επιδρά σε αυτά είναι:

$$E_H = -(v \times B) = -m_p (E \times B) \quad (1.10)$$

Η γωνία σκέδασης $\tan \theta_H$ δίνεται από τον τύπο:

$$\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E|} \quad (1.11)$$

Επομένως, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι το ηλεκτρικό πεδίο Hall E_H μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E_H = -\frac{1}{qD_p}(J \times B) = -R_H(J \times B) \quad (1.12)$$

όπου R_H είναι ο συντελεστής Hall.

Τελικά, η τάση Hall V_H σε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο πλάτους w , δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = m_p w E_x B_y = R_H w J B \quad (1.13)$$

Έστω ότι το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο έχει πάχος d . Τότε, η πυκνότητα ρεύματος J θα είναι ίση με:

$$J = \frac{I}{wd} \quad (1.14)$$

Οπότε, αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση, προκύπτει:

$$V_H = \frac{R_H I B}{d} \quad (1.15)$$

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα Hall εξαρτάται κυρίως από την επιλογή υλικών με υψηλή κινητικότητα φορέων. Λαμβάνοντας υπόψιν και τις απώλειες ισχύος P_R λόγω της αντίστασης του υλικού, τελικά η τάση εξόδου ενός αισθητήρα Hall V_H δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = \sqrt{\frac{m_p P_R}{D_p d}} B \quad (1.16)$$

Συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες Hall είναι τα Si, GaAs, InAs, και InSb. Το κάθε υλικό εμφανίζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται κυρίως με την ευαισθησία, τη γραμμικότητα των μετρήσεων, τα σφάλματα λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και τα επίπεδα θορύβου. Λόγω της ευρείας διάδοσης του πυριτίου στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το πυρίτιο είναι το σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται τελικά και στους αισθητήρες Hall. Αναλόγως του τρόπου κατασκευής του αισθητήρα, είναι δυνατή η μέτρηση σε περισσότερες της μίας διαστάσεις.

Όμως, τυχόν ασυμμετρία της διάταξης ή ανακριβής τοποθέτηση των ηλεκτροδίων εισόδου και εξόδου, οδηγούν στην εμφάνιση απόκλισης στις λαμβανόμενες μετρήσεις. Για την εξάλειψη της απόκλισης, επιλέγεται είτε η κατασκευή των αισθητήρων με χρήση laser, είτε η εκ των υστέρων αντιστάθμισή της με χρήση αντιστάσεων. Αντιστοίχως, για την αντιμετώπιση σφαλμάτων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, συχνά χρησιμοποιούνται αισθητήρες θερμοκρασίας που ενσωματώνονται στο ίδιο ολοκληρωμένο με τον Hall, με σκοπό να αντισταθμίζουν τις αποκλίσεις που προκαλούνται.

Οι τυπικοί αισθητήρες Hall που συναντώνται στην αγορά έχουν πολύ χαμηλό κόστος λόγω της μαζικής τους παραγωγής και της ευρείας διάδοσης. Οι αισθητήρες Hall χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, αναλόγως των μετρήσεων που είναι ικανοί να πραγματοποιήσουν.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που παράγουν ένα συγκεκριμένο σήμα εξόδου εάν το μαγνητικό πεδίο που δέχονται υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή (latch Hall sensors). Επομένως, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τον προσδιορισμό ύπαρξης ή μη μαγνητικού πεδίου και όχι για τη μέτρηση της τιμής του. Τέτοιοι αισθητήρες έχουν εφαρμογές κυρίως σε περιπτώσεις μέτρησης αριθμού περιστροφών και συνεπώς ταχύτητας περιστροφής.

Στην δεύτερη και στην τρίτη κατηγορία αισθητήρων Hall περιλαμβάνονται οι αισθητήρες που είναι ικανοί να παράγουν μία τάση εξόδου που σχετίζεται γραμμικά με το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι γραμμικοί αισθητήρες Hall χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τους μονοπολικούς (linear unipolar) και τους διπολικούς (linear bipolar). Οι μονοπολικοί αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μόνο η

μέτρηση της απόλυτης τιμής του μαγνητικού πεδίου. Εάν είναι απαραίτητη η γνώση και της κατεύθυνσης επιβολής του μαγνητικού πεδίου ως προς τον αισθητήρα, τότε χρησιμοποιούνται οι διπολικοί αισθητήρες Hall. Στην περίπτωση των διπολικών αισθητήρων Hall, η τάση εξόδου για μηδενικό επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας. Συνεπώς, τάση εξόδου στο διάστημα $(0, \frac{V_{cc}}{2})$ υποδηλώνει επιβολή μαγνητικού πεδίου με κατεύθυνση αντίθετη ως προς την εμπρόσθια όψη του αισθητήρα, ενώ τάση εξόδου στο διάστημα $(\frac{V_{cc}}{2}, V_{cc})$ υποδηλώνει επιβολή πεδίου με κατεύθυνση όμοια με αυτή του αισθητήρα.

1.4 Μη Καταστροφικός Έλεγχος Υλικών

1.4.1 Εισαγωγή

Ως «Μη Καταστροφικός Έλεγχος» (**Non-Destructive Testing – NDT**) ορίζεται το σύνολο των μεθόδων ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα υλικό με σκοπό την εξακρίβωση της ποιότητάς του, χωρίς να προκληθούν φθορές σε αυτό. Περιλαμβάνεται, δηλαδή, ο εντοπισμός ατελειών, ανομοιογενειών και λοιπών σφαλμάτων που είναι δυνατόν να έχουν δημιουργηθεί σε αυτό, καθώς και η μελέτη των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του.

Ο οπτικός ή και ακουστικός έλεγχος από τον άνθρωπο είναι συχνά αρκετός για την ταχεία εξέταση ενός δοκιμίου και τον εντοπισμό σοβαρών εμφανών σφαλμάτων. Όμως, σε πολλές περιπτώσεις αυτό δεν επαρκεί, καθώς απαιτείται διεξοδικός έλεγχος σφαλμάτων, για την ανίχνευση των οποίων είναι απαραίτητο να μελετηθεί το εξεταζόμενο υλικό σε δομικό επίπεδο. Γι' αυτόν το σκοπό, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι που αναδεικνύουν τις ατέλειες και τα χαρακτηριστικά του υλικού που δεν γίνονται αντιληπτά στον άνθρωπο με διαφορετικό τρόπο, χωρίς όμως να προκαλούν φθορές στο υπό εξέταση υλικό.

Το βασικό πλεονέκτημα του Μη Καταστροφικού Ελέγχου είναι η αποφυγή πρόκλησης μονίμων μεταβολών στο εξεταζόμενο υλικό. Επομένως, είναι δυνατή η επί τόπου μελέτη υλικών, χωρίς, δηλαδή, να είναι απαραίτητη η μετακίνησή τους σε

εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συχνότερα βασίζονται στον μαγνητισμό, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στους υπερήχους, στην οπτική, στην ακουστική και στη ραδιογραφία. Συνεπώς, ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος συναντάται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις βιομηχανικές μονάδες, τα παραγόμενα προϊόντα, τις κτηριακές εγκαταστάσεις, τα μεταφορικά μέσα, τους αγωγούς διανομής ενέργειας και τα οδικά δίκτυα.

Μια σημαντική κατηγορία Μη Καταστροφικού Ελέγχου περιλαμβάνει τις μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φερρομαγνητικά υλικά, όπως είναι ο χάλυβας. Λόγω της ευρείας χρήσης του συγκεκριμένου υλικού, τέτοιες μέθοδοι συναντώνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που περιλαμβάνει τις μεταφορές (π.χ. σιδηροδρομικές γραμμές, πλοία), την ενέργεια (π.χ. σωλήνες μεταφοράς καυσίμων, μετασχηματιστές) και τη βιομηχανία (μεταλλικές κατασκευές, γραμμές παραγωγής). Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητος ο συχνός έλεγχος της κατάστασης του χάλυβα, με σκοπό την εύρεση ατελειών, την πρόληψη και αντιμετώπιση τυχόν αστοχιών, καθώς και την πρόβλεψη του χρόνου ζωής του υλικού [94].

1.4.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου μαγνητικών υλικών

1.4.2.1 Εισαγωγή

Για τον έλεγχο των μαγνητικών υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικίλες μέθοδοι. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται προφανώς από το υλικό, καθώς και από την επιθυμητή εφαρμογή. Σε κάθε περίπτωση, ο έλεγχος ενός υλικού είναι τοπικός, κάτι που σημαίνει ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί σε πολλά διαφορετικά σημεία, ώστε να ληφθεί σαφές συμπέρασμα για την κατάσταση του υλικού. Επίσης, λόγω της ανισοτροπίας των υλικών, απαιτείται η πραγματοποίηση ελέγχων σε περισσότερους από έναν προσανατολισμούς λήψης μέτρησης.

Το επόμενο καθοριστικό στοιχείο κατά τον έλεγχο ενός υλικού είναι η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου που θα μετρηθεί και, μέσω αυτής, θα αξιολογηθεί η συνολική κατάσταση του υλικού. Τα τρία βασικά μεγέθη που καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την κατάσταση και τις ιδιότητες ενός υλικού, είναι το μαγνητικό πεδίο H , η μαγνητική επαγωγή B και η μαγνητική διαπερατότητα μ .

Για τη μέτρηση των παραπάνω μεγεθών, υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις και αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το σύνηθες στοιχείο που χρησιμοποιείται είναι το πηνίο, το οποίο όταν βρίσκεται σε επαφή με το εξεταζόμενο υλικό ή σε μικρή απόσταση από αυτό, δίνει τη δυνατότητα διάδοσης της μαγνητικής ροής μέσω αυτού. Αντιστρόφως, ένα πηνίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη της μαγνητικής πληροφορίας, δηλαδή του μαγνητικού σήματος που θα έχει τροποποιηθεί λόγω των ιδιοτήτων και της κατάστασης του υλικού. Ένα πηνίο μπορεί να τυλιχθεί απευθείας γύρω από το υλικό, ώστε να είναι ικανό να λάβει πληροφορία από το σύνολό του, με την προϋπόθεση να μπορεί να υπερνικήσει το επιδερμικό φαινόμενο [95]–[98].

1.4.2.2 Μέτρηση μαγνητικής επαγωγής

Για τη μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται επάνω ή κοντά στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού και λαμβάνουν εντοπισμένες μετρήσεις, που μπορούν να συσχετιστούν με την κατάσταση του υλικού στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και Hall είναι μερικοί από αυτούς. Όπως προαναφέρθηκε, η ανισοτροπία των υλικών επιβάλλει τη λήψη μετρήσεων σε ποικίλους προσανατολισμούς. Αυτό μπορεί να γίνει ευκολότερο μέσω της χρήσης αισθητήρων που επιτρέπουν τη λήψη μετρήσεων σε περισσότερες της μίας διαστάσεις. Σε κάθε περίπτωση, σημαντικό ρόλο παίζει η σωστή τοποθέτηση και η γνώση του προσανατολισμού του αισθητήρα ως προς το μετρούμενο δοκίμιο. Ο συγκεκριμένος παράγοντας αβεβαιότητας αυξάνεται λόγω των μικρών διαστάσεων που έχουν πολλοί από τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες.

Η τάση εξόδου V_{out} από ένα πηνίο μέτρησης μαγνητικής επαγωγής προκύπτει, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, από την παρακάτω σχέση:

$$V_{out} = -A \cdot N \cdot \frac{dB}{dt} \quad (1.17)$$

όπου:

- B : η μαγνητική επαγωγή

- A : το εμβαδόν διατομής
- N : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι δεν είναι δυνατή η άμεση μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής B , αλλά μπορεί να υπολογιστεί μέσω ολοκλήρωσης:

$$B = - \int \frac{V_{out}}{A \cdot N} dt \quad (1.18)$$

1.4.2.3 Μέτρηση με δινορρεύματα

Τα δινορρεύματα (eddy currents) μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο των υλικών. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης των δινορρευμάτων είναι ότι μπορεί ως μέθοδος να εφαρμοστεί και σε υλικά που δεν είναι μαγνητικά, αρκεί να είναι ηλεκτρικά αγώγιμα. Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτείται ένα πηνίο που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, επιβάλλοντας μαγνητικό πεδίο που θα διαδοθεί κάθετα στο εξεταζόμενο υλικό. Εάν τοποθετηθεί κοντά ένα αγώγιμο υλικό, θα αναπτυχθούν δινορρεύματα σε κλειστούς βρόχους.

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτά μπορεί να ληφθεί μέσω ενός δεύτερου πηνίου και να αναλυθεί, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού και των ατελειών του. Ο έλεγχος με δινορρεύματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέθοδος χαρακτηρισμού υλικών για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας, της μαγνητικής τους διαπερατότητας, αλλά και του πάχους τους. Οι ατέλειες που είναι δυνατόν να εντοπιστούν πρέπει να βρίσκονται στην επιφάνεια ή σε μικρό βάθος ως προς το εξεταζόμενο υλικό. Η ανίχνευση γίνεται χωρίς να είναι απαραίτητη η άμεση επαφή με το δοκίμιο, αλλά και χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του. Ωστόσο, απαιτείται εμπειρία για την κατανόηση των αποτελεσμάτων και την απομόνωση του σήματος από τον περιβαλλοντικό θόρυβο [99]–[102].

1.4.2.4 Μέτρηση μηχανικών τάσεων

Ένας άλλος τρόπος ελέγχου του υλικού είναι μέσω της μέτρησης και παρακολούθησης των μηχανικών τάσεων που ασκούνται σε αυτό. Η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων επηρεάζει τη δομή του υλικού, ενώ σε συνδυασμό με την επιβολή εξωτερικών τάσεων, μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στη θραύση του. Για την αντιμετώπισή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανικές μέθοδοι, ή και τεχνικές τοπικής θέρμανσης [103], [104].

Για την εύρεση των παραμενουσών τάσεων στους χάλυβες, χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι αναφοράς: η περίθλαση ακτίνων Χ (**X-Ray Diffraction – XRD**) [105] και η περίθλαση νετρονίων (**Neutron Diffraction – ND**) [106]. Αυτές οι μέθοδοι είναι εργαστηριακές και προϋποθέτουν την κατανάλωση χρόνου για την κατάλληλη προετοιμασία του δοκιμίου και τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Άλλες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, για τον επί τόπου έλεγχο των επιβαλλόμενων τάσεων. Ο αισθητήρας πιεζοαντίστασης (**strain gauge**) αποτελεί μία συνήθη επιλογή για την παρακολούθηση μηχανικών τάσεων, μέσω της μέτρησης της κάμψης ή του εφελκυσμού του υλικού. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αλλαγή της αντίστασης του αισθητήρα, που οφείλεται στη μεταβολή των διαστάσεων του υλικού του, λόγω των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτόν. Το μήκος των αισθητήρων **strain gauge** ποικίλλει από μερικά cm έως και περίπου 2m. Επομένως, πρέπει να διεξαχθεί μελέτη ή και προσομοίωση μέσω μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων και του πλήθους των αισθητήρων που πρέπει να τοποθετηθούν, ώστε να ληφθεί σαφής εικόνα της κατάστασης της υπό εξέταση δομής [107]–[112].

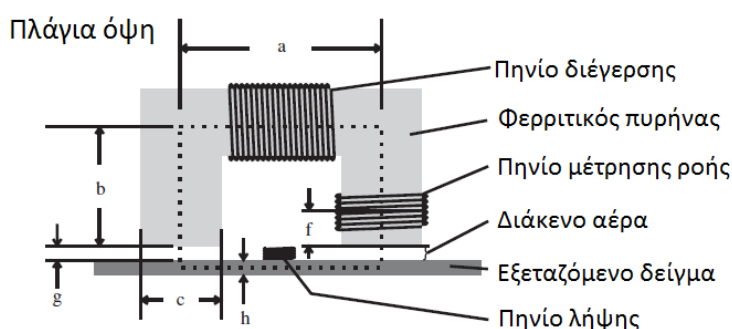
Μία άλλη κατηγορία αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των μηχανικών τάσεων, είναι οι αισθητήρες οπτικών ινών (**Fiber Bragg Grating – FBG**). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μετάδοση οπτικού σήματος γνωστού μήκους κύματος μέσω των οπτικών ινών και στη λήψη και καταγραφή του μήκους κύματος του ανακλώμενου σήματος. Αλλαγή του μήκους της οπτικής ίνας λόγω εφελκυσμού, οδηγεί στην αλλαγή του καταγραφόμενου μήκους κύματος. Οι οπτικές ίνες τοποθετούνται σε περίβλημα, ώστε να αποφευχθούν τυχόν φθορές. Σε συνδυασμό με την ανοχή τους σε θερμοκρασιακές μεταβολές ή ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές,

οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι ικανοί να μετρούν υπό ένα μεγάλο εύρος συνθηκών [113]–[121].

1.4.2.5 Μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας

Οι μηχανικές τάσεις μπορούν να συσχετιστούν με τις μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας ενός υλικού, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του υλικού και τις ιδιότητές του. Μέσω ενός κατάλληλα βαθμονομημένου μαγνητικού αισθητήρα, είναι δυνατή η εξαγωγή των παραπάνω πληροφοριών [122]–[126].

Μια συνήθης διάταξη μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας αποτελείται από ένα πηνίο διέγερσης, το οποίο περιελίσσεται γύρω από έναν πυρήνα ηλεκτρικού χάλυβα σε σχήμα «Π» (yoke). Στον ίδιο πυρήνα ή στο δείγμα τοποθετείται και ένα πηνίο λήψης. Το μαγνητικό κύκλωμα ολοκληρώνεται όταν το yoke τοποθετείται πάνω ή πολύ κοντά στο υπό εξέταση υλικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Για την ελάττωση των παραγόμενων δινορρευμάτων, το yoke μπορεί να αποτελείται από πολλά φύλλα με μονωτικά στρώματα μεταξύ αυτών. Σε μια παραλλαγή του παραπάνω τρόπου μέτρησης, τα πηνία τυλίγονται απευθείας πάνω στο εξεταζόμενο υλικό. Αν και αυτός είναι πιο άμεσος τρόπος μέτρησης, αφού δεν περιλαμβάνει άλλο υλικό πέραν του εξεταζόμενου, παρ' όλα αυτά απαιτεί την επέμβαση στο υπό εξέταση δοκίμιο για την τοποθέτηση των πηνίων, κάτι που δεν είναι πάντοτε εφικτό.



Σχήμα 1.7: Διάταξη μέτρησης με χρήση yoke (Τροποποίηση από [127]).

Η αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας συνδέεται με τις μηχανικές τάσεις μέσω του φαινομένου Villari, σύμφωνα με το οποίο η αλλαγή των διαστάσεων ενός

υλικού προκαλεί την αλλαγή της μαγνητικής του διαπερατότητας μ και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο [128]:

$$\mu = \frac{J_s^2}{3\mu_0\lambda_s\sigma} = \frac{J_s^2}{3\mu_0\lambda_s Y \varepsilon} \quad (1.19)$$

όπου:

- J_s : η μαγνητική πόλωση κορεσμού
- λ_s : ο συντελεστής μαγνητοσυστολής
- σ : το μέτρο της επιβαλλόμενης τάσης
- Y : το μέτρο ελαστικότητας
- ε : η ανηγμένη παραμόρφωση του υλικού.

Τελικά, από τη μελέτη του σήματος που λαμβάνεται, μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του υλικού και για τη δομή του, αφού οι ατέλειές του δημιουργούν μεταβολές στη μαγνητική ροή.

Με αυτήν τη μέθοδο μπορούν να ανιχνευθούν ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού ή και σε όσο βάθος επιτρέπει το επιδερμικό φαινόμενο. Για τη διεξαγωγή της μέτρησης δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του δοκιμίου και μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και με χαμηλό κόστος.

1.4.2.6 Μέτρηση βρόχου υστέρησης

Ο βρόχος υστέρησης αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία για τη μελέτη των φερρομαγνητικών υλικών. Περιέχει ένα σύνολο πληροφοριών σχετικά με τις ιδιότητές τους και με τις μεταβολές που τυχόν προκύπτουν σε αυτά [129]. Η ευαισθησία ενός υλικού στις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου, το πεδίο που απαιτείται για να φθάσει σε κορεσμό, η μαγνήτιση που παραμένει στο υλικό απουσία επιβολής πεδίου, το μαγνητικό πεδίο που απαιτείται για να απομαγνητιστεί το υλικό και η ενέργεια που δαπανάται σε κάθε κύκλο του βρόχου, είναι μερικά από τα στοιχεία που προκύπτουν από τη μελέτη του βρόχου υστέρησης ενός υλικού.

Για την καταγραφή του βρόχου υστέρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία διάταξη με ένα yoke, το οποίο περιλαμβάνει πηνία διέγερσης και λήψης του σήματος. Η επιλογή της κατάλληλης συχνότητας διέγερσης είναι σημαντική, για την καταγραφή του συνόλου του βρόχου, αλλά και για την αντιμετώπιση των δινορρευμάτων που δημιουργούνται. Γι' αυτό το λόγο, οι συχνότητες διέγερσης που χρησιμοποιούνται είναι χαμηλές, συνήθως στο εύρος 100mHz έως 10Hz. Για την εμφάνιση και αποτύπωση του βρόχου υστέρησης, απαιτείται η ταυτόχρονη καταγραφή των τιμών των δύο μεγεθών που τον χαρακτηρίζουν, δηλαδή του επιβαλλόμενου πεδίου H και της μαγνητικής επαγωγής B . Συνεπώς, είναι απαραίτητη η χρήση ολοκληρωτή για την εξαγωγή των τιμών της μαγνητικής επαγωγής από τις μετρήσεις που προκύπτουν από το πηνίο λήψης.

1.4.2.7 Μέτρηση θορύβου Barkhausen

Μία, επίσης συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος, είναι η καταγραφή του Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen [130]–[132]. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μη καταστροφική και βασίζεται στη λήψη του σήματος που παράγεται κατά τη μαγνήτιση του υπό εξέταση υλικού. Η μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων που πραγματοποιείται κατά τη μαγνήτιση ενός φερρομαγνητικού υλικού είναι απότομη και ασυνεχής και όταν καταγράφεται μέσω ενός πηνίου λήψης, μοιάζει με θόρυβο. Οι ατέλειες και οι παραμορφώσεις που επηρεάζουν το υλικό επιδρούν στο λαμβανόμενο σήμα. Έχοντας βαθμονομήσει καταλλήλως τον αισθητήρα Barkhausen, είναι δυνατή η ανάλυση του σήματος και η διεξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση του υλικού. Σε αυτό το είδος μέτρησης λαμβάνεται η ενεργός τιμή του καταγραφόμενου σήματος, καθώς και ο αριθμός των λεγόμενων “αλμάτων Barkhausen”, δηλαδή των τιμών σήματος που ξεπερνούν ένα ορισμένο κατώφλι και υποδηλώνουν την απότομη και ασυνεχή μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων του φερρομαγνητικού υλικού [133]–[135].

Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ανάγκη για πολύ καλή επαφή μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου, η χαμηλή συχνότητα διέγερσης που συνεπάγεται και χαμηλό ρυθμό λήψης μετρήσεων και η ύπαρξη παρεμβολών στο χαμηλής τάσης λαμβανόμενο σήμα.

1.4.3 Ηλεκτρονικά κυκλώματα μετρήσεων

Μετά την επιλογή της μεθόδου και της ανάπτυξης της κατάλληλης τοπολογίας για την ανίχνευση της επιθυμητής ποσότητας, το επόμενο σημαντικό βήμα είναι η σχεδίαση και η ανάπτυξη των κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που θα είναι σε θέση να τροφοδοτήσουν τους αισθητήρες, να λάβουν το σήμα εξόδου και να το προσαρμόσουν σε μία μορφή που θα επιτρέπει την εξαγωγή των επιθυμητών συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση του εξεταζόμενου υλικού.

Στο πλαίσιο μιας εργαστηριακής διάταξης, συνήθως προτιμάται να θυσιαστεί η φορητότητά της και το χαμηλό της κόστος, ώστε να είναι δυνατή η αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιούνται εργαστηριακά όργανα για την παραγωγή του απαιτούμενου σήματος διέγερσης και για τη λήψη της πληροφορίας.

Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση της ανάπτυξης μιας φορητής διάταξης. Η ακρίβεια των μετρήσεων μειώνεται, αλλά είναι δυνατή η μείωση του μεγέθους και του κόστους της. Ο παράγοντας της ενεργειακής κατανάλωσης πρέπει, επίσης, να ληφθεί υπόψιν σε πολλές περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η τροφοδοσία της διάταξης από ένα σταθερό δίκτυο παροχής ενέργειας.

Όσον αφορά το λαμβανόμενο σήμα, σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η ενίσχυσή του. Η ανέπαφη μαγνητική μέτρηση προσφέρει το πλεονέκτημα της αποφυγής της φθοράς του αισθητήρα και του δοκιμίου, όμως η ύπαρξη διάκενου (lift-off) μειώνει σημαντικά το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος. Τελικά, το πλάτος του σήματος μπορεί να είναι της τάξης των μV , καθιστώντας δύσκολη τη μετ' έπειτα επεξεργασία του. Διάφορα είδη ενισχυτών (π.χ. lock-in amplifiers, instrumentational amplifiers κ.λπ.) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση του σήματος, εξαλείφοντας όσο είναι δυνατόν τον θόρυβο από αυτό. Η περαιτέρω εξάλειψη του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών φίλτρων κατάλληλης τάξης και τοπολογίας. Το εύρος συχνοτήτων που θα αποκόπτεται από το φίλτρο διαφέρει αναλόγως του είδους της μέτρησης και της εφαρμογής και μπορεί να καθοριστεί μέσω βιβλιογραφικής έρευνας και πειραματικών μετρήσεων. Λόγω της φύσης των μετρήσεων, σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, τα ηλεκτρονικά που θα

χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από γρήγορη απόκριση, χαμηλά επίπεδα θορύβου και χαμηλά επίπεδα επηρεασμού από τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Τέλος, η ψηφιοποίηση για την περαιτέρω επεξεργασία της λαμβανόμενης πληροφορίας διαφέρει αναλόγως του τύπου μέτρησης. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να απαιτείται η λήψη του συνόλου της πληροφορίας, ενώ σε άλλες η καταγραφή μόνο της τιμής τάσης από κορυφή σε κορυφή. Ο ρυθμός και η ανάλυση της δειγματοληψίας είναι οι δύο σημαντικότερες παράμετροι σε αυτό το στάδιο. Ο ρυθμός δειγματοληψίας συνδέεται με το είδος της μέτρησης. Για παράδειγμα, οι μετρήσεις ελέγχου της δομής ενός υλικού πραγματοποιούνται σε χαμηλή συχνότητα, ώστε να είναι μεγαλύτερο το βάθος διείσδυσης, ενώ οι μετρήσεις επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας μπορούν να πραγματοποιούνται σε πολύ πιο υψηλές συχνότητες. Όταν είναι απαραίτητη η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης της διάταξης, επιβάλλεται η μείωση του ρυθμού δειγματοληψίας ή και μετάδοσης των δεδομένων. Σχετικά με την ανάλυση της δειγματοληψίας, το κόστος και το μέγεθος της διάταξης αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να επιλεγεί ο βέλτιστος συνδυασμός των παραπάνω στοιχείων σε σχέση με την επιθυμητή ακρίβεια των μετρήσεων της διάταξης.



Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων

2.1 Εισαγωγή

Λόγω της ευρείας χρήσης των μαγνητικών αισθητήρων, ένα απαραίτητο στάδιο μετά την ανάπτυξή τους αποτελεί η διακρίβωσή τους, δηλαδή η συσχέτιση του σήματος εξόδου που παράγουν με ένα γνωστό μέγεθος. Ως διαδικασία, η διακρίβωση μπορεί να εκτελείται σε διαφορετική χρονική βάση, ανάλογα με το είδος του αισθητήρα, την απαιτούμενη ακρίβεια και τις συνθήκες λειτουργίας του. Κύριο μειονέκτημα των υπάρχουσών διατάξεων διακρίβωσης αποτελεί το γεγονός ότι βασίζονται σε κάποιο άλλο μαγνητόμετρο, υψηλότερης ευαισθησίας, για τη μέτρηση και αντιστάθμιση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Το σύνηθες μαγνητόμετρο που χρησιμοποιείται και μπορεί να ανιχνεύσει μεταβολές του μαγνητικού πεδίου με υψηλή ευαισθησία είναι ο αισθητήρας SQUID. Όμως, η αρχή λειτουργίας του προϋποθέτει τη χρήση ενός συστήματος ψύξης, ενώ η υψηλή ευαισθησία απαιτεί την ανάπτυξη ενός συστήματος επαρκούς μαγνητικής θωράκισης, ώστε τα υπάρχοντα μαγνητικά πεδία να μην επηρεάζουν τις μετρήσεις. Εκτός από τα παραπάνω, οι μικρές διαστάσεις του αισθητήρα SQUID επιδρούν αρνητικά σε μία τέτοια εφαρμογή, καθώς αυξάνουν την αβεβαιότητα της θέσης και

της ευθυγράμμισης του αισθητήρα με τον υπό εξέταση προσανατολισμό μέτρησης [4], [45], [46].

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω, προτείνεται η χρήση μιας διάταξης, η οποία βασίζεται στη μέτρηση μιας θεμελιώδους ποσότητας, όπως είναι ο χρόνος. Το κύριο πλεονέκτημα που προκύπτει από μία τέτοια διάταξη είναι πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και ως πρωτεύον πρότυπο για τη διακρίβωση των μαγνητομέτρων, μέσω κατάλληλων βελτιώσεων ως προς τα ηλεκτρονικά παραγωγής και μέτρησης του σήματος.

2.2 Αρχή λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα μαγνητόμετρα SQUID προσφέρουν υψηλή ευαισθησία, όμως δεν είναι εύκολη η χρήση τους, καθώς απαιτούν ειδικές συνθήκες ψύξης, ενώ το μικρό τους μέγεθος αυξάνει την αβεβαιότητα στις μετρήσεις, ειδικά στη συγκεκριμένη εφαρμογή διακρίβωσης, στην οποία απαιτείται η όσο το δυνατόν καλύτερη ευθυγράμμιση του μαγνητομέτρου ως προς το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

Από την άλλη πλευρά, αισθητήρες διαφορετικών τύπων, όπως είναι οι αισθητήρες Fluxgate, οι αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) και οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (GMI), μπορούν να κατασκευαστούν έχοντας τις επιθυμητές διαστάσεις και να αποκτήσουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ακρίβειας και μείωσης της αβεβαιότητας. Σε αυτό συμβάλλει και η επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως πυρήνας των αναπτυχθέντων μαγνητομέτρων. Για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης διάταξης διακρίβωσης, ιδανικές επιλογές υλικών του πυρήνα είναι τα άμορφα μαλακά μαγνητικά υλικά με τη μορφή σύρματος ή ταινίας, όπως είναι τα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB.

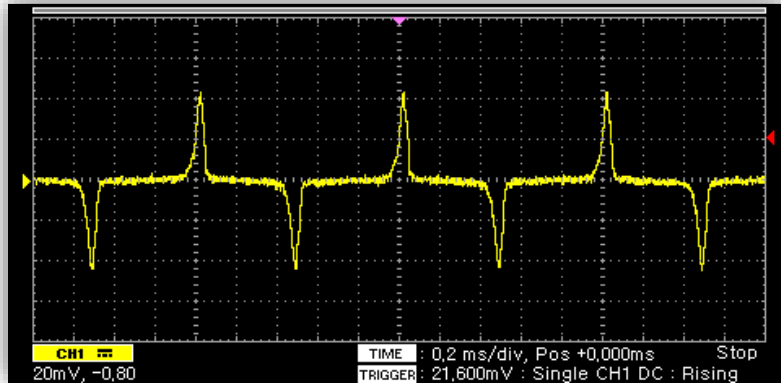
Συνεπώς, το πρώτο βήμα για τη σχεδίαση της διάταξης είναι η επιλογή και ανάπτυξη μιας κατάλληλης τοπολογίας, που θα ανιχνεύει το υπάρχον μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της διάταξης, συσχετίζοντάς το με τη θεμελιώδη ποσότητα του χρόνου και θα βασίζεται στη χρήση των βασικών μαγνητικών φαινομένων.

Η τοπολογία που αναπτύχθηκε και προτείνεται ως σύστημα ανίχνευσης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της διάταξης, βασίζεται στα μαγνητικά φαινόμενα που υφίστανται στα φερρομαγνητικά υλικά και συγκεκριμένα στην αρχή λειτουργίας πύλης-ροής (fluxgate). Πιο συγκεκριμένα, ένα μαγνητικό υλικό φθάνει στον μαγνητικό κορεσμό όταν επιβάλλεται σε αυτό μαγνητικό πεδίο, με τιμή μεγαλύτερη από αυτή του πεδίου κορεσμού για το συγκεκριμένο υλικό.

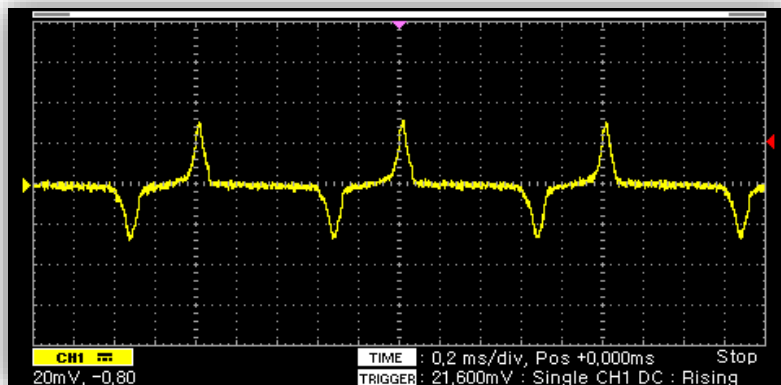
Συνεπώς, εάν χρησιμοποιηθεί μια τοπολογία ενός πρωτεύοντος πηνίου (διέγερσης) για την επιβολή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα τέτοιο υλικό, καθώς και ενός δευτερεύοντος πηνίου (λήψης), θα παρατηρηθεί ότι τα μέγιστα και ελάχιστα του λαμβανόμενου σήματος ισαπέχουν χρονικά. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το υλικό φθάνει σε κορεσμό σε ίσους χρόνους, κατά τη θετική και κατά την αρνητική ημιπερίοδο του εναλλασσόμενου σήματος διέγερσης.

Τα παραπάνω θα ισχύουν στην περίπτωση που το μαγνητικό υλικό δέχεται την επίδραση μόνο του εναλλασσόμενου σήματος διέγερσης. Αντιθέτως, κατά την επιβολή ενός συνεχούς εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το υλικό θα εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά κατά τη θετική και αρνητική ημιπερίοδο του σήματος διέγερσης, διότι το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο θα επιβραδύνει ή θα επιταχύνει τον κορεσμό του. Σαν αποτέλεσμα, η χρονική διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και των ελαχίστων του σήματος θα έχει πλέον μεταβληθεί, αφού το μαγνητικό υλικό φθάνει ταχύτερα ή αργότερα στο σημείο του κορεσμού. Συνεπώς, η ύπαρξη ή μη ενός εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου ανάγεται στη μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ των κορυφών του σήματος που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης της χρησιμοποιούμενης τοπολογίας.

Στα επόμενα σχήματα εμφανίζεται ενδεικτικά το ληφθέν σήμα που προκύπτει χρησιμοποιώντας ένα σύρμα CoFeSiB, κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 2.1) και κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1: Σήμα πηνίου λήψης για μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 2.2: Σήμα πηνίου λήψης για εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Σε αυτά τα σχήματα, γίνεται εμφανής η μεταβολή του σήματος που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης κατά την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στην πρώτη περίπτωση, τα μέγιστα και τα ελάχιστα του σήματος ισαπέχουν ως προς τον οριζόντιο άξονα του χρόνου. Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση, τα διαδοχικά μέγιστα και ελάχιστα παύουν να ισαπέχουν. Η εύρεση της ακριβούς θέσης αυτών των κορυφών και η μέτρηση της μεταξύ τους χρονικής διαφοράς, οδηγεί στην εύρεση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Συνεπώς, ο εκμηδενισμός αυτής της διαφοράς, μέσω της επιβολής ενός μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης, οδηγεί και στην εξάλειψη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

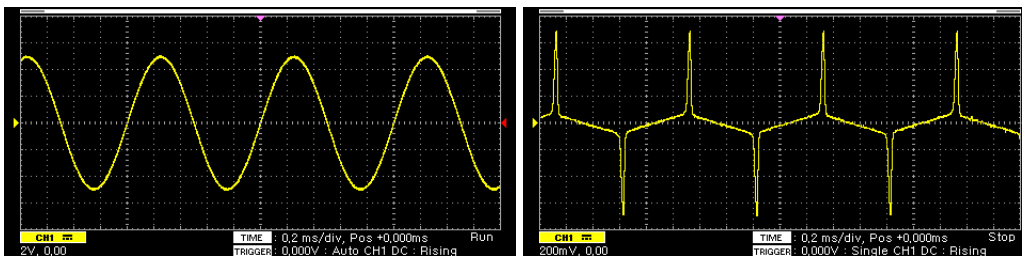
2.3 Ανάπτυξη τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου

Για τη διεξαγωγή μετρήσεων, αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε μία τοπολογία, αποτελούμενη από ένα πηνίο διέγερσης (2 στρώσεων των 550 περιελίξεων, σύρματος χαλκού $\varnothing 0.1\text{mm}$) και από ένα πηνίο λήψης με τα ίδια χαρακτηριστικά. Ως πυρήνας, χρησιμοποιήθηκε άμορφο σύρμα CoFeSiB, διαμέτρου $101\mu\text{m}$.

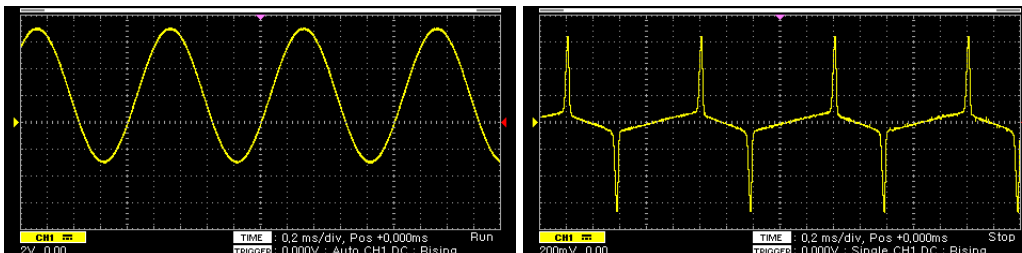


Σχήμα 2.3: Η τοπολογία πηνίων της διάταξης διακρίβωσης.

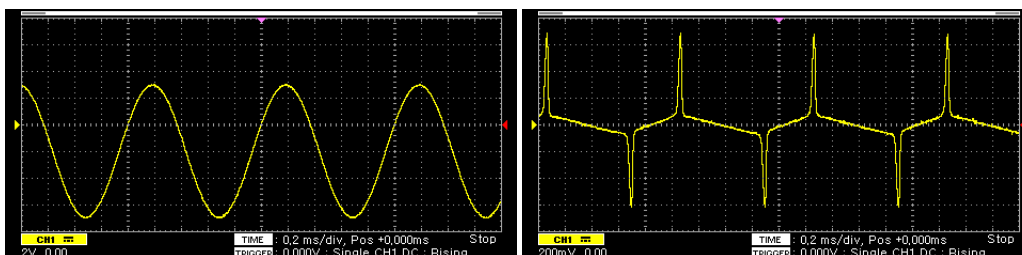
Για τη δοκιμή της λειτουργίας της συγκεκριμένης τοπολογίας, χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια συχνοτήτων για την παραγωγή του σήματος διέγερσης και ένας παλμογράφος για την απεικόνιση του λαμβανόμενου σήματος. Για την προσομοίωση της επιβολής ενός συνεχούς μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία DC Offset της γεννήτριας συχνοτήτων. Συνεπώς, προστέθηκε μία συνεχής θετική ή αρνητική συνιστώσα στο εναλλασσόμενο ημιτονοειδές σήμα που παρείχε η γεννήτρια στο πηνίο διέγερσης της τοπολογίας. Από τα παρακάτω σχήματα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η επιβολή αυτού του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οδηγεί στη μετατόπιση των κορυφών, δηλαδή στη χρονική διαφορά, μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος.



Σχήμα 2.4: Λαμβανόμενο σήμα (δεξιά), για ημιτονοειδή διέγερση πλάτους 5V και συχνότητας 1kHz (αριστερά).



Σχήμα 2.5: Λαμβανόμενο σήμα (δεξιά), για ημιτονοειδή διέγερση πλάτους 5V με DC συνιστώσα +1V, συχνότητας 1kHz (αριστερά).

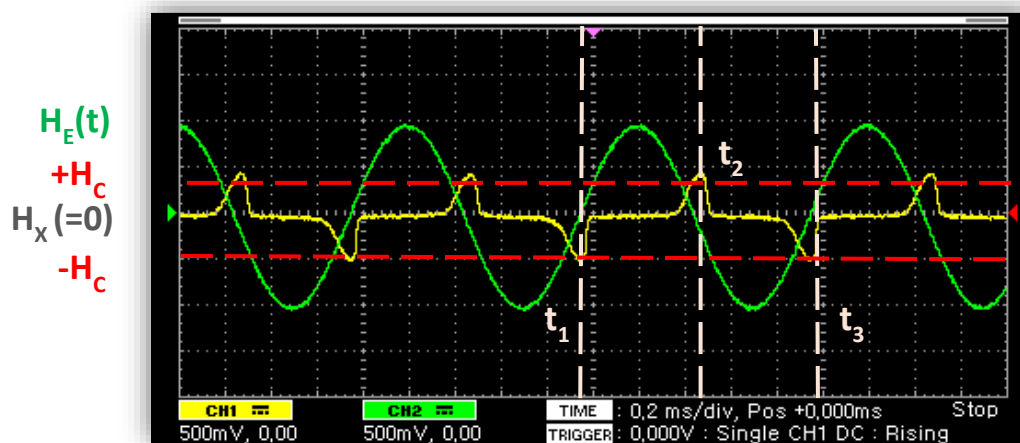


Σχήμα 2.6: Λαμβανόμενο σήμα (δεξιά), για ημιτονοειδή διέγερση πλάτους 5V με DC συνιστώσα -1V, συχνότητας 1kHz (αριστερά).

2.4 Θεωρητικοί υπολογισμοί

2.4.1 Σχέση χρονικής διαφοράς για ημιτονοειδές πεδίο

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ενδεικτικό σήμα διέγερσης, πλάτους $V = 1V$ και συχνότητας $f = 1kHz$, καθώς και το αντίστοιχο σήμα που λαμβάνεται μέσω της αναπτυχθείσας τοπολογίας.



Σχήμα 2.7: Σήμα διέγερσης και ληφθέν σήμα.

Απεικονίζονται οι ακόλουθες τιμές:

- t_1 : χρονικό σημείο ελαχίστου
- t_2 : χρονικό σημείο μέγιστου
- t_3 : χρονικό σημείο επόμενου ελαχίστου
- $H_E(t)$: πεδίο διέγερσης
- H_C : συνεκτικό πεδίο υλικού
- H_X : άγνωστο επιβαλλόμενο πεδίο.

Για τις τρεις χρονικές στιγμές, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$t_1: H_E(t_1) = H_C - H_X \Rightarrow H_E \cdot \sin(\omega t_1) = H_C - H_X \quad (2.1)$$

$$t_2: H_E(t_2) = -H_C - H_X \Rightarrow H_E \cdot \sin\left[\omega\left(t_2 - \frac{T}{2}\right)\right] = H_C + H_X \quad (2.2)$$

(αφού λόγω συμμετρίας ισχύει $t_1 = t_2 - \frac{T}{2}$)

$$t_3: t_1 + T = H_E \cdot \sin(\omega t_1) + T \quad (2.3)$$

(αφού έχει συμπληρωθεί μία περίοδος του σήματος).

Συνεπώς, με απλή επίλυση των παραπάνω σχέσεων ως προς t_1 , t_2 και t_3 αντίστοιχα, προκύπτει:

$$t_1 = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} \quad (2.4)$$

$$t_2 = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C + H_X}{H_E}\right)}{\omega} + \frac{T}{2} \quad (2.5)$$

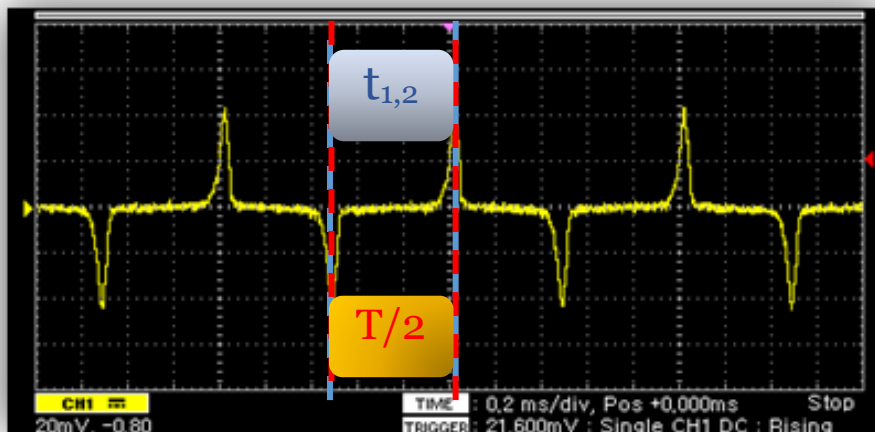
$$t_3 = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} + T \quad (2.6)$$

Τελικά, η χρονική διαφορά Δt υπολογίζεται ως εξής:

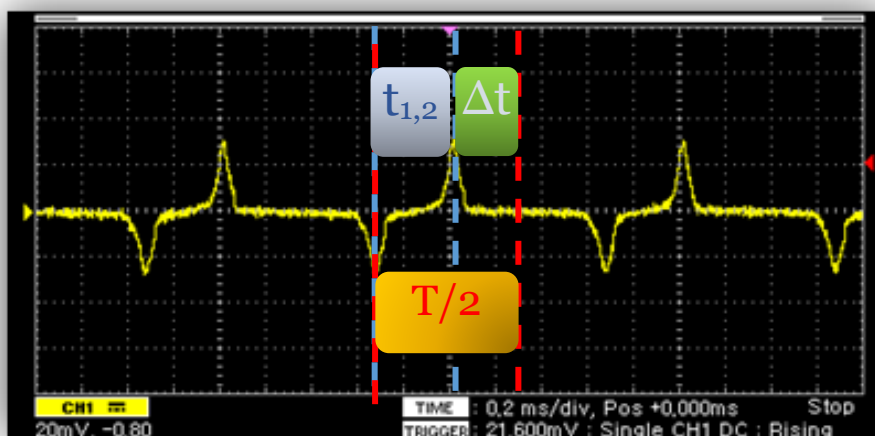
$$\begin{aligned} \Delta t &= (t_2 - t_1) - (t_3 - t_2) = 2t_2 - t_1 - t_3 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= 2\left(\frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C + H_X}{H_E}\right)}{\omega} + \frac{T}{2}\right) - \frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} - \left(\frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} + T\right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= 2\frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C + H_X}{H_E}\right)}{\omega} + T - \frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} - \frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} - T \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= 2\frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C + H_X}{H_E}\right)}{\omega} - 2\frac{\sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right)}{\omega} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= \frac{2}{\omega} \left[\sin^{-1}\left(\frac{H_C + H_X}{H_E}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{H_C - H_X}{H_E}\right) \right] \quad (2.7) \end{aligned}$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, είναι δυνατός ο υπολογισμός του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, μέσω της χρονικής διαφοράς των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του λαμβανόμενου σήματος.

Τα μεγέθη προς μέτρηση, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.8: Μέτρηση απουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου ($\Delta t = 0$).



Σχήμα 2.9: Μέτρηση παρουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου ($\Delta t > 0$).

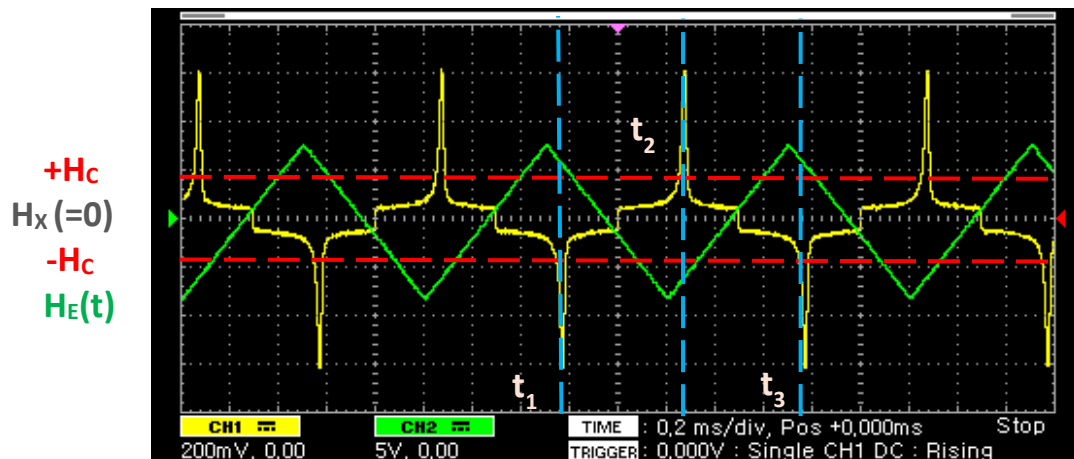
2.4.2 Σχέση χρονικής διαφοράς για τριγωνικό πεδίο

Η σχέση που υπολογίστηκε για το ημιτονοειδές σήμα διέγερσης μπορεί να λυθεί μόνο προσεγγιστικά, ως προς το άγνωστο επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H_x , λόγω της ύπαρξης της αντίστοιχης μεταβλητής στο τόξο ημιτόνου [136].

Για να αποφευχθεί η προσεγγιστική επίλυση και να αυξηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων της διάταξης διακρίβωσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τριγωνικό σήμα διέγερσης. Ένα, ακόμη, πλεονέκτημα του τριγωνικού σήματος διέγερσης αποτελεί η γενικότερη γραμμική συμπεριφορά του κατά ίσα χρονικά διαστήματα, κάτι που έχει

ως αποτέλεσμα την παραγωγή κορυφών με μικρότερης διάρκειας και συνεπώς τη μείωση της αβεβαιότητας των μετρήσεων.

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το τριγωνικό σήμα διέγερσης, καθώς και το αντίστοιχο σήμα λήψης της χρησιμοποιηθείσας τοπολογίας, για πλάτος $V = 7.5V$ και συχνότητα $f = 1kHz$.



Σχήμα 2.10: Σήμα διέγερσης και ληφθέν σήμα από την αναπτυχθείσα τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου.

Απεικονίζονται οι ακόλουθες τιμές:

- t_1 : χρονικό σημείο ελαχίστου
- t_2 : χρονικό σημείο μεγίστου
- t_3 : χρονικό σημείο επόμενου ελαχίστου
- $H_E(t)$: πεδίο διέγερσης
- H_C : συνεκτικό πεδίο υλικού
- H_X : άγνωστο επιβαλλόμενο πεδίο.

Για τις τρεις χρονικές στιγμές ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$t_1: H_E(t_1) = H_C - H_X \Rightarrow a \cdot t_1 = H_C - H_X \quad (2.8)$$

όπου a είναι ο συντελεστής κλίσης του τριγωνικού σήματος.

$$t_2: H_E(t_2) = -H_C - H_X \Rightarrow -a \cdot \left(t_2 - \frac{T}{2}\right) = -H_C - H_X \quad (2.9)$$

(αφού λόγω συμμετρίας ισχύει $t_1 = t_2 - \frac{T}{2}$)

$$t_3: t_1 + T \quad (2.10)$$

(αφού έχει συμπληρωθεί μία περίοδος του σήματος).

Στη συνέχεια, επιλύονται οι παραπάνω σχέσεις ως προς t_1 , t_2 και t_3 αντίστοιχα:

$$t_1 = \frac{H_C - H_X}{a} \quad (2.11)$$

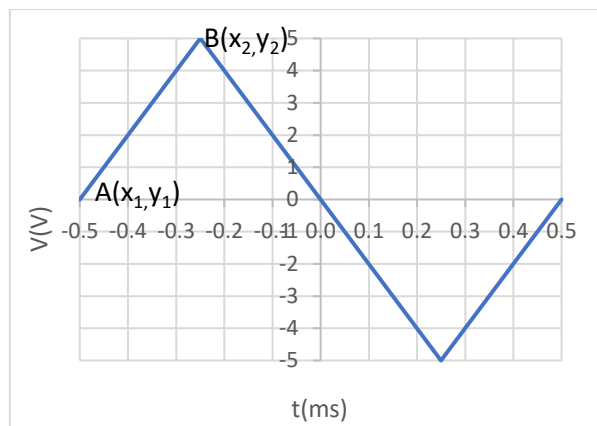
$$t_2 = \frac{H_C + H_X + a \frac{T}{2}}{a} \quad (2.12)$$

$$t_3 = \frac{H_C - H_X}{a} + T \quad (2.13)$$

Τελικά, η χρονική διαφορά Δt υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \Delta t &= (t_2 - t_1) - (t_3 - t_2) = 2t_2 - t_1 - t_3 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= 2 \left(\frac{H_C + H_X + a \frac{T}{2}}{a} \right) - \frac{H_C - H_X}{a} - \left(\frac{H_C - H_X}{a} + T \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= \frac{2H_C}{a} + \frac{2H_X}{a} + T - \frac{H_C}{a} + \frac{H_X}{a} - \frac{H_C}{a} + \frac{H_X}{a} - T \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \Delta t &= \frac{4H_X}{a} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H_X &= \frac{a \cdot \Delta t}{4} \quad (2.14) \end{aligned}$$

Για να υπολογιστεί ο συντελεστής κλίσης α , μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια περίοδος του τριγωνικού σήματος, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.11: Υπολογισμός κλίσης από το τριγωνικό σήμα διέγερσης.

Όπως είναι εμφανές σε αυτό το σχήμα, η κλίση α , μεταξύ των σημείων $A(x_1, y_1)$ και $B(x_2, y_2)$, μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \alpha &= \frac{V - 0}{-\frac{T}{4} + \frac{T}{2}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \alpha &= \frac{4V}{T} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Τελικά, από τις Σχέσεις 2.14 & 2.15 προκύπτει:

$$\begin{aligned} H_X &= \frac{\alpha \cdot \Delta t}{4} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H_X &= \frac{\frac{4H_E}{T} \cdot \Delta t}{4} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H_X &= \frac{H_E \cdot \Delta t}{T} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H_X &= f \cdot H_E \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2.16)$$

όπου f είναι η συχνότητα του σήματος διέγερσης και H_E η μέγιστη τιμή του σήματος διέγερσης.

Είναι προφανές ότι η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια πολύ πιο απλή σχέση. Όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι γνωστά, με αποτέλεσμα να είναι δυνατός

ο ακριβέστερος υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου, μέσω της μέτρησης της χρονικής διαφοράς μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων, χωρίς να απαιτούνται περαιτέρω απλοποιήσεις ή παραδοχές.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αποδεικνύουν τη σχέση μεταξύ χρονικής διαφοράς κορυφών και επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Παρ' όλα αυτά, για τη χρήση της διάταξης διακρίβωσης δεν είναι απαραίτητος υπολογισμός του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, παρά μόνο ο μηδενισμός της χρονικής διαφοράς Δt , μέσω της επιβολής ενός μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης.

