



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Δ.Π.Μ.Σ. «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ ΣΤΑΔΙΟΥ ΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ  
FLUXGATE**

Γκόγκος Βασιλάκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / /2018

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής .....(Υπογραφή)  
Νικόλαος Θεοδώρου, Καθηγητής .....(Υπογραφή)  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης, Επίκουρος Καθηγητής .....(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ 2018

.....  
Γκόγκος Βασιλάκης Διπλωματούχος Δ.Π.Μ.Σ ΑΥΤΥΟΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Ε.Μ.Π.

Copyright © Γκόγκος Βασιλάκης 2017. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης, και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

Από τα αρχαία χρόνια οι άνθρωποι χρησιμοποιούν αισθητήρες για να μετρήσουν και να καταλάβουν διάφορα φυσικά φαινόμενα. Η πρώτη κατασκευή η οποία χρησιμοποιούσε στοιχειώδεις αισθητήρα ήταν η πυξίδα ,η οποία βασιζόταν στους μαγνητικούς πόλους της γης και τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που διαπρέπουν αυτά, για την εύρεση της κατεύθυνσης στην ναυσιπλοΐα. Στην συνέχεια, και με την βοήθεια της τεχνολογίας solid state, κατασκευάστηκαν και άλλοι είδους αισθητήρων όπως ο μηχανικός, ο χημικός και ο θερμικός οι οποίοι μπορούσαν να ενταχθούν σε μικρές συσκευές.

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας αναφέρεται εν συντομία στην ιστορική αναδρομή των αισθητήρων. Ακόμα αναφέρονται και οι ιδιότητες που τους διέπουν. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι μαγνητικών αισθητήρων. Σε αυτήν την παράγραφο δίνετε μεγαλύτερη έμφαση στους αισθητήρες Fluxgate οι οποίοι περιγράφονται εκτενέστερα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές των μαγνητικών αισθητήρων (Κεφάλαιο 3). Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της πλακέτας ενίσχυσης του αισθητήρα. Συγκεκριμένα αυτό το κεφάλαιο διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Στο πρώτο κομμάτι περιγράφεται η διαδικασία της σχεδίαση της πλακέτας χρησιμοποιώντας διάφορα προγράμματα και στο δεύτερο κομμάτι παρουσιάζεται η εργαστηριακή διαδικασία υλοποίησης της πλακέτας. Τέλος, στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές μετρήσεις οι οποίες λήφθηκαν χρησιμοποιώντας την πλακέτα ενίσχυσης και τον αισθητήρα.

# Λέξης κλειδιά

Αισθητήρες, Μαγνητική αισθητήρες, Fluxgate, πλακέτα ενίσχυσης, καμπύλη υστέρησης, αισθητήρας Hall, αισθητήρας Squid, αισθητήρας LVDT.

# Abstract

Since ancient time man are using sensors for measuring and better understanding natural phenomena. The first structure that had used elementary sensor was the compass, which used magnetic poles of the earth and the electromagnetic phenomena that excelled them in finding the direction of navigation. Later, based on growing solid state technologies, were manufactured other sensors such as the mechanical, the chemical and the thermal that can be integrated in small devices.

At the first part of the master thesis there is a reference to the Historical Recursion of sensors. Furthermore we mention the properties that govern them. In 2nd chapter we present the different types of magnetics sensors. In this chapter we place more emphasis on the Fluxgate sensors with which we are dealing below. Subsequently we present different applications of magnetics sensors (Chapter 3). In 4th chapter we are dealing with the process that we followed to build the amplification board. This chapter is divided in two parts. In the first part we present the process of board designing using different software's and in the second part we present the laboratory process for the implementation of the board. At the end, in 5th chapter we present the laboratory measurements we received using the amplifier board and the sensor.

## Key words

Sensors, Magnetics sensors, Fluxgate, amplification board, hysteresis curve, Hall sensors, SQUID sensors, LVDT sensors

# Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Χριστοφόρου Ευάγγελου στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού» της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κατ' αρχάς τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, Διευθυντή του Εργαστηρίου Αισθητήρων Ε.Μ.Π για την υπομονή, κατανόηση και τη συνεχή καθοδήγηση του όλο αυτό το διάστημα, καθώς και για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου αναθέτοντας μου την εργασία αυτή.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Σπύρο Αγγελόπουλο Υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ, τόσο για την πολύτιμη βοήθεια του όσο και για την θαυμάσια συνεργασία μας κατά την διεξαγωγή της πειραματικής και συγγραφικής διαδικασίας.

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Λέξης κλειδιά .....	ii
Abstract.....	iii
Key words.....	iv
Ευχαριστιες .....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά για τους αισθητήρες .....	1
1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	3
1.2.1 Πιστότητα.....	3
1.2.2 Το εύρος.....	3
1.2.3 Συστηματικό σφάλμα .....	4
1.2.4 Ακρίβεια, επαναληψιμότητα, αναπαραγωγιμότητα.....	4
1.2.5 Γραμμική απόκριση .....	5
1.2.6 Ευαισθησία .....	5
1.2.7 Υστέρηση.....	7
1.2.8 Χρόνος απόκρισης και νεκρό εύρος .....	8
2 Μαγνητικοί αισθητήρες.....	9
2.1 Εισαγωγή.....	9



2.2	Αισθητήρες Πύλης-Ροής (Fluxgate) .....	10
2.2.1	Βασικές αρχές αισθητήρων Fluxgate.....	10
2.2.2	Αρχή λειτουργίας μαγνητόμετρων Fluxgate .....	13
2.2.3	Διατάξεις αισθητήρα Fluxgate.....	15
2.3	Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης .....	19
2.4	Μαγνητόμετρο πηνίου ανίχνευσης .....	21
2.5	Αισθητήρες LVDT.....	22
2.6	Αισθητήρες SQUID .....	23
2.7	Αισθητήρας Hall .....	24
3	Εφαρμογές μαγνητικών αισθητήρων .....	27
3.1	Εισαγωγή.....	27
3.2	Εφαρμογές στην πλοήγηση .....	27
3.3	Εφαρμογές ανίχνευσης οχημάτων .....	29
3.4	Εφαρμογές στην ιατρική .....	31
3.5	Ανίχνευση μετάλλων.....	33
4	Κατασκευή πλακέτας ενίσχυσης αισθητήρα.....	35
4.1	Σχεδίαση κυκλώματος ενισχυτή .....	35
4.2	Υλοποίηση πλακέτας.....	40
5	Μετρήσεις σε αισθητήρα Fluxgate.....	47
5.1	Μετρήσεις με τη βοήθεια DC πεδίου. ....	52
5.2	Μετρήσεις με σωληνοειδές πηνίο.....	58

5.3	Μετρήσεις για αισθητήρα θέσης.....	67
6	Συμπεράσματα.....	75
7	Βιβλιογραφία .....	77

# Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα.....	5
Σχήμα 2: (a) Ολίσθηση μηδενός, (b) Ολίσθηση ευαισθησίας, (c) Συνδυασμένη επίδραση.....	6
Σχήμα 3: Βρόχος υστέρησης αισθητήρα.....	7
Σχήμα 4: Χαρακτηριστική εξόδου με νεκρό χρόνο.....	8
Σχήμα 5: Σύγκριση μαγνητικών αισθητήρων .....	9
Σχήμα 6: Στοιχειώδες σχέδιο αισθητήρα Fluxgate.....	11
Σχήμα 7: Χαρακτηριστικές μορφές καμπύλης μαγνήτισης.....	12
Σχήμα 8: Καταστάσεις του μαγνητικού πυρήνα όταν (α) δεν βρίσκεται σε κορεσμό και (β) βρίσκεται σε κορεσμό .....	13
Σχήμα 9: Βρόχος υστέρησης.....	16
Σχήμα 10: Fluxgate Διπλού Δρόμου .....	17
Σχήμα 11: Fluxgate διαμήκους πυρήνα τύπου Förster .....	18
Σχήμα 12: Fluxgate Δακτυλιοειδούς πυρήνα.....	18
Σχήμα 13: Fluxgate ελλειψοειδούς πυρήνα.....	19
Σχήμα 14: Αλλαγή ειδικής αντίστασης συναρτήσει μαγνητικού πεδίου.....	20
Σχήμα 15: Μαγνητόμετρο Μαγνητοαντίστασης.....	20
Σχήμα 16: Μαγνητόμετρο πηνίου ανίχνευσης.....	21

Σχήμα 17: Αισθητήρας LVDT.....	22
Σχήμα 18: Καταστάσεις λειτουργίας αισθητήρα.....	23
Σχήμα 19: Η βασική διάταξη αισθητήρα Hall.....	25
Σχήμα 20: Διάταξη πυξίδας τύπου Fluxgate .....	28
Σχήμα 21: Διαταραχή των Μαγνητικών γραμμών του γήινου πεδίου από την παρουσία οχήματος .....	30
Σχήμα 22: Αισθητήρας ταχύτητας τοποθετημένος στον στρόφαλο. ....	30
Σχήμα 23: Ευαισθησία διάφορων τύπων αισθητήρων και τα μαγνητικά πεδία που μπορούν να δημιουργήσουν τα όργανα του ανθρώπινου σώματος .....	32
Σχήμα 24: Μηχανισμοί ανίχνευσης μετάλλων .....	33
Σχήμα 25: Κύκλωμα ενίσχυσης με τρανζίστορ.....	35
Σχήμα 26: Κύκλωμα ενίσχυσης.....	36
Σχήμα 27: Σήματα εισόδου (πράσινο) και εξόδου (κόκκινο) ενισχυτή.....	37
Σχήμα 28: Κύκλωμα ενισχυτή OPA549.....	38
Σχήμα 29: Σήματα εισόδου (πράσινο) και εξόδου (κόκκινο) κυκλώματος.....	39
Σχήμα 30: Τελικό κύκλωμα ενισχυτή.....	40
Σχήμα 31: Σχέδιο πλακέτας .....	41
Σχήμα 32: Σχέδιο έτοιμο για εκτύπωση .....	42
Σχήμα 33: Πλακέτα μαζί με τα στοιχεία του κυκλώματος.....	43
Σχήμα 34: Πίσω όψη πλακέτας.....	43
Σχήμα 35: Μπλοκ διάγραμμα σύνδεσης.....	44

Σχήμα 36: Έξοδος ενισχυτή.....	44
Σχήμα 37: Μπλοκ διάγραμμα των μετρήσεων κέρδους. ....	45
Σχήμα 38: Μπλοκ διάγραμμα των μετρήσεων με orthogonal Fluxgate αισθητήρα...	48
Σχήμα 39: Σήμα εξόδου αισθητήρα με πηνίο 1cm.....	48
Σχήμα 40: Σήμα εξόδου αισθητήρα με πηνίο 2cm.....	49
Σχήμα 41: Σήμα εξόδου αισθητήρα με πηνίο 3cm.....	49
Σχήμα 42: Σήμα εξόδου αισθητήρα με ημιτονοειδή είσοδο πλάτους 50mV και συχνότητας 1kHz.....	50
Σχήμα 43: Σήμα εξόδου αισθητήρα με ημιτονοειδή είσοδο πλάτους 150mV και συχνότητας 1kHz .....	51
Σχήμα 44: Σήμα εξόδου αισθητήρα με ημιτονοειδή είσοδο πλάτους 200mV και συχνότητας 1kHz.....	51
Σχήμα 45: Σήμα εξόδου αισθητήρα χωρίς την ενίσχυση. ....	52
Σχήμα 46: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 10mV DC offset. ....	53
Σχήμα 47: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -10mV DC offset. ....	53
Σχήμα 48: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 30mV DC offset. ....	53
Σχήμα 49: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -30mV DC offset. ....	54
Σχήμα 50: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 50mV DC offset. ....	54
Σχήμα 51: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -50mV DC offset. ....	54
Σχήμα 52: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 77mV DC offset. ....	55
Σχήμα 53: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -74mV DC offset. ....	55
Σχήμα 54: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 80mV DC offset. ....	55

Σχήμα 55: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 100mV DC offset. ....	56
Σχήμα 56: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -100mV DC offset. ....	56
Σχήμα 57: Μέγιστο πλάτος εξόδου συναρτήσει DC offset εισόδου. ....	57
Σχήμα 58: Σωληνοειδές πηνίο. ....	58
Σχήμα 59: Μπλοκ διάγραμμα για μέτρηση με σωληνοειδές πηνίο. ....	59
Σχήμα 60: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,018A. ....	60
Σχήμα 61: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,11A. ....	60
Σχήμα 62: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,2A. ....	60
Σχήμα 63: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,3A. ....	61
Σχήμα 64: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,4A. ....	61
Σχήμα 65: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,5A. ....	61
Σχήμα 66: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,65A. ....	62
Σχήμα 67: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,662A. ....	62
Σχήμα 68: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,019A. ....	62
Σχήμα 69: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,2A. ....	63
Σχήμα 70: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,3A. ....	63
Σχήμα 71: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,4A. ....	63
Σχήμα 72: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,5A. ....	64
Σχήμα 73: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,6A. ....	64
Σχήμα 74: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,646A. ....	64
Σχήμα 75: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,704A. ....	65

Σχήμα 76: Αποστάσεις κορυφών σήματος εξόδου. ....	66
Σχήμα 77: Καμπύλη $\Delta t = t_1 - t_2$ συναρτήσει εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου. ....	67
Σχήμα 78: Διάταξη μέτρησης μετακίνησης πυρήνα.....	68
Σχήμα 79: Μπλοκ διάγραμμα για μετρήσεις με αισθητήρα θέσης. ....	68
Σχήμα 80: Αρχικό σήμα εξόδου χωρίς μετακίνηση του πυρήνα.....	69
Σχήμα 81: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 0.5 cm προς τα έξω.....	69
Σχήμα 82: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 1 cm προς τα έξω.....	69
Σχήμα 83: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 1.5 cm προς τα έξω.....	70
Σχήμα 84: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 2 cm προς τα έξω.....	70
Σχήμα 85: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 2.5 cm προς τα έξω.....	70
Σχήμα 86: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 3 cm προς τα έξω.....	71
Σχήμα 87: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 3.5 cm προς τα έξω.....	71
Σχήμα 88: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 4 cm προς τα έξω.....	71
Σχήμα 89: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 4.5 cm προς τα έξω.....	72
Σχήμα 90: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 5 cm προς τα έξω.....	72
Σχήμα 91: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 5.5 cm προς τα έξω.....	72
Σχήμα 92: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 6 cm προς τα έξω.....	73
Σχήμα 93: Σήμα εξόδου αισθητήρα συναρτήσει της μετακίνησης του πυρήνα. ....	74





# 1 Εισαγωγή

Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται εδώ και 2.000 χρόνια και οι πρώτες εφαρμογές τους ήταν για την εύρεση κατεύθυνσης και για τη ναυσιπλοΐα (πυξίδες). Σήμερα οι αισθητήρες είναι ένα από τα κύρια στοιχεία των συστημάτων επειδή είναι αυτές οι δομές οι οποίες βοηθούν στην λήψη των αποφάσεών τους. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας στερεάς κατάστασης (solid state) αναπτύχθηκε και ο κλάδος των αισθητήρων κάνοντάς τους μικρότερους σε μέγεθος και με αυξημένη ευαισθησία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τη σημασία των αισθητήρων για τα διάφορα συστήματα και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

Κατά την χρήση των αισθητήρων δεν είναι ζητούμενη μόνο η άμεση μέτρηση του ανάλογου μεγέθους, π.χ. μέτρηση μαγνητικού πεδίου, άλλα και η μέτρηση κάποιου άλλου μεγέθους όπως η ταχύτητα περιστροφής, η παρουσία ενός μαγνητικού μελανιού, η ανίχνευση οχήματος ή ο προσδιορισμός της ενδείξεως μιας πυξίδας κ.α. Η μέτρηση αυτών των μεγεθών δεν μπορεί να γίνει άμεσα, αλλά μπορούν να εξαχθεί από αλλαγές ή διαταραχές. Για παράδειγμα, στους μαγνητικούς αισθητήρες η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να πραγματοποιηθεί από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα σε ένα καλώδιο, γύρω από έναν μόνιμο μαγνήτη ή τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της γης.

## 1.1 Γενικά για τους αισθητήρες

Η σημασία των αισθητήρων για τον άνθρωπο είναι αυτονόητη. Οι πρώτοι αισθητήρες εμφανίζονται μαζί με τα έμβρυα και αποτελούν τα αισθητήρια όργανά τους. Πολύ αργότερα αναπτύχθηκε η ανάγκη για την δημιουργία οργάνων για να λυθούν διάφορα καθημερινά προβλήματα, όπως η μέτρηση του μήκους, του βάθους ή του όγκου. Στην συνέχεια η επιθυμία του ανθρώπου για να γνωρίσει τη Φύση

δημιούργησαν την ανάγκη μέτρησης περισσότερων φυσικών μεγεθών. Γι' αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκαν οι μηχανικοί αισθητήρες.

Ως αισθητήρες ορίζονται οι διατάξεις που είναι ικανές να μετατρέψουν μια φυσική ποσότητα-ιδιότητα σε ένα μετρήσιμο μέγεθος. Οι αισθητήρες είναι αυτές οι διατάξεις οι οποίες είναι ικανές να αντιληφθούν ένα σήμα εισόδου και να παράγουν ένα κατάλληλο σήμα εξόδου [1]. Συνήθως η έξοδος ενός αισθητήρα είναι ένα ηλεκτρικό σήμα, ώστε να είναι πιο εύκολη η περαιτέρω εκμετάλλευσή του μέσω της μέτρησης, απεικόνισης ή μετατροπής του.

Οι αισθητήρες ανάλογα με το είδος του μεγέθους που είναι ικανοί να αντιληφθούν διαχωρίζονται στους μηχανικούς, χημικούς, μαγνητικούς και θερμικούς αισθητήρες, καθώς και τους αισθητήρες ακτινοβολίας [2]. Οι μηχανικοί ή φυσικοί αισθητήρες αντιλαμβάνονται μεγέθη όπως η πίεση, η μετατόπιση, το ηλεκτρικό φορτίο, η μάζα ή και ο χρόνος. Αντίστοιχα οι χημικοί αισθητήρες αντιλαμβάνονται χημικά μεγέθη όπως είναι η υγρασία και η χημική σύσταση ενός υγρού ή αερίου. Οι μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν το μαγνητικό πεδίο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης βασιζόμενοι στο μαγνητικό πεδίο της γης. Οι θερμικοί αισθητήρες μετρούν τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Φυσικά, τέτοιοι αισθητήρες συναντώνται σε ένα μεγάλο εύρος συσκευών, τόσο για καθημερινή χρήση όσο και για εξειδικευμένες και πολύ ακριβείς μετρήσεις. Τέλος, οι αισθητήρες ακτινοβολίας μπορούν να ανιχνεύσουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται από διάφορες πηγές. Οι οπτικοί αισθητήρες ανήκουν σε αυτή την κατηγορία αφού αντιλαμβάνονται την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του φωτός και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των αισθητήρων είναι αυτή η οποία τους διαχωρίζει ανάλογα με τη χρήση τους για την οποία προορίζονται. Βάση αυτής της κατηγοριοποίησης διαχωρίζονται σε αισθητήρες μεταφορών, ενέργειας, περιβάλλοντος, ασφαλείας καθώς και σε αισθητήρες οικιακών, βιομηχανικών, ιατρικών και στρατιωτικών εφαρμογών [3].

Ανάλογα με το είδος της επιθυμητής μέτρησης και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν πρέπει να γίνει και η κατάλληλη επιλογή του υλικού του αισθητήρα. Τα υλικά αυτά ποικίλουν και ανήκουν κυρίως στις κατηγορίες των διηλεκτρικών, ημιαγωγικών, αγωγικών, υπεραγωγικών, μαγνητικών, ραδιενεργών

και βιολογικών υλικών [4]. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του κατάλληλου υλικού είναι η επιθυμητή ευαισθησία του παραγόμενου αισθητήρα, η καταλληλότητα και αντοχή του υλικού στις συνθήκες που θα διεξαχθούν οι μετρήσεις και φυσικά, το κόστος και ο τρόπος κατασκευής του.

## 1.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι αυτά τα οποία βοηθούν να επέλθει ισορροπία μεταξύ του αισθητήρα και του μετρούμενου μεγέθους. Τα βασικότερα από αυτά είναι η πιστότητα, η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα, η αναπαραγωγικότητα, το εύρος, το συστηματικό σφάλμα, η γραμμικότητα, η ευαισθησία στη μέτρηση, η υστέρηση και ο χρόνος απόκρισης [5].

### 1.2.1 Πιστότητα

Η πιστότητα σχετίζεται με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών. Συνήθως δίνεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα. Για παράδειγμα, εάν ένας αισθητήρας ο οποίος μετράει ηλεκτρικό ρεύμα με περιοχή λειτουργίας 0-10A έχει πιστότητα  $\pm 1,0\%$ , τότε η μέγιστη αβεβαιότητα του αισθητήρα θα είναι 0,1A.

### 1.2.2 Το εύρος

Το εύρος μετρήσεων περιλαμβάνει το διάστημα μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής που είναι δυνατόν να μετρηθεί με τον συγκεκριμένο αισθητήρα. Αυτό το μέγεθος εκφράζει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα προσαρμογής του αισθητήρα

σε διαφορετικές μετρήσεις. Ένας ιδανικός αισθητήρας πρέπει να λαμβάνει ακριβείς μετρήσεις για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος σημάτων εισόδου.

