



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Ανάπτυξη και Βαθμονόμηση Μαγνητόμετρου Πύλης – Ροής
(fluxgate)**

Διπλωματική εργασία

Κωνσταντίνος Κοκκινέλης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη και Βαθμονόμηση Μαγνητόμετρου Πύλης – Ροής (fluxgate)

Διπλωματική εργασία

Κωνσταντίνος Κοκκινέλης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή την Νοεμβρίου 2017

.....
Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παύλος – Πέτρος Σωτηριάδης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δημήτριος Τσαμάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

.....

Κωνσταντίνος Κοκκινέλης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Κοκκινέλης 2017.

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 παρών μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την 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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο για την βοήθειά του στην διάρκεια της εργασίας, την καθοδήγησή του καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να εργαστώ και να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υποψήφιο διδάκτορα Σπύρο Αγγελόπουλο για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, τον χρόνο που αφιέρωσε και τις συμβουλές και γνώσεις που μου μετέδωσε και συνέλαβαν τα μέγιστα στην προσπάθειά μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους και την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και υποστήριξή τους τόσο κατά τη διάρκεια της εργασίας όσο και στη διάρκεια όλων αυτών των χρόνων.

Κωνσταντίνος Κοκκινέλης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία υλοποιείται η ανάπτυξη και βαθμονόμηση ενός μαγνητόμετρου πύλης – ροής (fluxgate). Κατασκευάζουμε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για την διέγερση του αισθητήρα fluxgate και χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο διενεργούμε τις μετρήσεις για υπολογισμό μετατόπισης-θέσης και υπολογισμό μονοδιάστατου DC μαγνητικού πεδίου.

Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα διέγερσης αποτελείται από δύο στάδια, που υλοποιήθηκαν με χρήση τελεστικών ενισχυτών LM741 και παράγεται τριγωνικός παλμός 1 kHz, ο οποίος αποτελεί το σήμα διέγερσης που θα δοθεί στον αισθητήρα. Εν συνεχεία, λαμβάνουμε το σήμα εξόδου του αισθητήρα, δηλαδή την επαγόμενη λόγω του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου τάση, και με αυτό γίνονται οι μετρήσεις και η βαθμονόμηση του μαγνητόμετρου πύλης - ροής.

Επομένως, η εργασία είχε τρία κομμάτια ενασχόλησης: Αρχικά την εύρεση και κατασκευή κατάλληλου ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης, εν συνεχεία την μελέτη και υλοποίηση του αισθητήρα fluxgate και τέλος την σύνδεσή τους ως ενιαία διάταξη για την λήψη μετρήσεων και τον καθορισμό λειτουργίας του αισθητήρα.

Λέξεις κλειδιά

Μαγνητόμετρο, αισθητήρας fluxgate, μαγνητικό πεδίο, κύκλωμα διέγερσης, διακρίβωση μαγνητομέτρων.

ABSTRACT

In this thesis, it is implemented the development and calibration of a fluxgate magnetometer. We manufacture an electronic circuit for the excitation of the fluxgate sensor and by using the sensor constructed in the laboratory, we perform the measurements for position – shift calculation and DC magnetic field in one dimension.

More specifically, the excitation circuit consists of 2 stages which are implemented with the use of LM741 amplifiers. A 1kHz triangular waveform is produced, which is the excitation of the sensor. Then, we receive the output signal from the sensor, that is the voltage induced by the external magnetic field, which we use to conduct the measurements and perform the magnetometer calibration.

Therefore, this thesis consists of three parts: Initially, the design and development of a suitable electronic circuit, then the study and implementation of a fluxgate sensor and finally the connection of these parts as a single device, in order to determine the operation of the sensor.

Keywords

Magnetometer, fluxgate sensor, magnetic field, excitation circuit, magnetometer calibration.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	viii
ABSTRACT	x
Κατάλογος σχημάτων	xiv
Κατάλογος πινάκων	xv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός διπλωματικής	1
1.2 Δομή εργασίας	1
1.3 Ιστορικά στοιχεία των fluxgates	2
1.4 Πεδία εφαρμογής μαγνητόμετρων και πλεονεκτήματα	4
1.5 Άλλα είδη μαγνητόμετρων	5
2 Θεωρητικό μέρος	9
2.1 Μαγνητικά πεδία-Θεωρία μαγνητισμού	9
2.1.1 Νόμοι μαγνητικών πεδίων	9
2.1.2 Μαγνητική επαγωγή	10
2.1.3 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	12
2.1.4 Μαγνητικό δίπολο - μαγνητική διπολική ροπή	13
2.1.5 Νόμος Gauss	14
2.1.6 Εξισώσεις Maxwell	14
2.1.7 Υπολογισμοί σε βασικά μαγνητικά πεδία	16
2.2 Θεωρία Μαγνήτισης	18
2.2.1 Ορισμός	18
2.2.2 Μαγνητική επαγωγή και μαγνήτιση	19
2.2.3 Μαγνήτιση κορεσμού	20
2.2.4 Μαγνητική διαπερατότητα και επιδεκτικότητα	20
2.3 Μαγνητόμετρα πύλης-ροής (fluxgate)	22
2.3.1 Αρχή λειτουργίας	22
2.3.2 Μαγνήτιση υλικού του πυρήνα	26
2.3.3 Κατηγορίες fluxgate	28
3 Πειραματικό μέρος	31
3.1 Κύκλωμα διέγερσης	31
3.1.1 1 ^ο Ηλεκτρονικό κύκλωμα	32
3.1.2 2 ^ο Ηλεκτρονικό κύκλωμα	42
3.2 Αισθητήρας fluxgate	50
3.3 Διαδικασία μετρήσεων – μετρήσεις – αποτελέσματα	54

3.3.1 Μέτρηση θέσης.....	55
3.3.2 Μέτρηση πεδίου	58
4 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελέτη	71
4.1 Συμπεράσματα	71
4.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	72
5 Βιβλιογραφία.....	73

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1	Το μαγνητόμετρο με πυρήνα δακτυλίου των Aschenbrenner και Goubau.....	2
Σχήμα 2	Αριστερά τύπου Forster με 2 πηνία λήψης. Δεξιά τύπου Vaquier με 1 πηνίο λήψης.	3
Σχήμα 3	Το εύρος που εφαρμόζονται τα πιο κύρια μαγνητόμετρα.....	6
Σχήμα 4	Κατασκευή και λειτουργία fluxgate.....	22
Σχήμα 5	Μαγνητικά διανύσματα σε τυχαίες θέσεις.....	23
Σχήμα 6	Μαγνητικά διανύσματα προσανατολισμένα στην ίδια κατεύθυνση.....	23
Σχήμα 7	Ιδανικές κυματομορφές για fluxgate μαγνητόμετρα.	24
Σχήμα 8	Αρχή λειτουργίας αισθητήρα fluxgate.....	25
Σχήμα 9	Τυπικός βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.	27
Σχήμα 10	Κατασκευή παράλληλου (A) και ορθογώνιου (B) fluxgate.....	28
Σχήμα 11	1 ^ο κύκλωμα διέγερσης.	32
Σχήμα 12	Κύκλωμα χρονιστή NE555.....	33
Σχήμα 13	Προσομοίωση 1 ^{ου} σταδίου.....	34
Σχήμα 14	Πραγματική έξοδος 1 ^{ου} σταδίου.	35
Σχήμα 15	Κύκλωμα ολοκληρωτή.	36
Σχήμα 16	Προσομοίωση 2 ^{ου} σταδίου.....	37
Σχήμα 17	Πραγματική έξοδος 2 ^{ου} σταδίου.	37
Σχήμα 18	Κύκλωμα ενισχυτή σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.....	38
Σχήμα 19	Προσομοίωση 3 ^{ου} σταδίου.....	39
Σχήμα 20	Πραγματική έξοδος πλακέτας.....	39
Σχήμα 21	Σχηματικό στο Eagle 1 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης.....	40
Σχήμα 22	Σχέδιο πλακέτας στο Eagle 1 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης.....	41
Σχήμα 23	Άνω όψη 1 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης κατασκευασμένου σε πλακέτα.	41
Σχήμα 24	Κάτω όψη 1 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης κατασκευασμένου σε πλακέτα.	42
Σχήμα 25	Κύκλωμα διέγερσης.	43
Σχήμα 26	Ταλαντωτής με LM741.	43
Σχήμα 27	Προσομοίωση σημάτων εξόδου ταλαντωτή.	45
Σχήμα 28	Προσομοίωση τριγωνικής εξόδου ταλαντωτή.....	45
Σχήμα 29	Έξοδος ταλαντωτή σε παλμογράφο.....	46
Σχήμα 30	Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή.....	47
Σχήμα 31	Προσομοίωση 2 ^{ου} σταδίου.....	48
Σχήμα 32	Πραγματική έξοδος 2 ^{ης} πλακέτας.	48
Σχήμα 33	Σχηματικό στο Eagle 2 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης.....	49
Σχήμα 34	Σχέδιο πλακέτας στο Eagle 2 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης.....	49
Σχήμα 35	Άνω όψη 2 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης υλοποιημένου σε πλακέτα.....	50
Σχήμα 36	Κάτω όψη 2 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης υλοποιημένου σε πλακέτα.	50
Σχήμα 37	Δομή αισθητήρα fluxgate.	51
Σχήμα 38	Το μαγνητόμετρο πύλης-ροής που χρησιμοποιήθηκε.	52
Σχήμα 39	Έξοδος αισθητήρα με 1 ^ο κύκλωμα διέγερσης.	52
Σχήμα 40	Έξοδος αισθητήρα με 2 ^ο κύκλωμα διέγερσης.	53
Σχήμα 41	Συνολική συνδεδεμένη διάταξη.	54
Σχήμα 42	Αισθητήρας fluxgate σε χιλιοστομετρικό χαρτί.....	56
Σχήμα 43	Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης αισθητήρα fluxgate.....	57
Σχήμα 44	Σωληνοειδές πηνίο βαθμονόμησης.....	59
Σχήμα 45	I/V Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ορθής πόλωσης.....	62

Σχήμα 46	I/V Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ανάστροφης πόλωσης.	62
Σχήμα 47	I/V Συγκεντρωτική χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate	63
Σχήμα 48	V/B Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ορθής πόλωσης.	64
Σχήμα 49	V/B Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ανάστροφης πόλωσης.	64
Σχήμα 50	B/V Συγκεντρωτική χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate.....	65
Σχήμα 51	Έξοδος αισθητήρα με 1 ^ο κύκλωμα διέγερσης για θετική τιμή DC ρεύματος.	67
Σχήμα 52	Έξοδος αισθητήρα με 1 ^ο κύκλωμα διέγερσης για αρνητική τιμή DC ρεύματος....	67
Σχήμα 53	I/RTD χαρακτηριστική fluxgate με χρήση 1 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης.	69
Σχήμα 54	B/RTD χαρακτηριστική fluxgate με χρήση 1 ^{ου} κυκλώματος διέγερσης.....	69

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1	Διάγραμμα με τομείς εφαρμογής fluxgate από έρευνα του 2013-2014.	5
Πίνακας 2	Χαρακτηριστικά πηνίων fluxgate.....	51
Πίνακας 3	Αποτελέσματα για βαθμονόμηση μαγνητόμετρου ως αισθητήρα μέτρησης θέσης.	56
Πίνακας 4	Χαρακτηριστικά σωληνοειδούς αγωγού.	58
Πίνακας 5	Ρεύμα και πεδίο με ορθή πολικότητα.	60
Πίνακας 6	Ρεύμα και πεδίο με ανάστροφη πολικότητα.	61
Πίνακας 7	Μέτρηση πεδίου με 1 ^ο κύκλωμα διέγερσης.	68

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε στα πλαίσια του προπτυχιακού κύκλου σπουδών στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Ε.Μ.Π. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη του ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης και η βαθμονόμηση ενός μαγνητικού αισθητήρα πύλης-ροής (fluxgate).

Το κίνητρο της εργασίας ήταν ότι δόθηκε η δυνατότητα για εξοικείωση με δύο ενδιαφέροντα κομμάτια, την κατασκευή και χρησιμοποίηση ενός μαγνητομέτρου fluxgate, καθώς και την σχεδίαση και κατασκευή ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος διέγερσης του αισθητήρα, ώστε να αποφευχθεί η χρήση γεννήτριας σήματος.

Η απλή κατασκευή καθώς και η ευκολία στην χρήση λόγω του μικρού μεγέθους τόσο του αισθητήρα όσο και του κυκλώματος διέγερσης σε συνδυασμό με την μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων που μπορούν να εξαχθούν, αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα για την ενασχόληση με το αντικείμενο των μαγνητόμετρων πύλης-ροής. Επιπλέον ισχυρό κίνητρο αποτέλεσε η ευκαιρία για εμβάθυνση στην σχεδίαση αναλογικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και η πληθώρα εφαρμογών που έχουν.

1.2 Δομή εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε 3 κυρίως κεφάλαια στα οποία αναπτύσσεται το θέμα της διπλωματικής και αναλύεται σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί το θεωρητικό μέρος της εργασίας και περιέχει την εμβάθυνση στην θεωρία του μαγνητισμού και των μαγνητικών πεδίων. Γίνεται αναφορά στις αρχές μαγνήτισης στις οποίες βασίζεται το μαγνητόμετρο πύλης-ροής και λεπτομερής ανάλυση του αισθητήρα fluxgate σε θεωρητικό επίπεδο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον σχεδιασμό και κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει ακόμα την διαδικασία μετρήσεων, τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την λειτουργία της πειραματικής διάταξης.

Το τέταρτο κεφάλαιο, συνοψίζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πορεία και πραγματοποίηση της εργασίας και από τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Περιέχει τέλος προτάσεις για μελλοντική εργασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής και την βελτιστοποίησή τους.

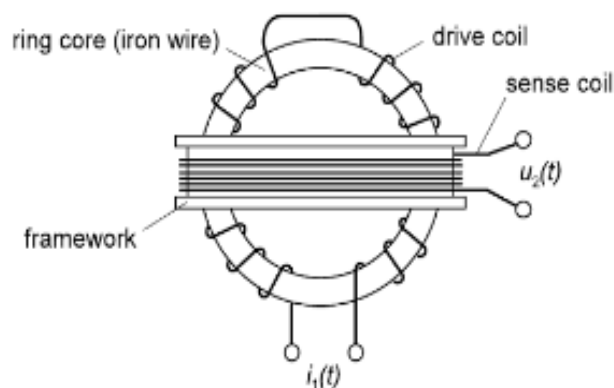
1.3 Ιστορικά στοιχεία των fluxgates

Τα fluxgates ή μαγνητόμετρα πύλης-ροής είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ισχύος και της κατεύθυνσης μαγνητικών πεδίων. Η βασική αρχή λειτουργίας τους η οποία θα επεξηγηθεί παρακάτω είναι ο κορεσμός των μαγνητικών υλικών.

Το πρώτο μαγνητόμετρο ικανό να μετρήσει την ένταση του μαγνητικού πεδίου εφευρέθηκε το 1833 από τον Carl Friedrich Gauss. Ήταν ένα όργανο που αποτελούνταν από μία σταθερή μπάρα μαγνήτισης αιωρούμενη οριζόντια από μια χρυσή ίνα. Η διαφορά στις ταλαντώσεις όταν μαγνητιζόταν και απομαγνητιζόταν επέτρεψε στον Gauss να υπολογίσει την ισχύ του μαγνητικού πεδίου της γης.

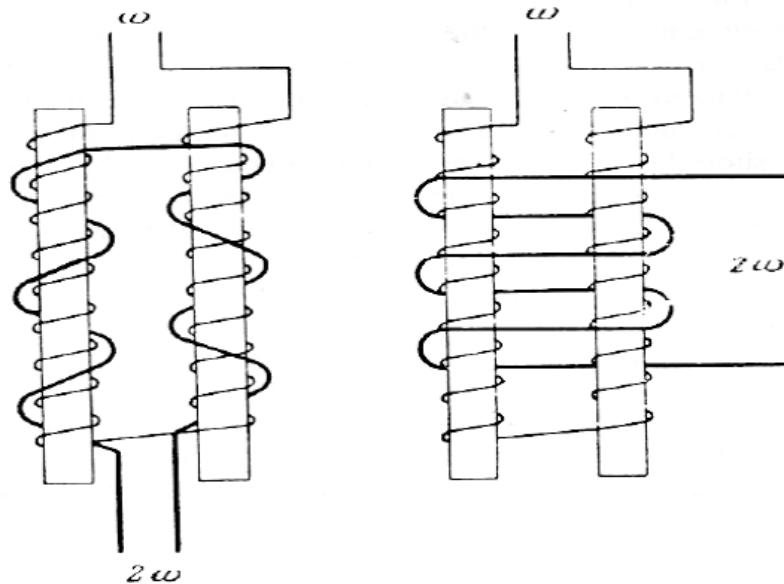
Όσον αφορά τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής αναπτύχθηκαν από την δεκαετία του 1930 και μετά και χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση το σχήμα του πυρήνα που χρησιμοποιούν. Τα μαγνητόμετρα με πυρήνα σε σχήμα ράβδου (rod core) και αυτά με πυρήνα σε σχήμα δακτυλίου (ring core) [1].

Συγκεκριμένα εφευρέθηκαν το 1936 από τους H. Aschenbrenner και G. Goubau και μία από τις πρώτες χρήσεις τους ήταν ο εντοπισμός των υποβρυχίων κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο.



Σχήμα 1 Το μαγνητόμετρο με πυρήνα δακτυλίου των Aschenbrenner και Goubau.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1 ο πυρήνας είναι σε σχήμα δακτυλίου ενώ από την δεκαετία του '30 και μετά τα fluxgates που χρησιμοποιούν ράβδο εξελίχθηκαν περισσότερο και χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, κατά Forster και κατά Vaquier.



Σχήμα 2 Αριστερά τύπου Forster με 2 πηνία λήψης. Δεξιά τύπου Vaquier με 1 πηνίο λήψης.

Τα fluxgates με πυρήνα σε σχήμα δακτυλίου αναπτύχθηκαν εκ νέου και έγιναν πάλι ανταγωνιστικά μετά το 1960.

Γενικά τα fluxgates είναι κατάλληλα για εφαρμογές μέτρησης μαγνητικού πεδίου και χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα καθώς μπορούν να επιτύχουν ανάλυση μέχρι και 0,1 nT και ακρίβεια μέτρησης 1 nT [2].

Ακόμα και κατασκευές fluxgate ανοιχτού βρόχου και χαμηλού κόστους είναι ικανές να μετρήσουν σε θερμοκρασία δωματίου μαγνητικά πεδία μικρότερα του 0,01 mT [3].

Όσον αφορά μαγνητόμετρα κλειστού βρόχου, όπου το ρεύμα εξόδου ανατροφοδοτείται στην είσοδο μέσω της ανάδρασης, έχουν αναπτυχθεί πάρα πολύ τα τελευταία χρόνια καθώς επιτυγχάνουν μεγάλη μείωση στον θόρυβο. Χρόνο με το χρόνο γίνονται βελτιώσεις στην κατασκευή τους και πλέον έχουν επιτευχθεί τιμές

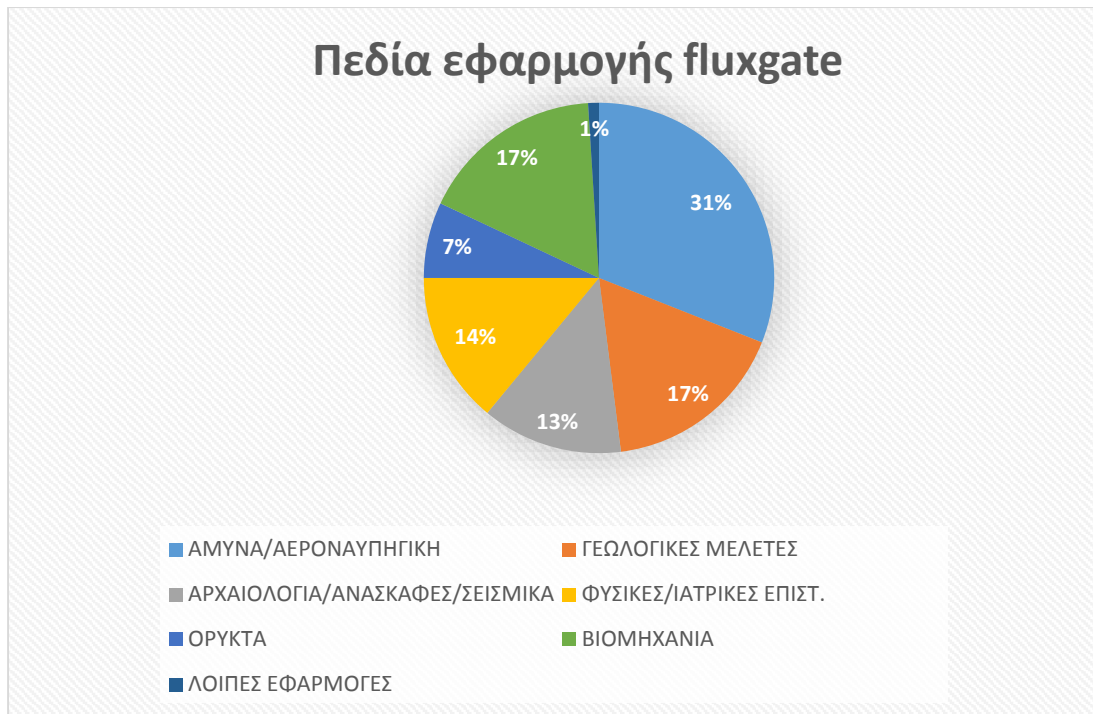
θορύβου κοντά στο $1 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ανάλογα πάντα και με το μήκος του πυρήνα του αισθητήρα[4].

1.4 Πεδία εφαρμογής μαγνητόμετρων και πλεονεκτήματα

Τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής όπως είδαμε χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τον εντοπισμό υποβρυχίων κατά το Β΄ Π.Π. Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξή τους έχουν καταστεί χρήσιμα πλέον σε πληθώρα εφαρμογών όπως [3],[8]:

- **Διαστημικός και υποβρύχιος εξοπλισμός**, μέσω των μαγνητικών πυξίδων για την μέτρηση προσανατολισμού και θέσης τόσο σε δορυφόρους όσο και σε μη επανδρωμένα υποβρύχια.
- **Παρατήρηση πεδίων και αξιολόγηση μετρήσεων** όπου παρέχουν έλεγχο για την ασφάλεια και υγιεινή ηλεκτρικών διατάξεων, μηχανών, μαγνητικών τομογράφων, κ.λπ.
- **Εντοπισμό μαγνητικών ανωμαλιών**, γεγονός που βοηθάει στην πλοήγηση και ασφάλεια αεροπλάνων, υποβρυχίων, κ.λπ.
- **Συστήματα ασφαλείας**, με μεγάλη χρήση σε στρατιωτικά ζητήματα όπως η ασφάλεια περιμέτρου, ο έλεγχος συνόρων μέσω μαγνητικών θυρών ή ακόμα και σε φυλακές.
- **Τοπογραφία και γεωφυσική στην επιφάνεια της γης**, γεγονός που βοηθάει στην εξέλιξη κλάδων όπως η εγκληματολογία, η αρχαιολογία καθώς και η εξερεύνηση και εντοπισμός πολύτιμων μετάλλων.
- **Αναλύσεις τεκτονικών πλακών και σεισμικές μελέτες**, με εξαιρετική σημασία για την ασφάλεια και πρόληψη.
- **Ανατομία και μελέτη του ανθρώπινου σώματος.**
- **Μετρήσεις αγωγιμοτήτων και εντοπισμός σωληνώσεων και καλωδίων** σε μεγάλες κατασκευές και σε ισχυρά ρεύματα.

Πιο συγκεκριμένα τα πεδία εφαρμογής των fluxgate παγκοσμίως σε ποσοστιαίες μονάδες με βάση την χρονιά 2013-2014 είναι:



Πίνακας 1 Διάγραμμα με τομείς εφαρμογής fluxgate από έρευνα του 2013-2014.

Όσον αφορά τα πλεονεκτήματα των μαγνητόμετρων πύλης-ροής, τα οποία τα καθιστούν τόσο χρήσιμα και διαδεδομένα είναι:

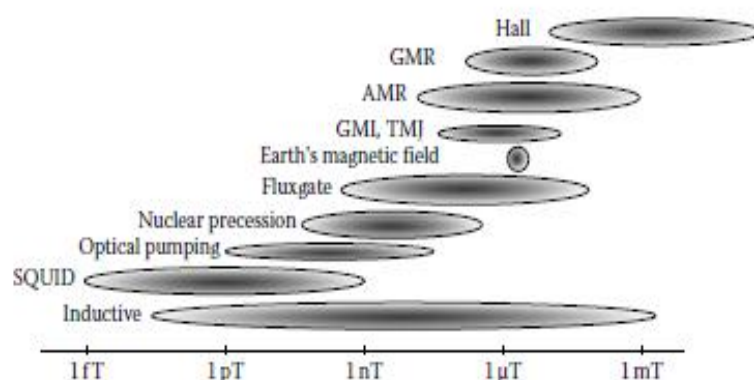
- Η απλή κατασκευή τους
- Το χαμηλό κόστος
- Η υψηλή ευαισθησία
- Ο χαμηλός θόρυβος
- Η θερμική σταθερότητα
- Η μεγάλη αξιοπιστία

1.5 Άλλα είδη μαγνητόμετρων

Πέρα από τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής υπάρχουν και άλλα είδη μαγνητομέτρων που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την ένταση των μαγνητικών πεδίων που θέλουμε να μετρήσουμε. Για παράδειγμα, για πολύ μικρές τιμές πεδίου χρησιμοποιούνται ευρέως οι αισθητήρες SQUID, ενώ για μέσες τιμές εντάσεως μαγνητικού πεδίου

χρησιμοποιούνται τα fluxgates. Γύρω από τις τιμές του μαγνητικού πεδίου της γης πολύ διαδεδομένοι είναι οι αισθητήρες AMR και GMR ενώ για μεγάλες εντάσεις χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά οι αισθητήρες Hall. Τέλος, οι επαγωγικοί αισθητήρες ανταποκρίνονται σε πολύ μεγάλο εύρος μαγνητικών πεδίων, από πολύ ασθενή έως πολύ ισχυρά [5].