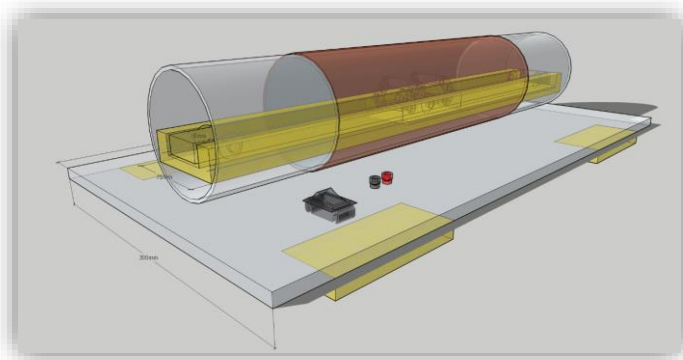
2.5 Κατασκευή σωληνοειδούς

Η διακρίβωση ενός μαγνητομέτρου προϋποθέτει την επιβολή γνωστού και ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δύο μέσα δημιουργίας ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου είναι το σωληνοειδές και τα ζεύγη πηνίων Helmholtz. Κύριο χαρακτηριστικό των πηνίων Helmholtz είναι ότι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο κέντρο κάθε ζεύγους πηνίων είναι ομογενές. Με την κατασκευή τριών ζευγών πηνίων Helmholtz, τα οποία είναι ανά δύο κάθετα μεταξύ τους, επιτυγχάνεται ο έλεγχος και η εξάλειψη του μαγνητικού πεδίου και στις τρεις διαστάσεις.

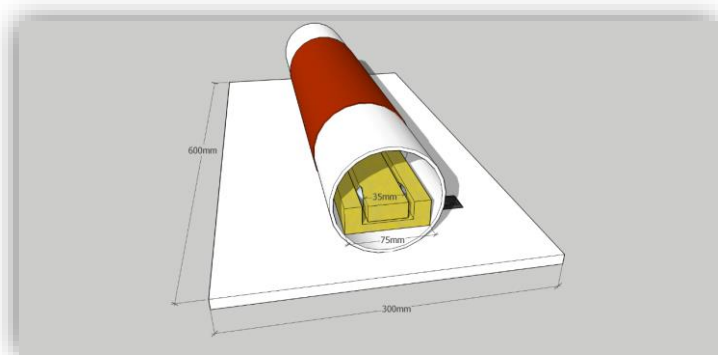
Για την παραγωγή γνωστού μαγνητικού πεδίου σε έναν άξονα, το οποίο θα ενεργεί στο υπό εξέταση μαγνητόμετρο, αρκεί η χρήση ενός σωληνοειδούς, το οποίο και κατασκευάστηκε. Ο χώρος που περικλείεται από το σωληνοειδές λειτουργεί ως χώρος διακρίβωσης του μαγνητομέτρου, όπου το μαγνητικό πεδίο μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια, μέσω της παροχής συνεχούς ρεύματος σε αυτό. Το σωληνοειδές εμφανίζει ένα χρήσιμο πλεονέκτημα σε σχέση με τα πηνία Helmholtz: η κατάλληλη σχεδιάσή του, σε συνδυασμό με το μεγάλο του μήκος, επιτρέπουν την ακριβή τοποθέτηση του υπό διακρίβωση μαγνητομέτρου στο εσωτερικό του.

Το σωληνοειδές που κατασκευάστηκε αποτελείται από δύο στρώσεις σύρματος χαλκού $\varnothing 1\text{mm}$, 290 περιελίξεων η καθεμία. Το πηνίο τυλίχθηκε γύρω από σωλήνα πολυβινυλοχλωριδίου (PVC). Το συνολικό μήκος του σωληνοειδούς είναι 30cm και η

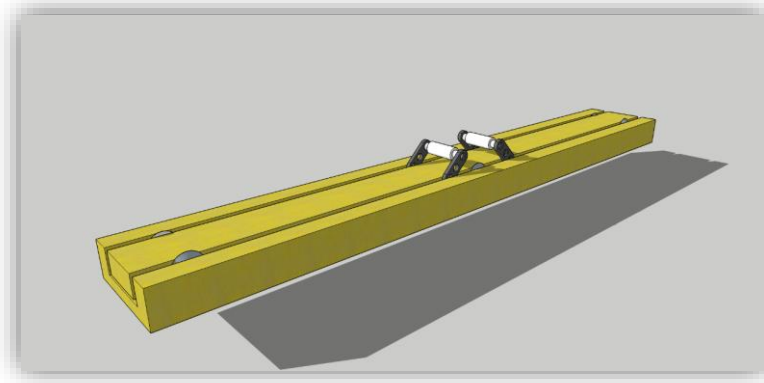
ακτίνα του είναι 5cm. Όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του είναι μη μεταλλικά, ώστε να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη μαγνήτιση και η αλλοίωση του δημιουργηθέντος μαγνητικού πεδίου. Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς τοποθετήθηκε συρόμενη βάση στερέωσης των υπό εξέταση μαγνητομέτρων, κατασκευασμένη από ξύλο. Σε ισαπέχουσες θέσεις από το μέσο της βάσης ανοίχθηκαν οπές και τοποθετήθηκαν βραχίονες στήριξης των μαγνητομέτρων, κατασκευασμένοι από πλαστικό. Τέλος, για τον χειροκίνητο έλεγχο της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου, τοποθετήθηκε ένας μηχανικός διακόπτης τύπου DPDT (Double-Pole, Double-Throw), ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή της πολικότητας της τάσης τροφοδοσίας, οδηγώντας έτσι στην αντιστροφή του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου. Η σχεδίαση του σωληνοειδούς φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



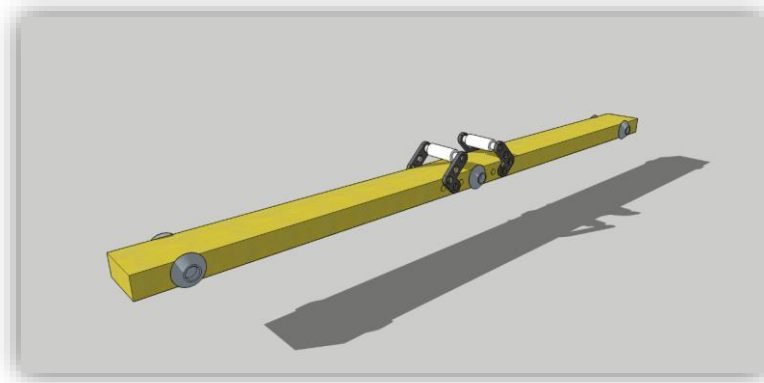
Σχήμα 2.12: Σχέδιο εσωτερικού και εξωτερικού μέρους του σωληνοειδούς.



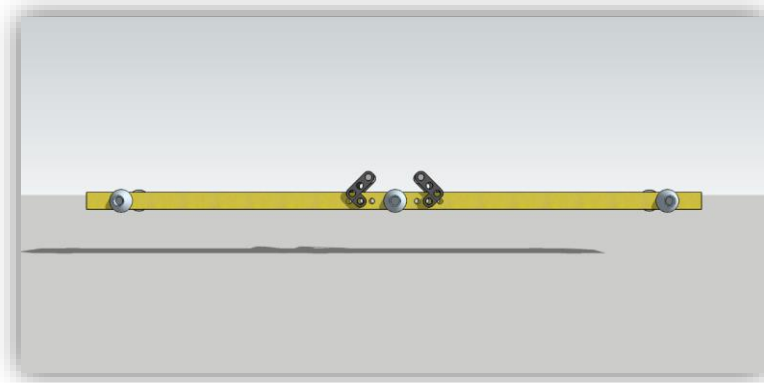
Σχήμα 2.13: Διαστάσεις σωληνοειδούς.



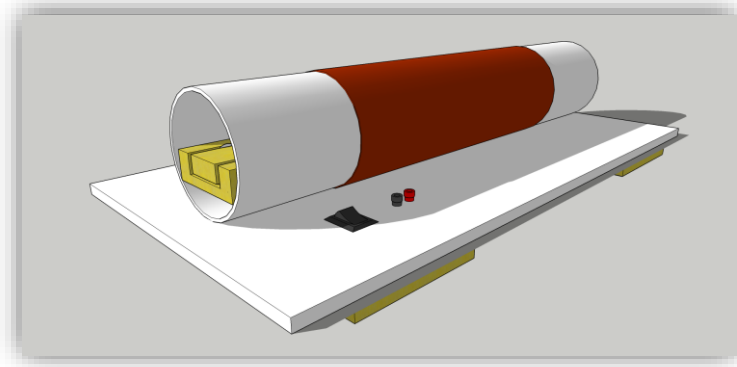
Σχήμα 2.14: Εσωτερική κατασκευή τοποθέτησης μαγνητομέτρου.



Σχήμα 2.15: Συρόμενο τμήμα κατασκευής τοποθέτησης μαγνητομέτρου.



Σχήμα 2.16: Πλάγια όψη συρόμενου τμήματος.

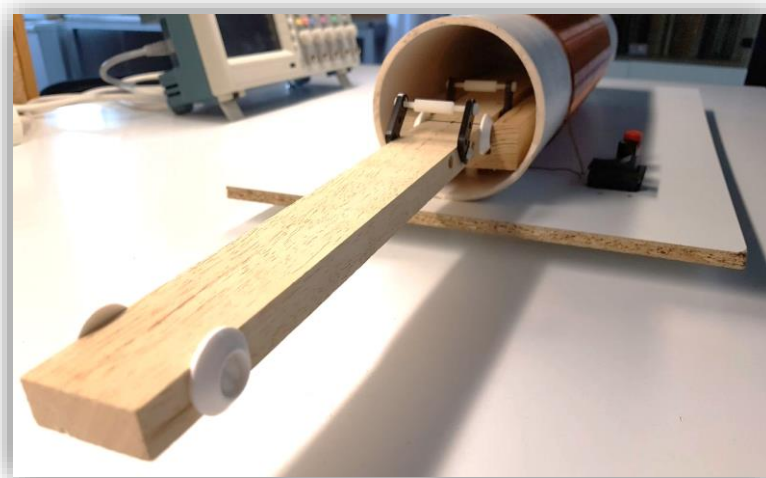


Σχήμα 2.17: Συνολική εικόνα διάταξης.

Η τελική διάταξη που κατασκευάστηκε, παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.18: Τελική αναπτυχθείσα διάταξη σωληνοειδούς.

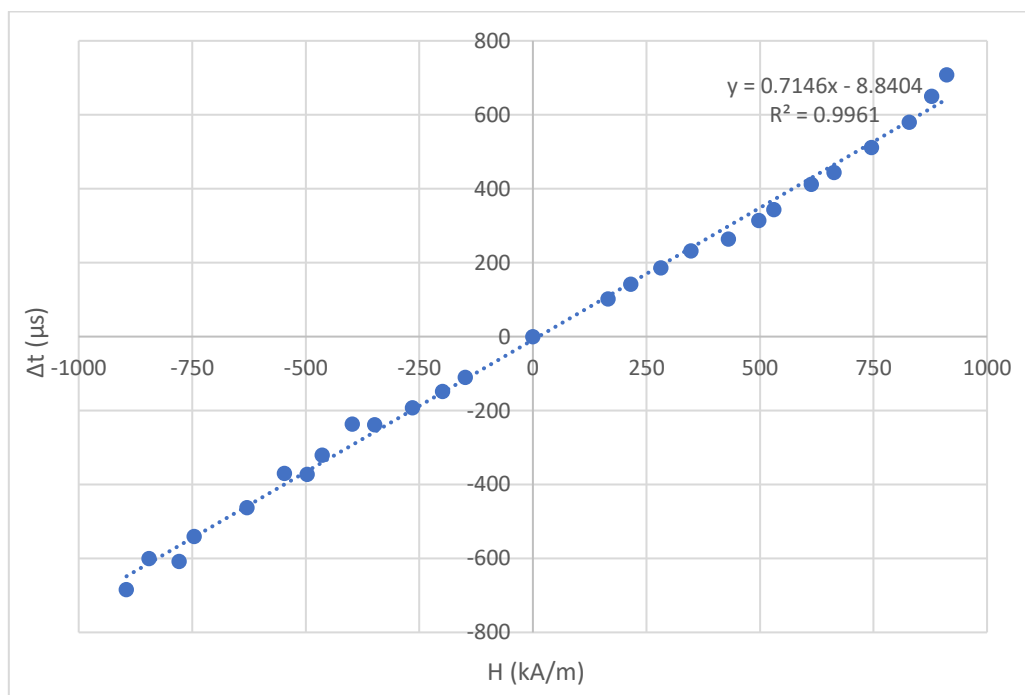


Σχήμα 2.19: Συρόμενη βάση στήριξης του μαγνητομέτρου.

2.6 Μετρήσεις μαγνητικού πεδίου

Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του κατασκευασμένου σωληνοειδούς, καθώς και των θεωρητικών σχέσεων υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται στο κέντρο του, τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του η τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου που έχει κατασκευαστεί.

Τροφοδοτώντας το πηνίο διέγερσης με ημιτονοειδές σήμα πλάτους $V = 2.5V$ και συχνότητας $f = 1kHz$, ελήφθησαν μετρήσεις χρονικής διαφοράς των κορυφών, για διαφορετικές τιμές μαγνητικού πεδίου. Στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζεται το διάγραμμα που προέκυψε από τη λήψη των χρονικών διαφορών, συναρτήσει του επιβαλλόμενου από το σωληνοειδές μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.20: Διάγραμμα χρονικής διαφοράς Δt συναρτήσει του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Οι παρεχόμενες τιμές έντασης ρεύματος στο σωληνοειδές ανήχθησαν σε τιμές μαγνητικού πεδίου, σύμφωνα με τη θεωρητική σχέση έντασης ρεύματος και μαγνητικού πεδίου (Σχέση 1.3). Αντιστοίχως, στον κάθετο άξονα τοποθετήθηκαν οι τιμές του Δt , δηλαδή της προαναφερθείσας χρονικής διαφοράς μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του ληφθέντος σήματος. Από το διάγραμμα που

προκύπτει, είναι εμφανής η γραμμικότητα της σχέσης των δύο μεταβλητών, καθώς και η ορθή λειτουργία τόσο του σωληνοειδούς, όσο και της αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου.

2.7 Ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών

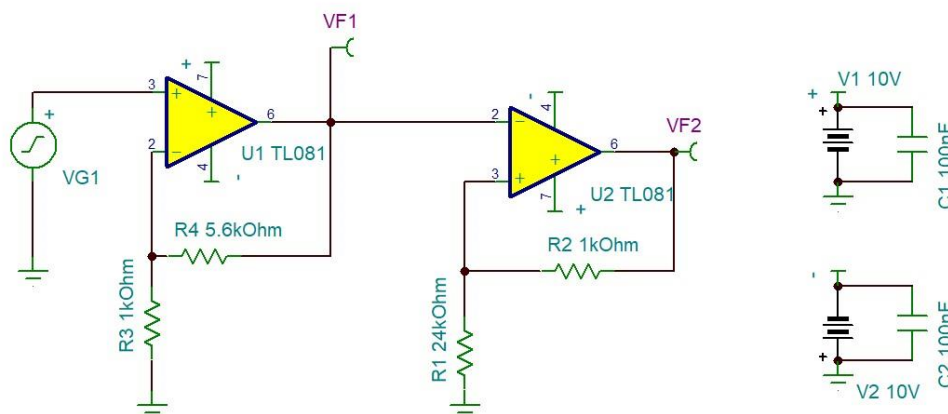
2.7.1 Εισαγωγή

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η αυτόματη ανίχνευση και μέτρηση της προαναφερθείσας χρονικής διαφοράς Δt , μέσω της σχεδίασης και ανάπτυξης κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων.

2.7.2 Σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης

Η λειτουργία του ηλεκτρονικού κυκλώματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.21, όπως σχεδιάστηκε μέσω του λογισμικού Designsoft TINA, βασίζεται στη χρήση ενός συγκριτή τύπου Schmitt trigger, ο οποίος δημιουργεί θετικούς και αρνητικούς παλμούς, η διάρκεια των οποίων αντιστοιχεί στη χρονική διαφορά των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του λαμβανόμενου σήματος [137]–[140]. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτή η απευθείας μέτρηση της χρονικής διαφοράς, μέσω μιας απλής μέτρησης διάρκειας παλμού, κάτι που επιτυγχάνεται εύκολα με τη χρήση ενός μικροελεγκτή.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε βασίστηκε στον τελεστικό ενισχυτή TL081 της Texas Instruments, ο οποίος έχει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, ενώ παρουσιάζει και υψηλό μέγιστο ρυθμό μεταβολής (slew rate) [141]. Επομένως, ο TL081 αποτελεί μία καλή επιλογή χαμηλού κόστους, καθώς επιτυγχάνει γρήγορη απόκριση στις μεταβολές του ληφθέντος σήματος, δημιουργώντας τους αντίστοιχους παλμούς με μεγαλύτερη ακρίβεια.

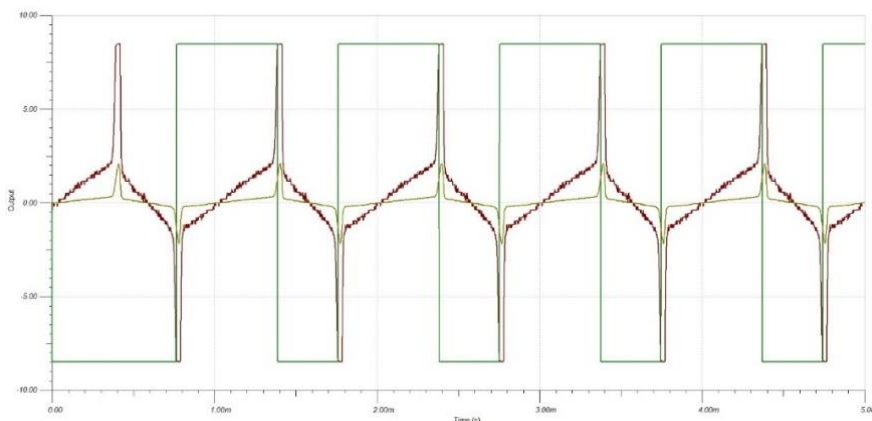


Σχήμα 2.21: Το κύκλωμα προς υλοποίηση.

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται ενίσχυση του σήματος, ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιείται ο τελεστικός ενισχυτής ως συγκριτής τύπου Schmitt trigger. Οι τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 του ηλεκτρονικού κυκλώματος καθορίζουν την τιμή κατωφλίου του σήματος, που θα αντιστοιχεί στην εύρεση της κορυφής. Το συγκεκριμένο κατώφλι V_{thr} υπολογίζεται ποσοστιαία από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{thr}\% = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 100\% \quad (2.17)$$

Επομένως, για $R_1 = 24k\Omega$ και $R_2 = 1k\Omega$, προκύπτει $V_{thr}\% = 96\%$. Το συγκεκριμένο ποσοστό κρίνεται επαρκές, ώστε να εντοπίζονται οι κορυφές χωρίς σφάλματα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συγκεκριμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.22.

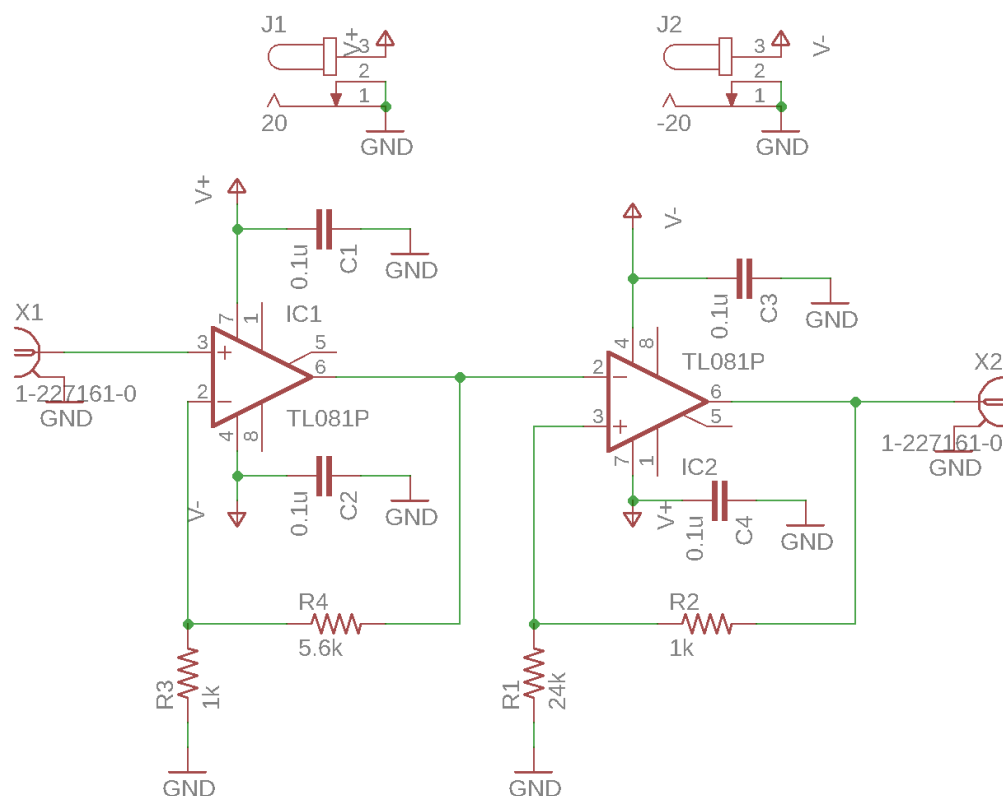


Σχήμα 2.22: Σήμα εισόδου (κίτρινο χρώμα), ενισχυμένο σήμα (κόκκινο χρώμα) και σήμα εξόδου (πράσινο χρώμα).

2.7.3 Σχεδίαση πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης

Για τη σχεδίαση της πλακέτας του ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Autodesk Eagle. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής του λεγόμενης μάσκας, δηλαδή του σχεδίου που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της πλακέτας με το επιθυμητό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Παρέχοντας βιβλιοθήκες ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, είναι δυνατή η εύκολη σχεδίαση της επιθυμητής πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος, με ακριβείς διαστάσεις.

Αρχικά, σχεδιάζεται το κύκλωμα, όπως είχε ήδη δημιουργηθεί για την προσομοίωση. Το συγκεκριμένο σχέδιο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.23.

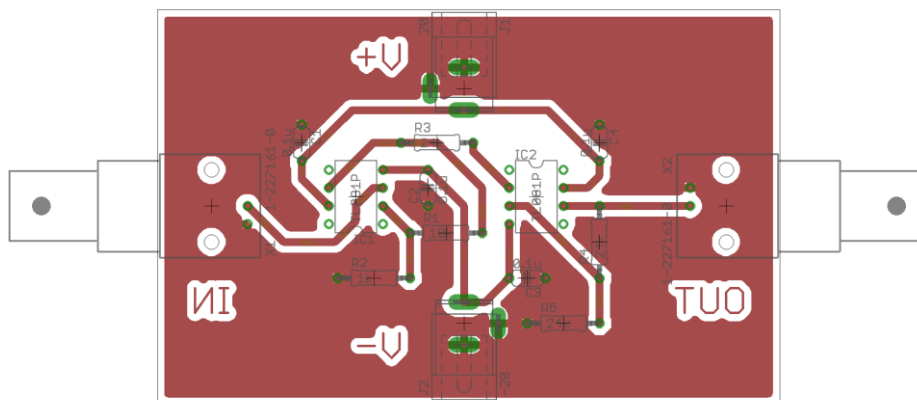


Σχήμα 2.23: Σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος στο λογισμικό Eagle.

Στο ηλεκτρονικό κύκλωμα προστέθηκαν πυκνωτές εξομάλυνσης χωρητικότητας 100nF κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας των τελεστικών ενισχυτών. Για την είσοδο και έξοδο του σήματος επελέγησαν υποδοχές τύπου BNC, ώστε η σύνδεση με τις υπόλοιπες εργαστηριακές συσκευές να γίνεται με χρήση ομοαξονικού καλωδίου.

Τέλος, για την DC τροφοδοσία του κυκλώματος, χρησιμοποιήθηκαν υποδοχές 2.1mm, οι οποίες συναντώνται ευρέως στα τροφοδοτικά.

Βάσει της παραπάνω σχεδίασης, δημιουργήθηκε η τοπολογία της πλακέτας, στην οποία τοποθετήθηκαν καταλλήλως όλα τα παραπάνω εξαρτήματα.



Σχήμα 2.24: Σχεδίαση πλακέτας του ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Για να είναι ευκολότερη η κατασκευή της πλακέτας στον εργαστήριο χώρο, επελέγη η χρήση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων τύπου through-hole, αντί των SMDs (Surface-Mount Devices). Επίσης, οι αγωγίμοι δρόμοι σχεδιάστηκαν σχηματίζοντας γωνίες 120° , έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η διέλευση των σημάτων με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες λόγω σκεδάσεων. Το πλάτος, τόσο των αγωγίμων δρόμων, όσο και των τοιχωμάτων τους (isolation), ήταν επαρκές, ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες σφαλμάτων κατά τα στάδια της κατασκευής και αποχάλκωσης της πλακέτας που ακολουθούν.

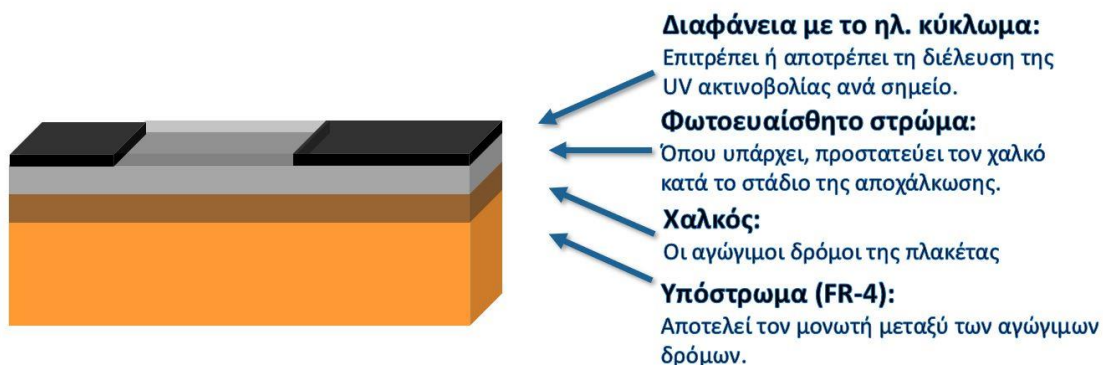
Η πλακέτα που κατασκευάστηκε είναι μίας όψης. Συνεπώς, λόγω της τοποθέτησης των εξαρτημάτων στην αντίθετη όψη από αυτή στην οποία δημιουργήθηκαν οι αγωγίμοι δρόμοι, τα στοιχεία του κυκλώματος που πρέπει να έχουν συγκεκριμένη φορά τοποθέτησης (ολοκληρωμένα, υποδοχές εισόδου/εξόδου, κείμενα), εμφανίζονται στο σχέδιο αντικατοπτρισμένα. Η διαδικασία κατασκευής της πλακέτας θα παρουσιαστεί πιο αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

2.7.4 Κατασκευή πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης

2.7.4.1 Εισαγωγή – Εκτύπωση μάσκας

Για την κατασκευή της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος (**Printed Circuit Board** – PCB) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φωτολιθογραφίας, σύμφωνα με την οποία μια φωτοευαίσθητη πλακέτα εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία, έχοντας τοποθετημένη στην επιφάνειά της κατάλληλη «μάσκα», η οποία καθορίζει τα τμήματα της πλακέτας που θα εκτεθούν ή όχι στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Η πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια φωτοευαίσθητη πλακέτα μονής όψεως, που περιλαμβάνει ένα φωτοευαίσθητο στρώμα, ένα στρώμα χαλκού και μια πολυμερική βάση (FR-4). Η συνήθης δομή μιας τέτοιας πλακέτας εμφανίζεται στο Σχήμα 2.25:

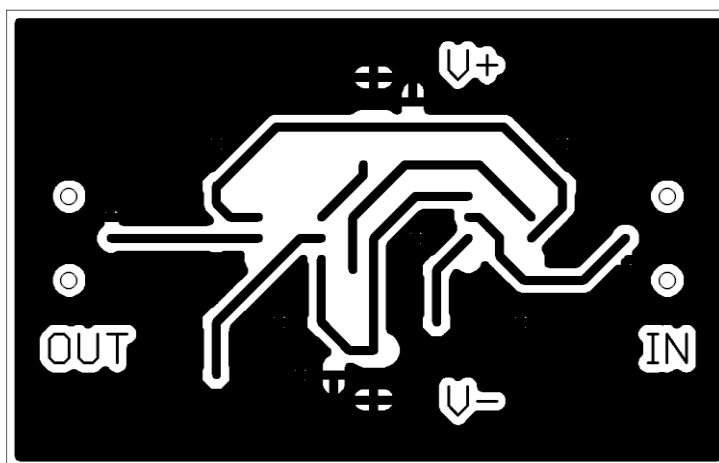


Σχήμα 2.25: Τυπική δομή φωτοευαίσθητης πλακέτας.

Για τη δημιουργία της μάσκας, χρησιμοποιήθηκε το σχέδιο του κυκλώματος που δημιουργήθηκε στο λογισμικό Eagle γι' αυτόν τον σκοπό. Το σχέδιο εκτυπώνεται σε φύλλο διαφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι λευκές περιοχές του σχεδίου θα αντιστοιχούν στις διαφανείς περιοχές της μάσκας, ενώ οι έγχρωμες περιοχές του σχεδίου στις αδιαφανείς, οι οποίες θα καλύπτουν τις περιοχές της πλακέτας που απαιτείται να παραμείνουν αγώγιμες. Σαν αποτέλεσμα, τις προστατεύουν από την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία οδηγεί στην απομάκρυνση του φωτοευαίσθητου στρώματος της πλακέτας, αποτρέποντας τη μετ' έπειτα αποχάλκωση των συγκεκριμένων περιοχών. Αντιθέτως, οι διαφανείς περιοχές της μάσκας θα επιτρέψουν την έκθεση του φωτοευαίσθητου στρώματος της πλακέτας

στην υπεριώδη ακτινοβολία, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την αφαίρεσή του και συνεπώς, την αποχάλκωση και τη δημιουργία των μη αγώγιμων περιοχών της.

Τελικά, αφού πρώτα αφαιρέθηκαν από το συγκεκριμένο σχέδιο τα περιττά στρώματα (layers), τα οποία βοηθούν στο στάδιο της σχεδίασης της πλακέτας, αλλά δεν πρέπει να περιλαμβάνονται στη μάσκα (περιγράμματα, ονομασίες και τιμές εξαρτημάτων), το σχέδιο της μάσκας εκτυπώθηκε αντικατοπτρισμένο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο αντικατοπτρισμός του σχεδίου της μάσκας διευκολύνει τη μετέπειτα διαδικασία της συγκόλλησης και τοποθέτησης των εξαρτημάτων σε αυτήν, συγκεκριμένα για τις περιπτώσεις των εξαρτημάτων που πρέπει να τοποθετηθούν με συγκεκριμένη πολικότητα.



Σχήμα 2.26: Τελική μάσκα προς εκτύπωση.

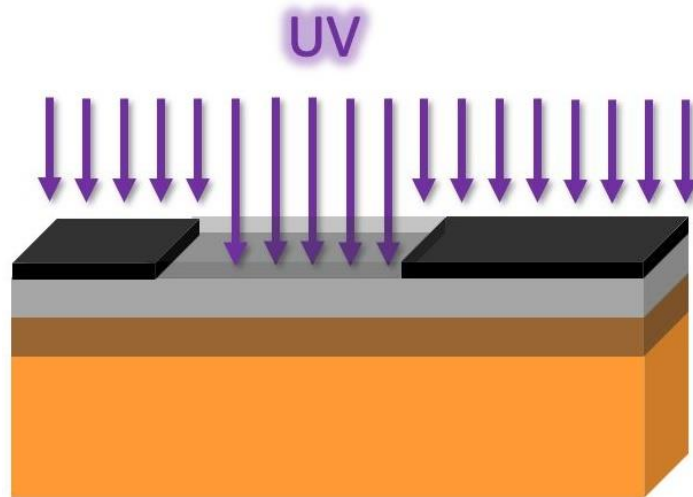
2.7.4.2 Εμφάνιση πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης

Η εκτυπωμένη μάσκα, αφού ελέγχθηκε για τυχόν ατέλειες που προκύπτουν κατά την εκτύπωση (είτε σε εκτυπωτή έγχυσης μελάνης, είτε σε εκτυπωτή laser), τοποθετήθηκε στη φωτοευαίσθητη πλακέτα. Για την έκθεση της πλακέτας σε υπεριώδη ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε ειδική συσκευή έκθεσης γι' αυτόν τον σκοπό (UV Exposure Unit). Η έκθεση πραγματοποιήθηκε σε σκοτεινό χώρο, κάτι που απαιτείται για την αποφυγή της ανεπιθύμητης έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία των διαφόρων τμημάτων της πλακέτας. Η έκθεση διήρκεσε 4 λεπτά, χρόνος που προέκυψε με εμπειρικό τρόπο ότι επαρκεί για την πλήρη έκθεση της πλακέτας.

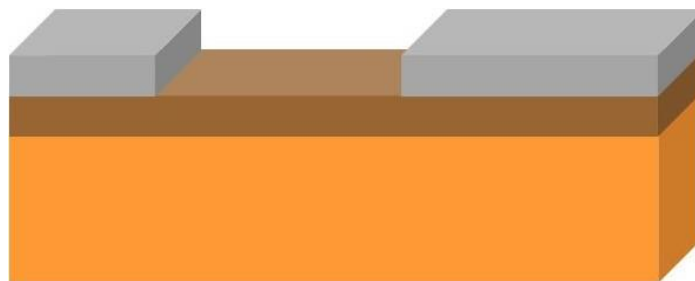
Αμέσως μετά, η πλακέτα τοποθετήθηκε σε διάλυμα καυστικής σόδας (NaOH), το οποίο αποτελεί ένα σύνηθες χημικό (developer) που χρησιμοποιείται για την εμφάνιση, επιταχύνοντας τη διαδικασία εμφάνισης του σχεδίου στην πλακέτα. Μετά από λίγα λεπτά, το σχέδιο εμφανίζεται πλήρως στο άνω στρώμα της πλακέτας, οπότε μπορεί αυτή να απομακρυνθεί από το διάλυμα.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την αποχάλκωση, δηλαδή την αφαίρεση του στρώματος χαλκού από τα σημεία της πλακέτας που εκτέθηκαν προηγουμένως στην υπεριώδη ακτινοβολία. Για την πραγματοποίηση της αποχάλκωσης χρησιμοποιείται διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου (FeCl_3), στο οποίο τοποθετείται η πλακέτα. Η διάρκεια της αποχάλκωσης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η εξασθένηση του διαλύματος και η πολυπλοκότητα του σχεδίου του κυκλώματος και μπορεί να κυμανθεί από 20 λεπτά έως και 1-2 ώρες. Για την επιτάχυνση της διαδικασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές συσκευές αποχάλκωσης, οι οποίες θερμαίνουν το διάλυμα, ενώ ταυτόχρονα το αναδεύουν με χρήση υπερήχων, ώστε να επιταχύνουν την απομάκρυνση του περιττού χαλκού από την πλακέτα. Μια πιο απλή αλλά αποτελεσματική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, περιλαμβάνει τη χρήση αντλίας παροχής οξυγόνου. Η παροχή οξυγόνου επιταχύνει την αποχάλκωση, ενώ ταυτόχρονα το υγρό αναδεύεται, απομακρύνοντας πιο γρήγορα τον χαλκό.

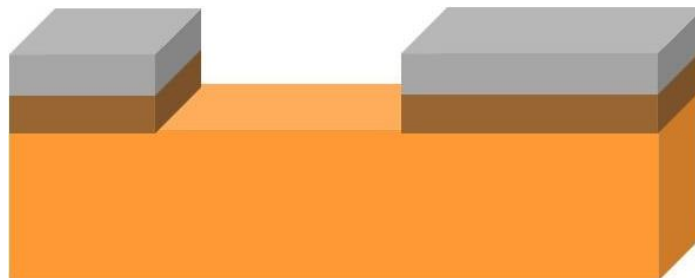
Τελικά, αφού αφαιρεθεί πλήρως ο χαλκός από τα ανεπιθύμητα σημεία, η πλακέτα καθαρίζεται με ακετόνη. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται οπτικός έλεγχος και έπειτα ελέγχεται η αγωγιμότητα με χρήση πολυμέτρου, ώστε να διορθωθούν και να αποφευχθούν τυχόν βραχυκυκλώματα. Τα παραπάνω στάδια της διαδικασίας παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα:



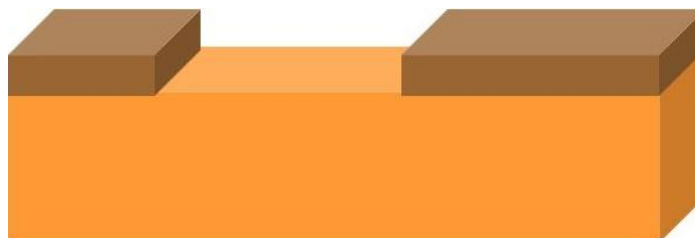
Σχήμα 2.27: Στάδιο έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία.



Σχήμα 2.28: Στάδιο εμφάνισης (απομάκρυνση φωτοευαίσθητου στρώματος).



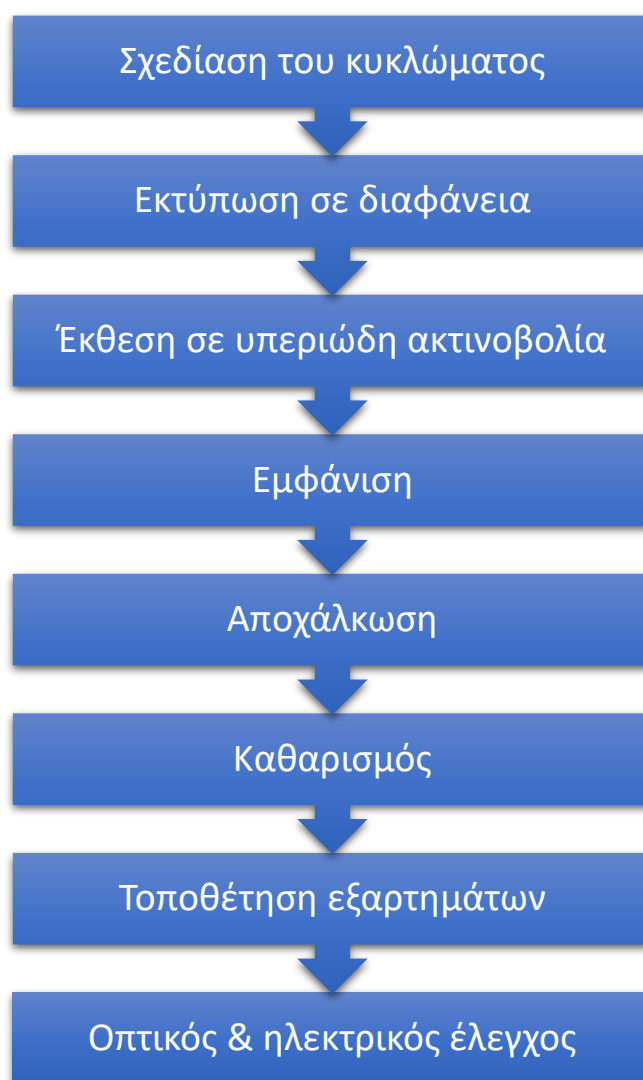
Σχήμα 2.29: Στάδιο αποχάλκωσης (απομάκρυνση στρώματος χαλκού).



Σχήμα 2.30: Στάδιο καθαρισμού (απομάκρυνση φωτοευαίσθητου στρώματος).

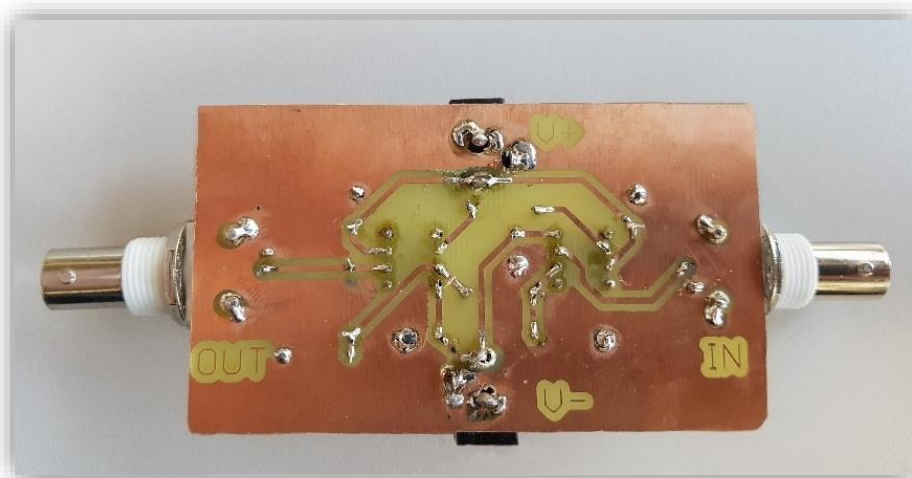
Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει τη διάνοιξη των οπών και την τοποθέτηση των διαφόρων through-hole εξαρτημάτων στην πλακέτα. Οι διάμετροι των οπών προς διάνοιξη κυμαίνονται από 0.8 έως 1.0 mm. Για τη διάνοιξη, χρησιμοποιήθηκε ειδική συσκευή διάνοιξης οπών σε PCB, η οποία λειτουργεί πνευματικά (με χρήση πεπιεσμένου αέρα) και περιλαμβάνει στερεοσκόπιο για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια κατά την τοποθέτηση της πλακέτας και την διάνοιξη των οπών. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η κόλληση των εξαρτημάτων και ο τελικός έλεγχος της πλακέτας για πιθανά βραχυκυκλώματα.

Η συνολική διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω διάγραμμα:

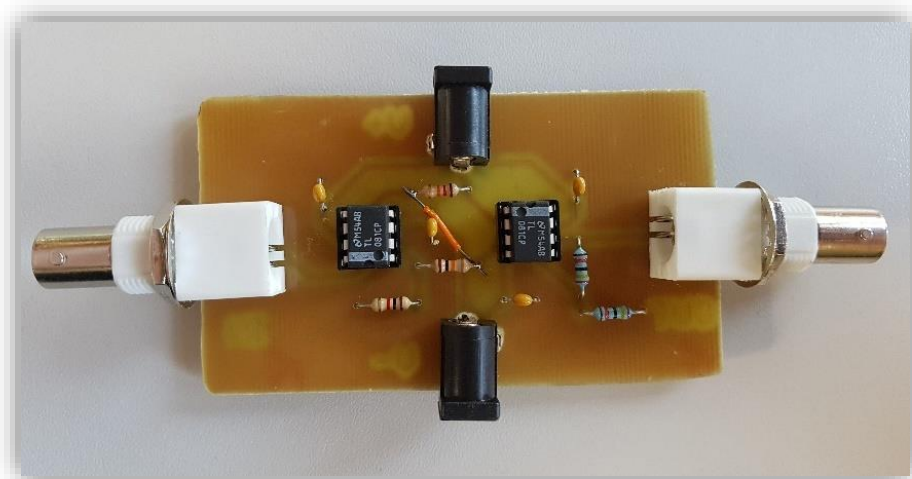


Σχήμα 2.31: Διάγραμμα διαδικασίας κατασκευής πλακέτας.

Η τελική πλακέτα εμφανίζεται παρακάτω:



Σχήμα 2.32: Α' όψη τελική πλακέτας.



Σχήμα 2.33: Β' όψη τελικής πλακέτας.

2.7.5 Ανάπτυξη αλγορίθμου

Με σκοπό τη μέτρηση του πλάτους των παλμών, αναπτύχθηκε κατάλληλος αλγόριθμος, γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού C++, ο οποίος μετρά τη χρονική διαφορά μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος. Επίσης, μπορεί να μετατρέπει τη χρονική διαφορά σε τιμές μαγνητικού πεδίου, βάσει των σχέσεων που υπολογίστηκαν παραπάνω για τριγωνικό σήμα διέγερσης. Ο συγκεκριμένος κώδικας χρησιμοποιεί ως δεδομένα τη συχνότητα διέγερσης και το πλάτος του

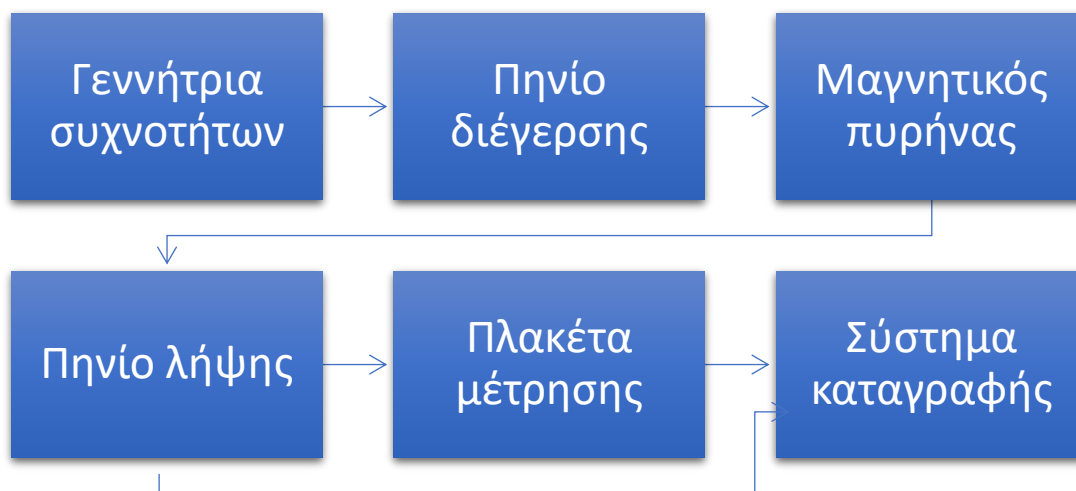
σήματος διέγερσης και λαμβάνει ως είσοδο τους παλμούς που δημιουργούνται από το ηλεκτρονικό κύκλωμα. Έτσι, μετράει τη διάρκεια των παλμών και υπολογίζει την τιμή του μαγνητικού πεδίου. Ο συγκεκριμένος κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα (Ενότητα 6.1).

2.7.6 Διεξαγωγή μετρήσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν, χρησιμοποιώντας το ηλεκτρονικό κύκλωμα που αναπτύχθηκε. Η συνολική πειραματική διάταξη περιλαμβάνει:

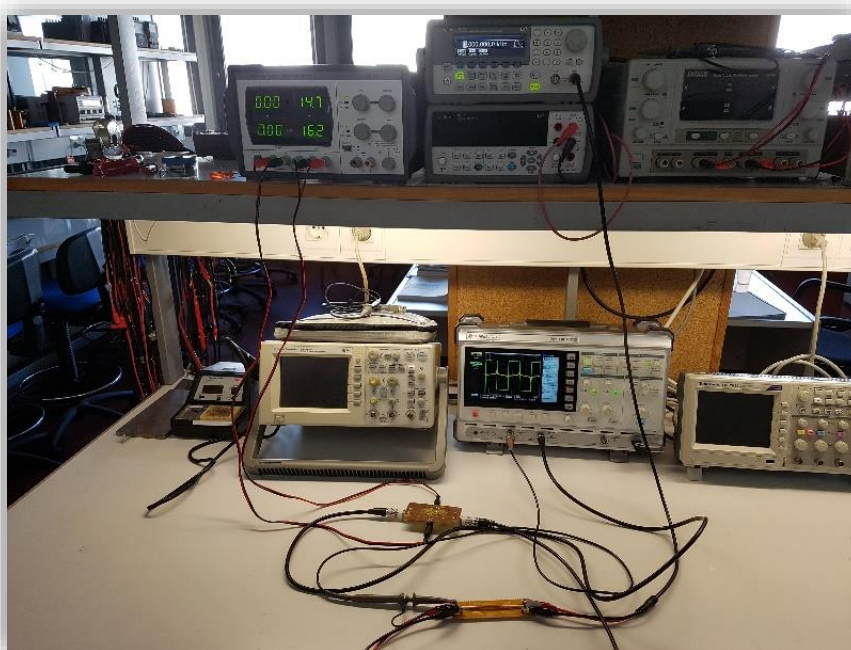
- Μία γεννήτρια συχνοτήτων, ώστε να παραχθεί το σήμα διέγερσης του πρωτεύοντος πηνίου.
- Η τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου που αναπτύχθηκε.
- Το ηλεκτρονικό κύκλωμα ενίσχυσης και ανίχνευσης των κορυφών του σήματος που προέρχεται από το πηνίο λήψης.
- Το σωληνοειδές, για τη δημιουργία ενός ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου.
- Ένα τροφοδοτικό, για την τροφοδοσία του ηλεκτρονικού κυκλώματος
- Ένα τροφοδοτικό ακριβείας, για την τροφοδοσία του σωληνοειδούς.
- Έναν παλμογράφο, ώστε να επιβεβαιωθεί και να καταγραφεί η ορθή λειτουργία της διάταξης.
- Μία πλακέτα μικροελεγκτή με τον αναπτυχθέντα κώδικα, για την ακριβή μέτρηση του επιβαλλόμενου πεδίου.
- Έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, για την απεικόνιση και καταγραφή των αποτελεσμάτων.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία, εμφανίζονται στο επόμενο διάγραμμα:



Σχήμα 2.34: Διάγραμμα διαδικασίας μέτρησης.

Επίσης, στο Σχήμα 2.35 εμφανίζονται τα επιμέρους στοιχεία της διάταξης:



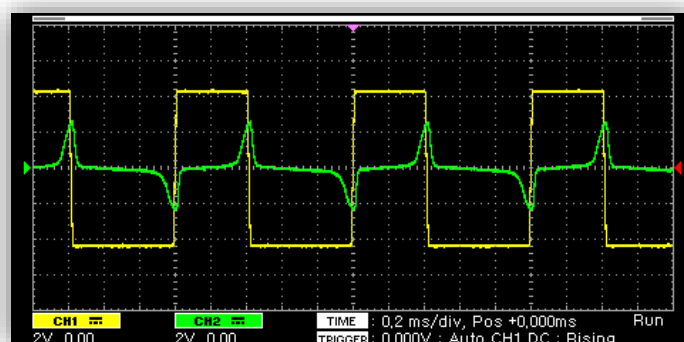
Σχήμα 2.35: Χρήση της τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου & του ηλεκτρονικού κυκλώματος και εμφάνιση των σημάτων στον παλμογράφο.

Αρχικά, χρησιμοποιείται μια γεννήτρια συχνοτήτων για την παραγωγή του σήματος διέγερσης. Το σήμα διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν τριγωνικό, με

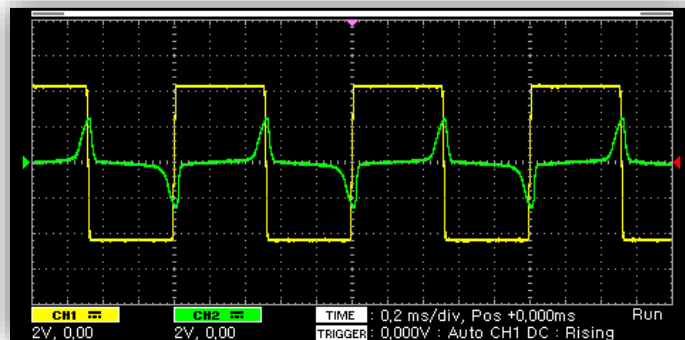
πλάτος $V = 5V$ και συχνότητα $f = 1kHz$. Το συγκεκριμένο σήμα οδηγήθηκε στο πηνίο διέγερσης της αναπτυχθείσας τοπολογίας. Η μαγνητική ροή που δημιουργείται, διαδίδεται μέσα από τον μαγνητικό πυρήνα που τον αποτελεί μια ταινία άμορφου υλικού (CoFeSiB). Τελικά, η μαγνητική ροή λαμβάνεται από το πηνίο λήψης, με αποτέλεσμα να μετατραπεί εκ νέου σε ηλεκτρικό σήμα.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, για κάποια τιμή του πεδίου διέγερσης, ο μαγνητικός πυρήνας οδηγείται σε κορεσμό. Τα μέγιστα και ελάχιστα του λαμβανόμενου σήματος σχετίζονται με την έναρξη και τη λήξη της κατάστασης κορεσμού του μαγνητικού πυρήνα, με αποτέλεσμα να είναι χρήσιμη η μέτρηση της μεταξύ τους χρονικής διαφοράς. Συνεπώς, σκοπός του ηλεκτρονικού κυκλώματος που κατασκευάστηκε είναι η μέτρηση της χρονικής διαφοράς Δt μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου. Υπενθυμίζεται ότι το συγκεκριμένο κύκλωμα μέτρησης ανιχνεύει τα σημεία που βρίσκονται τα μέγιστα και τα ελάχιστα, δημιουργώντας ένα παλμικό σήμα, του οποίου οι θετικοί και αρνητικοί παλμοί αντιστοιχούν σε αυτά. Άρα, η μέτρηση του Δt μπορεί πλέον να αναχθεί σε μέτρηση της διάρκειας των παλμών, κάτι που διευκολύνει σημαντικά την ψηφιοποίηση, καταγραφή και ανάλυση του σήματος.

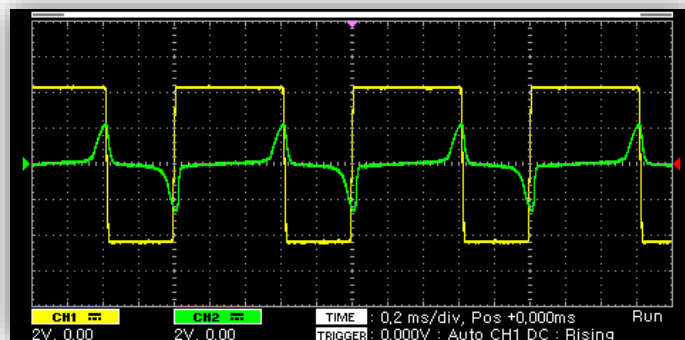
Παρακάτω παρουσιάζονται τα σήματα που ελήφθησαν για διαφορετικές τιμές επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, μέσω της τροφοδοσίας του σωληνοειδούς με συγκεκριμένες τιμές τάσης. Είναι εμφανές ότι το ηλεκτρονικό κύκλωμα λειτουργεί αποδοτικά, ενισχύοντας το σήμα εισόδου και μετατρέποντάς το σε παλμικό, ώστε να είναι ευκολότερη η μέτρησή του.



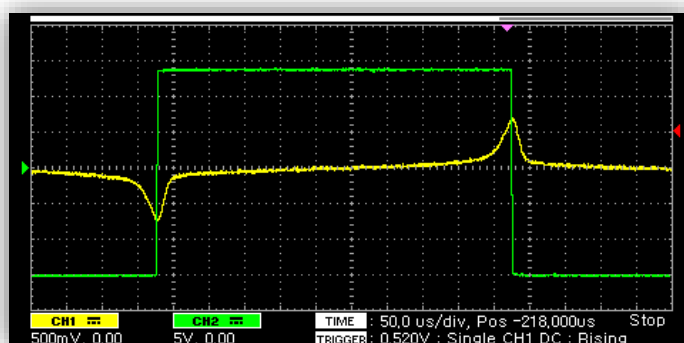
Σχήμα 2.36: Ληφθέν σήμα κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ($V_{AC} = 5V$, $f = 1kHz$, $V_{DC} = -80mV$).



Σχήμα 2.37: Ληφθέν σήμα για μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ($V_{AC} = 5V$, $f = 1kHz$, $V_{DC} = 0V$).