### 1.2.3 Συστηματικό σφάλμα

Ως στατιστικό σφάλμα είναι ένα σταθερό σφάλμα το οποίο συνήθως μπορεί να μηδενιστεί μέσο βαθμονόμησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του σφάλματος εμφανίζεται στις οικιακές ζυγαριές, οι οποίες μπορεί να δείχνουν μη μηδενική ένδειξη, ακόμα και χωρίς φορτίο. Αυτή η μη μηδενική ένδειξη αποτελεί το συστηματικό σφάλμα το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί από τη μέτρηση ώστε να προκύψει η πραγματική τιμή.

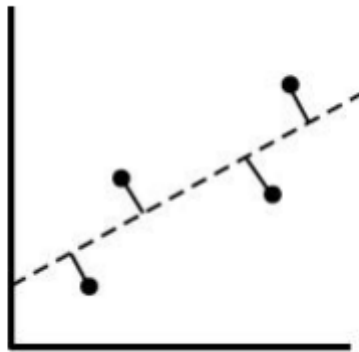
### 1.2.4 Ακρίβεια, επαναληψιμότητα, αναπαραγωγιμότητα

Ο όρος ακρίβεια εκφράζει τον βαθμό ελευθερίας του αισθητήρα από τυχαία σφάλματα. Εάν πάρουμε μεγάλο αριθμό μετρήσεων τότε η μεταξύ τους διασπορά θα είναι μικρή. Η ακρίβεια συνδέεται συχνά με την πιστότητα. Από την άλλη πλευρά η μεγάλη ακρίβεια δεν σημαίνει κατ' ανάγκη και μεγάλη πιστότητα. Κακής πιστότητας μετρήσεις από έναν ακριβή αισθητήρα, σημαίνει ότι οι μετρήσεις έχουν σημαντικό σφάλμα, γεγονός το οποίο μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση του αισθητήρα.

Με τον όρο της επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας χαρακτηρίζεται η ικανότητα του αισθητήρα να αναπαράγει το ίδιο σήμα εξόδου κατά τις επαναλήψεις της ίδιας μέτρησης, υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι αποκλίσεις στις τιμές ενός αισθητήρα πρέπει να βρίσκονται εντός κάποιων ορίων και βεβαίως να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.

### 1.2.5 Γραμμική απόκριση

Είναι επιθυμητό η απόκριση ενός αισθητήρα να μεταβάλλεται γραμμικά με το μετρούμενο μέγεθος. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ σήματος εισόδου και εξόδου ενός αισθητήρα. Η γραμμή μεταξύ των σημείων χαράσσεται εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μη-γραμμικότητα εκφράζεται ως η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των σημείων και της γραμμής. Άρα η γραμμικότητα εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να διατηρεί σταθερά τα χαρακτηριστικά του, παρά τις μεταβολές που μπορεί να τον επηρεάσουν. Μετράται ως ποσοστό, αλλά μπορεί και να απεικονιστεί ως καμπύλη, για σύγκριση με την ιδανική καμπύλη μετρήσεων.



Σχήμα 1: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα.

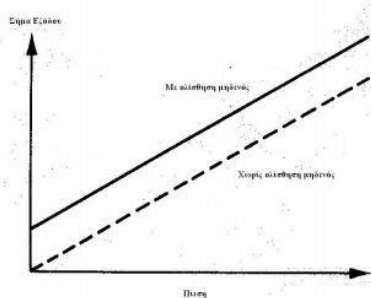
### 1.2.6 Ευαισθησία

Ένας αισθητήρας λειτουργεί μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος χαρακτηριστικών και παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι καθορίζονται από τους κατασκευαστές. Εάν μεταβάλουμε κάποιες παραμέτρους και χαρακτηριστικά πρέπει να δούμε και την αντίστοιχη μεταβολή στην έξοδο του αισθητήρα. Η ελάχιστη μεταβολή η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στον αισθητήρα και μπορεί να φέρει μεταβολή στην έξοδό του

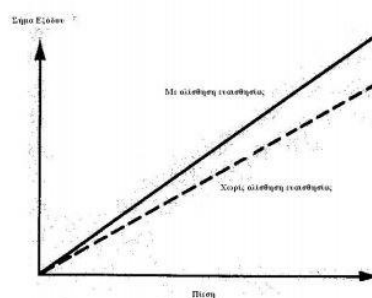
ονομάζεται ευαισθησία. Σε έναν αισθητήρα μεταβάλλονται συνήθως δύο χαρακτηριστικά, τα οποία είναι η ολίσθηση ευαισθησίας και ολίσθηση του μηδενός.

Η ολίσθηση ευαισθησίας ορίζεται ως το ποσό μεταβολής της ευαισθησίας ενός αισθητήρα λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το μέγεθος της ολίσθησης ανά μονάδα μεταβολής της παραμέτρου που την προκάλεσε εκφράζεται από τον συντελεστή ολίσθησης ευαισθησίας.

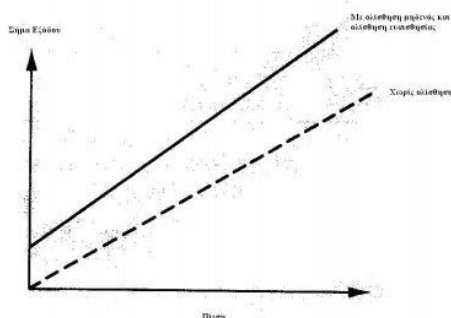
Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μη μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν το σήμα εισόδου είναι μηδενικό, λόγω μεταβολής των συνθηκών. Εάν έχουμε παραπάνω από μία επηρεάζουσα παράμετρο τότε ο αισθητήρας χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες ολισθήσεις του μηδενός. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε τις δύο παραπάνω ολισθήσεις και την συνδυασμένη επίδραση αυτών.



(a)



(b)

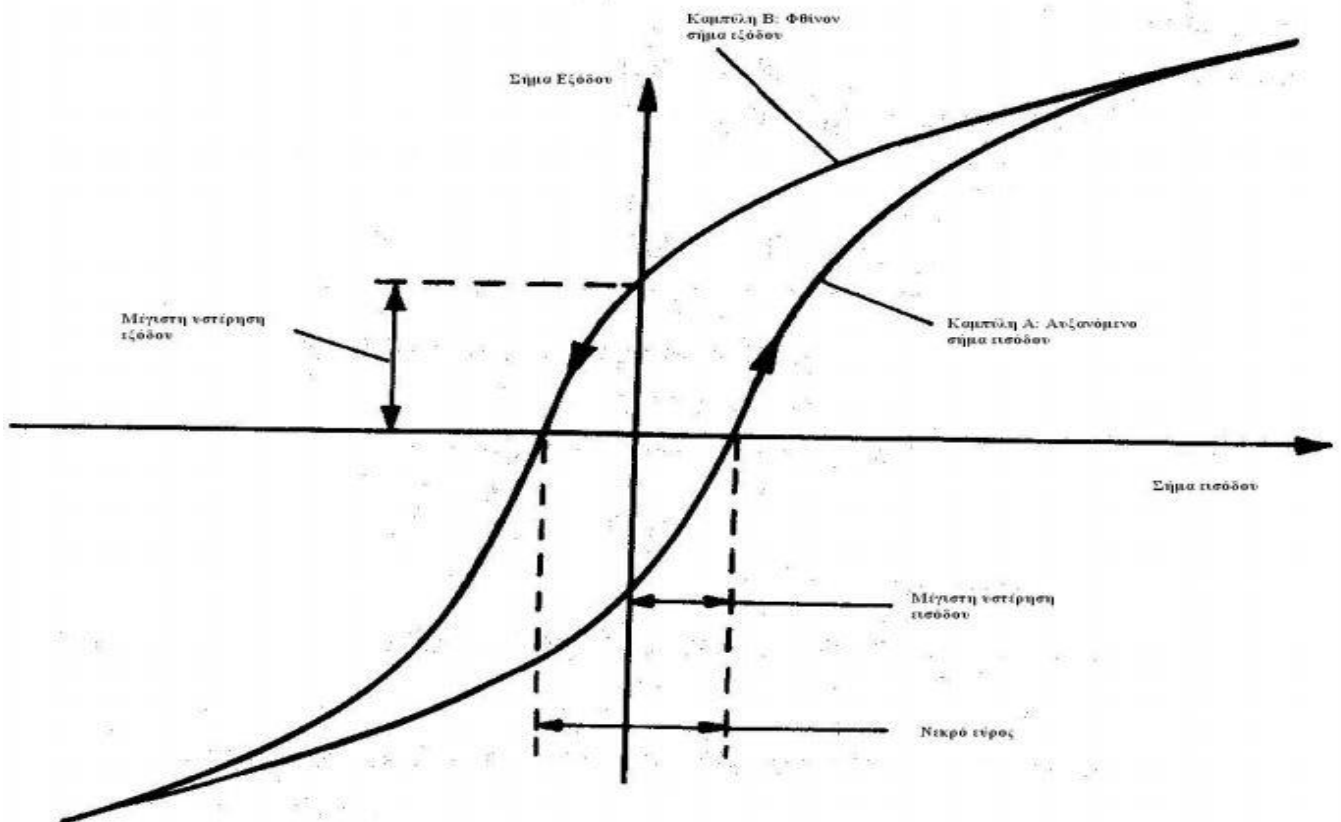


(c)

Σχήμα 2: (a) Ολίσθηση μηδενός, (b) Ολίσθηση ευαισθησίας, (c) Συνδυασμένη επίδραση.

### 1.2.7 Υστέρηση

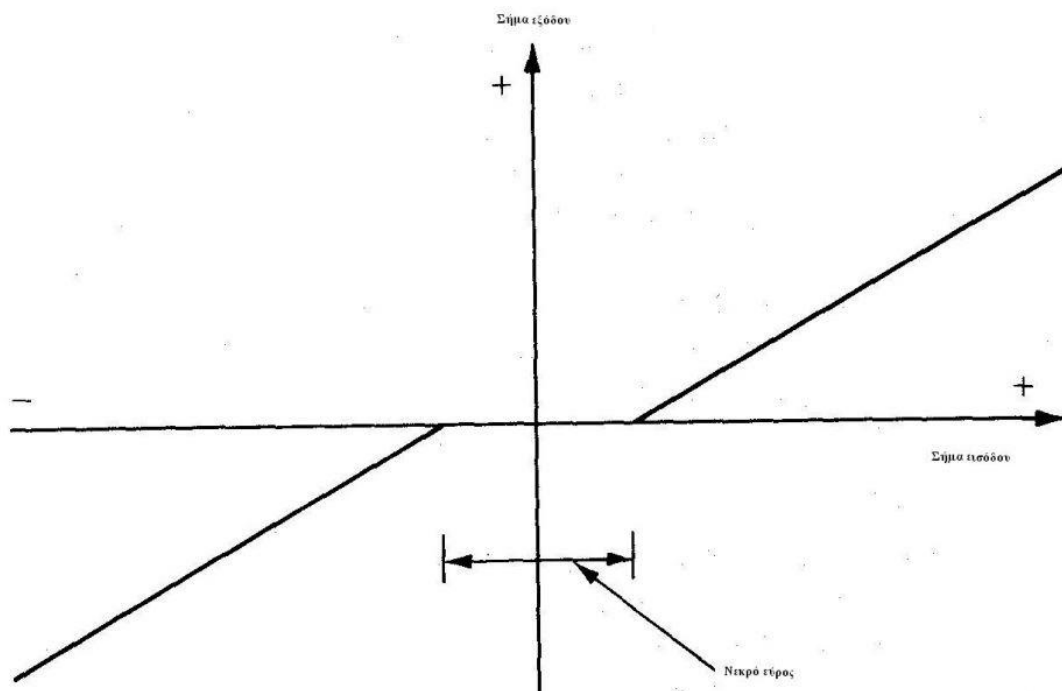
Παρόμοιο μέγεθος με τη γραμμικότητα είναι και η υστέρηση. Ένας αισθητήρας πρέπει να προσαρμόζεται στις διάφορες μεταβολές που συμβαίνουν λόγω του περιβάλλοντος και του εύρους των μετρήσεων, αλλά και να είναι ικανός να καταγράψει παρόμοιες μετρήσεις, παρά τις διαφοροποιήσεις στην κατεύθυνση των μετρήσεων. Η συνήθης παρουσίαση της υστέρησης γίνεται μέσω του λεγόμενου βρόχου υστέρησης, από τον οποίο μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα για τη φύση και την ποιότητα ενός αισθητήρα.



Σχήμα 3: Βρόχος υστέρησης αισθητήρα.

### 1.2.8 Χρόνος απόκρισης και νεκρό εύρος

Τέλος, ο χρόνος απόκρισης είναι ο χρόνος ο οποίος χρειάζεται ο αισθητήρας για να εμφανίσει την έξοδο από την στιγμή της διέγερσης. Το νεκρό εύρος είναι το εύρος το οποίο αντιστοιχεί στο χρόνο απόκρισης.



Σχήμα 4: Χαρακτηριστική εξόδου με νεκρό χρόνο.



## 2 Μαγνητικοί αισθητήρες

### 2.1 Εισαγωγή

Οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι αυτά τα τεχνολογικά μέσα τα οποία επιτρέπουν την μέτρηση των μαγνητικών πεδίων. Οι αρχές στις οποίες βασίζονται οι μαγνητικοί αισθητήρες για να λειτουργήσουν είναι η στενή σχέση μεταξύ των μαγνητικών και των ηλεκτρικών φαινομένων. Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε την λειτουργία των μαγνητικών αισθητήρων και κυρίως των αισθητήρων Fluxgate.

Ανάλογα με την τεχνολογία την οποία χρησιμοποιούν και την πολυπλοκότητα κατασκευής τους, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για πολλές εφαρμογές οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε σχέση με την ευαισθησία τους. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε τους πιο σημαντικούς μαγνητικούς αισθητήρες και την αντίστοιχη ευαισθησία τους [5]. Εκτός από την ευαισθησία υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι καθιστούν κατάλληλους τους αισθητήρες για διάφορες εφαρμογές όπως η απόκριση, η συχνότητα, η ισχύς και το μέγεθός τους.

Τεχνολογία Μαγνητικών Αισθητήρων	Ανιχνεύσιμο Πεδίο (Gauss)				
	$10^{-10}$	$10^{-6}$	$10^{-0}$	$10^3$	$10^6$
1. Μαγνητόμετρο πηνίου ανίχνευσης					
2. Αισθητήρες Πύλης Ροής (Fluxgate)					
3. Αισθητήρες Οπτικής Άντλησης					
4. Αισθητήρες Πυρηνικής Πομπής					
5. Αισθητήρες SQUID					
6. Αισθητήρες Hall					
7. Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης					
8. Μαγνητοδιόδος					
9. Μαγνητοτρανζίστορ					
10. Μαγνητόμετρο Οπτικής Ίνας					
11. Μαγνητοοπτικός Αισθητήρας					

Σχήμα 5: Σύγκριση μαγνητικών αισθητήρων [5].

## 2.2 Αισθητήρες Πύλης-Ροής (Fluxgate)

Οι αισθητήρες Fluxgate αναπτύχθηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1930 για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της γης. Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου χρησιμοποιήθηκαν για ανθυποβρυχιακό πόλεμο και από τα υποβρύχια για τον εντοπισμό των χαμηλά ιπτάμενων αεροσκαφών. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν για αποστολές στο διάστημα.

Τα μαγνητόμετρα Fluxgate μπορούν να μετρήσουν την απόλυτη τιμή της έντασης μαγνητικού πεδίου και την μέτρηση της διαφοράς μεταξύ δύο σημείων εντός μαγνητικού πεδίου. Μπορούν να μετρήσουν πεδίο της τάξης των  $10^{-1}$  έως  $10^6$  nT [6] και η διακριτική τους ικανότητα μπορεί να πλησιάσει τα 100pT [7]. Το εύρος λειτουργίας τους και η διακριτική τους ικανότητα καλύπτουν το κενό ανάμεσα στους φθηνούς αισθητήρες Hall και στα ακριβά μαγνητόμετρα που βασίζονται σε κβαντικά φαινόμενα όπως τα SQUIDS.

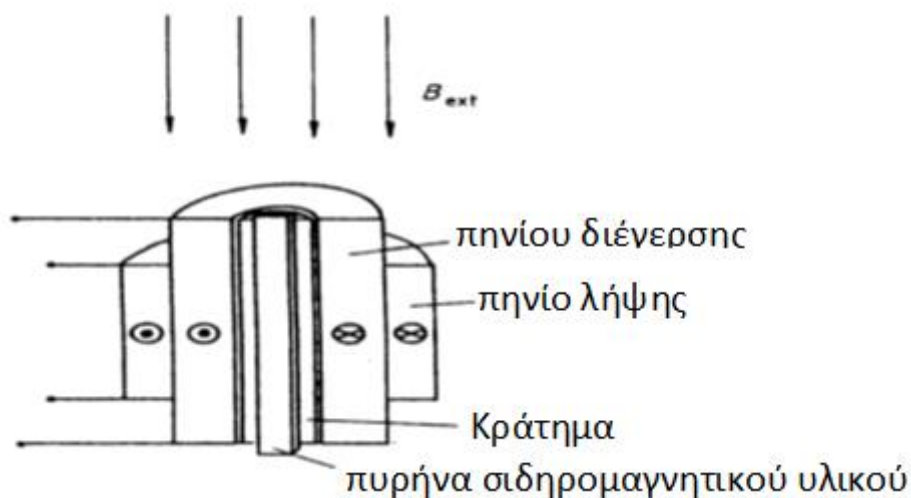
Στις μέρες μας παρατηρείται μεγάλη πρόοδος σε εναλλακτικές τεχνολογίες όμως λόγω των χαρακτηριστικών των αισθητήρων Fluxgate όπως η υψηλή γραμμικότητα, η σταθερότητα, η υψηλή ευαισθησία και το κόστος τους, τους κάνει κατάλληλους για χρήση σε πολλές εφαρμογές. Οι σύγχρονες εφαρμογές τους περιλαμβάνουν γεωμαγνητικές παρατηρήσεις, αναζήτηση ορυκτών, μετρήσεις στο εξώτερο διάστημα, ανίχνευση υποβρυχίων, μαγνητική προστασία πλοίων κλπ. Οι αισθητήρες Fluxgate διαθέτουν δυνατότητα μέτρησης περισσότερων από μίας συνιστωσών μαγνητικού πεδίου, καθώς και εφαρμογές σε μεταλλογραφικές συσκευές προς ανίχνευση ανωμαλιών ή δομικών κενών σε μεταλλικά υλικά.

### 2.2.1 Βασικές αρχές αισθητήρων Fluxgate

Για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου υπάρχουν δύο τρόποι: Ο πρώτος τρόπος είναι η άμεση μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτόν τον τρόπο σαν είσοδο

έχουμε την απόλυτη τιμή του μαγνητικού πεδίου και σαν έξοδο έχουμε ένα μετρήσιμο σήμα. Αυτή η μέθοδος υπερτερεί λόγω απλότητας αλλά δεν είναι κατάλληλη για μέτρηση ασθενών μαγνητικών πεδίων. Για να καλυφθεί αυτό το κενό αναπτύχθηκαν οι αισθητήρες Fluxgate οι οποίοι χρησιμοποιούν το δεύτερο τρόπο, δηλαδή για να μετρήσουν το μαγνητικό πεδίο απαιτούν ένα πεδίο αναφοράς ώστε να γίνει η σύγκριση με το προς μέτρηση πεδίο.

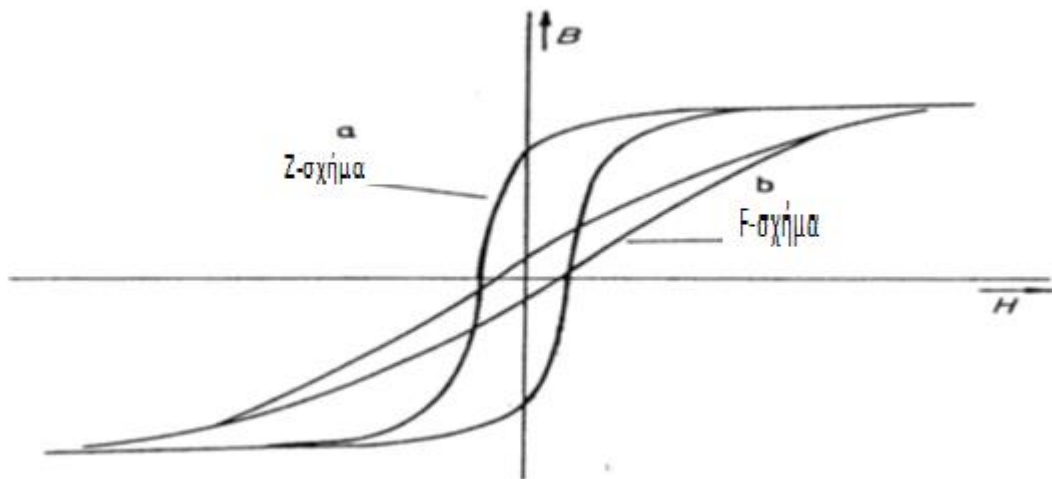
Για να λειτουργήσει ο αισθητήρας Fluxgate πρέπει να επιβληθεί μέσω του πηνίου διέγερσης στον πυρήνα του πεδίο αναφοράς το οποίο συνήθως είναι ένα εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ή τετραγωνικό ή τριγωνικό σήμα. Με αυτόν τον τρόπο ο πυρήνας οδηγείται σε κορεσμό. Το μετρούμενο πεδίο το λαμβάνουμε από το πηνίο λήψης. Έτσι, το αισθητήριο τμήμα ενός Fluxgate περιλαμβάνει συνήθως έναν πυρήνα σιδηρομαγνητικού υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και χαμηλού συνεκτικού πεδίου, γύρω από το οποίο τυλίγονται δύο τουλάχιστον πηνία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 [6].