Ενδεικτικό είναι το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3 Το εύρος που εφαρμόζονται τα πιο κύρια μαγνητόμετρα.

- **SQUIDS:** Πρόκειται για πολύ ευαίσθητα μαγνητόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν πολύ ασθενή σήματα, όπως για παράδειγμα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του ανθρώπινου σώματος. Με τη χρήση της επαφής Josephson, τα SQUIDS ανιχνεύουν μεταβολές της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας 100δς φορές ασθενέστερες από την ενέργεια που κινεί την βελόνα μιας πυξίδας. Τα μαγνητόμετρα SQUID αποτελούνται από δύο μικροσκοπικούς βρόχους υπεραγωγών που λειτουργούν ως επαφές Josephson, με τους οποίους επιτυγχάνεται υπέρθεση. Τα SQUIDS έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές για δοκιμαστικούς σκοπούς που απαιτούν ιδιαίτερη ευαισθησία, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών, ιατρικών και γεωλογικών εξοπλισμών. Λόγω του ότι μετρούν μεταβολές σε μαγνητικά πεδία με μεγάλη ευαισθησία, δεν είναι απαραίτητο να έρθουν σε επαφή με το σύστημα το οποίο ελέγχουν.

- **Search coils:** Πρόκειται για αισθητήρες επαγωγής, οι οποίοι βασίζονται στον νόμο επαγωγής του Faraday. Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: Τα πηνία που βασίζονται σε πυρήνα αέρα και σε αυτά με πυρήνα σιδηρομαγνητικό. Τα πηνία με σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά είναι λιγότερο σταθερά από αυτά χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Αξίζει να αναφέρουμε μερικές από τις εφαρμογές που βρίσκουν τα πηνία ανίχνευσης. Στη γεωφυσική μετρούν αδύνατους παλμούς του πεδίου της γης για συχνότητες στο εύρος 1mHz έως 1Hz. Στην μεταλλουργική χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση και τη μελέτη των δευτερευόντων μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται μετά από διέγερση, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος Barkhausen. Στην ιατρική, χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και την καταγραφή της κίνησης του ματιού. Τέλος, στο εύρος ακουστικών συχνοτήτων, μπορούν να λειτουργούν σαν μικρόφωνα.
- **Αισθητήρες Hall:** Το φαινόμενο Hall, στο οποίο βασίζονται οι αισθητήρες Hall, είναι γνωστό για πάνω από εκατό χρόνια, αλλά μόνο τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες άρχισε η ευρεία εφαρμογή του. Όταν τοποθετήσουμε σε μαγνητικό πεδίο B ένα ρευματοφόρο πλακίδιο, τότε στα άκρα του αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού (τάση Hall) σε διεύθυνση που είναι κάθετη στο ρεύμα I και στο μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο προκαλείται από την μονομερή απόκλιση που υφίστανται οι φορείς του ρεύματος, εξ αιτίας της δύναμης που δέχονται από το μαγνητικό πεδίο. Η σωστή ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε ένα αγώγιμο πλακίδιο, δίνει πληροφορίες για το πρόσημο των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και για την πυκνότητά τους. Εφαρμογές που αξιοποιούν το φαινόμενο Hall χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος συσκευών, όπως υπολογιστές, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, ακόμα και ιατρικά μηχανήματα. Ο αισθητήρας Hall χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου, καθώς και για την ανίχνευση της θέσης ενός αντικειμένου. Το βασικό μειονέκτημα του αισθητήρα Hall είναι ότι έχει πολύ χαμηλότερη ακρίβεια στις μετρήσεις σε σύγκριση με τα μαγνητόμετρα fluxgate.

- **Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης:** Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης βασίζονται στο φαινόμενο της σκέδασης των ηλεκτρονίων, η οποία εξαρτάται από την διεύθυνση της στροφορμής (spin) ως προς το στιγμιαίο μαγνητισμό των φερρομαγνητικών υλικών. Υπάρχουν οι ακόλουθες τρεις βασικές κατηγορίες μαγνητοαντίστασης:

1. Η ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR), η οποία κατασκευάζεται σε λεπτά φιλμ.
2. Η γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση (GMR), η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της ανταλλαγής σύζευξης στα υπέρλεπτα μαγνητικά και μη μαγνητικά επίπεδα (superlattices).
3. Η κολοσσιαία μαγνητοαντίσταση (CMR), η οποία αποτελεί αρκετά πρόσφατη εφεύρεση και έχει δυνατότητες για πολλές μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα των αισθητήρων.

Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έρευνας και ανάπτυξης έχει καταστεί δυνατή η εφαρμογή τους στην βιομηχανία των αισθητήρων καθώς και στην δημιουργία κεφάλων ανάγνωσης-καταγραφής δεδομένων. Η πρόοδος που έχει σημειωθεί βασίζεται στην εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας και στις απαιτήσεις για μείωση του μεγέθους. Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης είναι κυρίως κατάλληλοι για μέσης τάξης πεδία, όπως αυτά του μαγνητικού πεδίου της γης, καθώς και για συστήματα πλοήγησης και μέτρησης θέσης. Μπορούν να κατασκευαστούν με τεχνικές μικροηλεκτρονικής, ώστε να έχουν μικρό μέγεθος, υψηλή ακρίβεια και ταυτόχρονα χαμηλό κόστος.

2 Θεωρητικό μέρος

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας θα γίνει ανάλυση της θεωρίας και των φαινομένων πάνω στα οποία βασίζεται η λειτουργία των μαγνητόμετρων πύλης-ροής. Θα αναλυθούν οι νόμοι και οι αρχές των μαγνητικών πεδίων καθώς και της μαγνήτισης και θα επεξηγηθεί σε θεωρητικό επίπεδο το fluxgate.

2.1 Μαγνητικά πεδία-Θεωρία μαγνητισμού

Ένα από τα βασικά στοιχεία της θεωρίας μαγνητισμού είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν στον χώρο υπάρχει μαγνητικό πεδίο, αυτό ασκεί δύναμη σε οποιοδήποτε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο του χώρου, σε αγωγούς που διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα και σε μαγνητικά δίπολα. Επίσης, μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί και από την κίνηση ενός ηλεκτρικού φορτίου ή από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από έναν αγωγό. Ακόμα, μπορεί να δημιουργηθεί από μόνιμους μαγνήτες χωρίς την προφανή παρουσία ηλεκτρικών ρευμάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι κινήσεις και η ιδιοπεριστροφή των ηλεκτρονίων προκαλούν την μαγνήτιση του υλικού και τη δημιουργία πεδίου στον χώρο γύρω του [6].

2.1.1 Νόμοι μαγνητικών πεδίων

N. Ampere

Όταν ένα κύκλωμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στον χώρο γύρω του που εξαρτάται από το μονοπάτι αγωγής και από την ένταση του ρεύματος. Ο Ampere, υποθέτοντας ότι κάθε κύκλωμα αποτελείται από άπειρα στοιχειώδη ρεύματα τα οποία συνεισέφεραν στο πεδίο, κατέληξε στην παρακάτω σχέση.

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2.1)$$

όπου I είναι το πεπλεγμένο σε κλειστή διαδρομή I ρεύμα και H η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

N. Biot-Savart

Αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού και μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ένταση μαγνητικού πεδίου H που προκαλείται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Υπολογίζει τη συνεισφορά στο πεδίο από ένα στοιχειώδες τμήμα αγωγού $d\vec{l}$ που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως i .

$$\delta\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} i \delta\vec{l} \times \vec{u} \quad (2.2)$$

όπου r η ακτινική απόσταση, u το μοναδιαίο διάνυσμα στην ακτινική διεύθυνση και δH η συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίο του στοιχειώδους τμήματος $d\vec{l}$ του αγωγού. Η σχέση που αποδεικνύει τον N. Biot-Savart αποδεικνύεται μέσω πειραματικών μετρήσεων και όχι με μαθηματική απόδειξη. Η μονάδα μέτρησης στο SI του H είναι A/m .

2.1.2 Μαγνητική επαγωγή

Η ύπαρξη ηλεκτρικών ρευμάτων δημιουργεί στον χώρο μαγνητικό πεδίο εντάσεως H . Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να εγκατασταθεί είτε στο κενό είτε σε οποιοδήποτε άλλο υλικό μέσο. Η απόκριση του μέσου αυτού στην εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου περιγράφεται από το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής B . Η μαγνητική επαγωγή ονομάζεται και πυκνότητα μαγνητικής ροής (flux density) και καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ένα υλικό (ή μη) μέσο αντιδρά όταν βρίσκεται σε χώρο που καταλαμβάνεται από μαγνητικό πεδίο. Η σχέση μεταξύ της έντασης H του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής B εξαρτάται από την μαγνητική διαπερατότητα

του μέσου που συμβολίζεται με μ και μπορεί να είναι βαθμωτή συνάρτηση, ή πραγματική σταθερά.

$$B = \mu \cdot H \quad (2.3)$$

Ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ των εννοιών της έντασης μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής είναι πολύ σημαντικός. Για παράδειγμα για τον κενό χώρο έχουμε $B = \mu_0 H$, όπου το μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, είναι σταθερά και ισούται με $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

Σε άλλη κατηγορία υλικών, όπως είναι τα φερρομαγνητικά, το B παύει να είναι γραμμική συνάρτηση του H . Για την ακρίβεια δεν είναι πλέον ούτε μία μονοσήμαντη συνάρτηση του H . Εδώ έγκειται η κρισιμότητα του διαχωρισμού ανάμεσα στα δύο αυτά μεγέθη και μία απλή χάραξη του βρόχου υστέρησης αρκεί για να γίνει αυτή προφανής. Η σχέση $B = \mu H$ εξακολουθεί να ισχύει, όμως σε τέτοιου τύπου υλικά μέσα, η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι απαραίτητα σταθερή. Μάλιστα, αν και στα παραμαγνητικά ή διαμαγνητικά υλικά το μ παραμένει σταθερό για ένα μεγάλο εύρος τιμών του H , στα φερρομαγνητικά η διαπερατότητα εξαρτάται έντονα από την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Στη συνέχεια θα ορίσουμε την μαγνητική ροή Φ . Θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του κυκλικού αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως i . Όπως αναφέρθηκε, το ρεύμα i δημιουργεί στον χώρο μαγνητικό πεδίο του οποίου η ένταση υπολογίζεται από τον Ν. Biot-Savart. Η ενέργεια που δαπανάται για να εγκατασταθεί το πεδίο στο χώρο ισούται με την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια στο πεδίο, και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$E = \frac{1}{2} i \Phi \quad (2.4)$$

όπου Φ το ποσό της μαγνητικής ροής που το ρεύμα i δημιουργεί στο χώρο. Η μαγνητική ροή που υπάρχει σε κάθε μαγνητικό πεδίο εγκατεστημένο στο χώρο μετρείται σε Weber, και ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται μπορεί να μετρηθεί

μέσω της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που αναπτύσσεται σε ένα αγώγιμο βρόχο, όταν η μαγνητική ροή διαπερνά την επιφάνεια που ο εν λόγω βρόχος ορίζει.

Ακολούθως, ως μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής B ορίζεται το Wb/m^2 , μιας και η μαγνητική επαγωγή ορίστηκε ως πυκνότητα μαγνητικής ροής, δηλαδή Weber ανά μονάδα επιφάνειας. Μαγνητική ροή τιμής 1 Wb/m^2 ισοδυναμεί με μαγνητική επαγωγή τιμής 1Tesla , το οποίο είναι και η αντίστοιχη μονάδα στο S.I.

2.1.3 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Πλήθος εφαρμογών της ηλεκτροτεχνίας και της τεχνολογίας αισθητήρων βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Όταν η μαγνητική ροή που εμπλέκει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα μεταβάλλεται, τότε στα άκρα του κυκλώματος επάγεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη που ονομάζεται τάση επαγωγής. Σύμφωνα με το N. Faraday, η επαγόμενη τάση είναι ευθέως ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της ροής που εμπλέκει το κύκλωμα. Ενώ σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, η πολικότητα της επαγόμενης τάσης είναι τέτοια ώστε τα ρεύματα που προκαλούνται δημιουργούν πεδία που τείνουν να αναιρέσουν εκείνα τα οποία προκάλεσαν την μεταβολή της ροής.

Οι δύο παραπάνω νόμοι εκφράζονται από την σχέση που ακολουθεί:

$$V = -N * \frac{d\Phi}{dt} = -N * A * \frac{dB}{dt} \quad (2.5)$$

όπου V είναι η επαγόμενη τάση και Φ η ροή που διαπερνά πηνίο με N σπείρες. Αν θέσουμε $B = \Phi/A$, τότε έχουμε μία εναλλακτική έκφραση του νόμου της επαγωγής, από την οποία φαίνεται πως ένα χρονικά εξαρτώμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση ηλεκτρικών ρευμάτων.

2.1.4 Μαγνητικό δίπολο - μαγνητική διπολική ροπή

Το απλούστερο κύκλωμα με το οποίο μπορούμε να προκαλέσουμε μαγνητικό πεδίο είναι ο αγώγιμος κυκλικός βρόχος. Ο βρόχος ρεύματος και το μαγνητικό δίπολο αποτελούν τις δύο στοιχειώδεις οντότητες του μαγνητισμού. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει μία μαγνητική διπολική ροπή \mathbf{m} που σχετίζεται με την στοιχειώδη οντότητα. Στον βρόχο ρεύματος η μαγνητική διπολική ροπή ισούται με το γινόμενο της έντασης i και της επιφάνειας που οριοθετεί ο βρόχος A . Στο μαγνητικό δίπολο, το οποίο βρίσκεται σε απόλυτη αντιστοιχία με το ηλεκτρικό δίπολο, η ροπή ισούται με το γινόμενο του «μαγνητικού φορτίου» q με την απόσταση μεταξύ των δύο πόλων l .

Ο όρος μαγνητικό φορτίο είναι προφανώς μία αφηρημένη έννοια που δεν υφίσταται πραγματικά. Αν και στη φύση δεν έχει αποδειχθεί ακόμη ότι δύναται να υπάρξει μόνο βόρειος ή μόνο νότιος πόλος, χρησιμοποιούμε αυτή την έννοια για να δώσουμε την αντιστοιχία των μεγεθών με το ηλεκτρικό πεδίο. Αποτέλεσμα της παραπάνω πρότασης αποτελεί το γεγονός ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πάντα κλειστές, δηλαδή ξεκινούν από βόρειο και καταλήγουν σε νότιο πόλο. Σε αντίθεση, στο ηλεκτρικό πεδίο μπορούμε να έχουμε ακτινική για παράδειγμα κατανομή, με δυναμικές γραμμές που καταλήγουν στο άπειρο.

Η μηχανική ροπή που ασκείται σε μαγνητικό δίπολο ροπής \mathbf{m} όταν αυτό βρεθεί σε πεδίο επαγωγής \mathbf{B} δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B} \quad (2.6)$$

Στον κενό χώρο θα ισχύει $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ άρα η ροπή θα είναι

$$\vec{\tau} = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H} \quad (2.7)$$

Αυτό σημαίνει ότι το δίπολο τείνει να ευθυγραμμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική διπολική ροπή να είναι παράλληλη με τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου,

ή εναλλακτικά, το πεδίο που ο βρόχος ρεύματος δημιουργεί, να είναι παράλληλο με αυτήν. Αν δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις να δρουν πάνω στο μαγνητικό δίπολο, τότε η δύναμη που ασκείται σε αυτό από το πεδίο είναι διατηρητική. Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε την ενέργεια του διπόλου ως εξής:

$$E = -\vec{m} \vec{H} \quad (2.8)$$

2.1.5 Νόμος Gauss

Ο νόμος του Gauss, στη γενική του μορφή, δίνει τη ροή διανυσματικού μεγέθους μέσα από κλειστή επιφάνεια, σαν το επιφανειακό ολοκλήρωμα του διανύσματος αυτού. Λόγω της ιδιότητας των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου, να σχηματίζουν πάντα κλειστά μονοπάτια, η μαγνητική ροή που εισέρχεται σε μία κλειστή επιφάνεια ισούται με αυτήν που εξέρχεται. Έτσι ο νόμος του Gauss για την μαγνητική επαγωγή καταλήγει στη σχέση:

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.9)$$

όπου $d\vec{A} = dA \hat{A}$ με dA το στοιχειώδες εμβαδό πάνω στη κλειστή επιφάνεια και \hat{A} το μοναδιαίο διάνυσμα στη θέση του dA κάθετο σε αυτό με φορά προς τα έξω.

2.1.6 Εξισώσεις Maxwell

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Πέρα από τις εξισώσεις και τους νόμους που έχουν αναλυθεί παραπάνω τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να περιγραφούν πλήρως από μία ομάδα τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων που είναι γνωστές με την ονομασία Εξισώσεις Maxwell.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{N. Ampere} \quad (2.10)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{N. Faraday} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{N. Gauss για μαγν. ροή} \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{N. Gauss για μαγν. ροή} \quad (2.13)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, D το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης (ή πυκνότητα ηλεκτρικής ροής) και ρ η πυκνότητα της χωρικής κατανομής ηλεκτρικού φορτίου. Με τις εξισώσεις αυτές γίνεται φανερή η αντιστοιχία μεγεθών ανάμεσα σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.

ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ Η ΧΡΟΝΟΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Οι εξισώσεις Maxwell ισχύουν τόσο σε περιπτώσεις σταθερών με τον χρόνο πεδίων όσο και όταν υπάρχει χρονική εξάρτηση. Ξεκινώντας από τις τέσσερις εξισώσεις Maxwell μπορούμε να καταλήξουμε σε μία περιγραφική σχέση για ένα χρονοεξαρτώμενο μαγνητικό πεδίο, σε μέσο ηλεκτρικής αγωγιμότητας σ , και διηλεκτρικής σταθεράς ϵ .

$$\nabla^2 \vec{H} - \nabla \nabla \cdot \vec{H} = \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

Στην ειδική περίπτωση του κενού χώρου, λαμβάνοντας υπόψιν τη σχέση μεταξύ B και H , καθώς και τον νόμο του Gauss για την μαγνητική ροή έχουμε:

$$\nabla^2 \vec{H} - \sigma \frac{\mu_0 \partial \vec{H}}{\partial t} - \epsilon \frac{\mu_0 \partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.15)$$

Η παραπάνω εξίσωση για το μαγνητικό πεδίο αποτελεί εξίσωση κύματος και συμπεριλαμβάνει την απόσβεση που μπορεί να προκαλέσει η παρουσία αγωγίμου μέσου.

2.1.7 Υπολογισμοί σε βασικά μαγνητικά πεδία

- **Πεδίο στο εσωτερικό λεπτού σωληνοειδούς με θεωρητικά άπειρο μήκος.**

$$H = n * i \quad (2.16)$$

Το πεδίο είναι πρακτικά ομογενές, με διεύθυνση τον άξονα του σωληνοειδούς, και φορά που βρίσκεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Το n είναι ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους και i το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο. Στην πράξη, για να κατασκευάσουμε ένα «άπειρο» πηνίο δίνουμε στο πηνίο τοροειδές σχήμα. Το πεδίο είναι:

$$H = \frac{N}{2\pi r} * i \quad (2.17)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός σπειρών και r η ακτίνα του τοροειδούς.

- **Πεδίο κατά μήκος του άξονα αγωγίμου κυκλικού βρόχου**

$$H = i \frac{a^2}{2(a^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2.18)$$

όπου a η ακτίνα του βρόχου και x η απόσταση από το κέντρο του κύκλου. Η φορά του πεδίου βρίσκεται και εδώ με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

- **Πεδίο από δύο ομοαξονικά, όμοια πηνία**

Για να δημιουργήσουμε ένα ομογενές πεδίο σε μεγάλο όγκο, χρησιμοποιούμε ένα ζεύγος πηνίων Helmholtz. Η διάταξη αυτή αποτελείται από δύο όμοια και με ίδιο αριθμό σπειρών πηνία, με κοινό άξονα, συνδεδεμένα σε σειρά και με ίδια φορά περιέλιξης. Η απόσταση μεταξύ των πηνίων είναι ίση με την κοινή τους ακτίνα. Στην περίπτωση αυτή, η αξονική συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου στο μέσο της απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{8Ni}{5^{3/2}R} \quad (2.19)$$

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

- **Πεδίο στο κέντρο πολυστρωματικού πηνίου πεπερασμένου μήκους**

Μία επίσης σημαντική πρακτική εφαρμογή παρουσιάζεται όταν χρειαζόμαστε αυξημένη ένταση μαγνητικού πεδίου σε σωληνοειδές σταθερού μήκους. Στην περίπτωση αυτή, είναι προτιμότερο να αυξηθεί ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους, παρά η ένταση του ρεύματος στο πηνίο. Είναι γνωστό ότι η θερμότητα Joule σε αγωγό γνωστής ωμικής αντίστασης είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος. Έτσι, διπλασιασμός του ρεύματος τετραπλασιάζει τις θερμικές απώλειες, ενώ διπλασιασμός του αριθμού σπειρών (άρα και της αντίστασης) τις διπλασιάζει.

Για το λόγο αυτό, όταν υπάρχει απαίτηση υψηλής έντασης μαγνητικού πεδίου, κατασκευάζονται πηνία με πολλές στρώσεις περιελίξεων. Σε αυτά τα πηνία η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα δεν μπορούν να θεωρηθούν ίσες και οι υπολογισμοί του πεδίου είναι αρκετά πολύπλοκοι. Συνοπτικά, το πεδίο στο κέντρο ενός τέτοιου πηνίου δίνεται από τις σχέσεις:

$$H_0 = F(\alpha, \beta) f(i, a_1, a_2) \quad (2.20)$$

$$F(\alpha, \beta) = \beta \left[\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) - \operatorname{arcsinh}\left(\frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (2.21)$$

$$f(i, a_1, a_2) = N \frac{i a_1}{L a_2 - a_1} \quad (2.22)$$

$$a = \frac{a_2}{a_1} \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{L}{2a_1} \quad (2.24)$$

όπου N: αριθμός σπειρών, i: ένταση ρεύματος, L: μήκος πηνίου, a_1 : ακτίνα εσωτερικού τυλίγματος, a_2 : ακτίνα εξωτερικού τυλίγματος.

2.2 Θεωρία Μαγνήτισης

2.2.1 Ορισμός

Η μαγνήτιση σε ένα μεγάλο βαθμό σχετίζεται με τον τρόπο που οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού συνδέονται με την μαγνητική επαγωγή. Κύριο χαρακτηριστικό του διπόλου, είναι η μαγνητική διπολική ροπή την οποία ορίσαμε μέσω της μηχανικής ροπής που ασκείται σε ένα δίπολο όταν αυτό βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο.

Λόγω της μαγνητικής διπολικής ροπής, τα μαγνητικά δίπολα σε ένα υλικό τείνουν να προσανατολιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε το παραγόμενο από αυτά πεδίο να είναι παράλληλο στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Επομένως μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος της μαγνήτισης ως την μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου ενός υλικού μέσου.

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (2.25)$$

Έστω τώρα ραβδόμορφος μαγνήτης, με τους δύο πόλους συγκεντρωμένους στα άκρα του, μήκους l με εμβαδό διατομής A και Φ η μαγνητική ροή στο κέντρο του. Η μαγνητική ροπή στο κέντρο του είναι:

$$\vec{m} = \Phi \frac{L}{\mu_0} \quad (2.26)$$

Από τις σχέσεις (2.25), (2.26) προκύπτει η παρακάτω σχέση για την μαγνήτιση:

$$M = \frac{\Phi}{\mu_0 A} \quad (2.27)$$

και λόγω του ορισμού της μαγνητικής επαγωγής ως πυκνότητα μαγνητικής ροής ή μαγνητικής ροής ανά μονάδα επιφάνειας προκύπτει:

$$\vec{M} = \frac{B}{\mu_0} \quad (2.28)$$

Στην περίπτωση αυτή δεν λάβαμε υπόψιν την ύπαρξη εξωτερικών συμβατικών ηλεκτρικών ρευμάτων που θα δημιουργούσαν μαγνητικό πεδίο. Έτσι, η μαγνητική επαγωγή δίνεται από τη σχέση $B = \mu_0 M$. Εδώ γίνεται προφανές ότι τόσο η μαγνήτιση, όσο και η παρουσία εξωτερικού πεδίου H συνεισφέρουν στη μαγνητική επαγωγή με παρόμοιο τρόπο [7].

2.2.2 Μαγνητική επαγωγή και μαγνήτιση

Είδαμε ότι το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, από το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και από τη μαγνήτιση του υλικού. Επομένως η μαγνητική επαγωγή είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο μεγεθών.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.29)$$

όπου το B εκφράζεται σε Tesla και τα M, H σε Ampere/m. Το μαγνητικό πεδίο H μπορεί να δημιουργηθεί από ηλεκτρικά ρεύματα έξω από το υλικό, από ένα σωληνοειδές, από έναν ηλεκτρομαγνήτη ή τέλος, από έναν μόνιμο μαγνήτη. Η μαγνήτιση είναι αποτέλεσμα των μη αντισταθμισμένων spin και τροχιακών κινήσεων των ασύζευκτων ηλεκτρονίων στον όγκο του υλικού.

2.2.3 Μαγνήτιση κορεσμού

Υποθέτουμε ότι κάποιο υλικό διαθέτει n στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα ανά μονάδα όγκου, κάθε ένα εκ των οποίων παρουσιάζει μαγνητική διπολική ροπή m. Το υλικό θα παρουσιάσει μαγνήτιση κορεσμού όταν όλα τα στοιχειώδη δίπολα προσανατολιστούν παράλληλα μεταξύ τους, και προφανώς παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση κορεσμού λοιπόν θα ισούται με το γινόμενο n επί m. Ένα υλικό θα φτάνει σε μαγνήτιση κόρου στην κατάσταση όπου θα αποτελείται από μία και μόνο μαγνητική περιοχή.