Σχήμα 2.38: Ληφθέν σήμα κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ($V_{AC} = 5V$, $f = 1kHz$, $V_{DC} = +80mV$).

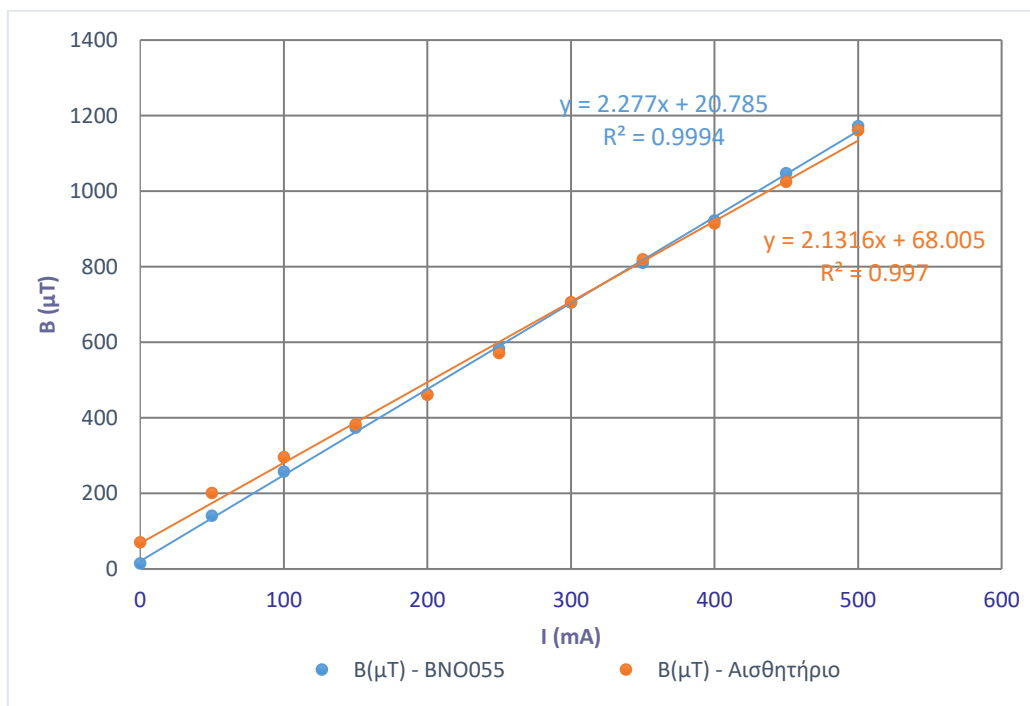


Σχήμα 2.39: Μεγέθυνση περιοχής, στην οποία φαίνεται η δημιουργία του παλμού βάσει του ελαχίστου και του μεγίστου του σήματος.

Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ηλεκτρονικό κύκλωμα λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο. Ο εντοπισμός των κορυφών του σήματος εισόδου, δηλαδή των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος που προέρχεται

από το πηνίο λήψης γίνεται με επιτυχία και με ακρίβεια. Επίσης, οι παραγόμενοι παλμοί έχουν μικρό χρόνο ανόδου και αντιστοιχούν στη διάρκεια μεταξύ του ελαχίστου και του διαδοχικού μεγίστου. Συνεπώς, καθίσταται εύκολη η μετέπειτα μέτρηση της διάρκειας του παλμού μέσω κατάλληλου κώδικα, καθώς και η διεξαγωγή συμπερασμάτων για το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, βάσει των σχέσεων που έχουν αναπτυχθεί προηγουμένως.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές μαγνητικής επαγωγής που υπολογίστηκαν μέσω της διάταξης, καθώς και οι μετρήσεις που προέκυψαν από τη χρήση ενός εμπορικού μαγνητικού αισθητήρα (Bosch BNO055), κατά την τροφοδοσία του σωληνοειδούς με συγκεκριμένες τιμές έντασης ρεύματος. Παρατηρείται ότι υπάρχει ταύτιση σε μεγάλο βαθμό μεταξύ των τιμών της αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου και του εμπορικού αισθητήρα, για τις επιβαλλόμενες τιμές μαγνητικού πεδίου.



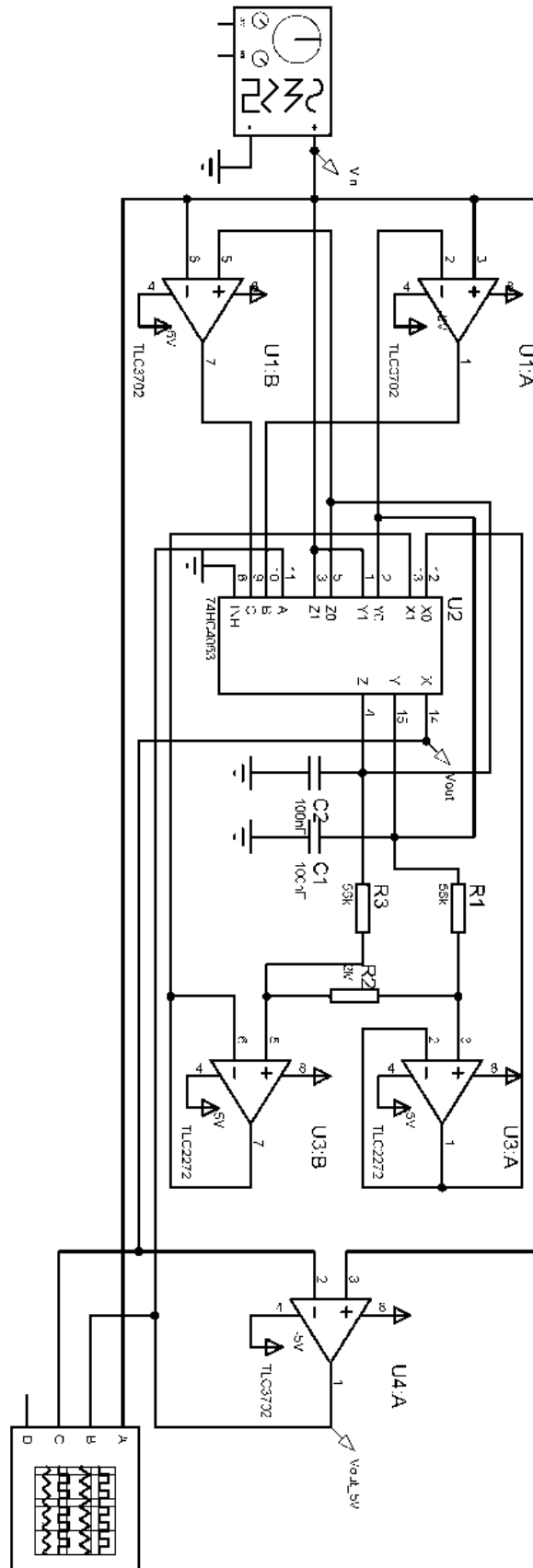
Σχήμα 2.40: Συγκριτικό διάγραμμα εμπορικού μαγνητομέτρου και αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου.

2.8 Ανάπτυξη προσαρμοστικής διάταξης μέτρησης

Η παραπάνω διάταξη που βασίστηκε στον συγκριτή τύπου Schmitt trigger, λειτουργεί αποτελεσματικά στον εντοπισμό των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου της αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου [142]. Παρ' όλα αυτά, η λειτουργία της προϋποθέτει τον ορισμό του ανώτατου και του κατώτατου κατωφλίου τάσης που θα χρησιμοποιηθεί από τον συγκριτή για την ανίχνευση των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος. Συνεπώς, απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση της αναμενόμενης τάσης του σήματος εξόδου και η σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος βάσει των ακροτάτων τιμών αυτής. Κάτι τέτοιο, περιορίζει τις δυνατότητες χρήσης του ίδιου ηλεκτρονικού κυκλώματος για διαφορετικούς αισθητήρες, ή και για διαφορετικά σήματα διέγερσης. Ακόμη και για την περίπτωση μέτρησης σε αισθητήρες ίδιου τύπου, τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του μαγνητικού πυρήνα μπορεί να διαφέρουν αρκετά σε κάθε τμήμα υλικού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αβεβαιότητα των μετρήσεων. Έτσι, εάν οι τάσεις κατωφλίου που έχουν επιλεγεί δεν είναι κατάλληλες, το σήμα εξόδου δεν θα είναι σωστό, καθώς η δημιουργία του θα βασίζεται σε λανθασμένες τιμές ορίων. Επομένως, οι παλμοί του σήματος εξόδου μπορεί να αντιστοιχούν σε τιμές μικρότερες των πραγματικών μεγίστων και ελαχίστων ή και να μην παράγονται ποτέ, εάν τα μέγιστα και ελάχιστα του σήματος εισόδου ξεπερνούν τις τιμές κατωφλίου.

Λόγω των παραπάνω και με σκοπό τη βελτίωση της διάταξης, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα νέο ηλεκτρονικό κύκλωμα, το οποίο βασίζεται επίσης στον συγκριτή τύπου Schmitt trigger, αλλά προσφέρει τη δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής των κατωφλίων τάσης του σήματος. Συνεπώς, η τελική έξοδος του σήματος παραμένει ένας παλμός μεταβαλλόμενης διάρκειας, η οποία αντιστοιχεί στη χρονική μετατόπιση μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εισόδου.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.41:



Σχήμα 2.41: Σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος προσαρμοστικού συγκριτή τύπου Schmitt trigger.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα περιλαμβάνει δύο ανιχνευτές κορυφής (peak detectors), οι οποίοι αποτελούνται από έναν συγκριτή, έναν αναλογικό διακόπτη και έναν πυκνωτή. Ο συγκριτής οδηγεί το σήμα στον θετικό ή αρνητικό κορεσμό, με αποτέλεσμα να δρα πρακτικά ως ένας ψηφιοποιητής του αναλογικού σήματος. Όταν η τάση του σήματος εισόδου υπερβεί ένα κατώφλι, όπως αυτό ορίζεται από τον πυκνωτή, σε συνδυασμό με τις αντιστάσεις R_1 , R_2 και R_3 , τότε η έξοδος του συγκριτή οδηγεί στην ενεργοποίηση του αναλογικού διακόπτη. Έτσι, δημιουργείται ένα σήμα με τιμή τάσης που αντιστοιχεί στην τάση του σήματος εισόδου, η οποία διατηρείται σταθερή μέσω του πυκνωτή. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται τόσο από τον ανιχνευτή μεγίστων, όσο και από τον ανιχνευτή ελαχίστων. Τελικά, μέσω των αντιστάσεων, οι πυκνωτές αποφορτίζονται.

Η διαφορά των τάσεων μεταξύ των δύο ορίων, μπορεί να υπολογιστεί μέσω των διαιρετών τάσης που σχηματίζονται. Έτσι, για το άνω όριο V_U και για το κάτω όριο V_L , προκύπτει αντιστοίχως:

$$V_U = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_{in} \quad (2.18)$$

και

$$V_L = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_{in} \quad (2.19)$$

Θέτοντας $R_1 = R_3$:

$$V_U - V_L = \frac{R_2}{2R_1 + R_2} V_{in} \quad (2.20)$$

Συνεπώς, για $R_1 = R_3 = 56\text{k}\Omega$ και $R_2 = 2\text{M}\Omega$, προκύπτει ότι η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των δύο ορίων (μεγίστου και ελαχίστου) θα είναι ίση με 94.6%. Επίσης, φαίνεται ότι το άνω και κάτω όριο εξαρτώνται από την τάση εισόδου, κάτι που ήταν και το ζητούμενο στη σχεδίαση του συγκεκριμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Το επόμενο στάδιο του κυκλώματος αποτελείται από δύο απομονωτές (buffers). Προφανής σκοπός τους είναι να εξαλείψουν τυχόν παρεμβολές μεταξύ του προηγούμενου και του επόμενου σταδίου, κυρίως κατά τις στιγμές εναλλαγής του τελικού αναλογικού διακόπτη που ακολουθεί.

Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει ουσιαστικά έναν συγκριτή τύπου Schmitt trigger, ο οποίος συγκρίνει τα σήματα της αναστρέφουσας και μη-αναστρέφουσας εισόδου του και παράγει την ανάλογη έξοδο. Σαν αποτέλεσμα, το σήμα που παράγεται από το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από παλμούς, η διάρκεια των οποίων αντιστοιχεί στη χρονική διαφορά μεταξύ των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο, η μέτρηση αυτής της χρονικής διαφοράς ανάγεται στη μέτρηση του πλάτους των διαδοχικών παλμών, χωρίς να απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση της μέγιστης και ελάχιστης πιθανής τάσης του σήματος εισόδου και συνεπώς, η ανά περίπτωση ρύθμιση και τροποποίηση των τάσεων τροφοδοσίας.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να προσφέρει τη δυνατότητα δύο διαφορετικών σημάτων εξόδου. Το πρώτο, με σταθερή τάση 5V και μεταβλητή διάρκεια παλμών, διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία και μέτρηση του τελικού σήματος από έναν μικροελεγκτή. Το δεύτερο σήμα εξόδου έχει μεταβλητό πλάτος, ίσο με αυτό του σήματος λήψης της αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου. Σαν αποτέλεσμα, είναι δυνατή η αξιοποίηση και της πληροφορίας της τάσης του αρχικού σήματος, όταν αυτό απαιτείται.

Τελικά, με τη συγκεκριμένη υλοποίηση είναι δυνατή η αυτόματη προσαρμογή των τάσεων κατωφλίου που εισάγονται στον συγκριτή, με αποτέλεσμα να προσφέρεται η δυνατότητα χρήσης του ηλεκτρονικού κυκλώματος σε μεγαλύτερο εύρος μαγνητομέτρων, χωρίς να απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών του σήματος εξόδου τους.

2.8.1 Προσομοίωση λειτουργίας ηλεκτρονικού κυκλώματος

Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του ηλεκτρονικού κυκλώματος, επελέγη η διεξαγωγή προσομοίωσης. Για εξοικονόμηση χώρου, επελέγησαν

ολοκληρωμένα που περιλαμβάνουν πολλαπλούς συγκριτές και αναλογικούς διακόπτες, αντιστοίχως.

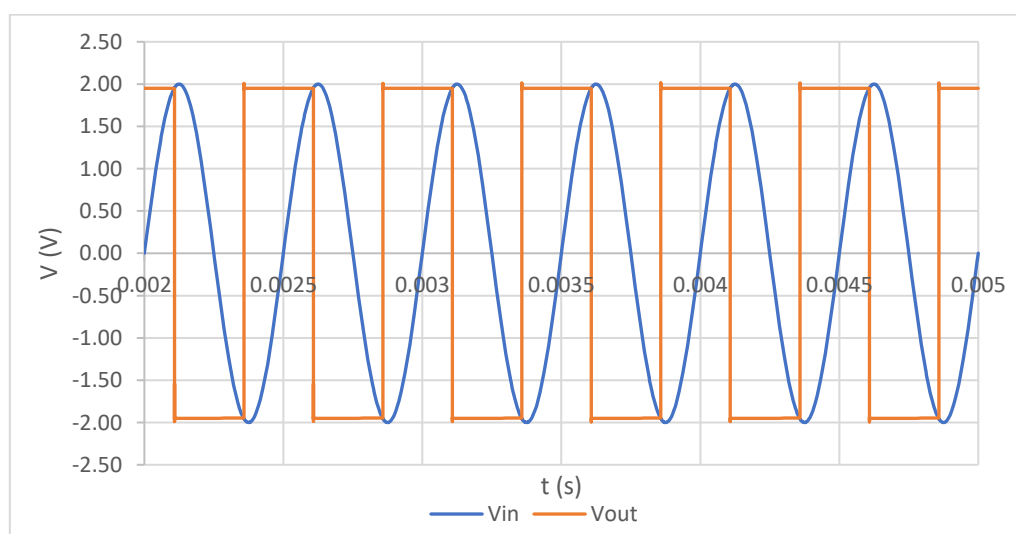
Για το στάδιο των συγκριτών τάσης επελέγησαν οι συγκριτές TLC3702 της Texas Instruments. Οι συγκεκριμένοι συγκριτές βασίζονται στην τεχνολογία High-speed CMOS (HCMOS) και μπορούν να προσφέρουν υψηλή ταχύτητα απόκρισης, με χαμηλή κατανάλωση [143].

Για το στάδιο των αναλογικών διακοπών, επελέγη ο CD74HC4053 της Texas Instruments. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο αποτελεί έναν πολυπλέκτη 8 αναλογικών καναλιών, ο οποίος συνδυάζει χαμηλή κατανάλωση, υψηλή ταχύτητα εναλλαγών και χαμηλά επίπεδα θορύβου [144].

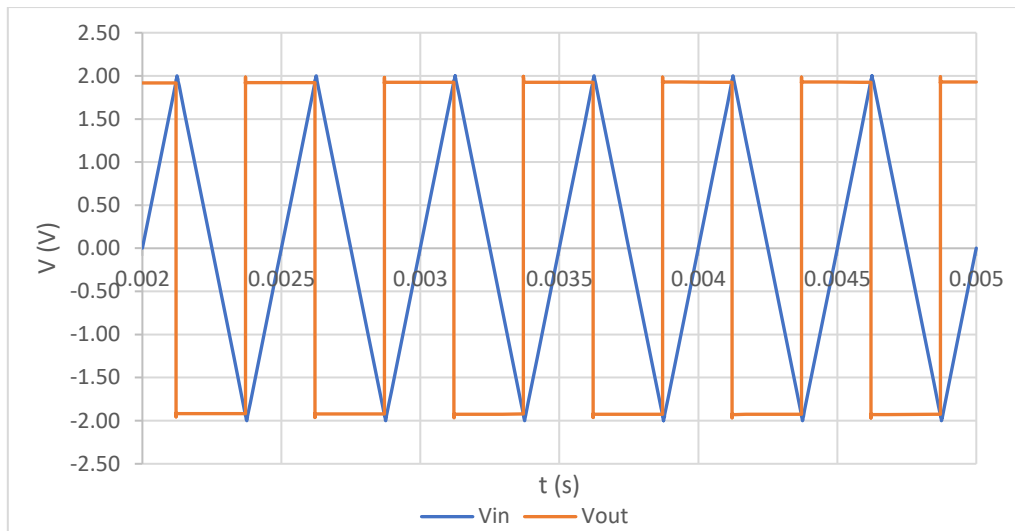
Τέλος, για το στάδιο των απομονωτών, επελέγη ο τελεστικός ενισχυτής TLC2272 της Texas Instruments, ο οποίος χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα θορύβου και υψηλή εμπέδηση εισόδου, καθιστώντας τον ιδανικό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή [145].

2.8.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

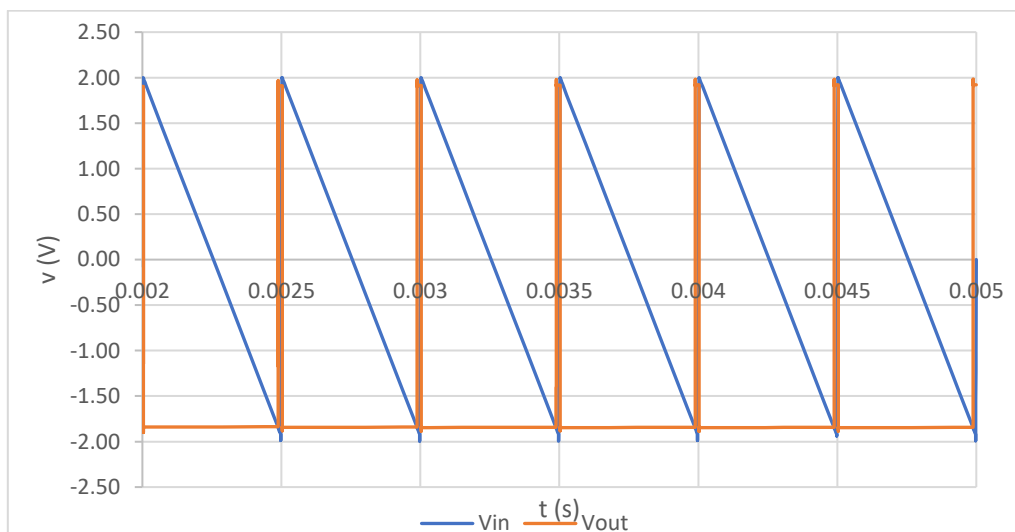
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν, για σήμα εισόδου διαφόρων κυματομορφών, πλάτους $V = 2V$ και συχνότητας $f = 2kHz$.



Σχήμα 2.42: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για ημιτονοειδές σήμα εισόδου.



Σχήμα 2.43: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για τριγωνικό σήμα εισόδου.



Σχήμα 2.44: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για ασύμμετρο τριγωνικό σήμα εισόδου.

Είναι εμφανές ότι το κύκλωμα συμπεριφέρεται με τον αναμενόμενο τρόπο. Στην περίπτωση του ημιτονοειδούς σήματος, οι ανιχνευτές κορυφής εντοπίζουν με ακρίβεια τα μέγιστα και τα ελάχιστα του σήματος. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση του τριγωνικού σήματος, για το οποίο παράγονται, επίσης, παλμοί με διάρκεια αντίστοιχη της χρονικής διαφοράς μεταξύ των μεγίστων και των ελαχίστων. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα συμπεριφέρεται με ακρίβεια ακόμη και στην ακραία περίπτωση του μη συμμετρικού τριγωνικού σήματος με ασυμμετρία τάξεως 99%. Σε αυτήν την περίπτωση, παράγονται επίσης οι αναμενόμενοι παλμοί, παρά την απότομη μεταβολή του σήματος μεταξύ των δύο ακραίων τιμών του.

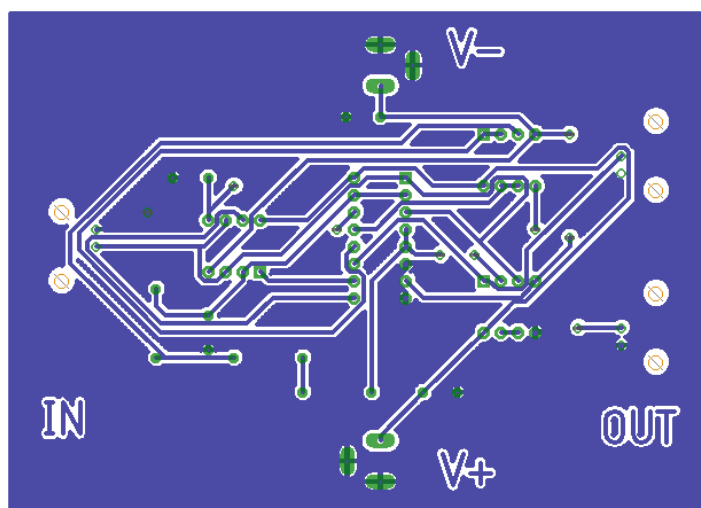
2.9 Πλακέτα ηλεκτρονικού κυκλώματος

2.9.1 Κατασκευή της πλακέτας του ηλεκτρονικού κυκλώματος

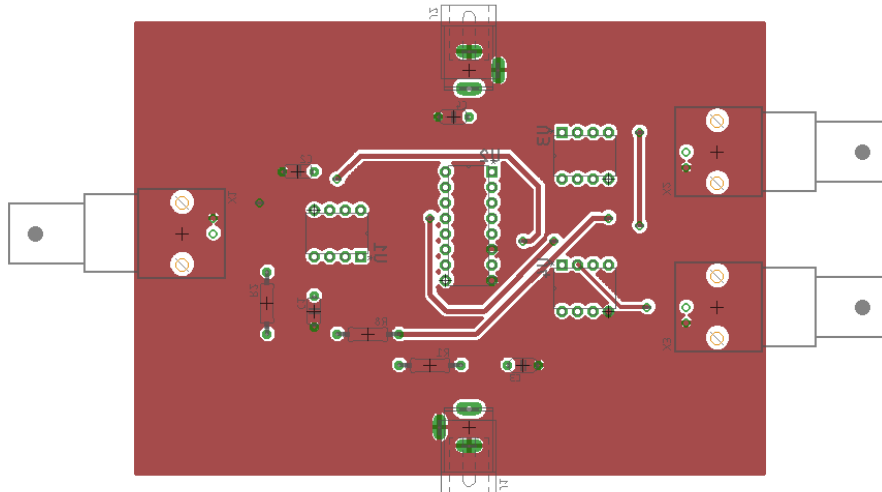
Η κατασκευή της πλακέτας του νέου ηλεκτρονικού κυκλώματος που βασίζεται στον συγκριτή Schmitt trigger πραγματοποιήθηκε βάσει της ίδιας διαδικασίας που είχε διεξαχθεί και για την κατασκευή της πλακέτας του προηγούμενου ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Η πλακέτα του ηλεκτρονικού κυκλώματος σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Autodesk Eagle. Ως υποδοχές τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκαν υποδοχές των 2.1mm. Για την είσοδο και έξοδο του σήματος χρησιμοποιήθηκαν υποδοχές τύπου BNC, για σύνδεση με τα υπόλοιπα μέρη της διάταξης με χρήση ομοαξονικών καλωδίων.

Λόγω της πολυπλοκότητας του ηλεκτρονικού κυκλώματος, δεν ήταν δυνατή η τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων σε μία, μόνο, όψη της φωτοευαίσθητης πλακέτας. Συνεπώς, σχεδιάστηκε μία πλακέτα δύο όψεων. Οι δύο όψεις της πλακέτας, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:

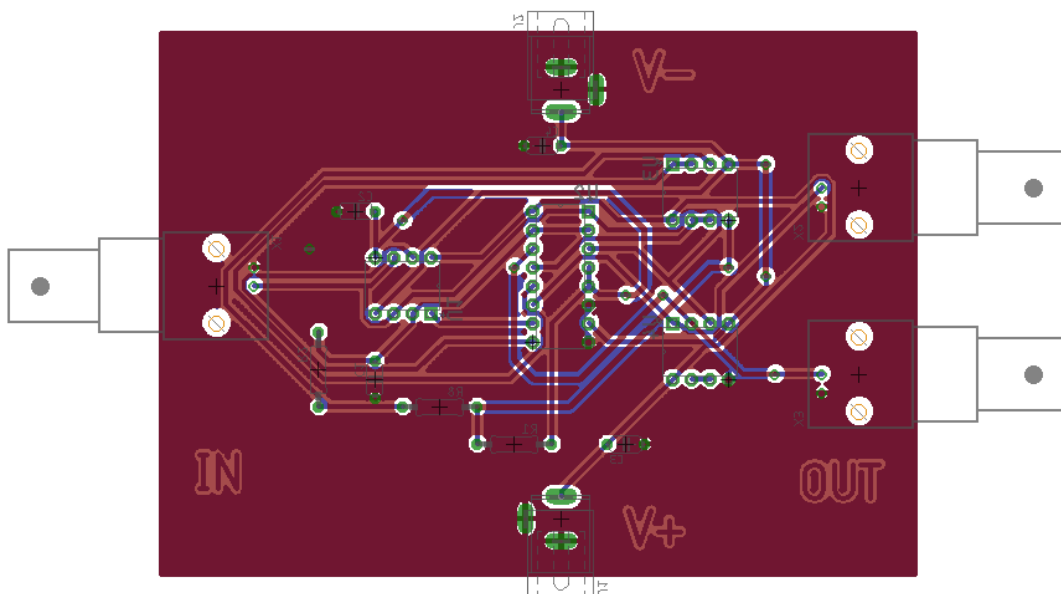


Σχήμα 2.45: Α' όψη πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος.



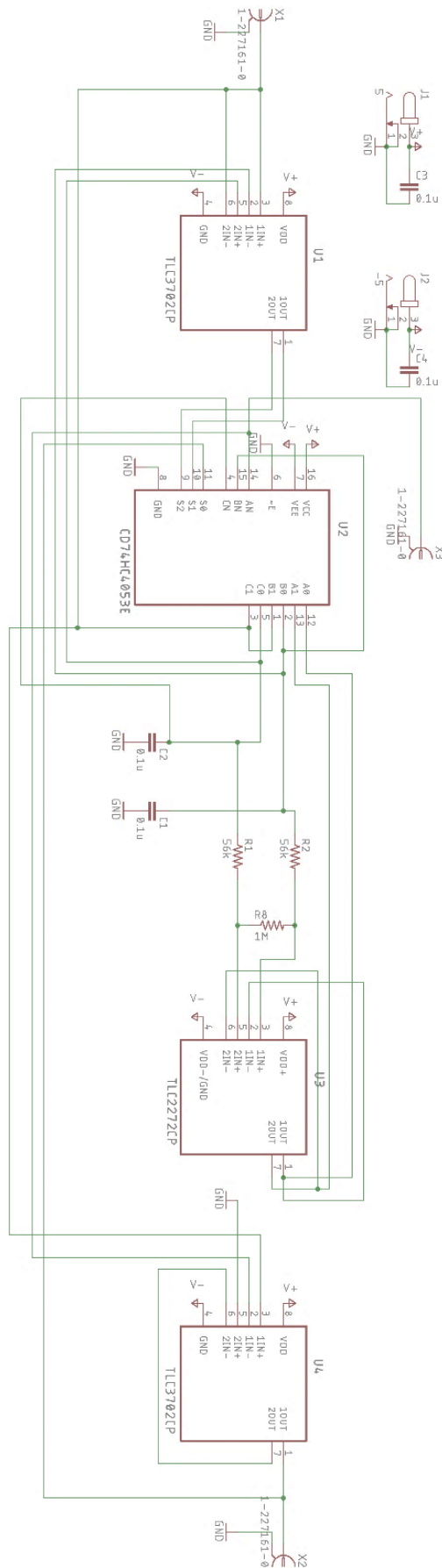
Σχήμα 2.46: Β' όψη πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Στο Σχήμα 2.47 παρουσιάζεται η συνολική εικόνα της πλακέτας, όπου φαίνονται οι εναλλαγές των αγώγιμων δρόμων μεταξύ των δύο όψεων.



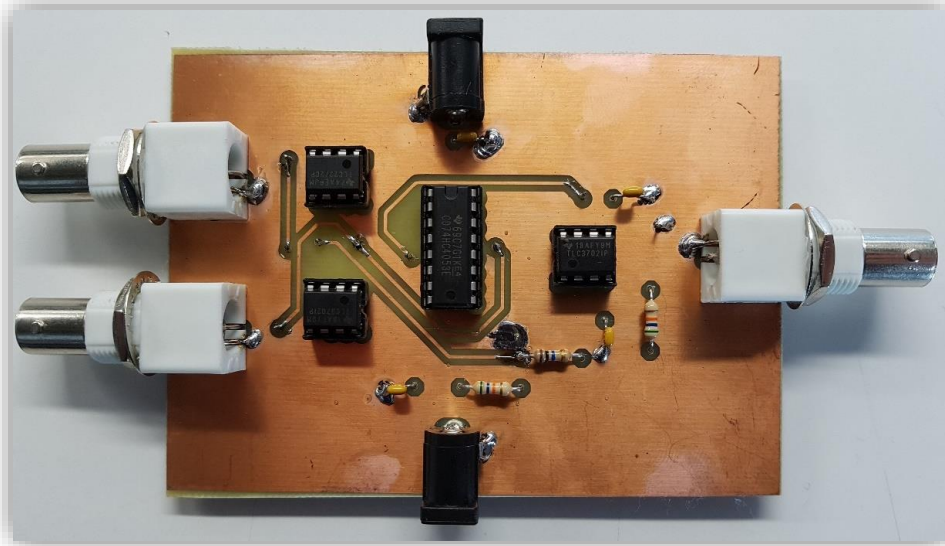
Σχήμα 2.47: Συνολική εικόνα πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Το διάγραμμα του κυκλώματος, όπως σχεδιάστηκε στο λογισμικό Eagle, φαίνεται στο Σχήμα 2.48.

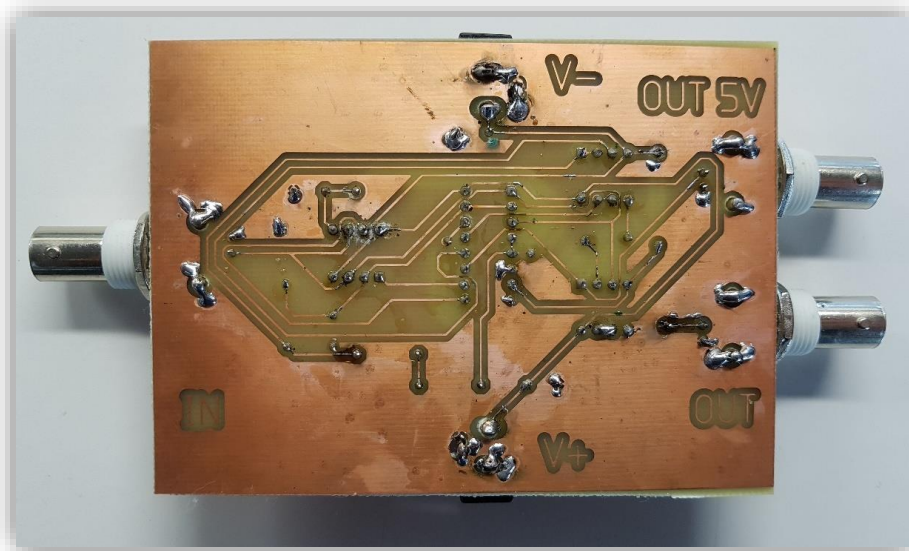


Σχήμα 2.48: Διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η διαδικασία κατασκευής της πλακέτας, σύμφωνα με την τεχνική που είχε περιγραφεί σε προηγούμενη παράγραφο. Οι όψεις της τελικής πλακέτας παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.49: Α' όψη πλακέτας.

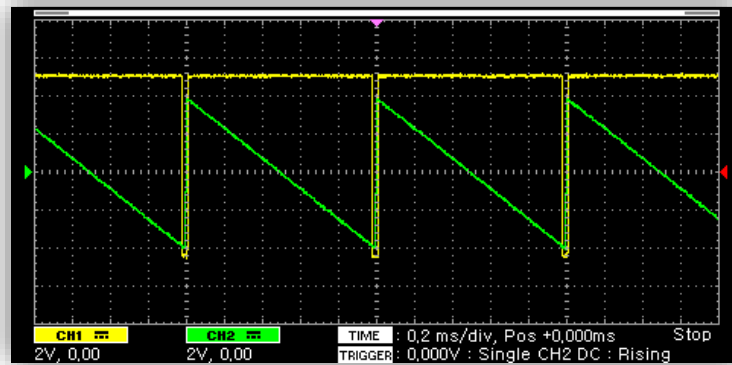


Σχήμα 2.50: Β' όψη πλακέτας.

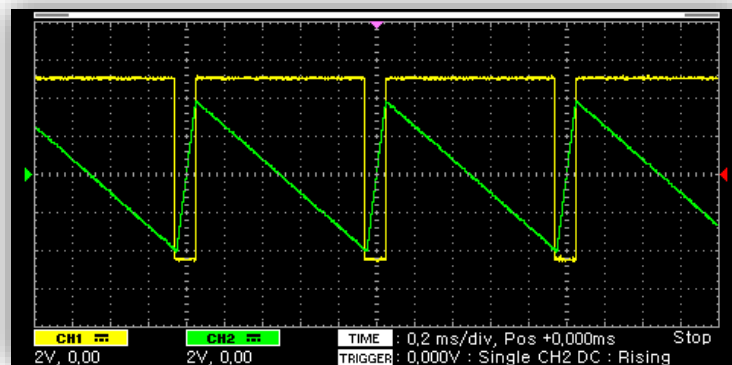
2.9.2 Δοκιμή του νέου ηλεκτρονικού κυκλώματος

Για τη δοκιμή της νέας πλακέτας, αρχικά χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια συχνοτήτων, ώστε να παραχθούν σήματα που εισήλθαν απευθείας στην είσοδο της

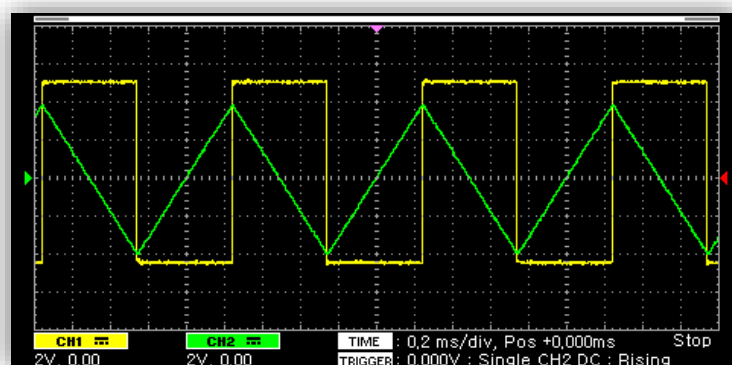
πλακέτας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τριγωνικά σήματα εισόδου, διαφορετικής συμμετρίας.



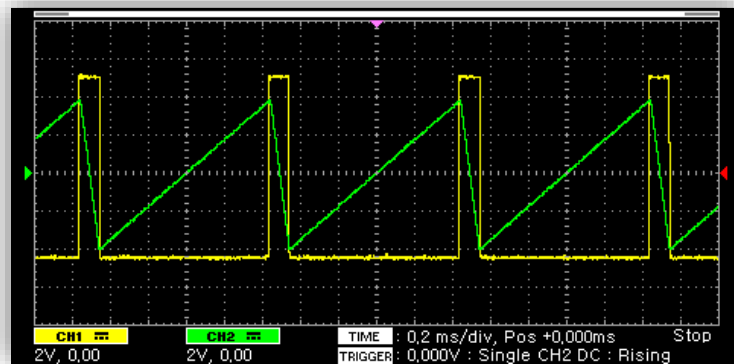
Σχήμα 2.51: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 5%.



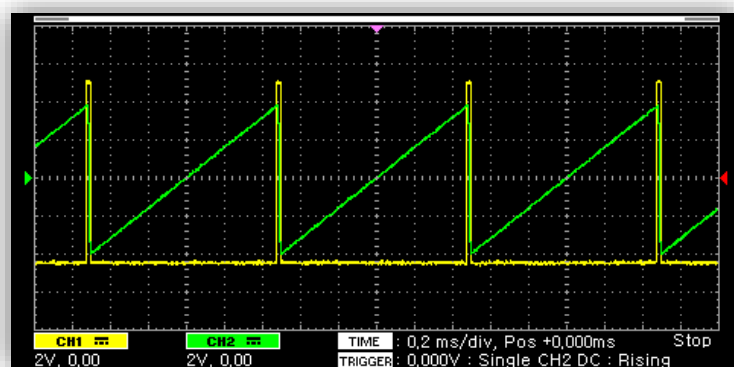
Σχήμα 2.52: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 10%.



Σχήμα 2.53: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 50%.



Σχήμα 2.54: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 90%.



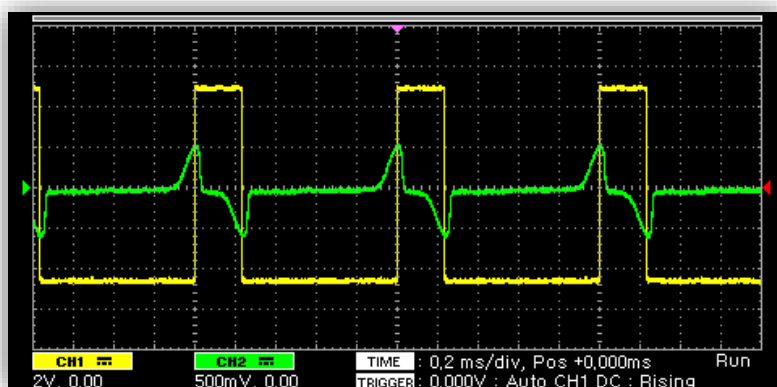
Σχήμα 2.55: Παλμικό σήμα εξόδου για τριγωνικό σήμα με συμμετρία 95%.

Είναι εμφανές ότι το ηλεκτρονικό κύκλωμα λειτουργεί με τον αναμενόμενο τρόπο, καθώς προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των προσομοιώσεων. Η έναρξη του κάθε παλμού συμπίπτει με την εμφάνιση του μεγίστου του σήματος εισόδου, ενώ η λήξη του παλμού συμπίπτει με την εμφάνιση του ελαχίστου. Το ίδιο συμβαίνει ακόμη και στις ακραίες περιπτώσεις, κατά τις οποίες το σήμα εισόδου είναι ασύμμετρο, με αποτέλεσμα τα μέγιστα και ελάχιστα του να έχουν πολύ μικρή χρονική διαφορά.

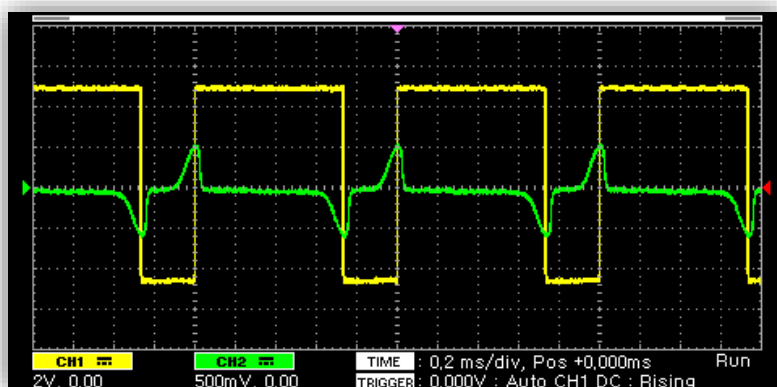
Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν χρησιμοποιώντας την έξοδο της πλακέτας που δημιουργεί σήμα πλάτους 5V, ανεξαρτήτως του πλάτους του σήματος εισόδου. Όμως, όπως είχε προαναφερθεί, σε μερικές περιπτώσεις είναι χρήσιμη και η πληροφορία του πλάτους του σήματος, σε συνδυασμό με τη χρονική διαφορά μεγίστων και ελαχίστων. Σε αυτήν την περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η

δεύτερη έξοδος της πλακέτας, το σήμα της οποίας διατηρεί το αρχικό πλάτος εισόδου, παράγοντας παλμούς μεταβλητού πλάτους και διάρκειας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σήματα που ελήφθησαν όταν χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο, ώστε να πραγματοποιηθούν δοκιμές για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης πλάτους $V = 5V$ και συχνότητας $f = 1kHz$.

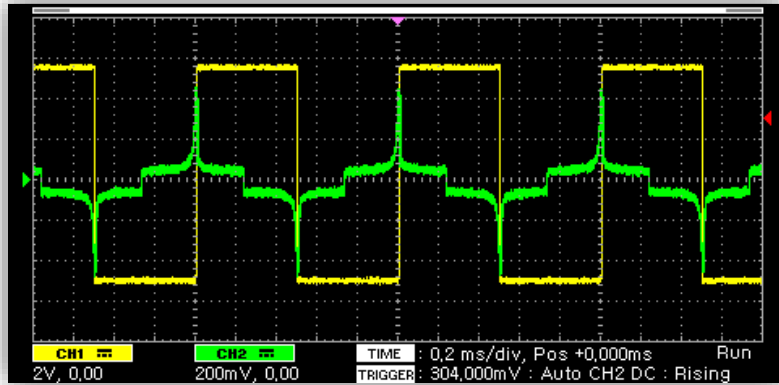


Σχήμα 2.56: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου ομόρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.

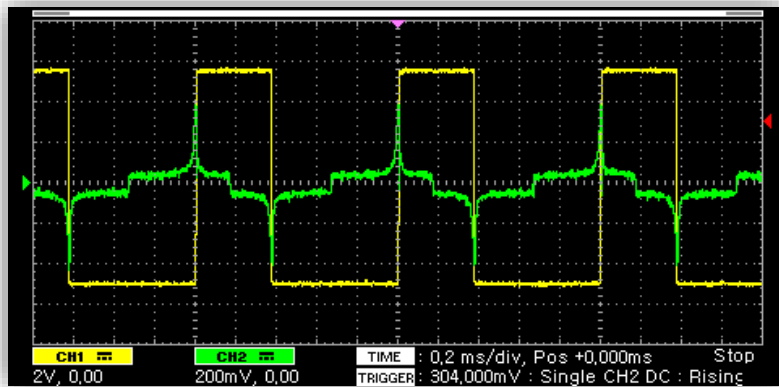


Σχήμα 2.57: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.

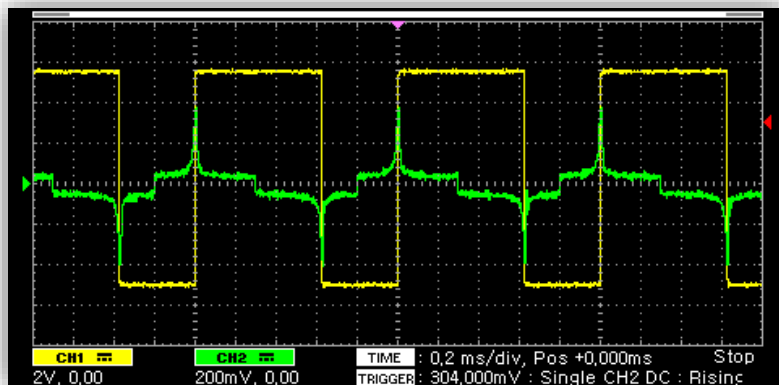
Ομοίως, τα σήματα που προκύπτουν για τριγωνικό σήμα διέγερσης πλάτους $V = 5V$ και συχνότητας $f = 1kHz$, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.58: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), απουσία επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.59: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου ομόρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.



Σχήμα 2.60: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και πλακέτας (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.

Η κύρια διαφορά των παραπάνω σημάτων για την τριγωνική διέγερση, σε σχέση με αυτά που προκύπτουν για την ημιτονοειδή διέγερση, έγκειται στην εμφάνιση των απότομων ασυνεχειών στα σημεία που αντιστοιχούν στα μέγιστα και ελάχιστα του τριγωνικού σήματος. Παρ' όλα αυτά, η έξοδος της πλακέτας του κυκλώματος μέτρησης είναι η αναμενόμενη, καθώς ο συγκριτής δεν επηρεάζεται από τις ασυνέχειες. Ελάττωση ή και εξάλειψη αυτών των ασυνεχειών μπορεί να επέλθει μέσω της μείωσης του πλάτους του σήματος διέγερσης ή και μέσω της ανόπτησης του μαγνητικού υλικού.

2.10 Σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου

2.10.1 Εισαγωγή

Επόμενο βήμα για την ανάπτυξη της διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων αποτέλεσε η δημιουργία ενός χώρου διεξαγωγής μετρήσεων, στον οποίο θα μπορεί να ελέγχεται και να ορίζεται η επιβολή μαγνητικού πεδίου. Ο βέλτιστος τρόπος για την παραγωγή αυτών των πεδίων είναι η χρήση ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου, το οποίο λαμβάνει ως είσοδο τις μετρήσεις της αναπτυχθείσας τοπολογίας και προσαρμόζει καταλλήλως την τροφοδοσία που παρέχεται στο εκάστοτε σύστημα αντιστάθμισης, όπως είναι το σωληνοειδές που έχει αναπτυχθεί. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η παροχή τροφοδοσίας με ελεγχόμενο τρόπο στο σωληνοειδές, δημιουργώντας το μαγνητικό πεδίο αντιστάθμισης με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί ως είσοδο τις τιμές χρονικής διαφοράς Δt των παλμών που προκύπτουν από το ηλεκτρονικό κύκλωμα που έχει κατασκευαστεί. Υπενθυμίζεται πως βάσει της αρχής λειτουργίας, όταν η χρονική διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος του πηνίου λήψης της αναπτυχθείσας τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος είναι μηδενική, δεν υφίσταται επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, σκοπός του συστήματος κλειστού βρόχου είναι να μηδενιστεί η συγκεκριμένη χρονική

διαφορά, μέσω της ελεγχόμενης τροφοδοσίας του συστήματος αντιστάθμισης, ώστε να δημιουργηθεί ένας χώρος με μηδενική επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αποτελεί και το σημαντικότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης διακρίβωσης: Οι μετρήσεις δεν βασίζονται στη χρήση μαγνητομέτρων αναφοράς για τη μέτρηση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου. Αντιθέτως, ως βάση εξάλειψης του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιείται ο μηδενισμός της χρονικής διαφοράς των μεγίστων και ελαχίστων ενός σήματος που εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός μαγνητικού υλικού. Συνεπώς, η μέτρηση βασίζεται σε μία θεμελιώδη ποσότητα, δηλαδή τον χρόνο, προσφέροντας τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως πρωτεύον πρότυπο, μετά από κατάλληλες βελτιώσεις στο σύστημα διέγερσης και μέτρησης.

2.10.2 Ανάπτυξη αλγορίθμου αυτομάτου ελέγχου

Έχοντας ως δεδομένα εισόδου το παλμικό σήμα της αναπτυχθείσας πλακέτας ανίχνευσης κορυφών, σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος που θα είναι ικανός να λαμβάνει αυτό το σήμα, να το επεξεργάζεται και να παράγει την κατάλληλη έξοδο για την τροφοδοσία του συστήματος αντιστάθμισης. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για το προαναφερθέν σύστημα αυτομάτου ελέγχου βασίζεται στον μηχανισμό ελέγχου PID (**P**roportional-**I**ntegral-**D**erivative). Συνεπώς, απαραίτητο στοιχείο για την ορθή λειτουργία του, είναι η εύρεση των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων K_p , K_i και K_d που καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας ενός συστήματος PID. Για την ευκολότερη ρύθμιση αυτών των τιμών, αναπτύχθηκε ένα τμήμα του αλγορίθμου που δίνει τη δυνατότητα της ρύθμισής τους σε πραγματικό χρόνο από το χρήστη, μέσω της σειριακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Φυσικά, η συγκεκριμένη ρύθμιση των παραμέτρων διατηρείται και χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μόνο κατά την περίπτωση που τροποποιηθεί κάποιο στοιχείο της συνολικής διάταξης.

Τα υπόλοιπα στάδια του κώδικα περιλαμβάνουν την ανάγνωση της τιμής εισόδου, δηλαδή της μέτρησης της διάρκειας των παλμών που προέρχονται από την

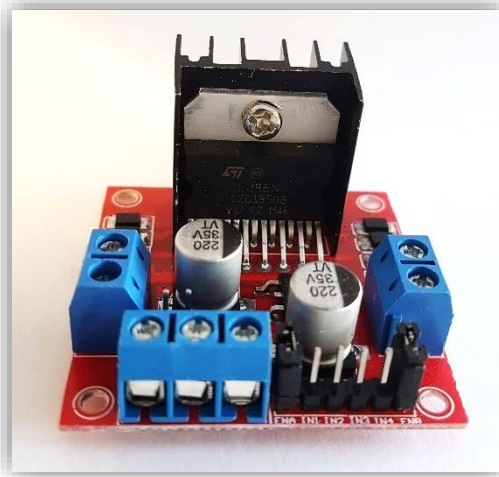
αναπτυχθείσα ηλεκτρονική πλακέτα μέτρησης και τον υπολογισμό της χρονικής τους διαφοράς.

Έπειτα, ορίζεται η πολικότητα της τροφοδοσίας που θα παρασχεθεί, ώστε το μαγνητικό πεδίο που θα δημιουργηθεί από το ίδιο το σύστημα αντιστάθμισης να είναι αντίθετο του επιβαλλόμενου, με σκοπό την εξάλειψή του. Τέλος, αφού έχει ορισθεί η πολικότητα της παρεχόμενης τάσης τροφοδοσίας, ρυθμίζεται η τιμή της. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης του συστήματος αυτομάτου ελέγχου, η οποία λαμβάνει ως τιμή εισόδου τη χρονική διαφορά των παλμών, χρησιμοποιεί τις παραμέτρους K_r , K_i και K_d και υπολογίζει την τιμή εξόδου, η οποία παρέχεται στο σύστημα αντιστάθμισης. Ο συνολικός κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα (Ενότητα 6.2).

2.10.3 Έλεγχος τροφοδοσίας συστήματος αντιστάθμισης

Για την εκτέλεση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε ένας μικροελεγκτής (Atmel ATmega328P), ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο τους παλμούς που παράγονται από την αναπτυχθείσα πλακέτα και μετρά τη χρονική διαφορά Δt . Τελικά, μέσω του αλγορίθμου, ενεργοποιείται μια έξοδος τύπου PWM (**P**ulse-**W**idth **M**odulation) του μικροελεγκτή.

Η τιμή αυτής της εξόδου εισάγεται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος τύπου γέφυρας (H-bridge L298N) που είναι ικανό να αντιστρέφει την πολικότητα της παραγόμενης τάσης, όταν αυτό είναι επιθυμητό. Το συγκεκριμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα χρησιμοποιεί δύο σήματα εισόδου για τη λειτουργία του: ένα ψηφιακό σήμα (HIGH/LOW) που καθορίζει την πολικότητα της τάσης εξόδου και ένα σήμα τύπου PWM που ρυθμίζει το πλάτος της. Επίσης, προσφέρει τη δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου δύο διαφορετικών καναλιών εξόδου, κάτι που είναι χρήσιμο για την παροχή τροφοδοσίας σε δύο συστήματα αντιστάθμισης, ώστε να ελέγχεται το μαγνητικό πεδίο σε δύο άξονες. Η συγκεκριμένη πλακέτα φαίνεται στο Σχήμα 2.61:



Σχήμα 2.61: Ηλεκτρονική πλακέτα ρυθμιζόμενης τροφοδοσίας.

Συνεπώς, προσθέτοντας τη συγκεκριμένη ηλεκτρονική πλακέτα στη διάταξη, είναι δυνατός ο έλεγχος της τιμής, αλλά και της κατεύθυνσης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης, σε πραγματικό χρόνο.

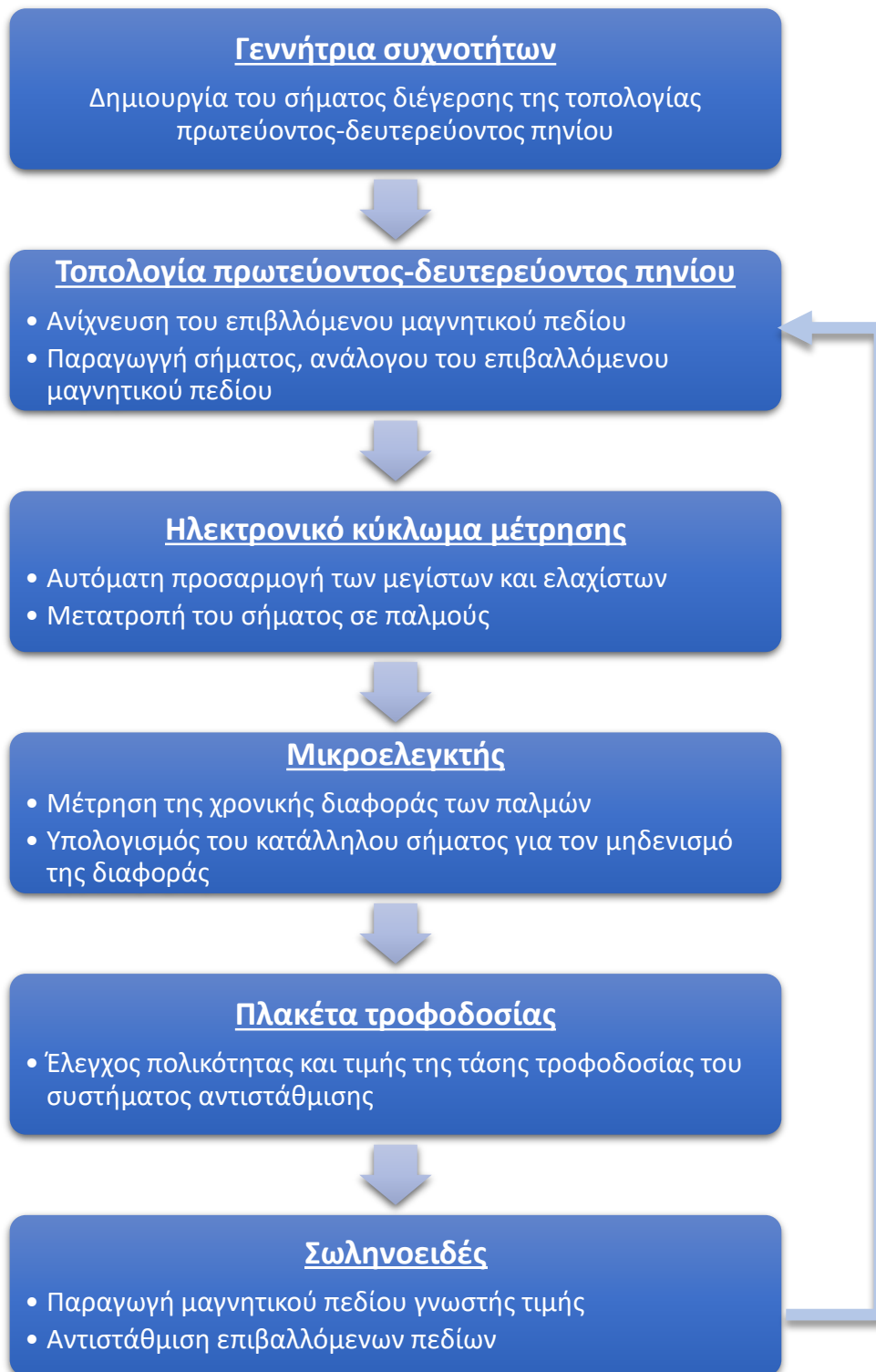
2.11 Χρήση της αναπτυχθείσας διάταξης διακρίβωσης

Συνολικά, η διαδικασία που ακολουθείται για τη διακρίβωση μαγνητομέτρων είναι η εξής: Αρχικά, στο εσωτερικό του σωληνοειδούς τοποθετείται η τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου που έχει αναπτυχθεί για την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου στο χώρο μέτρησης, με σκοπό την εξάλειψή του.