Σχήμα 6: Στοιχειώδες σχέδιο αισθητήρα Fluxgate.

Για να επιλεγεί ένας Fluxgate για συγκεκριμένη εφαρμογή βασιζόμαστε στην καμπύλη μαγνήτισης η οποία φαίνεται στο Σχήμα 7 [6]. Τα χαρακτηριστικά τα οποία παρατηρούμε στην καμπύλη μαγνήτισης ενός υλικού, ώστε να κριθεί κατάλληλος για τον Fluxgate είναι :

- σχήμα
- συμμετρία
- συμπεριφορά μηδενικού σημείου
- συμπεριφορά κορεσμού



Σχήμα 7: Χαρακτηριστικές μορφές καμπύλης μαγνήτισης[6].

Παρατηρώντας την καμπύλη συμπεραίνουμε ότι ο πυρήνας ο οποίος έχει την Z-καμπύλη φτάνει πιο γρήγορα στον κορεσμό όσο αυξάνεται το πεδίο ενώ ο πυρήνας της καμπύλης F απαιτεί πιο μεγάλο πεδίο. Άρα ανάλογα με την εφαρμογή που επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε το Fluxgate επιλέγουμε και τον αντίστοιχο πυρήνα. Ακόμα, το εμβαδόν της καμπύλης παριστάνει την ενέργεια που καταναλώνεται, λόγω υστέρησης, υπό την μορφή θερμότητας. Άρα η ισχύς P των απωλειών υστέρησης δίνεται από την σχέση:

$$P = fVS \quad 2.1$$

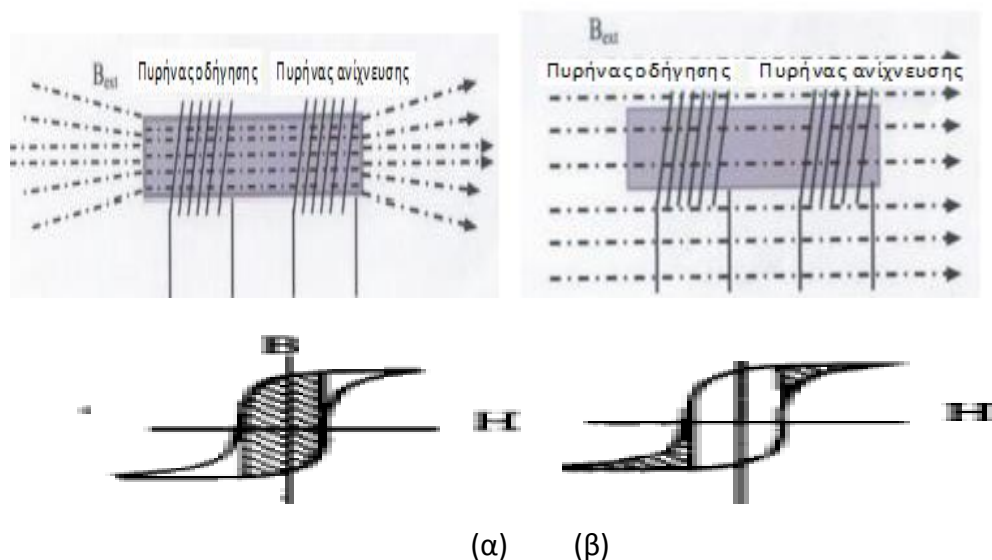
οπού f η συχνότητα της κυκλικής εναλλαγής του μαγνητικού πεδίου που επιβάλλεται στον πυρήνα, V ο όγκος του και S το εμβαδό του βρόχου υστέρησης.

## 2.2.2 Αρχή λειτουργίας μαγνητόμετρων Fluxgate

Ο αισθητήρας Fluxgate αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη:

- Μαγνητικό πυρήνα.
- Πηνίο διέγερσης του πυρήνα.
- Πηνίο μέτρησης του εξωτερικού πεδίου.

Στη λειτουργία του διακρίνονται οι καταστάσεις όταν ο μαγνητικός πυρήνας δεν βρίσκεται σε κορεσμό (Σχήμα 8α) και όταν ο μαγνητικός πυρήνας βρίσκεται σε κορεσμό (Σχήμα 8β). Οι καταστάσεις επιτυγχάνονται με την επιβολή ενός αρμονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού σήματος στο πηνίο διέγερσης. Κατά τη διάρκεια του κορεσμού, το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο δεν εισέρχεται στον μαγνητικό πυρήνα αλλά όταν δεν βρίσκεται σε κορεσμό μπορεί να εισέλθει σε αυτόν. Όσο το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εισέρχεται και εξέρχεται στον μαγνητικό πυρήνα η μαγνητική ροή  $\Phi$  μεταβάλλεται. Η μεταβολή αυτή η οποία είναι ανάλογη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου γίνεται αισθητή από το πηνίο μέτρησης.



Σχήμα 8: Καταστάσεις του μαγνητικού πυρήνα όταν (α) δεν βρίσκεται σε κορεσμό και (β) βρίσκεται σε κορεσμό

Από τις σχέσεις μεταξύ μαγνητικού πεδίου, έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνήτισης ξέρουμε ότι:

$$B = \mu_0(H + M) \quad 2.2$$

$$M = \chi H \quad 2.3$$

και άρα προκύπτει ότι:

$$B = (\mu_0\mu_r)H \quad 2.4$$

όπου :

$$\mu_r = 1 + \chi \quad 2.5$$

Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να γραφτεί ως:

$$H = H_{external} - DM \Rightarrow \frac{1}{\mu_0} B_{external} - DM \quad 2.6$$

όπου ως D ορίζεται ο παράγοντας απομαγνήτισης. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2.2, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$B = \frac{\mu_0}{1 + D(\mu_r - 1)} B_{external} \quad 2.7$$

Η τάση στα άκρα του πηνίου μέτρησης είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής και δίνεται από την εξίσωση:

$$V = nA \frac{dB}{dt} \quad 2.8$$

όπου  $n$  ο αριθμός των σπειρών του πηνίου μέτρησης και  $A$  η διατομή του.

Διαφορίζοντας την εξίσωση 2.7 καταλήγουμε:

$$V = \frac{nA(1 - D) \frac{d\mu_r}{dt}}{1 + D(\mu_r - 1)^2} B_{external} \quad 2.9$$

Η εξίσωση 2.9 παρουσιάζει τη μετρούμενη τάση στα άκρα του πηνίου μέτρησης η οποία είναι ανάλογη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

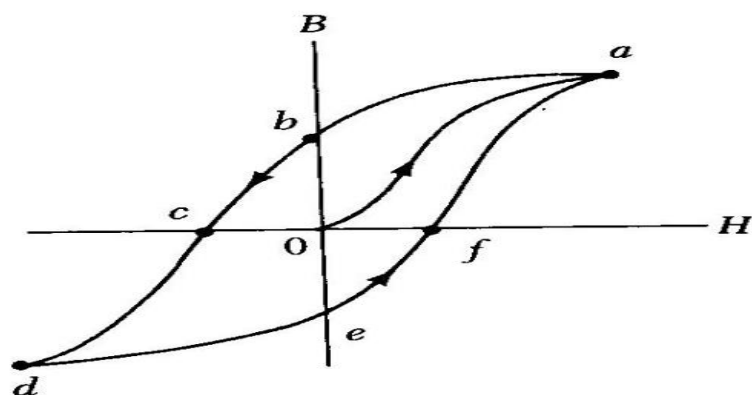
### 2.2.3 Διατάξεις αισθητήρα Fluxgate

Αναλόγως με τη διάταξη οι αισθητήρες Fluxgate κατηγοριοποιούνται σε:

- Fluxgate παράλληλου τύπου
- Fluxgate ορθογώνιου τύπου

Ως fluxgates παράλληλου τύπου ορίζονται οι αισθητήρες εκείνοι στους οποίους το πεδίο διέγερσης είναι παράλληλο με την προς μέτρηση συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες διαμήκους πυρήνα. Η απλούστερη διάταξη αισθητήρα Fluxgate είναι ο αισθητήρας διαμήκους πυρήνα που φαίνεται στο Σχήμα 6. Καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο ο πυρήνας φτάνει στο σημείο κορεσμού. Στο Σχήμα 9 αυτό το σημείο είναι το σημείο α. Στην συνέχεια όταν μηδενιστεί το εξωτερικό πεδίο που προκάλεσε την μαγνήτιση, η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται, αλλά διατηρεί θετικό πρόσημο. Η τιμή αυτή είναι το σημείο b και ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση. Όταν αλλάζει η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου, μηδενίζεται η μαγνήτιση του πυρήνα (σημείο c). Αυξάνοντας περαιτέρω τη διέγερση, ο πυρήνας φτάνει στον κόρο (σημείο d). Μειώνοντας στη συνέχεια το πεδίο μέχρι να μηδενιστεί, έχουμε και πάλι παραμένουσα μαγνήτιση στον πυρήνα με αντίθετη κατεύθυνση (σημείο e). Εφαρμόζοντας πάλι θετικό πεδίο συμπληρώνεται η κλειστή καμπύλη. Έτσι, η καμπύλη μαγνήτισης στην περίπτωση αυτή τοποθετείται συμμετρικά γύρω από το

σημείο 0, και οι δύο ακραίες φάσεις (θετική και αρνητική μαγνήτιση κορεσμού) απέχουν ακριβώς μισή περίοδο.

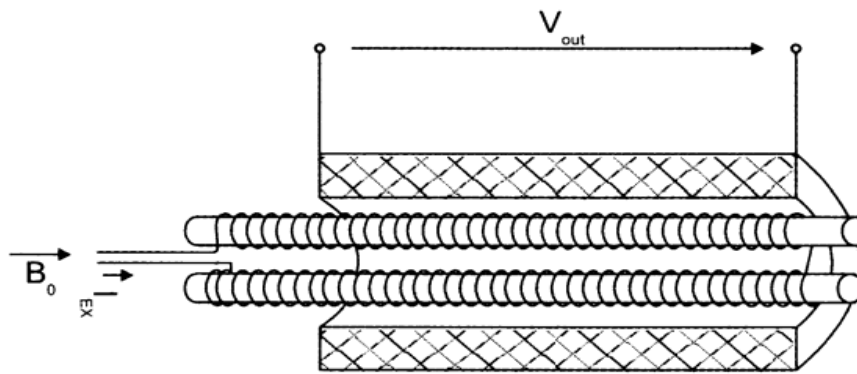


Σχήμα 9: Βρόχος υστέρησης.

Αν τώρα ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας βρεθεί εντός πεδίου με διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα του πυρήνα η παραπάνω συμμετρία διαταράσσεται. Στη θετική (ως προς το εξωτερικό πεδίο) ημιπερίοδο του κύκλου μαγνήτισης, ο κορεσμός θα υφίσταται λίγο νωρίτερα καθώς αυτός εξαρτάται από το συνολικό πεδίο, που στην περίπτωση αυτή είναι η υπέρθεση του πεδίου διέγερσης και του εξωτερικού πεδίου που είναι ομόρροπα. Στην αρνητική ημιπερίοδο, ο κορεσμός θα υφίσταται λίγο αργότερα αφού πλέον το συνολικό πεδίο είναι η υπέρθεση δύο αντίρροπων μαγνητικών πεδίων. Συμπεραίνουμε ότι όταν ο πυρήνας βρεθεί στην επίδραση του εξωτερικού πεδίου προκαλεί μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ της εμφάνισης δύο διαδοχικών καταστάσεων κορεσμού αντίθετης πολικότητας. Η ιδιότητα αυτή αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία του Fluxgate διαμήκους πυρήνα.

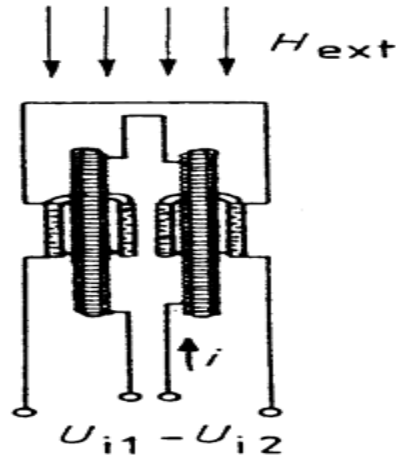
Επειδή στην απλή διάταξη του Fluxgate στο τύλιγμα λήψης υπάρχει και η συνιστώσα που αντιστοιχεί στην συχνότητα διέγερσης, αναπτύχθηκε ο Fluxgate που φαίνεται στο Σχήμα 10 [7].





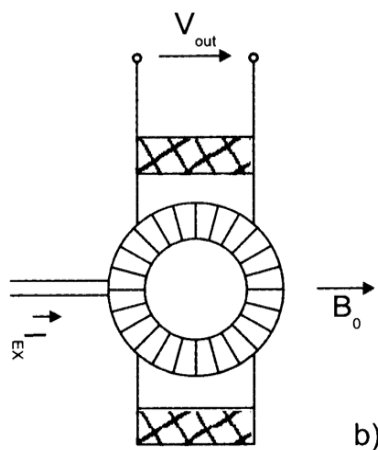
Σχήμα 10: Fluxgate Διπλού Δρόμου [7].

Σε αυτήν την διάταξη χρησιμοποιούνται δύο ίδιοι σιδηρομαγνητικοί πυρήνες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι παράλληλα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Το πηνίο λήψης τυλίγεται γύρω από τους δύο πυρήνες ενώ το πηνίο διέγερσης τυλίγεται με αντίθετη φορά, έτσι ώστε τα πεδία διέγερσης των σιδηρομαγνητών να έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$ . Απουσία μαγνητικού πεδίου, το δευτερεύον πηνίο δίνει πάντα μηδενική έξοδο καθώς η συνολική μαγνητική ροή διαμέσου αυτού είναι μηδενική. Αν όμως εφαρμοσθεί πεδίο παράλληλα με τον άξονα των σιδηρομαγνητικών πυρήνων τότε ενισχύεται η μαγνητική επαγωγή προς τη μία κατεύθυνση και έτσι στο πηνίο λήψης επάγεται μετρήσιμη τάση που είναι ανάλογη προς την ένταση  $H$  του εξωτερικού πεδίου. Παραλλαγή της διάταξης αυτής αποτελεί η υλοποίηση του αισθητήρα με δύο εν σειρά συνδεδεμένα πηνία λήψης, ένα για κάθε πυρήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11 [6] με πλεονέκτημα τον εύκολο μηδενισμό των offsets των οργάνων με κίνηση των πυρήνων εντός των δευτερευόντων πηνίων [8].



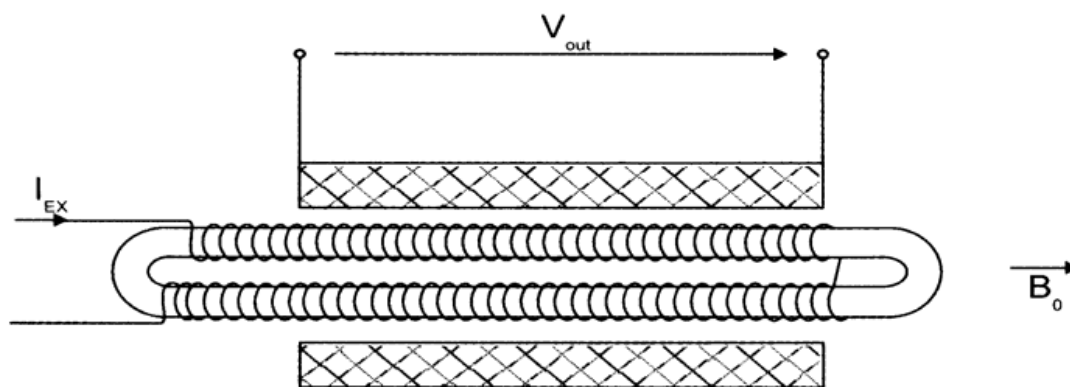
Σχήμα 11: Fluxgate διαμήκους πυρήνα τύπου Förster [7].

Μία επίσης σημαντική κατηγορία Fluxgate παράλληλου τύπου είναι οι διατάξεις δακτυλιοειδούς πυρήνα. Σε αυτή την υλοποίηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 12 [7], το πηνίο διέγερσης τυλίγεται τοροειδώς γύρω από τον δακτυλιοειδή πυρήνα ο οποίος έχει προσανατολισμό τέτοιο ώστε το προς μέτρηση πεδίο να κείται παράλληλα με μία διάμετρο του δακτυλίου. Σε αυτήν την διάταξη στον μισό δακτύλιο το πεδίο λόγω του ρεύματος διέγερσης είναι παράλληλο με το εξωτερικό πεδίο, και στον άλλο μισό αντιπαράλληλο. Το πηνίο λήψης είναι ένα απλό σωληνοειδές με άξονα παράλληλο στο προς μέτρηση πεδίο.



Σχήμα 12: Fluxgate Δακτυλιοειδούς πυρήνα.

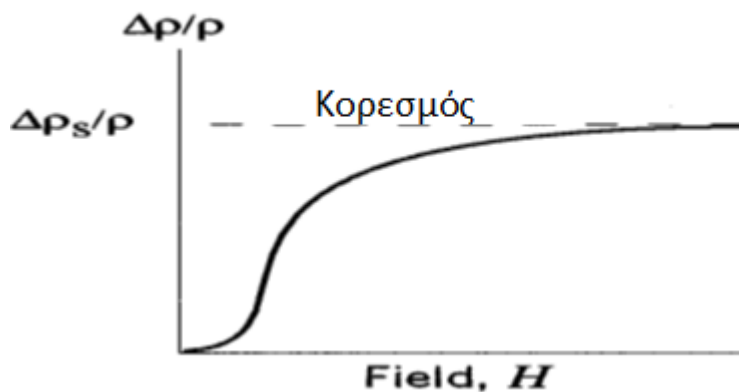
Ακόμα μία κατηγορία αισθητήρων Fluxgate αποτελούν οι αισθητήρες ελλειψοειδούς πυρήνα (race-track sensors). Ένας τυπικός αισθητήρας της μορφής αυτής φαίνεται στο Σχήμα 13 [7]. Σε αυτές τις διατάξεις το πεδίο διέγερσης είναι κάθετο ως προς τη μετρούμενη συνιστώσα μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 13: Fluxgate ελλειψοειδούς πυρήνα.

### 2.3 Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης

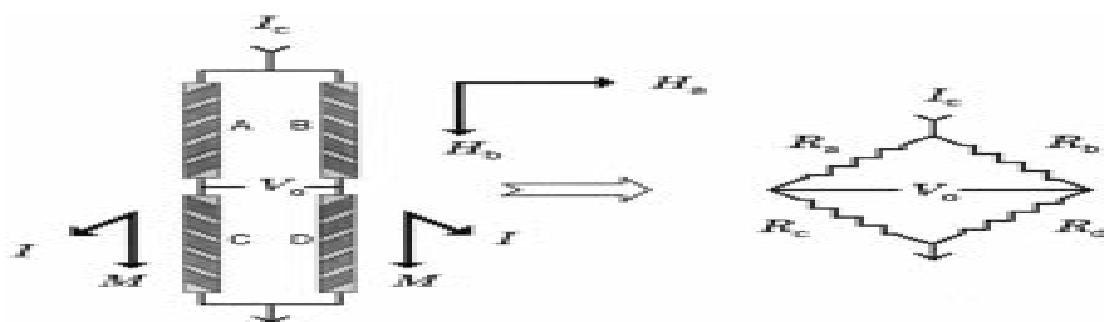
Το φαινόμενο Μαγνητοαντίστασης παρατηρήθηκε από τον William Thomson. Σύμφωνα με το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης αν εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα υλικό από το οποίο διέρχεται ρεύμα τότε παρατηρείται μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση αυτού του υλικού. Το ποσοστό της αλλαγής εξαρτάται από το μέγεθος της μαγνήτισης και τη διεύθυνση του ρεύματος το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι κράματα νικελίου και σιδήρου σε μορφή λεπτών υμένων, επειδή παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αλλαγή στην ειδική αντίσταση (περίπου 5%). Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της ειδικής αντίστασης για πεδίο το οποίο έχει εφαρμοστεί παράλληλα προς την ροή του ρεύματος.



Σχήμα 14: Αλλαγή ειδικής αντίστασης συναρτήσει μαγνητικού πεδίου.

Όπως φαίνεται, η αντίσταση αυξάνεται όταν αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο. Η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού αυξάνεται λόγω της μαγνήτισης των διπόλων του. Όταν τα μαγνητικά δίπολα διαταχθούν κάθετα στη φορά του ρεύματος προκαλούνται σκεδάσεις των ηλεκτρονίων, με συνέπεια τη μείωση της κινητικότητάς τους και τελικά την αύξηση της αντίστασης του υλικού. Σε αυτές τις ιδιότητες βασίζεται η Ανισοτροπική Μαγνητοαντίσταση (AMR) [9].

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης συνήθως ενσωματώνονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ως διατάξεις τεσσάρων αισθητήρων σε γέφυρα Wheatstone όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Οι αντιστάσεις έχουν τον ίδιο προσανατολισμό με την ροή του ρεύματος. Έτσι οι αντιστάσεις οι οποίες βρίσκονται σε παράλληλες θέσεις (θέσεις A και D) έχουν προσανατολισμό στην ροή ρεύματος που διαρρέει κατά  $90^\circ$  από τον προσανατολισμό των άλλων δυο αντιστάσεων (θέσεις B και C). Αυτή η διάταξη επιτυγχάνει ενίσχυση της τάσης εξόδου κατά τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την διάταξη που περιλαμβάνει μόνο μία μαγνητοαντίσταση [5].