2.2.4 Μαγνητική διαπερατότητα και επιδεκτικότητα

Τα δύο αυτά μεγέθη καθορίζουν την απόκριση και αντίδραση των μαγνητικών υλικών παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [21]. Η μαγνητική διαπερατότητα ορίζεται ως:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.30)$$

Αναπαριστά το βαθμό στον οποίο ένα μαγνητικό πεδίο διεισδύει σε ένα υλικό μέσο.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού ως:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.31)$$

Ανάλογα με τον τύπο του υλικού, η μαγνητική διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα μπορεί να μην είναι πραγματικές σταθερές. Ορίζονται η διαφορική διαπερατότητα και η διαφορική επιδεκτικότητα

$$\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (2.32)$$

$$x' = \frac{dM}{dx} \quad (2.33)$$

καθώς και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα που χρησιμοποιείται στο SI

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.34)$$

Εκφράζει κατά πόσο αυξάνεται η επαγωγή ενός σωληνοειδούς πηνίου, για παράδειγμα, όταν αυτό περικλείει ένα μαγνητικό μέσο. Το μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού χώρου μέσα στο σωληνοειδές και μ η διαπερατότητα του μαγνητικού μέσου.

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα συνδέεται με την μαγνητική επιδεκτικότητα μέσω της σχέσης:

$$\mu_r = x + 1 \quad (2.35)$$

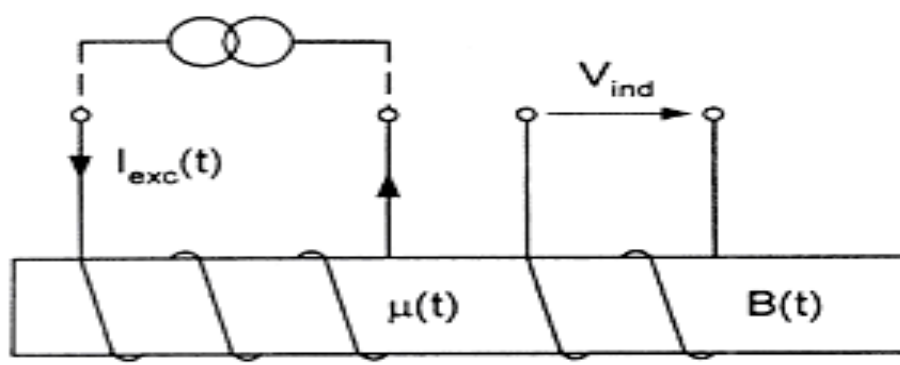
Τέλος η αρχική διαπερατότητα και η αρχική επιδεκτικότητα που παριστάνουν τις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών στην αρχή της καμπύλης μαγνήτισης του υλικού ορίζονται ως:

$$\mu_{in} = \left(\frac{dB}{dH} \right)_{B=0, H=0} \quad (2.36)$$

$$x_{in} = \left(\frac{dM}{dH} \right)_{M=0, H=0} \quad (2.37)$$

2.3 Μαγνητόμετρα πύλης-ροής (fluxgate)

Τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής μετρούν χαμηλής συχνότητας μαγνητικό πεδίο από 10^{-1} ως 10^6 nT με διακριτική ικανότητα που μπορεί να πλησιάσει τα 100 pT. Για την λειτουργία τους απαιτείται η ύπαρξη ενός πεδίου αναφοράς με το οποίο συγκρίνεται το προς μέτρηση πεδίο. Στο Σχήμα 4 φαίνεται μια τυπική κατασκευή fluxgate και η λειτουργία του που θα εξηγηθεί παρακάτω. Το πρώτο πηνίο αποτελεί το πηνίο διέγερσης και το δεύτερο το πηνίο λήψης. Αμφότερα είναι τυλιγμένα γύρω από τον πυρήνα του αισθητήρα.



Σχήμα 4 Κατασκευή και λειτουργία fluxgate.

2.3.1 Αρχή λειτουργίας

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η αρχή λειτουργίας πάνω στην οποία βασίζονται τα fluxgates είναι ο κορεσμός των μαγνητικών υλικών. Για παράδειγμα ένας τυπικός ηλεκτρομαγνήτης έχει πυρήνα από κράμα σιδήρου γύρω από τον οποίο «τυλίγεται» ένα πηνίο, το οποίο και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο του πηνίου ενισχύεται από τον πυρήνα, καθώς τα άτομα του (ή συστοιχίες ατόμων εντός του κρυσταλλικού πλέγματος) είναι μαγνητικά. Σε κοινά κράματα τα άτομα του πυρήνα έχουν μαγνητικά διανύσματα που τείνουν προς διάφορες τυχαίες κατευθύνσεις (Σχήμα 5), αλλά το συνολικό άθροισμά τους είναι ίσο με το μηδέν.



Σχήμα 5 Μαγνητικά διανύσματα σε τυχαίες θέσεις.

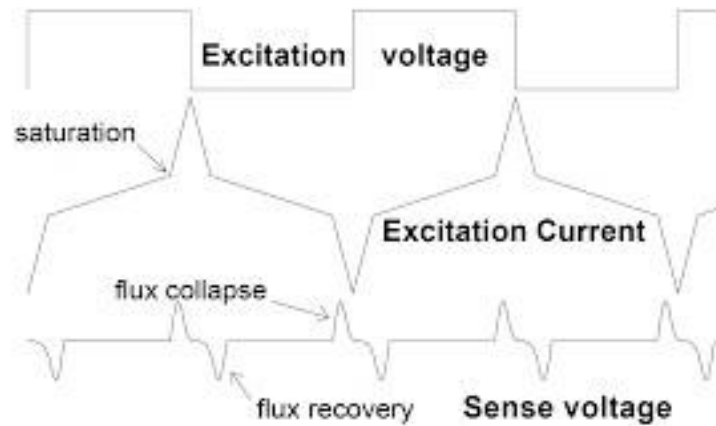
Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διαπεράσει το πηνίο, το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο επιβάλλεται στα μαγνητικά αυτά δίπολα του πυρήνα και αυτά προσανατολίζονται στην φορά του πεδίου και το ενισχύουν (Σχήμα 6).



Σχήμα 6 Μαγνητικά διανύσματα προσανατολισμένα στην ίδια κατεύθυνση.

Την στιγμή που όλα τα μαγνητικά δίπολα έχουν προσανατολιστεί κατάλληλα, ο πυρήνας επέρχεται σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού και δεν προσφέρει πλέον στην ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου του πηνίου.

Αν ο πυρήνας αποτελείται από άλλα κράματα (π.χ. φερριτικά) ο κορεσμός είναι πλήρης και επέρχεται πολύ πιο γρήγορα και σε ένα σταθερά ορισμένο επίπεδο. Ένα ισχυρό εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνώντας το πηνίο, επιφέρει και εναλλαγή στην μαγνητική πολικότητα του πυρήνα, επομένως ο κορεσμός εμφανίζεται με συμμετρικό τρόπο και σύμφωνα με αυτή τη διαφορά φάσης (π) [8].



Σχήμα 7 Ιδανικές κυματομορφές για fluxgate μαγνητόμετρα.

Για το λόγο αυτό, τα fluxgates χρησιμοποιούν έναν υψηλά διαπερατό πυρήνα, ο οποίος συγκεντρώνει το προς μέτρηση πεδίο ή αλλιώς περιβάλλον μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό διοχετεύεται στον πυρήνα πριν τον κορεσμό, προκαλώντας έντονη μαγνητική ροή (flux).

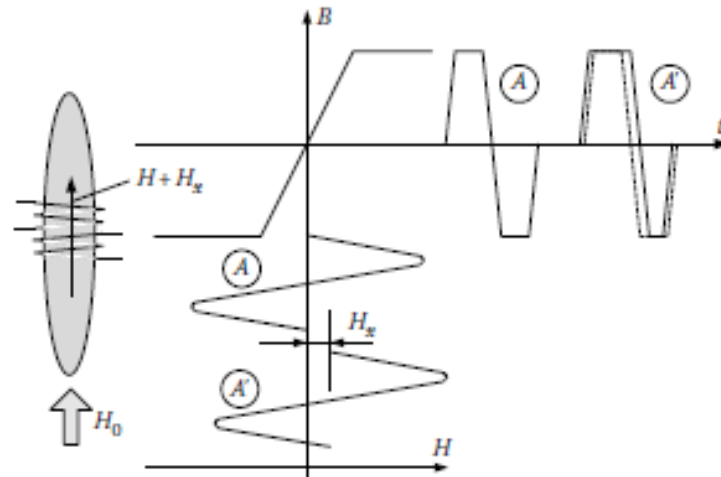
Εν συνεχεία, δίνοντας εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο διέγερσης δημιουργείται μαγνητικό πεδίο αναφοράς, το οποίο οδηγεί τον πυρήνα περιοδικά σε κορεσμό και έτσι η μαγνητική του διαπερατότητα παύει να αυξάνεται και η μαγνητική ροή που έχει σχηματιστεί καταρρέει. Στο επόμενο μισό του κύκλου, σύμφωνα με την κυματομορφή διέγερσης, ο πυρήνας επανέρχεται επομένως και η μαγνητική ροή, λόγω του περιβάλλοντος πεδίου, έως ότου έχουμε εκ νέου κορεσμό από την αντίθετη κατεύθυνση.

Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται όπως και οι συνεχείς εναλλαγές της μαγνήτισης λόγω της διέγερσης, παρ' όλα αυτά η μαγνητική ροή λόγω του περιβάλλοντος πεδίου επανέρχεται στα ίδια επίπεδα κατά τη διάρκεια του κύκλου.

Με χρήση ενός πηνίου λήψης γύρω από τον πυρήνα μπορούμε να λάβουμε τις αλλαγές στην μαγνητική ροή ως μεταβολές στην τάση εξόδου (V_{out}) και μέσω του Ν. Faraday (2.5) να υπολογίσουμε την τιμή του προς μέτρηση πεδίου [9].

$$E = -N * \frac{d\Phi}{dt} = -N * A * \frac{dB}{dt} \quad (2.38)$$

Η αρχή λειτουργίας του μαγνητομέτρου πύλης-ροής φαίνεται αναλυτικά και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8 Αρχή λειτουργίας αισθητήρα fluxgate.

Χρησιμοποιώντας ένα πηνίο διέγερσης, μαγνητίζουμε το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα με μαγνητικό πεδίο H , μεγαλύτερο από το συνεκτικό πεδίο για το συγκεκριμένο υλικό και λαμβάνουμε την πυκνότητα ροής (σήμα A). Αφού προστεθεί και το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H_x τότε το σήμα εξόδου της πυκνότητας της μαγνητικής ροής που λαμβάνεται από ένα πηνίο λήψης αλλάζει και γίνεται ασύμμετρο (σήμα A') ως προς τη χρονική διαφορά μεταξύ των μεγίστων και των ελαχίστων του σήματος dB/dt [23].

2.3.2 Μαγνήτιση υλικού του πυρήνα

Όπως αναφέραμε προηγουμένως τα fluxgates απαιτούν την ύπαρξη ενός πεδίου αναφοράς με το οποίο συγκρίνεται το προς μέτρηση πεδίο. Το πεδίο αναφοράς είναι εναλλασσόμενο ημιτονικό, τριγωνικό ή τετραγωνικό σήμα το οποίο δίνεται στον πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Ο πυρήνας μέσω του σήματος οδηγείται περιοδικά στον κορεσμό. Επομένως γίνεται κατανοητό ότι έχει μεγάλη σημασία το υλικό του πυρήνα και η καμπύλη μαγνήτισής του η οποία προκύπτει ανάλογα με την κατεργασία και τις ιδιότητες του υλικού και θα πρέπει να είναι μη γραμμική και συμμετρική [22].

Ο πυρήνας αποτελεί αισθητήριο τμήμα του fluxgate και το υλικό από το οποίο αποτελείται θα πρέπει να έχει υψηλή διαπερατότητα και χαμηλό συνεκτικό πεδίο. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του σιδηρομαγνητικού πυρήνα χωρίζονται σε μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά με βάση την τιμή του συνεκτικού τους πεδίου.

Μαλακά μαγνητικά υλικά

Μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου εφαρμόζονται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης όπως για παράδειγμα ηλεκτρικές μηχανές, επαγωγείς, μετασχηματιστές όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά. Συμπερασματικά, ένα μαλακό μαγνητικό υλικό έχει χαμηλό συνεκτικό πεδίο, υψηλή μαγνήτιση κορεσμού και υψηλή μαγνητική διαπερατότητα.

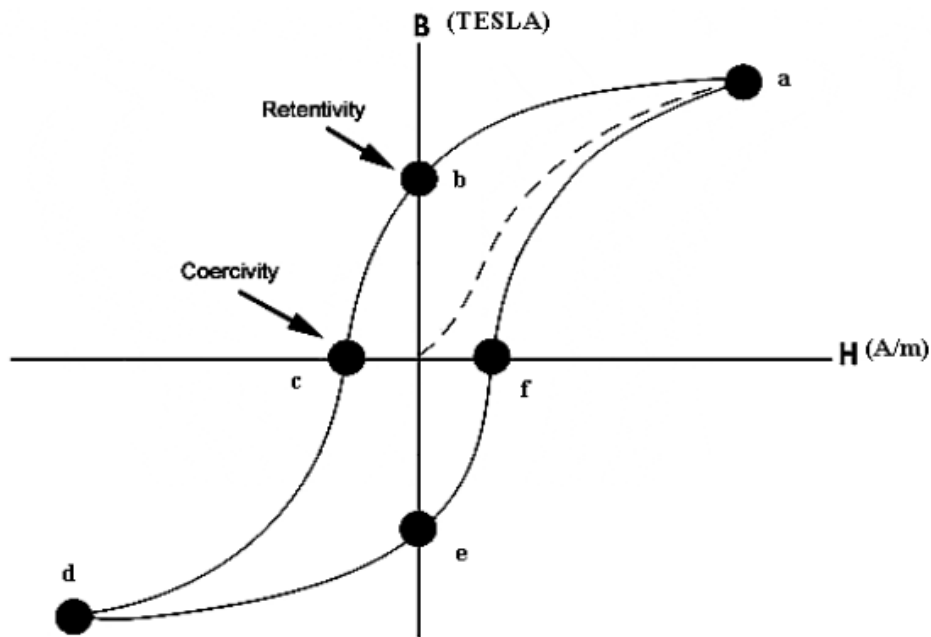
Σκληρά μαγνητικά υλικά

Μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, γι' αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Είναι κατάλληλα για χρήση ως μόνιμοι μαγνήτες καθώς έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση και υψηλό συνεκτικό πεδίο.

Από τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι οι πυρήνες από μαλακά μαγνητικά υλικά προτιμώνται για τα fluxgates αν και πλέον είναι διαδεδομένος ο συνδυασμός διαφόρων μαγνητικών υλικών για την κατασκευή άμορφων συρμάτων και την χρήση

τους ως πυρήνες στους αισθητήρες. Επιπλέον πέρα από το υλικό του πυρήνα έχει μεγάλη σημασία και το μήκος του καθώς συνήθως ταυτίζεται και με το μήκος του fluxgate. Επιλέγεται με τρόπο ώστε ο βρόχος μαγνήτισης να μην γίνεται ανυστερητικός δηλαδή να μην ταυτίζονται οι τιμές του H με το B .

Η καμπύλη μαγνήτισης ή βρόχος υστέρησης (Σχήμα 9) μας δίνει πληροφορίες για το αν κάποιο υλικό είναι κατάλληλο για χρήση στον πυρήνα του fluxgate.

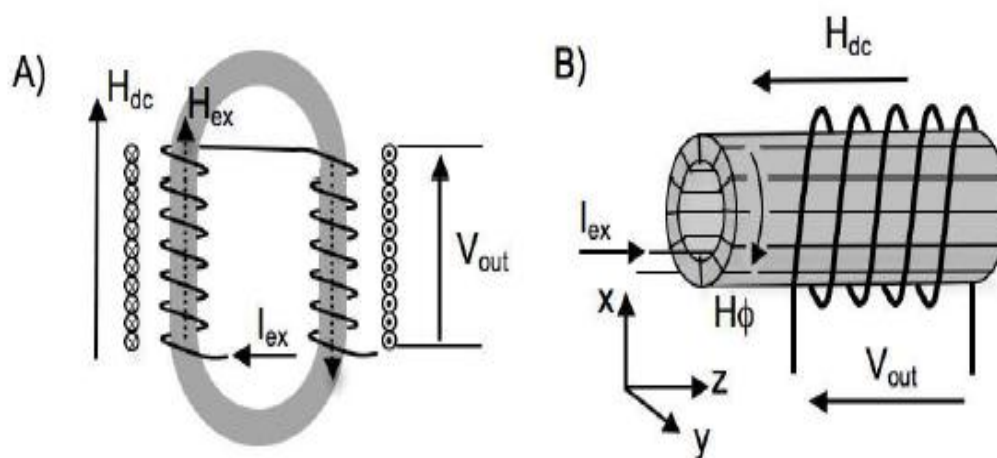


Σχήμα 9 Τυπικός βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

Στο σημείο a το υλικό έχει φτάσει την μαγνήτιση κορεσμού καθώς αύξηση του H επιφέρει ανεπαίσθητη αύξηση του B . Ακολούθως το H μειώνεται σταδιακά και η καμπύλη οδηγείται στο σημείο b ($H=0$) το οποίο παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης του υλικού. Εν συνεχεία το H αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα δηλαδή λαμβάνει αρνητικές τιμές και το B μειώνεται έως ότου μηδενιστεί στο σημείο c . Το H εξακολουθεί να αυξάνεται προς τα αρνητικά ως το σημείο d όπου επέρχεται κορεσμός του μαγνητικού υλικού από την αντίθετη φορά. Το σημείο e ($H=0$) παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης του υλικού της αντίστροφης φοράς και εν συνεχεία το H αρχίζει πάλι να αυξάνεται ξεκινώντας το νέο κύκλο [10].

2.3.3 Κατηγορίες fluxgate

Αναφερθήκαμε προηγουμένως στην αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζονται τα μαγνητόμετρα πύλης-ροής και στην καμπύλη μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού του πυρήνα. Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε τις δύο κατηγορίες που χωρίζονται τα fluxgates με βάση τον τρόπο κατασκευής τους. Αυτές είναι τα orthogonal fluxgates και τα parallel fluxgates [11].



Σχήμα 10 Κατασκευή παράλληλου (A) και ορθογώνιου (B) fluxgate.

Στο Σχήμα 10 φαίνεται η διαφορά στην κατασκευή μεταξύ των δύο ειδών.

- **Parallel fluxgate**

Η ονομασία προέρχεται από το γεγονός ότι το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Αποτελείται από έναν μαγνητικό δακτύλιο ή από πυρήνα αγωγίμου δρόμου που έρχεται περιοδικά σε κορεσμό, και από τις δύο διευθύνσεις, από εναλλασσόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το πηνίο διέγερσης λαμβάνει το σήμα του εναλλασσόμενου πεδίου ενώ η τάση εξόδου λαμβάνεται από το πηνίο λήψης.

- **Orthogonal fluxgate**

Σε αυτή την κατηγορία το πεδίο διέγερσης είναι κάθετο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου και από εκεί προκύπτει και η ονομασία τους. Αποτελούνται από κυλινδρικό πυρήνα μαλακού μαγνητικού υλικού με τοροειδές πηνίο διέγερσης τυλιγμένο γύρω του. Το ρεύμα διέγερσης ρέει μέσω αυτού του πηνίου προκαλώντας πεδίο H_{ϕ} , το οποίο σε συνδυασμό με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H φέρνει τον πυρήνα σε κορεσμό περιοδικά με αντίθετες πολώσεις. Η τάση εξόδου λαμβάνεται και εδώ μέσω πηνίου λήψης τυλιγμένου γύρω από τον πυρήνα. Σε περίπτωση απουσίας $H_{\text{εξωτερικού}}$ το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι μηδενικό.

Από νωρίς τα parallel fluxgates αναπτύχθηκαν και προτιμήθηκαν από τα orthogonal λόγω της καλύτερης απόδοσης και του χαμηλότερου θορύβου. Στην συνέχεια, με την βελτίωση των τεχνικών παραγωγής λεπτών μαγνητικών ινών με πολύ μικρή διάμετρο και εξαιτίας της αύξησης της ζήτησης για κατασκευή μικρών σε μέγεθος αισθητήρων μαγνητικού πεδίου τα orthogonal fluxgates επανήλθαν στο προσκήνιο και κέρδισαν μεγάλη αποδοχή. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν χρειάζονται απαραίτητα πηνίο διέγερσης καθώς αυτή μπορεί να δοθεί απευθείας στο σύρμα που αποτελεί τον πυρήνα.

3 Πειραματικό μέρος

Στο πειραματικό μέρος θα αναλυθεί το κύκλωμα διέγερσης που κατασκευάστηκε και ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον θα παρατεθούν οι μετρήσεις που έγιναν για την βαθμονόμηση του fluxgate τόσο ως αισθητήρα μέτρησης θέσης όσο και ως αισθητήρα μέτρησης πεδίου.

3.1 Κύκλωμα διέγερσης

Εξαρχής ο στόχος ήταν να κατασκευαστεί ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα με το χαμηλότερο δυνατό κόστος εξαρτημάτων, το οποίο θα δημιουργούσε τριγωνικό παλμό συχνότητας περίπου 1 kHz, ο οποίος θα αποτελούσε την διέγερση του αισθητήρα. Έτσι, ο αισθητήρας αποδεσμεύεται από την ανάγκη ύπαρξης αυτόνομης γεννήτριας συχνοτήτων για τη λειτουργία του.

Επιλέχτηκε η δημιουργία τριγωνικού σήματος για την διέγερση του fluxgate καθώς προσφέρει σταθερή ταχύτητα μετατόπισης των μαγνητικών τοιχωμάτων εν αντιθέσει με το ημιτονικό σήμα διέγερσης όπου η ταχύτητα αυτή μεταβάλλεται με μη γραμμικό τρόπο.

Κατασκευάστηκαν δύο κυκλώματα, καθώς το πρώτο παρουσίαζε ανεπιθύμητα spikes στην κυματομορφή εξόδου και θέλαμε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σταθερότητα και ακρίβεια στο σήμα. Για αυτό το λόγο κατασκευάστηκε και δεύτερο κύκλωμα με το οποίο επιτεύχθηκαν οι μετρήσεις και η βαθμονόμηση του fluxgate. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και με τα δύο κυκλώματα, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

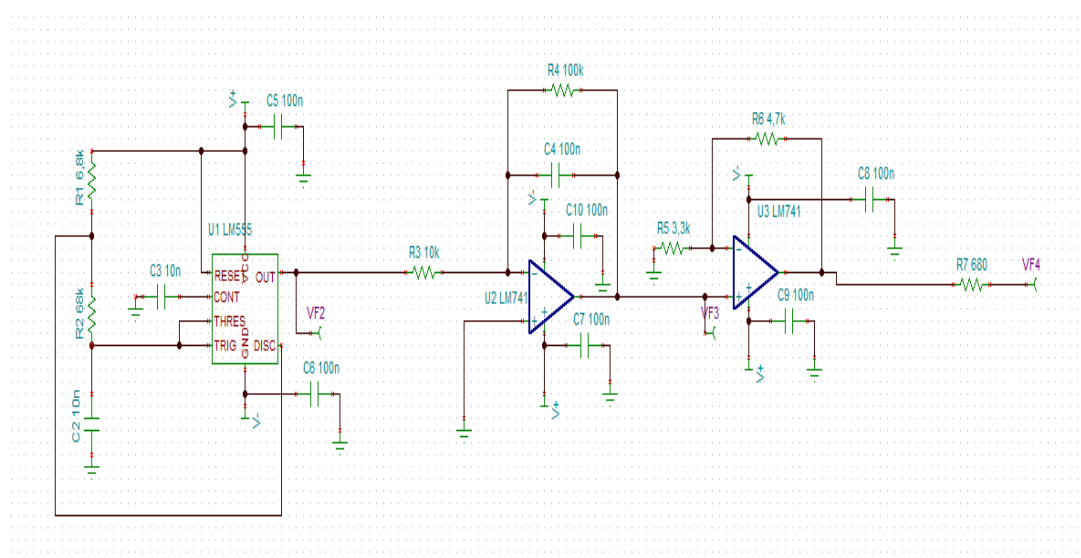
Η κατασκευή και ανάλυση των κυκλωμάτων έγινε αρχικά στον υπολογιστή με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης Designsoft TINA. Με το πρόγραμμα αυτό υπήρχε η δυνατότητα πειραματισμού με τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος για την επίτευξη του επιθυμητού σήματος εξόδου. Εν συνεχεία, κατασκευάστηκε το κύκλωμα στο εργαστήριο, πάνω σε breadboard ώστε να γίνουν οι δοκιμές σε πραγματικές

συνθήκες και να επιβεβαιωθεί η λειτουργία του και τα αποτελέσματα που προέκυπταν από την προσομοίωση. Στο τελικό βήμα είχαμε εκτύπωση του κυκλώματος σε φωτοευαίσθητη πλακέτα, αφού πρώτα είχε σχεδιαστεί στο πρόγραμμα AutoDesk Eagle.

Η διαδικασία αυτή, καθώς και η κόλληση των ηλεκτρονικών στοιχείων έγινε στο εργαστήριο με χρήση του εξοπλισμού που υπάρχει και με τήρηση των κανόνων ασφάλειας και υγιεινής.