Η είσοδος της αναπτυχθείσας τοπολογίας, δηλαδή το πηνίο διέγερσης, συνδέεται με μία γεννήτρια συχνοτήτων, ενώ η έξοδός της συνδέεται με το ηλεκτρονικό κύκλωμα μετατροπής του σήματος σε σειρά παλμών αντίστοιχης διάρκειας. Τυχόν επιβαλλόμενα εξωτερικά μαγνητικά πεδία θα γίνουν αντιληπτά λόγω της μη μηδενικής χρονικής διαφοράς μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του λαμβανόμενου σήματος.

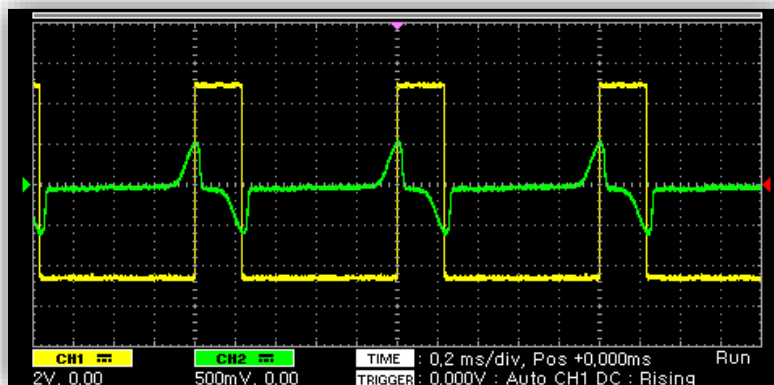
Σε αυτή την περίπτωση, ο αλγόριθμος που εκτελείται στον συνδεδεμένο μικροελεγκτή θα μετρήσει τη χρονική διαφορά των ληφθέντων παλμών και μέσω του συστήματος αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου, θα δημιουργήσει την κατάλληλη

έξοδο προς την πλακέτα τροφοδοσίας, ώστε να δημιουργηθεί το μαγνητικό πεδίο αντιστάθμισης μέσω του σωληνοειδούς. Η συνολική διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:

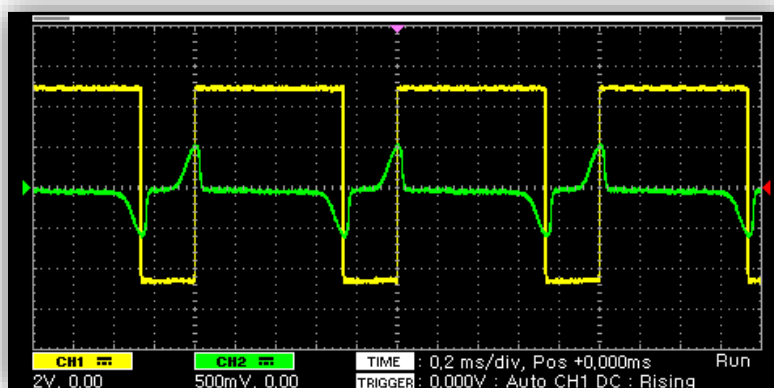


Σχήμα 2.62: Συνολική διάταξη για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται ενδεικτικές μετρήσεις κατά την ανίχνευση εξωτερικώς επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων στη διάταξη.



Σχήμα 2.63: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και ηλεκτρονικού κυκλώματος (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου ομόρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.

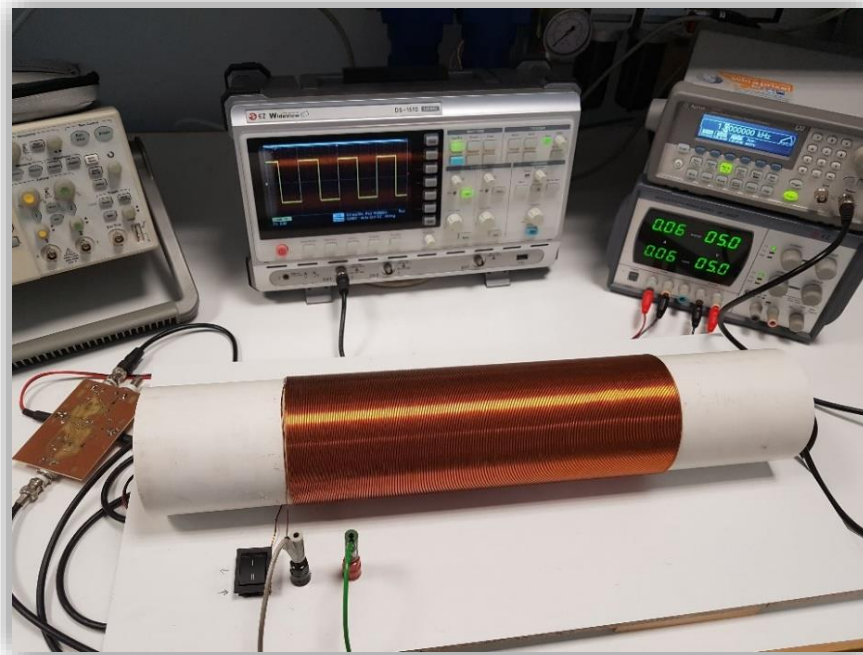


Σχήμα 2.64: Σήματα πηνίου λήψης (πράσινο) και ηλεκτρονικού κυκλώματος (κίτρινο), κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου αντίρροπου με την αναπτυχθείσα τοπολογία.

Για τη διεξαγωγή της διακρίβωσης, η αναπτυχθείσα τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου αφαιρείται από το εσωτερικό του σωληνοειδούς, αφού πρώτα χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη του υφιστάμενου μαγνητικού πεδίου. Η αφαίρεση της αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου είναι απαραίτητη για δύο λόγους: Πρώτον, αποφεύγεται τυχόν επίδρασή της στις μετρήσεις κατά τη διακρίβωση του υπό εξέταση μαγνητομέτρου και δεύτερον, αποδεσμεύει τον χώρο στο κέντρο του σωληνοειδούς για την τοποθέτηση του μαγνητομέτρου στο ίδιο ακριβώς σημείο. Δεδομένου ότι πρόκειται για εργαστηριακή

διάταξη, στην οποία δεν επιδρούν αστάθμητοι παράγοντες που θα οδηγούσαν σε απότομη μεταβολή του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, μπορεί να θεωρηθεί ότι στο χρονικό διάστημα μεταξύ της αφαίρεσης της αναπτυχθείσας τοπολογίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου και της διεξαγωγής της διακρίβωσης, δεν έχει αλλάξει το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Στη συνέχεια, το υπό διακρίβωση μαγνητόμετρο τοποθετείται στο κέντρο του σωληνοειδούς και παρέχεται σε αυτό μαγνητικό πεδίο γνωστής τιμής με σκοπό την εξάλειψη των επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων, αλλά και την διακρίβωσή του. Σαν αποτέλεσμα, λαμβάνοντας την έξοδο του για γνωστές τιμές πεδίου, μπορεί να εξαχθεί η καμπύλη βαθμονόμησής του. Στο Σχήμα 2.65 παρουσιάζεται ενδεικτική φωτογραφία της διάταξης:



Σχήμα 2.65: Η συνολική διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων.

3

Ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων

3.1 Εισαγωγή

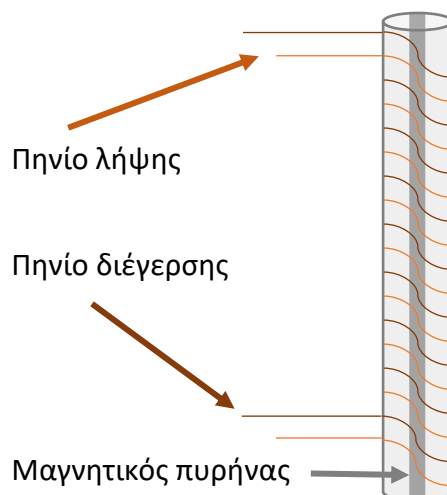
Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης της διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων, ακολούθησε η χρήση της για τη διακρίβωση νέων μαγνητικών αισθητήρων που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν, στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής.

Αρχικά αναπτύχθηκαν δύο τοπολογίες μαγνητομέτρων Fluxgate, που εμφανίζουν υψηλή ευαισθησία, έχοντας πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο μαγνητικοί αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο φερρομαγνητικών υλικών,. Ο πρώτος αποτελεί κυρίως μια εργαστηριακή διάταξη και μπορεί να καταγράψει το βρόχο υστέρησης ενός υπό εξέταση μαγνητικού υλικού. Ο δεύτερος αισθητήρας βασίζεται στο φαινόμενο Hall και είναι φορητός. Μπορεί να προσδιορίσει τις αλλαγές στη μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού και συνεπώς, να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την κατάστασή του, αλλά και τις μηχανικές τάσεις που αυτό.

3.2 1^η τοπολογία μαγνητομέτρου Fluxgate

3.2.1 Ανάπτυξη 1^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate

Το πρώτο μαγνητόμετρο βασίστηκε στην τυπική τοπολογία ενός μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

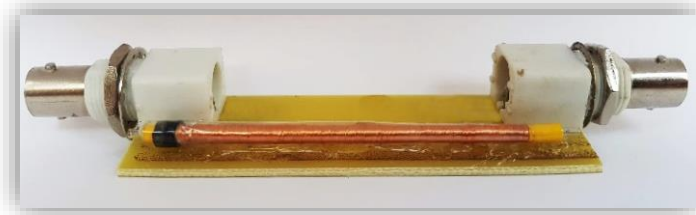


Σχήμα 3.1: Σχέδιο της τοπολογίας που χρησιμοποιήθηκε.

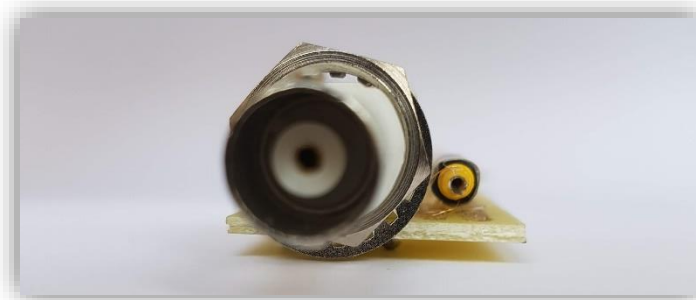
Το μαγνητόμετρο που κατασκευάστηκε περιλαμβάνει δύο πηνία (1 πηνίο διέγερσης και 1 πηνίο λήψης) και αποτελείται από 2 στρώσεις των 600 περιελίξεων η κάθε μία, κατασκευασμένες από σύρμα χαλκού $\varnothing 0.1\text{mm}$. Τα δύο πηνία τυλίχθηκαν σε γυάλινο σωλήνα διαμέτρου 1mm και μήκους 7cm. Στο εσωτερικό του τοποθετήθηκε ταινία άμορφου μαγνητικού υλικού (CoFeSiB). Η τελική κατασκευή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.2: Άνω όψη του μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate.



Σχήμα 3.3: Πλάγια όψη του μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate.



Σχήμα 3.4: Το αισθητήριο (με κίτρινο χρώμα).

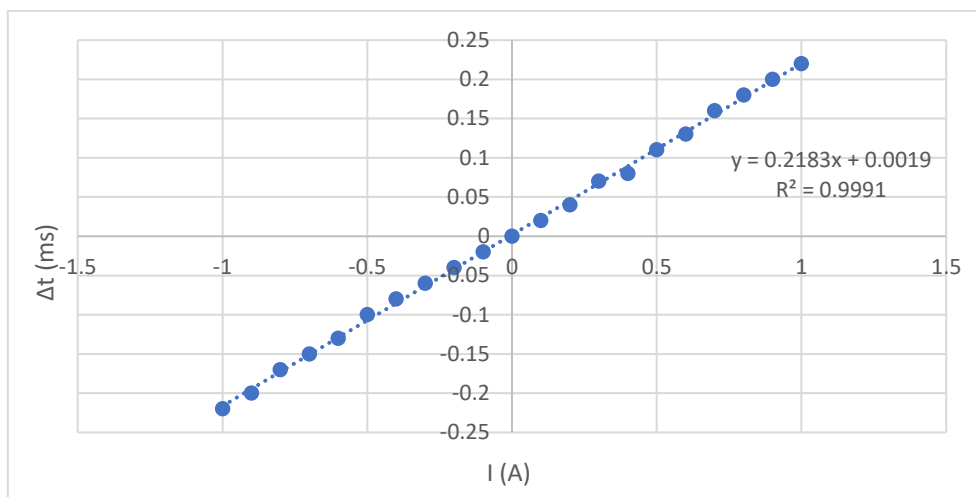
Όπως και στην περίπτωση του αισθητηρίου της αναπτυχθείσας διάταξης διακρίβωσης που βασίζεται στο ίδιο φαινόμενο, το σήμα εξόδου του συγκεκριμένου μαγνητομέτρου μπορεί να αξιοποιηθεί μέσω της μέτρησης της χρονικής διαφοράς των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το ηλεκτρονικό κύκλωμα μετατροπής των μεγίστων και ελαχίστων σε παλμούς, ώστε να μετρηθεί το μαγνητικό πεδίο μέσω της αντίστοιχης χρονικής διαφοράς, βάσει των εξισώσεων που έχουν εξαχθεί στο Κεφάλαιο 2.

3.2.2 Διακρίβωση 1^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate

Αρχικά, χρησιμοποιώντας τη διάταξη διακρίβωσης, μετρήθηκε το μαγνητικό πεδίο που υφίσταται στο κέντρο του σωληνοειδούς. Αφού υπολογίστηκε το μαγνητικό πεδίο αντιστάθμισης που έπρεπε να παραχθεί από το σωληνοειδές, το υπό διακρίβωση μαγνητόμετρο τοποθετήθηκε στο κέντρο του σωληνοειδούς. Μέσω της γεννήτριας συχνοτήτων, το πηνίο διέγερσης τροφοδοτήθηκε με τριγωνικό σήμα τάσης $V_{pp} = 5V$ και συχνότητας $f = 1kHz$. Στη συνέχεια, η έξοδος του πηνίου λήψης του αισθητήρα συνδέθηκε με την ηλεκτρονική πλακέτα μετατροπής του σήματος σε παλμούς. Τέλος, το σωληνοειδές τροφοδοτήθηκε με γνωστές εντάσεις ρεύματος,

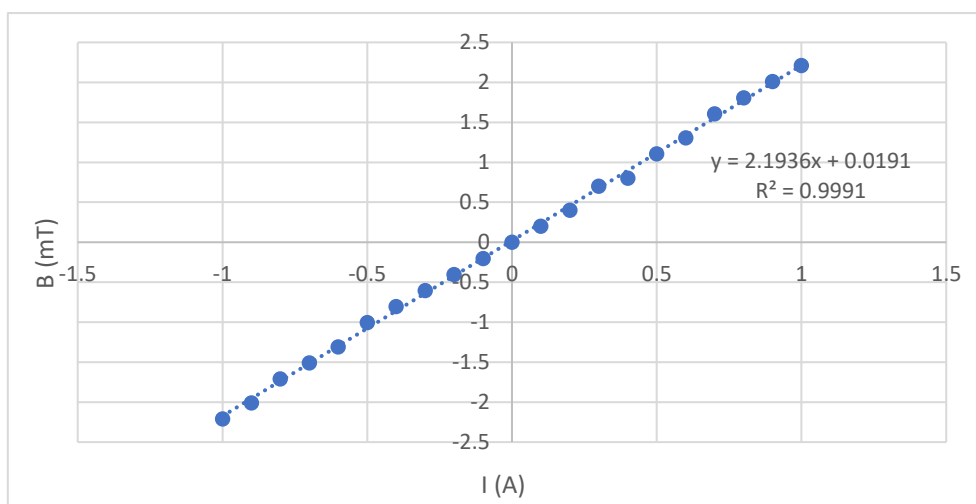
ώστε να ληφθούν μετρήσεις κατά την επιβολή μαγνητικών πεδίων συγκεκριμένης έντασης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν κατά τις μετρήσεις. Το ακόλουθο διάγραμμα εκφράζει τη μεταβολή της χρονικής διαφοράς των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων, δηλαδή της διαφοράς της διάρκειας των παραγόμενων παλμών, συναρτήσει του ρεύματος που τροφοδοτεί το σωληνοειδές.



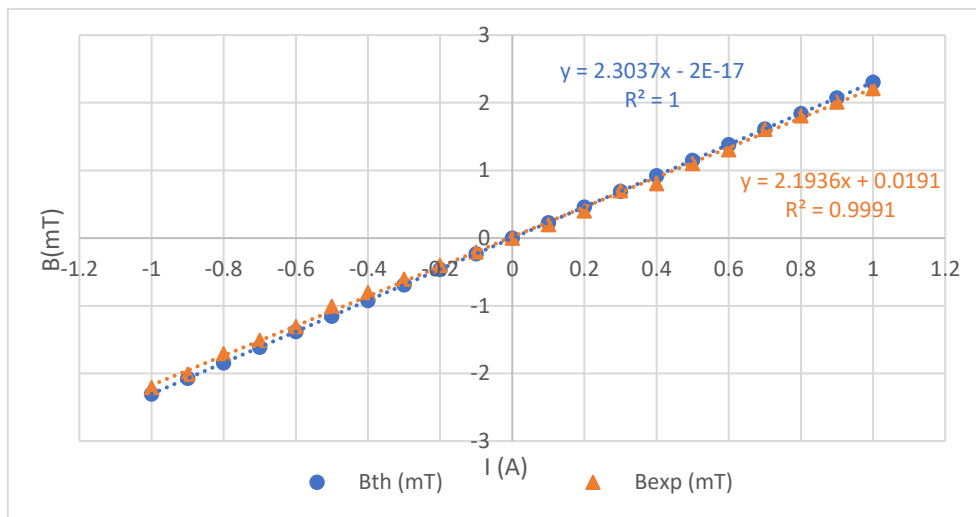
Σχήμα 3.5: Σχέση χρονικής διαφοράς παλμών και έντασης ρεύματος τροφοδοσίας σωληνοειδούς.

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει τις αντίστοιχες τιμές μαγνητικής επαγωγής, όπως προκύπτουν από τις εξισώσεις που έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2 για τις μετρηθείσες χρονικές διαφορές, συναρτήσει του ρεύματος που τροφοδοτεί το σωληνοειδές.



Σχήμα 3.6: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και χρονικής διαφοράς κορυφών.

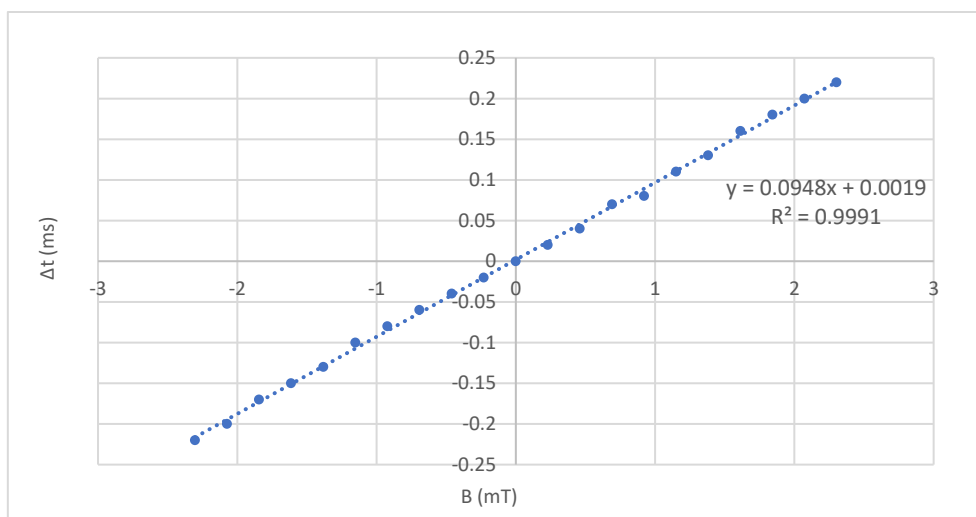
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η θεωρητική καμπύλη μαγνητικής επαγωγής του σωληνοειδούς, όπως προκύπτει από τη θεωρητική Σχέση 1.3, καθώς και η πειραματική καμπύλη, όπως προέκυψε από τη διεξαγωγή των μετρήσεων.



Σχήμα 3.7: Σχέση θεωρητικής και πειραματικής καμπύλης.

Είναι εμφανές ότι υπάρχει σύμπτωση των δύο καμπυλών (θεωρητικής και πειραματικής), κάτι που αποδεικνύει τόσο την ορθή λειτουργία της διάταξης διακριβώσης, όσο και την ορθή χρήση των υπολογιστικών σχέσεων.

Η τελική καμπύλη βαθμονόμησης του μαγνητομέτρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8:



Σχήμα 3.8: Σχέση χρονικής διαφοράς παλμών και μαγνητικής επαγωγής.

Συνεπώς, γνωρίζοντας, βάσει της διακρίβωσης, τις χρονικές διαφορές που προκύπτουν από το σήμα εξόδου του μαγνητομέτρου, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της μαγνητικής επαγωγής που αντιλαμβάνεται το συγκεκριμένο μαγνητόμετρο.

3.3 2^η τοπολογία μαγνητομέτρου Fluxgate

3.3.1 Ανάπτυξη 2^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate

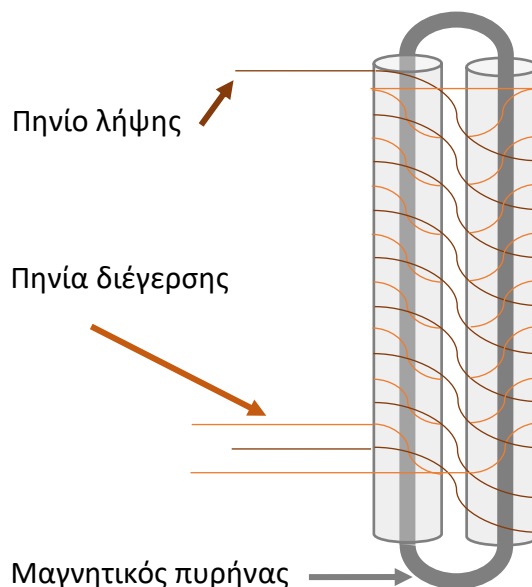
Το δεύτερο μαγνητόμετρο βασίστηκε σε μία παραλλαγή του τυπικού αισθητήρα Fluxgate. Η κλασική διάταξη του αισθητήρα Fluxgate, που περιλαμβάνει το πηνίο διέγερσης τυλιγμένο πάνω από το πηνίο λήψης, παρουσιάζει ένα μειονέκτημα: Το σήμα του πηνίου διέγερσης γίνεται αντιληπτό από το πηνίο λήψης, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τις μετρήσεις, οδηγώντας στη μείωση της ευαισθησίας του αισθητήρα στα εξωτερικώς επιβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Ένας τρόπος μερικής αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η ελάττωση του πλάτους του σήματος που παρέχεται στο πηνίο διέγερσης, έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται να είναι ασθενέστερο και να επηρεάζει όσο το δυνατόν λιγότερο τις μετρήσεις. Όμως, κάτι τέτοιο εξασθενεί και το σήμα λήψης, δημιουργώντας προφανή προβλήματα στα χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων (αβεβαιότητα, λόγος σήματος προς θόρυβο κ.λπ.).

Μία λύση για την εξάλειψη του προβλήματος αποτελεί η τροποποίηση της τοπολογίας του αισθητήρα Fluxgate. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο πηνία διέγερσης, γύρω από τα οποία τυλίγεται το πηνίο λήψης. Ο μαγνητικός πυρήνας μπορεί να είναι ξεχωριστός για καθένα από τα δύο πηνία διέγερσης, ή κοινός, δημιουργώντας έναν κλειστό βρόχο (τοπολογία racetrack). Τα δύο πηνία διέγερσης, τοποθετημένα παράλληλα και συνδεδεμένα σε σειρά, δημιουργούν ένα σήμα διέγερσης που επηρεάζει τον μαγνητικό πυρήνα του αισθητήρα, χωρίς όμως να γίνεται αντιληπτό από το πηνίο λήψης, αφού τα δύο σήματα που προέρχονται από τα πηνία διέγερσης, αλληλοαναιρούνται. Συνεπώς, η επιβολή ενός συμμετρικού εναλλασσόμενου σήματος διέγερσης έχει ως αποτέλεσμα

τη λήψη μηδενικού σήματος από το πηνίο λήψης, όσον αφορά στα πηνία διέγερσης. Αντιθέτως, η επιβολή ενός συνεχούς εξωτερικού μαγνητικού πεδίου θα γίνει αντιληπτή ως ένα επιπρόσθετο σήμα, με αποτέλεσμα η έξοδος από το πηνίο λήψης να μην είναι πλέον μηδενική.

Βάσει αυτής της τοπολογίας, κατασκευάστηκε μαγνητόμετρο που περιλαμβάνει 2 πηνία διέγερσης συνδεδεμένα σε σειρά και τοποθετημένα παράλληλα, τα οποία τυλίχθηκαν σε γυάλινους σωλήνες διαμέτρου 1mm και μήκους 7cm. Τα πηνία αποτελούνται από 600 περιελίξεις σύρματος χαλκού $\varnothing 0.1\text{mm}$. Γύρω από τα δύο παράλληλα πηνία τυλίχθηκε ένα πηνίο λήψης 600 σπειρών, κατασκευασμένο με σύρμα χαλκού $\varnothing 0.1\text{mm}$.

Ως μαγνητικός πυρήνας, χρησιμοποιήθηκε άμορφη ταινία CoFeSiB. Αρχικά, εξετάστηκε η χρήση δύο ξεχωριστών μαγνητικών πυρήνων ίσου μήκους, ο καθένας από τους οποίους τοποθετήθηκε στα δύο πηνία διέγερσης. Όμως, το σήμα που λαμβανόταν από το πηνίο λήψης δεν ήταν το ιδανικό, καθώς μικρές ανομοιομορφίες στους δύο πυρήνες οδηγούσαν στην αποτυχία εξάλειψης του σήματος διέγερσης. Η επόμενη τοπολογία που εξετάστηκε, βασιζόταν στη χρήση ενός ενιαίου πυρήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



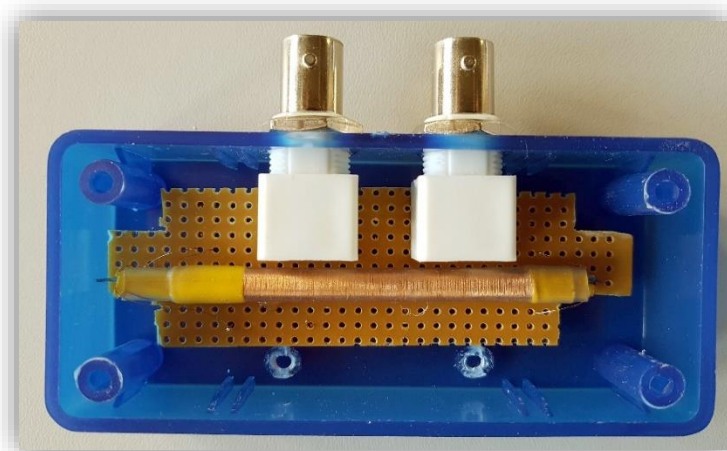
Σχήμα 3.9: Σχέδιο της τοπολογίας που αναπτύχθηκε.

Λόγω της χρήσης του ενιαίου πυρήνα, η συγκεκριμένη τοπολογία προσφέρει το πλεονέκτημα της καλύτερης δυνατής εξάλειψης του σήματος διέγερσης μεταξύ των δύο πηνίων, προσφέροντας υψηλότερη ευαισθησία σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό σε πρώτο στάδιο, μέσω της περιστροφής του μαγνητομέτρου στο χώρο. Τότε, παρατηρείται ότι το σήμα εξόδου μεταβάλλεται σημαντικά αναλόγως του προσανατολισμού του αισθητήρα, υποδεικνύοντας ότι μπορεί να ανιχνεύσει το μαγνητικό πεδίο της Γης, της τάξεως των 25-50 μT , κάτι που δεν ήταν δυνατό με την προηγούμενη τοπολογία του μαγνητομέτρου Fluxgate.

Στη συνέχεια, προστέθηκαν υποδοχές εισόδου και εξόδου του σήματος και ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε πλαστικό περίβλημα. Η τελική μορφή του φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:

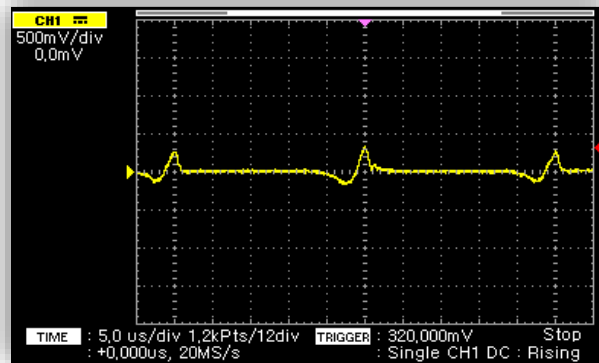


Σχήμα 3.10: Το μαγνητόμετρο τύπου Fluxgate.

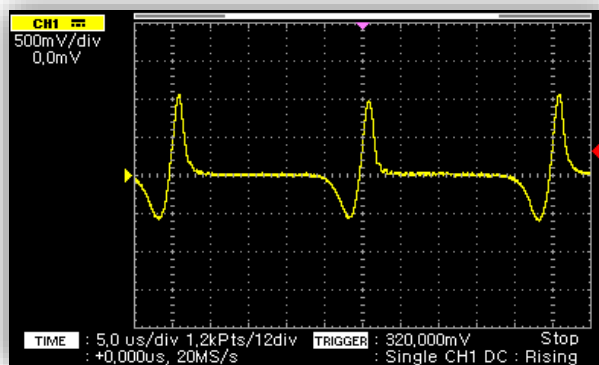


Σχήμα 3.11: Το εσωτερικό του μαγνητομέτρου.

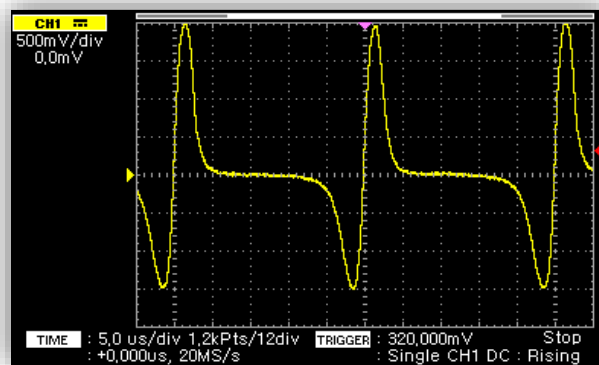
Κάποια τυπικά σήματα που λαμβάνονται από τον αισθητήρα για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης συχνότητας $f = 20kHz$ και τάσης $V_{pp} = 5V$, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



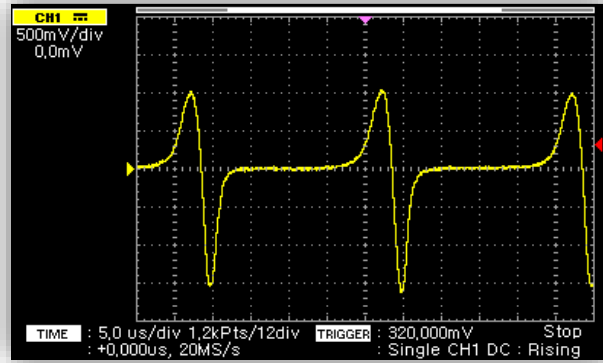
Σχήμα 3.12: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 5^\circ$.



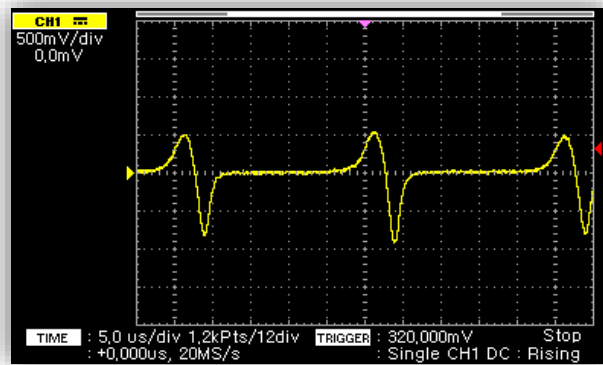
Σχήμα 3.13: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 45^\circ$.



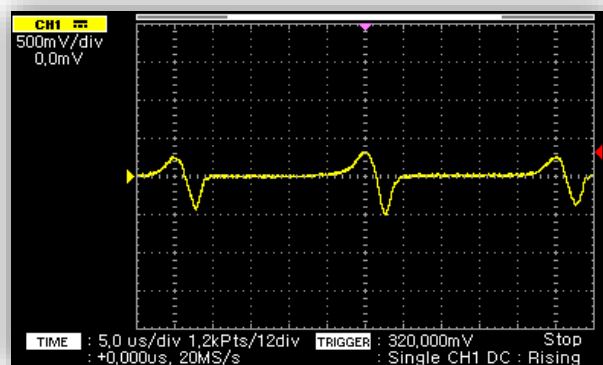
Σχήμα 3.14: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 90^\circ$.



Σχήμα 3.15: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 270^\circ$.



Σχήμα 3.16: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 315^\circ$.



Σχήμα 3.17: Ενδεικτικό σήμα για μαγνητικό προσανατολισμό $\sim 355^\circ$.

Από τα παραπάνω σήματα γίνεται αντιληπτό ότι το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι ισχυρό, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει γραμμικότητα στην απόκριση κατά την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου.

3.3.2 Διακρίβωση 2^{ης} τοπολογίας μαγνητομέτρου Fluxgate

Για τη διακρίβωση του νέου μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διακρίβωσης, με ένα ζεύγος πηνίων Helmholtz για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου.

Υπενθυμίζεται ότι η μαγνητική επαγωγή στο μέσο μιας διάταξης πηνίων Helmholtz δίδεται από τη Σχέση 1.4. Τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης διάταξης πηνίων Helmholtz είναι τα εξής:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά πηνίων Helmholtz.

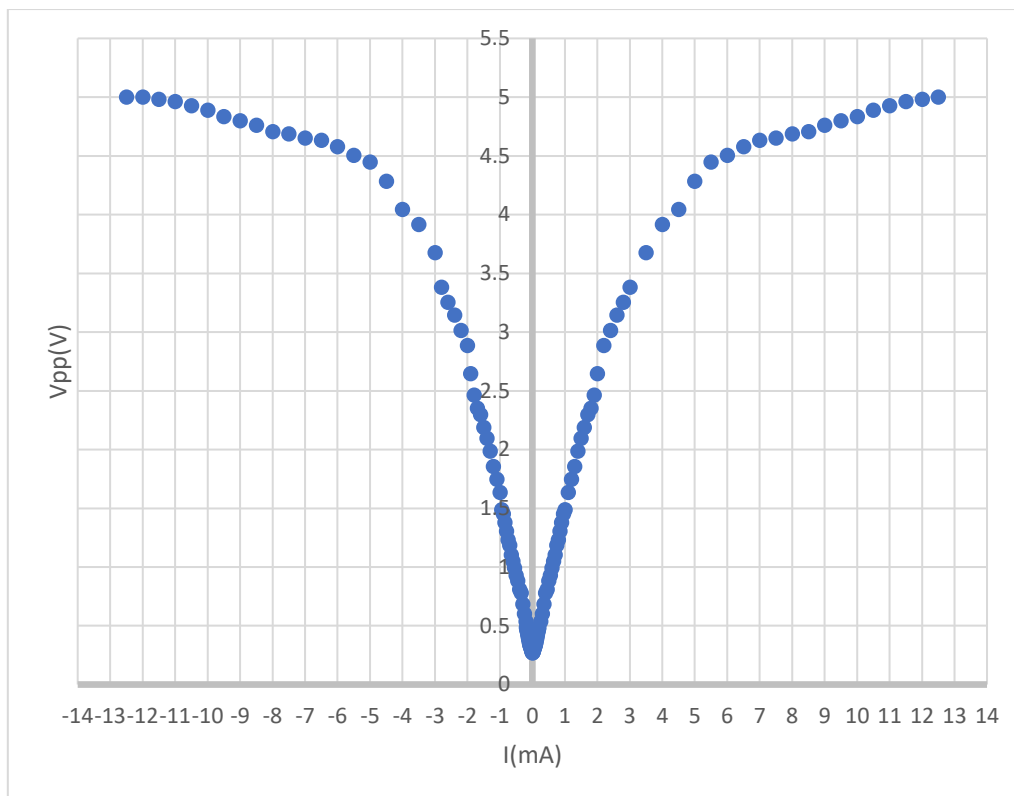
Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ακτίνα & Απόσταση πηνίων	100mm
Αριθμός περιελίξεων ανά στρώση	60
Αριθμός στρώσεων	10

Συνεπώς, βάσει των χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης διάταξης, προκύπτει ότι η μαγνητική επαγωγή στο κέντρο της θα ισούται με:

$$B = 5.39 \times 10^{-3} \cdot I \quad (3.1)$$

Για τη διεξαγωγή της διακρίβωσης του μαγνητομέτρου, τα πηνία Helmholtz συνδέονται με το ηλεκτρονικό κύκλωμα αυτομάτου ελέγχου, το οποίο τα τροφοδοτεί καταλλήλως, ώστε να αντισταθμίζουν το υπάρχον μαγνητικό πεδίο του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων. Το μαγνητόμετρο συνδέεται με μία γεννήτρια συχνοτήτων, η οποία διεγείρει τα πηνία λήψης του με ημιτονοειδές σήμα πλάτους $V = 2.5V$ και συχνότητας $f = 100kHz$.

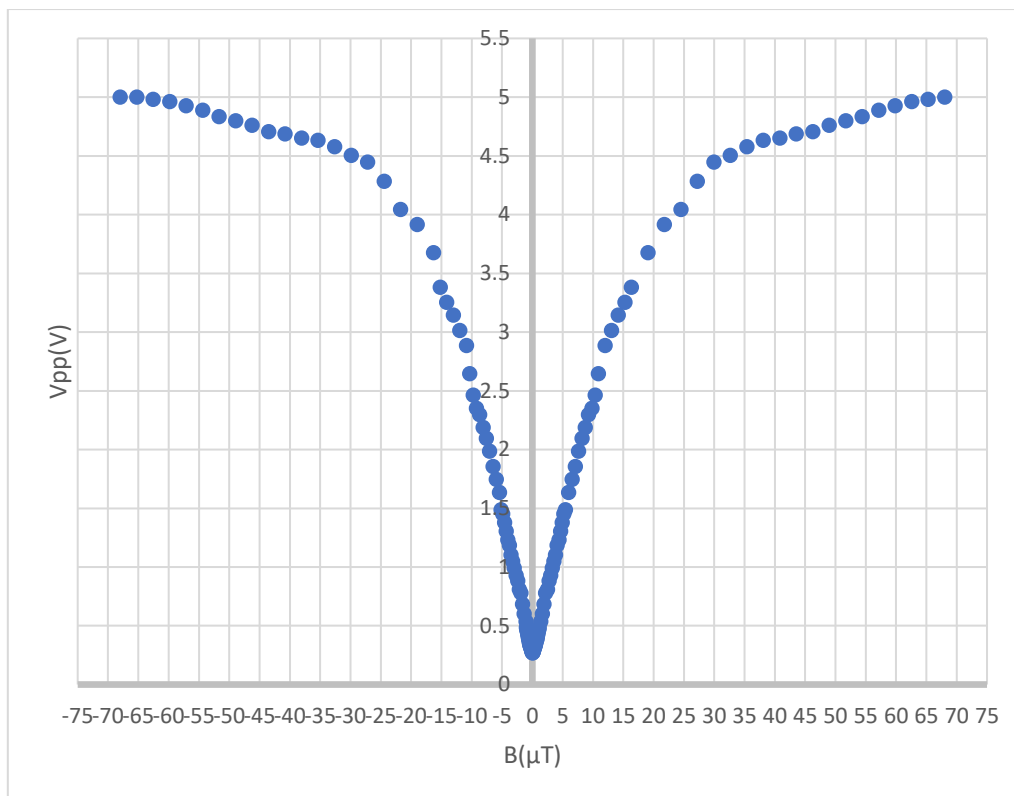
Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου, συναρτήσει της έντασης του παρεχόμενου ρεύματος στα πηνία Helmholtz.



Σχήμα 3.18: Σχέση παρεχόμενης έντασης ρεύματος στα πηνία Helmholtz και της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου.

Είναι εμφανές ότι, όπως αναμενόταν, η τάση που μετράται είναι σχεδόν ίση με μηδέν κατά την απουσία επιβολής μαγνητικού πεδίου από τα πηνία Helmholtz. Αντιστοίχως, αυξάνεται συμμετρικά κατά την επιβολή μαγνητικού πεδίου. Επίσης, παρατηρείται ότι μετά από ένα όριο έντασης, η αύξηση παύει να είναι γραμμική, κάτι που εξηγείται λόγω του μη γραμμικού βρόχου υστέρησης του μαγνητικού πυρήνα.

Αντιστοίχως, στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου, σε σχέση με τις τιμές μαγνητικής επαγωγής που υπολογίζονται για το συγκεκριμένο ζεύγος πηνίων Helmholtz, βάσει της Σχέσης 1.4.



Σχήμα 3.19: Σχέση παρεχόμενης μαγνητικής επαγωγής από τα πηνία Helmholtz και της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου.

Η ελάχιστη ακριβής μέτρηση που ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί με το συγκεκριμένο μαγνητόμετρο, πραγματοποιήθηκε για πεδίο 5.4nT. Η σχέση τάσης εξόδου και ανιχνευόμενης μαγνητικής επαγωγής για τη γραμμική περιοχή μέτρησης είναι ίση με 46.4mV/μT. Το εύρος μέτρησης μαγνητικής επαγωγής αντιστοιχεί σε $\pm 430\mu\text{T}$. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά του ανεπτυγμένου μαγνητομέτρου, σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο εμπορικό μαγνητόμετρο πολύ υψηλού κόστους [146]:

Πίνακας 2: Σύγκριση χαρακτηριστικών των μαγνητομέτρων.

Χαρακτηριστικό	Τιμή		Μονάδα
	Ανεπτυγμένο μαγνητόμετρο	Εμπορικό μαγνητόμετρο	
Λόγος V/B	46.4	50	mV/μT
Εύρος μέτρησης	± 430	± 200	μT

3.3.3 Ανάπτυξη ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης

Μετά τον έλεγχο της λειτουργίας του ανεπτυγμένου μαγνητομέτρου και τη διεξαγωγή της διακρίβωσής του, επελέγη η κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων παραγωγής του σήματος διέγερσης και λήψης του τελικού σήματος.

Παρατηρήθηκε ότι το ανεπτυγμένο μαγνητόμετρο λειτουργεί αποδοτικά τόσο με ημιτονοειδές, όσο και με παλμικό σήμα διέγερσης. Το παλμικό σήμα μπορεί εύκολα να παραχθεί μέσω της χρήσης ενός χρονιστή. Συγκεκριμένα, για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκε ο χρονιστής TLC555 της Texas Instruments σε τοπολογία ασταθούς πολυδονητή. Αυτός ο χρονιστής βασίζεται σε τεχνολογία CMOS, έναντι του κλασικού LM555. Αυτό προσφέρει το πλεονέκτημα πως το σήμα που παράγει δεν επηρεάζεται από την αντίσταση του φορτίου που θα συνδεθεί στην έξοδό του.

Η συχνότητα που επελέγη για την παραγωγή του παλμικού σήματος είναι ίση με $f = 1kHz$, με διάρκεια παλμού $t_{HIGH} \approx 500\mu s$ (duty cycle $\approx 50\%$). Για να υπολογιστούν οι τιμές των παθητικών εξαρτημάτων του ηλεκτρονικού κυκλώματος που θα παράγει το παλμικό σήμα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$t_{HIGH} = 0.693 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1 \quad (3.2)$$

$$t_{LOW} = 0.693 \cdot R_2 \cdot C_1 \quad (3.3)$$

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2) \cdot C_1} \quad (3.4)$$

όπου:

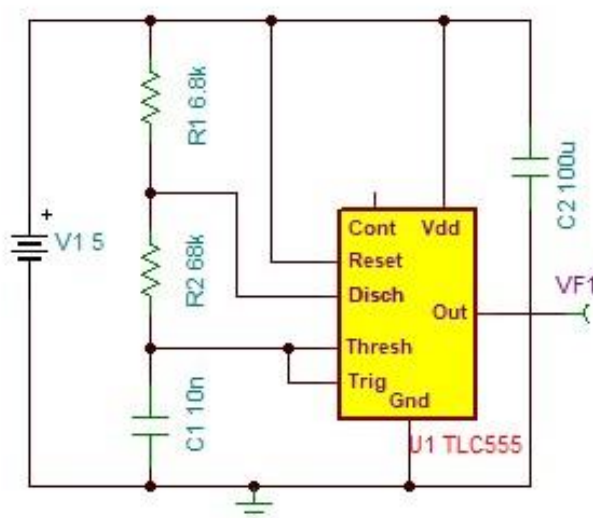
- t_{HIGH} : η διάρκεια του παλμού
- t_{LOW} : ο χρόνος που απομένει για τη συμπλήρωση μιας περιόδου
- f : η συχνότητα του παλμικού σήματος
- R_1, R_2 & C_1 : τα παθητικά εξαρτήματα, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.20.

Τελικά, από τους παραπάνω υπολογισμούς, προκύπτει παλμικό σήμα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά παραγόμενου παλμικού σήματος.

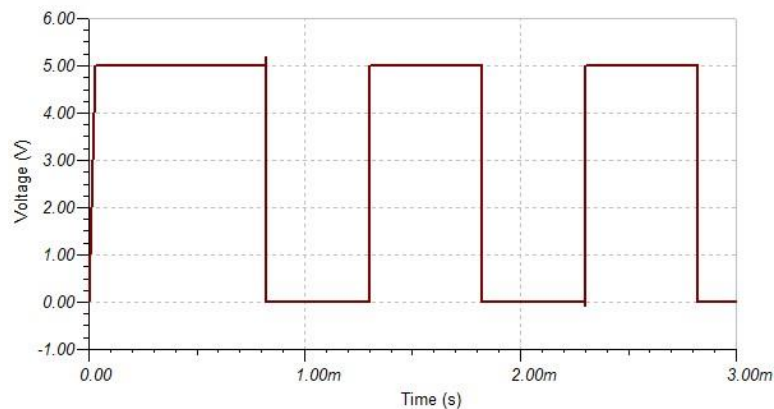
Μέγεθος	Τιμή
f	1008kHz
t_{HIGH}	518.364μs
t_{LOW}	471.240μs
T	989.604μs
Duty cycle	52.38%

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε, βάσει των παραπάνω υπολογισμών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20:



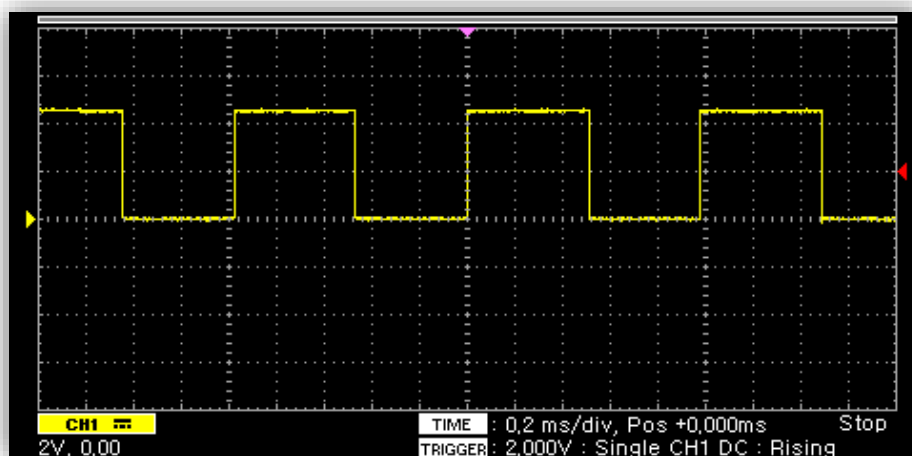
Σχήμα 3.20: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ασταθούς πολυδονητή.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του παραπάνω κυκλώματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22:



Σχήμα 3.21: Αποτέλεσμα προσομοίωσης σήματος εξόδου ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης.

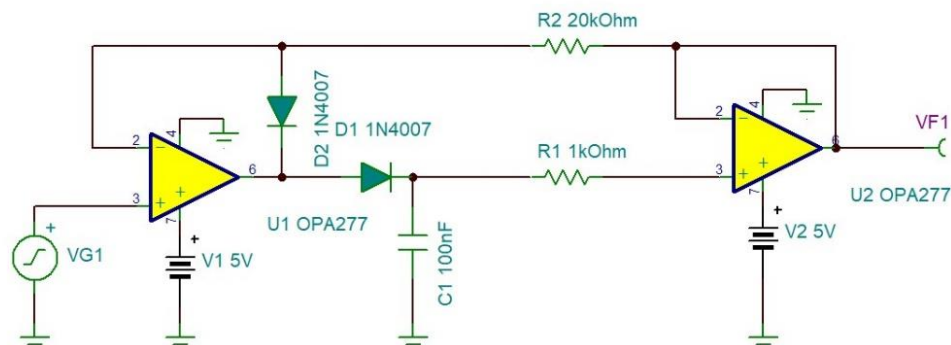
Τέλος, στο Σχήμα 3.22 απεικονίζεται το σήμα εξόδου του ασταθούς πολυδονητή που κατασκευάστηκε:



Σχήμα 3.22: Σήμα εξόδου ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης.

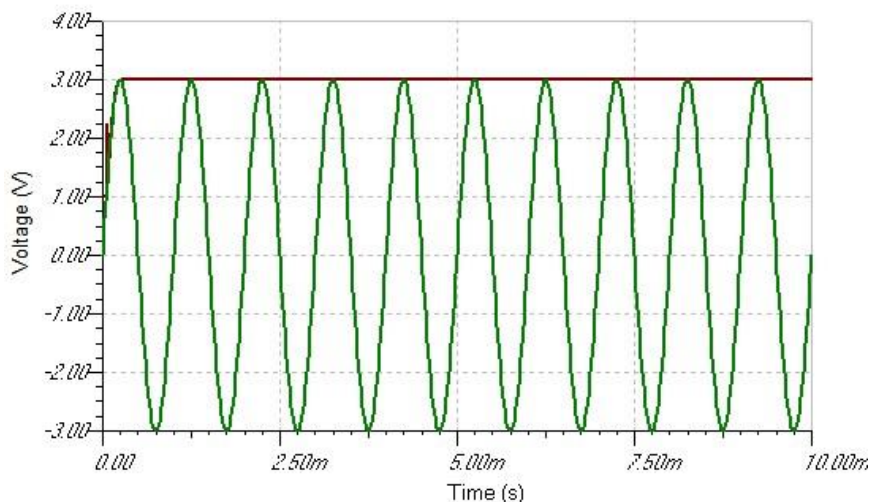
3.3.4 Κατασκευή ανιχνευτή κορυφών

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η σχεδίαση και η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος ικανού να ανιχνεύει τις κορυφές του σήματος διέγερσης. Γι' αυτόν τον σκοπό, σχεδιάστηκε το κύκλωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.23, βασισμένο στη χρήση των τελεστικών ενισχυτών υψηλής ακριβείας OPA277 της Texas Instruments.



Σχήμα 3.23: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του εν λόγω ηλεκτρονικού κυκλώματος για ημιτονοειδές σήμα εισόδου, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

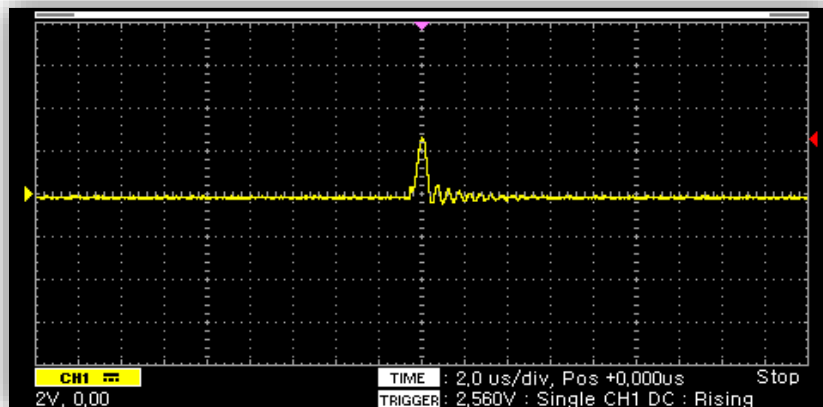


Σχήμα 3.24: Σήμα εξόδου ανιχνευτή κορυφών (κόκκινο) για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης.

3.3.5 Διεξαγωγή μετρήσεων

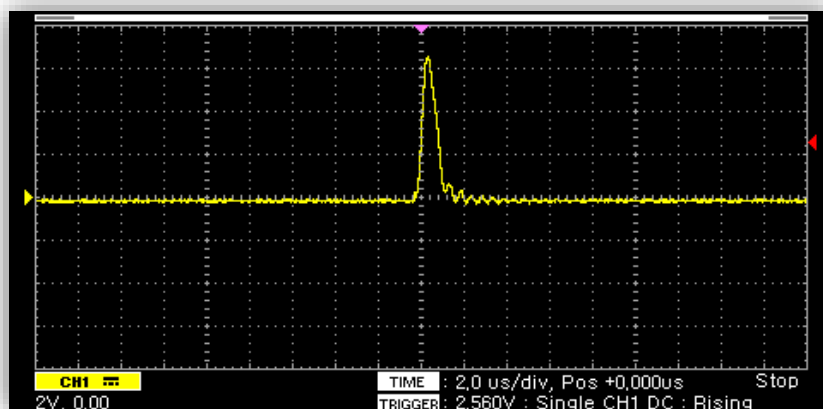
Μετά τη διακρίβωση, διεξήχθησαν δοκιμαστικές μετρήσεις με χρήση του συγκεκριμένου μαγνητομέτρου.