Σχήμα 15: Μαγνητόμετρο Μαγνητοαντίστασης

Παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με τους AMR, έχουν οι αισθητήρες GMR (Giant MagnetoResistance). Η διαφορά με τους AMR είναι η μεγαλύτερη μεταβολή ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζουν, της τάξης του 10 ή 20%. Η ανακάλυψη των αισθητήρων GMR οδήγησε στην απονομή του βραβείου Nobel στους ερευνητές Albert Fert και Peter Grünberg το 2007 [10].

## 2.4 Μαγνητόμετρο πηνίου ανίχνευσης

Τα μαγνητόμετρα πηνίου ανίχνευσης (search-coil magnetometers), τα οποία βασίζονται στους επαγωγικούς αισθητήρες, είναι αισθητήρες οι οποίοι μετρούν την μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή χάρη στο νόμο του Lenz. Τα μαγνητόμετρα πηνίου ανίχνευσης αποτελούνται από έναν επαγωγικό αισθητήρα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Προσφέρουν τη δυνατότητα μέτρησης άνω του ενός διανυσμάτων του μαγνητικού πεδίου και έχουν εύρος μέτρησης πεδίου από mHz έως MHz [11].



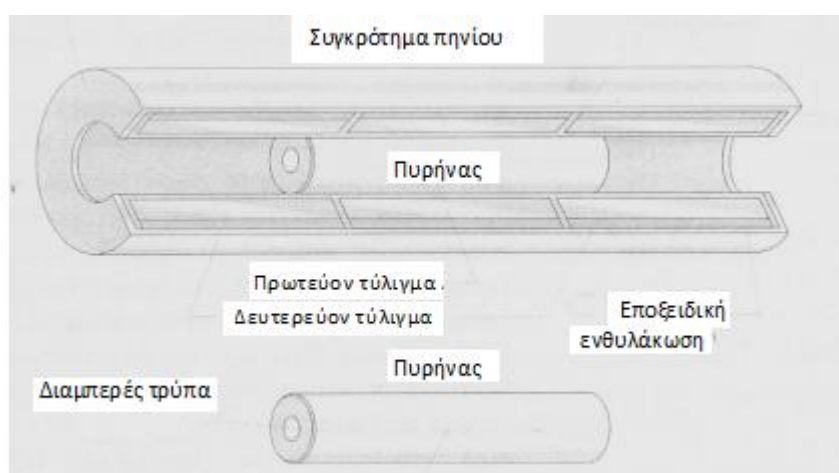
Σχήμα 16: Μαγνητόμετρο πηνίου ανίχνευσης

Η ευαισθησία αυτών των μαγνητόμετρων εξαρτάται από τη διαπερατότητα του πυρήνα, τις γεωμετρικές διαστάσεις του πηνίου και το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής διαμέσου του πηνίου.

## 2.5 Αισθητήρες LVDT

Ένας αισθητήρας LVDT (Linear Variable Differential Transformer – Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής) μπορεί να μετρήσει τη γραμμική μετατόπιση ενός υλικού από μερικά εκατοστά της ίντσας μέχρι μερικές ίντσες.

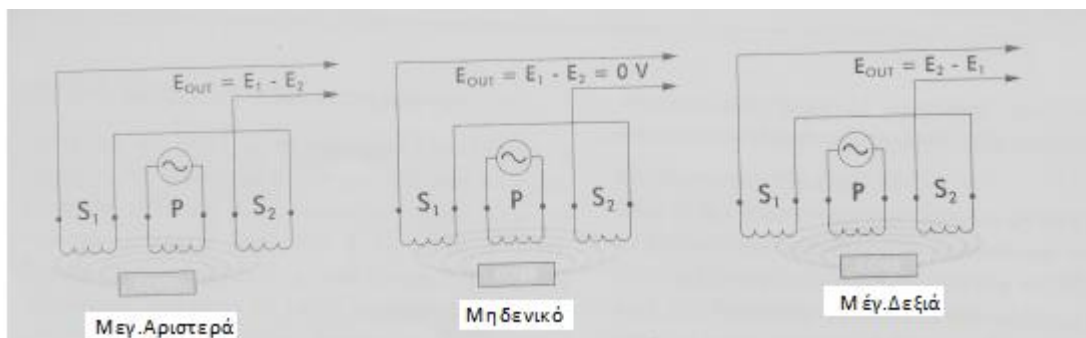
Στο Σχήμα 17 παρουσιάζουμε την δομή του LVDT. Ως μετασχηματιστής, στο εσωτερικό του έχει ένα πρωτεύον τύλιγμα το οποίο είναι τοποθετημένο στο κέντρο του και είναι ανάμεσα από δυο τυλίγματα (πρωτεύον και δευτερεύον). Τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα σε έναν κύλινδρο, ο οποίος είναι συνήθως γυάλινος. Όλη η παραπάνω δομή περικλείεται από κάποιο προστατευτικό υλικό με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και αποτελεί το σταθερό μέρος του αισθητήρα. Το κινητό μέρος του LVDT αποτελείται από τον πυρήνα ο οποίος μετακινείται κατά μήκος του άξονα του πηνίου [12].



Σχήμα 17: Αισθητήρας LVDT[12].

Για να λειτουργήσει ο αισθητήρας τροφοδοτούμε το πρωτεύον πηνίο με εναλλασσόμενο ρεύμα κατάλληλου πλάτους και συχνότητας. Επειδή το σήμα εισόδου περνάει από τα δύο δευτερεύοντα πηνία η έξοδος του μεταβάλλεται ανάλογα με την κίνηση του πυρήνα. Λόγω του εναλλασσόμενου ρεύματος εισόδου αναπτύσσεται στα δευτερεύοντα πηνία μαγνητική ροή  $S_1$  και  $S_2$ . Η τιμή των μαγνητικών ροών εξαρτάται από τη θέση του πυρήνα. Ανάλογα με την μαγνητική ροή

έχουμε και την αντίστοιχη τάση  $E_1$  και  $E_2$ . Η έξοδος του αισθητήρα είναι ανάλογη της διαφοράς των δύο τάσεων στα δευτερεύοντα πηνία, άρα  $E_2 - E_1$  ή  $E_1 - E_2$ . Οι τρεις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο αισθητήρας φαίνονται στο Σχήμα 18.



Σχήμα 18: Καταστάσεις λειτουργίας αισθητήρα.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα του LVDT είναι η μηδενική τριβή κατά τη λειτουργία του, η ικανοποιητική ανάλυση, η μεγάλη διάρκεια ζωής, η άμεση απόκριση, η αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες κ.α.

## 2.6 Αισθητήρες SQUID

Τα πιο ευαίσθητα όργανα μέτρησης μαγνητικού πεδίου είναι οι αισθητήρες SQUID. Οι υπερευαίσθητοι αισθητήρες SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) είναι αισθητήρες μαγνητικής ροής που μπορούν να διακρίνουν διαφορές της τάξης των  $10^{-11}$  T του μαγνητικού πεδίου της Γης. Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου γίνεται όταν συγκεκριμένα υλικά ψύχονται κάτω από μία υπεραγώγιμη μεταβατική θερμοκρασία. Με αυτόν τον τρόπο τα υλικά χάνουν την ηλεκτρική τους αντίσταση και γίνονται υπεραγωγοί.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στους αισθητήρες χαμηλής θερμοκρασίας (LTS) και στους αισθητήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTS). Οι LTS αισθητήρες λειτουργούν σε θερμοκρασίες  $-270^{\circ}\text{C}$  και κατασκευάζονται από νιόβιο ή κράματα μόλυβδου και χρυσού. Για τη λειτουργία τους απαιτείται ψύξη με υγρό ήλιο, κάτι που

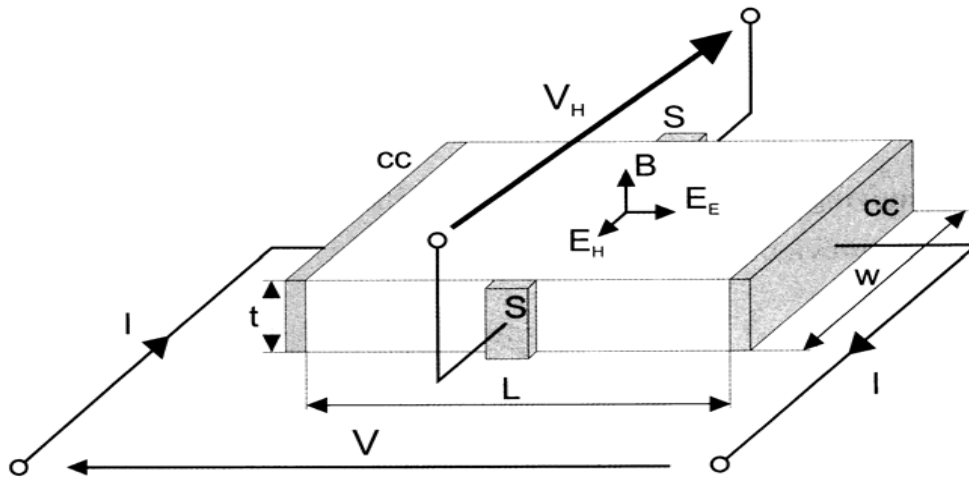
τους καθιστά πιο δύσχρηστους. Αντιθέτως, οι HTS αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως και περίπου  $-130^{\circ}\text{C}$ . Κατασκευάζονται από YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο είναι πιο εύχρηστο σε σχέση με το υγρό ήλιο και έχει χαμηλότερο κόστος.

Η λειτουργία τους συνδυάζει το κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson, σύμφωνα με το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο μη υπεραγωγίμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγωγίμων υλικών. Λόγω της μαγνητικής ροής η οποία δημιουργείται όταν ψύχονται σε κατάλληλη θερμοκρασία και του επιβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έχουμε απώλεια ενέργειας. Η απώλεια ενέργειας δημιουργείται λόγω της στιγμιαίας αλλαγής της μαγνητικής ροής όταν βρεθεί μέσα στο επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Μετρώντας αυτήν την ενέργεια, υπολογίζεται η τιμή του μαγνητικού πεδίου [13].

## 2.7 Αισθητήρας Hall

Οι αισθητήρες Hall βασίζονται στο ομώνυμο φαινόμενο. Όταν ένα αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, στις αντιδιαμετρικές πλευρές του εμφανίζεται διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Κατά συνέπεια, οι φορείς ηλεκτρικού φορτίου εκτρέπονται λόγω της δύναμης Lorentz που ασκείται σε αυτούς από το πεδίο. Η γωνία εκτροπής εξαρτάται από την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, και την ένταση του διερχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτέλεσμα της δράσης της δύναμης Lorentz είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο ένα άκρο του αγωγού και οπών στο άλλο. Καθώς η συγκέντρωση φορέων στα δύο άκρα αυξάνεται, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο που στο σχήμα συμβολίζεται με  $E_H$  και κατά συνέπεια είναι δυνατή η μέτρηση της τάσης Hall η οποία μπορεί να δώσει ένα μέτρο της τιμής του εφαρμοζόμενου πεδίου [14].





Σχήμα 19: Η βασική διάταξη αισθητήρα Hall.



## 3 Εφαρμογές μαγνητικών αισθητήρων

### 3.1 Εισαγωγή

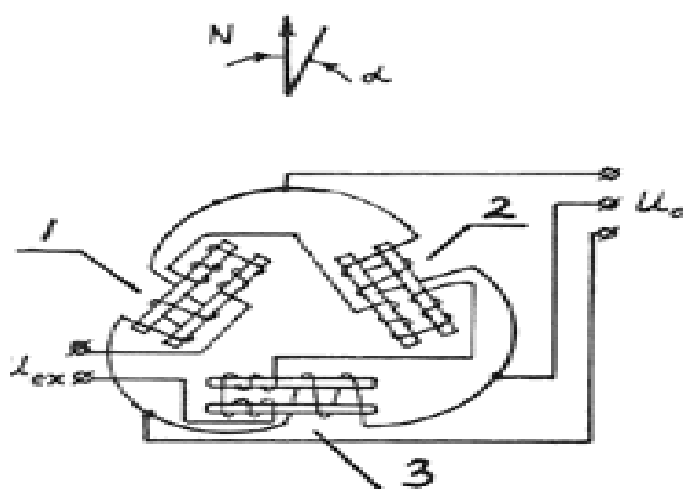
Στις μέρες μας οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι σε θέση να δώσουν λύση σε ποικίλα θέματα, όπως είναι ο εντοπισμός θέσης ή ο έλεγχος στάθμης. Ένας μαγνητικός αισθητήρας μετατρέπει τη μεταβολή της έντασης ενός μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτρικό σήμα. Η μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου μετράτε με τους τρόπους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας. Οι εφαρμογές τους είναι άπειρες και αρχίζουν από τις πιο απλοϊκές και γνωστές σ' όλους τους ανθρώπους όπως είναι π.χ. η μαγνητική πυξίδα, μέχρι τις σύνθετες μεθόδους μέτρησης μεταβολών του μαγνητικού πεδίου της γης για ανίχνευση πετρελαίου, αρχαιοτήτων, νερού κ.α. στο υπέδαφος.

### 3.2 Εφαρμογές στην πλοήγηση

Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων είναι η χρήση τους στην πλοήγηση στην θάλασσα και στον αέρα. Η ανάπτυξη των GPS έδωσε ώθηση στη τεχνολογία των μαγνητικών αισθητήρων για να κατασκευαστούν ολοκληρωμένοι μαγνητικοί αισθητήρες οι οποίοι μπορούσαν να τοποθετηθούν σε αυτά. Η τοποθέτηση των μαγνητόμετρων μέσα στα συστήματα πλοήγησης έγινε για τον λόγο του ότι τα GPS λειτουργούν μόνο σε μέρη τα οποία είναι ορατά από τους δορυφόρους. Σε περιοχές οι οποίες δεν καλύπτονται από τους δορυφόρους λειτουργούν τα μαγνητόμετρα των συστημάτων πλοήγησης. Αυτή η εφαρμογή είναι απαραίτητη κυρίως στα αεροσκάφη και στους πυραύλους οι οποίοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς τη συνεχή λήψη συντεταγμένων.

Ακόμα μια εφαρμογή στην πλοήγηση είναι αυτή στα υποβρύχια. Η πλοήγησή τους εξαρτάται αποκλειστικά από μαγνητόμετρα μεγάλης ακρίβειας. Στις μέρες μας μπορούν να κατασκευαστούν ηλεκτρονικές πυξίδες με ακρίβεια  $0,1^\circ$  με δυνατότητα αυτόματης αντιστάθμισης ανωμαλιών. Αυτές οι ανωμαλίες προέρχονται από τα ηλεκτρικά ρεύματα των διαφόρων συστημάτων και των μαγνητικών πεδίων που προέρχονται από την κατασκευή των πλοίων και των αεροσκαφών.

Μια πυξίδα του τύπου Fluxgate βασίζεται στην αρχή λειτουργίας ενός μαγνητόμετρου του ανωτέρω τύπου. Χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερα ζεύγη πηνίων. Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται το διάγραμμα μιας πυξίδας αυτού του τύπου που χρησιμοποιεί τρία ζεύγη πηνίων. Όταν ο προσανατολισμός της πυξίδας αλλάξει τότε παράγεται μια τάση στην έξοδο που είναι ανάλογη της απόκλισης από τον Βορρά σε μοίρες. Το πλεονέκτημα αυτής της πυξίδας είναι ότι οι ενδείξεις της μπορούν να μεταφερθούν ψηφιακά σε οποιοδήποτε σημείο [5].



Σχήμα 20: Διάταξη πυξίδας τύπου Fluxgate [5].

### 3.3 Εφαρμογές ανίχνευσης οχημάτων

Μία άλλη εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων είναι στην αυτοκινητοβιομηχανία. Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιούνται οι AMR αισθητήρες για την ανίχνευση οχημάτων που βρίσκονται κοντά στον αισθητήρα ή στο σύστημα των αισθητήρων [5].

Με την ένταξη των αισθητήρων στην αυτοκινητοβιομηχανία μπορούμε πλέον να προσδιορίσουμε την ταχύτητα, την διεύθυνση της κυκλοφορίας καθώς και τον αριθμό και τον τύπο των αυτοκίνητων που διέρχονται από κάποιο δρόμο. Επειδή τα σημερινά αυτοκίνητα έχουν αρκετή ποσότητα από σίδηρο, χάλυβα, νικέλιο και κοβάλτιο οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι πολύ καλοί για να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση των οχημάτων. Σήμερα, οι περισσότεροι μαγνητικοί αισθητήρες είναι αρκετά μικροί και λόγω της τεχνολογίας στερεάς κατάστασης η ενσωμάτωσή τους σε διάφορα συστήματα έχει γίνει ευκολότερη. Επειδή τα περισσότερα αυτοκίνητα δεν εκπέμπουν μαγνητικό πεδίο δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το φαινόμενο Hall, το οποίο προϋποθέτει την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου για την λειτουργία των αισθητήρων Hall.

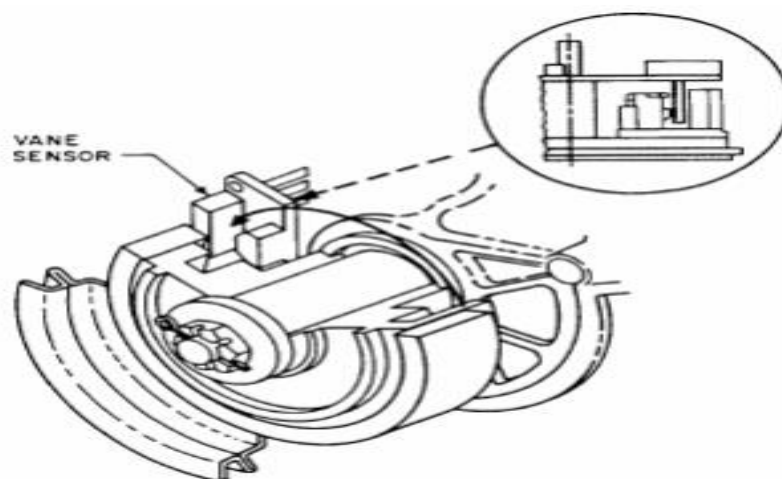
Για τον παραπάνω λόγο χρησιμοποιείται το μαγνητικό πεδίο της γης και οι αισθητήρες «ασθενών πεδίων». Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που προκαλούν τα κοντινά οχήματα. Το Σχήμα 21 δείχνει γραφικά το πώς οι μαγνητικές γραμμές εκτρέπονται όταν διαπερνούν αυτοκίνητο που περιλαμβάνει μαγνητικά υλικά.



Σχήμα 21: Διαταραχή των Μαγνητικών γραμμών του γήινου πεδίου από την παρουσία οχήματος [5].

Καθώς οι μαγνητικές γραμμές πυκνώνουν ή αραιώνουν (ουσιαστικά η αριθμητική τιμή του γήινου πεδίου μεταβάλλεται), ένας μαγνητικός αισθητήρας που έχει τοποθετηθεί εκεί θα υφίσταται τις ίδιες μαγνητικές επιδράσεις που το αυτοκίνητο δημιουργεί στο μαγνητικό πεδίο της γης.

Ακόμα μία εφαρμογή των αισθητήρων στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι αυτή της χρήσης αισθητήρων Hall σαν αισθητήρες περιστροφής. Τοποθετώντας μαγνήτες πάνω στον άξονα του αυτοκινήτου δημιουργείται η μαγνητική ροή η οποία ανιχνεύεται από τον αισθητήρα.



Σχήμα 22: Αισθητήρας ταχύτητας τοποθετημένος στον στρόφαλο.

Η λειτουργίες οι οποίες μπορεί να επιτευχθούν από των παραπάνω αισθητήρα είναι:

- Ανίχνευση ταχύτητας δίσκου
- Έλεγχος ταχύτητας
- Έλεγχος χρονισμού του κινητήρα
- Ανίχνευση μηδενικής ταχύτητας
- Ανίχνευση περιστροφικής θέσης
- Μέτρηση ροής

Ακόμα, μαγνητικούς αισθητήρες έχουμε και στη μέτρηση γωνιακής θέσης της πεταλούδας του γκαζιού. Σε αυτήν την εφαρμογή χρησιμοποιούνται αισθητήρες γραμμικής εξόδου.