3.1.1 1^ο Ηλεκτρονικό κύκλωμα

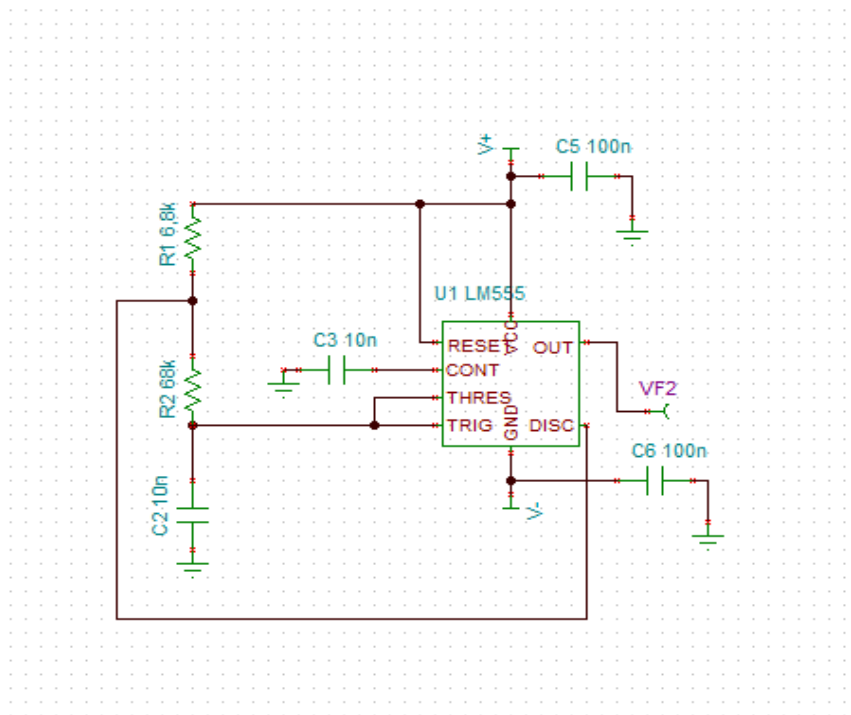
Το πρώτο κύκλωμα που κατασκευάσαμε αποτελείται από 3 στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από έναν χρονιστή NE555, ο οποίος λαμβάνει DC τάση από το τροφοδοτικό και δημιουργεί τετραγωνικό παλμό. Λειτουργεί επομένως ως γεννήτρια τετραγωνικού σήματος τάξης 1 kHz. Το δεύτερο στάδιο είναι ένας ολοκληρωτής με τη χρήση ενισχυτή LM741, ώστε να μετατραπεί το τετραγωνικό σήμα σε τριγωνικό και το τρίτο στάδιο είναι ενισχυτικό, με έναν ακόμη LM741 για περαιτέρω ενίσχυση του τριγωνικού σήματος, ώστε να καταστεί κατάλληλο για την διέγερση του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, το κύκλωμα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 11 1^ο κύκλωμα διέγερσης.

Πιο αναλυτικά για κάθε στάδιο έχουμε:

1^ο στάδιο [12]



Σχήμα 12 Κύκλωμα χρονιστή NE555.

Ο χρονιστής NE555 είναι σε συνδεσμολογία ασταθούς λειτουργίας, το οποίο μας δίνει την δυνατότητα να παράξουμε τετραγωνικό σήμα, στο οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε τόσο την συχνότητα f όσο και τον κύκλο εργασίας (duty cycle) D , μέσω των τιμών που θα επιλέξουμε για τις αντιστάσεις R_1 , R_2 και τον πυκνωτή C_2 .

Υπολογισμός συχνότητας f

Χρόνος φόρτισης t_1 ή t_H :

$$t_H = 0,693 * (R_1 + R_2) * C \quad (3.1)$$

Χρόνος εκφόρτισης t_2 ή t_L :

$$t_L = 0,693 * R_2 * C \quad (3.2)$$

Περίοδος T:

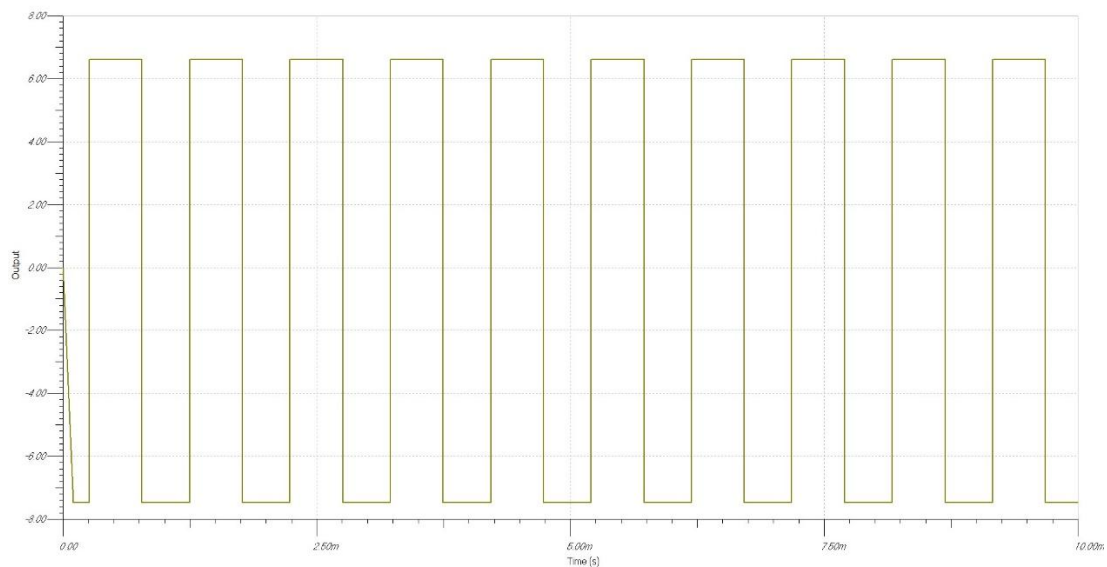
$$T = t_H + t_L = 0,693 * (R_1 + 2R_2) * C \quad (3.3)$$

Συχνότητα f:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2) * C} \quad (3.4)$$

Υπολογισμός duty cycle:

$$D = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \quad (3.5)$$



Σχήμα 13 Προσομοίωση 1^{ου} σταδίου.

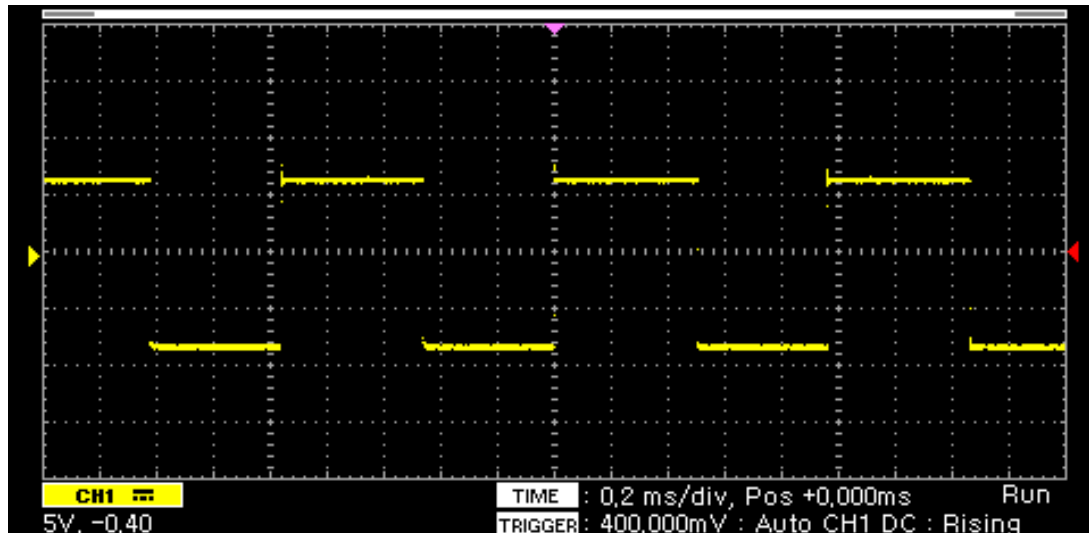
Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η προσομοίωση δίνει τετραγωνικό παλμό και με βάση τις τιμές που επιλέχθηκαν στα στοιχεία R_1 , R_2 , C_2 και την χρήση των παραπάνω τύπων έχουμε:

Συχνότητα $f = 1,008 \text{ kHz}$

και

duty cycle $D=52,3\%$.

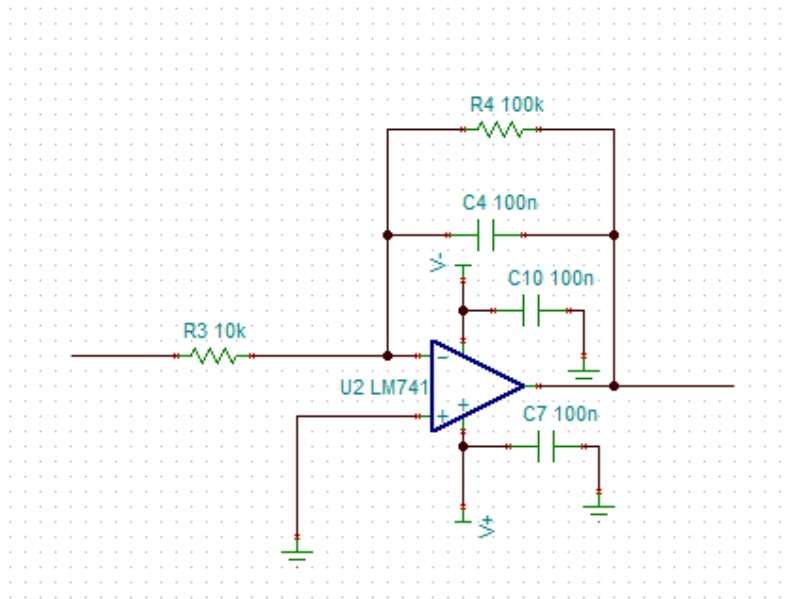
Η κατασκευή του πρώτου σταδίου του κυκλώματος στο εργαστήριο και η σύνδεσή του με το τροφοδοτικό έδωσε την παρακάτω κυματομορφή εξόδου μέσω του παλμογράφου.



Σχήμα 14 Πραγματική έξοδος 1^{ου} σταδίου.

Παρατηρείται η ύπαρξη spikes στις κορυφές του τετραγωνικού παλμού. Για την μείωση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκαν πυκνωτές 100 nF μεταξύ τροφοδοσίας και γείωσης, που βοήθησαν στην μερική εξάλειψη του overshoot. Το παραγόμενο σήμα έχει συχνότητα $f= 1,04$ kHz και πλάτος $V_{pp}= 13$ V.

2^ο στάδιο [13][14]

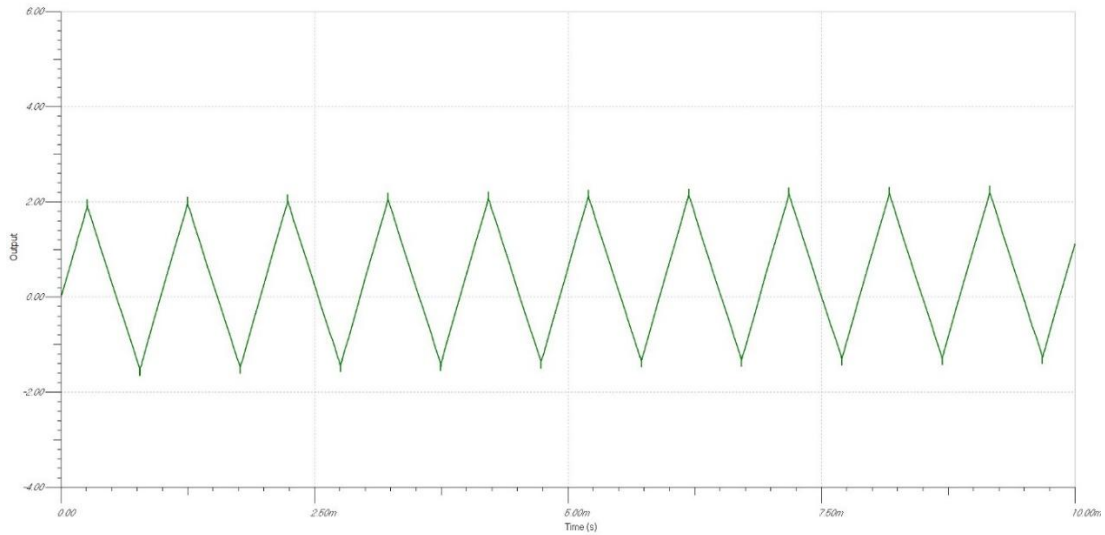


Σχήμα 15 Κύκλωμα ολοκληρωτή.

Το δεύτερο στάδιο του κυκλώματος αποτελείται από έναν τελεστικό ενισχυτή LM741 σε συνδεσμολογία ολοκληρωτή αναστροφής με αντίσταση παράλληλα στον πυκνωτή, ώστε να αποφευχθεί η πόλωση του με μία σταθερή τάση. Η λειτουργία του σταδίου είναι ότι λαμβάνει ως είσοδο το τετραγωνικό σήμα που παράγεται από το πρώτο στάδιο και εκτελώντας την πράξη της ολοκλήρωσης δημιουργεί τριγωνικό σήμα στην έξοδό του. Οι τιμές του πυκνωτή και των αντιστάσεων επιλέγονται ώστε ο ολοκληρωτής να λειτουργεί στην συχνότητα του σήματος εισόδου. Οι τύποι καθορισμού τη συχνότητας και του κέρδους είναι:

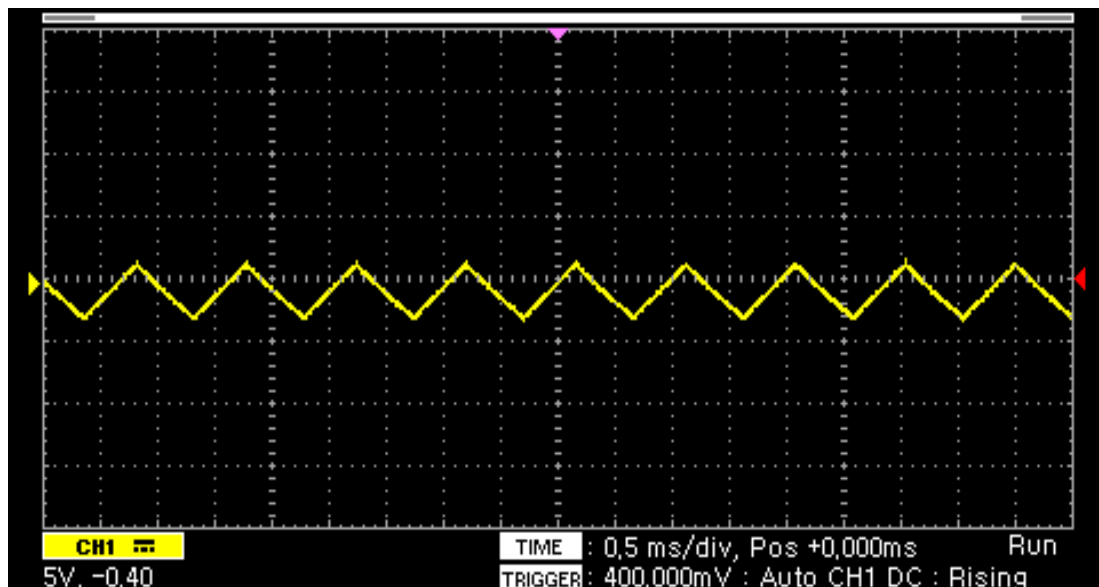
$$f = \frac{1}{2\pi C_4 R_4} \quad (3.6)$$

$$A_V = -\frac{R_4}{R_3} \times \frac{1}{1 + 2\pi C_4 R_4} \quad (3.7)$$



Σχήμα 16 Προσομοίωση 2^{ου} σταδίου.

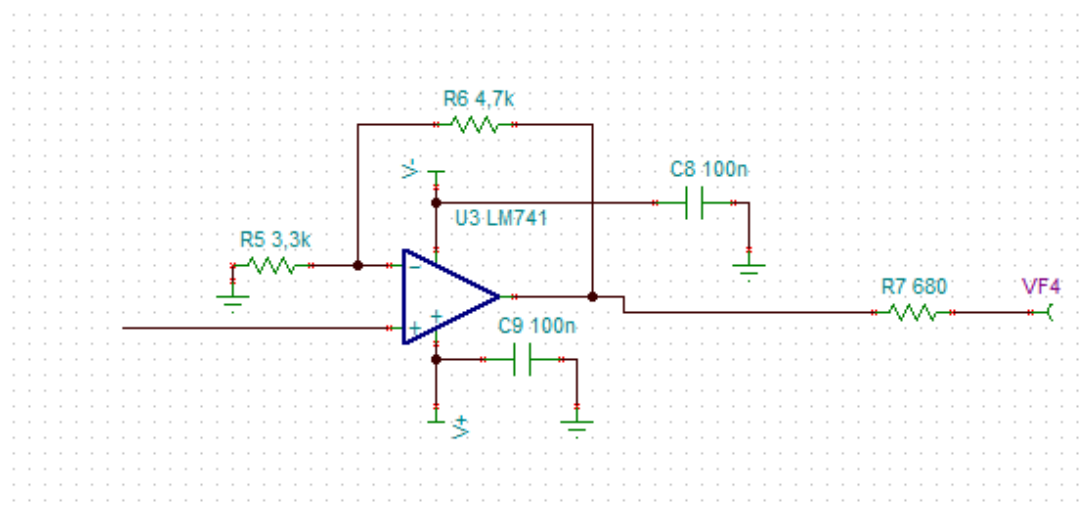
Η προσομοίωση στο TINA έδωσε τα παραπάνω αποτελέσματα για την κυματομορφή εξόδου του ολοκληρωτή. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η έξοδος του δεύτερου σταδίου του κυκλώματος διέγερσης στο παλμογράφο, σύμφωνα με την κατασκευή που έγινε στο εργαστήριο.



Σχήμα 17 Πραγματική έξοδος 2^{ου} σταδίου.

Παρατηρείται και εδώ η ύπαρξη spikes στις κορυφές του τριγώνου ως συνέπεια του φαινομένου που δημιουργείται από το πρώτο στάδιο. Το τριγωνικό σήμα έχει συχνότητα $f=1,04$ kHz και πλάτος $V_{pp}=5$ V.

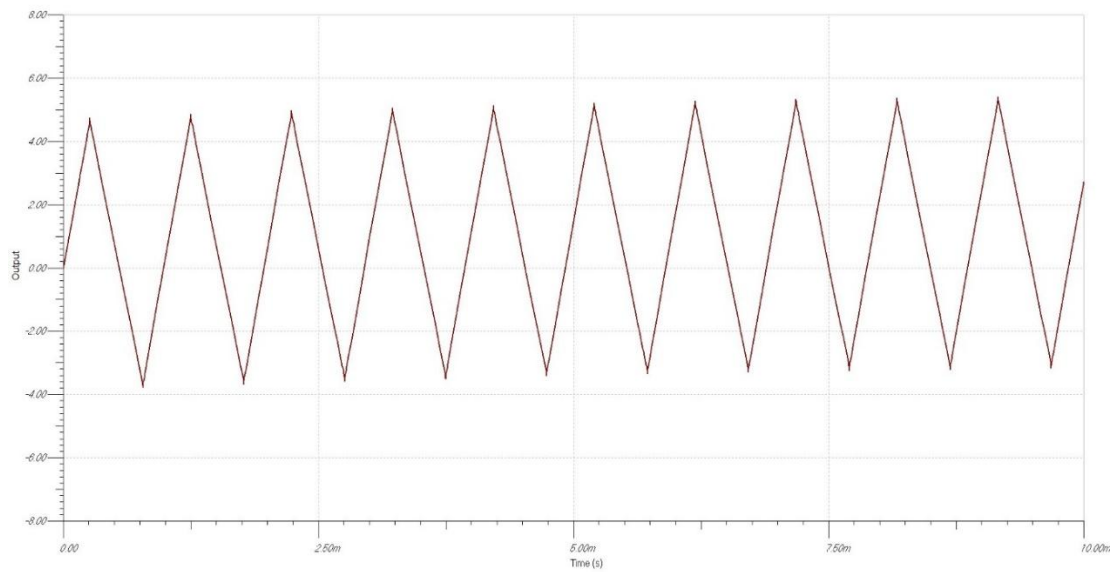
3^ο στάδιο [15][16]



Σχήμα 18 Κύκλωμα ενισχυτή σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία.

Το τελικό στάδιο του κυκλώματος ενισχύει το τριγωνικό σήμα της διέγερσης ώστε να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα για να δοθεί στον αισθητήρα. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός LM741 σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία και με την επιλογή κατάλληλων μεγεθών στις αντιστάσεις για την ρύθμιση του κέρδους.

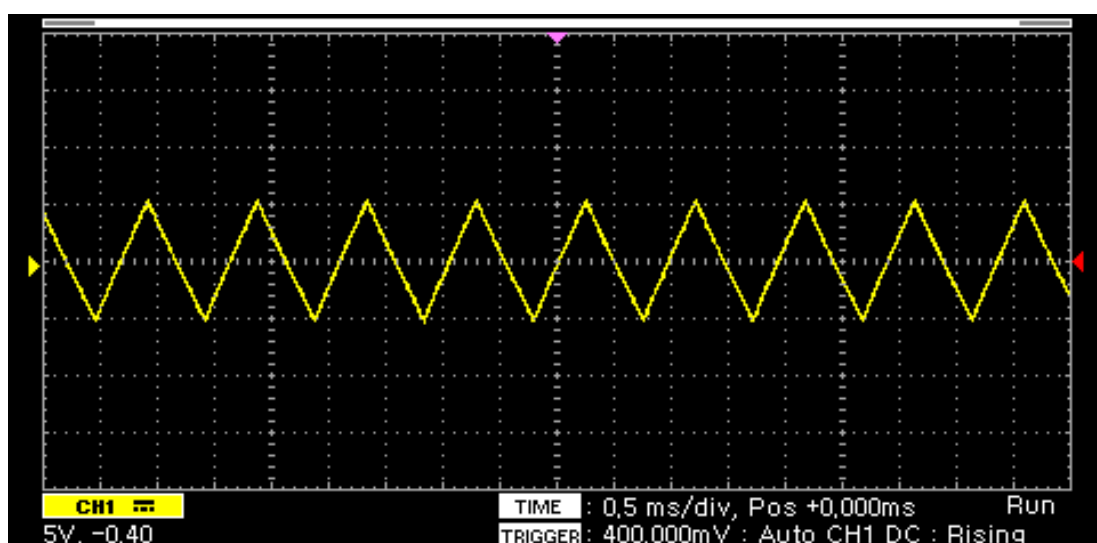
$$A = \frac{R_5 + R_6}{R_5} \quad (3.8)$$



Σχήμα 19 Προσομοίωση 3^{ου} σταδίου.

Όπως φαίνεται και από την προσομοίωση, το πλάτος της τάσης εξόδου έχει ενισχυθεί χωρίς να έρχεται σε κορεσμό.

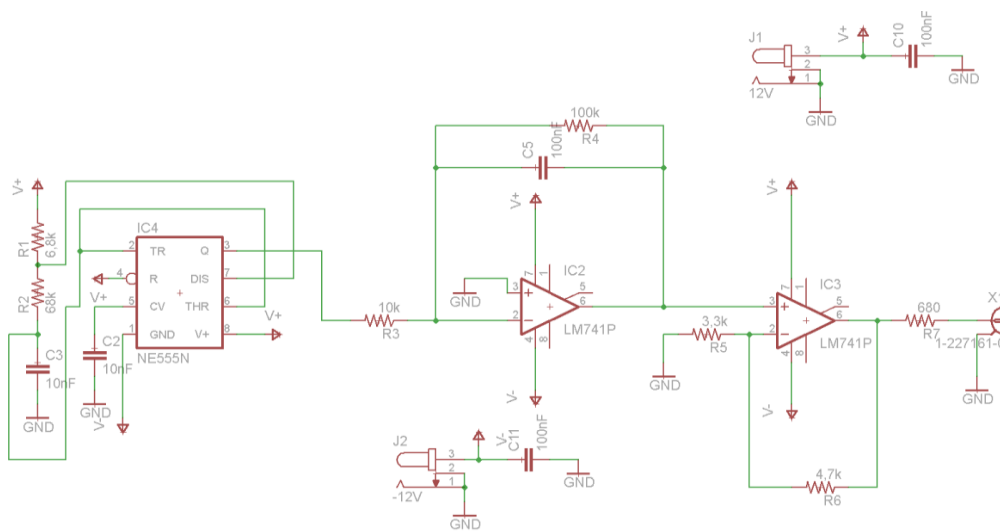
Η τελική έξοδος της πλακέτας που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο δίνεται στην παρακάτω εικόνα.



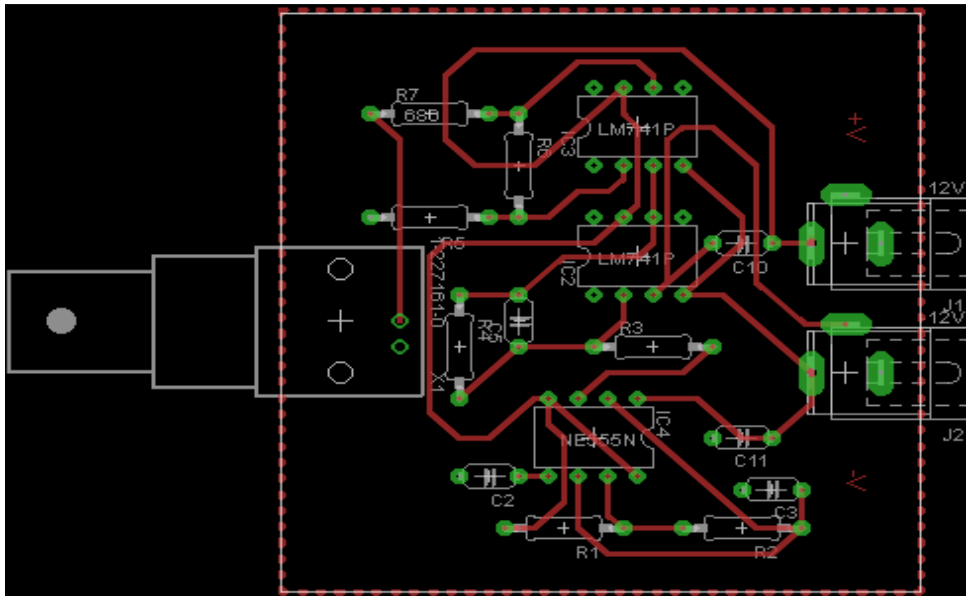
Σχήμα 20 Πραγματική έξοδος πλακέτας.

Το τριγωνικό σήμα τώρα έχει συχνότητα $f=1,04$ kHz και πλάτος $V_{pp}=13$ V.

Το τριγωνικό σήμα που έχει παραχθεί όπως απεικονίζεται στον παλμογράφο, είναι η έξοδος της πλακέτας που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Για την κατασκευή της πλακέτας υλοποιήσαμε το κύκλωμα στο AutoDesk Eagle. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα, έχουμε το σχηματικό του κυκλώματος και το σχέδιο της πλακέτας, το οποίο θα εκτυπωθεί σε διαφάνεια και θα αποτελέσει τη μάσκα για την κατασκευή της τελικής πλακέτας.