Αρχικά, δοκιμάστηκε η χρήση του μαγνητομέτρου σε διάταξη ανοικτού βρόχου (open-loop). Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζεται ενδεικτικό σήμα εξόδου του μαγνητομέτρου σε τυχαίο προσανατολισμό, χωρίς την επιβολή κάποιου ισχυρού μαγνητικού πεδίου.



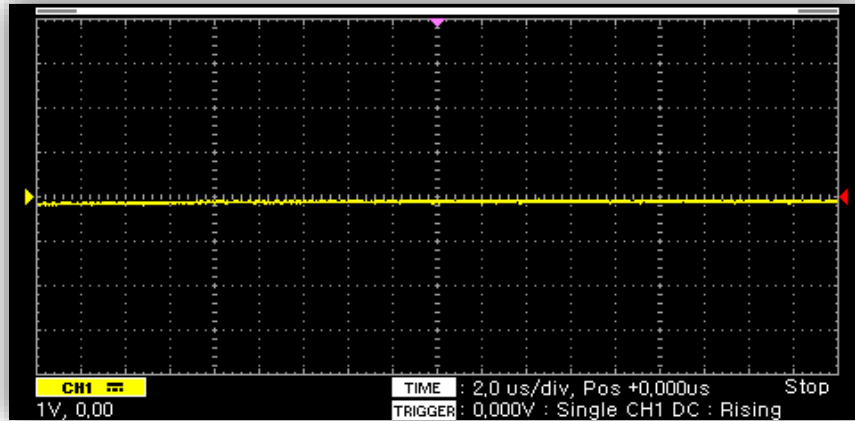
Σχήμα 3.25: Σήμα εξόδου μαγνητομέτρου απουσία μαγνήτη.

Αντιστοίχως, στο Σχήμα 3.26 παρουσιάζεται το σήμα εξόδου του μαγνητομέτρου για τον ίδιο προσανατολισμό, κατά την ύπαρξη ενός κυβικού μαγνήτη νεοδυμίου διαστάσεων $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$, σε απόσταση 50mm από το μαγνητόμετρο.

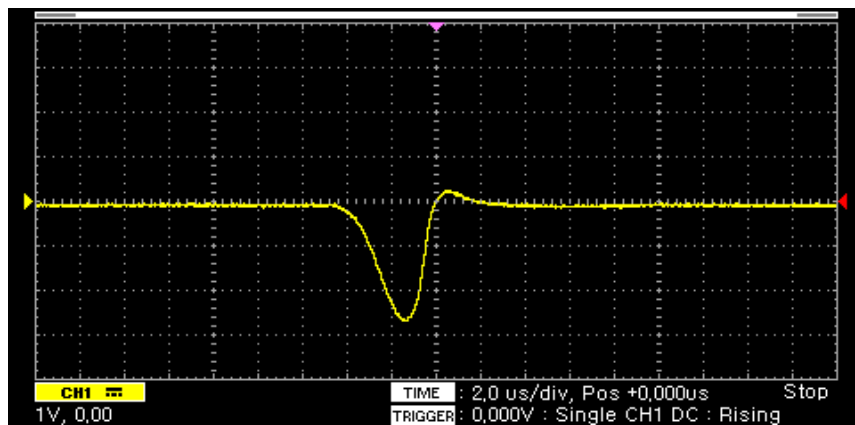


Σχήμα 3.26: Σήμα εξόδου μαγνητομέτρου παρουσία μαγνήτη.

Από τα παραπάνω σήματα, επιβεβαιώνεται η υψηλή ευαισθησία του μαγνητομέτρου, όμως είναι εμφανές ότι το σήμα εξόδου εμφανίζει κωδωνισμό (ringing). Αυτό μπορεί να μην επηρεάζει τις μετρήσεις όταν αυτές βασίζονται στην ανίχνευση κορυφής. Παρ' όλα αυτά, το φαινόμενο αντιμετωπίστηκε επιτυχώς με την προσθήκη ενός μη ηλεκτρολυτικού πυκνωτή χωρητικότητας 100nF, ο οποίος συνδέθηκε παράλληλα με τα άκρα των πηνίων διέγερσης. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται το σήμα εξόδου του μαγνητομέτρου που προέκυψε μετά την τοποθέτηση του πυκνωτή.

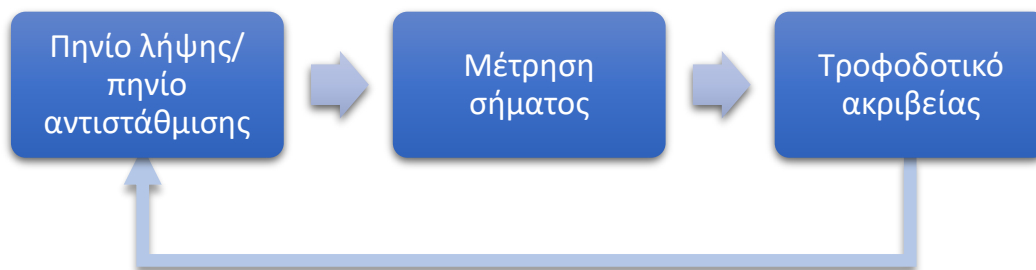


Σχήμα 3.27: Νέο σήμα εξόδου μαγνητομέτρου απουσία μαγνήτη.



Σχήμα 3.28: Νέο σήμα εξόδου μαγνητομέτρου παρουσία μαγνήτη.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μια διάταξη κλειστού βρόχου (closed-loop). Συγκεκριμένα, το πηνίο λήψης του μαγνητομέτρου συνδέθηκε με ένα τροφοδοτικό ακριβείας, ώστε να αποτελέσει ταυτόχρονα το πηνίο παραγωγής του μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης.



Σχήμα 3.29: Διάγραμμα λειτουργίας διάταξης κλειστού βρόχου.

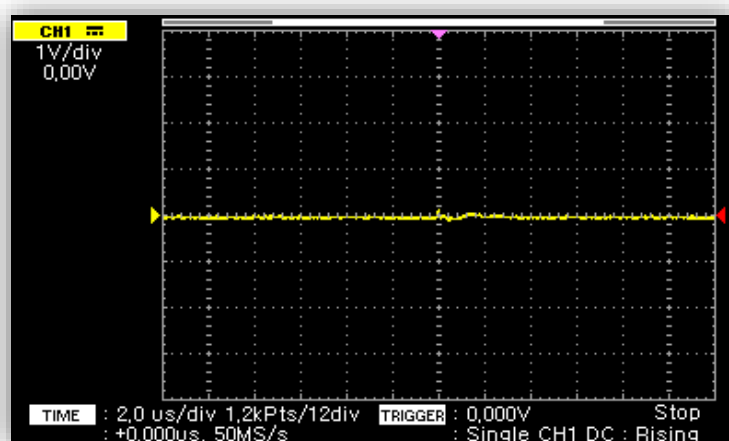
Η διάταξη κλειστού βρόχου προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα: το σήμα μελετάται στην γραμμική περιοχή γύρω από το μηδέν. Συνεπώς, δεν φτάνει στην περιοχή κόρου, επιτρέποντας την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου σε μεγαλύτερο εύρος. Σε αυτήν την περίπτωση, καταγράφεται η ένταση ρεύματος που παρέχεται στο πηνίο αντιστάθμισης, η οποία απαιτείται για την εξάλειψη του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Το πηνίο λήψης τροφοδοτήθηκε με ενδεικτικές τιμές έντασης ρεύματος στο εύρος [0, 1] mA. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές μαγνητικού πεδίου που αντιστοιχούν σε αυτές τις εντάσεις ρεύματος, βάσει των θεωρητικών υπολογισμών.

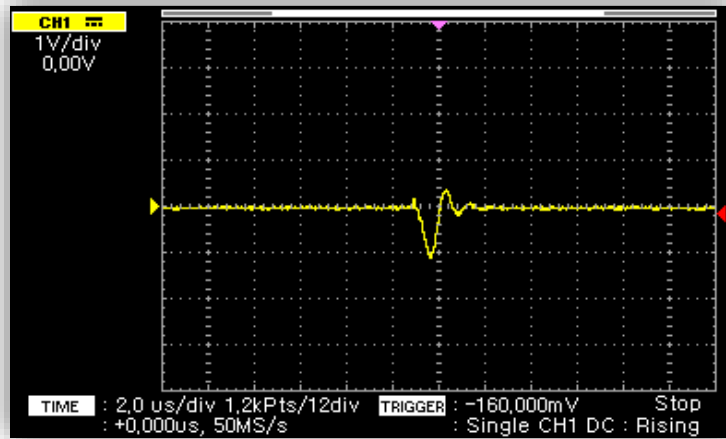
Πίνακας 4: Παραγόμενο μαγνητικό πεδίο πηνίου λήψης.

Ένταση ρεύματος (mA)	Τιμή μαγνητικού πεδίου (A/m)
0	0
0.5	4.28
1	8.57

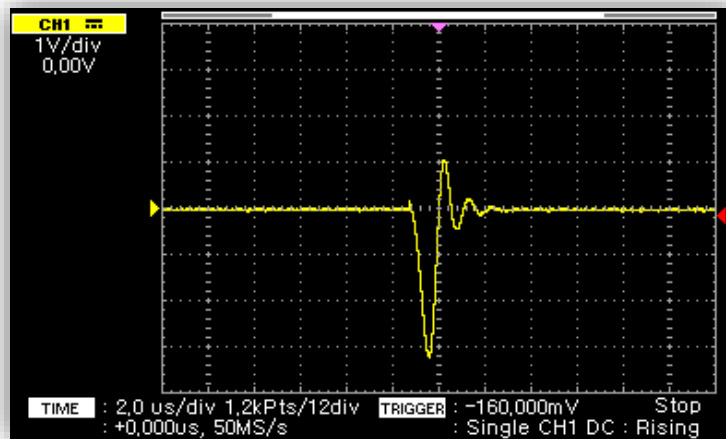
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα σήματα εξόδου που αντιστοιχούν στις παραπάνω τιμές μαγνητικού πεδίου:



Σχήμα 3.30: Σήμα εξόδου για μηδενική ένταση ρεύματος στο πηνίο λήψης.



Σχήμα 3.31: Σήμα εξόδου για ένταση ρεύματος 0.5mA στο πηνίο λήψης.



Σχήμα 3.32: Σήμα εξόδου για ένταση ρεύματος 1mA στο πηνίο λήψης.

3.4 Ανάπτυξη διάταξης καταγραφής βρόχου υστέρησης

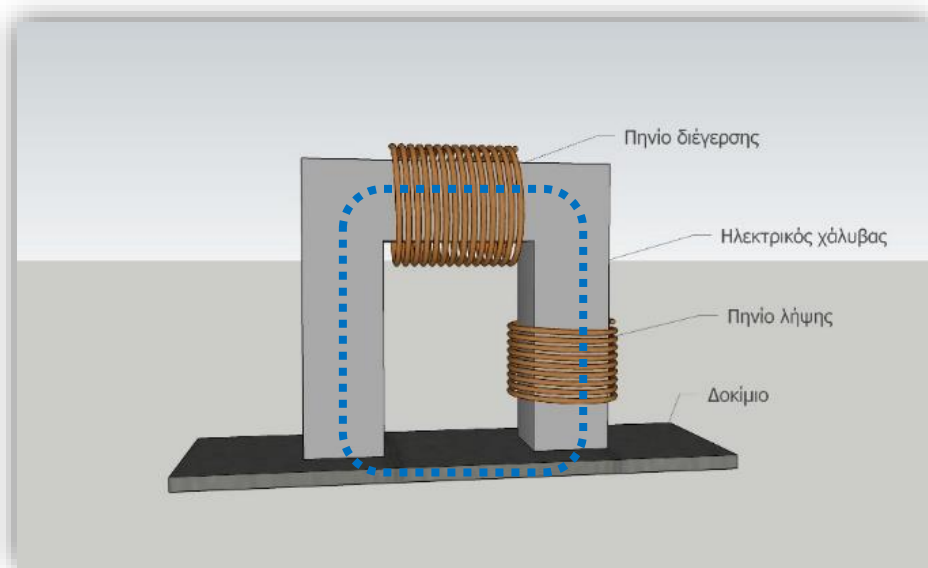
3.4.1 Εισαγωγή

Στις επόμενες παραγράφους προτείνεται η ανάπτυξη μιας διάταξης που έχει ως σκοπό τη λήψη του βρόχου υστέρησης φερρομαγνητικών υλικών, με σκοπό τη μελέτη για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή, την ύπαρξη ατελειών και την πρόβλεψη πιθανών αστοχιών. Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 1, ο βρόχος υστέρησης αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την εξαγωγή των παραπάνω

πληροφοριών. Για την καταγραφή του, απαιτείται η διέγερση του εξεταζόμενου υλικού μέσω κατάλληλου σήματος και η λήψη της μαγνητικής πληροφορίας, η οποία θα έχει επηρεαστεί από τα χαρακτηριστικά του. Η συνήθης τεχνική που ακολουθείται περιλαμβάνει τη χρήση πηνίων διέγερσης και λήψης, τα οποία χρησιμοποιούν το εξεταζόμενο υλικό ως πυρήνα τους ή ως μέρος αυτού. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα, του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά, εκτός του άγνωστου υλικού που πλέον αποτελεί μέρος του. Συνεπώς, εάν ο αισθητήρας έχει διακριβωθεί, οι μεταβολές των μετρήσεων μπορούν να συσχετιστούν με το εξεταζόμενο υλικό.

3.4.2 Σχεδίαση διάταξης καταγραφής βρόχου υστέρησης

Η διάταξη που σχεδιάστηκε με σκοπό την καταγραφή του βρόχου υστέρησης βασίζεται στη χρήση ενός πυρήνα σε σχήμα «Π» (yoke), γύρω από τον οποίο περιελίσσονται τα πηνία διέγερσης και λήψης. Με αυτόν τον τρόπο, δεν απαιτείται η επέμβαση στο υπό εξέταση δοκίμιο για την περιέλιξη κάποιου πηνίου σε αυτό. Η διάταξη που σχεδιάστηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.33.



Σχήμα 3.33: Αισθητήρια διάταξη καταγραφής βρόχου υστέρησης (με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται το κλειστό μαγνητικό κύκλωμα).

Ο πυρήνας που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από λεπτά φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα, μεταξύ των οποίων υπάρχουν μονωτικά στρώματα. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η επίδραση των δινορρευμάτων στο εσωτερικό του. Οι διαστάσεις του πυρήνα είναι (ΜxΠxΥ): 50x13x53 mm³.

Το πηνίο διέγερσης περιελίσσεται γύρω από το τμήμα του πυρήνα που είναι παράλληλο με το δοκίμιο, ενώ το πηνίο λήψης τοποθετείται σε μία από τις δύο βάσεις του πυρήνα. Η διάταξη έρχεται σε επαφή με το άγνωστο υλικό, ώστε να δημιουργηθεί ένας κλειστός βρόχος. Παρέχοντας στο πηνίο διέγερσης εναλλασσόμενο σήμα (ημιτονοειδές ή τριγωνικό), δημιουργείται μαγνητική ροή που διαδίδεται μέσω του βρόχου. Ο πυρήνας, όντας κατασκευασμένος από ένα υλικό με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, όπως είναι ο ηλεκτρικός χάλυβας, αποτελεί τη βέλτιστη διαδρομή διάδοσης. Τελικά, το μαγνητικό σήμα λαμβάνεται από το πηνίο λήψης. Όμως, το ληφθέν σήμα πλέον έχει επηρεαστεί από τις ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού που ολοκλήρωνε τον βρόχο, καθιστώντας δυνατή την ανίχνευση των μεταβολών που οφείλονται στο συγκεκριμένο υλικό.

3.4.3 Αρχή λειτουργίας

Πιο αναλυτικά, η λειτουργία αυτής της διάταξης βασίζεται στους νόμους του Ampere και του Faraday, από τους οποίους προκύπτει αντιστοίχως:

$$H = \frac{N_1 I}{l_\phi} \quad (3.5)$$

και

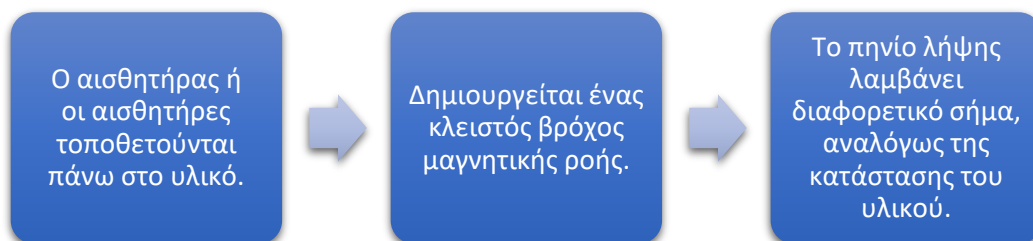
$$B(t) = -\frac{1}{AN_2} \int V_{out}(t) dt \quad (3.6)$$

όπου:

- H : το μαγνητικό πεδίο διέγερσης
- N_1 : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου διέγερσης
- I : η ένταση του παρεχόμενου ρεύματος

- l_ϕ : το μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής
- B : η μαγνητική επαγωγή
- A : το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου
- N_2 : ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου λήψης
- $V_{out}(t)$: το πλάτος του σήματος εξόδου.

Συνεπώς, έχοντας βαθμονομήσει καταλλήλως το αισθητήριο της διάταξης, είναι δυνατός ο συσχετισμός των μεταβολών του ληφθέντος σήματος με την αλλαγή της μαγνητικής διαπερατότητας μ των υλικών, μέσω της γνωστής σχέσης $B = \mu H$. Ακόμη, επειδή το ληφθέν σήμα, βάσει του νόμου του Faraday, είναι ανάλογο της κλίσης της μαγνητικής επαγωγής ως προς τον χρόνο, χρησιμοποιώντας έναν ολοκληρωτή, είναι δυνατή η εύρεση της μαγνητικής επαγωγής. Επομένως, είναι δυνατή η απεικόνιση και καταγραφή του βρόχου υστέρησης του υλικού, ο οποίος προσφέρει ένα σύνολο πληροφοριών για την κατάσταση και τις ιδιότητές του. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται τα στάδια της μέτρησης:



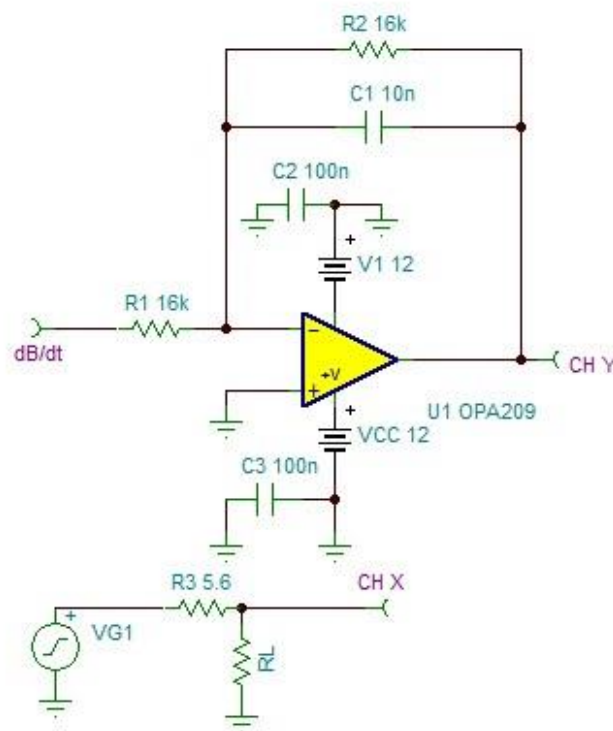
Σχήμα 3.34: Τα στάδια διεξαγωγής μέτρησης.

3.4.4 Σχεδίαση ηλεκτρονικού κυκλώματος

Για την καταγραφή του βρόχου υστέρησης των εξεταζόμενων υλικών, σχεδιάστηκε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που έχει ως σκοπό τη λήψη των δύο βασικών απαιτούμενων παραμέτρων: του μαγνητικού πεδίου H και της μαγνητικής επαγωγής B . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πρώτη παράμετρος είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο διέγερσης. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, είναι δυνατή η καταγραφή της, μέσω της μέτρησης της τάσης στα άκρα μιας γνωστής αντίστασης χαμηλής τιμής, ώστε να μην επηρεάζει τα αποτελέσματα. Η δεύτερη παράμετρος, δηλαδή η μαγνητική επαγωγή B , δεν

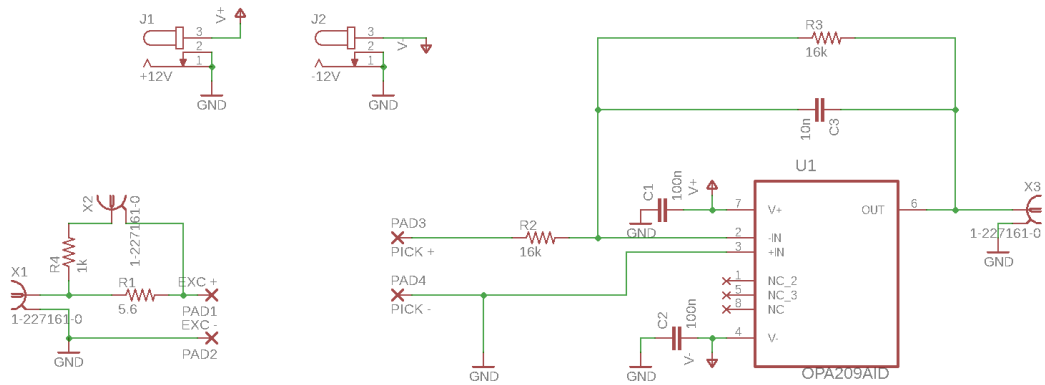
λαμβάνεται απευθείας από την έξοδο του πηνίου λήψης του αισθητηρίου. Αντιθέτως, λαμβάνεται η παράγωγος αυτής ως προς τον χρόνο. Άρα, για την καταγραφή των τιμών της μαγνητικής επαγωγής, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ολοκληρωτή.

Συνολικά, το ηλεκτρονικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε περιλαμβάνει έναν τελεστικό ενισχυτή σε τοπολογία ολοκληρωτή, έναν αντιστάτη με μικρή τιμή αντίστασης για τον υπολογισμό του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο διέγερσης και τέλος, τις κατάλληλες υποδοχές εισόδου, εξόδου και τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.35.

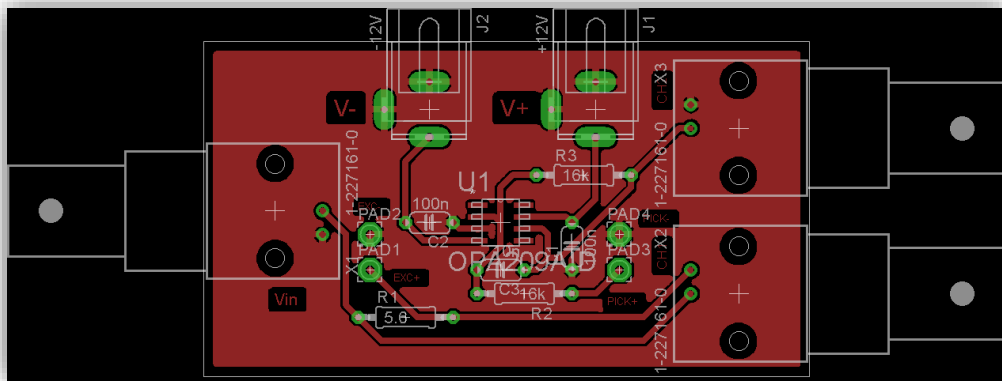


Σχήμα 3.35: Σχέδιο ηλεκτρονικού κυκλώματος καταγραφής βρόχου υστέρησης.

Ο τελεστικός ενισχυτής που επελέγη είναι ο OPA209 της Texas Instruments, λόγω των χαμηλών επιπέδων θορύβου που τον χαρακτηρίζουν [147]. Το σήμα που προέρχεται από το πηνίο λήψης παρέχεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου, το οποίο συνδέεται μέσω υποδοχής τύπου BNC. Ομοίως, τα δύο σήματα εξόδου αποστέλλονται στον παλμογράφο, επίσης μέσω δύο υποδοχών τύπου BNC. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα, καθώς και η πλακέτα που τελικά σχεδιάστηκε, εμφανίζονται στα παρακάτω σχήματα:



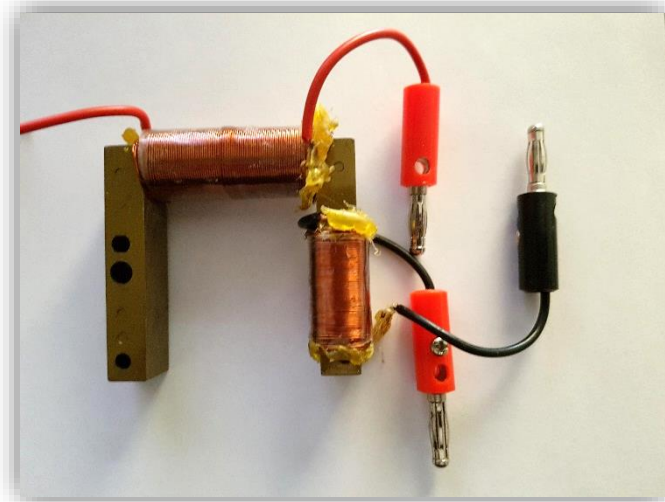
Σχήμα 3.36: Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος.



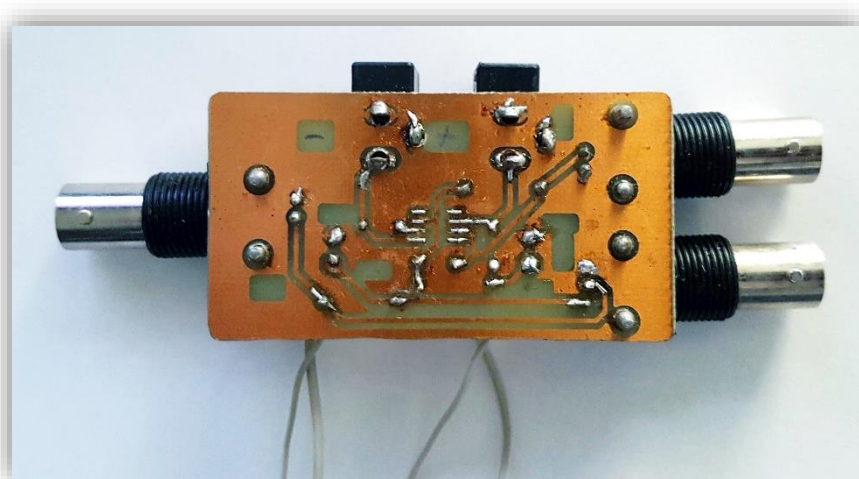
Σχήμα 3.37: Σχέδιο πλακέτας καταγραφής βρόχου υστέρησης.

3.4.5 Ανάπτυξη διάταξης

Μετά την κατασκευή της πλακέτας και την κόλληση των απαιτούμενων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, κατασκευάστηκε το αισθητήριο της διάταξης. Συγκεκριμένα, γύρω από τον μαγνητικό πυρήνα δημιουργήθηκαν 3 στρώσεις των 100 περιελίξεων, σύρματος χαλκού $\varnothing 0.5\text{mm}$, που αποτέλεσαν το πηνίο λήψης και 2 στρώσεις των 50 περιελίξεων, επίσης σύρματος χαλκού $\varnothing 0.5\text{mm}$, που αποτέλεσαν το πηνίο διέγερσης. Το αισθητήριο, καθώς και η τελική μορφή της πλακέτας, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.38: Το αισθητήριο της διάταξης καταγραφής βρόχου υστέρησης.



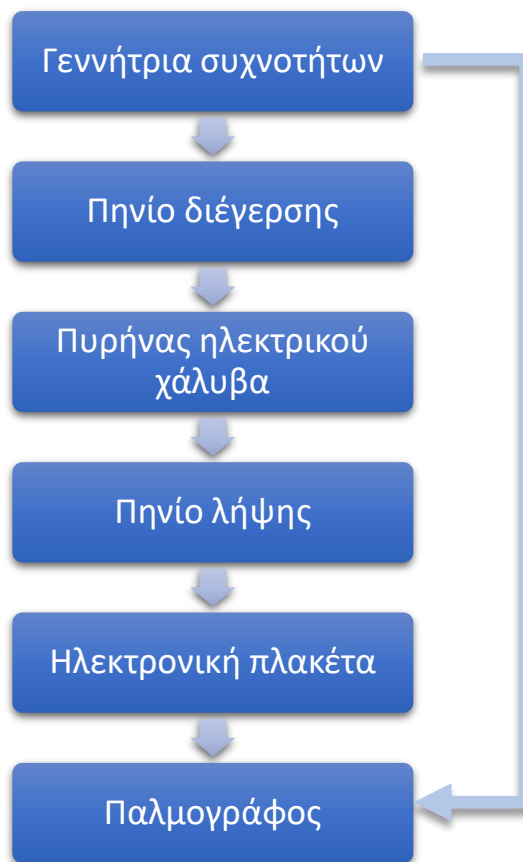
Σχήμα 3.39: Η αναπτυχθείσα πλακέτα καταγραφής του βρόχου υστέρησης.

3.4.6 Διεξαγωγή μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιείται μια γεννήτρια συχνοτήτων, από την οποία τίθεται σήμα χαμηλής συχνότητας (περίπου 1-4 Hz). Το σήμα της γεννήτριας οδηγείται σε έναν εργαστηριακό ενισχυτή ρεύματος, με σκοπό την παροχή μεγαλύτερης έντασης ρεύματος στο πηνίο διέγερσης του αισθητήρα και συνεπώς, τη δημιουργία ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου. Η χαμηλή συχνότητα είναι

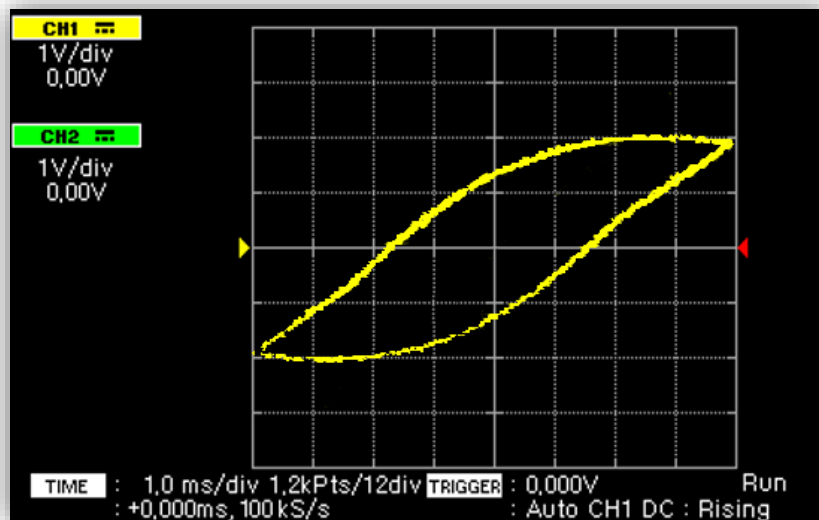
απαραίτητη για την αντιμετώπιση των δινορρευμάτων, τα οποία αντιδρούν στην επιβολή του μαγνητικού πεδίου στο υλικό.

Τελικά, το παραγόμενο σήμα οδηγείται στο πηνίο διέγερσης του αισθητηρίου. Η μαγνητική ροή που διαδίδεται μέσω του μαγνητικού πυρήνα, διαδίδεται και μέσα από το εξεταζόμενο φερρομαγνητικό υλικό, με το οποίο σχηματίζεται κλειστό μαγνητικό κύκλωμα. Στη συνέχεια, ανιχνεύεται από το πηνίο λήψης του αισθητηρίου και μεταφέρεται ως ηλεκτρικό σήμα στην ηλεκτρονική πλακέτα, στην οποία διενεργείται η ολοκλήρωση του σήματος ως προς τον χρόνο. Τέλος, μέσω των εξόδων της ηλεκτρονικής πλακέτας, τα ηλεκτρικά σήματα που αντιστοιχούν στο μαγνητικό πεδίο και στη μαγνητική επαγωγή οδηγούνται στον παλμογράφο. Προφανώς, για την ορθή απεικόνιση αυτών των σημάτων στην οθόνη του παλμογράφου απαιτείται η χρήση της λειτουργίας X-Y του παλμογράφου, κατά την οποία τα δύο σήματα απεικονίζονται στους αντίστοιχους άξονες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του επιθυμητού βρόχου υστέρησης. Τα στάδια της παραπάνω διαδικασίας εμφανίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:

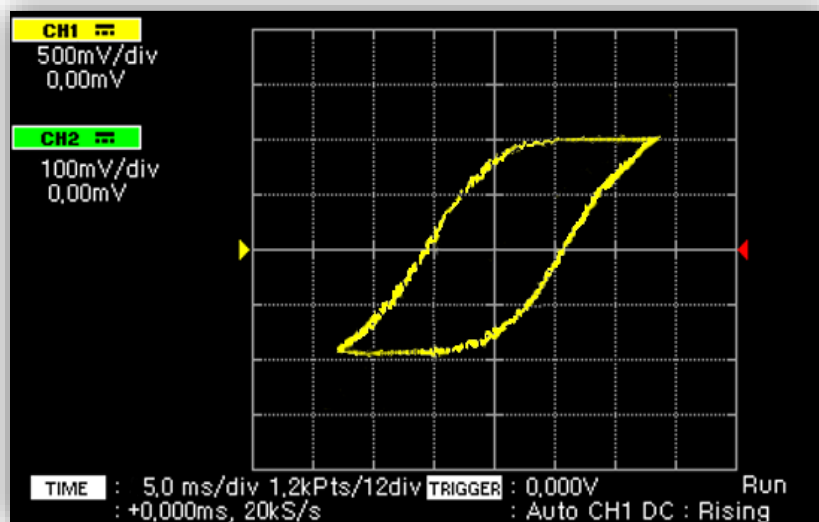


Σχήμα 3.40: Τα στάδια καταγραφής του βρόχου υστέρησης ενός υλικού.

Για τον έλεγχο της λειτουργίας της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα, διαστάσεων $300 \times 35 \times 0.6 \text{ mm}^3$. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται ενδεικτικοί βρόχοι υστέρησης που εμφανίστηκαν στον παλμογράφο μέσω της αναπτυχθείσας διάταξης, χρησιμοποιώντας συχνότητα διέγερσης $f = 1 \text{ Hz}$.



Σχήμα 3.41: Ενδεικτικός βρόχος υστέρησης πρώτου δείγματος χάλυβα.



Σχήμα 3.42: Ενδεικτικός βρόχος υστέρησης δεύτερου δείγματος χάλυβα.

3.4.7 Σχολιασμός λειτουργίας της διάταξης

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα μιας διάταξης, όπως η συγκεκριμένη, αποτελεί η δυνατότητα προσαρμογής της μέτρησης αναλόγως των απαιτήσεων και των συνθηκών της εκάστοτε εφαρμογής. Τροποποιώντας το πλάτος και τη συχνότητα του σήματος διέγερσης είναι δυνατή η διεξαγωγή μετρήσεων σε διαφορετικό βάθος στο εξεταζόμενο υλικό.

Όμως, η χρήση του εναλλασσόμενου σήματος διέγερσης δημιουργεί ταυτόχρονα και ένα μειονέκτημα της διάταξης: στην επιφάνεια του υλικού δημιουργούνται δινορρέυματα, τα οποία παράγουν μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στην επιθυμητή διάδοση του πεδίου διέγερσης στο εσωτερικό του υλικού. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μερικώς με τη χρήση χαμηλών συχνοτήτων διέγερσης, καθώς το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Από την άλλη πλευρά, κάτι τέτοιο συνεπάγεται και την κατανάλωση περισσότερου χρόνου για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, καθιστώντας πιο αποδοτική τη χρήση της διάταξης σε εργαστηριακό περιβάλλον και όχι ως φορητή για επί τόπου λήψη μετρήσεων.

3.5 Ανάπτυξη διάταξης προσδιορισμού μαγνητικής διαπερατότητας

3.5.1 Εισαγωγή

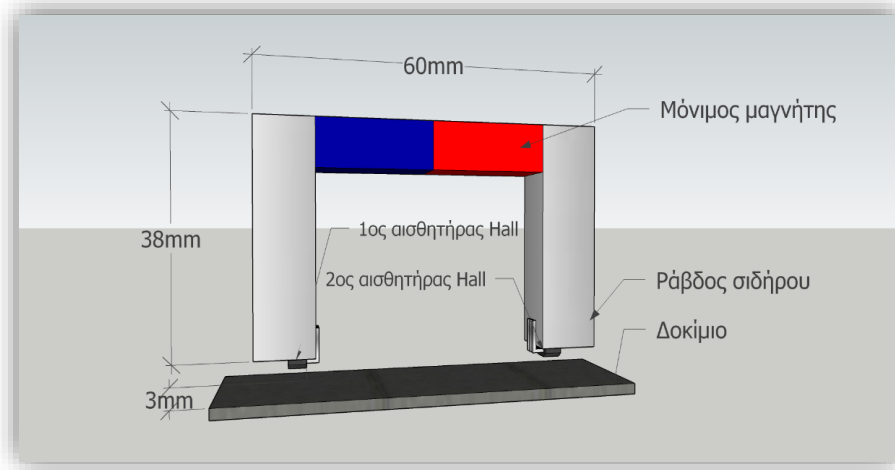
Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η σχεδίαση και η ανάπτυξη μιας νέας διάταξης, με σκοπό τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο φερρομαγνητικών υλικών, βασισμένη στο φαινόμενο Hall.

Στο Κεφάλαιο 1 έχουν αναλυθεί οι βασικές μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό τυχόν ατελειών σε φερρομαγνητικά υλικά, καθώς και για τη μέτρηση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται σε αυτά. Πολλές από τις μεθόδους μπορούν πρακτικά να χρησιμοποιηθούν μόνο σε εργαστηριακό περιβάλλον. Όμως, σε αρκετές περιπτώσεις

απαιτείται ο επί τόπου ή και ο συνεχής έλεγχος ενός υλικού. Συνεπώς, οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες πρέπει να είναι μικροί σε μέγεθος, φορητοί και να μπορούν να λαμβάνουν μετρήσεις με υψηλό ρυθμό. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητά τους να είναι ενεργειακά αυτόνομοι και να μπορούν να μεταδώσουν ασύρματα τα δεδομένα τους. Ιδανικά, το κόστος τους πρέπει να είναι χαμηλό, ώστε να είναι εφικτή η τοποθέτηση πολλών αισθητήρων, που θα καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή ελέγχου, δημιουργώντας ένα δίκτυο.

Οι δύο κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη λήψη τέτοιου είδους μετρήσεων βασίζονται στους αισθητήρες πιεζοαντίστασης (strain gauge) και στις οπτικές ίνες (Fiber-Bragg Grating). Όμως, αυτές οι μέθοδοι εμφανίζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα: Πρώτον, προϋποθέτουν την προσεκτική τοποθέτηση των αισθητήρων σε κρίσιμα σημεία για την επιτήρηση της κατάστασης της υπό εξέταση περιοχής (π.χ. κύτος πλοίου, τοιχώματα δεξαμενής κ.λπ.). Ανεπαρκής επαφή με το υλικό ή ελλιπής δειγματοληψία θα οδηγήσει σε ασαφή αποτελέσματα. Δεύτερον, δεν είναι ικανές να ανιχνεύσουν τις προϋπάρχουσες φθορές του υλικού, δηλαδή την κόπωση που είχε υποστεί προτού τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Η λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων είναι η χρήση κάποιας μεθόδου, η οποία θα είναι ικανή να ανιχνεύσει τόσο την τρέχουσα κατάσταση του υλικού, όσο και την κόπωση που υφίσταται λόγω των μηχανικών τάσεων που δέχεται.

Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, μέσω αισθητήρων Hall, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση ατελειών σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, αναπτύσσοντας μία νέα διάταξη. Συγκεκριμένα, η διάταξη που σχεδιάστηκε αποτελείται από έναν ραβδόμορφο μόνιμο μαγνήτη, δύο ράβδους μαλακού σιδήρου και δύο αισθητήρες Hall. Οι δύο ράβδοι σιδήρου τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα ως προς τον μόνιμο μαγνήτη, σχηματίζοντας ένα «Π». Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η χρήση πηνίων για τη μαγνήτιση του εξεταζόμενου υλικού και για τη λήψη του παραγόμενου σήματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το αισθητήριο της προτεινόμενης διάταξης:



Σχήμα 3.43: Το αισθητήριο της προτεινόμενης διάταξης.

3.5.2 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης διάταξης βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του υπό εξέταση υλικού, μέσω της μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής που ανιχνεύουν οι αισθητήρες Hall. Όταν η διάταξη πλησιάζει ή έρχεται σε επαφή με το υλικό, δημιουργείται ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα διάδοσης του συνεχούς μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από τον μόνιμο μαγνήτη. Η δημιουργηθείσα μαγνητική ροή, ακολουθώντας την οδό της υψηλότερης μαγνητικής διαπερατότητας, θα διαδοθεί μέσα από το εξεταζόμενο υλικό, το οποίο αποτελεί μέρος του μαγνητικού κυκλώματος.

Κατά τη μαγνήτιση, οι μαγνητικές ροπές των μαγνητικών περιοχών του φερρομαγνητικού υλικού τείνουν να ευθυγραμμιστούν με το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών επιτυγχάνεται μέσω της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων. Τυχόν ατέλειες στη δομή του υλικού εμποδίζουν την ομαλότητα αυτής της κίνησης και μπορούν να γίνουν αντιληπτές μέσω της λήψης του σήματος. Στην περίπτωση ενός θετικά μαγνητοσυστολικού υλικού, η επιβολή εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του άξονα μαγνήτισης οδηγεί στην αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. Ομοίως, θλιπτικές δυνάμεις οδηγούν στη μείωσή της.

Συνεπώς, αναλόγως της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, οι αισθητήρες Hall θα αντληφθούν διαφορετική τιμή επιβαλλόμενης μαγνητικής επαγωγής. Αυτή η πληροφορία, σε συνδυασμό με τη χρήση καμπύλων βαθμονόμησης για τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας σε σχέση με την επιβολή τάσεων ανά υλικό, οδηγεί στην εύρεση των μηχανικών τάσεων και στην παρακολούθηση της κατάστασης του υλικού. Τα στάδια της συγκεκριμένης διαδικασίας παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.44: Τα στάδια διεξαγωγής μέτρησης.

3.5.3 Σχεδίαση διάταξης

3.5.3.1 Εύρεση των παραμέτρων της διάταξης

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη της προτεινόμενης διάταξης είναι ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών του αισθητηρίου της, δηλαδή του «Π» που σχηματίζεται από τις δύο ράβδους σιδήρου, σε συνδυασμό με έναν μόνιμο μαγνήτη νεοδυμίου. Για τον συγκεκριμένο υπολογισμό, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης ANSYS, το οποίο βασίζεται σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Methods – FEM).

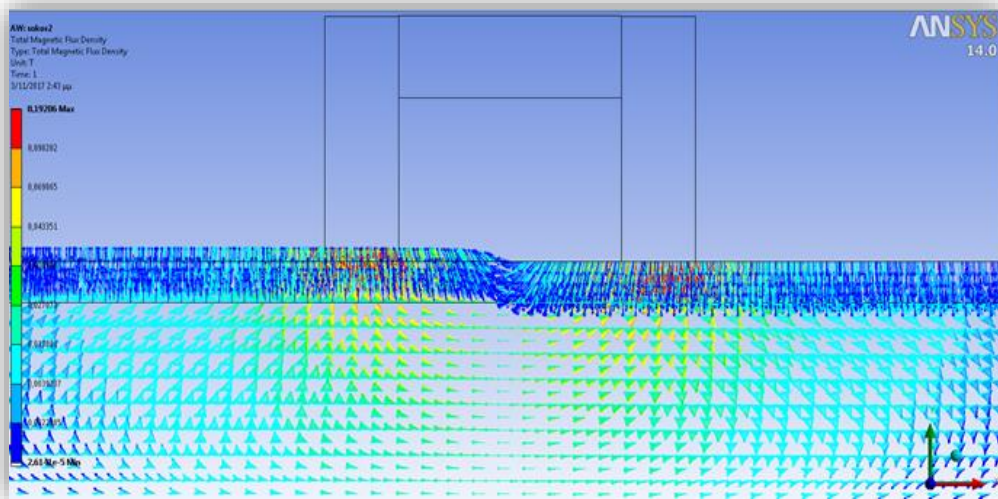
Η πρώτη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η θέση του μαγνήτη ως προς τις δύο ράβδους. Εξετάστηκε η περίπτωση της τοποθέτησής του πάνω από τις ράβδους και η περίπτωση της τοποθέτησής του μεταξύ των ράβδων. Τελικά, όπως ήταν αναμενόμενο, η ιδανική τοπολογία ήταν εκείνη με τον μαγνήτη μεταξύ των ράβδων, ώστε να υφίστανται οι μικρότερες δυνατές απώλειες μαγνητικής ροής.

Έπειτα, μέσω των προσομοιώσεων, υπολογίστηκε η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των ράβδων του αισθητηρίου, καθώς και η κάθετη απόσταση του αισθητηρίου από το εξεταζόμενο υλικό (lift-off). Τελικά, οι διαστάσεις που επελέγησαν για τις ράβδους

σιδήρου είναι $40 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$, ενώ για τον κυλινδρικό μαγνήτη νεοδυμίου είναι 40 mm , $\varnothing 10 \text{ mm}$. Επίσης, αναφορικά με την καθ' ύψος απόσταση του αισθητηρίου από το δοκίμιο, επελέγησαν τα 3 mm , στα οποία εμφανίζεται η καλύτερη σχέση έντασης και ομοιομορφίας του μαγνητικού πεδίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι επελέγη η χρήση του ραβδόμορφου μαγνήτη κυκλικής διατομής, αντί της τετραγωνικής, καθώς αυτή η μορφή είναι η συνηθέστερη που συναντάται στο εμπόριο, έχοντας τους μαγνητικούς πόλους στα δύο άκρα, ενώ συντελεί και στη συγκέντρωση των μαγνητικών γραμμών στο εσωτερικό του αισθητηρίου.

Μία ενδεικτική εικόνα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα σημεία, λόγω του μονίμου μαγνήτη.



Σχήμα 3.45: Απεικόνιση της μαγνητικής επαγωγής, όπως υπολογίστηκε από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

3.5.3.2 Επιλογή μαγνητικών αισθητήρων

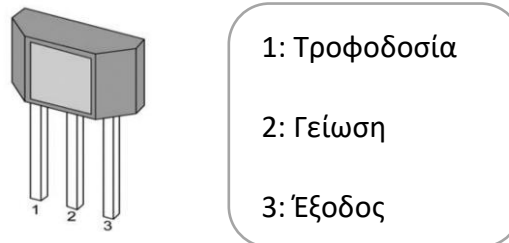
Στη συνέχεια, επελέγησαν οι αισθητήρες Hall που είναι κατάλληλοι για την προτεινόμενη διάταξη. Προφανώς, απαιτείται η χρήση αισθητήρων Hall γραμμικής μέτρησης, ώστε η έξοδός τους να είναι τάση ανάλογη του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου. Επίσης, λόγω της χρήσης του μαγνήτη νεοδυμίου, του οποίου η μαγνητική επαγωγή φθάνει τις μερικές εκατοντάδες mT, το μετρούμενο εύρος των αισθητήρων

πρέπει να είναι αντίστοιχο. Για τους παραπάνω λόγους, επελέγησαν οι αισθητήρες Hall SS49E της Honeywell, τα τυπικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5: Τυπικά χαρακτηριστικά αισθητήρα Hall SS49E.

Χαρακτηριστικό	Τιμή	Μονάδα
Τάση τροφοδοσίας	2.7 – 6.5	V
Ένταση ρεύματος τροφοδοσίας (25°C)	6 – 10	mA
Τάση εξόδου για μηδενικό πεδίο	$\frac{V_{CC}}{2} = \sim 2.5$	V
Εύρος μέτρησης (25°C)	± 1000	G
Ευαισθησία	1.4	mV/G
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40 – 100	°C
Θερμοκρασιακό σφάλμα	± 0.1	%/°C

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ακροδέκτες σύνδεσης του αισθητήρα Hall SS49E:



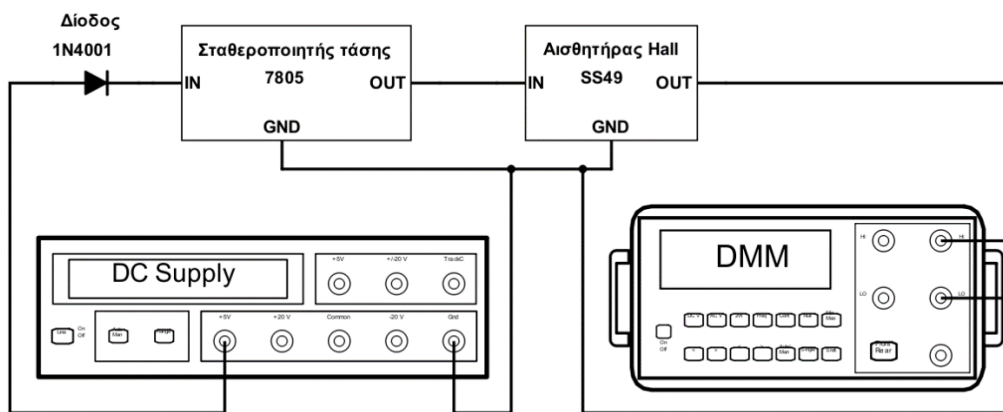
Σχήμα 3.46: Ακροδέκτες αισθητήρα Hall.

Όπως αναφέρθηκε, ο αισθητήρας Hall SS49E είναι τύπου linear bipolar. Η έξοδός του, δηλαδή, σχετίζεται γραμμικά με την τιμή μαγνητικής επαγωγής, αλλά και με την κατεύθυνση αυτού του πεδίου. Βάσει της τυπικής καμπύλης βαθμονόμησης του αισθητήρα, όπως αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή του, προκύπτει ότι για το εύρος μέτρησής του (από -100 έως +100 mT), ο λόγος τάσης εξόδου προς το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο είναι 1.4mV/Gauss (1G = 10⁻⁴T). Η τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα πρέπει να βρίσκεται στο εύρος 2.7-6.5 V. Επίσης, με σκοπό την απόδοση τιμών τάσης εξόδου σε ένα τυπικό εύρος (π.χ. 0-5 V), η τάση εξόδου του

αισθητήρα για την περίπτωση της απουσίας επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, αντιστοιχεί στο μισό της τάσης τροφοδοσίας του ($V_{out}(0mT) = \frac{V_{CC}}{2}$).

3.5.3.3 Ανάπτυξη ηλεκτρονικού κυκλώματος ελέγχου αισθητήρα Hall

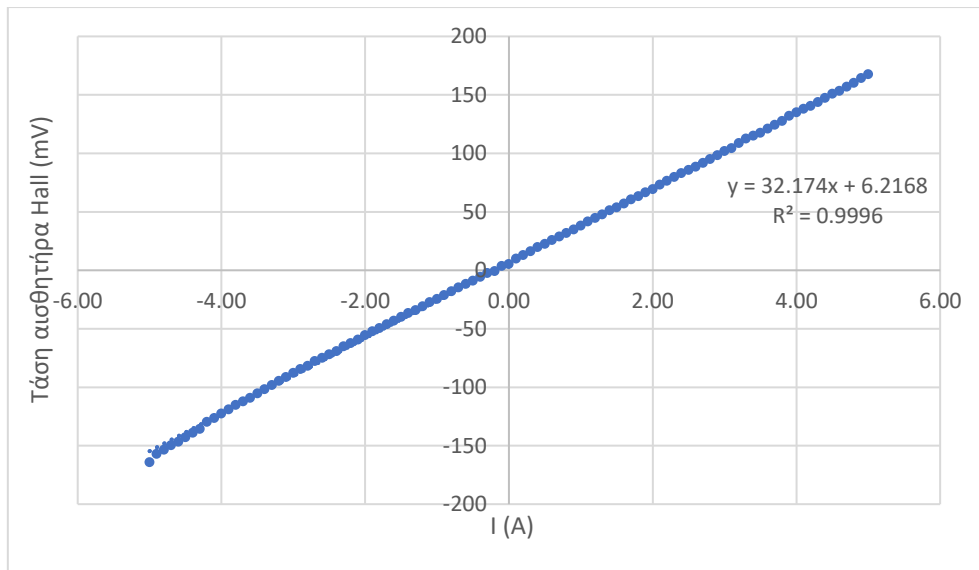
Τελικά, ο αισθητήρας Hall τοποθετήθηκε σε πλακέτα, η οποία περιλαμβάνει μία δίοδο (1N4001) και έναν σταθεροποιητή (LM7805). Η δίοδος αποτρέπει την τροφοδοσία του αισθητήρα με αρνητική τιμή τάσης, ενώ ο σταθεροποιητής προσφέρει την σταθερή τάση τροφοδοσίας των 5V που απαιτεί ο αισθητήρας για τη λειτουργία του. Το συνολικό διάγραμμα της διάταξης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



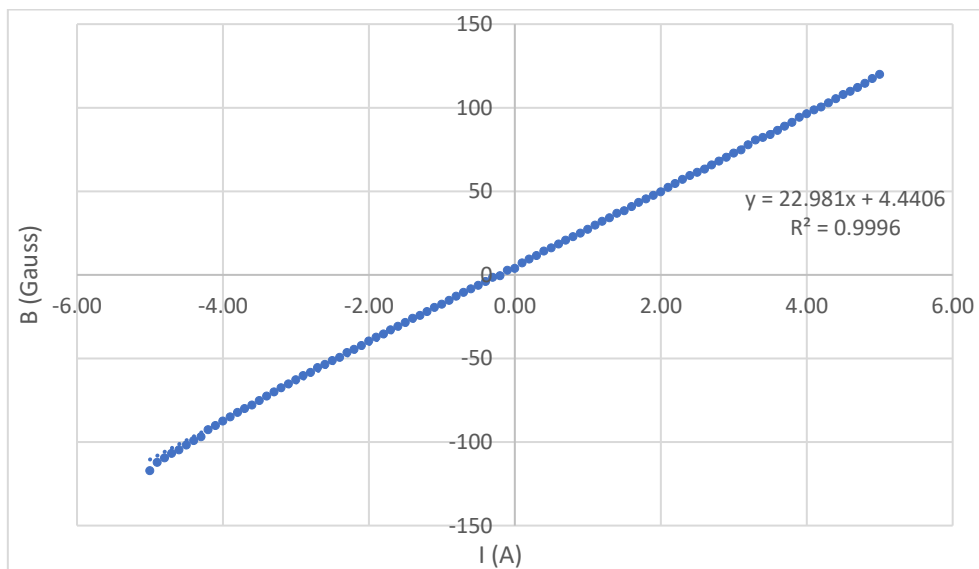
Σχήμα 3.47: Συνδεσμολογία διάταξης αισθητήρα Hall.

3.5.3.4 Διακρίβωση αισθητήρα Hall

Για την διακρίβωσή του, ο αισθητήρας Hall τοποθετήθηκε στο σωληνοειδές της διάταξης διακρίβωσης. Στη συνέχεια, ελήφθησαν μετρήσεις για εντάσεις ρεύματος τροφοδοσίας του σωληνοειδούς στο εύρος -5A έως 5A. Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, η έξοδος του συγκεκριμένου αισθητήρα Hall για μηδενικό μαγνητικό πεδίο ισούται με το μισό της τάσης τροφοδοσίας του, αυτή η τιμή αφαιρέθηκε από τις μετρήσεις, ώστε να προκύψει αυτούσια η τιμή της τάσης Hall. Στα επόμενα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις της τάσης εξόδου του αισθητήρα Hall και της μαγνητικής επαγωγής, αντιστοίχως, συναρτήσεως του ρεύματος που τροφοδοτούσε το σωληνοειδές.