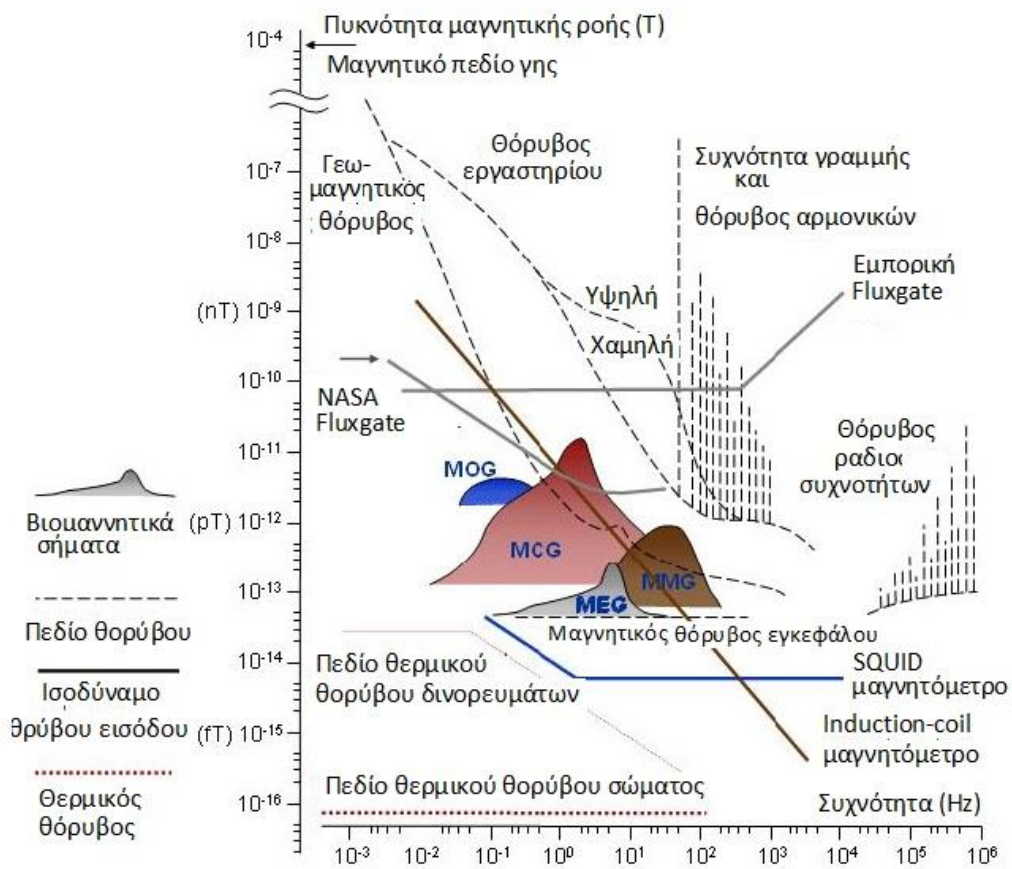
### 3.4 Εφαρμογές στην ιατρική

Όπως έχουμε αναφέρει, τα όργανα του ανθρώπινου σώματος εκπέμπουν ηλεκτρικά σήματα και ως συνέπεια δημιουργούν μαγνητικά πεδία. Αυτά τα ασθενή μαγνητικά πεδία χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική ιατρική με χρήση των μαγνητικών αισθητήρων. Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική απεικόνιση που συσχετίζει την ευαισθησία διαφόρων τύπων αισθητήρων με τα μαγνητικά πεδία των ανθρώπινων οργάνων. Τα όργανα που αναφέρονται στο ανωτέρω σχήμα είναι MCG= Μαγνητο-καρδιογράφημα, MMG = μαγνητο-μυογράφημα, MEG = μαγνητο-εγκεφαλογράφημα, MOG= Μαγνητο-οφθαλμογράφημα [5].

Τα μαγνητικά πεδία που παράγουν τα διάφορα όργανα έχουν μαγνητική ροή της τάξεως των  $10^{-13}$  έως  $10^{-11}$  Tesla, τα οποία είναι πολύ μικρότερα σε ένταση από το μαγνητικό πεδίο της γης, και επομένως αν γίνει προσπάθεια μετρήσεώς τους, αυτό δεν θα είναι δυνατόν. Για αυτόν το λόγο οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε ειδικά

διαμορφωμένους χώρους που καλύπτονται από σιδηρομαγνητικά υλικά και αλουμίνια.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 23 τα μαγνητόμετρα Fluxgate εμπορικού τύπου όπως επίσης και τα μαγνητόμετρα του ίδιου τύπου της NASA δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις των βιομαγνητικών πεδίων. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται οι πολύπλοκοι αισθητήρες SQUID.



Σχήμα 23: Ευαισθησία διάφορων τύπων αισθητήρων και τα μαγνητικά πεδία που μπορούν να δημιουργήσουν τα όργανα του ανθρώπινου σώματος [5].



### 3.5 Ανίχνευση μετάλλων

Μία άλλη εφαρμογή των μαγνητομέτρων είναι η ανίχνευση μετάλλων. Η εφαρμογή σε αυτό το τομέα δεν περιορίζεται μόνο στο να βρεθούν πολύτιμα μέταλλα αλλά και για την ασφάλεια αεροδρομίων, κτηρίων ή και σε μεγάλα γεγονότα όπως ένας αθλητικός αγώνας ή μία συναυλία. Η χρησιμότητά τους όμως είναι μεγάλη και στις αρχαιολογικές ανασκαφές και τις γεωλογικές έρευνες [5].

Ένας τυπικός ανιχνευτής μετάλλων αποτελείται από :

- Σταθεροποιητή, ο οποίος χρησιμοποιείται για να διατηρεί σταθερή τη μονάδα κατά την κίνησή της.
- Κουτί ελέγχου, που περιέχει το κύκλωμα, το ηχείο, μπαταρίες και τον μικροπομπό.
- Άξονας που συνδέει το κουτί ελέγχου και το πηνίο. Συνήθως προσαρμόζεται ώστε να είναι τοποθετημένο σε κατάλληλο, για το ύψος του χρήστη, επίπεδο.
- Πηνίο έρευνας ή αναζήτησης: Πρόκειται για το τμήμα που εντοπίζει το μέταλλο, γνωστό επίσης κι ως κεφαλή αναζήτησης ή κεραία.

Οι ανιχνευτές μετάλλων χρησιμοποιούν μία από τις τρεις τεχνολογίες:

- Χαμηλών συχνοτήτων (VLF)
- Παλμικής επαγωγής (PI)
- Ρυθμικής συχνότητας ταλάντωσης (BFO)



Σχήμα 24: Μηχανισμοί ανίχνευσης μετάλλων [5].

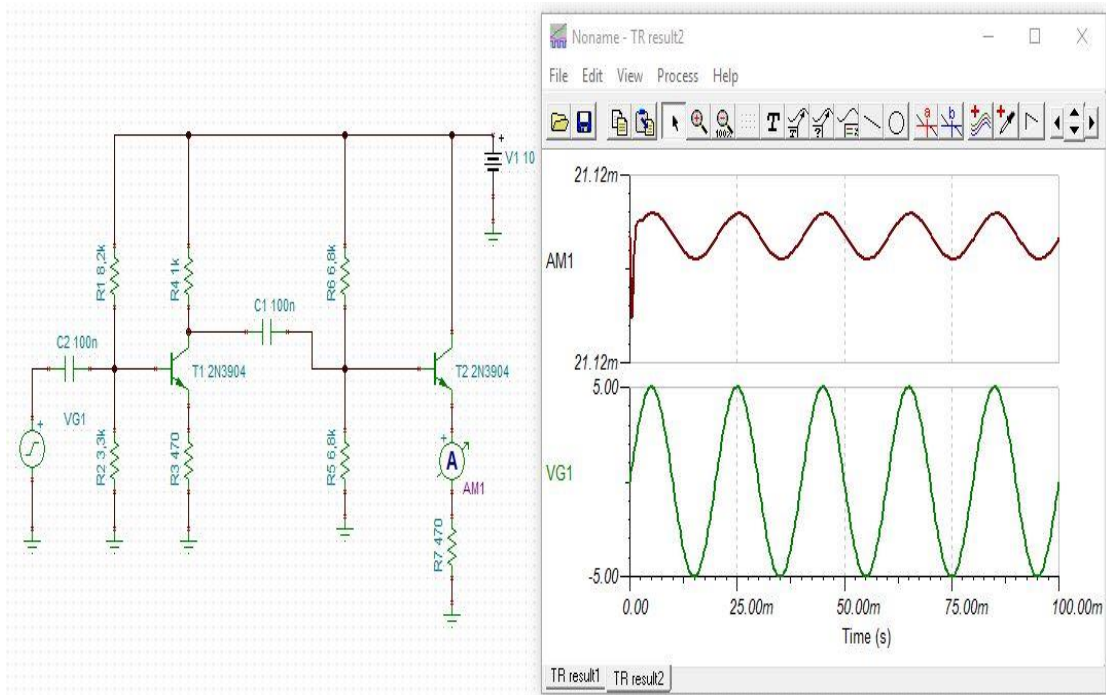
Αυτή η χρήση των αισθητήρων ως ανιχνευτές μετάλλων εφαρμόζετε στις στρατιωτικές εφαρμογές. Αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται για ανίχνευση ναρκών. Αρχικά οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας εντόπιζαν μικρά μαγνητικά πεδία ή ανωμαλίες σε αυτό. Με την πάροδο του χρόνου γεννήθηκε η ανάγκη για πιο ακριβούς αισθητήρες λόγω του ότι η νάρκες αποστελλόντουσαν από λιγότερο σίδηρο και περισσότερο πλαστικό. για τον παραπάνω λόγο χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και μαγνητοεμπέδησης.

## 4 Κατασκευή πλακέτας ενίσχυσης αισθητήρα

Για να λειτουργήσει ομαλά και να έχει επιθυμητή έξοδο ο αισθητήρας χρειάζεται ένα σταθερό στάδιο ενίσχυσης το οποίο θα προσφέρει την επιθυμητή ένταση ρεύματος σε κάθε περίπτωση. Παρακάτω θα ασχοληθούμε με τη διαδικασία την οποία ακολουθήσαμε για να φτάσουμε στο επιθυμητό κύκλωμα για τον ενισχυτή.

### 4.1 Σχεδίαση κυκλώματος ενισχυτή

Για την υλοποίηση του κυκλώματος έγινε αρχικά με τον κλασικό ενισχυτή ρεύματος ο οποίος αποτελείται από τρανζίστορ [15]. Για να σχεδιάσουμε το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Tina-TI.

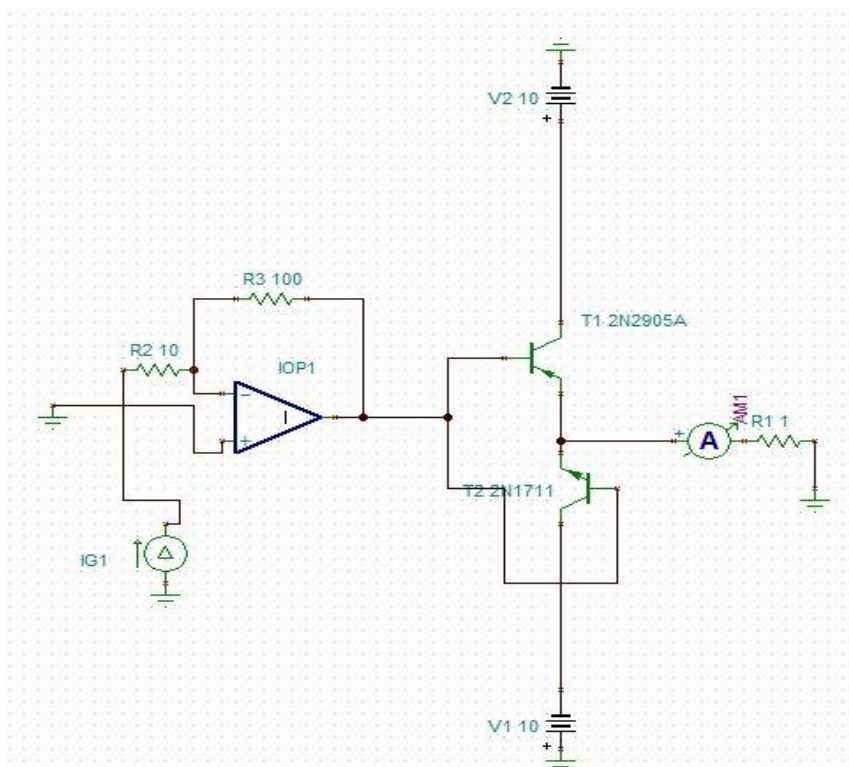


Σχήμα 25: Κύκλωμα ενίσχυσης με τρανζίστορ.

Σε αυτό το σχέδιο, η κυματομορφή του ενισχυμένου σήματος πρέπει να είναι όμοια με το σήμα εισόδου, ώστε να διεγείρεται με τον επιθυμητό τρόπο ο πυρήνας

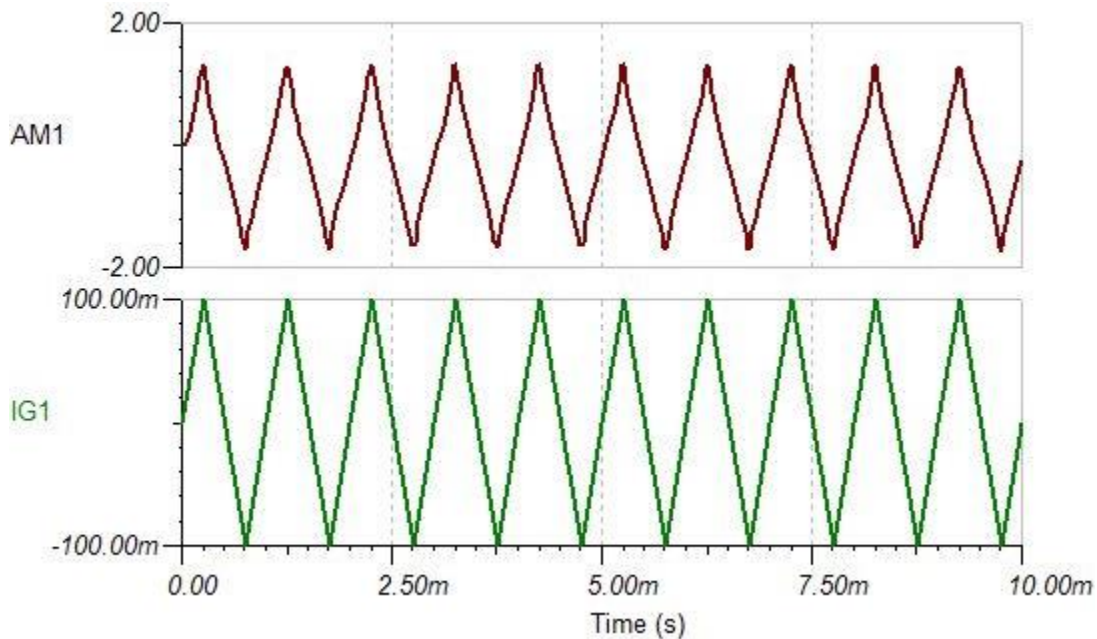
του αισθητήρα, π.χ. για ημιτονοειδή είσοδο, πρέπει και η έξοδος του κυκλώματος να είναι ημιτονοειδής και όχι συνεχής αλλά με μεγαλύτερη ένταση ρεύματος. Βλέποντας το Σχήμα 26 παρατηρούμε ότι η έξοδος (με κόκκινο χρώμα) έχει έναν κυματισμό στα 21,12 mA, αλλά δεν ακολουθεί το σήμα εισόδου (με πράσινο χρώμα).

Για τον παραπάνω λόγο χρησιμοποιήθηκαν τοπολογίες με ενισχυτές ρεύματος class A. Στο επόμενο σχέδιο χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής και τρανζίστορ μαζί σε ένα κύκλωμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



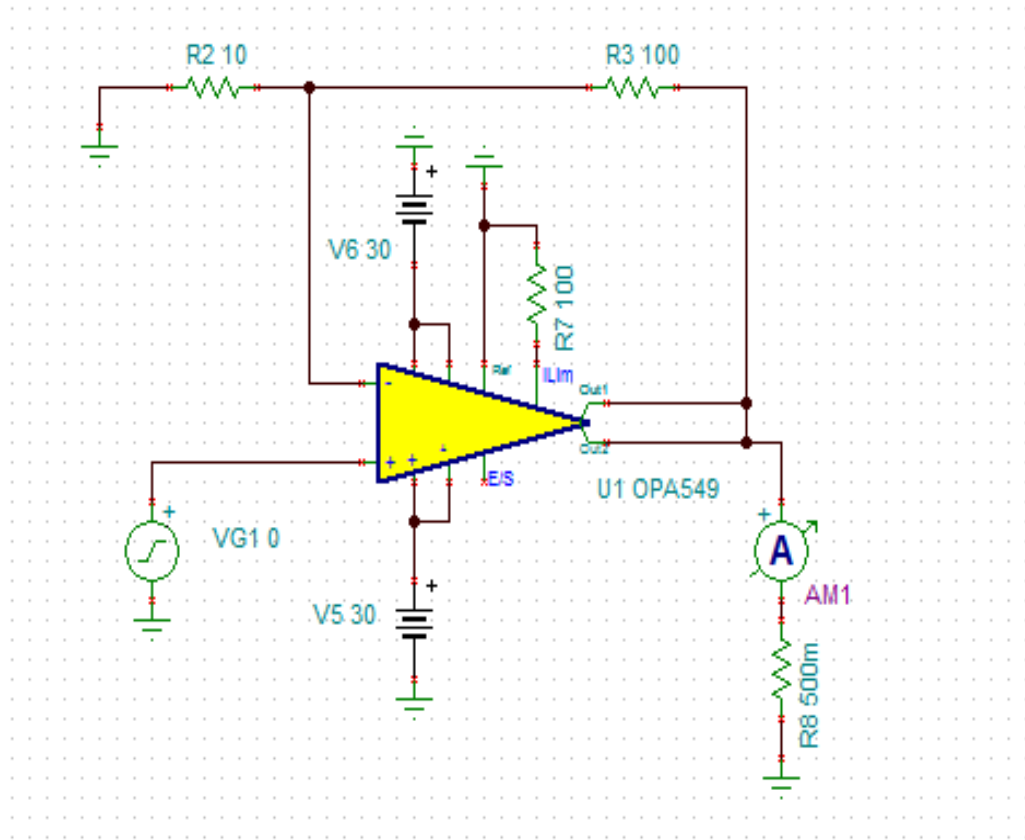
Σχήμα 26: Κύκλωμα ενίσχυσης.

Η έξοδος αυτού του ενισχυτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 26, επιτυγχάνει την επιθυμητή ενίσχυση του σήματος εισόδου και η έξοδος ακολουθεί την είσοδο. Σαν είσοδο χρησιμοποιήσαμε τριγωνικό σήμα με πλάτος 100mA και σαν έξοδο επιτυγχάνετε τριγωνικό σήμα με πλάτος σχεδόν 2A.



Σχήμα 27: Σήματα εισόδου (πράσινο) και εξόδου (κόκκινο) ενισχυτή.

Το πρόβλημα με αυτήν τη διάταξη προκύπτει από τη χρήση ιδανικού ενισχυτή. Βασιζόμενοι στην παραπάνω διάταξη, επιλέχθηκε ενισχυτής ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των ενισχυτών ισχύος (power amplifiers) και να μην απαιτεί επιπρόσθετα τρανζίστορ για ενίσχυση. Για να βρούμε τον κατάλληλο power amplifier ψάξαμε στην ιστοσελίδα της Texas Instruments [16]. Ο ενισχυτής ο οποίος επιλέχθηκε ήταν ο OPA549. Ο OPA549 μπορεί να λειτουργήσει με τάση εισόδου για διπλή τροφοδοσία από  $\pm 4V$  έως  $\pm 30V$ , με ρεύμα εξόδου μέχρι 10A [17]. Ωστόσο, η μακροχρόνια λειτουργία του ενισχυτή με αυτό το ρεύμα εξόδου μειώνει την απόδοσή του. Το υψηλότερο όριο για το ρεύμα εξόδου για συνεχή λειτουργία ενισχυτή έχει οριστεί στα 8A από τον κατασκευαστή. Για να σχεδιαστεί το κύκλωμα του ενισχυτή χρησιμοποιήθηκε το datasheet του ενισχυτή [17]. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα το οποίο σχεδιάσαμε για τον OPA549.



Σχήμα 28: Κύκλωμα ενισχυτή OPA549.

Η επιλογή των αντιστάσεων R2 και R3 έγινε εμπειρικά με σκοπό την επίτευξη καλύτερης απόκρισης και του επιθυμητού κέρδους. Η αντίσταση R7 χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την ένταση εξόδου από 0A έως 10A και για αυτό το λόγο στην συνέχεια την αλλάχθηκε με trimmer. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των επιθυμητών ρευμάτων εξόδου και των τιμών της αντίστασης R7 που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η σχέση μεταξύ  $I_{LIM}$  και αντίστασης  $R_{CL}$  ( αντίσταση R7 στο κύκλωμα μας) είναι [17]:

$$R_{CL} = \frac{75kV}{I_{LIM}} - 7.5k\Omega \quad 3.1$$

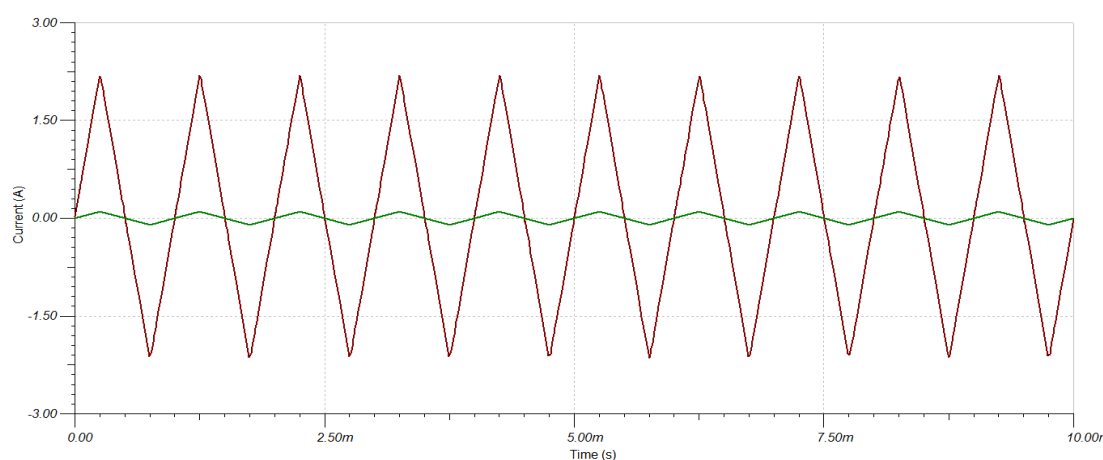
Πίνακας 3.1: Τιμές ρεύματος εξόδου και η αντίστοιχη τιμή αντίστασης  $R_{CL}$ .