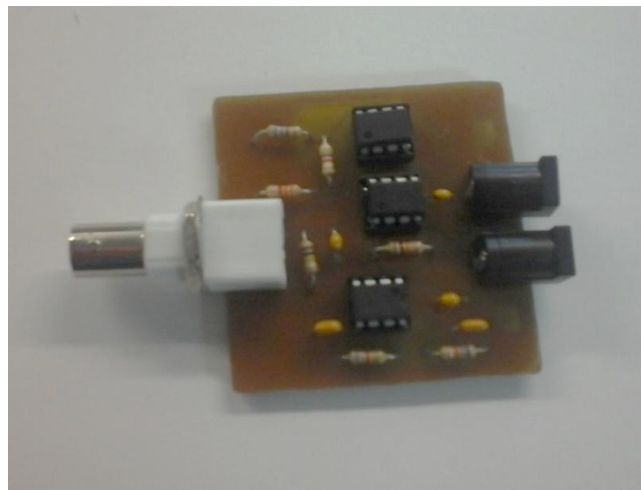


Σχήμα 21 Σχηματικό στο Eagle 1^{ου} κυκλώματος διέγερσης.

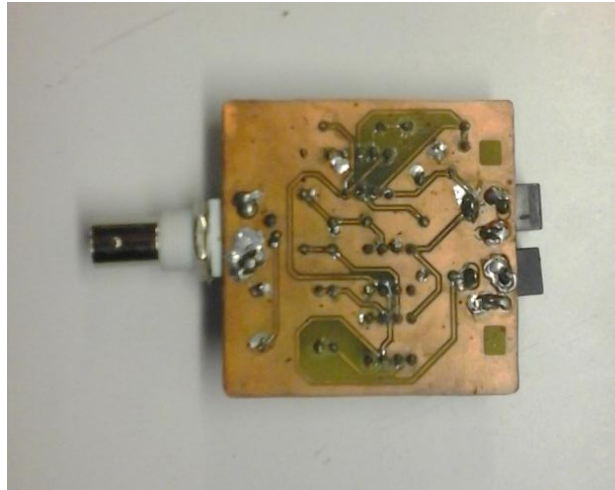


Σχήμα 22 Σχέδιο πλακέτας στο Eagle 1^{ου} κυκλώματος διέγερσης.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε φωτοευαίσθητη πλακέτα, πάνω στην οποία τοποθετήθηκε η διαφάνεια με το εκτυπωμένο κύκλωμα. Στη συνέχεια, η πλακέτα εκτέθηκε σε υπεριώδη ακτινοβολία. Ακολούθησε η εμφάνιση του κυκλώματος σε αυτήν, η αποχάλκωση, η κοπή και η διάνοιξη των οπών για τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Αφού αυτά τοποθετήθηκαν και κολλήθηκαν, ακολούθησε ένας έλεγχος της πλακέτας.



Σχήμα 23 Άνω όψη 1^{ου} κυκλώματος διέγερσης κατασκευασμένου σε πλακέτα.

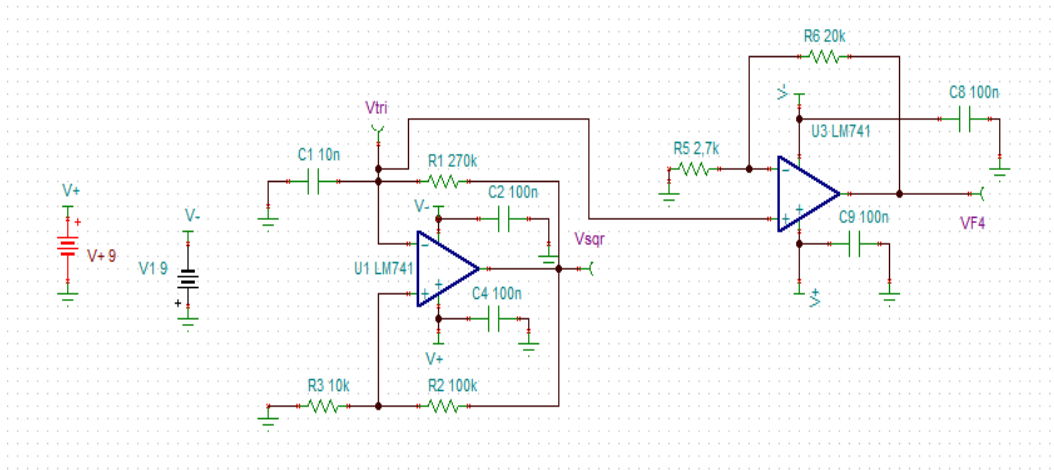


Σχήμα 24 Κάτω όψη 1^{ου} κυκλώματος διέγερσης κατασκευασμένου σε πλακέτα.

Η πλακέτα παράγει το σήμα διέγερσης που θα δοθεί στο fluxgate. Η ύπαρξη ωστόσο των spikes στις κορυφές του τριγώνου και σε αυτό το στάδιο, παρά την χρήση πυκνωτών 100nF από την τροφοδοσία στην γη, καθιστά το σήμα ασταθές και δημιουργεί προβλήματα στο σήμα εξόδου του αισθητήρα. Για αυτό το λόγο κατασκευάστηκε δεύτερο κύκλωμα διέγερσης, χωρίς την χρήση χρονιστή NE555 ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του overshooting στην διέγερση.

3.1.2 2^ο Ηλεκτρονικό κύκλωμα

Το δεύτερο κύκλωμα διέγερσης που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την διέγερση του αισθητήρα αποτελείται από 2 στάδια. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ο στόχος ήταν η παραγωγή ενός εναλλασσόμενου τριγωνικού σήματος συχνότητας 1 kHz, το οποίο θα δοθεί στο fluxgate. Για το κύκλωμα δεν χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια σήματος παρά μόνο θετική και αρνητική τροφοδοσία. Το σήμα δημιουργείται στο 1^ο στάδιο και εν συνεχεία ενισχύεται μέσω του 2^{ου} σταδίου, η έξοδος του οποίου δίνεται στο πηνίο διέγερσης του fluxgate. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ενισχυτές LM741, αντιστάσεις και πυκνωτές, ώστε να υλοποιηθεί το κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 25.

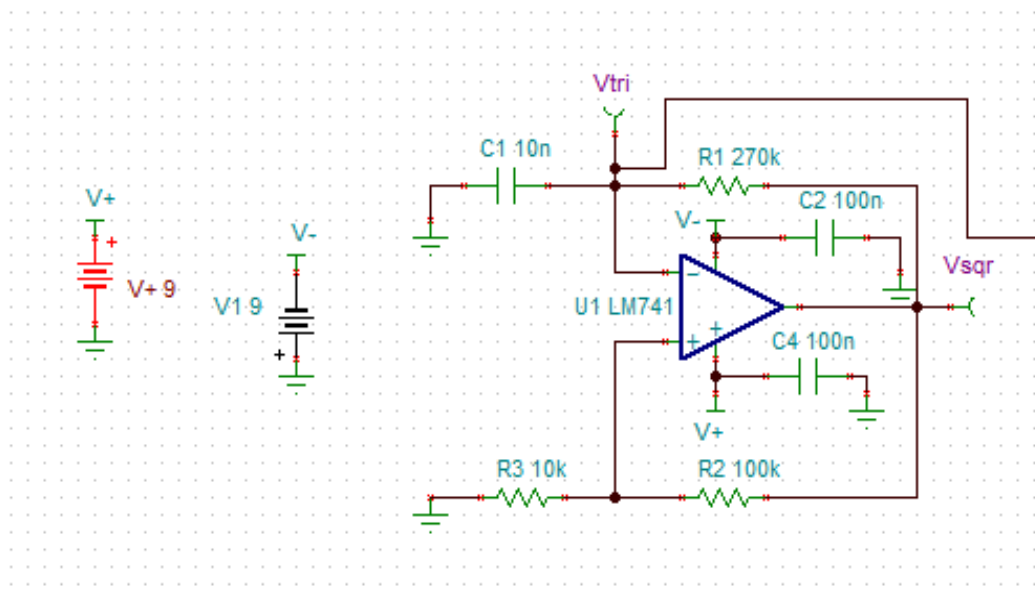


Σχήμα 25 Κύκλωμα διέγερσης.

Παρακάτω θα αναλυθεί η λειτουργία κάθε σταδίου, τα στοιχεία που επιλέχθηκαν και οι κυματομορφές που πήραμε τόσο μέσω του προγράμματος προσομοίωσης TINA όσο και μετά την κατασκευή και σύνδεση της πλακέτας στο εργαστήριο.

Αναλυτικότερα έχουμε:

1^ο στάδιο [17]



Σχήμα 26 Ταλαντωτής με LM741.

Το πρώτο στάδιο είναι ένας ταλαντωτής τριγωνικής και τετραγωνικής κυματομορφής 1 kHz. Κατασκευάζεται με χρήση ενός LM741, με σύνδεση των στοιχείων όπως

φαίνεται παραπάνω. Ο πυκνωτής C_1 και οι αντιστάσεις R_1 , R_2 , R_3 επιλέχθηκαν με κριτήριο την περίοδο T του σήματος που παράγεται με βάση τον τύπο:

$$T = 2 * R_1 * C_1 * \ln\left(\frac{2R_3 + R_2}{R_2}\right) \quad (3.9)$$

όπου θέλουμε περίπου $T = (1/f) = 1 \text{ ms}$.

Για τιμές:

$C = 10 \text{ nF}$

$R_1 = 270 \text{ k}\Omega$

$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

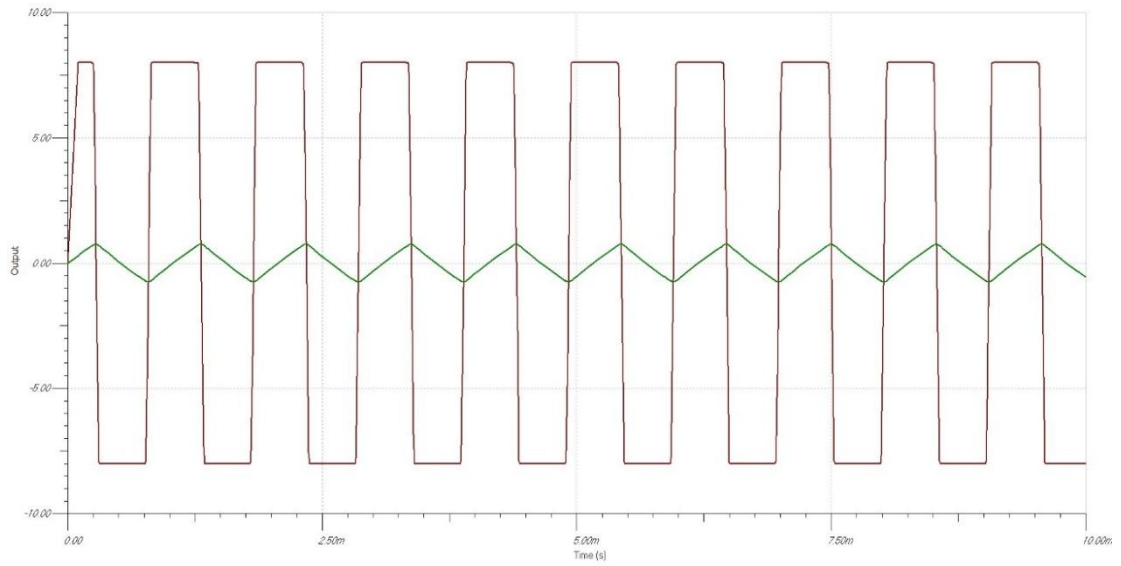
έχουμε $T = 0,984 \text{ ms}$

Άρα $f = 1,016 \text{ kHz}$.

Παρατηρούμε ότι το τετραγωνικό σήμα εξάγεται από το pin 6 του LM741 ενώ το τριγωνικό που μας ενδιαφέρει, από τον κόμβο που ενώνει το pin 2 με τα C_1 , R_1 .

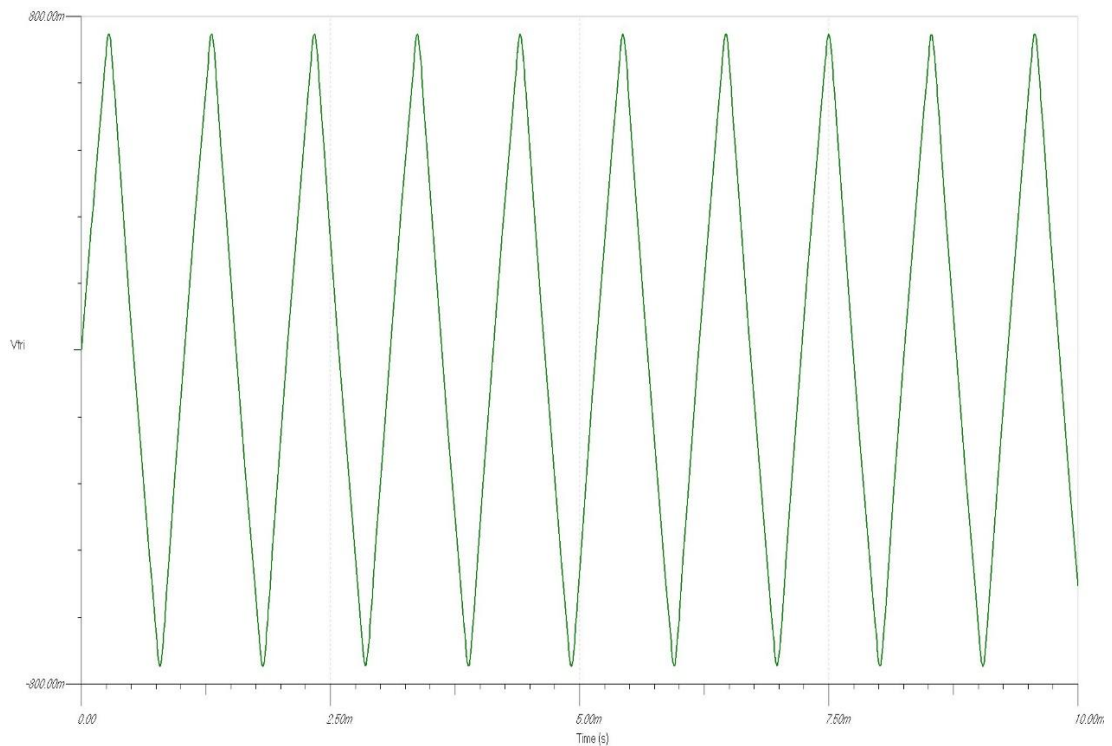
Στα pins 4 και 7 συνδέονται η αρνητική και θετική τροφοδοσία αντίστοιχα και χρησιμοποιούνται δύο πυκνωτές 100 nF από τις τροφοδοσίες στη γη για εξάλειψη θορύβου και ανεπιθύμητης κυμάτωσης στο σήμα εξόδου λόγω του τροφοδοτικού.

Η προσομοίωση μέσω του TINA για το κύκλωμα του ταλαντωτή εμφανίζει τα δύο σήματα που δημιουργήθηκαν.



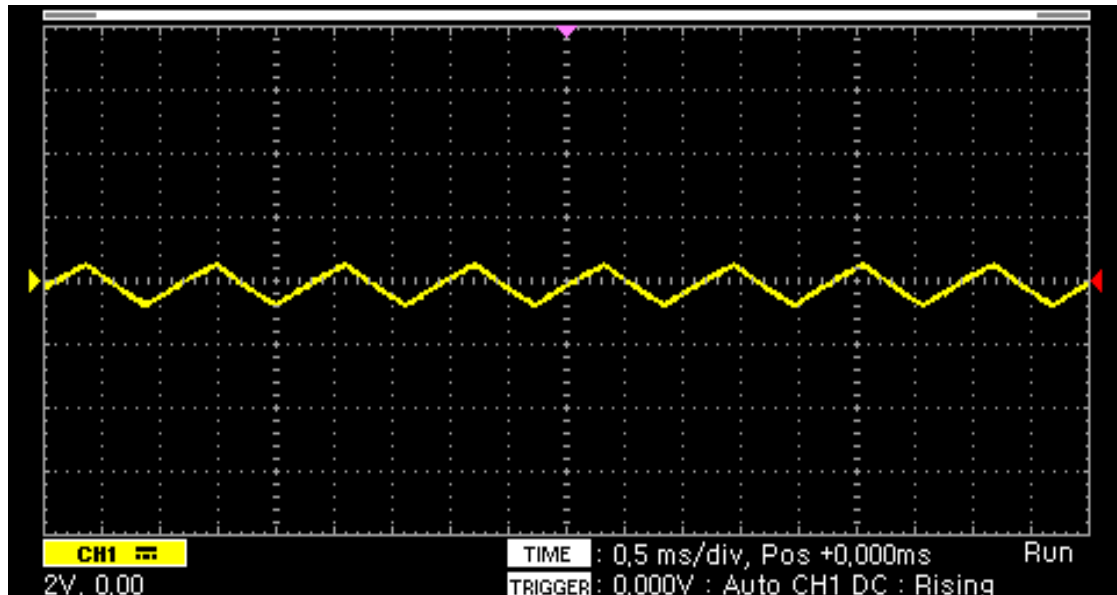
Σχήμα 27 Προσομοίωση σημάτων εξόδου ταλαντωτή.

Πιο συγκεκριμένα το εναλλασσόμενο τριγωνικό σήμα που αναμένεται να λάβουμε και να χρησιμοποιήσουμε στην συνέχεια φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 28 Προσομοίωση τριγωνικής εξόδου ταλαντωτή.

Με βάση την προσομοίωση, η συχνότητά του είναι $f = 1,01 \text{ kHz}$ και το πλάτος του $V_{pp} = 1,5 \text{ V}$. Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή του ταλαντωτή στο εργαστήριο σε πραγματικές συνθήκες και η σύνδεσή του με τον παλμογράφο για επιβεβαίωση της λειτουργίας του και των αποτελεσμάτων που πήραμε από το TINA.

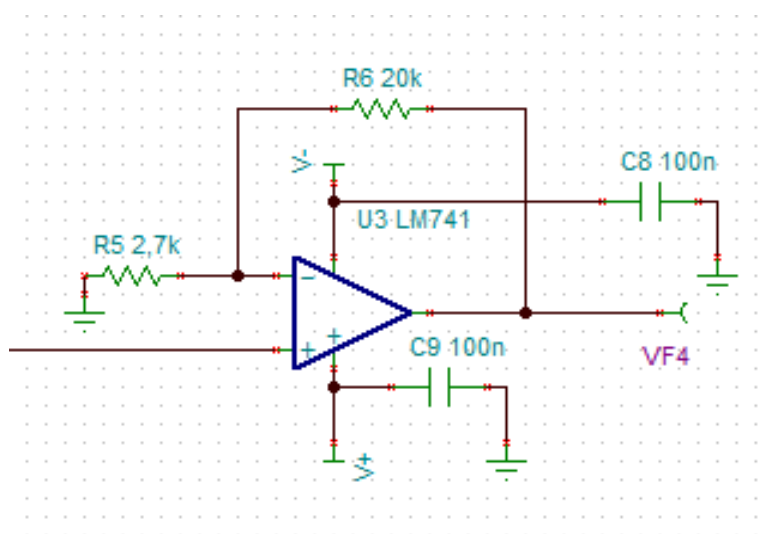


Σχήμα 29 Έξοδος ταλαντωτή σε παλμογράφο.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται στον παλμογράφο το σήμα που παράγει ο ταλαντωτής. Η συχνότητά του είναι $f = 0,91 \text{ kHz}$ και το πλάτος $V_{pp} = 1,4 \text{ V}$.

Παρατηρούμε ότι η συχνότητα και το πλάτος του σήματος στην πραγματικότητα είναι λίγο μικρότερα από αυτά που δίνει η προσομοίωση. Αυτό συμβαίνει διότι οι τιμές των αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν μπορεί να έχουν μικρή απόκλιση από αυτές που αναγράφονται πάνω τους.

2^ο στάδιο

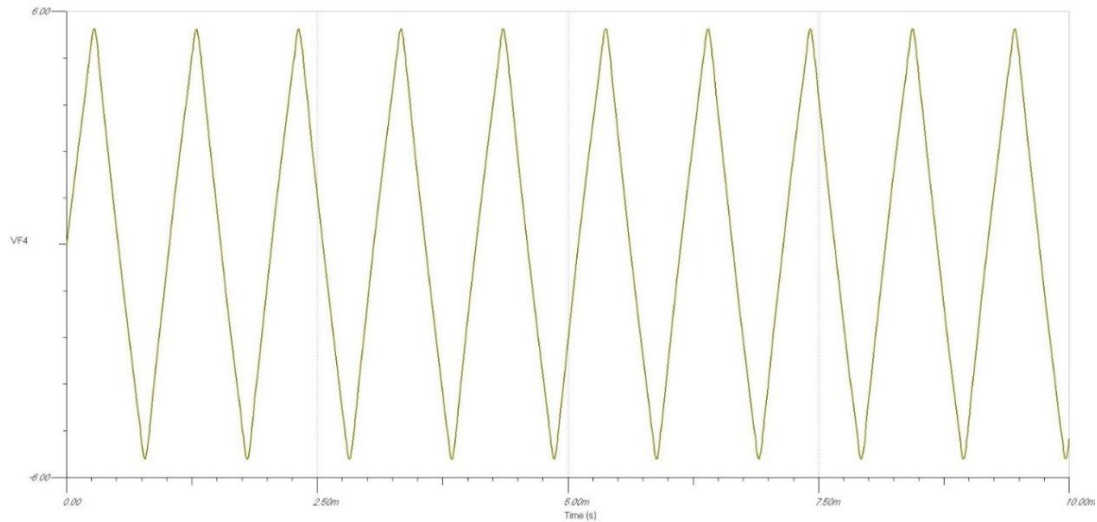


Σχήμα 30 Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή.

Το τριγωνικό σήμα που δημιουργήθηκε με τον ταλαντωτή προηγουμένως δίνεται ως είσοδος στο επόμενο στάδιο του κυκλώματος. Ο στόχος είναι η ενίσχυσή του μέσω ενός τελεστικού ενισχυτή LM741 σε μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία. Ο τύπος που καθορίζει το κέρδος τάσης είναι:

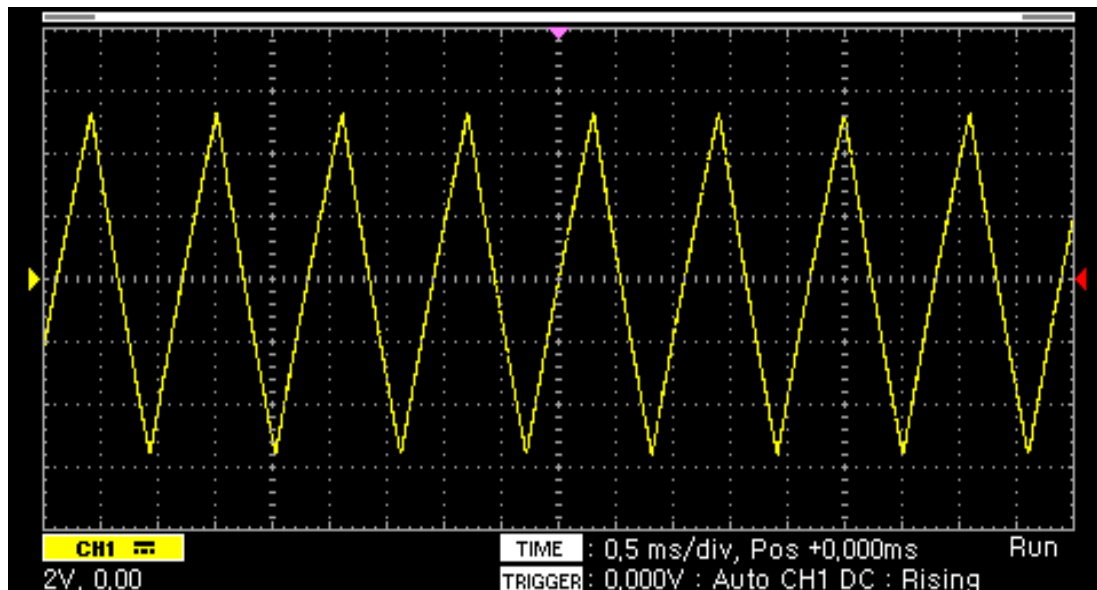
$$A = \frac{R_5 + R_6}{R_5} \quad (3.10)$$

Οι τιμές των αντιστάσεων επιλέχθηκαν ώστε να επιτυγχάνεται το μέγιστο δυνατό κέρδος και η μέγιστη ενίσχυση της τάσης χωρίς το σήμα εξόδου να φτάνει σε κορεσμό. Τα όρια της λειτουργίας καθορίζονται από την τάση τροφοδοσίας που δίνουμε στο κύκλωμα και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του LM741. Οι πυκνωτές 100 nF χρησιμοποιούνται και σε αυτό το στάδιο, στα pins τροφοδοσίας του ενισχυτή για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σταθεροποίηση του σήματος.



Σχήμα 31 Προσομοίωση 2^{ου} σταδίου.