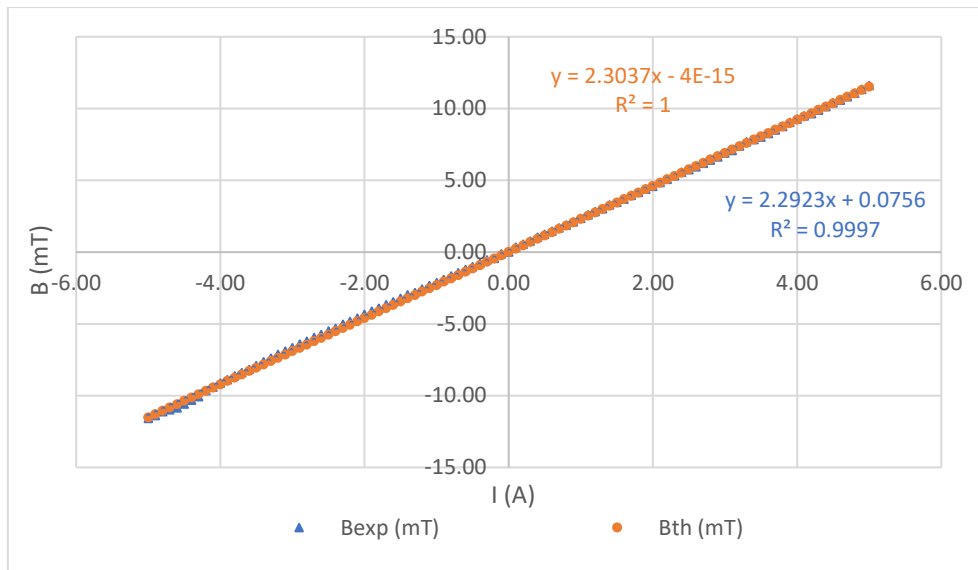


Σχήμα 3.48: Σχέση τάσης εξόδου αισθητήρα Hall και έντασης ρεύματος τροφοδοσίας σωληνοειδούς.



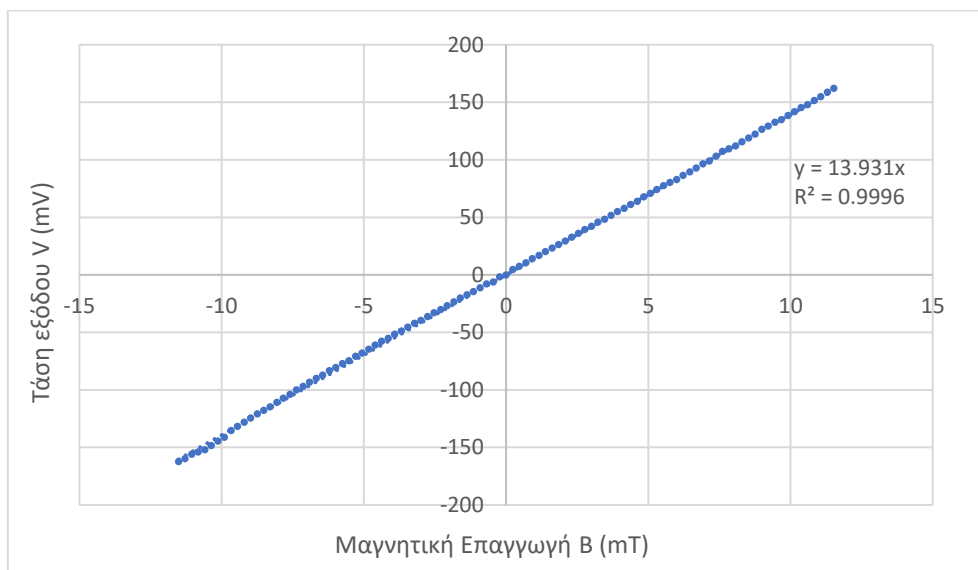
Σχήμα 3.49: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και έντασης ρεύματος τροφοδοσίας σωληνοειδούς.

Τα πειραματικά αποτελέσματα, όπως προκύπτουν από τον αισθητήρα Hall, καθώς και τα θεωρητικά αποτελέσματα, όπως υπολογίζονται βάσει των μαθηματικών σχέσεων για τη μαγνητική επαγωγή στο κέντρο του σωληνοειδούς, παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.50: Σχέση πειραματικών & θεωρητικών τιμών μαγνητικής επαγωγής με την ένταση ρεύματος τροφοδοσία του σωληνοειδούς.

Είναι εμφανές ότι υπάρχει σύμπτωση μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών. Βάσει των παραπάνω, προκύπτει η τελική καμπύλη βαθμονόμησης του αισθητήρα Hall, η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα:



Σχήμα 3.51: Σχέση τάσης εξόδου αισθητήρα Hall και μαγνητικής επαγωγής.

Βάσει αυτού του διαγράμματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός της σχέσης της τάσης εξόδου του αισθητήρα Hall συναρτήσεως του αντιλαμβανόμενου μαγνητικού πεδίου. Τελικά, από την κλίση της καμπύλης προκύπτει ότι η συγκεκριμένη σχέση

είναι ίση με 1.39mV/Gauss, τιμή που πλησιάζει πολύ την τιμή που δίνεται από τη βαθμονόμηση που πραγματοποιήσε ο κατασκευαστής (1.40mV/Gauss).

3.5.4 Κατασκευή στοιχείων διάταξης

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η επιλογή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που θα πλαισιώνουν το αισθητήριο, με σκοπό τη λήψη των μετρήσεων, την επεξεργασία της πληροφορίας και τη μετάδοσή της. Σημειώνεται ότι τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα επελέγησαν έχοντας ως στόχο τη δημιουργία μίας φορητής μετρητικής διάταξης, η οποία θα είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, διατηρώντας ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής της σε χαμηλά επίπεδα.

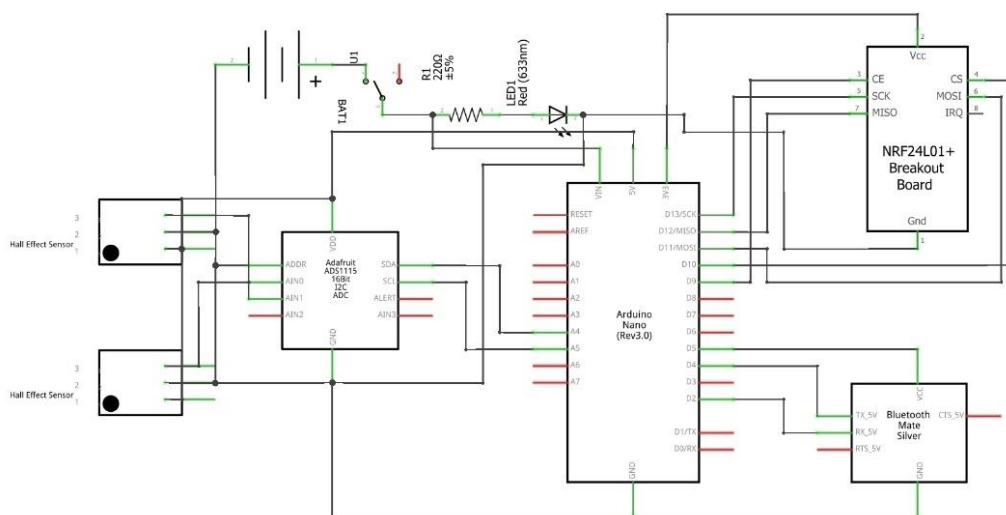
Η διάταξη σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αποτελείται από δύο επιμέρους συσκευές. Η πρώτη συσκευή αναλαμβάνει τη διεξαγωγή των μετρήσεων και την εκπομπή των αποτελεσμάτων. Περιλαμβάνει το αισθητήριο, την τροφοδοσία του και τα συστήματα μετάδοσης των μετρήσεων. Η δεύτερη συσκευή αποτελεί τον δέκτη, στον οποίο συλλέγονται τα δεδομένα μέσω της ασύρματης επικοινωνίας και προβάλλονται σε μία ενσωματωμένη οθόνη. Και οι δύο συσκευές είναι φορητές και μικρές σε μέγεθος, ώστε να είναι εύκολη η χρήση τους σε ποικίλα περιβάλλοντα μετρήσεων.

3.5.4.1 Κατασκευή συσκευής μέτρησης και εκπομπής

Το αισθητήριο, αποτελούμενο από τις ράβδους σιδήρου, τον μόνιμο μαγνήτη και τους δύο αισθητήρες Hall, τοποθετήθηκε στη βάση της πρώτης συσκευής. Πάνω από το αισθητήριο, τοποθετήθηκε μία πλάκα κατασκευασμένη από Ni-Fe (Mumetal), το οποίο, λόγω της υψηλής του μαγνητικής διαπερατότητας, είναι ικανό να «εγκλωβίζει» στο εσωτερικό του τις μαγνητικές γραμμές που εξέρχονται από τον ισχυρό μαγνήτη νεοδυμίου, ώστε αυτές να μην επηρεάζουν τα λοιπά ηλεκτρονικά μέρη της συσκευής, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο ένα είδος παθητικής μαγνητικής θωράκισης.

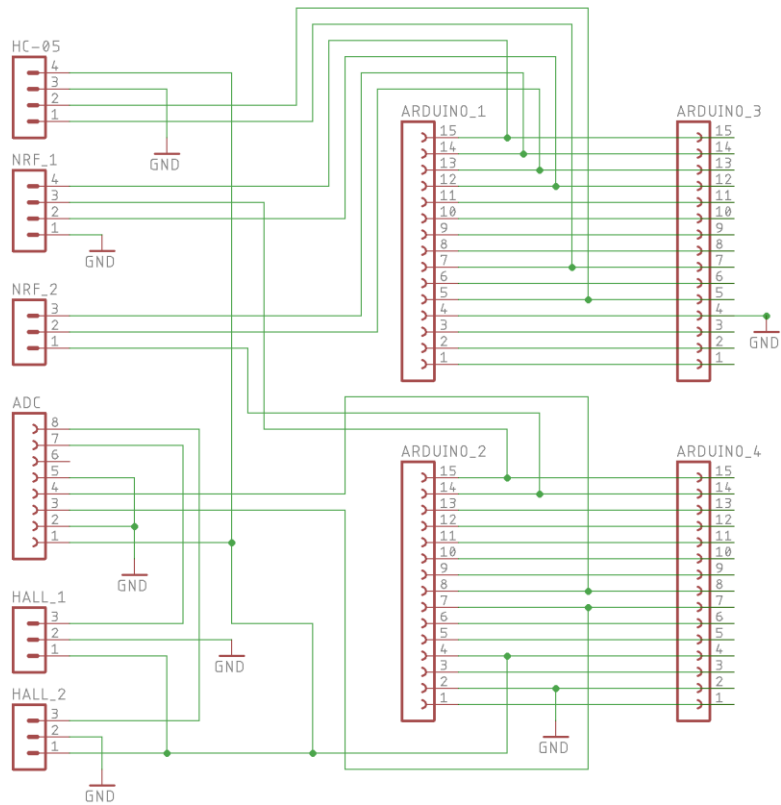
Στο άνωθεν τμήμα της συσκευής τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρονικά μέρη της διάταξης, με σκοπό την επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος και τη μετάδοσή

του. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, οδηγούνται αρχικά σε έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (**Analog-to-Digital Converter – ADC**) των 16 bit (Texas Instruments ADS1115 [148]). Στη συνέχεια, οδηγούνται στον μικροελεγκτή (Atmel ATmega328P) που βρίσκεται σε ένα Arduino Nano και ο οποίος αναλαμβάνει την επεξεργασία και τη μετάδοση της πληροφορίας, μέσω δύο συστημάτων επικοινωνίας: Μέσω Bluetooth (HC-05), σε οποιαδήποτε συμβατή συσκευή (π.χ. κινητό τηλέφωνο, υπολογιστής κ.λπ.) και μέσω ραδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τη συχνότητα των 2.4GHz (nRF24L01), στη δεύτερη συσκευή, που αποτελεί τον δέκτη. Κύριο πλεονέκτημα της επικοινωνίας μέσω Bluetooth είναι η ευρεία συμβατότητα με πολλές συσκευές, ενώ πλεονέκτημα της επικοινωνίας μέσω ραδιοσυχνοτήτων είναι η μεγαλύτερη εμβέλεια, που φθάνει τα 100m σε ανοικτό χώρο. Η συνδεσμολογία των μερών της συσκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.52:

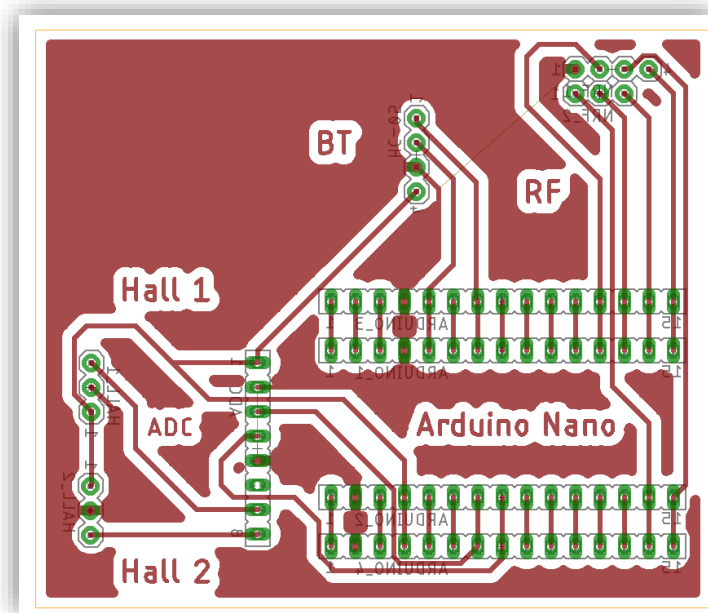


Σχήμα 3.52: Σύνδεση μερών συσκευής μέτρησης και εκπομπής.

Για τη βέλτιστη σύνδεση των παραπάνω εξαρτημάτων, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ηλεκτρονική πλακέτα PCB, τα σχέδια της οποίας παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



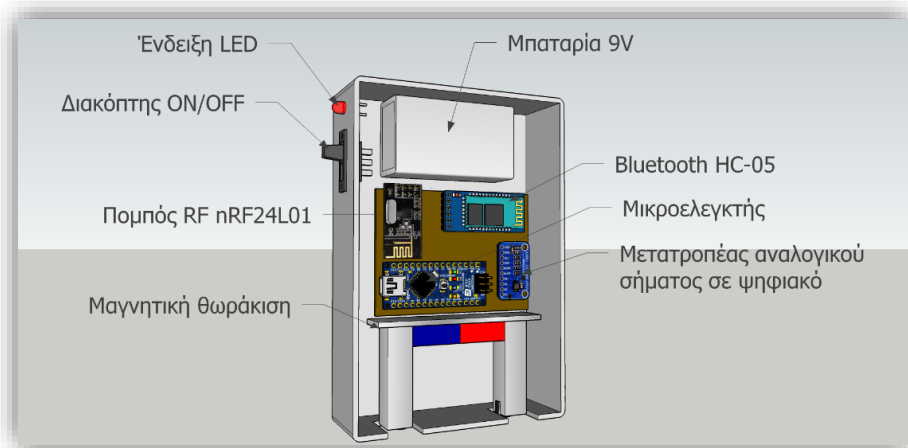
Σχήμα 3.53: Συνολικό διάγραμμα των ηλεκτρονικών μερών.



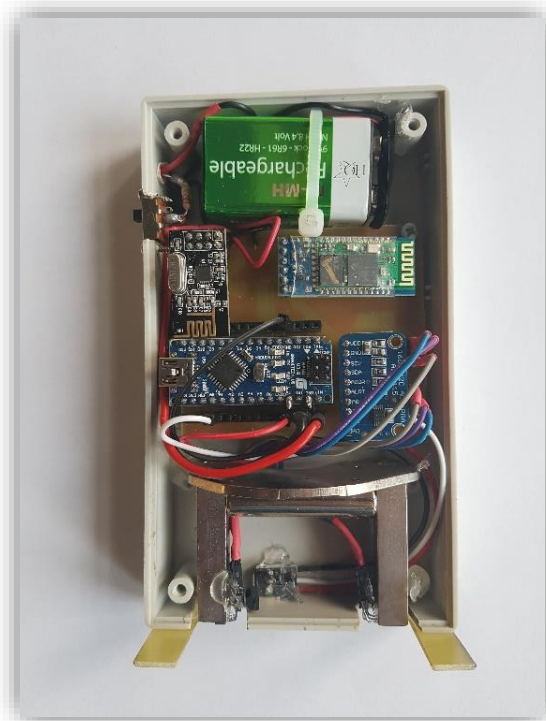
Σχήμα 3.54: Τελικό σχέδιο της ηλεκτρονικής πλακέτας.

Στη συνέχεια, όλα τα μέρη της διάταξης τοποθετήθηκαν σε πλαστικό περίβλημα. Μεταξύ του περιβλήματος και των αισθητήρων Hall δημιουργήθηκε το απαιτούμενο

διάκενο, ώστε να υφίσταται η ανέπαφη διεξαγωγή των μετρήσεων, η οποία προστατεύει τους αισθητήρες από τις μηχανικές φθορές. Τέλος, τοποθετήθηκε επαναφορτιζόμενη μπαταρία των 9V για την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η σχεδίαση της συνολικής διάταξης, καθώς και η εικόνα της τελικής συσκευής, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



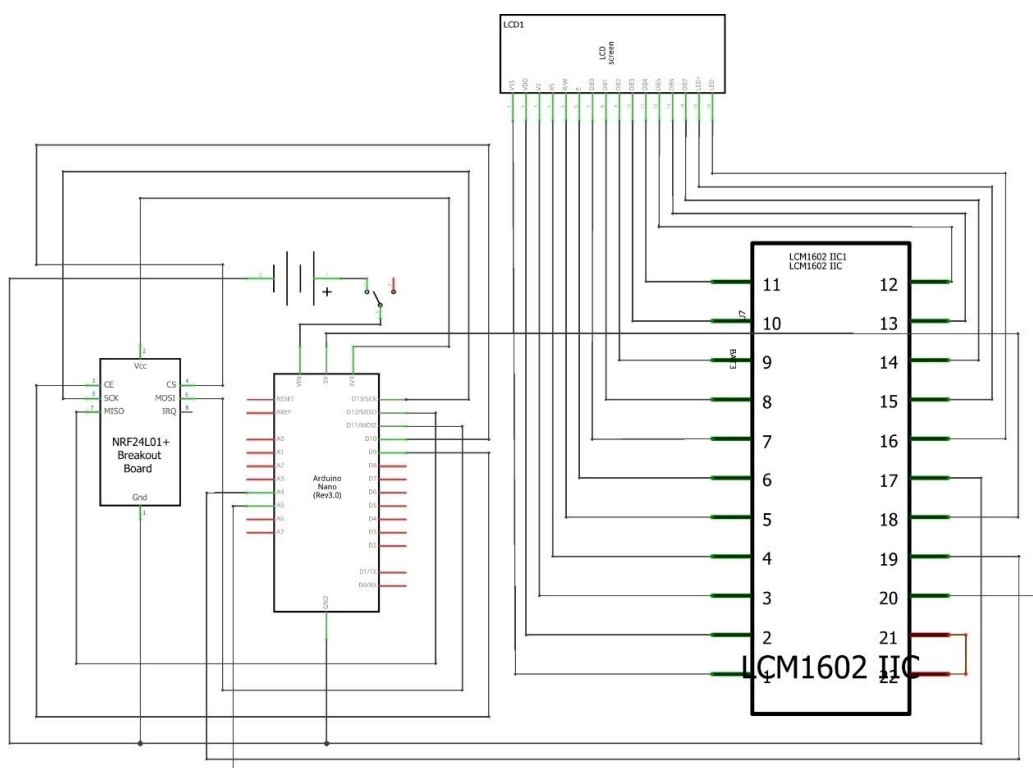
Σχήμα 3.55: Η διάταξη της τελικής συσκευής μέτρησης και εκπομπής.



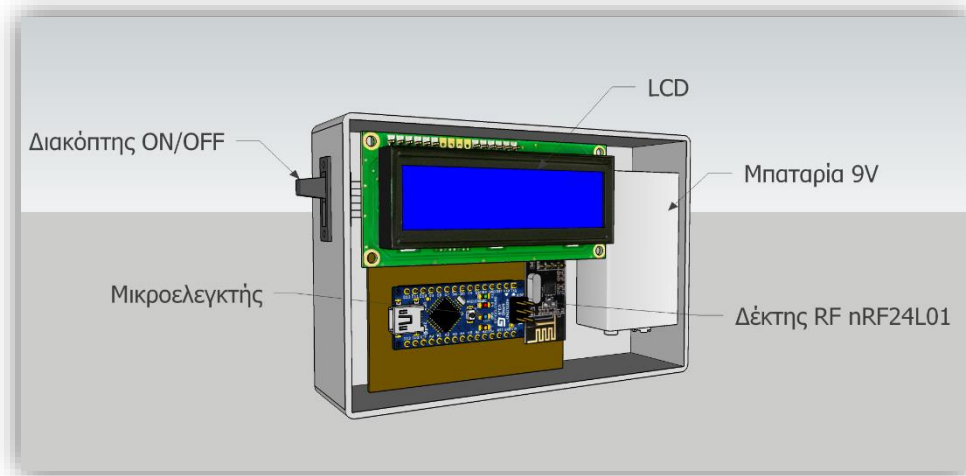
Σχήμα 3.56: Η τελική συσκευή μέτρησης και εκπομπής.

3.5.4.2 Κατασκευή δέκτη

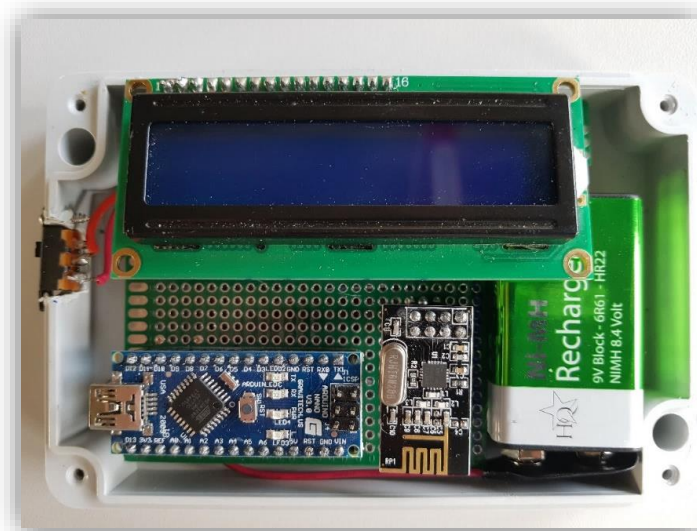
Η δεύτερη συσκευή, που αναλαμβάνει τον ρόλο του δέκτη στην περίπτωση της επικοινωνίας μέσω ραδιοσυχνοτήτων, περιλαμβάνει έναν δέκτη ραδιοσυχνοτήτων (nRF24L01), έναν μικροελεγκτή (Atmel ATmega328P), μία οθόνη LCD 16x2 που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας I²C και μία μπαταρία 9V για την τροφοδοσία αυτών των ηλεκτρονικών. Το μεταδιδόμενο σήμα λαμβάνεται από τον δέκτη ραδιοσυχνοτήτων και μέσω του μικροελεγκτή, εμφανίζεται στην οθόνη. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της διάταξης του δέκτη, η σχεδιάσή του, καθώς και η τελική εικόνα της συσκευής:



Σχήμα 3.57: Σύνδεση μερών συσκευής λήψης.



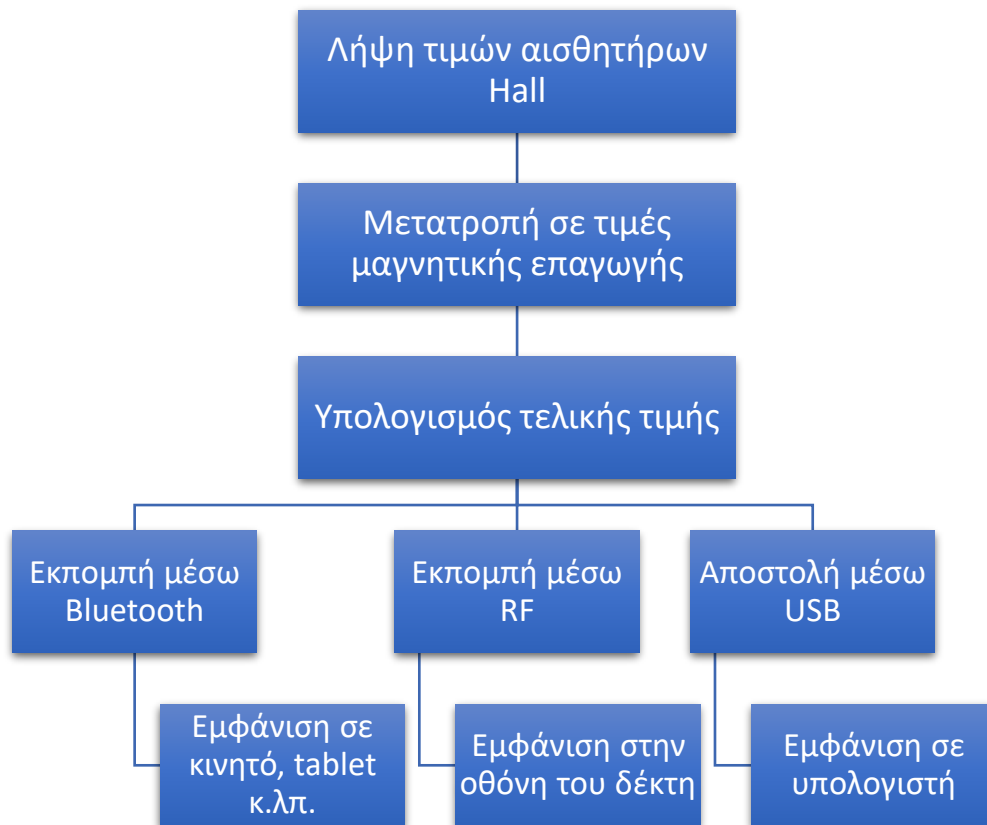
Σχήμα 3.58: Η διάταξη της τελικής συσκευής λήψης.



Σχήμα 3.59: Η τελική συσκευή λήψης.

3.5.5 Ανάπτυξη αλγορίθμων

Παρακάτω παρατίθενται οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για τη λειτουργία του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα, μαζί με τον απαιτούμενο σχολιασμό για την επεξήγηση της λειτουργίας τους. Οι κώδικες έχουν γραφεί στη γλώσσα προγραμματισμού C++. Στο Σχήμα 3.60 παρουσιάζεται η γενική λειτουργία των αλγορίθμων:



Σχήμα 3.60: Τα στάδια των αλγορίθμων.

3.5.5.1 Αλγόριθμος πομπού

Αρχικά, παρατίθενται οι συνδέσεις των διαφόρων ηλεκτρονικών μερών της συσκευής σε μορφή σχολίων:

```

/* =====
Hall sensor: SS49E
5V, GND, Aout: A0, A1
-----

16-bit ADC: ADS1115
VDD: 5V, GND, SCL: A5, SDA: A4, ADDR: GND, A0: Hall_1, A1:
Hall_2
-----

RF Transmitter: nRF24L01
Vcc: 3.3V, GND, CE: D9, CSN: D10, MOSI: D11, MISO: D12. SCK:
D13
-----

BT Transmitter: HC-05
  
```

```
Vcc: D5, GND, TX: D2, RX: D4
```

```
=====
*/
```

Στη συνέχεια, εισάγονται οι βιβλιοθήκες που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της συσκευής και αρχικοποιούνται κάποιες καθολικές μεταβλητές που είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς, για τον ψηφιοποιητή, για την ραδιοεπικοινωνία και για την επικοινωνία με Bluetooth:

```
#include "VirtuinoBluetooth.h"
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>

Adafruit_ADS1015 ads;

SoftwareSerial bluetoothSerial = SoftwareSerial(2, 4);
VirtuinoBluetooth virtuino(bluetoothSerial);

int BLpin = 5;
int bat_voltage;
float v_zero_field = bat_voltage / 2;
float offset1_value;
float offset2_value;
float magn;
boolean executed = false;

RF24 radio(9, 10);
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;
```

Για τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στους υπολογισμούς του μαγνητικού πεδίου βάσει των λαμβανόμενων τιμών, δημιουργήθηκε μία συνάρτηση που δέχεται το εύρος των πιθανών τιμών του αισθητήρα και της τάσης εξόδου στις οποίες αντιστοιχεί. Με αυτά τα δεδομένα, καταμερίζει οποιαδήποτε τάση εισόδου που

ανήκει σε αυτό το εύρος, στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους στην οποία αντιστοιχεί:

```
float mapf(float x, float in_min, float in_max, float out_min,
float out_max)
{
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min)
+ out_min;
}
```

Στο επόμενο τμήμα του κώδικα, ορίζονται οι εντολές που εκτελούνται κατά την εκκίνηση της συσκευής. Πιο συγκεκριμένα, η συσκευή ξεκινά με απενεργοποιημένο το Bluetooth για περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης, ορίζεται η σειριακή επικοινωνία και η επικοινωνία μέσω Bluetooth στα 9600bps, η επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων στα 250kbps και τέλος, ξεκινά η επικοινωνία με τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό:

```
void setup() {
  virtuino.DEBUG = true;
  bluetoothSerial.begin(9600);
  pinMode(BLpin, OUTPUT);
  digitalWrite(BLpin, LOW);

  Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  radio.setChannel(115);
  radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
  radio.openWritingPipe(pipe);
  ads.begin();
}
```

Το επόμενο τμήμα του κώδικα είναι εκείνο που θα εκτελείται συνεχώς, για όσο διάστημα τροφοδοτείται η συσκευή. Αρχικά, καλείται η συνάρτηση readVcc(), η οποία ελέγχει την κατάσταση της μπαταρίας, καθώς μειωμένη τάση τροφοδοσίας θα οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις. Εάν η τάση της μπαταρίας είναι ικανοποιητική, τότε λαμβάνονται οι τιμές που μετρούν οι δύο αισθητήρες Hall. Οι τιμές που θα

ληφθούν κατά την πρώτη εκτέλεση του κώδικα θα χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς για το υπάρχον επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιείται μία αυτόματη βαθμονόμηση της συσκευής στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας:

```
void loop()
{
  bat_voltage = readVcc();
  if (bat_voltage > 4000) {
    int16_t adc0, adc1;
    adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
    adc1 = ads.readADC_SingleEnded(1);

    if (executed == false) {
      offset1_value = adc0;
      offset2_value = adc1;
      executed = true;
    }
  }
}
```

Έπειτα, υπολογίζονται οι μετρούμενες τιμές μαγνητικής επαγωγής από τους δύο αισθητήρες και εξάγεται ο μέσος όρος σε mT. Τελικά, τα αποτελέσματα μεταδίδονται ασύρματα είτε στον δέκτη, είτε σε κάποια συσκευή συμβατή με το πρωτόκολλο Bluetooth:

```
float min1_value = 1000 * offset1_value / v_zero_field;
float max1_value = 4000 * offset1_value / v_zero_field;
float min2_value = 1000 * offset2_value / v_zero_field;
float max2_value = 4000 * offset2_value / v_zero_field;

float sensor1Value = adc0;
float magn1 = mapf(sensor1Value, min1_value, max1_value, -
100.0, 100.0);

float sensor2Value = adc1;
float magn2 = mapf(sensor2Value, min2_value, max2_value, -
100.0, 100.0);

magn = magn2 - magn1;

Serial.print(bat_voltage);
```

```

Serial.println(" mV");
Serial.print("RAW value 1: ");
Serial.print(sensor1Value);
Serial.print("\t Magn 1: ");
Serial.print(magn1);
Serial.println(" mT");
Serial.print("RAW value 2: ");
Serial.print(sensor2Value);
Serial.print("\t Magn 2: ");
Serial.print(magn2);
Serial.println(" mT");
Serial.println(magn);
delay(500);
radio.write(&magn, sizeof(magn));

```

Η ενεργοποίηση του Bluetooth πραγματοποιείται μέσω της σειριακής επικοινωνίας και συγκεκριμένα, εάν αποσταλεί κάποιος από τους χαρακτήρες H, h ή 1. Αντιστοίχως, το Bluetooth απενεργοποιείται με την αποστολή των χαρακτήρων L, l ή 0. Τέλος, στην περίπτωση που η τάση της μπαταρίας μειωθεί κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα, έχει οριστεί να αποσταλεί στον δέκτη η τιμή -9999, ως μια ακραία τιμή που θα υποδείξει ότι πρέπει να εμφανιστεί μήνυμα σφάλματος:

```

if (Serial.available() > 0) {
int incomingByte = Serial.read();
if (incomingByte == 'H' || incomingByte == 'h' ||
incomingByte == '1') {
digitalWrite(BLpin, HIGH);
virtuino.run();
virtuino.vMemoryWrite(0, magn);
}
if (incomingByte == 'L' || incomingByte == 'l' ||
incomingByte == '0') {
digitalWrite(BLpin, LOW);
}
}

```

```

delay(300);
}
else {
Serial.println("Low battery!");
magn = -9999;
radio.write(&magn, sizeof(magn));
delay(300);
}
}

```

Παρακάτω παρουσιάζεται η συνάρτηση readVcc(), η οποία αναλαμβάνει τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται έλεγχος της τιμής που αποδίδει ο ενσωματωμένος μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, για την τάση αναφοράς του 1.1V του ακροδέκτη AREF του μικροελεγκτή. Εάν αυτή η τιμή είναι λανθασμένη, υποδηλώνεται ότι η τάση τροφοδοσίας της συσκευής έχει μειωθεί:

```

long readVcc() {
ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) |
_BV(MUX1);
delay(2);
ADCSRA |= _BV(ADSC);
while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC));
uint8_t low = ADCL;
uint8_t high = ADCH;

long result = (high << 8) | low;
result = 1125300L / result;
return result;
}

```

Ο συνολικός αλγόριθμος του πομπού παρατίθεται στο Παράρτημα (Ενότητα 6.3).

3.5.5.2 Αλγόριθμος δέκτη

Αρχικά, όπως και προηγουμένως, καταγράφονται οι συνδέσεις των διαφόρων ηλεκτρονικών μερών της συσκευής, εισάγονται οι απαιτούμενες βιβλιοθήκες και αρχικοποιούνται ορισμένες μεταβλητές:

```

/*
-----
RF Receiver: nRF24L01
Vcc: 3.3V, GND, CE: D9, CSN: D10, MOSI: D11, MISO: D12. SCK:
D13
----- LCD
I2C 16x2
Vcc: 5V, GND, SDA: A4, SCL: A5
-----
*/
//=====Libraries=====
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <LcdBarGraphX.h>
float magn = 0.0;

//=====LCD=====
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
LcdBarGraphX lbg(&lcd, 16, 0, 1);

//=====nRF24=====
RF24 radio(9, 10);
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;

```

Στη συνέχεια, ορίζεται η θέση του δείκτη στην οθόνη και ξεκινά η ασύρματη επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων, με ρυθμίσεις όμοιες με αυτές του πομπού. Κατά την πρώτη εκκίνηση, η συσκευή αναμένει για 3 δευτερόλεπτα, ώστε να εκτελεστεί η αυτόματη βαθμονόμηση του αισθητήρα:

```

void setup(void)
{
//=====LCD=====
lcd.begin(16, 2);
lcd.setCursor(5, 0);
//=====nRF24=====
radio.begin();
radio.setChannel(115);
radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);

```

```

radio.setDataRate( RF24_250KBPS ) ;
radio.openReadingPipe(1, pipe);
radio.startListening();

Serial.begin(9600);
Serial.println("Starting Measurement.....");

lcd.print("Auto");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print("Calibration.");
delay(1000);
lcd.setCursor(14, 1);
lcd.print(".");
delay(1000);
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(".");
delay(1000);
lcd.clear();
}

```

Στο επόμενο τμήμα του κώδικα, ορίζεται ο τρόπος λήψης και εμφάνισης των αποτελεσμάτων στην οθόνη. Συγκεκριμένα, εμφανίζεται η διαφορά μεταξύ των τιμών μαγνητικής επαγωγής που μετρούν οι δύο αισθητήρες, σε mT. Εάν ληφθεί η τιμή -9999, θα εμφανιστεί μήνυμα σφάλματος, που θα υποδεικνύει χαμηλή τάση τροφοδοσίας. Ομοίως, εάν δεν ληφθεί σήμα από τον πομπό, θα εμφανιστεί αντίστοιχο μήνυμα σφάλματος στην οθόνη:

```

void loop(void)
{
  for (int i = 0; i < 16; ++i)
  {
    lcd.setCursor(i, 0);
    lcd.write(' ');
  }

  if (radio.available()) {
    radio.read(&magn, sizeof(magn));
    if (magn == -9999) {
      Serial.println("Low transmitter battery!");
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Low transmitter");
      lcd.setCursor(4, 1);
      lcd.print("battery!");
      delay(1000);
    }
    else {
      Serial.print("Magn : ");

```



```
Serial.print(magn);  
Serial.println(" mT");  
  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Diff=");  
lcd.setCursor(5, 0);  
lcd.print(magn, 3);  
lcd.print(" mT");  
  
lcd.setCursor(0, 1);  
lbg.drawValue(abs(magn), 100);  
  
delay(1000);  
}  
}  
else {  
Serial.println("No signal!");  
lcd.setCursor(4, 0);  
lcd.print("No signal!");  
delay(1000);  
}  
}
```

Ο συνολικός αλγόριθμος του δέκτη παρατίθεται στο Παράρτημα (Ενότητα 6.4).

Όπως έχει αναφερθεί, ο δεύτερος τρόπος μετάδοσης της πληροφορίας βασίζεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth. Γί αυτόν τον σκοπό, αναπτύχθηκε ένα γραφικό περιβάλλον για συσκευές που χρησιμοποιούν το λειτουργικό σύστημα Android, μέσω της εφαρμογής Virtuino. Αφού πραγματοποιηθεί ζεύξη του κινητού τηλεφώνου που εκτελεί την εφαρμογή, με τον πομπό Bluetooth της αναπτυχθείσας συσκευής, τα δεδομένα απεικονίζονται μέσω γραφικών στοιχείων στην οθόνη της συνδεδεμένης συσκευής.

Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής που σχεδιάστηκε, απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.61: Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής.

3.5.6 Διεξαγωγή μετρήσεων

Όπως προαναφέρθηκε, η αρχή λειτουργίας της διάταξης βασίζεται στη δημιουργία ενός κλειστού κυκλώματος μαγνητικής ροής, υπό την επίδραση ενός μόνιμου μαγνήτη. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που διαδίδεται μέσω του υλικού και συνεπώς, η εξαγωγή συμπεράσματος για την τιμή της μαγνητικής του διαπερατότητας. Στη συνέχεια, μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης, η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας μπορεί να συσχετιστεί με την κατάσταση του υπό εξέταση υλικού, καθώς και με την επιβολή μηχανικών τάσεων σε αυτό.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι δύο συσκευές της διάταξης. Η συσκευή λήψης μέτρησης (δεξιά) τοποθετείται επάνω στο υπό εξέταση φερρομαγνητικό υλικό. Διατηρώντας σταθερό το διάκενο μεταξύ των αισθητήρων Hall και του δοκιμίου, λαμβάνονται μετρήσεις μαγνητικής επαγωγής σε διαφορετικά σημεία. Η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων των δύο αισθητήρων εμφανίζεται στην οθόνη της

δεύτερης συσκευής (αριστερά) ή και αποστέλλεται μέσω του Bluetooth σε κάποια συμβατή συσκευή.



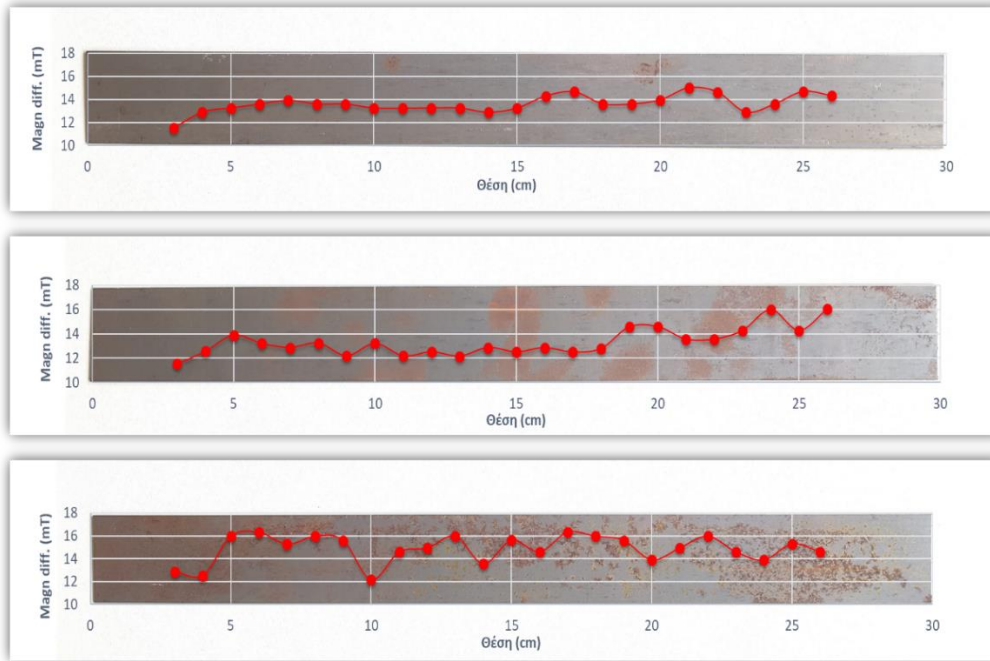
Σχήμα 3.62: Συνολική εικόνα της διάταξης κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων.

Για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας της διάταξης, πραγματοποιήθηκαν δύο είδη μετρήσεων σε φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα. Το πρώτο είδος μέτρησης αφορούσε στον προσδιορισμό μεταβολών στην επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα των δειγμάτων, ενώ το δεύτερο αφορούσε στην ανίχνευση των επιβαλλόμενων μηχανικών τάσεων στο υλικό.

3.5.7 Αποτελέσματα

3.5.7.1 Προσδιορισμός επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας

Για τον προσδιορισμό της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια, διαστάσεων $300 \times 34 \times 0.6 \text{ mm}^3$, τα οποία παρουσίαζαν διαφορετικό βαθμό επιφανειακής οξείδωσης. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του κάθε δοκιμίου για τη λήψη διαδοχικών μετρήσεων μαγνητικής επαγωγής κατά το μήκος του, ανά 10mm. Στο Σχήμα 3.63 παρουσιάζονται οι μετρήσεις, όπως αυτές ελήφθησαν ανά δοκίμιο.



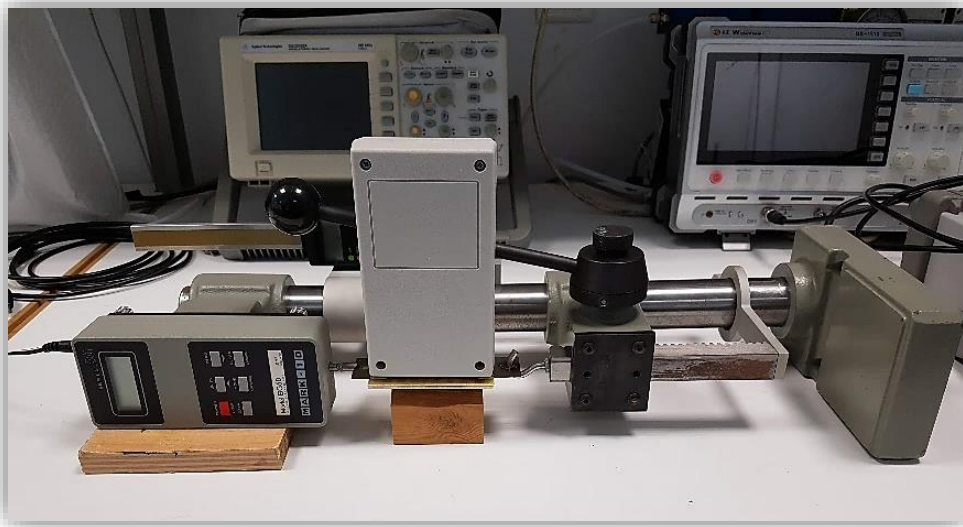
Σχήμα 3.63: Αποτελέσματα μετρήσεων μαγνητικής επαγωγής τριών δοκιμίων.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, στο καθένα από τα οποία παρουσιάζεται το αντίστοιχο δοκίμιο και η αντίστοιχη θέση μέτρησης, οι μεγαλύτερες διαφορές μαγνητικής επαγωγής που μετρήθηκαν από τους αισθητήρες Hall προέκυψαν στο τρίτο δοκίμιο, του οποίου ο βαθμός οξείδωσης ήταν μεγαλύτερος. Γενικότερα, παρατηρείται ότι τα σημεία ύπαρξης οξείδωσης και των τριών δοκιμίων, γίνονται εμφανή μέσω των μετρήσεων. Αυτό το αποτέλεσμα είναι και το αναμενόμενο, καθώς η μείωση της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας στα συγκεκριμένα οξειδωμένα σημεία οδηγεί στη μείωση της μαγνητικής ροής που διαρρέει το υλικό και συνεπώς στην αύξηση της μαγνητικής επαγωγής που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες Hall, λόγω του μόνιμου μαγνήτη.

3.5.7.2 Μετρήσεις μηχανικών τάσεων

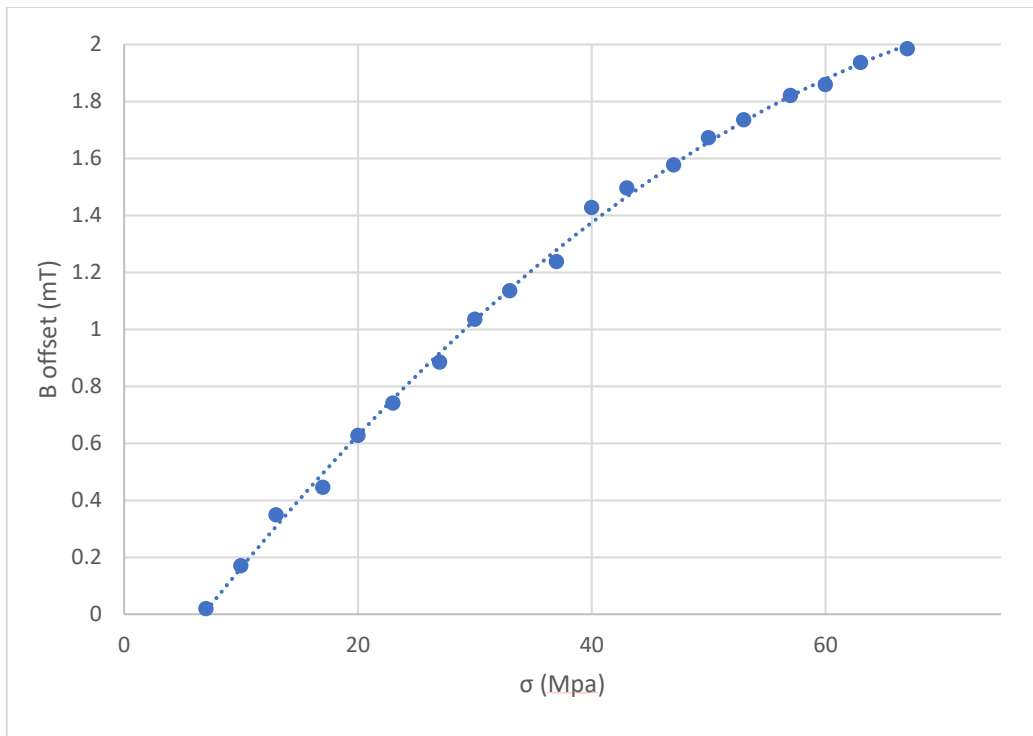
Για το δεύτερο είδος μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη επιβολής θλιπτικών ή εφελκυστικών τάσεων στα υπό εξέταση δοκίμια. Και σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα που αναπτύχθηκε, είναι δυνατή η μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής και τελικά, ο συσχετισμός των μεταβολών της με την επιβολή μηχανικών τάσεων στο εξεταζόμενο υλικό.

Για την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα, διαστάσεων $110 \times 34 \times 0.6 \text{ mm}^3$, τα οποία τοποθετήθηκαν στη μηχανή θλίψης/εφελκυσμού. Στο άκρο της συγκεκριμένης μηχανής τοποθετήθηκε ένα δυναμόμετρο, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση των επιβαλλόμενων μηχανικών τάσεων, καθώς και την ανίχνευση του είδους τους. Τέλος, πάνω στο υπό εξέταση δοκίμιο τοποθετήθηκε η αναπτυχθείσα συσκευή μέτρησης. Η συνολική διάταξη μέτρησης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

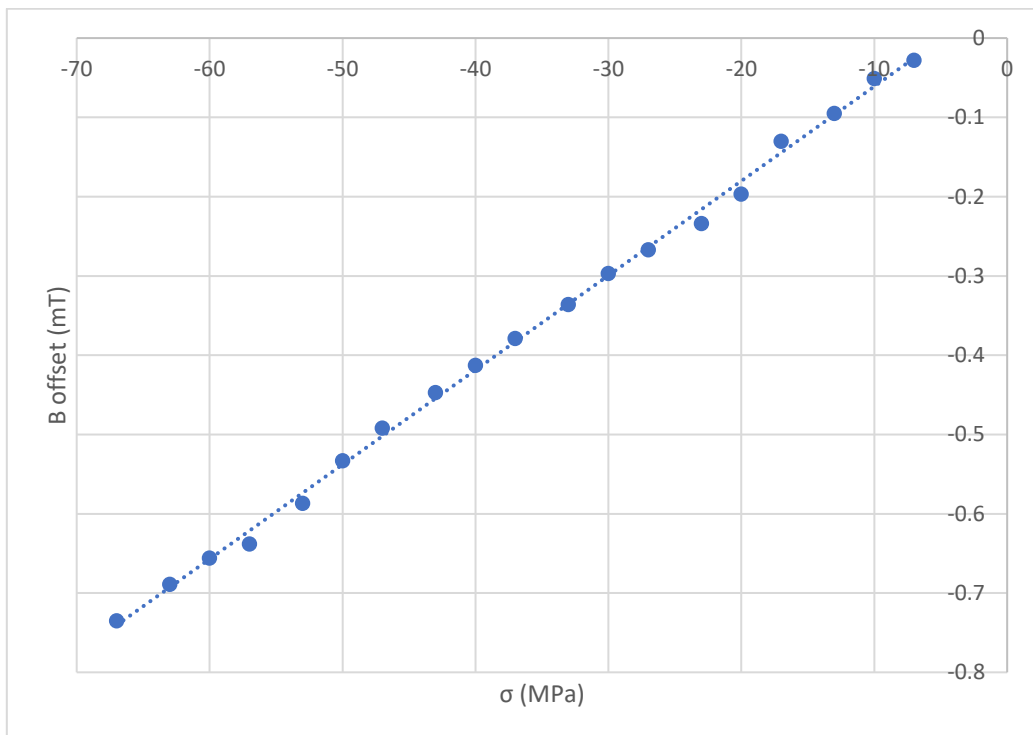


Σχήμα 3.64: Η διάταξη μέτρησης μηχανικών τάσεων.

Για συγκεκριμένες τιμές μηχανικής τάσης που ασκήθηκε ελεγχόμενα στο υπό εξέταση δοκίμιο, κατεγράφη η διαφορά μαγνητικής επαγωγής, όπως αυτή μετρήθηκε μέσω του αισθητήρα. Η λειτουργία της αυτόματης βαθμονόμησης της συσκευής προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης μόνο των τιμών μαγνητικής επαγωγής που οφείλονται στην επιβολή των μηχανικών τάσεων στο υλικό, οι οποίες και παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα που προέκυψαν για διάφορες τιμές ασκούμενης μηχανικής τάσης.



Σχήμα 3.65: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και εφελκυστικών τάσεων.



Σχήμα 3.66: Σχέση μαγνητικής επαγωγής και θλιπτικών τάσεων.

Ο οριζόντιος άξονας των παραπάνω διαγραμμάτων εκφράζει την επιβαλλόμενη εφελκυστική ή θλιπτική μηχανική τάση, όπως αυτή κατεγράφη από το δυναμόμετρο,

ενώ ο κάθετος άξονας εκφράζει τη μεταβολή των τιμών της μαγνητικής επαγωγής, όπως αυτή μετράται από τους αισθητήρες. Και σε αυτήν την περίπτωση, τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα. Η διάταξη μέτρησης αντιλαμβάνεται επιτυχώς τις μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής, κάτι που σχετίζεται με την επιβολή μηχανικών τάσεων. Η ανίχνευση του είδους της επιβαλλόμενης τάσης (εφελκυστικής ή θλιπτικής) είναι, επίσης, δυνατή, εξετάζοντας το πρόσημο της μαγνητικής επαγωγής, κάτι που οφείλεται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής των υλικών, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 1.

3.5.8 Ανάπτυξη διάταξης συγκομιδής ενέργειας

3.5.8.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί, στόχος μας συσκευής όπως είναι η αναπτυχθείσα, είναι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον επί τόπου έλεγχο των υλικών ή και για τη συνεχή παρακολούθησή τους. Αυτός ο δεύτερος τρόπος χρήσης προϋποθέτει την ελάχιστη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση της συσκευής. Αυτό είναι εφικτό σε έναν βαθμό μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και μικροελεγκτών με δυνατότητες εισόδου σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό κυρίως στην περίπτωση του περιοδικού ελέγχου των υλικών. Έτσι, στο χρονικό διάστημα μεταξύ της διεξαγωγής μετρήσεων, η συσκευή θα καταναλώνει αμελητέα ενέργεια.

Όμως, ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, είναι ο τρόπος επικοινωνίας της συσκευής με τον χρησιμοποιούμενο δέκτη. Τα δεδομένα των μετρήσεων που λαμβάνονται από τη συσκευή μπορούν να αποσταλούν είτε ενσύρματα, είτε ασύρματα. Επειδή δεν είναι δυνατή η χρήση ή η τοποθέτηση καλωδίων σε πολλές εφαρμογές, η ασύρματη επικοινωνία κρίνεται απαραίτητη. Το βέλτιστο πρωτόκολλο επικοινωνίας πρέπει να επιλεγεί ανά περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψιν το εκάστοτε περιβάλλον λειτουργίας, τις ιδιομορφίες του και τη μέγιστη απόσταση επικοινωνίας. Στην περίπτωση που τοποθετηθούν πολλές διατάξεις μέτρησης, κρίνεται ιδανικότερη η χρήση δικτύων επικοινωνίας τύπου πλέγματος

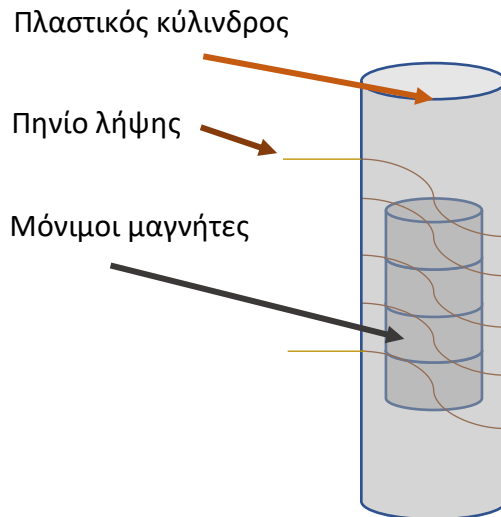
(mesh), τα οποία επιτρέπουν την τοπική επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων, με αποτέλεσμα ο καθένας να αποτελεί έναν αναμεταδότη των δεδομένων.

Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο να αναπτυχθούν συσκευές που θα είναι ενεργειακά αυτόνομες. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούν να λειτουργούν χωρίς να βασίζονται στη χρήση κάποιας πηγής ενέργειας, αλλά αντίθετα να παράγουν την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία τους και για τη μετάδοση των δεδομένων. Βάσει αυτής της λογικής, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές αξιοποίησης των εκάστοτε συνθηκών, με σκοπό τη συγκομιδή ενέργειας (energy harvesting). Χαρακτηριστικά παραδείγματα για την περίπτωση των αισθητήρων αποτελούν η αξιοποίηση του πιεζοηλεκτρισμού, του φωτός, του θερμοηλεκτρισμού, των κραδασμών, του μαγνητισμού και των ραδιοσυχνοτήτων. Μάλιστα, έχουν αναπτυχθεί και εμπορικά ηλεκτρονικά, τα οποία λαμβάνουν ενέργεια αθροιστικά, από περισσότερες της μίας από τις παραπάνω πηγές.

3.5.8.2 Ανάπτυξη διάταξης

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης διάταξης και με βάση τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας της (σε μεταφορικά μέσα ή στη βιομηχανία), κρίθηκε χρησιμότερη η αξιοποίηση των κραδασμών, σε συνδυασμό με τον μαγνητισμό. Έτσι, η προτεινόμενη διάταξη αποτελείται από έναν πλαστικό κύλινδρο, πάνω στον οποίο τυλίγεται ένα πηνίο, ενώ στο εσωτερικό του κυλίνδρου τοποθετούνται μαγνήτες. Υπό την επίδραση κραδασμών, οι μαγνήτες κινούνται παλινδρομικά στο εσωτερικό του κυλίνδρου, κατά την επιτρεπτή διεύθυνση. Αυτή η κίνησή τους έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας τάσης στα άκρα του πηνίου, βάσει του νόμου του Faraday. Συνεπώς, αποτέλεσμα της λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης είναι η συγκομιδή ενέργειας που παράγεται λόγω των κραδασμών που αυτή δέχεται.

Στο Σχήμα 3.67 παρουσιάζεται ένα σχέδιο της προτεινόμενης διάταξης:



Σχήμα 3.67: Σχέδιο διάταξης συγκομιδής ενέργειας.

Η προτεινόμενη διάταξη κατασκευάστηκε με σκοπό την επαλήθευση της αρχής λειτουργίας της. Χρησιμοποιήθηκε ένας πλαστικός σωλήνας μήκους 60mm και διαμέτρου 8mm, γύρω από τον οποίο τυλίχθηκε ένα πηνίο 150 περιελίξεων, σύρματος χαλκού διαμέτρου 0.5mm. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου τοποθετήθηκαν 4 κυλινδρικοί μαγνήτες νεοδυμίου, διαμέτρου 6mm και μήκους 3mm.

Στη συνέχεια, η διάταξη τοποθετήθηκε σε μία συσκευή παραγωγής κραδασμών ρυθμιζόμενης συχνότητας και έντασης, ενώ με τη βοήθεια ενός πολυμέτρου μετρήθηκε η τάση στα άκρα μιας αντίστασης που είχε συνδεθεί στο πηνίο, ώστε να αποτελέσει το φορτίο.

Μετά από πειραματικές δοκιμές, βρέθηκε ότι η υψηλότερη τιμή τάσης προκύπτει για συχνότητα $f = 10Hz$ και ήταν ίση με $V_{RMS} = 100mV$.

Επομένως, η μέγιστη τάση είναι:

$$V = V_{RMS} \cdot 1.414 = 141.4mV \quad (3.7)$$

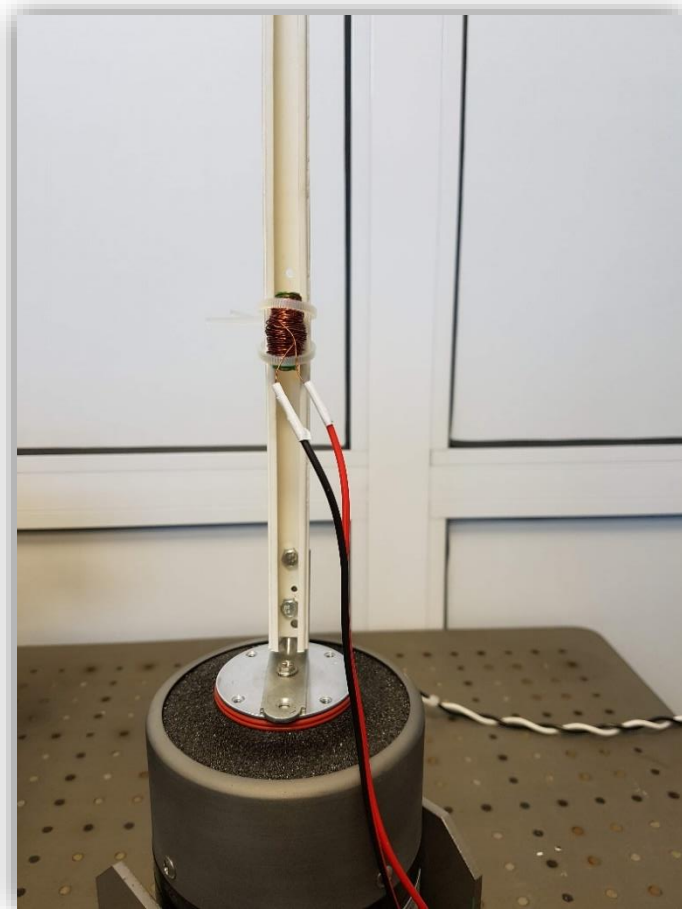
Η τιμή της συνολικής αντίστασης της διάταξης μετρήθηκε μέσω ενός πολυμέτρου ακριβείας και ήταν ίση με $R = 0.67\Omega$. Αντιστοίχως, μετρήθηκε η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου και ήταν ίση με $L = 465\mu H$. Συνεπώς, η συνολική εμπέδηση της διάταξης προκύπτει ίση με:

$$Z = R + 2\pi fL = 0.67 + 2\pi \cdot 10 \cdot 465 \times 10^{-6} = 0.70\Omega \quad (3.8)$$

Άρα, η τιμή της παραγόμενης ισχύος είναι:

$$P = \frac{V^2}{Z} = \frac{(141.4 \times 10^{-3})^2}{0.7} = 28.56mW \quad (3.9)$$

Στο Σχήμα 3.68 παρουσιάζεται εικόνα της διάταξης:



Σχήμα 3.68: Η διάταξη συγκομιδής ενέργειας.

Προφανώς, για να είναι δυνατή η αξιοποίηση της συγκεκριμένης διάταξης σε συνδυασμό με τα ηλεκτρονικά και τους διάφορους αισθητήρες, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός ανορθωτή που θα μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, με σκοπό την φόρτιση των μέσων αποθήκευσης ενέργειας της εκάστοτε συσκευής. Παρ' όλα αυτά, οι παραπάνω δοκιμές αποτέλεσαν μια ένδειξη για την ορθή λειτουργία της διάταξης.

4

Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

4.1 Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων

Aρχικό βήμα για την ανάπτυξη και χρήση μιας διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων αποτελεί η εξάλειψη των εξωτερικώς επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων από αυτήν. Για την αποφυγή χρήσης ειδικών εγκαταστάσεων που βασίζονται στην παθητική μαγνητική θωράκιση, κρίνεται αναγκαία η χρήση διατάξεων ενεργητικής αντιστάθμισης πεδίου, οι οποίες εξαλείφουν με δυναμικό τρόπο τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, δημιουργώντας το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο για την αντιστάθμισή τους.

Συνεπώς, η χρήση των διατάξεων διακρίβωσης προϋποθέτει την ανάπτυξη των κατάλληλων τοπολογιών ανίχνευσης, οι οποίες θα προσφέρουν την επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης του μαγνητικού πεδίου. Με αυτόν τον στόχο, αναπτύχθηκε κατάλληλη τοπολογία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου, βασισμένη σε άμορφο μαγνητικό υλικό, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση των μαγνητικών του ιδιοτήτων και συγκεκριμένα της ταχείας απόκρισης στην επιβολή μαγνητικού πεδίου, καθώς και του κορεσμού του για μικρές τιμές μαγνητικού πεδίου. Τα παραπάνω

χαρακτηριστικά έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία εμφανών μεγίστων και ελαχίστων στο λαμβανόμενο σήμα.

Βάσει του μαγνητικού φαινομένου πύλης-ροής, τα συγκεκριμένα μέγιστα και ελάχιστα εκφράζουν τον κορεσμό της μαγνητικής ροής που υφίσταται στο μαγνητικό υλικό. Χρονικά ισαπέχοντα μέγιστα και ελάχιστα κατά την επιβολή εναλλασσόμενου πεδίου διέγερσης, υποδηλώνουν ότι δεν επιδρά κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στο υλικό. Αντιθέτως, η ύπαρξη χρονικής διαφοράς μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων οφείλεται στην επιβολή ενός εξωτερικού πεδίου που επιδρά στο υλικό. Η τιμή του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου μπορεί να υπολογιστεί, αν και κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο για τη λειτουργία της αναπτυχθείσας διάταξης. Ωστόσο, απαραίτητη είναι η ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης της προαναφερθείσας χρονικής διαφοράς, με σκοπό τη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης.

Συνεπώς, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ηλεκτρονικά κυκλώματα με στόχο τον εντοπισμό των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του λαμβανόμενου σήματος. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ήταν η χρήση συγκριτών τύπου Schmitt trigger, με σκοπό τη δημιουργία παλμών, η διάρκεια των οποίων θα αντιστοιχεί στη χρονική διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων. Το πρώτο ηλεκτρονικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε γι' αυτόν τον σκοπό πλεονεκτεί στην εύκολη υλοποίηση, αλλά εμφανίζει ως μειονέκτημα την απαίτηση του εξ αρχής ορισμού των τάσεων κατωφλίου που θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των μεγίστων και ελαχίστων.

Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την ανάπτυξη του δεύτερου ηλεκτρονικού κυκλώματος, το οποίο μπορεί να προσαρμόζει τις τιμές κατωφλίου του ανά περίπτωση, χωρίς να απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση τους. Η ηλεκτρονική πλακέτα που κατασκευάστηκε με το συγκεκριμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα, προσφέρει δύο εξόδους: οι παλμοί που παράγονται από την πρώτη έξοδο αντιστοιχούν τόσο στη διάρκεια, όσο και στο πλάτος του αρχικού σήματος, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω όταν αυτό είναι απαραίτητο. Οι παλμοί της δεύτερης εξόδου έχουν σταθερό πλάτος 5V και μεταβλητή διάρκεια, ώστε να είναι ευκολότερη η μέτρηση της διάρκειάς τους μέσω ενός μικροελεγκτή.

Τελικά, επελέγη η χρήση ενός μικροελεγκτή για τη μέτρηση της διάρκειας των παλμών και τον υπολογισμό της χρονικής διαφοράς τους. Για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης αναπτύχθηκε κατάλληλος αλγόριθμος, βασισμένος στον αυτόματο έλεγχο. Λαμβάνοντας ως είσοδο τη χρονική διαφορά των παλμών, υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο την τάση που πρέπει να προσφερθεί στο σύστημα αντιστάθμισης, με σκοπό τον μηδενισμό αυτής της χρονικής διαφοράς.

Η αντιστάθμιση είναι δυνατή μέσω της χρήσης κατάλληλων πηνίων που θα μπορούν να παρέχουν σε πραγματικό χρόνο το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο. Για τον σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε ένα σωληνοειδές με κατάλληλη διάταξη εισαγωγής του υπό διακρίβωση μαγνητομέτρου στο εσωτερικό του. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σωληνοειδούς είναι μη μαγνητικά, ώστε να μην επηρεάζουν τη διεξαγωγή μετρήσεων. Εκτός από το σωληνοειδές, χρησιμοποιήθηκε και ένα ζεύγος πηνίων Helmholtz. Τα συγκεκριμένα πηνία προσφέρουν τη δυνατότητα δημιουργίας ομογενούς πεδίου στο κέντρο τους, ενώ είναι εφικτή και η διεξαγωγή μετρήσεων σε αισθητήρες μεγαλύτερου μεγέθους.

Τελικά, μέσω της κατάλληλης τροφοδοσίας του συστήματος αντιστάθμισης, είναι δυνατή η εξάλειψη του εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου ή και η δημιουργία πεδίου γνωστής τιμής, με σκοπό τη διακρίβωση του εξεταζόμενου μαγνητομέτρου.

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτέλεσε ένα πρωτότυπο, με σκοπό την επαλήθευση της αρχής λειτουργίας της. Η καινοτομία της αναπτυχθείσας διάταξης έγκειται στο γεγονός ότι βασίζεται στη μέτρηση της θεμελιώδους ποσότητας του χρόνου και όχι στη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου μέσω της χρήσης ενός άλλου μαγνητομέτρου. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας συσκευές τροφοδοσίας υψηλής ακριβείας και αντίστοιχα συστήματα μέτρησης, όπως είναι τα ατομικά ρολόγια και οι αντιστάσεις βάσει του κβαντικού φαινομένου Hall, είναι δυνατή η βελτίωση της ακρίβειας της διάταξης και η αναγωγή της σε πρωτεύον πρότυπο διακρίβωσης μαγνητομέτρων.

4.2 Ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η σχεδίαση και ανάπτυξη μαγνητικών αισθητήρων διαφόρων τύπων. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες διακριβώθηκαν με χρήση της αναπτυχθείσας διάταξης διακρίβωσης.

Αρχικά, κατασκευάστηκαν δύο μαγνητικοί αισθητήρες Fluxgate. Ο πρώτος τύπος βασίστηκε στην κλασική τοπολογία, που περιλαμβάνει ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο λήψης. Η διακρίβωσή του, που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την αναπτυχθείσα διάταξη, καθώς και η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του σε σύγκριση με έναν εμπορικό αισθητήρα, απέδειξαν ότι τόσο ο αισθητήρας, όσο και η διάταξη διακρίβωσης, λειτουργούν με τον αναμενόμενο τρόπο.

Παρ' όλα αυτά, για τη βελτίωση της ευαισθησίας του μαγνητομέτρου, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ένας δεύτερος τύπος αισθητήρα Fluxgate, ο οποίος περιλαμβάνει δύο πηνία διέγερσης συνδεδεμένα σε σειρά και τοποθετημένα παράλληλα. Γύρω από αυτά τυλίγεται ένα πηνίο λήψης. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας αποτελεί η αυξημένη ευαισθησία, αφού το πηνίο λήψης ανιχνεύει μόνο το σήμα που επιβάλλεται από τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, χωρίς να επηρεάζεται από τα σήματα διέγερσης των δύο πηνίων, τα οποία αλληλοαναιρούνται.

Για τη διακρίβωση αυτού του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος πηνίων Helmholtz. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαίωσαν την αυξημένη ευαισθησία του αισθητήρα και είναι συγκρίσιμα με εμπορικό μαγνητόμετρο, έχοντας ταυτόχρονα σημαντικά χαμηλότερο κόστος κατασκευής.

Για την ολοκλήρωση της κατασκευής του συγκεκριμένου αισθητήρα, σχεδιάστηκαν ηλεκτρονικά κυκλώματα για το σήμα διέγερσης, αλλά και για τη μέτρηση του σήματος εξόδου. Επίσης, δοκιμάστηκε η χρήση του αισθητήρα σε διάταξη κλειστού βρόχου, κατά την οποία το πηνίο λήψης λαμβάνει το ρόλο ανάδρασης, με σκοπό την αντιστάθμιση του εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Έτσι, πλέον το υπό μέτρηση μέγεθος είναι η ένταση ρεύματος που πρέπει να παρασχεθεί στο πηνίο λήψης, ώστε να εξαλειφθεί το μαγνητικό πεδίο που

ανιχνεύεται. Μέσω μιας τέτοιας διάταξης είναι δυνατή η αύξηση της ακρίβειας, αλλά και του εύρους μέτρησης του αισθητήρα.

Επόμενο βήμα αποτελεί η περαιτέρω βελτίωση του μαγνητομέτρου, τόσο ως προς τη σχεδιάσή του (διαφορετικό μήκος αισθητήρα, διαφορετικό υλικό πυρήνα, τοπολογία orthogonal Fluxgate κ.λπ.), όσο και ως προς τον τρόπο μέτρησης. Η αυτοματοποίηση του συστήματος ανατροφοδότησης για τη λειτουργία κλειστού βρόχου και η ανάπτυξη των απαιτούμενων ηλεκτρονικών, μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία ενός εμπορικά ανταγωνιστικού μαγνητομέτρου, με υψηλή ευαισθησία και χαμηλό κόστος.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο διατάξεις για τον Μη Καταστροφικό Έλεγχο φερρομαγνητικών υλικών. Η πρώτη διάταξη είναι ικανή να καταγράφει τον βρόχο υστέρησης των μαγνητικών υλικών, βασισμένη στη χρήση πηνίων. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από έναν μαγνητικό πυρήνα σε σχήμα «Π», στον οποίο έχουν τυλιχθεί δύο πηνία. Το ένα αποτελεί το πηνίο διέγερσης και το άλλο το πηνίο λήψης. Η τοποθέτηση του συγκεκριμένου αισθητηρίου στο υπό εξέταση υλικό δημιουργεί ένα κλειστό κύκλωμα διάδοσης της μαγνητικής ροής, η οποία δημιουργείται μέσω της τροφοδοσίας του πηνίου διέγερσης. Τελικά, μέσω κατάλληλου ηλεκτρονικού κυκλώματος που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε, ήταν δυνατή η εξαγωγή του βρόχου υστέρησης ενός υλικού, ο οποίος μπορεί να προσφέρει ένα σύνολο πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την κατάσταση του εξεταζόμενου υλικού.

Η δεύτερη διάταξη που κατασκευάστηκε επιτρέπει τον έλεγχο της κατάστασης των φερρομαγνητικών υλικών, μέσω του προσδιορισμού της μαγνητικής διαπερατότητας. Ο συσχετισμός της μαγνητικής διαπερατότητας με την επιβολή μηχανικών τάσεων και τη μελέτη των χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων, των ατελειών και γενικότερα της δομής του, καθιστά τη συγκεκριμένη διάταξη ένα χρήσιμο εργαλείο Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Η λειτουργία της βασίζεται στη χρήση ενός μόνιμου μαγνήτη για τη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου, το οποίο διαδίδεται μέσω δύο ράβδων σιδήρου στο εξεταζόμενο υλικό, το οποίο αποτελεί μέρος του μαγνητικού κυκλώματος, όπως συνέβη και στην περίπτωση της προηγούμενης διάταξης. Η μεταβολές στη μαγνητική επαγωγή που οφείλονται στη μαγνητική

διαπερατότητα του υπό εξέταση υλικού, γίνονται αντιληπτές μέσω δύο αισθητήρων Hall που έχουν τοποθετηθεί στα άκρα του αισθητηρίου. Η συγκεκριμένη συσκευή είναι φορητή και μπορεί να μεταδώσει τις μετρήσεις σε έναν δέκτη μέσω ραδιοσυχνοτήτων, ή σε οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth.

Με σκοπό την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας των δύο διατάξεων, πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικές μετρήσεις σε φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα. Οι μετρήσεις επιβεβαίωσαν την αρχή λειτουργίας, τόσο στη δημιουργία του βρόχου υστέρησης, όσο και κατά τον έλεγχο της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μηχανή εφαρμογής θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων, στην οποία τοποθετήθηκε η διάταξη αισθητήρων Hall. Από τα ληφθέντα αποτελέσματα ήταν δυνατός ο προσδιορισμός τόσο του μεγέθους, όσο και του είδους των μηχανικών τάσεων.

Συνοψίζοντας, οι δύο προτεινόμενες διατάξεις επιτρέπουν τον έλεγχο της κατάστασης των φερρομαγνητικών υλικών, καθιστώντας τις χρήσιμα εργαλεία Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Η βιβλιογραφική έρευνα υποδεικνύει ότι οι υπάρχουσες λύσεις στον συγκεκριμένο τομέα δεν καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες μέτρησης, παρακολούθησης και ελέγχου, για τις διάφορες πιθανές εφαρμογές. Η διαδικασία προετοιμασίας των υλικών, αλλά και η διεξαγωγή των μετρήσεων, αποτελούν χρονοβόρες διεργασίες, αποτρέποντας τη διεξαγωγή τους σε τακτική χρονική βάση. Αντιθέτως, οι προτεινόμενες διατάξεις προσφέρουν τη δυνατότητα της διεξαγωγής μετρήσεων με μη επεμβατικό τρόπο, πλεονεκτώντας σε πολλούς τομείς.

Η πρώτη διάταξη μπορεί να αποτελέσει μια εργαστηριακή, κυρίως, διάταξη προσφέροντας τη δυνατότητα προσαρμογής των μετρήσεων στις εκάστοτε συνθήκες, μέσω του ελέγχου του επιβαλλόμενου πεδίου διέγερσης. Το αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να απεικονιστεί ως βρόχος υστέρησης του εξεταζόμενου υλικού, με σκοπό τη εξαγωγή όλων των πληροφοριών που προκύπτουν από αυτόν.

Η δεύτερη διάταξη καλύπτει την ανάγκη για τον επί τόπου έλεγχο των υλικών στο πεδίο. Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες συσκευές μέτρησης, μπορεί να διεξάγει μετρήσεις με υψηλή ταχύτητα, χωρίς την απαίτηση για την προετοιμασία των υπό εξέταση υλικών. Η φορητότητα της συσκευής επιτρέπει την απευθείας μέτρηση σε

πραγματικό χρόνο και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η ασύρματη μετάδοση των δεδομένων στον δέκτη ή σε οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth, καθιστά εφικτή την τοποθέτηση της συσκευής σε δυσπρόσιτα σημεία, χωρίς την ανάγκη της ενσύρματης σύνδεσής της.

Συνεπώς, οι προτεινόμενες διατάξεις μπορούν να εξαλείψουν τα προβλήματα των τρεχόντων συστημάτων παρακολούθησης και ελέγχου των φερρομαγνητικών υλικών, καθώς παρουσιάζουν οφέλη σε πολλούς τομείς. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από τους αισθητήρες μπορούν να εμφανίσουν τη φθορά του υλικού. Δηλαδή, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αισθητήρες που ανιχνεύουν την καταπόνηση από τη στιγμή τοποθέτησής τους και μετά, οι μαγνητικοί αισθητήρες που βασίζονται στην παρακολούθηση της δομής του υλικού προσφέρουν το πλεονέκτημα της πληροφορίας για την καταπόνηση που εκείνο έχει δεχθεί, ακόμη και πριν από την τοποθέτηση των αισθητήρων. Σε συνδυασμό με πληροφορίες από άλλους αισθητήρες (π.χ. κραδασμών, θερμοκρασίας κ.λπ.), τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν για να προκύψει συμπέρασμα για τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια ειδικών συνθηκών και φορτίων. Επίσης, με κατάλληλες προσαρμογές, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις σε συγκεκριμένα βάθη υλικού, ώστε να ανιχνεύουν την κατάστασή του, την κόπωση και την πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών.

Ακόμη, η χαμηλού κόστους ανάπτυξη των αισθητήρων, σε συνδυασμό με την ασύρματη μετάδοση των πληροφοριών τους, παρέχει τη δυνατότητα να προστεθούν περισσότεροι αισθητήρες, δημιουργώντας ένα δίκτυο μετάδοσης της πληροφορίας, προκειμένου να επιτευχθούν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα μετρήσεων. Η έλλειψη κινούμενων μερών στους αισθητήρες εξασφαλίζει ότι η απαιτούμενη συντήρησή τους θα είναι ελάχιστη. Η έγκαιρη ενημέρωση σχετικά με πιθανή αστοχία ενός συγκεκριμένου υλικού είναι πολύ σημαντική για την πραγματοποίηση προληπτικών ενεργειών. Η γνώση της κατάστασης του υλικού μπορεί να συμβάλει στη μείωση των κινδύνων και να βοηθήσει στον καλύτερο προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης, των οποίων ο χρόνος μπορεί να μειωθεί, μέσω της αξιοποίησης των ήδη ληφθέντων δεδομένων από τις τακτικές μετρήσεις Μη Καταστροφικού Ελέγχου.

Συνεπώς, είναι εμφανής η δυνατότητα ευρείας αξιοποίησης των τελικών προϊόντων, τόσο σε εργαστηριακό επίπεδο, όσο και για επί τόπου μετρήσεις. Η εύκολη χρήση των συγκεκριμένων διατάξεων και η αξιοπιστία των μετρήσεων που προσφέρουν, τις θέτουν ιδανικές για συνεχή χρήση. Η προσάρτηση των αισθητήρων σε καίρια σημεία της υπό εξέταση δομής είναι εφικτή, λόγω του μικρού μεγέθους τους, του χαμηλού κόστους και της δυνατότητας ασύρματης επικοινωνίας. Σημαντικός παράγοντας σε όλα τα παραπάνω αποτελεί η ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών. Συσκευές μικρών διαστάσεων και χαμηλής κατανάλωσης, που περιλαμβάνουν μικροελεγκτές και προσφέρουν τη δυνατότητα λήψης, ανάλυσης, αποθήκευσης και αποστολής των δεδομένων, αποτελούν ιδανική επιλογή για τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα καταγραφής του σήματος από τους αισθητήρες, ανάλυσης των δεδομένων από τον μικροελεγκτή και τελικά, αποστολής της τελικής πληροφορίας στο κινητό τηλέφωνο ή στον υπολογιστή του χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, το κόστος της συσκευής μπορεί να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα, χωρίς κάτι τέτοιο να συνεπάγεται και τον υποβιβασμό της ποιότητάς της.

Μελλοντική εργασία, σε σχέση με τους συγκεκριμένους αισθητήρες, μπορεί να αποτελέσει η περαιτέρω χρήση τους για μετρήσεις σε διαφορετικά υλικά. Σημαντικός παράγοντας για τις μετρήσεις είναι το βάθος διείσδυσης, το οποίο μπορεί να τροποποιηθεί καταλλήλως, για τη λήψη πληροφοριών σε υλικά διαφορετικού πάχους. Η αξιοποίηση της φορητότητας των αισθητήρων θα επιτρέψει τη χρήση τους υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και την τοποθέτησή τους σε διατάξεις, με σκοπό τη συνολική μελέτη δομών φερρομαγνητικών υλικών, ως προς την κατάστασή τους και τις μηχανικές τάσεις που ασκούνται σε αυτές.

Προς αυτή την κατεύθυνση, μία ακόμη βελτίωση των διατάξεων αποτελεί η ενεργειακή αυτονομία τους, μέσω συστημάτων συγκομιδής ενέργειας (energy harvesting). Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η δημιουργία ενός δικτύου αισθητήρων που μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία της υπό εξέταση περιοχής (π.χ. μιας γραμμής παραγωγής, της γάστρας ενός πλοίου κ.λπ.) και να λαμβάνουν μετρήσεις με τον επιθυμητό ρυθμό δειγματοληψίας, χωρίς να απαιτείται

η ανθρώπινη παρέμβαση για τον τακτικό έλεγχο των αισθητήρων, την απόκτηση των μετρήσεων ή την παροχή τροφοδοσίας σε αυτούς.

Τελικός στόχος είναι η δημιουργία ενός πλήρους συστήματος, το οποίο θα περιλαμβάνει την παρακολούθηση της κατάστασης των υλικών, τον εντοπισμό ατελειών, την πρόβλεψη πιθανών σημείων αστοχίας και την επί τόπου επιδιόρθωσή τους.

5

Βιβλιογραφία

- [1] T. Rikitake, *Magnetic and Electromagnetic Shielding*. Springer Science & Business Media, 1987.
- [2] X. C. Tong, *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. CRC Press, 2016.
- [3] K. L. Kaiser, *Electromagnetic Shielding*. CRC Press, 2005.
- [4] M. Jaroszewski, S. Thomas, and A. V. Rane, *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [5] S. Celozzi, R. Araneo, and G. Lovat, *Electromagnetic Shielding*. John Wiley & Sons, 2008.
- [6] G. A. Webb, *Nuclear Magnetic Resonance*. Royal Society of Chemistry, 2009.
- [7] M. Espy, A. Matlashov, and P. Volegov, "SQUID-detected ultra-low field MRI," *J. Magn. Reson.*, vol. 229, pp. 127–141, Apr. 2013.
- [8] F. Shanehsazzadeh *et al.*, "High Tc SQUID based magnetocardiography system in unshielded environment," in *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2015, pp. 1198–1202.
- [9] Y. Adachi, D. Oyama, Y. Terazono, T. Hayashi, T. Shibuya, and S. Kawabata, "Calibration of Room Temperature Magnetic Sensor Array for Biomagnetic Measurement," *IEEE Trans. Magn.*, pp. 1–6, 2019.

-
- [10] L. H. Hemming, *Architectural Electromagnetic Shielding Handbook: A Design and Specification Guide*. John Wiley & Sons, 2000.
- [11] A. Goldman, *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*. Springer Science & Business Media, 1999.
- [12] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston, 2001.
- [13] V. Kelha, J. Pukki, R. Peltonen, A. Penttinen, R. Ilmoniemi, and J. Heino, "Design, construction, and performance of a large-volume magnetic shield," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 18, no. 1, pp. 260–270, Jan. 1982.
- [14] K. Harakawa, G. Kajiwara, K. Kazami, H. Ogata, and H. Kado, "Evaluation of a high-performance magnetically shielded room for biomagnetic measurement," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 6, pp. 5256–5260, Nov. 1996.
- [15] K. Tashiro and I. Sasada, "A low-cost magnetic shield consisting of nonoriented silicon steel," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp. 4081–4083, Oct. 2005.
- [16] S. Knappe-Grueneberg, A. Schnabel, G. Wuebbeler, and M. Burghoff, "Influence of demagnetization coil configuration on residual field in an extremely magnetically shielded room: Model and measurements," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 7, p. 07E925, Mar. 2008.
- [17] P. Sergeant, L. Dupre, and J. Melkebeek, "Active and passive magnetic shielding for stray field reduction of an induction heater with axial flux," *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 152, no. 5, pp. 1359–1364, Sep. 2005.
- [18] I. M. V. Caminiti, A. Formisano, M. C. Lupoli, and R. Martone, "A New Approach to Design Flexible Magnetic Active Shielding," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 2, pp. 791–794, Feb. 2013.
- [19] W. Sun *et al.*, "Active magnetic field canceling system," in *2013 9th International Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo)*, 2013, pp. 119–122.
- [20] J. Mazaheri, H. Kamrani, F. Sareshtedari, and M. Fardmanesh, "Active magnetic field compensation system using proton precession scalar magnetometer for

- SQUID based applications,” in *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2015, pp. 1378–1380.
- [21] T. Yamamoto, T. Sonoda, and K. Tanaka, “Active magnetic shielding with a magnetic field sensor,” in *INTERMAG Asia 2005. Digests of the IEEE International Magnetism Conference, 2005.*, 2005, pp. 1545–1546.
- [22] Y. Okazaki, S. Yanase, and N. Sugimoto, “Active magnetic shielding with magneto-impedance sensor,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 13, no. 1–4, pp. 437–440, Jan. 2001.
- [23] H. Nowak, J. Haueisen, M. Ziolkowski, F. Resmer, J. Schuler, and F. Giessler, “Active shielding in measurements of DC near biomagnetic fields,” in *2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2001, vol. 4, pp. 3277–3280 vol.4.
- [24] M. Ziolkowski and S. Gratkowski, “Active, Passive and Dynamic Shielding of Static and Low Frequency Magnetic Fields,” in *VXV International Symposium on Theoretical Engineering*, 2009, pp. 1–5.
- [25] F. Shanehsazzadeh, M. Majzoubi, N. Kalantari, and M. Fardmanesh, “Design and optimization of feedback control system for active shielding of HTS RF-SQUID based MCG,” in *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2016, pp. 457–459.
- [26] A. Mahgoub, I. Sasada, T. Takeda, and M. Shimada, “Desktop Shielding System,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 7, pp. 4124–4127, Jul. 2013.
- [27] P. Sergeant and L. Dupre, “Software control of an active magnetic shield,” *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, vol. 153, no. 1, pp. 13–21, Jan. 2006.
- [28] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity: Second Edition*. Dover Publications, 2004.
- [29] V. V. Schmidt, *The Physics of Superconductors: Introduction to Fundamentals and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.

-
- [30] Y. Nakashima, Y. Suzuki, I. Sasada, M. Shimada, and T. Takeda, "Experimental Study of the Active Compensation to a Full-Size Separate-Shell Magnetic Shield," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2318–2321, Jun. 2010.
- [31] R. M. Carmina and B. Octavian, "First-order SQUID gradiometer with electronic subtraction for magnetocardiography," in *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2012, pp. 577–580.
- [32] N. M. S. Jahed, F. Sarreshtedari, F. Forooghi, M. Fardmanesh, J. Schubert, and M. Banzet, "Comparison of noise reduction techniques in RF SQUID magnetic detection systems," in *2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2010, pp. 446–449.
- [33] K. Kobayashi, T. Murakami, and D. Oyama, "Wide dynamic range SQUID magnetometer with noise cancellation for magnetocardiogram without magnetically shielded room," in *2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*, 2015, pp. 1–1.
- [34] F. Shanehsazzadeh and M. Fardmanesh, "Low Noise Active Shield for SQUID-Based Magnetocardiography Systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 4, pp. 1–5, Jun. 2018.
- [35] S. Razmkhah, M. J. Eshraghi, F. Forooghi, F. Sarreshtedari, and M. Fardmanesh, "Fundamental mode fluxgate magnetometers for active magnetic shielding," in *2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2011, pp. 1–1.
- [36] Y. A. Polyakov, V. K. Semenov, and S. K. Tolpygo, "3D Active Demagnetization of Cold Magnetic Shields," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 724–727, Jun. 2011.
- [37] M. Ishii, S. Kurokawa, and Y. Shimada, "AC magnetic field standard for magnetometer calibrations at NMIJ," in *2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements*, 2012, pp. 488–489.
- [38] S. A. H. Tabatabaei, A. Gluhak, and R. Tafazolli, "A Fast Calibration Method for Triaxial Magnetometers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 11, pp. 2929–2937, Nov. 2013.

-
- [39] A. Zikmund and M. Janosek, "Calibration procedure for triaxial magnetometers without a compensating system or moving parts," in *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2014, pp. 473–476.
- [40] A. Zikmund, M. Janosek, M. Ulvr, and J. Kupec, "Precise Calibration Method for Triaxial Magnetometers Not Requiring Earth's Field Compensation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 5, pp. 1242–1247, May 2015.
- [41] C. C. Foster and G. H. Elkaim, "Extension of a two-step calibration methodology to include nonorthogonal sensor axes," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, no. 3, pp. 1070–1078, Jul. 2008.
- [42] E. Dorveaux, D. Vissière, A. Martin, and N. Petit, "Iterative calibration method for inertial and magnetic sensors," in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, 2009, pp. 8296–8303.
- [43] Y. Wu and W. Shi, "On Calibration of Three-Axis Magnetometer," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 11, pp. 6424–6431, Nov. 2015.
- [44] M. Kok and T. B. Schön, "Magnetometer Calibration Using Inertial Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 14, pp. 5679–5689, Jul. 2016.
- [45] H. Weinstock, *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [46] J. Clarke and A. I. Braginski, *The SQUID Handbook: Applications of SQUIDs and SQUID Systems*. John Wiley & Sons, 2006.
- [47] Y. Nakatani, T. Hayashi, Y. Miyato, and H. Itozaki, "Laser SQUID Microscope for the Evaluation of Solar Cell," *Phys. Procedia*, vol. 36, pp. 394–399, Jan. 2012.
- [48] A. L. Elrefai and I. Sasada, "Magnetic Particle Detection System Using Fluxgate Gradiometer on a Permalloy Shielding Disk," *IEEE Magn. Lett.*, vol. 7, pp. 1–4, 2016.

-
- [49] A. L. Elrefai, I. Sasada, and T. Yoshida, "Fluxgate gradiometer for magnetic nanoparticle magnetorelaxometry in unshielded environment," in *2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*, 2015, pp. 1–1.
- [50] P. Ripka, "Magnetic Sensors for Navigation and Security Applications," in *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2006, pp. VI–VI.
- [51] P. Ripka and M. Janosek, "Advances in Magnetic Field Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 10, no. 6, pp. 1108–1116, Jun. 2010.
- [52] M. Zhi, Y. Lv, L. Ji, Q. Ju, L. Tang, and D. Qiao, "Research on the electronics unit of digital fluxgate sensor," in *2016 IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC)*, 2016, pp. 1–2.
- [53] G. Musmann, *Fluxgate Magnetometers for Space Research*. BoD – Books on Demand, 2010.
- [54] E. Weiss and R. Alimi, *Low-Power and High-Sensitivity Magnetic Sensors and Systems*. Artech House, 2018.
- [55] J. L. Rasson and T. Delipetrov, *Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [56] J. A. Blackburn, *Modern Instrumentation for Scientists and Engineers*. Springer Science & Business Media, 2001.
- [57] P. Ripka, "New directions in fluxgate sensors," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 215–216, pp. 735–739, Jun. 2000.
- [58] L. C. de C. Benyosef, G. C. Stael, and M. Bochner, "Optimization of the magnetic properties of materials for fluxgate sensors," *Mater. Res.*, vol. 11, no. 2, pp. 145–149, Jun. 2008.
- [59] P. Ripka, M. Butta, M. Malatek, S. Atalay, and F. E. Atalay, "Characterisation of Magnetic Wires for Fluxgate Cores," in *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2007, pp. 2369–2372.

-
- [60] P. D. Dimitropoulos, J. N. Avaritsiotis, and E. Hristoforou, "Boosting the performance of miniature fluxgates with novel signal extraction techniques," *Sens. Actuators Phys.*, vol. 90, no. 1, pp. 56–72, May 2001.
- [61] C. Petridis, A. Ktena, E. Laskaris, P. Dimitropoulos, and E. Hristoforou, "Ni-Fe Thin Film Coated Cu Wires for Field Sensing Applications," *Sens. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 93–97, Mar. 2007.
- [62] P. Ripka, X. P. Li, and J. Fan, "Orthogonal fluxgate effect in electroplated wires," in *IEEE Sensors, 2005.*, 2005, pp. 4 pp.-.
- [63] I. Sasada and S. Harada, "Fundamental Mode Orthogonal Fluxgate Gradiometer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2014.
- [64] M. Butta and I. Sasada, "Orthogonal Fluxgate With Annealed Wire Core," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 1, pp. 62–65, Jan. 2013.
- [65] K. Goleman and I. Sasada, "High Sensitive Orthogonal Fluxgate Magnetometer Using a Metglas Ribbon," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 3276–3278, Oct. 2006.
- [66] J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka, and P. Kaspar, "Low-power PCB fluxgate sensor," in *IEEE Sensors, 2005.*, 2005, pp. 4 pp.-.
- [67] P. Ripka, J. Kubik, M. Duffy, W. G. Hurley, and S. O'Reilly, "Current sensor in PCB technology," in *Proceedings of IEEE Sensors, 2002*, vol. 2, pp. 779–784 vol.2.
- [68] A. Tipek, T. O'Donnell, P. Ripka, and J. Kubik, "Excitation of PCB fluxgate sensor," in *Proceedings of IEEE Sensors 2003 (IEEE Cat. No.03CH37498)*, 2003, vol. 1, pp. 647-650 Vol.1.
- [69] A. Tipek, T. O'Donnell, P. Ripka, and J. Kubik, "Excitation and temperature stability of PCB fluxgate sensor," *IEEE Sens. J.*, vol. 5, no. 6, pp. 1264–1269, Dec. 2005.
- [70] C. F. Brockelsby, *Ultrasonic Delay Lines*. Iliffe Books, 1963.
- [71] E. Keonjian, *Micropower Electronics*. Elsevier, 2013.

-
- [72] H. W. Gschwind, *Design of Digital Computers: An Introduction*. Springer, 2013.
- [73] D. R. Raichel, *The Science and Applications of Acoustics*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [74] E. Hristoforou, “Magnetostrictive delay lines and their applications,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 59, no. 1, pp. 183–191, Apr. 1997.
- [75] E. Hristoforou and D. Niarchos, “Fast characterisation of magnetostrictive delay lines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 6, pp. 3147–3149, Nov. 1993.
- [76] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, and I. Darie, “Sound velocity in magnetostrictive amorphous ribbons and wires,” *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 27, no. 8, p. 1595, 1994.
- [77] E. Hristoforou and A. Ktena, “Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, no. 2, pp. 372–378, Sep. 2007.
- [78] C. Reig, S. Cardoso, and S. C. Mukhopadhyay, *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors: From Basis to State-of-the-Art Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [79] H. S. Nalwa, *Handbook of Thin Films, Five-Volume Set*. Academic Press, 2001.
- [80] W. Y. Du, *Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies*. CRC Press, 2014.
- [81] A. Asfour, *Magnetic Sensors: Development Trends and Applications*. BoD – Books on Demand, 2017.
- [82] E. Hirota, H. Sakakima, K. Inomata, and K. Inomata, *Giant Magneto-Resistance Devices*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [83] A. Fert, “Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 80, no. 4, pp. 1517–1530, Dec. 2008.
- [84] M. J. Caruso, “Applications of magnetic sensors for low cost compass systems,” in *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000*, 2000, pp. 177–184.

-
- [85] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, "Magnetoresistive sensors," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 19, no. 16, p. 165221, Apr. 2007.
- [86] S. Tumański, *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011.
- [87] P. Jantaratana and C. Sirisathitkul, "Low-cost Sensors Based on the GMI Effect in Recycled Transformer Cores," *Sensors*, vol. 8, no. 3, pp. 1575–1584, Mar. 2008.
- [88] H. Chang, M. Yang, J. Liu, and Y. Yu, "Highly Sensitive GMI Sensor with an Equivalent Noise 0.3 nT," in *2012 Spring Congress on Engineering and Technology*, 2012, pp. 1–4.
- [89] P. Sarkar, J. Vcelak, R. K. Roy, A. K. Panda, A. Mitra, and P. Ripka, "Co-Based Amorphous Material for Giant Magnetoimpedance and Fluxgate Sensing Cores," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2015.
- [90] G. Meijer, *Smart Sensor Systems*. John Wiley & Sons, 2008.
- [91] E. Ramsden, *Hall-Effect Sensors: Theory and Application*. Elsevier, 2011.
- [92] C. Chien, *The Hall Effect and Its Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [93] E. M. Secula, "Hall Effect Measurements," *NIST*, 03-Dec-2008. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/engineering-physics-division/popular-links/hall-effect>. [Accessed: 06-Jun-2019].
- [94] D. C. Jiles, "Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 21, no. 7, p. 1186, 1988.
- [95] J. Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [96] J. B. Hull, *Non-Destructive Testing*. Macmillan International Higher Education, 2015.
- [97] S. Huang and S. Wang, *New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing*. Springer, 2016.

-
- [98] B. Raj, T. Jayakumar, and M. Thavasimuthu, *Practical Non-destructive Testing*. Woodhead Publishing, 2002.
- [99] *Eddy-current Characterization of Materials and Structures*. ASTM International, 1981.
- [100] A. Davies, *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [101] P. E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. John Wiley & Sons, 2005.
- [102] M.-U. Rahman, *Optimization of In-line Defect Detection by Eddy Current Techniques*. kassel university press GmbH, 2011.
- [103] J.-S. Park and J.-T. Park, "Effect of stress relief annealing temperature and atmosphere on the microstructure and magnetic properties of non-oriented electrical steels," in *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2016, pp. 288–292.
- [104] E. J. Hilinski and G. H. Johnston, "Annealing of electrical steel," in *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 2014, pp. 1–7.
- [105] M. Birkholz and C. Genzel, "Residual Stress Analysis," in *Thin Film Analysis by X-Ray Scattering*, Wiley-Blackwell, 2006, pp. 239–295.
- [106] A. J. Allen, M. T. Hutchings, C. G. Windsor, and C. Andreani, "Neutron diffraction methods for the study of residual stress fields," *Adv. Phys.*, vol. 34, no. 4, pp. 445–473, Jan. 1985.
- [107] J.-M. Drouet and Y. Champoux, "Designing a Strain Gauge Transducer for Dynamic Load Measurement in Cycling Using Numerical Simulation," *Procedia Eng.*, vol. 72, pp. 304–309, Jan. 2014.
- [108] M. Z. S. Khan, D. S. Saunders, N. J. Baldwin, and D. H. Sanford, "An investigation of the use of strain gages to measure welding-induced residual stresses," *Exp. Mech.*, vol. 37, no. 3, pp. 264–271, Sep. 1997.
- [109] R. W. Cuffe, "Transducers for ship's hull stress monitoring," in *IEE Colloquium on Sensing Via Strain*, 1993, pp. 2/1-212.

-
- [110] J. Lee, “Application of strain gauge method for investigating influence of ship shaft movement by hydrodynamic propeller forces on shaft alignment,” *Measurement*, vol. 121, pp. 261–275, Jun. 2018.
- [111] A. L. Window, *Strain Gauge Technology*. Springer Netherlands, 1992.
- [112] S. Keil, *Technology and Practical Use of Strain Gages: With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain Gages*. John Wiley & Sons, 2017.
- [113] M. A. Adam, N. J. M. Satar, W. Kuntjoro, and M. K. A. Rahman, “Preliminary research in characterization of fatigue load parameters using fiber optic,” in *2011 International Conference on Business, Engineering and Industrial Applications*, 2011, pp. 51–56.
- [114] M. A. B. Adam, W. Kuntjoro, and M. K. B. A. Rahman, “Research in characterization of cyclic load parameters using fiber bragg gratings system,” in *2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, 2012, pp. 237–241.
- [115] R. Ivče, I. Jurdana, and Z. Mrak, “Longitudinal ship’s hull strength monitoring with optical fiber sensors,” in *2009 International Symposium ELMAR*, 2009, pp. 167–170.
- [116] R. Ivče, I. Jurdana, and R. Mohović, “Vibrations monitoring on board ship with a fiber optic sensors,” in *Proceedings ELMAR-2011*, 2011, pp. 165–168.
- [117] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 2009.
- [118] G. Sagvolden, K. Pran, L. Vines, H. E. Torkildsen, and G. Wang, “Fiber optic system for ship hull monitoring,” in *2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No.02EX533)*, 2002, pp. 435–438 vol.1.
- [119] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, 1999.
- [120] A. Cusano, A. Cutolo, and J. Albert, *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation*. Bentham Science Publishers, 2011.

-
- [121] W. N. Sharpe, *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [122] D. Atherton and D. Jiles, "Effects of stress on the magnetization of steel," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 19, no. 5, pp. 2021–2023, Sep. 1983.
- [123] W. Mao and D. L. Atherton, "Effect of compressive stress on the reversible and irreversible differential magnetic susceptibility of a steel cube," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 214, no. 1, pp. 69–77, May 2000.
- [124] P. Vourna, C. H. Hervochoes, M. Vrana, A. Ktena, and E. Hristoforou, "Correlation of Magnetic Properties and Residual Stress Distribution Monitored by X-Ray and Neutron Diffraction in Welded AISI 1008 Steel Sheets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, pp. 1–4, 2015.
- [125] E. Hristoforou, P. Vourna, A. Ktena, and P. Svec, "On the Universality of the Dependence of Magnetic Parameters on Residual Stresses in Steels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 5, pp. 1–6, May 2016.
- [126] P. Vourna, E. Hristoforou, A. Ktena, P. Svec, and E. Mangiorou, "Dependence of Magnetic Permeability on Residual Stresses in Welded Steels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 4, pp. 1–4, Apr. 2017.
- [127] S. White, T. Krause, and L. Clapham, "Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 11, p. 3501, Nov. 2007.
- [128] G. Hinz and H. Voigt, "Magnetoelastic Sensors," *Sensors*, Mar. 2008.
- [129] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. Gulf Professional Publishing, 1998.
- [130] W. Zimmermann and J. Halm, "Method for measuring stress/strain using Barkhausen noises," US7317314B2, 08-Jan-2008.
- [131] L. Mierczak, D. C. Jiles, and G. Fantoni, "A New Method for Evaluation of Mechanical Stress Using the Reciprocal Amplitude of Magnetic Barkhausen Noise," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 2, pp. 459–465, Feb. 2011.

-
- [132] P. Vourna, A. Ktena, P. E. Tsakiridis, and E. Hristoforou, “A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels,” *NDT E Int.*, vol. 71, pp. 33–42, Apr. 2015.
- [133] R. Albanese, G. Rubinacci, T. Takagi, and S. S. Udpa, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II)*. IOS Press, 1998.
- [134] F. Kojima, T. Takagi, and S. S. Udpa, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VI)*. IOS Press, 2002.
- [135] C.-G. Stefanita, *From Bulk to Nano: The Many Sides of Magnetism*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [136] B. Andò, S. Baglio, A. R. Bulsara, and V. Sacco, “‘Residence times difference’ fluxgate,” *Measurement*, vol. 38, no. 2, pp. 89–112, Sep. 2005.
- [137] U.A.Bakshi and A.P.Godse, *Analog And Digital Electronics*. Technical Publications, 2009.
- [138] P. Rao, *Pulse And Digital Circuits*. Tata McGraw-Hill Education, 2006.
- [139] D. S. Taylor, *Transistor Circuit Design Tables*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [140] R. J. Baker, *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation*. John Wiley & Sons, 2008.
- [141] “TL081 High Slew Rate JFET-Input Operational Amplifier | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/TL081>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [142] W. G. Jung, *IC Op-Amp Cookbook*, 3 edition. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1986.
- [143] “TLC3702 Dual, Micropower, Push-Pull Outputs, LinCMOS™ Voltage Comparator | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/TLC3702#>. [Accessed: 03-Jul-2019].
- [144] “CD74HC4053 High-speed CMOS triple 2-channel analog multiplexer & demultiplexer | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/CD74HC4053>. [Accessed: 03-Jul-2019].

- [145] “TLC2272 Dual, Low-Noise, Rail-To-Rail Operational Amplifier | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/TLC2272>. [Accessed: 03-Jul-2019].
- [146] “Bartington Instruments,” *Bartington Instruments*. [Online]. Available: <https://www.bartington.com/>. [Accessed: 04-May-2019].
- [147] “OPA209 2.2nV/rtHz, 18MHz, Precision, RRO, 36V Operational Amplifier | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/OPA209>. [Accessed: 03-Jul-2019].
- [148] “ADS1115 16-Bit 860SPS 4-Ch Delta-Sigma ADC With PGA, Oscillator, Vref, Comparator, and I2C | TI.com.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/ADS1115>. [Accessed: 05-Jun-2019].