Επιθυμητό ρεύμα εξόδου	Αντίσταση $R_{CL}$
0A	$I_{LIM}$ ανοιχτό
2.5A	22.6kΩ
3A	17.4kΩ
4A	11.3kΩ
5A	7.5kΩ
6A	4.99kΩ
7A	3.24kΩ
8A	1.87kΩ
9A	845Ω
10A	$I_{LIM}$ συνδέεται με $R_{ef}$

Η εξίσωση του ρεύματος εξόδου για την παραπάνω μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία του ενισχυτή είναι:

$$I_o = I_{in} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \quad 3.2$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυματομορφές των σημάτων εισόδου και εξόδου για το κύκλωμα του ενισχυτή OPA549:

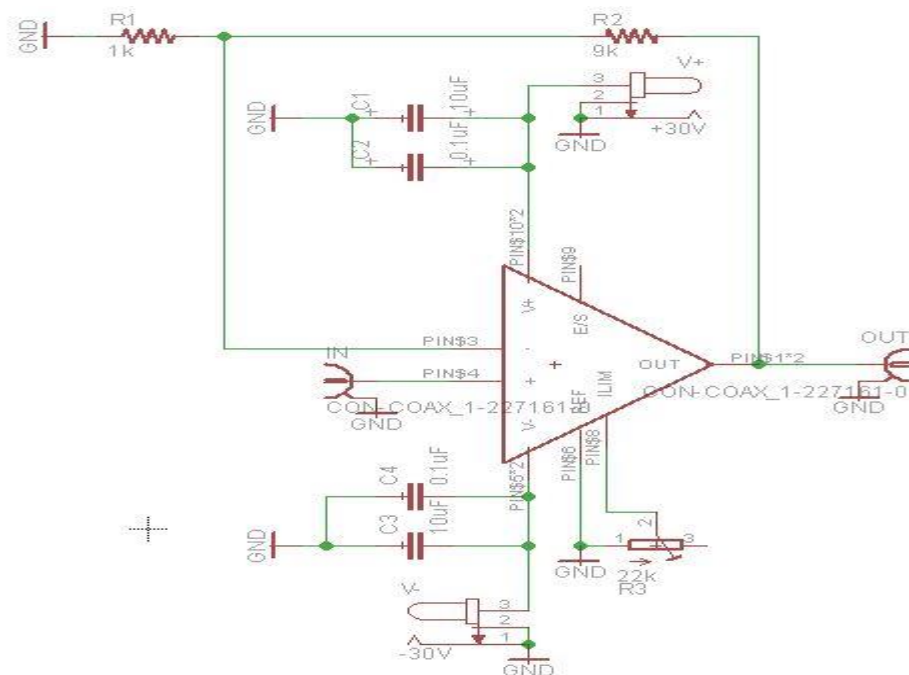


Σχήμα 29: Σήματα εισόδου (πράσινο) και εξόδου (κόκκινο) κυκλώματος.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 29, βάζοντας σαν σήμα εισόδου τριγωνική κυματομορφή πλάτους 100mA, συχνότητας 1kHz (πράσινη κυματομορφή) επιτυγχάνεται τριγωνική έξοδος πλάτους 2.25A και συχνότητας 1kHz (κόκκινη κυματομορφή). Συνεπώς, η προϋπόθεση ώστε το σήμα εξόδου να ακολουθεί το σήμα εισόδου, ώστε να διεγείρεται με τον επιθυμητό τρόπο ο μαγνητικός πυρήνας του μαγνητομέτρου, επιτυγχάνεται με αυτήν τη διάταξη.

## 4.2 Υλοποίηση πλακέτας

Το επόμενο βήμα μετά την σχεδίαση του κυκλώματος είναι η μεταφορά του σε ηλεκτρονική πλακέτα. Συνεπώς, ξανασχεδιάστηκε το κύκλωμα με σκοπό να προστεθούν μερικά στοιχεία ακόμα τα οποία τα προτείνει ο κατασκευαστής του OPA549, ώστε να λειτουργεί ομαλά ο ενισχυτής [17]. Για να ξανασχεδιαστεί το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Cadsoft Eagle. Στο Σχήμα 30 παρουσιάζεται το τελικό κύκλωμα.



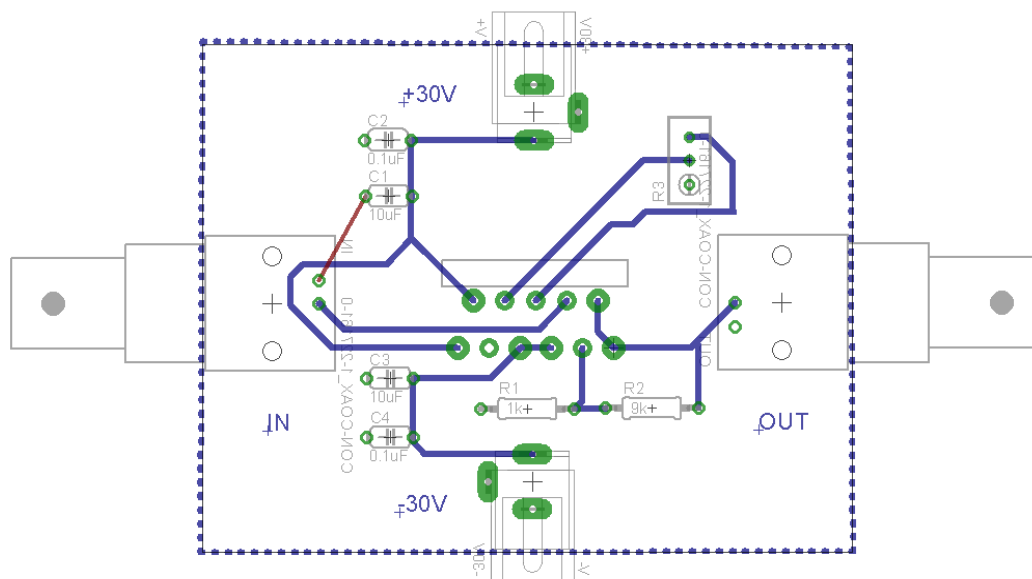
Σχήμα 30: Τελικό κύκλωμα ενισχυτή.



Τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο παραπάνω κύκλωμα εκτός από τις αντιστάσεις είναι:

- πυκνωτές τανταλίου 10 $\mu$ F, μέγιστης τάσης 25V
- κεραμικοί πυκνωτές 0,1 $\mu$ F
- Τρίμερ 22k $\Omega$
- Είσοδοι θετικής και αρνητικής DC τροφοδοσίας (DC power jacks)
- Είσοδος και έξοδος AC σήματος (BNC connectors)

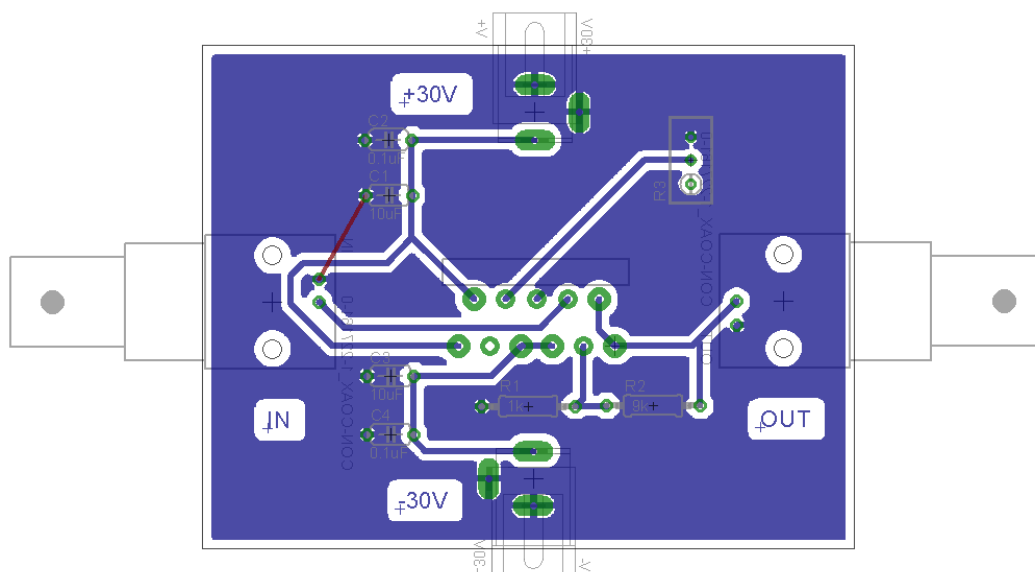
Με τη χρήση του Eagle, σχεδιαστικέ το κύκλωμα σε έτοιμο σχέδιο για να τυπωθεί σε πλακέτα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το σχέδιο πλακέτας.



Σχήμα 31: Σχέδιο πλακέτας

Οι μωβ γραμμές στο σχέδιο αποτελούν τους αγωγικούς δρόμους με τους οποίους συνδέονται τα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος. Με πράσινους κύκλους αναπαρίστανται οι οπές που πρέπει να ανοιχθούν στην πλακέτα, ώστε να τοποθετήσουμε τα διάφορα στοιχεία. Η γραμμή κόκκινου χρώματος αντιστοιχεί σε έναν αγωγικό δρόμο ο οποίος βρίσκεται στην άλλη πλευρά της πλακέτας. Τέλος, οι οπές που δεν συνδέονται με αγωγικούς δρόμους, συνδέονται μέσω μεταξύ τους

μέσω της αγώγιμης επιφάνειας της πλακέτας, με την κοινή γείωση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το σχέδιο έτοιμο προς εκτύπωση.



Σχήμα 32: Σχέδιο έτοιμο για εκτύπωση

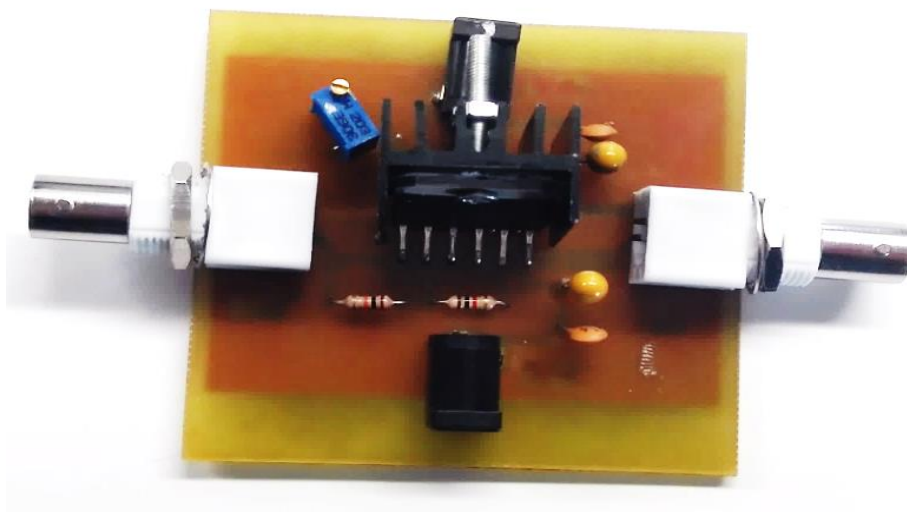
Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη επιφάνεια έχει γεμίσει με μωβ χρώμα. Σε αυτό το στάδιο αυτή η επιφάνεια παριστάνει το επίπεδο της γείωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι αγώγιμοι δρόμοι οι οποίοι συνδέουν τα στοιχεία μεταξύ τους έχουν διαχωριστεί από την υπόλοιπη επιφάνεια, έτσι ώστε να μην συνδέονται με τη γείωση. Το πάχος των αγώγιμων δρόμων επιλέχθηκε στα 0,61mm και το πάχος των διαχωριστικών στα 0,30 mm.

Για να τυπώσουμε το κύκλωμα πάνω στην πλακέτα εκτυπώσαμε το παραπάνω σχέδιο σε διαφάνεια. Στην συνέχεια, το κολλήθηκε πάνω στη φωτοευαίσθητη πλακέτα η οποία και τοποθετήθηκε σε συσκευή έκθεσης υπεριώδους ακτινοβολίας (UV exposure unit) για περίπου τρία λεπτά. Για την εμφάνιση της πλακέτας, χρησιμοποιήθηκε developer (υδροξείδιο του νατρίου- NaOH). Σε αυτό το στάδιο η πλακέτα πρέπει να καλύπτεται από το υγρό και να παραμείνει σε αυτό μέχρι την εμφάνιση του σχεδίου του κυκλώματος σε αυτήν.

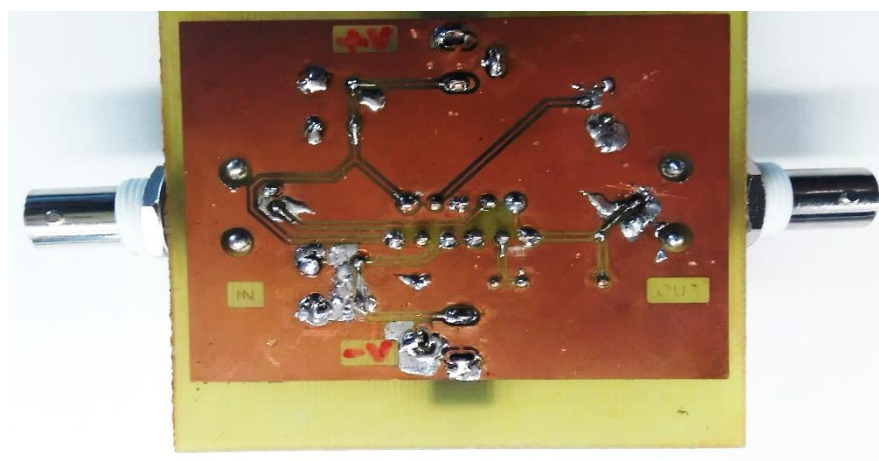
Όταν εμφανίστηκε το κύκλωμα, τοποθετήθηκε η πλακέτα σε τριχλωριούχο σίδηρο – FeCl<sub>3</sub> για αποχάλκωση. Και σε αυτό το στάδιο ακολουθείται η ίδια

διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε με το developer. Μετά από μία ώρα περίπου, η πλακέτα πρέπει να είναι έτοιμη για το επόμενο στάδιο.

Έπειτα από την εμφάνιση των αγώγιμων δρόμων η πλακέτα ελέγχθηκε για τυχόν βραχυκυκλώματα με τη χρήση ψηφιακού πολυμέτρου. Στην συνέχεια, ανοίχθηκαν οι οπές με ειδικό τρυπάνι για να τοποθετηθούν τα στοιχεία. Μετά την τοποθέτηση και την συγκόλληση των στοιχείων πάνω στην πλακέτα με καλάνι, η πλακέτα ελέγχθηκε πάλι για τυχόν βραχυκύκλωμα και για την ορθότητα των συγκολλήσεων. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η πλακέτα στο τέλος της παραπάνω διαδικασίας.

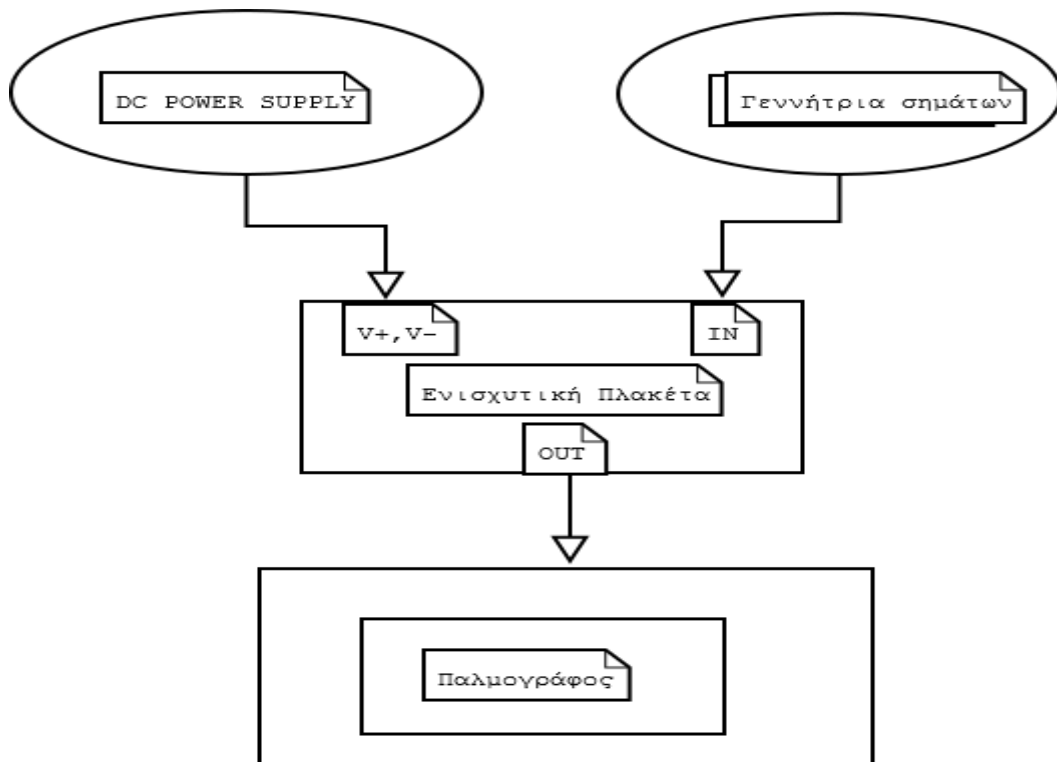


Σχήμα 33: Πλακέτα μαζί με τα στοιχεία του κυκλώματος.

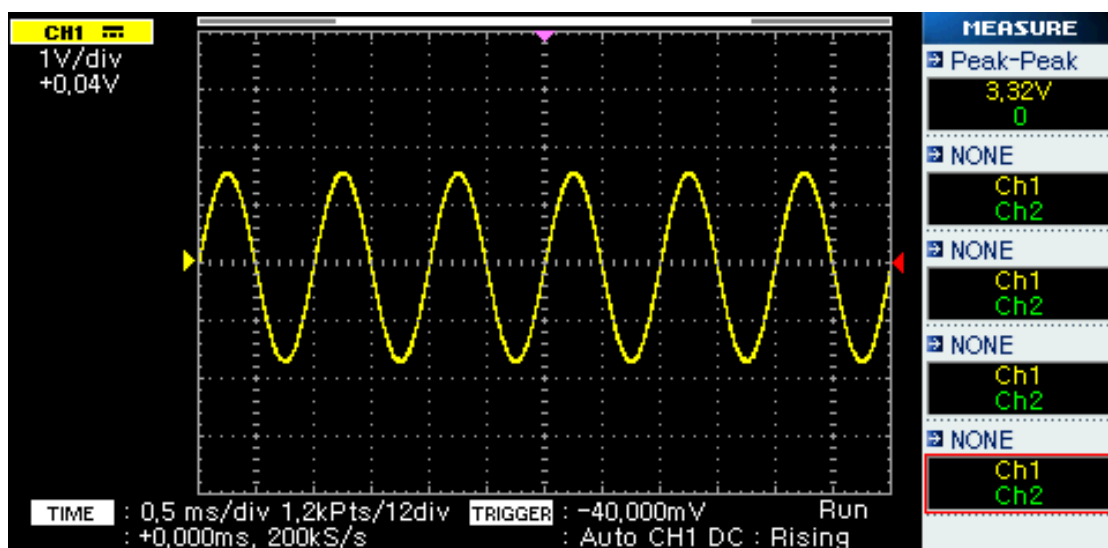


Σχήμα 34: Πίσω όψη πλακέτας.

Το τελευταία στάδιο της υλοποίησης της πλακέτας είναι ο έλεγχος για την σωστή λειτουργία του ενισχυτικού σταδίου. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιώντας το παρακάτω μπλοκ διάγραμμα καταγράψαμε την έξοδό της. Σαν είσοδο χρησιμοποιήσαμε ημιτονοειδές σήμα πλάτους 150 mV και συχνότητας 1kHz.



Σχήμα 35: Μπλοκ διάγραμμα σύνδεσης.



Σχήμα 36: Έξοδος ενισχυτή.