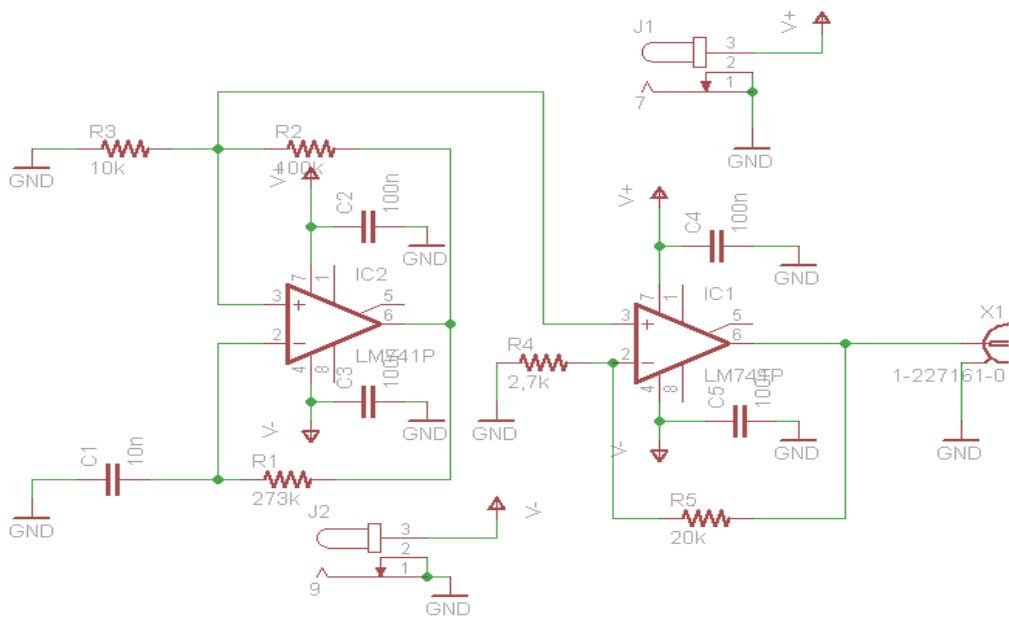
Στο σχήμα απεικονίζεται το τριγωνικό σήμα εξόδου που θα λάβουμε σύμφωνα με την προσομοίωση του TINA. Το πλάτος του είναι $V_{pp}=10,5\text{ V}$ και η συχνότητα $f=0,91\text{ kHz}$.



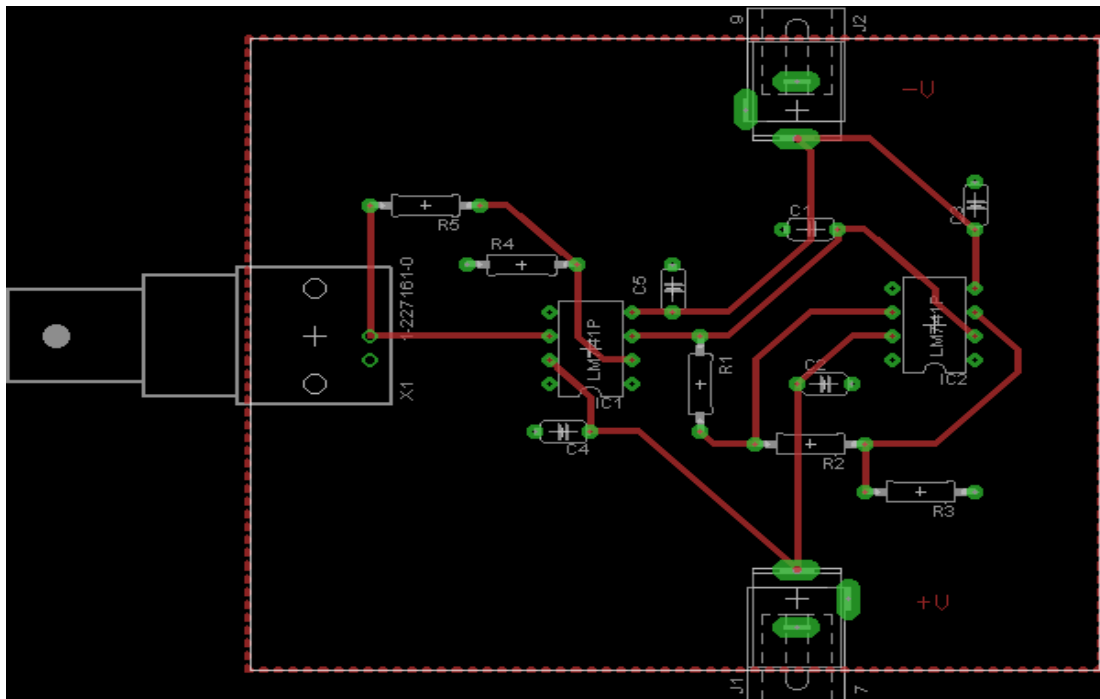
Σχήμα 32 Πραγματική έξοδος 2^{ης} πλακέτας.

Η υλοποίηση το κυκλώματος δίνει τα παραπάνω αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι παράχθηκε τριγωνικό εναλλασσόμενο σήμα 910 Hz με πλάτος $V_{pp}=10,7\text{ V}$ το οποίο είναι ικανό να δοθεί ως διέγερση στον αισθητήρα. Το σήμα είναι αντίστοιχο με αυτό που αναμέναμε και αποτελεί την έξοδο της πλακέτας που κατασκευάστηκε για το κύκλωμα διέγερσης.

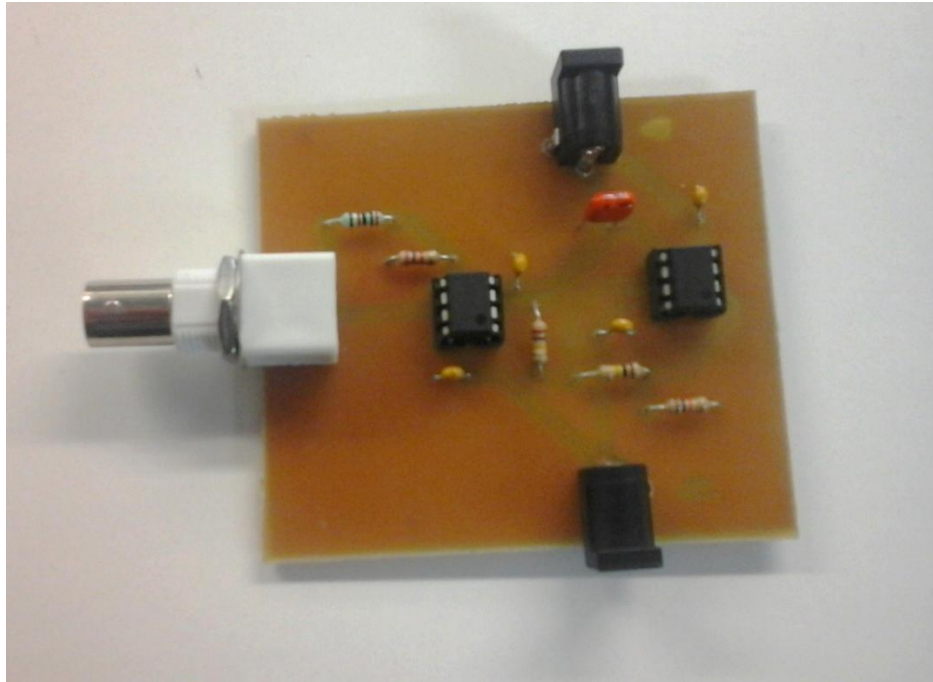
Για την κατασκευή της ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε και στο 1^ο κύκλωμα διέγερσης μέσω του προγράμματος AutoDesk Eagle.



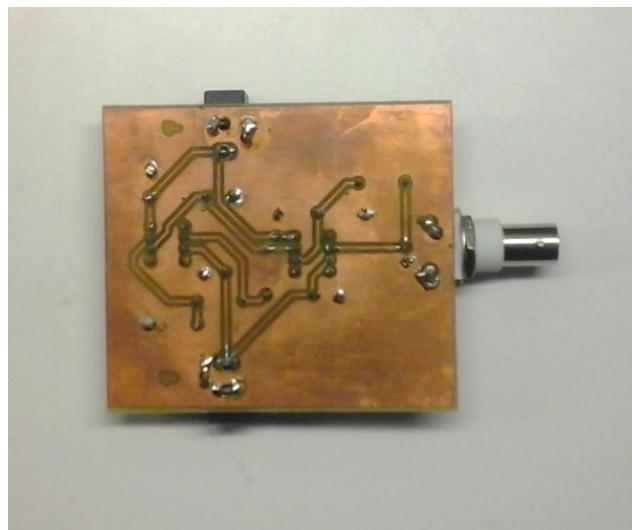
Σχήμα 33 Σχηματικό στο Eagle 2^{ου} κυκλώματος διέγερσης.



Σχήμα 34 Σχέδιο πλακέτας στο Eagle 2^{ου} κυκλώματος διέγερσης.



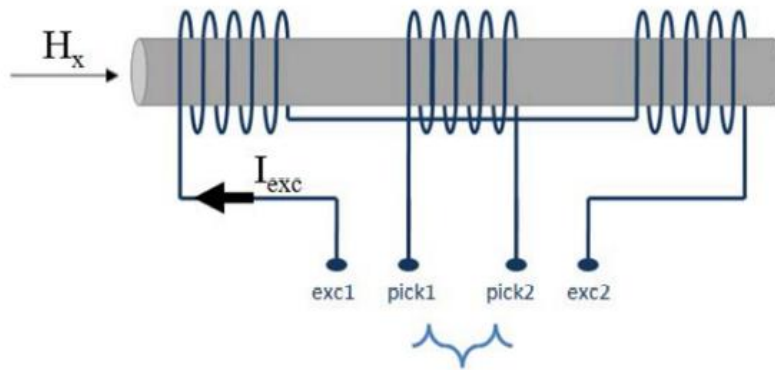
Σχήμα 35 Άνω όψη 2^{ου} κυκλώματος διέγερσης υλοποιημένου σε πλακέτα.



Σχήμα 36 Κάτω όψη 2^{ου} κυκλώματος διέγερσης υλοποιημένου σε πλακέτα.

3.2 Αισθητήρας fluxgate

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η υλοποίηση του αισθητήρα τύπου fluxgate που χρησιμοποιήθηκε και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του. Πρόκειται για ένα fluxgate μονού πυρήνα με δύο πηνία τυλιγμένα γύρω του [18].



Σχήμα 37 Δομή αισθητήρα fluxgate.

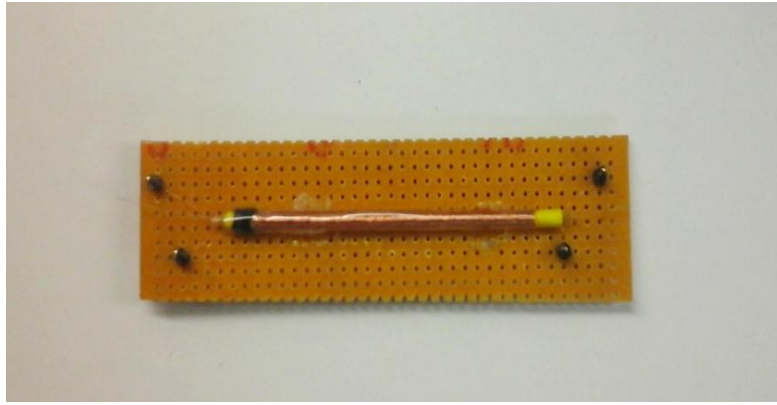
Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η δομή και το σχέδιο του αισθητήρα. Χρησιμοποιήθηκε ένας γυάλινος σωλήνας μήκους 7 cm και διαμέτρου 1 mm για την κατασκευή των πηνίων του μαγνητόμετρου. Η γεωμετρία επιλέχτηκε έτσι ώστε να μην έχουμε ανυστερητικό βρόχο όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.3.2. Ο πυρήνας του αποτελείται από άμορφο μαγνητικό σύρμα διαμέτρου 101 μm το οποίο περνάει μέσα από τον γυάλινο σωλήνα. Το μαγνητικό υλικό του σύρματος είναι CoFeSiB, το οποίο έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και προσφέρει υψηλή ευαισθησία.

Γύρω από τον σωλήνα είναι τυλιγμένα ομοιόμορφα σε σπειροειδή μορφή δύο σύρματα χαλκού διατομής 0,1 mm. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται τα δύο πηνία του fluxgate για τα οποία ισχύει:

Πηνία	Στρώσεις N	Σπείρες/Στρώση	Συνολικές σπείρες
Πηνίο διέγερσης	2	550	1100
Πηνίο λήψης	2	550	1100

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά πηνίων fluxgate.

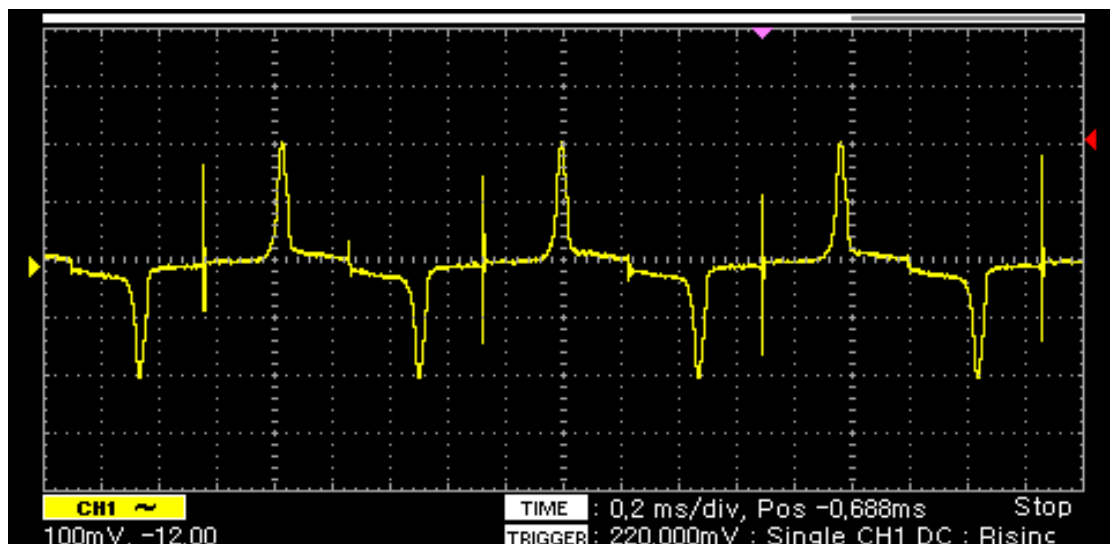
Η διάταξη που περιγράφηκε αποτελεί το μαγνητόμετρο πύλης-ροής (fluxgate) που χρησιμοποιήθηκε και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 38 Το μαγνητόμετρο πύλης-ροής που χρησιμοποιήθηκε.

Οι τέσσερις ακροδέκτες αποτελούν τα άκρα των δύο πηνίων και είναι τοποθετημένοι ανά ζεύγη. Το ένα ζεύγος ακροδεκτών προέρχεται από το πηνίο διέγερσης και σε αυτό θα εφαρμόσουμε το τριγωνικό σήμα εξόδου που δημιουργήσαμε με το κύκλωμα διέγερσης, ενώ το άλλο ζεύγος ακροδεκτών προέρχεται από το πηνίο λήψης και σε αυτό θα συνδεθεί ο παλμογράφος ώστε να λάβουμε το σήμα εξόδου του αισθητήρα.

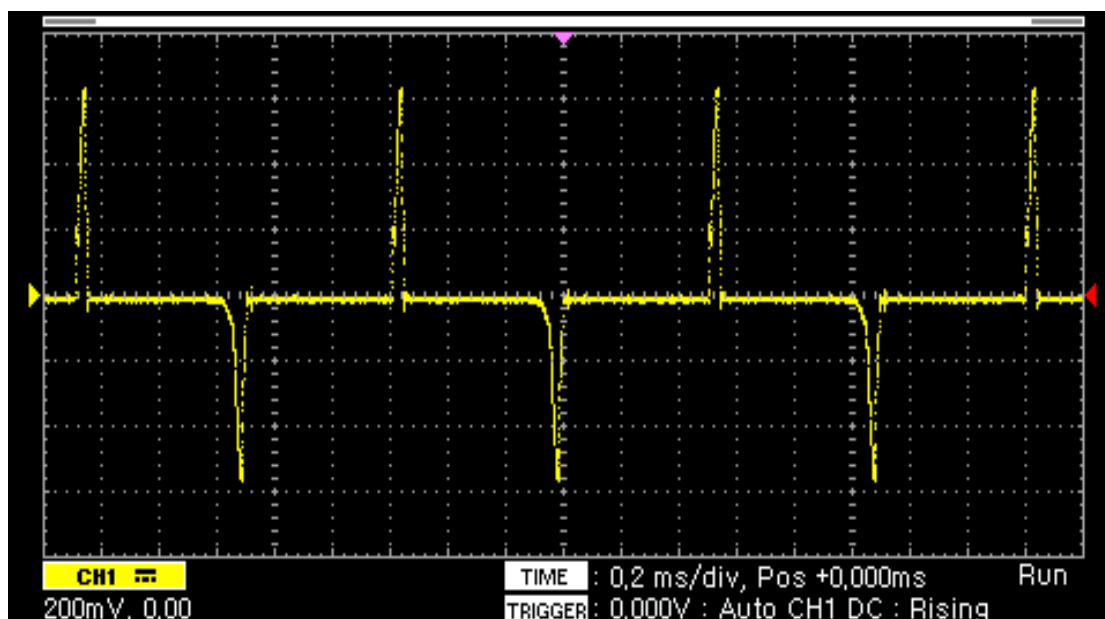
Ακολούθως παρατίθεται το σήμα εξόδου του αισθητήρα fluxgate και με τα δύο κυκλώματα.



Σχήμα 39 Έξοδος αισθητήρα με 1^ο κύκλωμα διέγερσης.

Ο αισθητήρας λειτουργεί σε συχνότητα $f = 1,03 \text{ kHz}$ και το πλάτος της τάσης είναι $V_{pp} = 0,4 \text{ V}$.

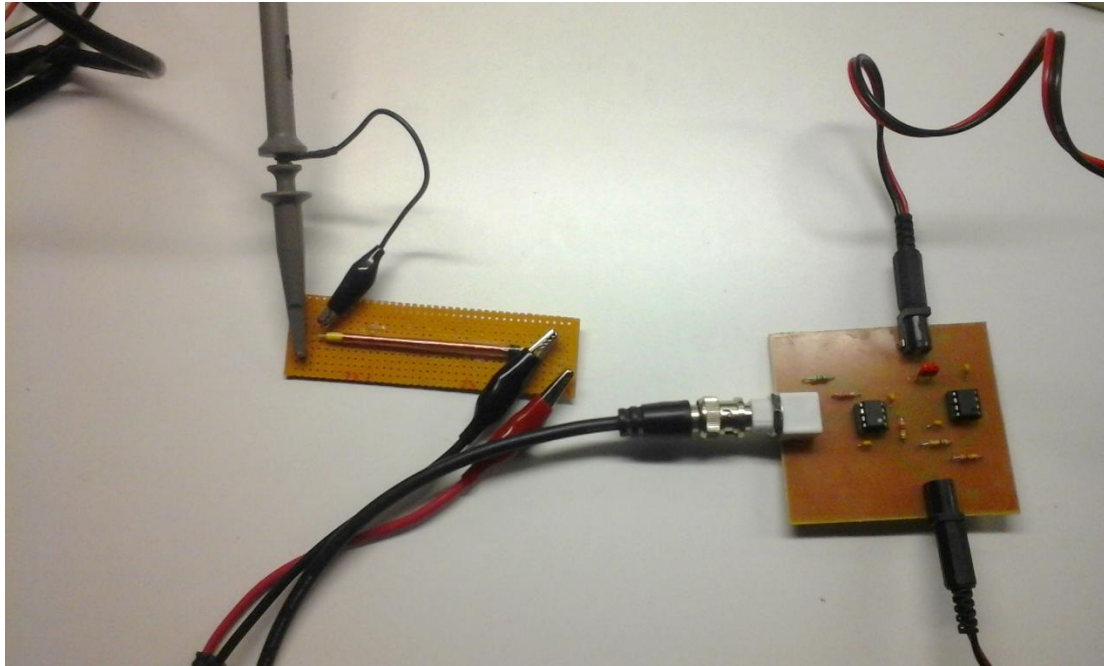
Διαπιστώνεται στο Σχήμα 39 η αστάθεια του σήματος και η ύπαρξη κατακόρυφων γραμμών υψηλότερων από τις κορυφές της τάσης εξόδου του αισθητήρα σε ορισμένα σημεία. Το πρόβλημα δημιουργείται όπως προαναφέρθηκε από το φαινόμενο του overshooting που προκύπτει στο 1^ο κύκλωμα διέγερσης λόγω της παρουσίας του χρονιστή NE555. Με την αντικατάσταση του κυκλώματος διέγερσης και την χρήση του 2^{ου} κυκλώματος που κατασκευάσαμε έχουμε:



Σχήμα 40 Έξοδος αισθητήρα με 2^ο κύκλωμα διέγερσης.

Η έξοδος του αισθητήρα έχει την επιθυμητή μορφή. Λειτουργεί σε συχνότητα $f=910$ Hz και το πλάτος της τάσης είναι $V_{pp}= 1,18$ V.

Επομένως, έγιναν πειραματικές μετρήσεις και βαθμονόμηση του μαγνητόμετρου πύλης-ροής και με τα δύο κυκλώματα διέγερσης που περιγράφηκαν στις ενότητες 3.1.1, 3.1.2 και το μαγνητόμετρο fluxgate που αναλύθηκε σε αυτήν την ενότητα. Παρακάτω φαίνεται η συνολική διάταξη συνδεδεμένη με τα όργανα του εργαστηρίου.



Σχήμα 41 Συνολική συνδεδεμένη διάταξη.

3.3 Διαδικασία μετρήσεων – μετρήσεις – αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση και βαθμονόμηση του αισθητήρα που υλοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη μετρήσεων. Αρχικά για την χρήση του ως αισθητήρα μέτρησης θέσης, μόνο με το 2^ο κύκλωμα διέγερσης, και εν συνεχεία ως αισθητήρα μέτρησης πεδίου και με τα δύο κυκλώματα διέγερσης ξεχωριστά. Η διαδικασία των μετρήσεων διεξήχθη στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του Ε.Μ.Π.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την βαθμονόμηση με το 1^ο κύκλωμα είναι η RTD, όπου η βαθμονόμηση γίνεται με βάση τη διαφορά μεταξύ της διάρκειας της θετικής και της αρνητικής ημιπεριόδου του σήματος εξόδου [19], δηλαδή

$$RTD = T^+ - T^- \quad (3.11)$$

Με το 2^ο κύκλωμα διέγερσης η βαθμονόμηση έγινε μέσω της μέτρησης της διαφοράς του πλάτους της τάσης μεταξύ θετικής και αρνητικής κορυφής του σήματος εξόδου.

$$\Delta V = V_{MAX} - V_{MIN} \quad (3.12)$$

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος προσδιορισμού του εξωτερικού πεδίου μέσω της εκτίμησης των μέγιστων και ελάχιστων τιμών της επαγόμενης στο πηνίο λήψης τάσης.

Η εφαρμογή ενός εξωτερικού πεδίου επιδρά στον μαγνητικό πυρήνα, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η έξοδος που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης. Επομένως οι τιμές των θετικών και αρνητικών κορυφών της τάσης εξόδου του αισθητήρα αλλάζουν και έχουμε αλλαγή στο V_{pp} .

Με χρήση του παλμογράφου, μπορεί να υπολογιστεί το V_{pp} του σήματος εξόδου. Συνεπώς, μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης, μπορούμε να συσχετίσουμε την τάση εξόδου με την ένταση ενός άγνωστου επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

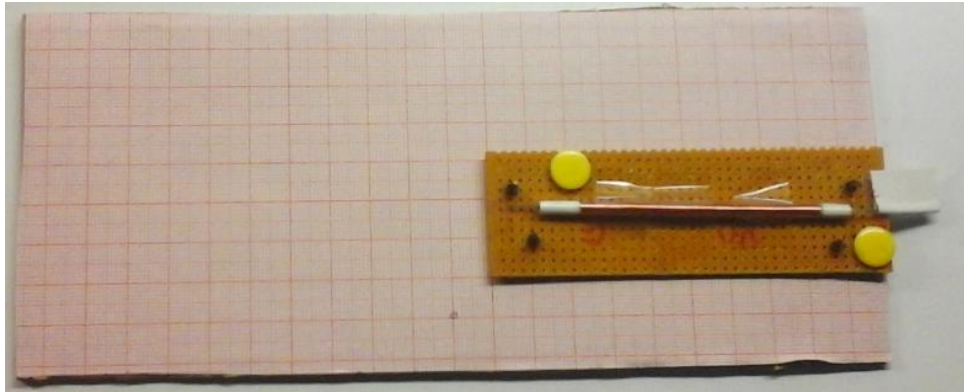
Για το 2^ο κύκλωμα διέγερσης δεν έγιναν οι μετρήσεις με βάση το RTD καθώς για να λειτουργήσει το μαγνητόμετρο ως RTD fluxgate και να γίνει βαθμονόμηση με βάση αυτό θα έπρεπε να του παρέχουμε ισχυρότερο ρεύμα διέγερσης άρα και υψηλότερη τάση διέγερσης. Αυτό δεν κατέστη δυνατό με την συγκεκριμένη διάταξη χαμηλού κόστους καθώς ο LM 741 εισερχόταν στην περιοχή κορεσμού όταν προσπαθούσαμε να ενισχύσουμε περαιτέρω την τάση.

3.3.1 Μέτρηση θέσης

Αρχικά έγινε βαθμονόμηση του fluxgate ως αισθητήρα μέτρησης θέσης.

Χρησιμοποιήθηκε μόνο το 2^ο κύκλωμα διέγερσης, δηλαδή το σήμα εξόδου του αισθητήρα που βλέπουμε στο Σχήμα 40.

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε χιλιοστομετρικό χαρτί το οποίο ήταν βαθμονομημένο ώστε όταν όλος ο πυρήνας από άμορφο σύρμα είναι εντός του μαγνητόμετρου, η άκρη του σύρματος να είναι στο σημείο 0. Εν συνεχεία, μετακινώντας την άκρη του σύρματος από το σημείο 0, δηλαδή μετατοπίζοντας τον πυρήνα, λαμβάναμε μετρήσεις για το πλάτος της τάσης εξόδου από την θετική στην αρνητική κορυφή.



Σχήμα 42 Αισθητήρας fluxgate σε χιλιοστομετρικό χαρτί.

Οι μετρήσεις έγιναν με πεδίο διέγερσης συχνότητας 910 Hz (Σχήμα 32).