Παράρτημα

6.1 Αλγόριθμος υπολογισμού μαγνητικού πεδίου

```
int input_pin = 2;
float voltage = 5.0;
float freq = 1000;

long dt = 0;
float h = 0;

void setup()
{
  pinMode(input_pin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  dt = pulseIn(input_pin, HIGH) - pulseIn(input_pin, LOW);
  h = freq * voltage * dt;

  Serial.print("Dt = ");
  Serial.print(dt);
  Serial.println(" us");
  Serial.print("H = ");
  Serial.print(h, 5);
  Serial.println(" A/m");
  Serial.println("-----");
  delay(100);
}
```

6.2 Αλγόριθμος μέτρησης και αυτομάτου ελέγχου

```
#include <PID_v1.h>
#define PIN_INPUT 2

int enA = 10;
int in1 = 9;
int in2 = 8;
float period = 1000.0;

double Setpoint, Input, Output ;
double Kp = 6, Ki = 0.05, Kd = 0.1;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

unsigned long now = 0;
unsigned long lastMessage = 0;

void setup()
{
  pinMode(PIN_INPUT, INPUT);
  pinMode(enA, OUTPUT);
  pinMode(in1, OUTPUT);
  pinMode(in2, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);
  Setpoint = 0;

  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetOutputLimits(-255, 255);
  myPID.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
  lastMessage = millis();
}
```

```
void loop()
{
  float HIGH_time = pulseIn(PIN_INPUT, HIGH);
  float LOW_time = pulseIn(PIN_INPUT, LOW);
  float dt = HIGH_time - LOW_time;
  Input = map(dt, 0, period, -255, 255);
  myPID.Compute();

  if (Output > 0) {
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);
    analogWrite(enA, Output);
    Serial.println("---");
    Serial.print("Setpoint = ");
    Serial.print(Setpoint);
    Serial.print(" Input = ");
    Serial.print(Input);
    Serial.print(" Output = ");
    Serial.print(Output);
    Serial.print("\n");
  }
  else if (Output < 0) {
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);
    analogWrite(enA, -Output);
    Serial.println(+++);
    Serial.print("Setpoint = ");
    Serial.print(Setpoint);
    Serial.print(" Input = ");
    Serial.print(Input);
    Serial.print(" Output = ");
    Serial.print(Output);
    Serial.print("\n");
  }
}
```

```
}  
else {  
  Serial.println("OK");  
  Serial.print("Setpoint = ");  
  Serial.print(Setpoint);  
  Serial.print(" Input = ");  
  Serial.print(Input);  
  Serial.print(" Output = ");  
  Serial.print(Output);  
  Serial.print("\n");  
}  
  
now = millis();  
  
if (Serial.available() > 0) {  
  for (int x = 0; x < 4; x++) {  
    switch (x) {  
      case 0:  
        Kp = Serial.parseFloat();  
        break;  
      case 1:  
        Ki = Serial.parseFloat();  
        break;  
      case 2:  
        Kd = Serial.parseFloat();  
        break;  
      case 3:  
        for (int y = Serial.available(); y == 0; y--) {  
          Serial.read();  
        }  
        break;  
    }  
  }  
  Serial.print("Kp,Ki,Kd = ");
```

```

Serial.print(Kp);
Serial.print(",");
Serial.print(Ki);
Serial.print(",");
Serial.println(Kd);

myPID.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
}
lastMessage = now;
}

```

6.3 Αλγόριθμος μέτρησης και εκπομπής διάταξης αισθητήρων Hall

```

/* =====
Hall sensor: SS49E
5V, GND, Aout: A0, A1
-----

16-bit ADC: ADS1115
VDD: 5V, GND, SCL: A5, SDA: A4, ADDR: GND, A0: Hall_1, A1:
Hall_2
-----

RF Transmitter: nRF24L01
Vcc: 3.3V, GND, CE: D9, CSN: D10, MOSI: D11, MISO: D12. SCK:
D13
-----

BT Transmitter: HC-05
Vcc: D5, GND, TX: D2, RX: D4
=====
*/

#include "VirtuinoBluetooth.h"
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>

```

```
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>

Adafruit_ADS1115 ads;
SoftwareSerial bluetoothSerial = SoftwareSerial(2, 4);
VirtuinoBluetooth virtuino(bluetoothSerial);

int BLpin = 5;
int bat_voltage;
float v_zero_field = bat_voltage / 2;
float offset1_value;
float offset2_value;
float magn;
boolean executed = false;

RF24 radio(9, 10);
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;

float mapf(float x, float in_min, float in_max, float out_min,
float out_max)
{
    return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min)
+ out_min;
}

void setup() {
    virtuino.DEBUG = true;
    bluetoothSerial.begin(9600);
    pinMode(BLpin, OUTPUT);
    digitalWrite(BLpin, LOW);

    Serial.begin(9600);
    radio.begin();
    radio.setChannel(115);
```



```
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
radio.openWritingPipe(pipe);
ads.begin();
}
void loop()
{
  bat_voltage = readVcc();
  if (bat_voltage > 4000) {
    int16_t adc0, adc1;
    adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
    adc1 = ads.readADC_SingleEnded(1);

    if (executed == false) {
      offset1_value = adc0;
      offset2_value = adc1;
      executed = true;
    }

    float min1_value = 1000 * offset1_value / v_zero_field;
    float max1_value = 4000 * offset1_value / v_zero_field;
    float min2_value = 1000 * offset2_value / v_zero_field;
    float max2_value = 4000 * offset2_value / v_zero_field;

    float sensor1Value = adc0;
    float magn1 = mapf(sensor1Value, min1_value, max1_value, -
100.0, 100.0);

    float sensor2Value = adc1;
    float magn2 = mapf(sensor2Value, min2_value, max2_value, -
100.0, 100.0);

    magn = magn2 - magn1;

    Serial.print(bat_voltage);
    Serial.println(" mV");
    Serial.print("RAW value 1: ");
    Serial.print(sensor1Value);
    Serial.print("\t Magn 1: ");
```

```
Serial.print(magn1);
Serial.println(" mT");
Serial.print("RAW value 2: ");
Serial.print(sensor2Value);
Serial.print("\t Magn 2: ");
Serial.print(magn2);
Serial.println(" mT");
Serial.println(magn);
delay(500);
radio.write(&magn, sizeof(magn));

if (Serial.available() > 0) {
int incomingByte = Serial.read();
if (incomingByte == 'H' || incomingByte == 'h' ||
    incomingByte == '1') {
digitalWrite(BLpin, HIGH);
virtuino.run();
virtuino.vMemoryWrite(0, magn);
}
if (incomingByte == 'L' || incomingByte == 'l' ||
    incomingByte == '0') {
digitalWrite(BLpin, LOW);
}
}
delay(300);
}
else {
Serial.println("Low battery!");
magn = -9999;
radio.write(&magn, sizeof(magn));
delay(300);
}
}
long readVcc() {
```

```

ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) |
_BV(MUX1);
delay(2);
ADCSRA |= _BV(ADSC);
while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC));
uint8_t low = ADCL;
uint8_t high = ADCH;

long result = (high << 8) | low;
result = 1125300L / result;
return result;
}

```

6.4 Αλγόριθμος λήψης διάταξης αισθητήρων Hall

```

/*
-----
RF Receiver: nRF24L01
Vcc: 3.3V, GND, CE: D9, CSN: D10, MOSI: D11, MISO: D12. SCK:
D13
----- LCD
I2C 16x2
Vcc: 5V, GND, SDA: A4, SCL: A5
-----
*/
//=====Libraries=====
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <LcdBarGraphX.h>
float magn = 0.0;

//=====LCD=====
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
LcdBarGraphX lbg(&lcd, 16, 0, 1);

//=====nRF24=====
RF24 radio(9, 10);
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;

```

```
void setup(void)
{
  //=====LCD=====
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor(5, 0);
  //=====nRF24=====
  radio.begin();
  radio.setChannel(115);
  radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
  radio.setDataRate( RF24_250KBPS );
  radio.openReadingPipe(1, pipe);
  radio.startListening();

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Starting Measurement.....");

  lcd.print("Auto");
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("Calibration.");
  delay(1000);
  lcd.setCursor(14, 1);
  lcd.print(".");
  delay(1000);
  lcd.setCursor(15, 1);
  lcd.print(".");
  delay(1000);
  lcd.clear();
}
void loop(void)
{
  for (int i = 0; i < 16; ++i)
  {
    lcd.setCursor(i, 0);
    lcd.write(' ');
  }

  if (radio.available()) {
    radio.read(&magn, sizeof(magn));
    if (magn == -9999) {
      Serial.println("Low transmitter battery!");
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Low transmitter");
      lcd.setCursor(4, 1);
      lcd.print("battery!");
      delay(1000);
    }
    else {
      Serial.print("Magn : ");
    }
  }
}
```

```
Serial.print(magn);  
Serial.println(" mT");  
  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Diff=");  
lcd.setCursor(5, 0);  
lcd.print(magn, 3);  
lcd.print(" mT");  
  
lcd.setCursor(0, 1);  
lbg.drawValue(abs(magn), 100);  
  
delay(1000);  
}  
}  
else {  
Serial.println("No signal!");  
lcd.setCursor(4, 0);  
lcd.print("No signal!");  
delay(1000);  
}  
}
```




Extended Abstract

7.1 Design and Development of a New Magnetometer Calibration Device

7.1.1 Introduction

Magnetometers are used in a variety of applications, in a wide range of fields, including science, transportation and industry. For higher quality monitoring and control services, higher accuracy levels are required. Consequently, it is necessary to carry out maintenance and calibration procedures at regular time intervals, depending on the application and the operating conditions. This is achievable by using a magnetometer calibration device that compensates the ambient magnetic field thus increasing the measurement's accuracy.

The elimination of the ambient magnetic field may be accomplished with two different techniques: the passive magnetic shielding and the active magnetic field compensation. Disadvantages of passive magnetic shielding, include the inability to properly eliminate DC or low-frequency magnetic fields, the installation cost, as well as the requirement of a thorough covering of the space where the measurements will be conducted.

In order to compensate DC or low-frequency magnetic fields, active magnetic field compensation techniques, or a combination of both active and passive magnetic shielding, must be used. Active techniques are based on the generation of a counter-acting magnetic field, opposing to the ambient magnetic field. The main advantage of the active magnetic field compensation is its ability to adapt – via a closed-loop control system – to the variations of the applied magnetic field, via a sensing element that provides the input to the system. Existing calibration devices based on the active magnetic field compensation techniques, use mainly SQUID sensors. However, the very small dimensions of the SQUID sensor render difficult its proper geometric alignment. Moreover, SQUID sensors require special operating conditions, including liquid nitrogen or liquid helium cooling.

In the technique described below, it is possible to compensate unknown DC ambient field contributions on an under-test magnetometer using a time measurement. The technique utilizes the effect of ambient magnetic fields on the asymmetry in the time differences between consecutive output pulses. The correction of the asymmetry corresponds to the compensation of the ambient magnetic field. The measurement of the time difference, rather than the use of a reference sensor for ambient field compensation, may allow the use of this technique even as a primary standard, since it is based only on the measurement of a base quantity, i.e. time, provided that field compensation is realized by primary current generation such as Quantum Hall effect methods.

To demonstrate the applicability of the proposed technique, we have developed an arrangement based on the fluxgate principle, according to which the applied magnetic field affects the magnetization cycles of a sensing element. The use of a sensing element made of amorphous FeSiB or CoFeSiB in the form of long ribbon or wire, allows rapid and accurate output response to the changes of the magnetic field. The geometry of the amorphous core mitigates the sources of positioning errors encountered in the SQUID arrangements.

7.1.2 Operating Principle

Fig. 1 shows the characteristic fluxgate response to a triangular excitation signal, $H_E(t)$. A sinusoidal excitation is also possible, but its non-linearity dictates the use of linearization models.

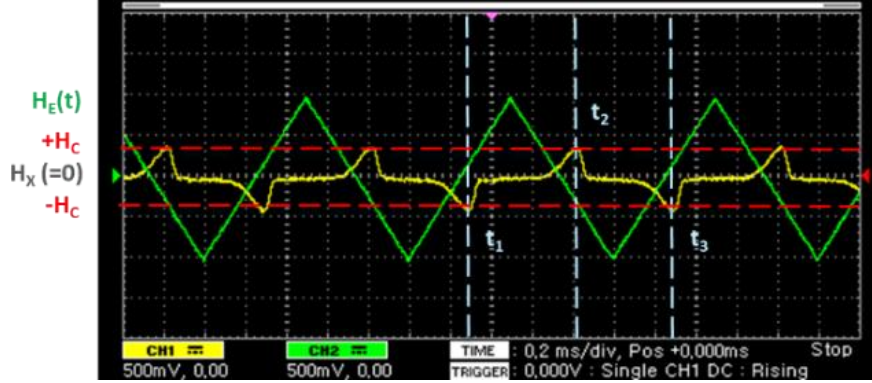


Fig. 1. The time difference $t_{32}-t_{21}$ must be zero when no ambient magnetic field is sensed.

The voltage output at the pickup coil is a sequence of positive and negative peaks corresponding to the negative and positive coercive field of the sensing element. When no ambient magnetic field is sensed by the sensing element, the time difference, $t_{32} = t_3 - t_2$, between a maximum occurring at time t_2 and the following minimum at time t_3 , is equal to the time difference, $t_{21} = t_2 - t_1$, between the maximum at time t_2 and the previous minimum at time t_1 .

Having determined the times t_1, t_2, t_3 , corresponding to the three consecutive peaks, a relation between the time difference $\Delta t = t_{32} - t_{21}$ and the unknown magnetic field, can be extracted:

$$t_1 = \frac{H_C - H_X}{a} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{H_C + H_X + a \frac{T}{2}}{a} \quad (2)$$

$$t_3 = t_1 + T \quad (3)$$

where T and a are the period and the slope of the triangular excitation signal, respectively, H_C is the sensing core's coercive field, and H_X is the unknown ambient DC field.

The time difference Δt may then be calculated as:

$$\begin{aligned}\Delta t &= (t_2 - t_1) - (t_3 - t_2) = 2t_2 - t_1 - t_3 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H_X &= \frac{\alpha \cdot \Delta t}{4}\end{aligned}\quad (4)$$

The slope coefficient α of the triangular excitation signal may be calculated by:

$$\alpha = \frac{4V}{T}\quad (5)$$

where, V is the amplitude of the excitation signal.

Finally, the unknown magnetic flux density may be calculated as:

$$\begin{aligned}H_X &= \frac{\alpha \cdot \Delta t}{4} \Leftrightarrow H_X = \frac{4V}{T} \cdot \frac{\Delta t}{4} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow H_X &= f \cdot V \cdot \Delta t\end{aligned}\quad (6)$$

where, f is the excitation frequency and V is proportional to H_E .

7.1.3 Development of the Magnetometer Calibration Device

The laboratory arrangement which was used as a proof-of-principle device, includes a function generator, which produces the excitation signal, a fluxgate sensing device as the sensing element, a solenoid as the controllable magnetic field generator device, an electronic circuit, comprising a microcontroller with an Analog-to-Digital converter, for the measurement of the unknown offset and the generation of the compensating field, and an oscilloscope as display. The arrangement is used in a magnetically quiet environment, to avoid any influence of random external magnetic field variations.

7.1.3.1 Development of the Solenoid

The magnetically controlled space used for the calibration procedure is the interior of a solenoid constructed of two layers with 290 windings each, made of $\emptyset 1\text{mm}$ enamelled copper wire. The overall length of the solenoid is 300mm and its radius is 50mm. The magnetic field at the center of the solenoid can be controlled,

through the adjustment of the supplied DC current. In our design, the range of the magnetic flux density sensed by the fluxgate sensing element is ± 11.5 mT. All the materials used for the construction of the solenoid are non-metallic, to avoid any unwanted magnetization. The movable mounting system, where the magnetometer is placed, is made of wood; all brackets and screws, holding the sensor in place, are plastic (Fig. 2).

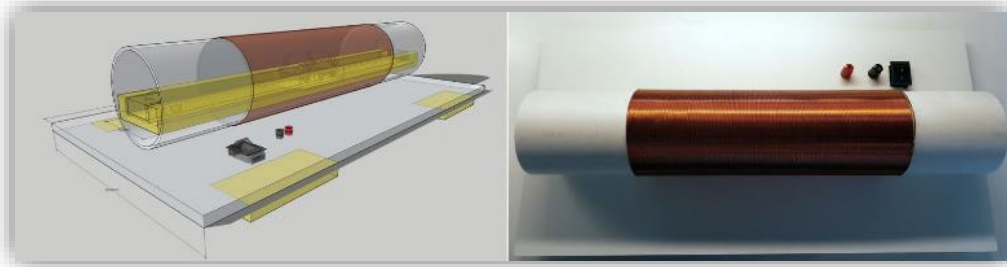


Fig. 2. Design of the solenoid and the actual device.

7.1.3.2 Development of the Sensing Device

There are several types of fluxgate sensors commonly used, such as racetrack, orthogonal and miniature PCB fluxgate sensors. The fluxgate sensing device developed for this work is similar to the typical fluxgate design. Its excitation and pickup coils are made of 2 layers of 550 windings each, using $\varnothing 0.1$ mm enamelled copper wire, wound around a glass tube ($\varnothing 1$ mm) and placed on a board, as shown in Fig. 3. A CoFeSiB wire ($\varnothing 101\mu\text{m}$) was chosen as the core's magnetic material. The total length of the proof-of-concept device is 70mm.



Fig. 3. The developed fluxgate sensing device.

7.1.3.3 Design and Development of the Electronic Circuit

In order to detect the maxima and minima of the fluxgate's output signal, an electronic circuit was designed and developed.

The overall design is based on a Schmitt trigger comparator, which is able to produce pulses, using positive (or negative) peaks as input, which are above (or below) a certain threshold voltage. This type of comparator, being able to operate with noisy input signals and generate sharp pulses of the appropriate duration, is ideal for the required measurements. However, the predefined threshold voltages of an ordinary Schmitt trigger circuit act as a restriction for this type of measurement, where the peak amplitudes of the output pulses of a magnetometer under test may vary or even be non-symmetrical. To overcome this restriction, a variation of the ordinary circuit was developed, allowing adaptable thresholds. The designed electronic circuit, as shown in Fig. 4, includes a positive peak detector, a negative peak detector, a multiplexer, two buffers and a Schmitt trigger comparator. The peak detectors supply the comparator with the varying upper & lower voltage thresholds for each case. The two buffers isolate the final stage, eliminating the noise. As a result, the output signal of the Schmitt trigger consists of noise-free positive & negative pulses, the duration of which corresponds to the time difference between the sequential maxima and minima of the initial signal.

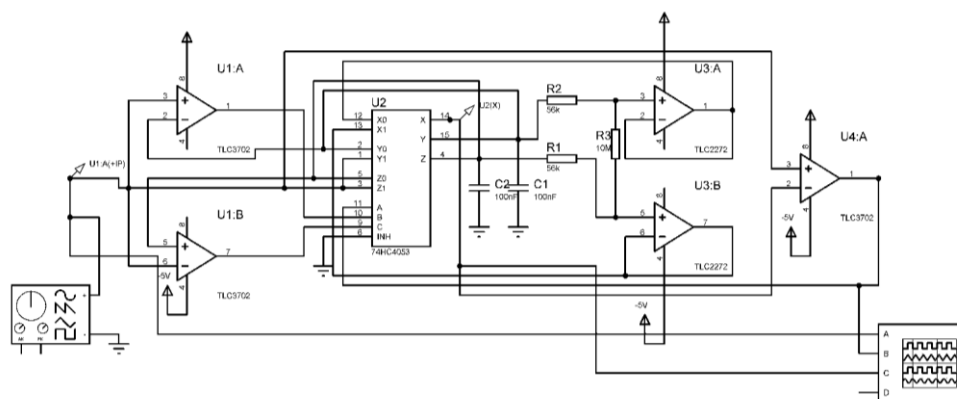


Fig. 4. The developed electronic circuit.

The final circuit was developed on a dual layer photosensitive printed circuit board (PCB). BNC connectors were used for the input and output signals. The 2 sides of the final PCB are shown in Fig. 5.



Fig. 5. Bottom and top side of the developed PCB.

7.1.3.4 Source Code & Closed-Loop Control System

To measure the pulse width of the Schmitt trigger circuit's output signal, a C++ code was developed. The developed C++ code uses as input the Schmitt trigger's output pulses and measures the time difference Δt between the positive and the negative pulses. Using a PID algorithm, it calculates the applied voltage V required to generate the compensating DC field inside the solenoid. V is controlled by a controller which provides a pulsed-width modulation (PWM) output signal fed to an H-bridge which controls both the amplitude and the polarity of V . The results are shown on a liquid-crystal display (LCD) and are stored as a CSV file.

It must be noted that zeroing the time difference corresponds to the ambient magnetic field compensation, without the need for prior knowledge or calculation of its value.

7.1.4 Experimental Results and Discussion

In order to test the proposed design, the fluxgate sensing device was placed at the center of the solenoid, which was connected to a DC power supply unit, through the H-bridge circuit, used to generate the counter-acting magnetic field. The fluxgate's excitation coil was connected to the function generator. The pickup coil was connected to both the developed electronic circuit board and the oscilloscope. Similarly, the output signal of the circuit board was fed to both the microcontroller and the oscilloscope. The output signals from the fluxgate sensing device and the Schmitt trigger circuit are shown in Fig. 6 and Fig. 7 for a triangular $1V_{pp}$, 1kHz

excitation signal and a $\pm 250\text{mV}_{\text{DC}}$ applied field. Figs 6 and 7 show the effect of positive and negative DC applied field on the time difference Δt and the resulting Schmitt trigger's output pulses.

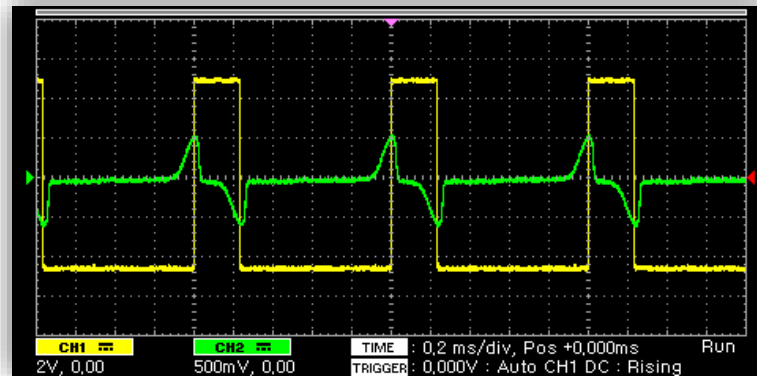


Fig. 6. The output signals of the sensing device and the Schmitt trigger for a positive magnetic field (250mV_{DC}) and a 1kHz, 1Vpp triangular excitation field.

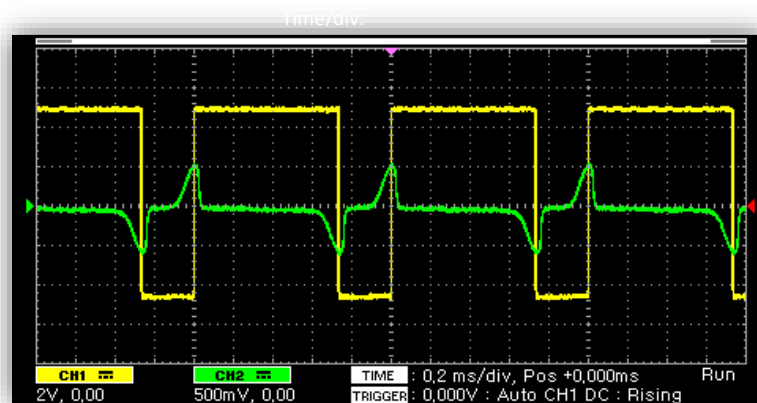


Fig. 7. The output signals of the sensing device and the Schmitt trigger for a negative magnetic field ($-250\text{mV}_{\text{DC}}$) and a 1kHz, 1Vpp triangular excitation field.

The difference Δt , as reflected in the output pulses, is measured by the microcontroller and fed to the closed-loop control algorithm implemented by the PID controller which in turn generates the PWM signal that controls the magnitude and polarity of the voltage signal that must be supplied to the solenoid in order to compensate the unknown ambient field. Now, the solenoid provides a magnetically controlled space with zero ambient field in the direction of the measurement.

Next, the sensing device was removed from the solenoid in order to avoid any influence on the magnetometers under test, during their calibration process.

To test the proposed calibration procedure, a commercial Hall sensor (SS49E) and a custom-made fluxgate sensor were calibrated using the developed arrangement. The calibration curves are shown in Fig. 8 and Fig. 9, respectively. The horizontal axis represents the magnetic flux density B provided through the solenoid to the magnetometer under test, based on (7):

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} \quad (7)$$

where, μ_0 is the magnetic permeability of free space ($\mu_0 \cong 1.257 \times 10^{-6} H/m$), N is the number of windings, I is the supplied current, L is the solenoid's length and R is the solenoid's radius.

In Fig. 8, the vertical axis represents the output voltage of the Hall sensor as a function of B .

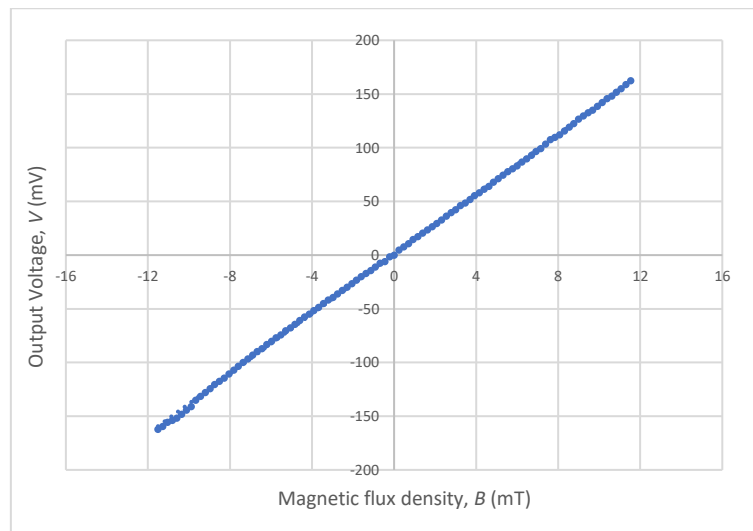


Fig. 8. Hall sensor's calibration curve.

In Fig. 9, the calibration curve for the fluxgate sensor is shown. In this case, we measure the time difference Δt , detected by our electronic circuit, as a function of the magnetic flux density B .

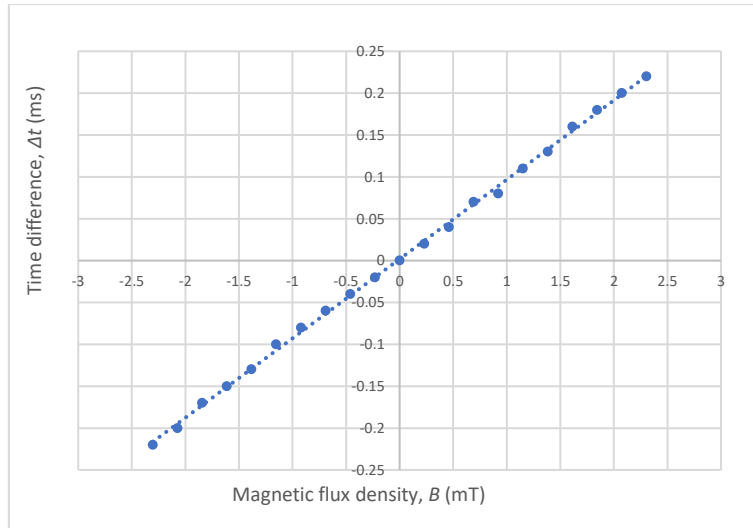


Fig. 9. Fluxgate sensor's calibration curve.

Using the proposed arrangement, the contributions to the uncertainty of the measurement stem from the sensing element and the electronics. The first one may be determined from the time measurement and is calculated to be approximately $\pm 4\text{pT}$ while the second one is due mainly to the electronics' rise time and may reach up to $\pm 200\text{pT}$.

The developed device can be used as a laboratory primary standard, to accurately calibrate new or existing magnetometers, used in many fields, such as navigation and geophysical applications.

7.1.5 Conclusions

A new magnetometer calibration device was developed, based on the fluxgate principle and the active magnetic field compensation technique. The unknown ambient magnetic field was sensed by a fluxgate sensing device. An electronic circuit was designed and developed to condition the series of positive and negative output peak values, to a train of positive or negative pulses whose duration depended on the magnitude of the ambient DC magnetic field. Using a PID controller and a solenoid as a magnetic field generator, it was possible to generate controllable magnetic fields, in order to compensate the unknown ambient magnetic field.

The novelty of this arrangement is that it can serve as simple and low-cost laboratory calibration device for commercial or custom-made magnetometers, using the measurement of time rather than a reference magnetometer. It is possible to also evaluate the value of the unknown ambient field, but it is not necessary for its compensation.

Future work includes the extension of the arrangement to three dimensions by replacing the solenoid by a 3D arrangement of Helmholtz coils. Additionally, the use of a larger arrangement of Helmholtz coils, enclosing the existing arrangement, can provide real-time magnetic field compensation. Further improvements include the use of electronics with lower rise time, the use of Quantum Hall Effect based voltage devices & QHE based resistance devices to more accurately control the compensating magnetic field, as well as an atomic clock, to improve the accuracy of the time measurement.

7.2 Magnetic Permeability Device Based on Hall Effect

7.2.1 Introduction

Steel and other ferromagnetic materials are used in a wide range of applications, including transportation (e.g. ships), energy (e.g. pipelines) and industry (e.g. steel constructions). Due to its importance, inspection of steel's condition is mandatory, in order to prevent structure failures. Steel health monitoring includes a variety of techniques, which can be used, depending on the application and the conditions, in order to detect the location of a defect and act accordingly to cure it.

Monitoring residual stresses in steels, using non-destructive techniques, is also an important requirement, since they are associated with the condition of the materials. Residual stresses can lead to distortion or even cracking of the material, if they are not treated shortly and correctly. Treatment of the residual stresses include mechanical methods, stress relief heat treatment and use of proper alloys.

There are two basic reference methods, which can be used in order to monitor and measure residual stresses in steels: X-ray diffraction (XRD) and Neutron diffraction (ND). Those are laboratory methods, requiring considerable amount of time for sample preparation and measurements.

Other methods can be used in industrial environments. Strain gauge sensors, in form of thin films, can be placed in specific spots, in order to monitor and measure residual stresses. An applied stress leads to deformation of the sensor, which will affect its resistance. Strain gauge sensors provide real-time results, which can be wirelessly transmitted. However, a large number of sensors is required, in order to provide sufficient data from many different spots. Furthermore, non-proper placement of the sensor may result in loss of accuracy.

Magnetic Barkhausen Noise can also be used as a non-destructive method for steel health monitoring. This method is based on the acquisition of the signal which is generated through the magnetization process of the under-test coupon. Any local deformation or imperfection of the material, will affect the output signal. Having the sensor calibrated for each type of ferromagnetic material, it is feasible to determine possible defective spots, by studying the received signal. This method requires very low (near-DC) excitation frequencies, leading to a time-consuming measuring process. Moreover, the resulting output signal is very weak, usually in the order of μV , requiring filtering and amplification. A key parameter for reliable results is proper placement and alignment of the sensing element. Insufficient contact between the sensor and the sample, will increase measurement's uncertainty.

As a result, all the above-mentioned methods show specific disadvantages, mainly related to the time which is required for measurements and the uncertainty of the results. A different approach to monitor stresses would be through the measurement of surface or bulk magnetic permeability of the ferromagnetic material under-test. Towards this direction, a new device is presented, which can be used to measure stress components along the surface and the bulk of the under-test ferromagnetic material. This is possible through the correlation of magnetic permeability with the corresponding stress component.

7.2.2 Operating principle

Measurements are based on Hall effect, according to which a transverse voltage, called Hall voltage, is generated between the two sides of a conductor or a semiconductor, when an electric current flows through it and a magnetic field generates a transverse force. Hall sensors can be used, in order to measure magnetic flux density, B . By monitoring variations on different spots and correlating those results with the corresponding magnetic stress calibration curves, it is possible to determine the condition and the stresses acting on the material under-test.

Based on this principle, the sensing element was designed to include a permanent neodymium magnet and two parallel soft iron bars. The magnet is placed between the two iron bars, forming a yoke. A Hall sensor is placed at the bottom of each bar. Similar arrangements are used to measure magnetic hysteresis, based on coils.

The sensing element is placed above the sample under-test. The magnetic flux, generated by the permanent magnet, penetrates the sample and the ensuing magnetization process is affected by the material's properties and structure. As a result, having a predefined distance (lift-off) between the Hall sensors and the sample, it is possible to measure variations of the magnetic flux density, in order to draw conclusions about the condition of the material. Changes of the magnetic permeability can also be obtained, due to its correlation with the magnetic flux density. Furthermore, the use of two Hall sensors, which form a closed magnetic loop, offers an important advantage: the arrangement can act as a form of compensation of the ambient magnetic field.

The optimal dimensions of the parts that consist the sensing element, as well as the position of the Hall sensors, were calculated using Finite Element Analysis (FEA) software. The simulation results and the dimensions of the sensing element are shown in Fig. 10 and Fig. 11, respectively.

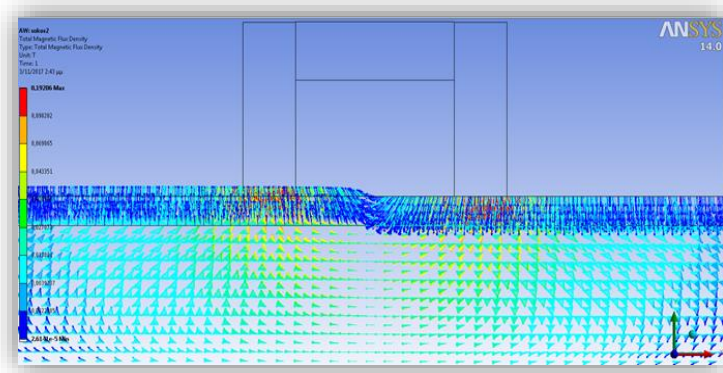


Fig. 10. Analysis of total magnetic flux density between the sensing element and the ferromagnetic coupon, calculated by FEA software.

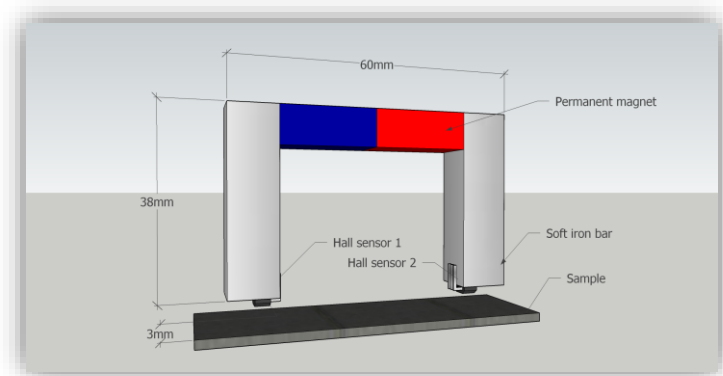


Fig. 11. Dimensions of the parts consisting the sensing element.

Having determined the location of the defective spots, stress rehabilitation methods can be used to treat them. Afterwards, the device can be used as a feedback system, to evaluate the result and confirm the rehabilitation success.

7.2.3 The sensor

The main goal of this work has been to develop a low-cost portable device, which can be used for on-site measurements, combined with a stress annihilation system. In order to achieve this, a device consisting of two parts, a transmitter and a receiver, was developed. Both parts are portable and communicate wirelessly. The transmitting device, including the sensing element, is placed above the under-test ferromagnetic coupon. The receiving device can be placed anywhere in a maximum range of 100m, depending on the obstacles between them.

Apart from the sensing element, the transmitter includes the required electronics to supply the sensors, receive their output signal and calculate the result. More specifically, the transmitting device includes a microcontroller (ATmega328P), two Hall sensors (SS49E), a Radio Frequency (RF) transceiver (nRF24L01), a Bluetooth transceiver (HC-05), an Analog-to-Digital Converter (ADC) (ADS1115) and a temperature sensor (TMP36). A PCB board was designed and manufactured, containing all the above-mentioned electronics. The device is battery powered, using a 9V rechargeable battery. Between the sensing element and the electronics' board, a mu-metal shielding separator was placed, to protect the electronics from undesired magnetic interference. The design, as well as the actual transmitting device, are shown in Fig. 12 and Fig. 13, respectively.

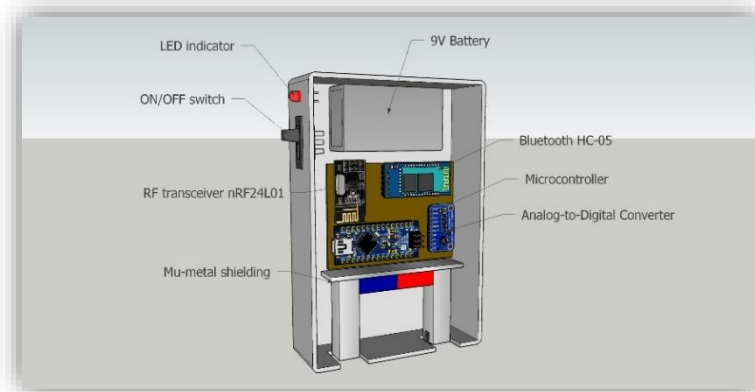


Fig. 12. Design of the transmitting device.



Fig. 13. The actual transmitting device.

Each Hall sensor is supplied by 5V, generating a voltage output which is linearly proportional to the detected magnetic flux density. Afterwards, the Hall sensors' output voltages are directed to the ADC, which can provide a resolution of 16 bits, instead of the 10-bit resolution of the ADC which is integrated in the ATmega328P microcontroller. Finally, the two digital values, corresponding to the outputs of the two Hall sensors, are received by the microcontroller and converted to magnetic flux density values in mT. The conversion is based on three parameters: the sensors' calibration data, the ambient temperature and the battery voltage level. The first parameter can be obtained from the sensor's datasheet, but it has been also verified using a calibration device, previously developed in our laboratory. The parameter of temperature variation is also important in many cases. Although the specific type of Hall sensors is not significantly affected by temperature variations, this parameter was also taken into account, using the included temperature sensor. Finally, it was necessary to take into consideration the voltage level of battery that supplies the device. A lower battery voltage level may be sufficient for the device's operation, but it can also lead to incorrect measurements, due to the use of a lower voltage reference. Additionally, in order to adjust the measurements regarding the initial state of the material under-test, the value of the initial measurement, received on each activation of the device, is used as an offset value during measurements.

The final result is then transmitted to the receiving device, via the RF transmitter. Alternatively, the result can be transmitted via Bluetooth to any compatible device (e.g. smartphone, tablet, or laptop). In order to avoid unnecessary battery consumption in case that Bluetooth communication is not used, its power supply can be disabled through a serial command. The two communication methods (RF and Bluetooth) were chosen in order to cover a wide field of applications. The RF method is fast, simple and effective, providing a range of approximately 100m. On the other hand, Bluetooth communication lacks regarding its range, but offers the ability to transmit the results easily in every compatible device. Wi-Fi communication protocol could also be implemented, but it was considered unsuitable for the specific application, offering medium transmission range, high power consumption and complexity.

The receiving device includes a microcontroller (ATmega328P), an RF receiver (nRF24L01) and a 16x2 liquid crystal display (LCD) using the I²C communication protocol. Similar to the transmitter, it is also battery powered, using a 9V rechargeable battery. The transmitted signal is obtained by the RF receiver and is sent to the microcontroller. The result is shown on the LCD. The design, as well as the actual receiving device, are shown in Fig. 14 and Fig. 15, respectively.

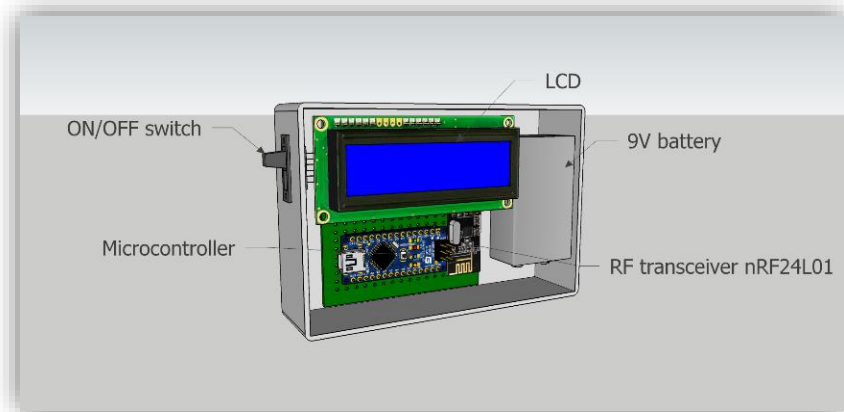


Fig. 14. Design of the receiving device.

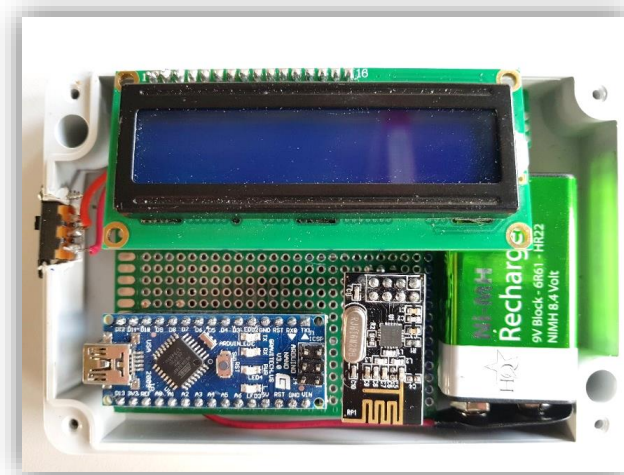


Fig. 15. The actual receiving device.

7.2.4 Measurements and Results

7.2.4.1 Surface Measurements

As proof of principle, coupons of electrical steel were measured using the developed device. In Fig. 16, the results of three coupons that were in a different state of corrosion, resulting in different surface magnetic permeability values, are shown.

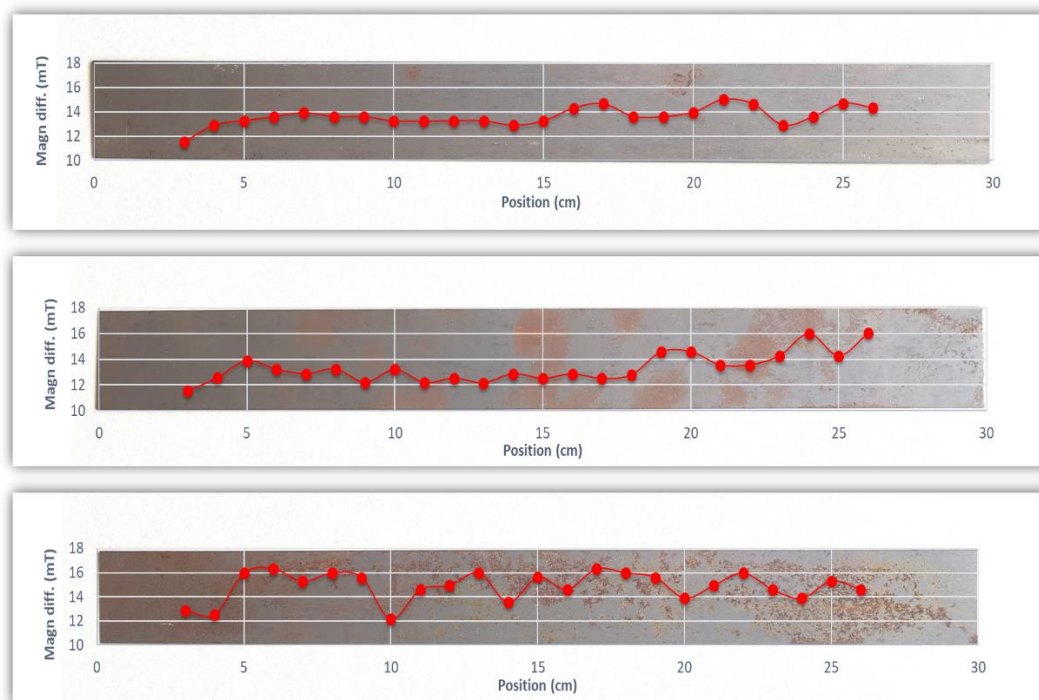


Fig. 16. Results of magnetic flux density measurements for different spots on the 3 coupons.

As it is shown in Fig. 16, the background of each plot is a photograph of the actual measured coupon, where each spot corresponds to the location of measurement. It is obvious that the increase of the corrosion of the coupons leads to an increase of the measurement's value. This is the expected result: As the surface magnetic permeability decreases due to corrosion, the propagated magnetic flux is reduced and the magnetic flux density due to the permanent magnet, measured by the Hall sensors, is increased. Moreover, the measurement of surface magnetic permeability offers the ability to obtain the results fast, due to the small penetration depth that is required. The calculation and the transmission of the final values are executed in high speed, too. As a result, the device, mounted on a remotely controlled vehicle, can

cover long distances in a small time period, while taking measurements of the material under test.

7.2.4.2 Stress Measurements

The second type of measurements was obtained using a tensile/compressive stress machine. An electrical steel laminate was used as a testing coupon. A force gauge meter was used to measure the stress applied to the sample. The sensor is placed on the coupon, as it is shown in Fig. 17.

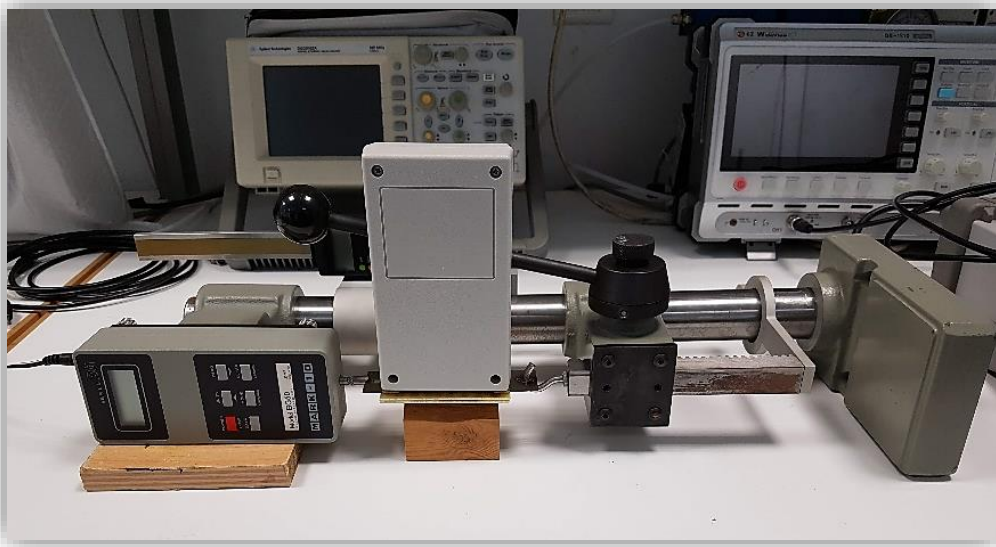


Fig. 17. The stress measurement arrangement.

Due to its auto-calibration function, the output values are not affected by the existing magnetic field. The results of tensile and compressive stress measurements are shown in Fig. 18 and Fig. 19, respectively. Horizontal axis represents the applied force, while vertical axis represents the offset of the flux measured at each stress level with respect to the magnetic flux measured initially.

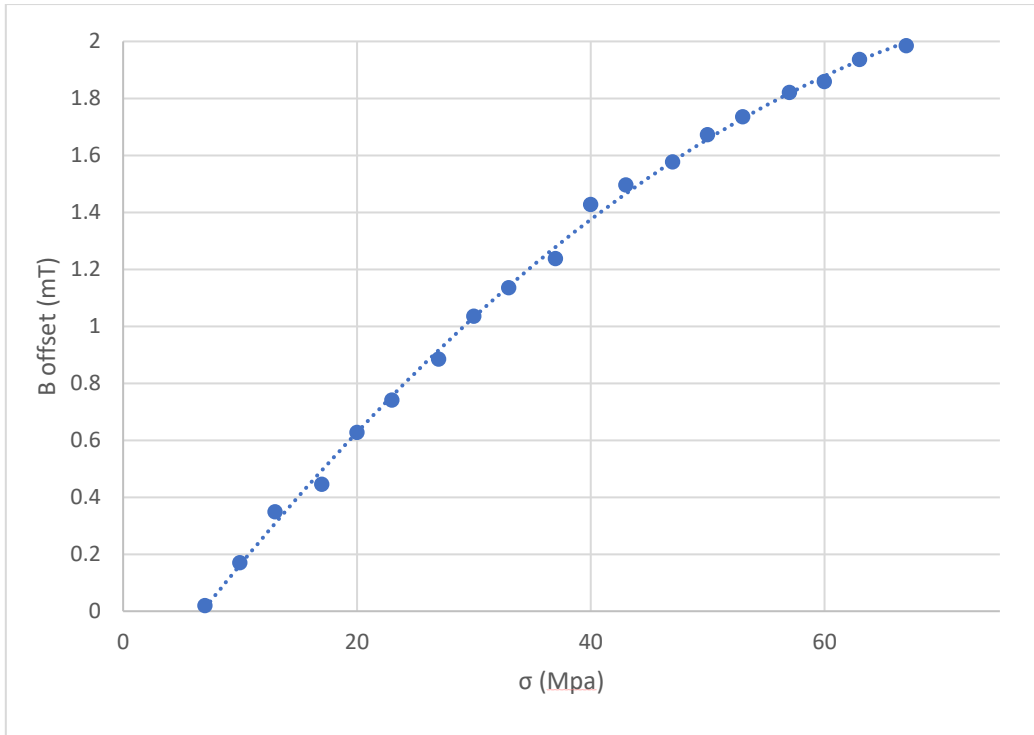


Fig. 18. Results of magnetic flux density measurements regarding the applied tensile stress.

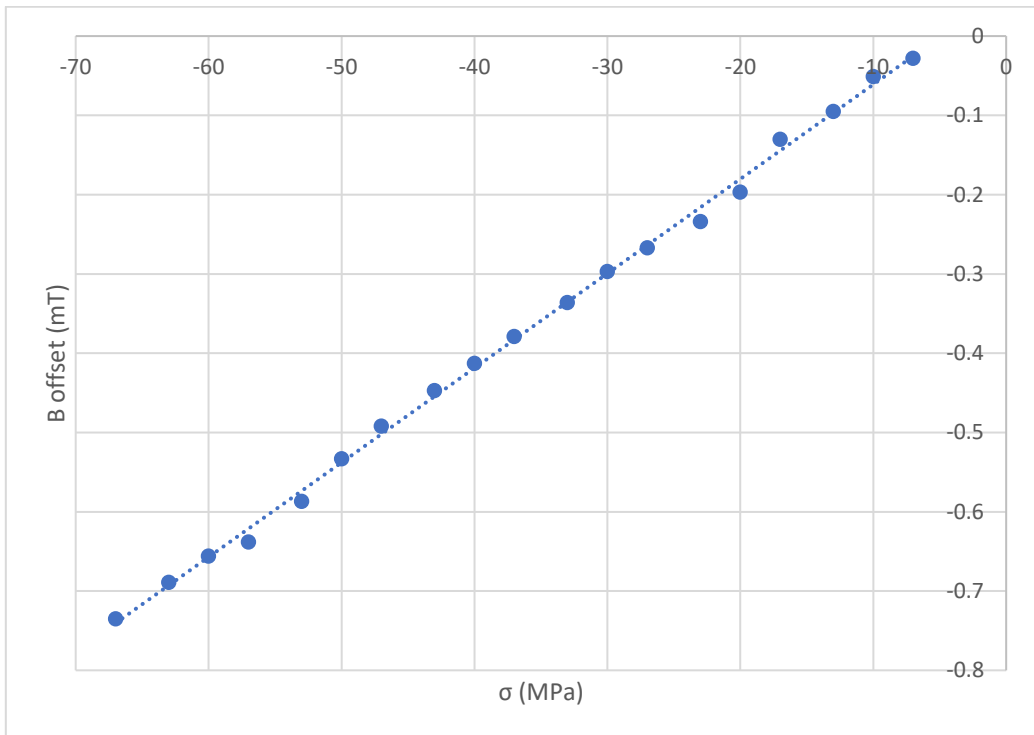


Fig. 19. Results of magnetic flux density measurements regarding the applied compressive stress.

7.2.5 Conclusions

The proposed method and the developed device are able to provide accurate results, while obtaining high-speed measurements. Unlike many other non-destructive techniques, there is no need for special preparation of the samples, before using the device. Furthermore, being fully portable, it can be used for on-site acquisition of the final results. The received data can be constantly wirelessly transmitted to the receiver or even stored on a Bluetooth-compatible device. Despite its low cost, the device remains accurate, small, light and energy efficient.

The main advantages of the device are that there is no need to directly calculate magnetic permeability values, or to magnetically shield the space where measurements are held. This is due to the differential measurements obtained through the closed loop formed by the yoke, the Hall sensors and the ferromagnetic material. Having the results of the differential measurements, it is possible to act immediately, in order to cure the defective regions, by using RF heating techniques.

Further work regarding the measurements includes real-time calibration of the sensor, based on data for each sample, provided by the corresponding magnetic stress calibration curves. This will allow the real time conversion of the flux differences to stress levels.

The uncertainty of the results can also be improved, by adding more sensors to the device. For example, a position sensor can provide data about the distance of the sensor relative to the coupon under test. The same device can be placed on a small remotely controlled vehicle (RCV), being able to travel fast on materials, while obtaining measurements.

Finally, regarding the device's data transmission, the addition of a mesh network approach could be tested. Using a mesh network, it is possible to create a network of sensors in distant and inaccessible areas (e.g. ship's hull), where RF, Bluetooth, Wi-Fi and any other communication protocol would fail.

Ανακοινώσεις σε Συνέδρια

- **Σ. Αγγελόπουλος**, Α. Κτενά, Ε. Χριστοφόρου, «Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen», 8^ο Εθνικό Συνέδριο Μη Καταστροφικών Ελέγχων, Ελληνική Εταιρεία Μη Καταστροφικών Ελέγχων, Αθήνα, 8-9 Μαΐου 2015.
- **S. Aggelopoulos**, Χ. Vourna, Α. Ktena, Ε. Hristoforou, “A new magnetic sensor for stress measurements”, International Scientific Conference eRA-10, Technological Education Institute of Piraeus, Piraeus, Greece, September 23-25, 2015.
- **S. Aggelopoulos**, “Design and development of a new magnetic sensor for stress measurements”, 5th International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (IC-MAST 2015), Μύκονος, Greece, September 27-30, 2015.
- **Σ. Αγγελόπουλος**, Ε. Χριστοφόρου, «Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων», 6^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων – HellasLab, Αθήνα, 13-14 Μαΐου 2016.
- Ε. Hristoforou, Α. Ktena, Ρ. Vourna, Ε. Mangiorou, **S. Aggelopoulos**, Ρ. Svec, C. Hervoche, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, “Monitoring Magnetic Property Tensor Across the Weld at the Same Points where Stress Tensor was Monitored”, Munich, Germany, June 13-17, 2016.
- Ε. Hristoforou, Α. Ktena, Ρ. Vourna, Ε. Mangiorou, **S. Aggelopoulos**, Ρ. Svec, C. Hervoche, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, “Analysis and Stress Determination in Welded Samples”, Munich, Germany, June 13-17, 2016.
- Ε. Hristoforou, Α. Ktena, Ρ. Vourna, Ε. Mangiorou, **S. Aggelopoulos**, Ρ. Svec, C. Hervoche, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, “Universality of the Calibration Curves - the Universality Law”, Munich, Germany, June 13-17, 2016.
- Ε. Hristoforou, Α. Ktena, Ρ. Vourna, Ε. Mangiorou, **S. Aggelopoulos**, Ρ. Svec, C. Hervoche, 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016, “State of the

Art on Magnetic Properties – Stress Correlation in Steels”, Munich, Germany, June 13-17, 2016.

- **Σ. Αγγελόπουλος**, Π. Βουρνά, Α. Κτενά, Ε. Χριστοφόρου, «Διάταξη διακρίβωσης μαγνητομέτρων μέτρησης συνεχούς μαγνητικού πεδίου», 9^ο Εθνικό Συνέδριο Μη Καταστροφικών Ελέγχων, Ελληνική Εταιρεία Μη Καταστροφικών Ελέγχων, Αθήνα, 11 Νοεμβρίου 2016.
- **S. Angelopoulos**, A. Ferraro, E. Hristoforou, “Design of a Magneto-CardioGram smart sensor”, 1st Hellenic Chinese Congress on Health, Greek-Chinese Institute of Development (EKINA), Athens, 11-14 May, 2017.
- **S. Angelopoulos**, A. Ferraro, N. Stefanakis, E. Hristoforou, “Implementation of IR imaging technology in a smart home”, 1st Hellenic Chinese Congress on Health, Greek-Chinese Institute of Development (EKINA), Athens, 11-14 May, 2017.
- **S. Angelopoulos**, “Development of a surface magnetic permeability sensor for non-destructive testing”, International Scientific Conference eRA-12, Technological Education Institute of Piraeus, Piraeus, Greece, October 24-26, 2017.
- **S. Angelopoulos**, P. Vourna, A. Ktena, E. Hristoforou, “Advances in residual stress tensor distribution monitoring in ferromagnetic steels”, C-MAC Days 2017, Athens, Greece, November 20-23, 2017.
- **S. Angelopoulos**, A. Ktena, E. Hristoforou, “A new wearable magnetic cardiograph based on the giant magneto-impedance effect”, C-MAC Days 2017, Athens, Greece, November 20-23, 2017.
- **Σ. Αγγελόπουλος**, Π. Βουρνά, Α. Κτενά, Ε. Χριστοφόρου, «Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων», 7^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων – HellasLab, Αθήνα, 11-12 Μαΐου 2018.
- **S. Angelopoulos**, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, E. Hristoforou, “Design and development of a new magnetometer calibration device”, 12th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, Athens, July 1-4, 2018.

- **S. Angelopoulos**, G. Banis, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, E. Hristoforou, “Magnetic Permeability Measurement Device Based on Hall Effect”, 12th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, Athens, July 1-4, 2018.
- **S. Angelopoulos**, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, E. Hristoforou, “Development of a magnetometer calibration device”, 1st International Conference on Welding & NDT of the Hellenic Society of NDT (HSNT) and the Welding Greek Institute, Athens, October 22-23, 2018.
- **S. Angelopoulos**, G. Banis, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, E. Hristoforou, “Magnetic Permeability Measurement Device Based on Hall Effect”, 1st International Conference on Welding & NDT of the Hellenic Society of NDT (HSNT) and the Welding Greek Institute, Athens, October 22-23, 2018.
- **S. Angelopoulos**, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, E. Hristoforou, A.G. Mamalis, “Giant Magneto-impedance Sensor for Steel Health Monitoring”, Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS 2018), Rio De Janeiro, November 4-7, 2018.
- **S. Angelopoulos**, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris, E. Hristoforou, A.G. Mamalis, “Magnetic Permeability Measurement Device Based on Hall Effect”, Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS 2018), Rio De Janeiro, November 4-7, 2018.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια

- **S. Angelopoulos**, “Design and development of a magnetometer calibration device”, IOP Conf. Series: Journal of Physics, vol. 939, 2017.
- N. Hadjigeorgiou, **S. Angelopoulos**, E. Hristoforou and P. Sotiriadis “Flux-Gate vs. Anisotropic Magneto Resistance Magnetic Sensors Characteristics in Closed-Loop Operation”, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Physical and Mathematical Sciences, vol. 11(8), pp. 526, 2017.
- **S. Aggelopoulos**, “Design and development of a new magnetic sensor for stress measurements”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 108, 2016.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά

- **S. Angelopoulos**, P. Vourna, A. Ktena, P. Tsarabaris and E. Hristoforou, “Design and development of a new magnetometer calibration device”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55(1), 2018.
- **S. Angelopoulos**, D. Misiaris, G. Banis, K. Liang, P. Tsarabaris, A. Ktena and E. Hristoforou, “Magnetic Permeability Measurement Device Based on Hall Effect”, Measurement (υπό κρίση).
- K. Liang, **S. Angelopoulos**, G. Lepipas, P. Tsarabaris, A. Ktena, X. Bi and E. Hristoforou “Sensor to monitor localized stresses on steel surfaces using the magnetostrictive delay line technique”, Sensors, vol. 19, 2019.