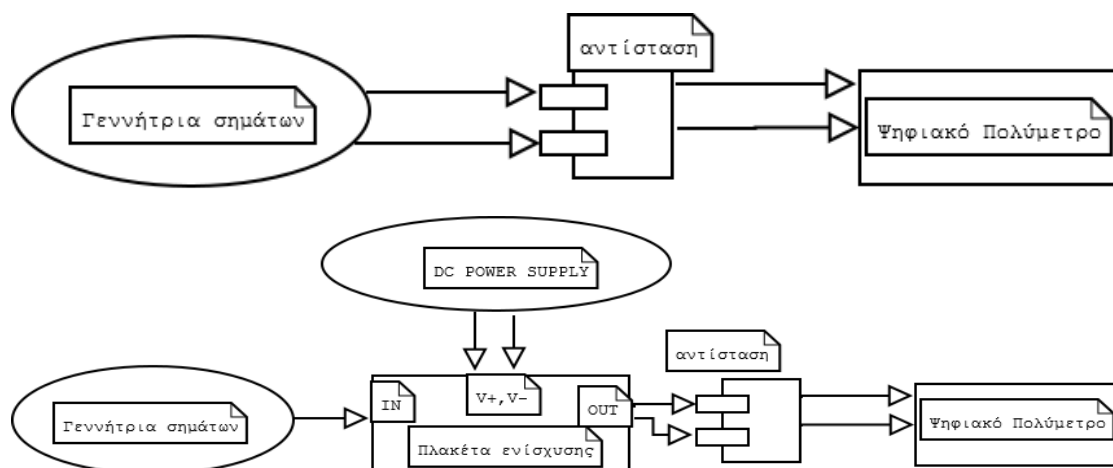
Όπως παρατηρείτε, διατηρείται η ημιτονοειδής μορφή του σήματος εξόδου. Η συχνότητα του σήματος εξόδου είναι 1kHz και το πλάτος 1,66V. Συνεπώς, επιτυγχάνεται η προϋπόθεση την οποία θέσαμε για την έξοδο να ακολουθεί το σήμα εισόδου, με σκοπό να διεγείρει κατάλληλα τον πυρήνα του αισθητήρα. Επίσης, το κέρδος ενίσχυσης είναι:

$$A = \frac{OUTPUT}{INPUT} = \frac{1,66V}{0,15V} = 11,06 \quad 3.3$$

Άρα η πλακέτα που φτιάξαμε λειτουργεί με σωστό τρόπο και επιτυγχάνει ικανή ενίσχυση τάσης. Ακόμα, για να δούμε πόση είναι η ενίσχυση ρεύματος, συνδέθηκε η γεννήτρια με μία αντίσταση 10Ω, 5W και την αντίστασή με ένα ψηφιακό πολύμετρο. Το σήμα πού βάλαμε ήταν το μέγιστο στα 10V<sub>pp</sub> και η ένδειξη του πολυμέτρου ήταν 106,1mA. Από την άλλη, παρεμβλήθηκε μεταξύ γεννήτριας και αντίστασης η πλακέτα, με τροφοδοσία 20VDC και η έξοδος αυτήν τη φορά ήταν 1,6A. Άρα το κέρδος ενίσχυσης ρεύματος είναι:

$$I = \frac{OUTPUT}{INPUT} = \frac{1,6A}{106,1mA} = 15,1 \quad 3.4$$

Παρακάτω προστίθενται τα διαγράμματα μπλοκ των παραπάνω μετρήσεων.



Σχήμα 37: Μπλοκ διάγραμμα των μετρήσεων κέρδους.

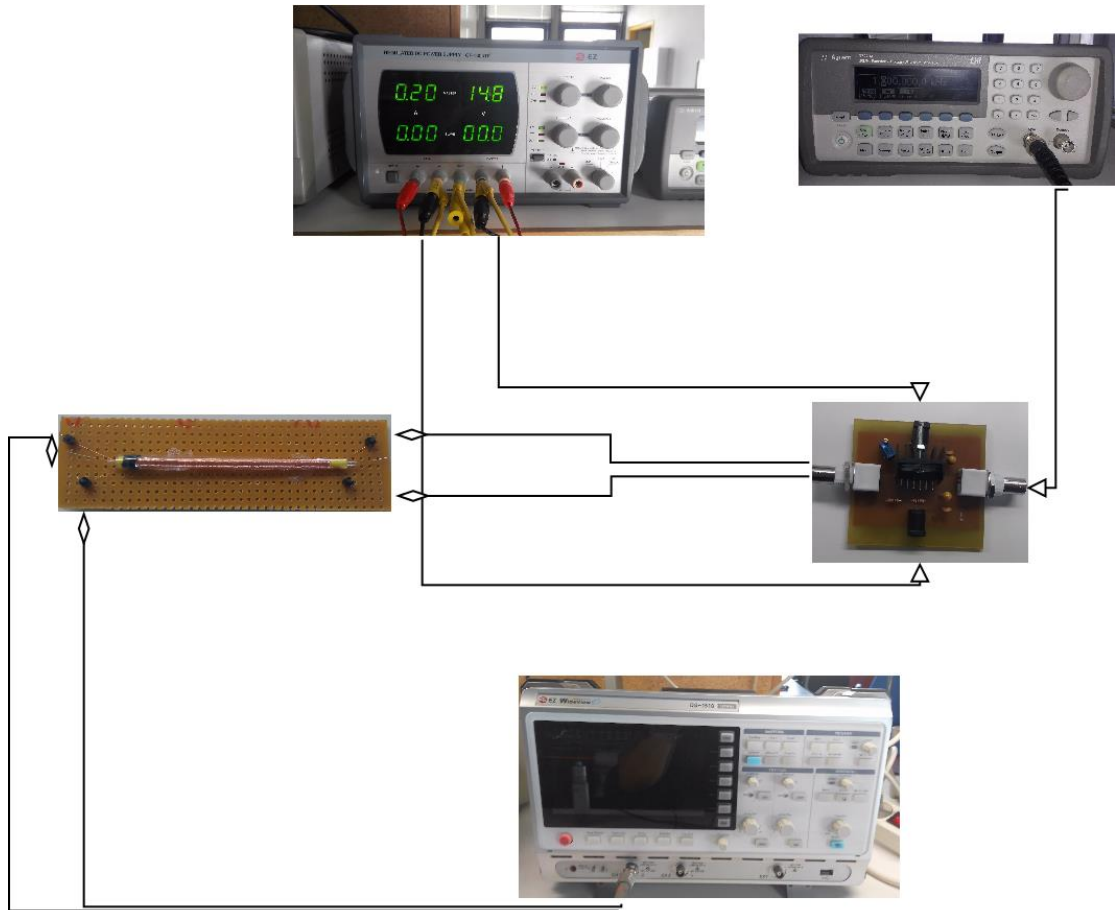


## 5 Μετρήσεις σε αισθητήρα Fluxgate

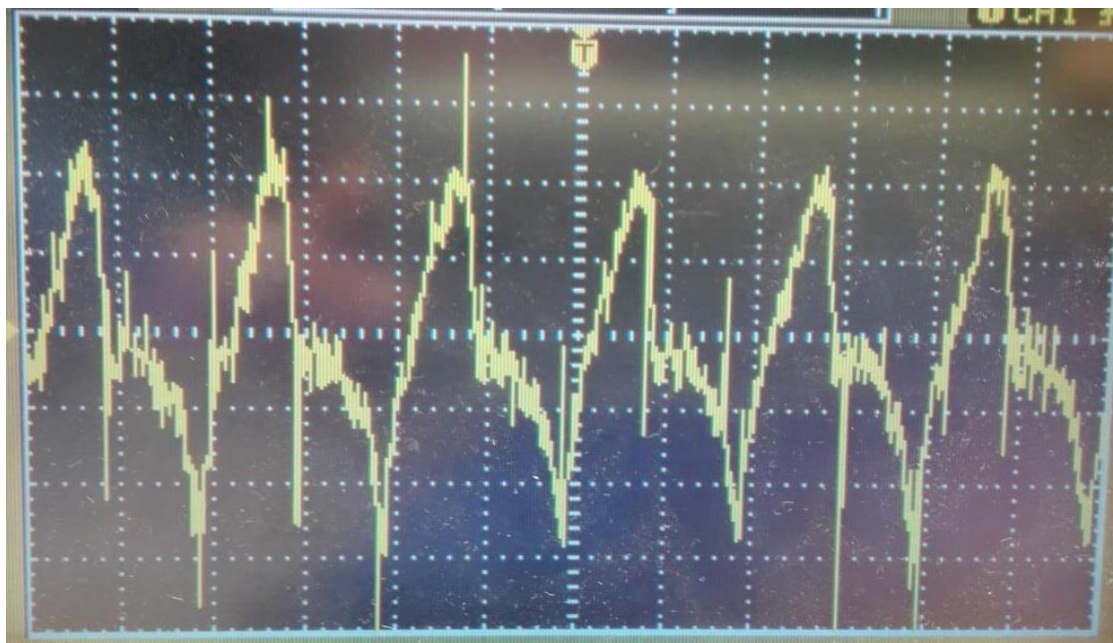
Μετά την κατασκευή και τον έλεγχο της πλακέτας, προχωρήσαμε στην εύρεση αισθητήρα Fluxgate για την εφαρμογή μας. Αρχικά, επιλέχθηκε η διάταξη orthogonal Fluxgate. Για την επιλογή του μεγέθους του αισθητήρα η οποίο θα χρησιμοποιηθεί, δοκιμάστηκαν αισθητήρες με μήκος πηνίων 1 cm, 2cm και 3cm αντίστοιχα. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω συσκευές:

- Γεννήτρια σημάτων Agilent 33220A
- DC Power Supply GP-1305TP
- Παλμογράφο EZ DS-1510 100MHz

Χρησιμοποιώντας το παρακάτω μπλοκ διάγραμμα για τις μετρήσεις μας, πήραμε τις κυματομορφές οι οποίες παρουσιάζονται στα σχήματα 39 έως 41. Αρχικά, συνδέθηκαν οι εισοδοί V+ και V- της πλακέτας με το DC Power Supply στα +15V και -15 V. Η είσοδος IN της πλακέτας συνδέθηκε με τη γεννήτρια σημάτων. Το σήμα το οποίο εφαρμόστηκε ήταν ημιτονική κυματομορφή πλάτους 150mV και συχνότητας 1kHz. Αυτό το σήμα εισόδου επιλέχθηκε μετά από πειραματικές μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Η έξοδος της πλακέτας συνδέθηκε με ένα άμορφο σύρμα CoFeSiB, που βρισκόταν στο εσωτερικό ενός πηνίου λήψης. Τέλος, το πηνίο λήψης συνδέθηκε με τον παλμογράφο ώστε να καταγράφουν τα αποτελέσματά μας.



Σχήμα 38: Μπλοκ διάγραμμα των μετρήσεων με orthogonal Fluxgate αισθητήρα.



Σχήμα 39: Σήμα εξόδου αισθητήρα με πηνίο 1cm.





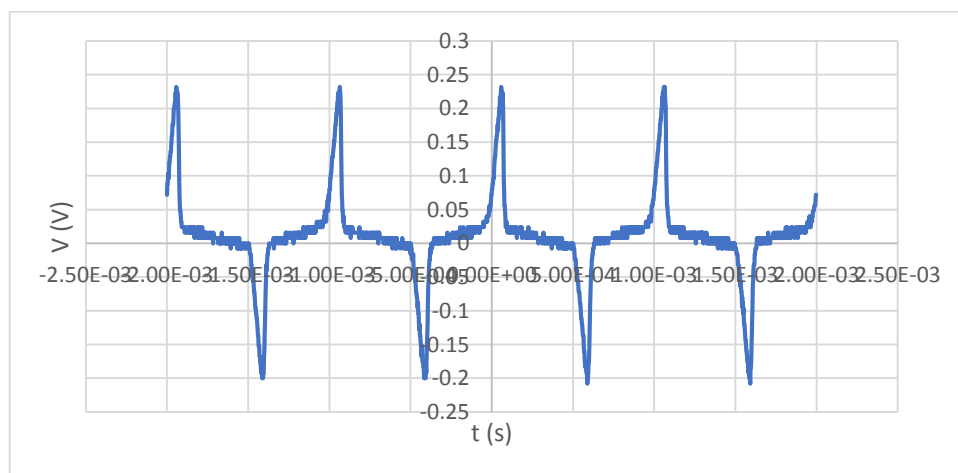
Σχήμα 40: Σήμα εξόδου αισθητήρα με πηνίο 2cm.



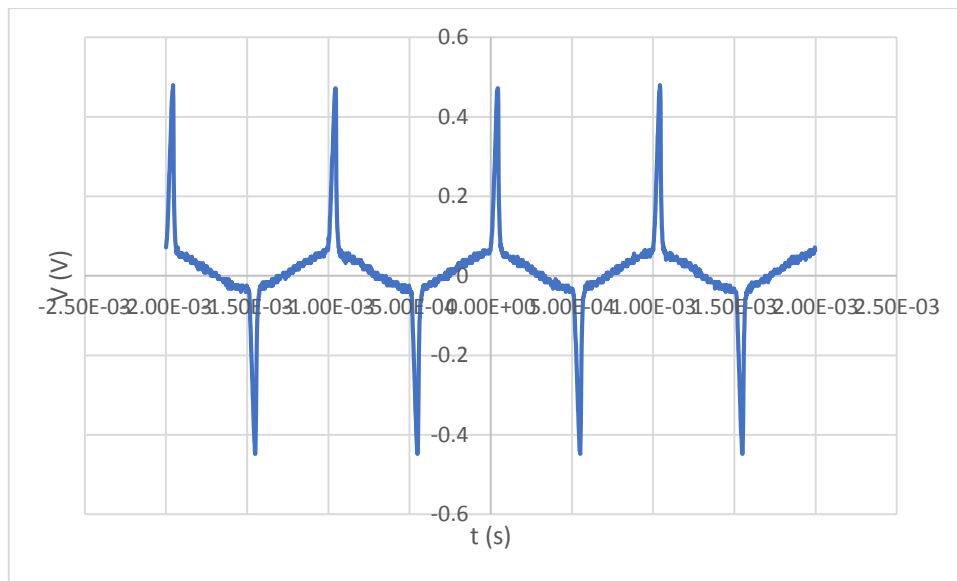
Σχήμα 41: Σήμα εξόδου αισθητήρα με πηνίο 3cm.

Παρατηρώντας τις διάφορες εξόδους που καταγράφηκαν, καταλήξαμε στο ότι καταλληλότερος orthogonal αισθητήρας είναι αυτός με πηνίο 3cm. Από το Σχήμα 41 παρατηρείτε ότι ο πυρήνας CoFeSiB δεν φτάνει στον κορεσμό με ομοιόμορφο τρόπο, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται κατάλληλη έξοδο. Ένας από τους λόγους για τους οποίους ο πυρήνας δεν φτάνει στον κορεσμό έχει να κάνει με την ευαισθησία του πυρήνα. Για να αυξηθεί η ευαισθησία του άμορφου σύρματος CoFeSiB διεγέρθηκε με συνεχές ρεύμα με ταυτόχρονη άσκηση εφελκυστικής τάσης. Όμως, λόγω της φύσης και της πολύ μικρής διαμέτρου του σύρματος (101 $\mu$ m) δεν επετεύχθη το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς το σύρμα κοβόταν λόγω της θέρμανσής του σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

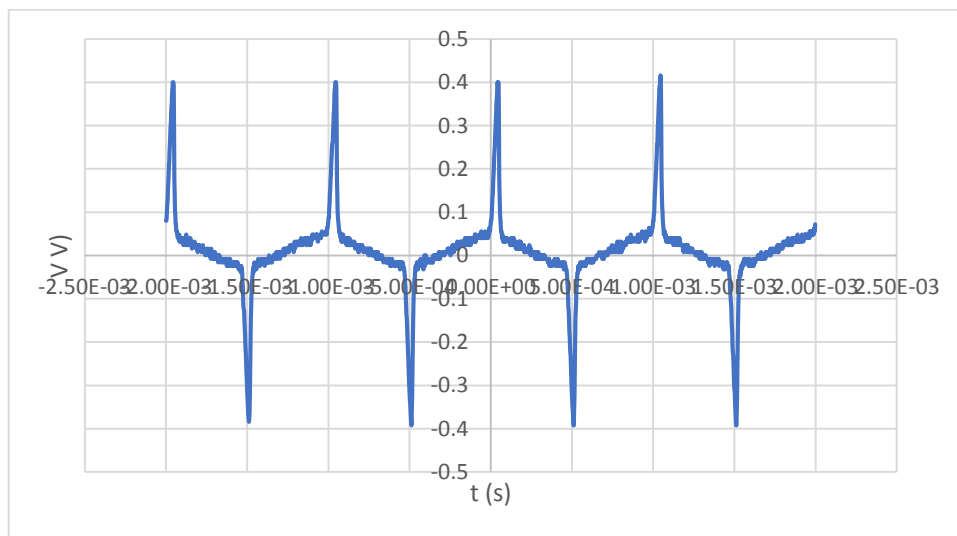
Για τον παραπάνω λόγο, χρησιμοποιήθηκε η απλή τοπολογία του Fluxgate αισθητήρα. Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο τυλίγματα των 1100 σπειρών. Τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα το ένα πάνω από το άλλο και διαμορφώνουν με αυτόν τον τρόπο το πηνίο λήψης και το πηνίο διέγερσης. Το σύρμα που χρησιμοποιήθηκε για το πηνίο είναι χάλκινο με μόνωση εμαγιέ διαμέτρου 0,1mm. Το συνολικό μήκος του αισθητήρα είναι 7cm. Σαν πυρήνα, χρησιμοποιήθηκε άμορφο σύρμα CoFeSiB διαμέτρου 101 $\mu$ m. Χρησιμοποιώντας το μπλοκ διάγραμμα του Σχήματος 38, αλλά συνδέοντας πλέον την έξοδο της πλακέτας ενίσχυσης με το πηνίο διέγερσης του αισθητήρα και εφαρμόζοντας διάφορα πλάτη σήματος εισόδου, καταγράφηκαν τα παρακάτω σήματα εξόδου.



Σχήμα 42: Σήμα εξόδου αισθητήρα με ημιτονοειδή είσοδο πλάτους 50mV και συχνότητας 1kHz.



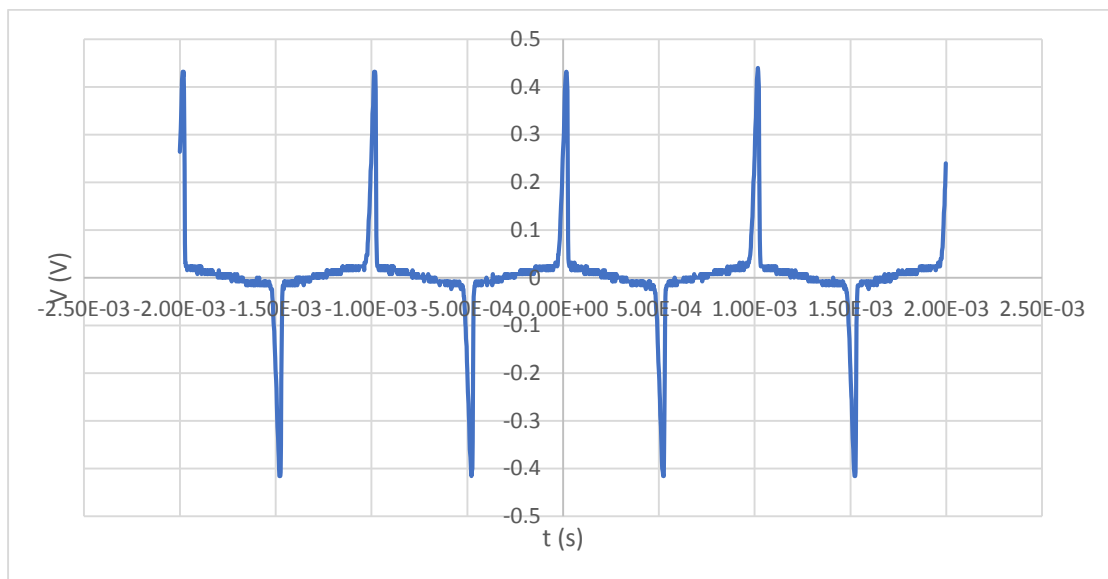
Σχήμα 43: Σήμα εξόδου αισθητήρα με ημιτονοειδή είσοδο πλάτους 150mV και συχνότητας 1kHz .



Σχήμα 44: Σήμα εξόδου αισθητήρα με ημιτονοειδή είσοδο πλάτους 200mV και συχνότητας 1kHz.

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρείτε ότι τα σήματα εξόδου είναι αυτά που περιμέναμε. Οι αποστάσεις μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων είναι ίδιες. Επίσης, από την έξοδο καταλαβαίνουμε ότι ο πυρήνας διεγείρεται με κατάλληλο τρόπο. Συγκρίνοντας τα σήματα εξόδου στα Σχήματα 42 έως 44 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το καταλληλότερο πλάτος για το σήμα εισόδου είναι τα 150 mV. Η

αντίστοιχη τάση η οποία πρέπει να εφαρμοστεί στον αισθητήρα χωρίς τη χρήση της πλακέτας ενίσχυσης είναι στα 2.5V, όπως φαίνεται στο σχήμα 45.



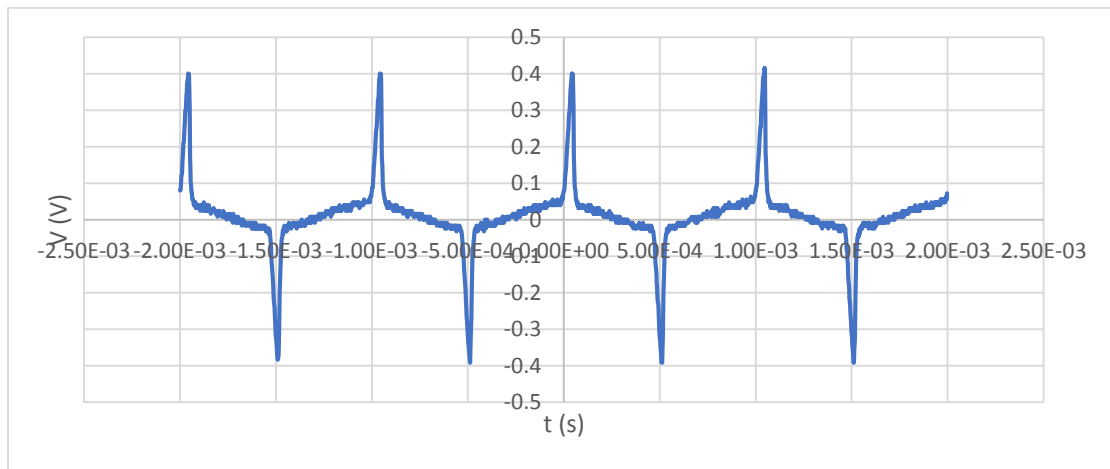
Σχήμα 45: Σήμα εξόδου αισθητήρα χωρίς την ενίσχυση.