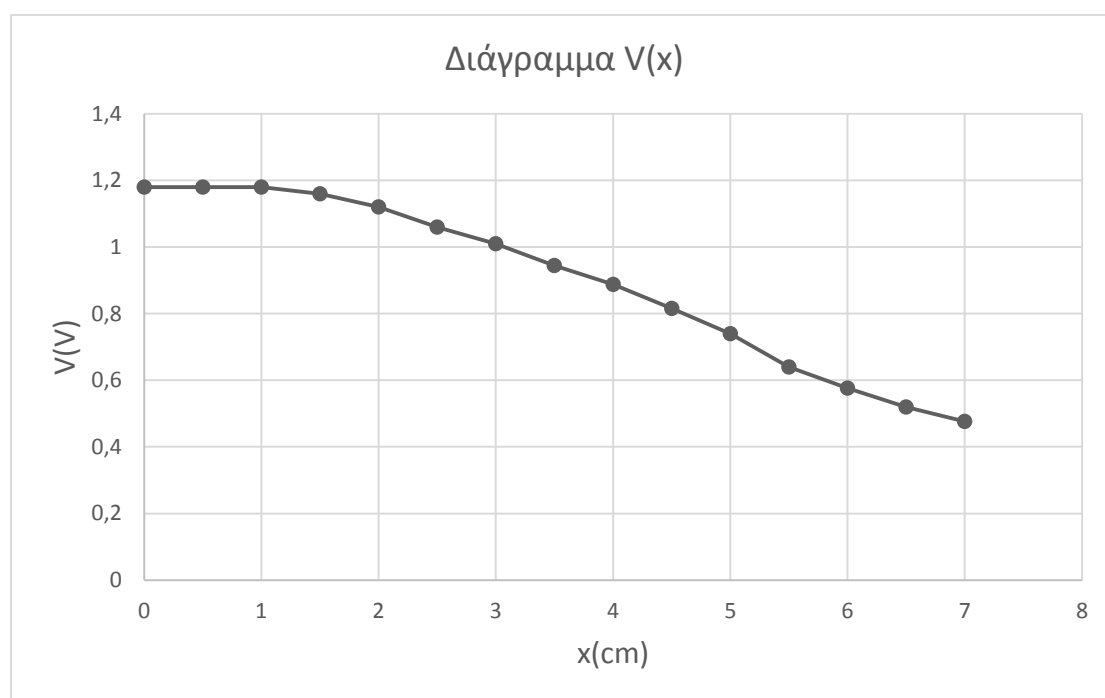
Ο πίνακας των μετρήσεων θέσης για τον αισθητήρα είναι ο παρακάτω.

Μετατόπιση πυρήνα $X(\text{cm})$	Τάση εξόδου $V_{pp}(V)$
0	1,18
0,5	1,18
1	1,18
1,5	1,16
2	1,12
2,5	1,06
3	1,01
3,5	0,944
4	0,888
4,5	0,816
5	0,740
5,5	0,640
6	0,576
6,5	0,520
7	0,476

Πίνακας 3 Αποτελέσματα για βαθμονόμηση μαγνητόμετρου ως αισθητήρα μέτρησης θέσης.

Πρέπει να αναφερθεί ότι όταν $x = 7$ cm, έχει αφαιρεθεί όλο το σύρμα από το εσωτερικό του γυάλινου σωλήνα του μαγνητόμετρου, επομένως ο αισθητήρας λειτουργεί ως πηνία με πυρήνα αέρα.

Ακολουθεί το διάγραμμα της τάσης εξόδου με την μετατόπιση του πυρήνα του αισθητήρα.



Σχήμα 43 Διάγραμμα τάσης – μετατόπισης αισθητήρα fluxgate.

Η χαρακτηριστική είναι αρκετά γραμμική για τιμές μετατόπισης του πυρήνα από 1,5 cm και μετά, αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς το σύρμα του πυρήνα είναι λίγο μεγαλύτερο από τα 7 cm του γυάλινου σωλήνα άρα για $x < 1,5$ όλο το πηνίο διαπερνάται από το σύρμα.

Επομένως η διάταξη και ο αισθητήρας που υλοποιήθηκε λειτουργεί ικανοποιητικά ως αισθητήρας μέτρησης θέσης και η βαθμονόμηση που έγινε παρέχει αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η σημασία της βαθμονόμησης που έγινε στο fluxgate είναι ότι ανάλογα με την τάση που λαμβάνουμε υπολογίζεται η θέση του προς μέτρηση αντικειμένου. Συγκεκριμένα η αλλαγή στην επαγόμενη τάση σημαίνει και αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο επαγωγής

και ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει προσδιορίζεται με χρήση του Πίνακα 3 και η απόσταση του αντικειμένου από το σημείο που έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας.

Έγινε χρήση της μεθόδου peak detection, όπως αναλύθηκε παραπάνω, όχι με άμεση μεταβολή του πεδίου αλλά με έμμεση μέσω της μετακίνησης του πυρήνα κατά απόσταση ίδια με την απόσταση του αντικειμένου από το μαγνητόμετρο πύλης-ροής.

3.3.2 Μέτρηση πεδίου

Το δεύτερο σύνολο μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε αποτελεί ουσιαστικά μία βαθμονόμηση του αισθητήρα fluxgate για τη μέτρηση του εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

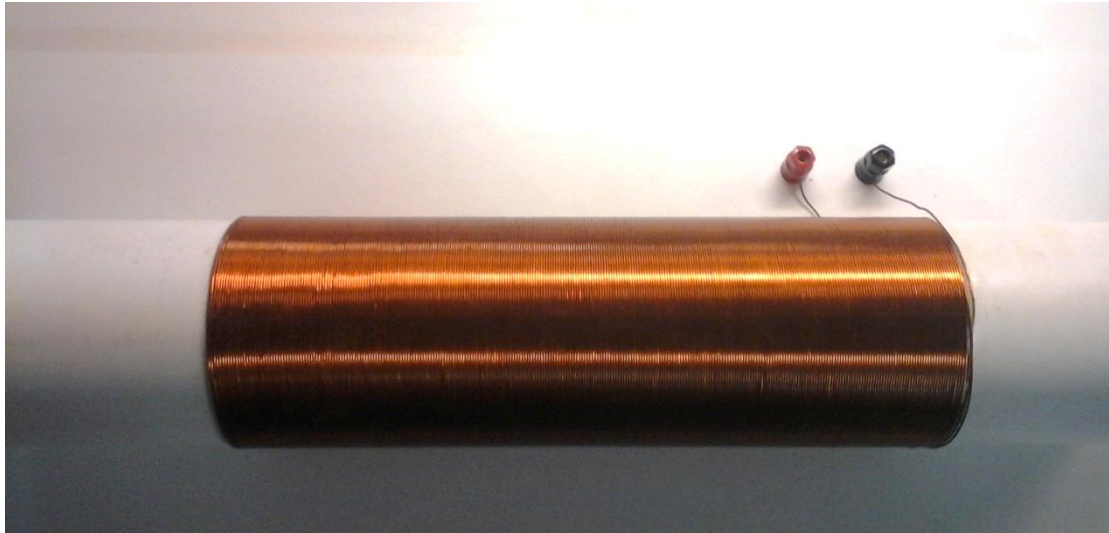
Για τη δημιουργία ομογενούς DC πεδίου χρησιμοποιήθηκε σωληνοειδές πηνίο που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο και τροφοδοτήθηκε με διάφορες τιμές ρεύματος, ώστε το πεδίο να λάβει διάφορες τιμές.

Τα χαρακτηριστικά του σωληνοειδούς που φαίνεται στο Σχήμα 44 είναι:

Μήκος L (cm)	30
Ακτίνα R (cm)	10
Στρώσεις	2
Σπείρες/στρώση	290
Συνολικές σπείρες N	580

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά σωληνοειδούς αγωγού.

Το σύρμα χαλκού με το οποίο δημιουργήθηκαν οι σπείρες του σωληνοειδούς πηνίου είναι διατομής $A= 1\text{mm}$.



Σχήμα 44 Σωληνοειδές πηνίο βαθμονόμησης.

Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο κέντρο του σωληνοειδούς, ενώ ήταν συνδεδεμένος με το κύκλωμα διέγερσης και με τον παλμογράφο. Μέσω του τροφοδοτικού, δημιουργήθηκε το τριγωνικό σήμα για την διέγερση του αισθητήρα. Μέσω ενός δεύτερου τροφοδοτικού που συνδέθηκε με τους ακροδέκτες του σωληνοειδούς πηνίου δόθηκε DC ρεύμα για την δημιουργία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εντός του σωληνοειδούς. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H στο κέντρο του σωληνοειδούς είναι γνωστή και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H = I * \frac{N}{L} \quad (3.13)$$

Με μονάδα μέτρησης το Wb (Webber) ή (A/m).

Βαθμονόμηση αισθητήρα με 2^ο κύκλωμα διέγερσης.

Στον παλμογράφο λαμβάναμε το σήμα της τάσης εξόδου του αισθητήρα και με τη μέθοδο ανίχνευσης κορυφών έγινε η βαθμονόμηση του, καθώς με την μεταβολή του ρεύματος είχαμε μεταβολή του επαγόμενου πεδίου, επομένως και μεταβολή της επαγόμενης από το πηνίο λήψης τάσης.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή η βαθμονόμηση δεν έγινε με την μέτρηση της διαφοράς του πλάτους V_{pp} αλλά μόνο με την μέτρηση του V_{min} στο σήμα εξόδου διότι παρουσίαζε πιο ομαλή λειτουργία και μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Χρησιμοποιήθηκε επομένως η αρνητική κορυφή της τάσης εξόδου του μαγνητόμετρου (Σχήμα 40).

Ακολουθεί ο πίνακας μετρήσεων πεδίου όπου το ρεύμα μεταβάλλεται με βήμα 0,05A και στην τάση αναγράφεται η απόλυτη τιμή του V_{min} . Η δυνατότητα παροχής ρεύματος ήταν έως 400 mA καθώς ο αισθητήρας δεν ήταν ικανός να μετρήσει μεγαλύτερες τιμές. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε πεδίο δεκάδες φορές ισχυρότερο από την μέση τιμή εντάσεως του πεδίου της γης.

Το σωληνοειδές τροφοδοτήθηκε αρχικά με DC ρεύμα ορθής φοράς και στην συνέχεια με ρεύμα αντίθετης φοράς. Επομένως, αρχικά είχαμε πεδίο ορθής και μετά ανάστροφης πολικότητας.

Το πεδίο διέγερσης είναι συχνότητας 910 Hz (Σχήμα 32).

I (A)	H (A/m)	B(mT)	V_{min} (mV)
0,05	96,667	0,12148	504
0,1	193,333	0,24295	480
0,15	290	0,36443	440
0,2	386,667	0,4859	280
0,25	483,333	0,60738	216
0,3	580	0,72885	120
0,35	676,667	0,85032	96
0,4	773,333	0,9718	96

Πίνακας 5 Ρεύμα και πεδίο με ορθή πολικότητα.

I (A)	H (A/m)	B(mT)	Vmin (mV)
-0,05	-96,6667	-0,12148	536
-0,1	-193,333	-0,24295	528
-0,15	-290	-0,36443	520
-0,2	-386,667	-0,4859	512
-0,25	-483,333	-0,60738	440
-0,3	-580	-0,72885	240
-0,35	-676,667	-0,85032	128
-0,4	-773,333	-0,9718	96

Πίνακας 6 Ρεύμα και πεδίο με ανάστροφη πολικότητα.

Το μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται από την τιμή της μαγνητικής επαγωγής B που εκφράζεται από τον τύπο :

$$B = \mu * H \quad (3.14)$$

όπου το B μετριέται σε (Wb/m²) ή (Tesla) και $\mu = 1,26 * 10^{-6}$ H/m η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα.

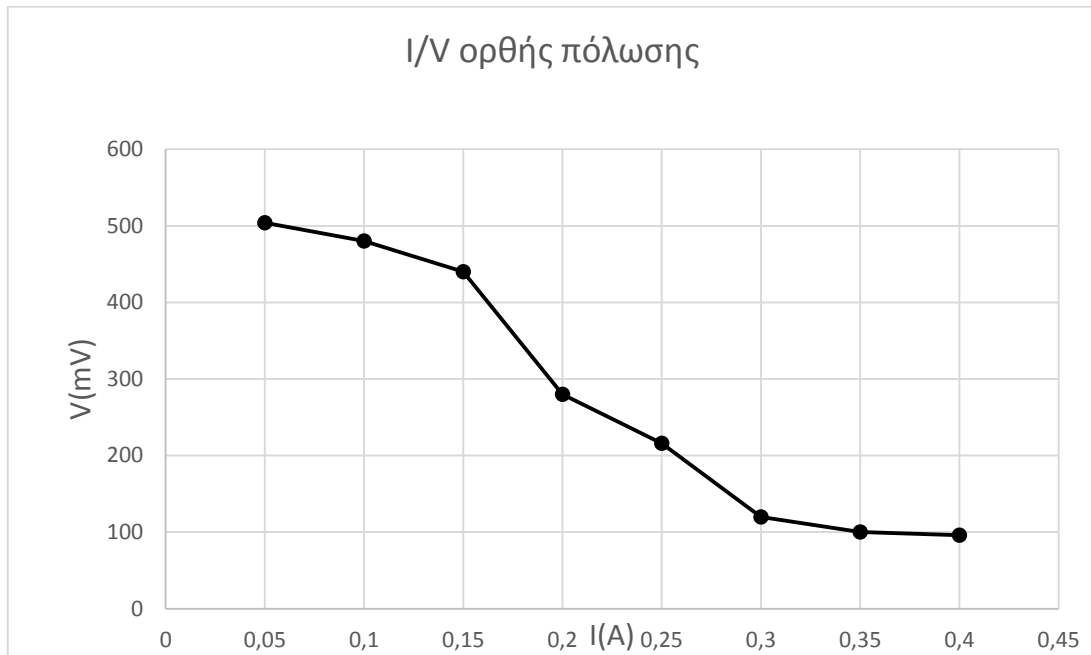
Επομένως για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του σωληνοειδούς όπου τοποθετήθηκε ο αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος [20]:

$$B = \mu * I * \frac{N}{L} \quad (3.15)$$

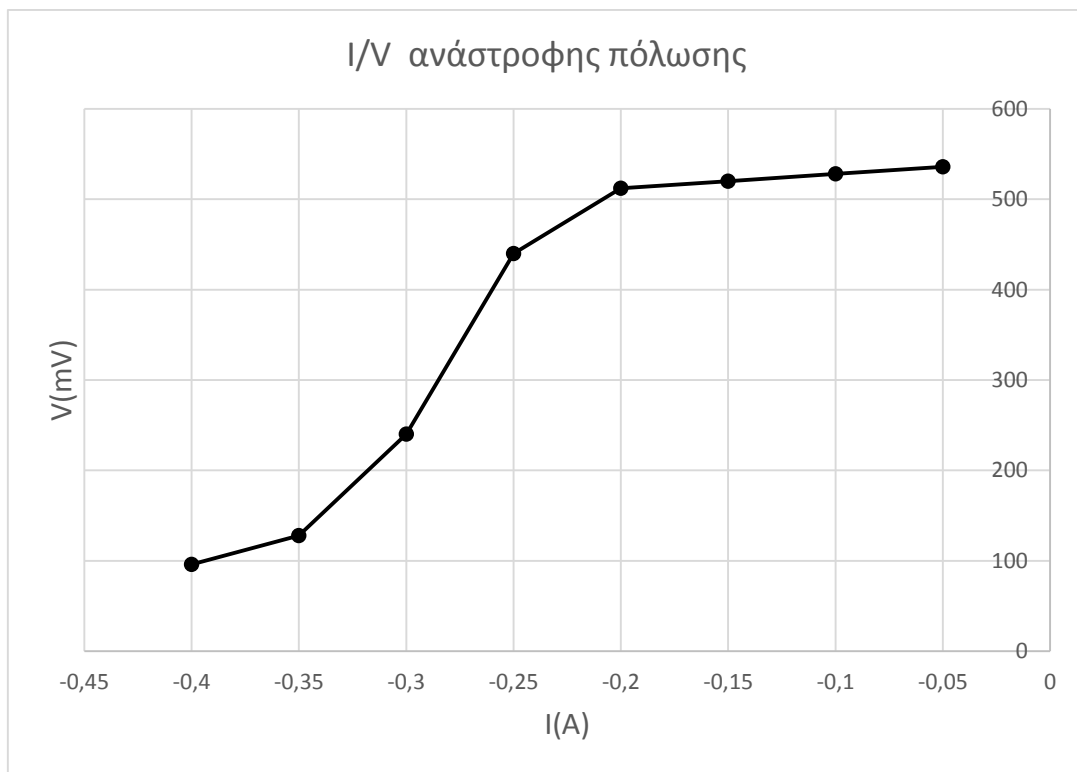
Στον πίνακα 6, το ρεύμα και το πεδίο έχουν ανάστροφη πολικότητα, οπότε χρησιμοποιούμε αρνητικό πρόσημο στα αποτελέσματα για τα I, H, B. Ουσιαστικά εφαρμόσαμε το ρεύμα στο σύρμα του πηνίου με αντίθετη φορά απ' ό,τι στην αρχή.

Ακολούθως παραθέτουμε τις καμπύλες συσχέτισης του ρεύματος τροφοδοσίας του σωληνοειδούς και του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, με την τιμή τάσης που

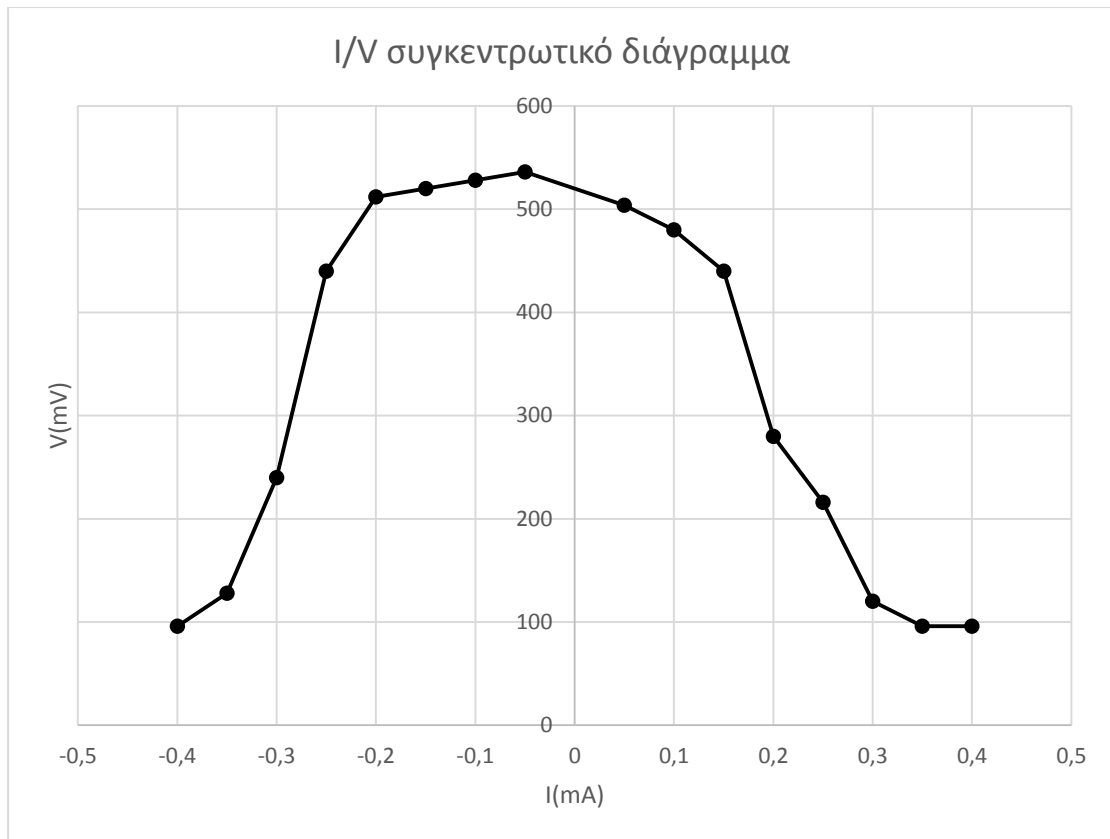
καταγράφεται στην έξοδο του αισθητήρα, όπως αυτές προκύπτουν από τις μετρήσεις που καταγράφηκαν στους Πίνακες 5 και 6.



Σχήμα 45 I/V Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ορθής πόλωσης.



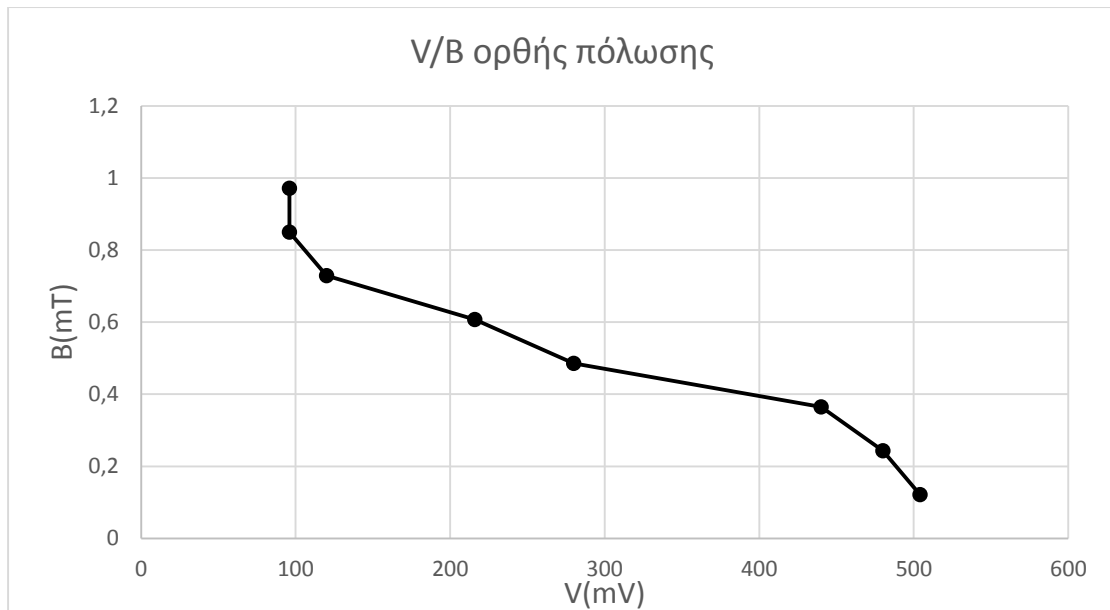
Σχήμα 46 I/V Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ανάστροφης πόλωσης.



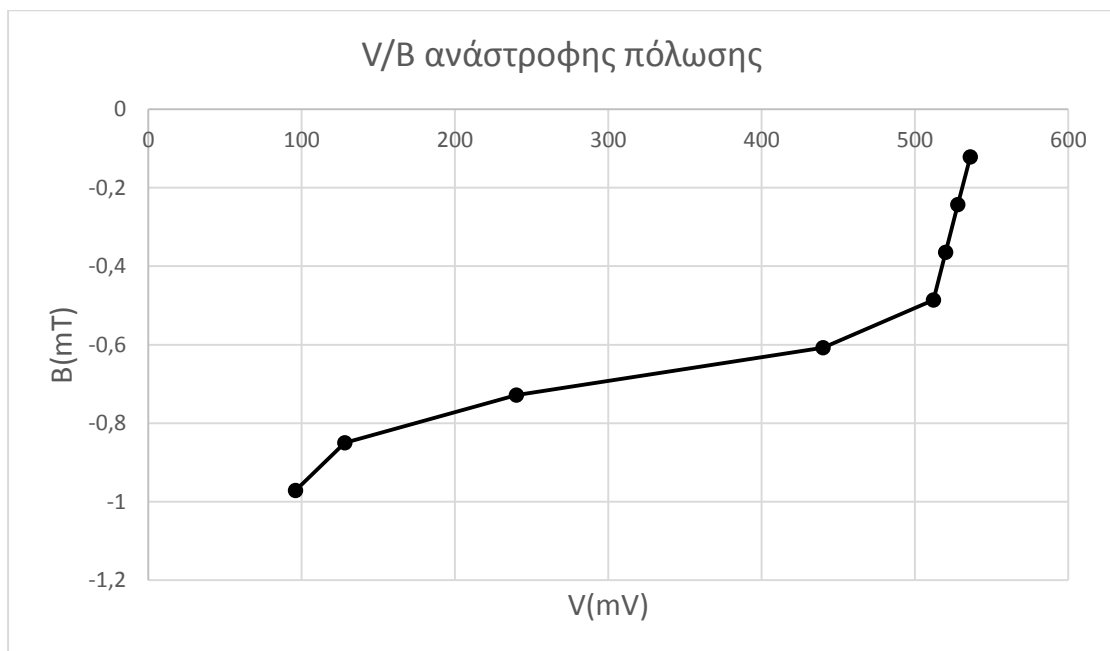
Σχήμα 47 I/V Συγκεντρωτική χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate .

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα, μειώνεται η τάση εξόδου του αισθητήρα που υλοποιήσαμε. Για αυτό το λόγο ο αισθητήρας είναι ικανός να μετρήσει ως τα 400 mA ρεύματος παροχής στον αγωγό, καθώς για περαιτέρω αύξησή του, το σήμα εξόδου του αισθητήρα ήταν σχεδόν μηδενικό και δεν υπήρχε κάποια μεταβολή.

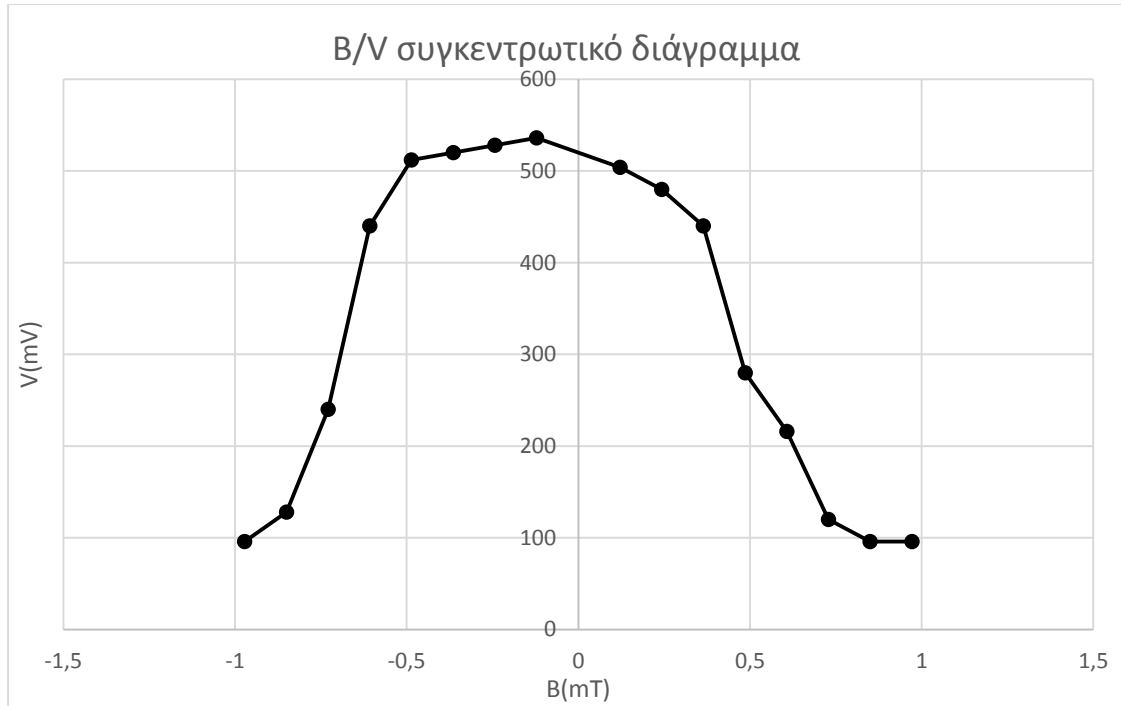
Παρακάτω απεικονίζονται οι καμπύλες μεταφοράς του μαγνητικού πεδίου του αγωγού συναρτήσει της τάσης εξόδου του αισθητήρα με βάση τους Πίνακες 5,6.



Σχήμα 48 V/B Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ορθής πόλωσης.



Σχήμα 49 V/B Χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate με ρεύμα ανάστροφης πόλωσης.



Σχήμα 50 B/V Συγκεντρωτική χαρακτηριστική αισθητήρα fluxgate.

Παρατηρούμε ότι ο αισθητήρας παρουσιάζει γραμμική λειτουργία για τιμές $I \geq -0,2$ A και $B \geq -0,4859$ mT ενώ στην ορθή πόλωση για τιμές $I \leq 0,15$ A και $B \leq 0,36443$ mT. Επομένως το εύρος λειτουργίας στο οποίο ο αισθητήρας λειτουργεί γραμμικά είναι $|I| \leq 0,15$ A και $|B| \leq 0,36443$ mT.

Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή του προς μέτρηση πεδίου πλησιάζει την τιμή του πεδίου αναφοράς πράγμα το οποίο δεν είναι αποδοτικό στην λειτουργία του μαγνητόμετρου πύλης-ροής καθώς το εύρος λειτουργίας εκφράζεται θεωρητικά από την σχέση:

$$|H_{\text{εξωτερικό}}| \leq |H_{\text{αναφοράς}}| \quad (3.15)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι ο αισθητήρας λειτουργεί και είναι ικανός να μετρήσει μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή πεδίου. Για να είναι λειτουργικός για μεγαλύτερες τιμές θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερο σήμα διέγερσης στον αισθητήρα ώστε η κυματομορφή της τάσης εξόδου να έχει μεγαλύτερο πλάτος. Ένας ακόμη παράγοντας είναι η τιμή της έντασης για την οποία επέρχεται σε κορεσμό ο μαγνητικός πυρήνας.

Ο τρόπος χρησιμοποίησης του αισθητήρα fluxgate για μέτρηση μαγνητικού πεδίου και η πρακτική χρήση της βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε είναι ότι με την τοποθέτησή του σε κάποιο χώρο με άγνωστο πεδίο και αφού τροφοδοτηθεί κατάλληλα για την δημιουργία σήματος διέγερσης, θα επιστρέψει κάποια τιμή τάσης και συγκεκριμένα την V_{min} . Από την τιμή αυτή και μέσω των Πινάκων 5, 6 και των Σχημάτων 47, 50 είναι εφικτό να βρεθεί η τιμή του μαγνητικού πεδίου του χώρου.

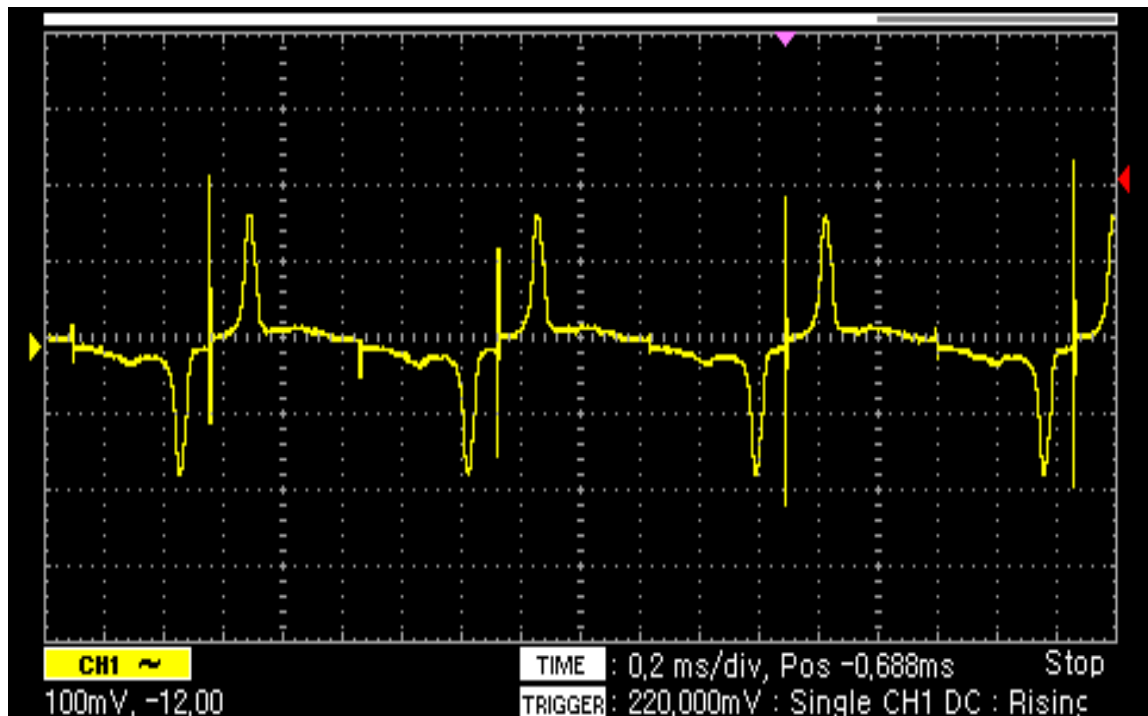
Βαθμονόμηση αισθητήρα με 1^ο κύκλωμα διέγερσης.

Όπως προαναφέρθηκε, για την μέτρηση μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του αισθητήρα και με το 1^ο κύκλωμα διέγερσης.

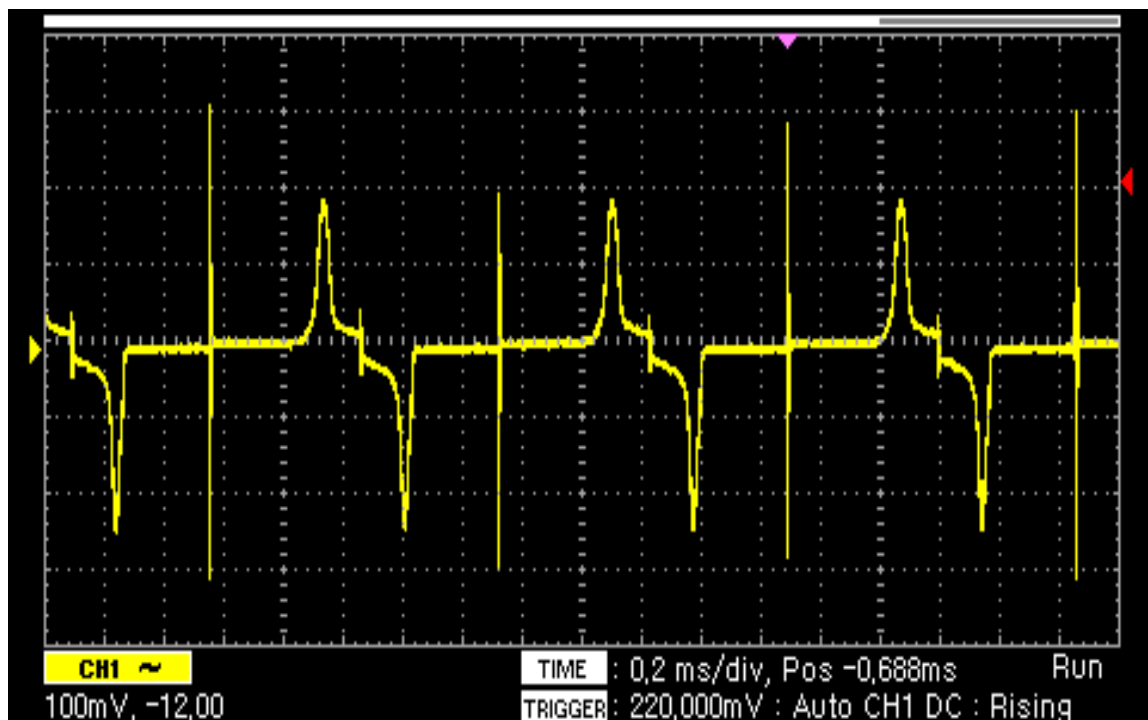
Παρά την ασταθή έξοδο που έδινε η συγκεκριμένη διάταξη και την ύπαρξη κυμάτων και κατακόρυφων γραμμών ήταν εφικτή η βαθμονόμηση του μαγνητόμετρου fluxgate με την μέτρηση του RTD στην έξοδό του.

Επαναλήφθηκε η προηγούμενη διαδικασία με τη χρήση του σωληνοειδούς πηνίου για την δημιουργία DC πεδίου μέσω της τροφοδοσίας του με DC ρεύμα. Το ρεύμα μεταβάλλεται με βήμα 10 mA και παίρνει τιμές από -80 ως 80 mA. Η μεταβολή αυτή προκαλεί και μεταβολή του επαγόμενου πεδίου που εκφράζεται σαν μεταβολή του T_1 και του T_2 στο σήμα εξόδου του αισθητήρα. Το T_1 είναι ο χρόνος από το V_{min} ως το V_{max} και το T_2 ο χρόνος από το ίδιο V_{max} ως το επόμενο V_{min} . Με αυτά προκύπτει ότι $RTD = T_1 - T_2$ και $T = T_1 + T_2$.

Χρησιμοποιήθηκε το σήμα εξόδου του αισθητήρα συχνότητας 1,03 kHz που φαίνεται στο Σχήμα 39 και στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ενδεικτικά η μεταβολή των T_1 , T_2 ανάλογα με την τιμή του εξωτερικού πεδίου.



Σχήμα 51 Έξοδος αισθητήρα με 1^ο κύκλωμα διέγερσης για θετική τιμή DC ρεύματος.

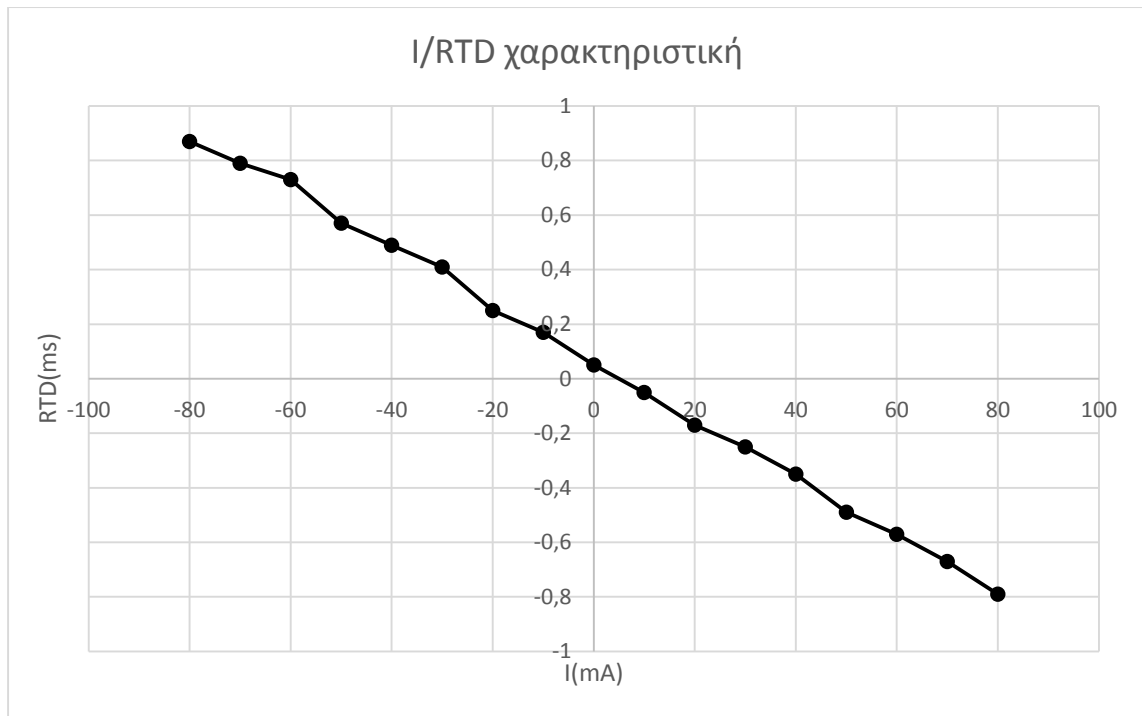


Σχήμα 52 Έξοδος αισθητήρα με 1^ο κύκλωμα διέγερσης για αρνητική τιμή DC ρεύματος.

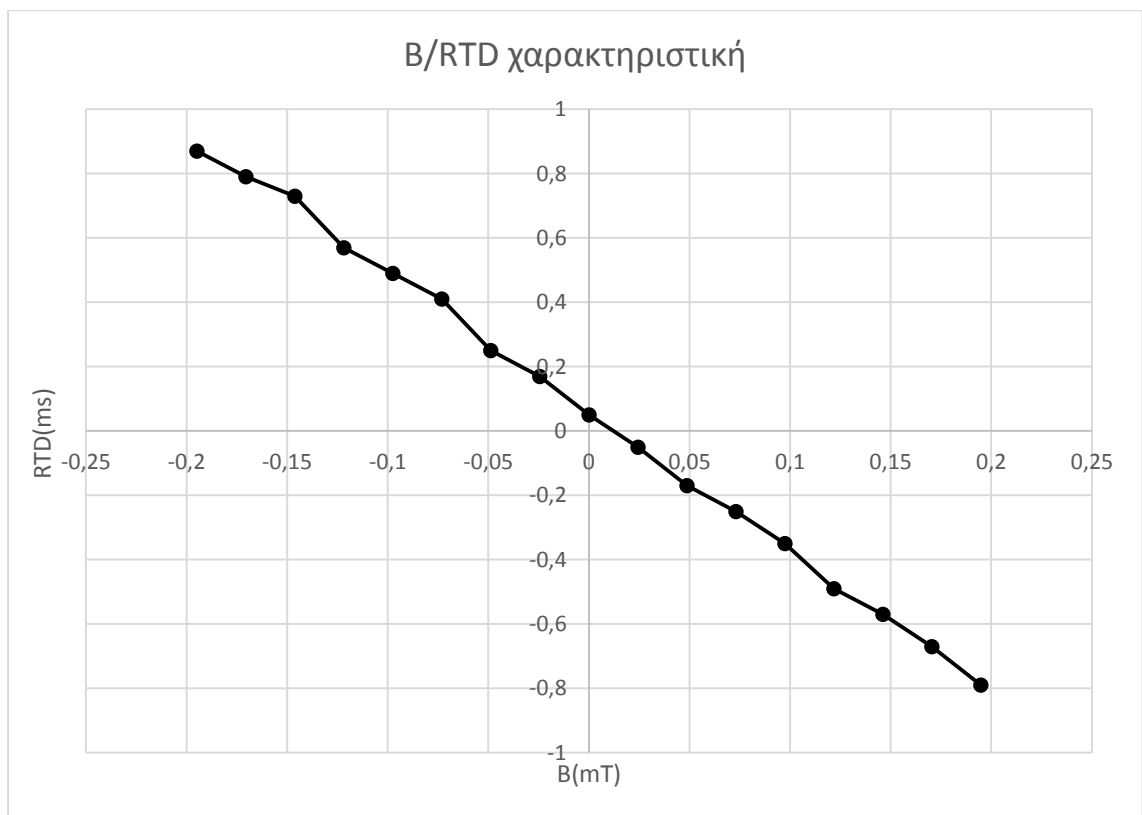
Ακολουθούν ο πίνακας μετρήσεων και οι καμπύλες συσχέτισης του ρεύματος τροφοδοσίας του σωληνοειδούς και του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, με την τιμή του RTD που καταγράφεται.

I(mA)	H(A/m)	B(mT)	T1(ms)	T2(ms)	RTD(ms)= T1-T2
-80	-154,667	-0,19488	0,92	0,05	0,87
-70	-135,333	-0,17052	0,88	0,09	0,79
-60	-116	-0,14616	0,84	0,11	0,73
-50	-96,6667	-0,1218	0,77	0,2	0,57
-40	-77,3333	-0,09744	0,73	0,24	0,49
-30	-58	-0,07308	0,69	0,28	0,41
-20	-38,6667	-0,04872	0,61	0,36	0,25
-10	-19,3333	-0,02436	0,57	0,4	0,17
0	0	0	0,51	0,46	0,05
10	19,33333	0,02436	0,46	0,51	-0,05
20	38,66667	0,04872	0,4	0,57	-0,17
30	58	0,07308	0,36	0,61	-0,25
40	77,33333	0,09744	0,31	0,66	-0,35
50	96,66667	0,1218	0,24	0,73	-0,49
60	116	0,14616	0,2	0,77	-0,57
70	135,3333	0,17052	0,15	0,82	-0,67
80	154,6667	0,19488	0,09	0,88	-0,79

Πίνακας 7 Μέτρηση πεδίου με 1^ο κύκλωμα διέγερσης.



Σχήμα 53 I/RTD χαρακτηριστική fluxgate με χρήση 1^{ου} κυκλώματος διέγερσης.



Σχήμα 54 B/RTD χαρακτηριστική fluxgate με χρήση 1^{ου} κυκλώματος διέγερσης.

Παρατηρούμε ότι και οι δύο καμπύλες είναι αρκετά γραμμικές δεδομένου και του σφάλματος ή της μικρής απόκλισης που μπορεί να προκύψει κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το εύρος λειτουργίας στο οποίο ο αισθητήρας λειτουργεί τώρα είναι $|I| \leq 0,08$ A και $|B| \leq 0,19488$ mT. Επομένως και με το 1^ο κύκλωμα διέγερσης επιτεύχθηκε μία αξιόπιστη λειτουργία του αισθητήρα για την μέτρηση μαγνητικού πεδίου μικρότερης βέβαια τιμής απ' ότι προηγουμένως αλλά αντίστοιχης ακρίβειας.

Ο τρόπος χρησιμοποίησης του αισθητήρα fluxgate για μέτρηση μαγνητικού πεδίου και η πρακτική χρήση της δεύτερης βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε είναι ότι με την τοποθέτησή του σε κάποιο χώρο με άγνωστο πεδίο και αφού τροφοδοτηθεί κατάλληλα για την δημιουργία σήματος διέγερσης, θα επιστρέψει κάποια τιμή RTD. Από την τιμή αυτή και μέσω του Πίνακα 7 και των Σχημάτων 53, 54 είναι εφικτό να βρεθεί η τιμή του μαγνητικού πεδίου του χώρου.

4 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελέτη

4.1 Συμπεράσματα

Μέσω της συγκεκριμένης Εργασίας, υλοποιήθηκε αισθητήρας fluxgate κατάλληλος για μετρήσεις μονοδιάστατων πεδίων με την κατασκευή και χρήση ηλεκτρονικού κυκλώματος για την παραγωγή του σήματος διέγερσης. Συνολικά επιτεύχθηκε μια αρκετά εύχρηστη διάταξη, η οποία είναι μικρού μεγέθους, χαμηλού κόστους και απλή στην εφαρμογή της στην πράξη.

Κατασκευάστηκαν δύο κυκλώματα διέγερσης καθώς το πρώτο παρουσίαζε ανεπιθύμητη κυμάτωση στην τριγωνική κυματομορφή εξόδου. Παρ' όλα αυτά χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση μονοδιάστατου μαγνητικού πεδίου με αξιόπιστα αποτελέσματα και δυνατότητα μέτρησης από $-200 \mu\text{T}$ ως $200 \mu\text{T}$.

Το δεύτερο κύκλωμα διέγερσης που κατασκευάστηκε και προτιμήθηκε δίνει δυνατότητα για δημιουργία σταθερού τριγωνικού σήματος, του οποίου η συχνότητα και το πλάτος καθορίζεται από τις επιλογές των αντιστάσεων που έγιναν.

Με αυτό, το μαγνητόμετρο fluxgate ως αισθητήρας μέτρησης θέσης παρουσιάζει αρκετά καλή συμπεριφορά καθώς η λειτουργία του είναι γραμμική και τα αποτελέσματα που δίνει είναι ικανά να μετρήσουν την θέση ή μετατόπιση ενός αντικειμένου με ακρίβεια 1mm .

Ως αισθητήρας μέτρησης πεδίου λειτουργεί αξιόπιστα για τον προσδιορισμό μονοδιάστατων DC – μαγνητικών πεδίων κυρίως για τιμές $B \leq |0,36443| \text{ mT}$. Το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό αν αναλογιστούμε ότι είναι μία κατασκευή χαμηλού κόστους και το εύρος πεδίου που μετράει κυμαίνεται από $100 \mu\text{T}$ έως 1 mT .

4.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Μια ενδιαφέρουσα πρόταση για μελέτη θα αφορούσε στην εξάλειψη του overshoot όταν χρησιμοποιείται ο NE555 για την κατασκευή κυκλώματος διέγερσης. Μια πιθανή λύση περιλαμβάνει την τοποθέτηση χρονιστή τύπου CMOS. Μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμο στην παραγωγή σήματος διέγερσης λόγω της δυνατότητας που δίνει να ρυθμίζουμε την συχνότητα, το πλάτος και το duty cycle του καθώς και να δημιουργηθεί τριγωνικό, τετραγωνικό και ημιτονικό σήμα.

Ακόμα θα μπορούσε να γίνει μελέτη πάνω στην βελτίωση του αισθητήρα. Για παράδειγμα, να αυξηθεί ο αριθμός των σπειρών και να γίνει περαιτέρω βελτίωση του άμορφου υλικού του πυρήνα ώστε να επιτυγχάνεται ισχυρότερο πεδίο αναφοράς άρα και μέτρηση ισχυρότερων εξωτερικών πεδίων χωρίς να υπάρχει μεγάλη απώλεια της ευαισθησίας του αισθητήρα.

Τέλος, μία μελέτη για την βελτίωση της κατασκευής της συνολικής διάταξης όταν χρησιμοποιείται το δεύτερο κύκλωμα διέγερσης θα ήταν αρκετά χρήσιμη, ώστε το μαγνητόμετρο να λειτουργήσει ως RTD fluxgate, το οποίο χαρακτηρίζεται για την υψηλή ευαισθησία και τον χαμηλό θόρυβο.

5 Βιβλιογραφία

- [1]: Ken Evans, “Fluxgate Magnetometers Explained”, INVASENS, pp. 1, 2006.
- [2]: Pavel Ripka, “New directions in fluxgate sensors”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol 215-216, pp. 2, 2000.
- [3]: Bruno Ando, Salvatore Baglio, Ad R. Bulsara, Vincenzo Sacco, “Residence times difference”, IEEE Sensors Journal, vol. 5, pp. 2, 2005.
- [4]: Mattia Butta, Ichiro Sasada, “Orthogonal Fluxgate with Annealed Core”, IEEE TRANSACTION OF MAGNETICS, vol. 49, no. 1, 2013.
- [5]: S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, A Taylor & Francis book, pp. 159-160, 2011.
- [6]: David Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, A Taylor & Francis book, pp. 3-28.
- [7]: David Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, A Taylor & Francis book, pp. 40-43.
- [8]: Σώκος Χαράλαμπος, “ Μαγνητόμετρα πύλης-ροής (fluxgate)”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακό «Συστήματα Αυτοματισμού», pp. 4-5 , 2016.
- [9]: Ken Evans, “Fluxgate Magnetometers Explained”, INVASENS, pp. 1-2, 2006.
- [10]: Αρώνης Μάριος, “Ανάπτυξη και βαθμονόμηση αισθητήρα fluxgate με χρήση ηλεκτρολυτικών υμενίων σιδήρου-νικελίου ως πυρήνες” , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, pp. 29-30, 75-76, 2005.
- [11]: Mattia Butta, “Orthogonal Fluxgates”, SSM, vol. 19, pp.1-3
- [12]: Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, *Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα* , Τόμος Β', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, pp.1201-1203, 2014.
- [13]: Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, *Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα* , Τόμος Α', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, pp.105-106, 110, 2014.

- [14]: Πορλιδάς Δημήτριος , Τελεστικοί Ενισχυτές : Κυκλώματα, πειραματικές μετρήσεις και μέθοδοι, pp. 13-14, 2009.
- [15]: Πορλιδάς Δημήτριος , Τελεστικοί Ενισχυτές : Κυκλώματα, πειραματικές μετρήσεις και μέθοδοι, pp. 6-7, 2009.
- [16]: Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, *Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα* , Τόμος Α', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, pp.77-78, 2014.
- [17]: Neil P. Albaugh, "Triangle and Square wave Oscillator", 2006.
- [18]: La Malfa, Salvatore, *Rtd Fluxgate Magnetometers* , Chapter1, pp.1-3, 2012.
- [19]: B. Ando, S. Baglio, S. La Malfa, C. Trigona, "Experimental Investigations on the Spatial Resolution in RTD-Fluxgates", I2MTC, pp.1-2, 2009.
- [20]: Ι. Ρουμελιώτης, Ι. Τσαλαμέγκας, *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία*, Τόμος Β', Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Κεφάλαιο 11, pp. 337, 2011.
- [21]: S. O. Kasap, *Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, pp 860-862, 2004.
- [22]: S. O. Kasap, *Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, pp 898-910, 2004.
- [23]: S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, A Taylor & Francis book, pp. 179-181, 2011.