Ακόμα, χρησιμοποιώντας την πλακέτα ενίσχυσης, η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής του σήματος εξόδου (jittering) είναι 16μs, ενώ χωρίς την πλακέτα η μέγιστη μετατόπιση της κορυφής είναι 30μs. Άρα, η πλακέτα ενίσχυσης διορθώνει τη μετατόπιση του σήματος εξόδου. Για να ελεγχθεί εάν η πλακέτα μπορεί να ανταποκριθεί σε διάφορες περιπτώσεις και εάν ο αισθητήρας που επιλέχθηκε είναι ο κατάλληλος, προχωρήσαμε σε μερικές εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες.

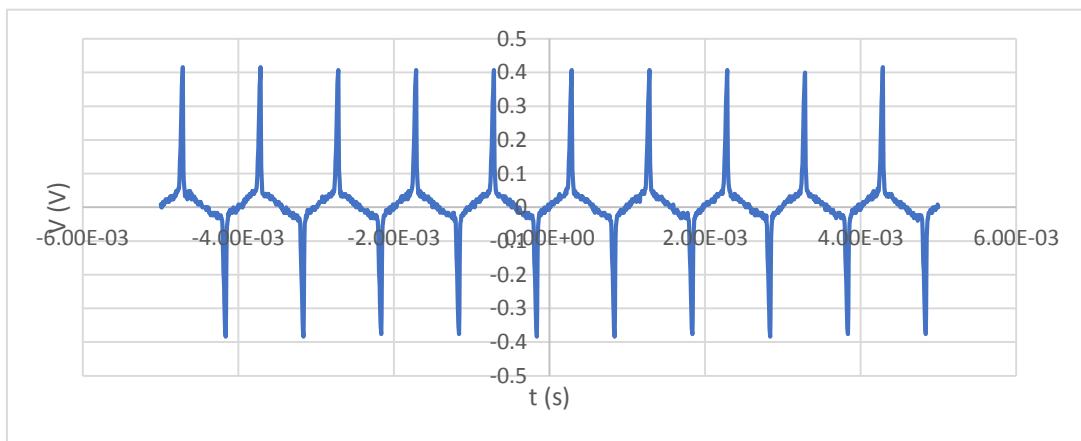
## 5.1 Μετρήσεις με τη βοήθεια DC πεδίου.

Για τις παρακάτω μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε το μπλοκ διάγραμμα του Σχήματος 38 και αλλάζοντας το offset στη γεννήτρια σημάτων, πήραμε διάφορες μετρήσεις για την έξοδο του ενισχυτή. Παρακάτω, παρατίθενται οι δύο ομάδες

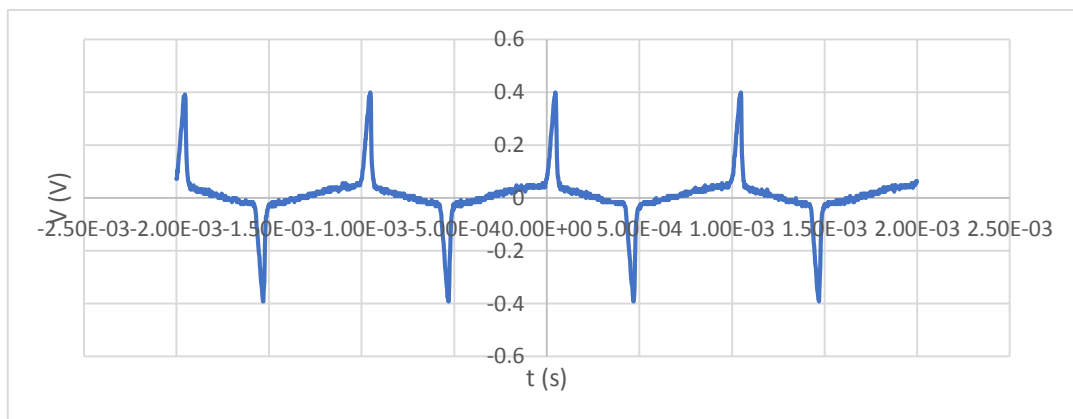
μετρήσεων, η πρώτη με θετικό DC πεδίο και η δεύτερη με αρνητικό DC πεδίο. Το σήμα εισόδου είναι ημιτονικής κυματομορφής πλάτους 150mV και συχνότητας 1kHz.



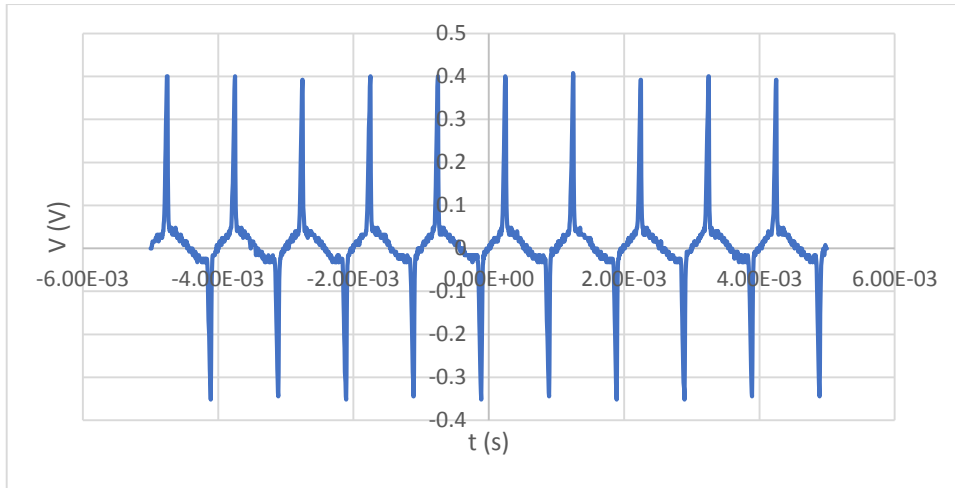
Σχήμα 46: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 10mV DC offset.



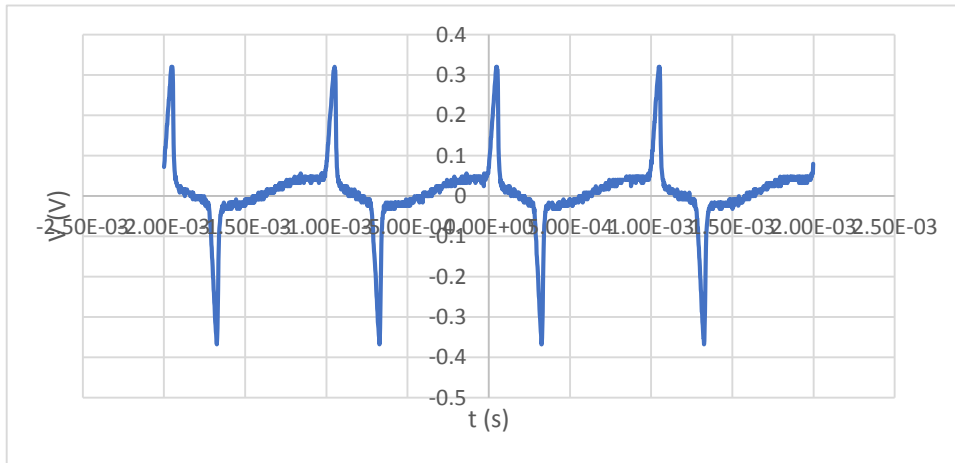
Σχήμα 47: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -10mV DC offset.



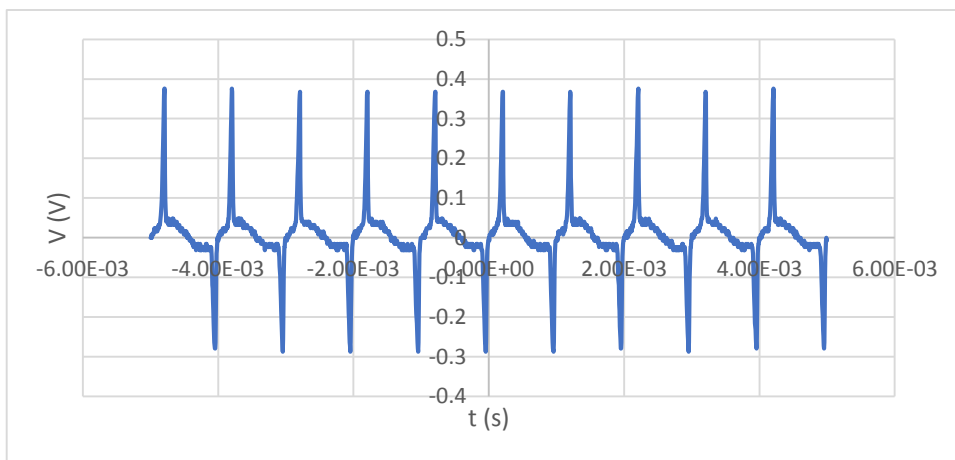
Σχήμα 48: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 30mV DC offset.



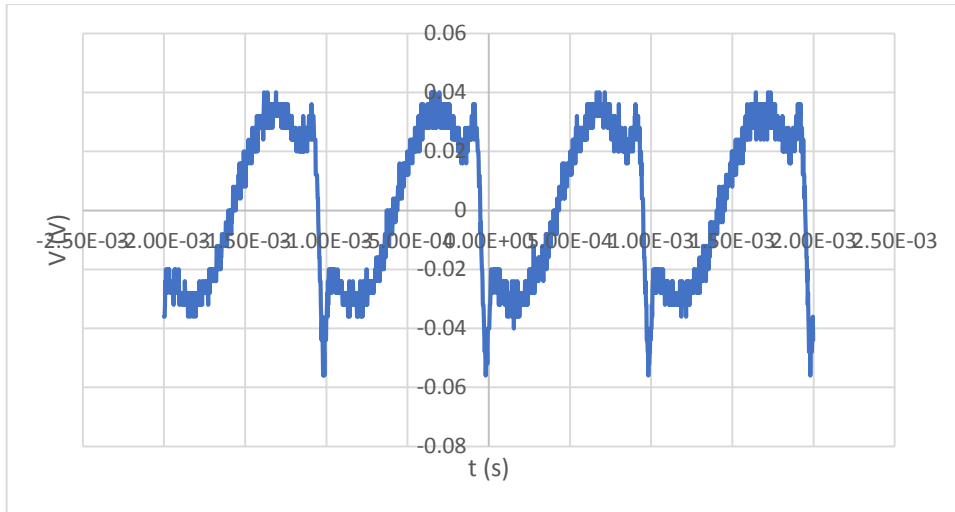
Σχήμα 49: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -30mV DC offset.



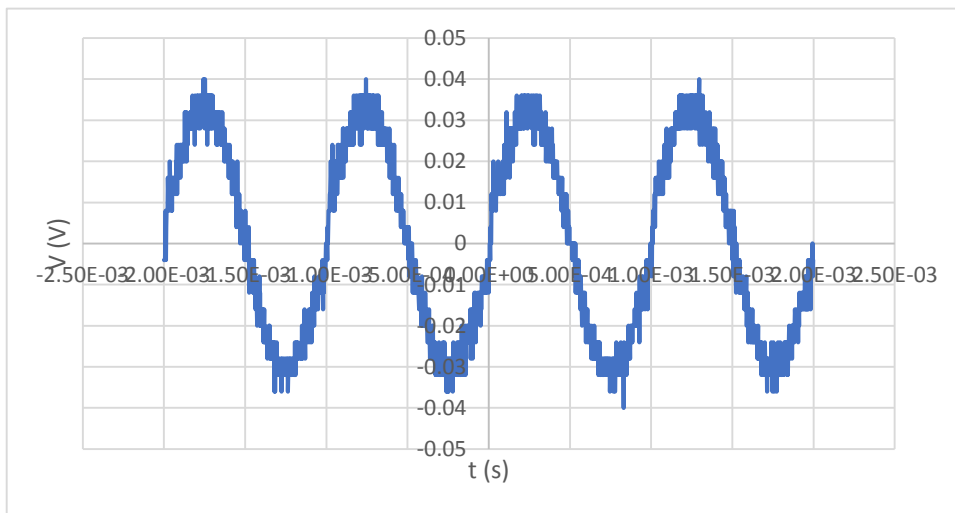
Σχήμα 50: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 50mV DC offset.



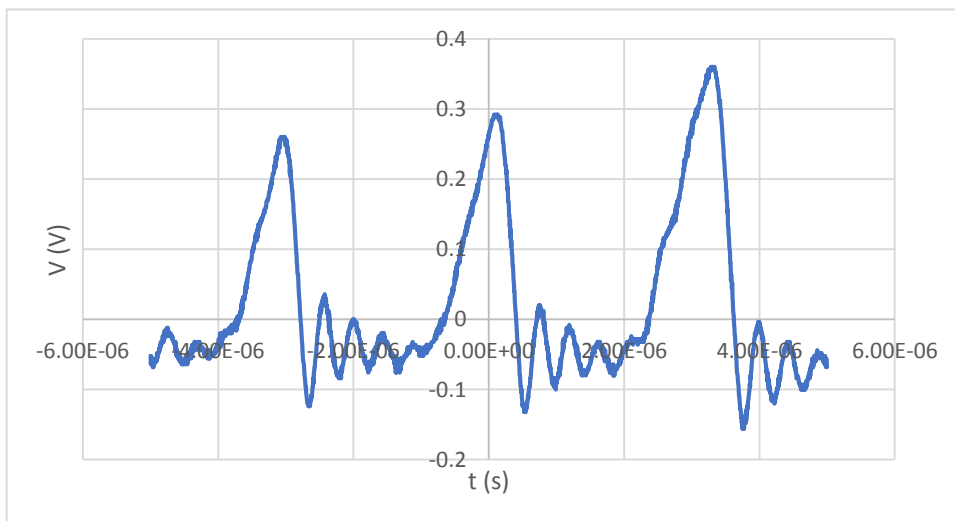
Σχήμα 51: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -50mV DC offset.



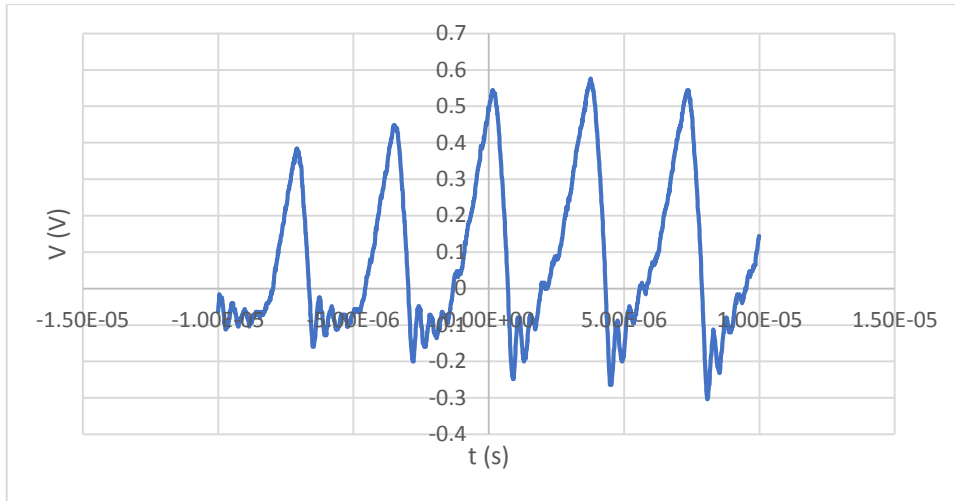
Σχήμα 52: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 77mV DC offset.



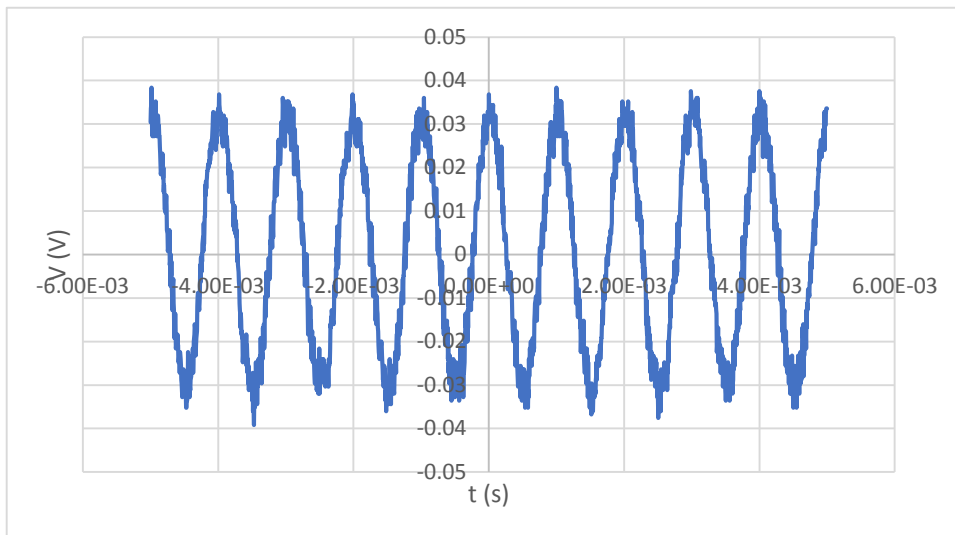
Σχήμα 53: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -74mV DC offset.



Σχήμα 54: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 80mV DC offset.



Σχήμα 55: Σήμα εξόδου αισθητήρα με 100mV DC offset.



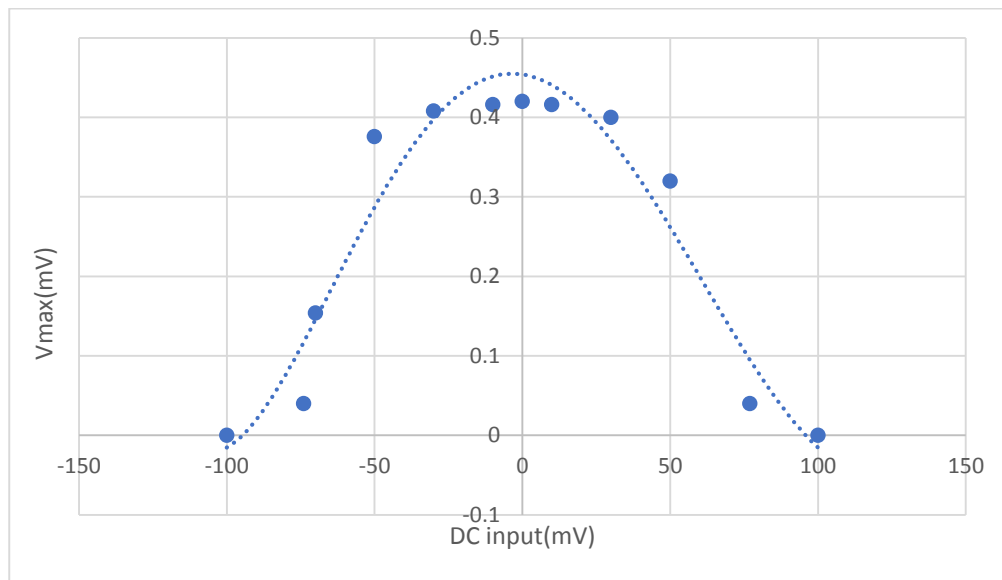
Σχήμα 56: Σήμα εξόδου αισθητήρα με -100mV DC offset.

Όπως παρατηρείτε από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, η απόκριση του Fluxgate είναι σχεδόν ίδια στις ίδιες αρνητικές και θετικές τιμές του DC πεδίου. Στα 77mV και -74mV παρατηρείτε ότι το σήμα εξόδου γίνεται πλέον ημιτονοειδές. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές των μεγίστων πλατών των σημάτων εξόδου συναρτήσει του DC πεδίου.



Πίνακας 4.1: Μέγιστο πλάτος εξόδου συναρτήσει DC πεδίου.

DC Offset (mV)	max Vout (V)
-100	0
-74	0.04
-70	0.154
-50	0.376
-30	0.408
-10	0.416
0	0.42
10	0.416
30	0.4
50	0.32
77	0.04
100	0

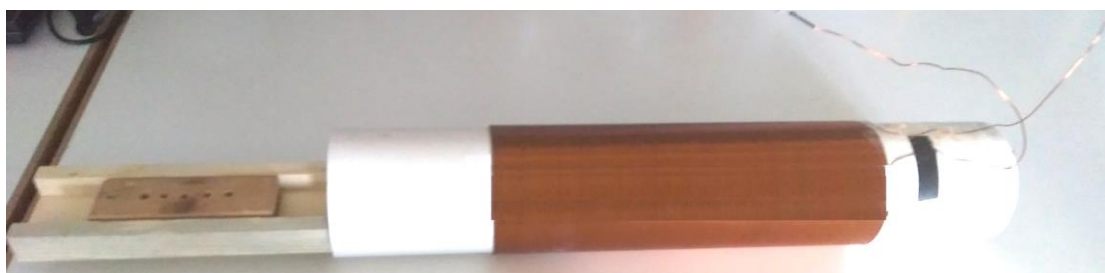


Σχήμα 57: Μέγιστο πλάτος εξόδου συναρτήσει DC offset εισόδου.

Βάσει του Σχήματος 57 παρατηρείτε ότι ο αισθητήρας έχει την ίδια συμπεριφορά και στις δύο ομάδες μετρήσεων. Τυχόν αποκλίσεις οφείλονται σε διάφορα σφάλματα.

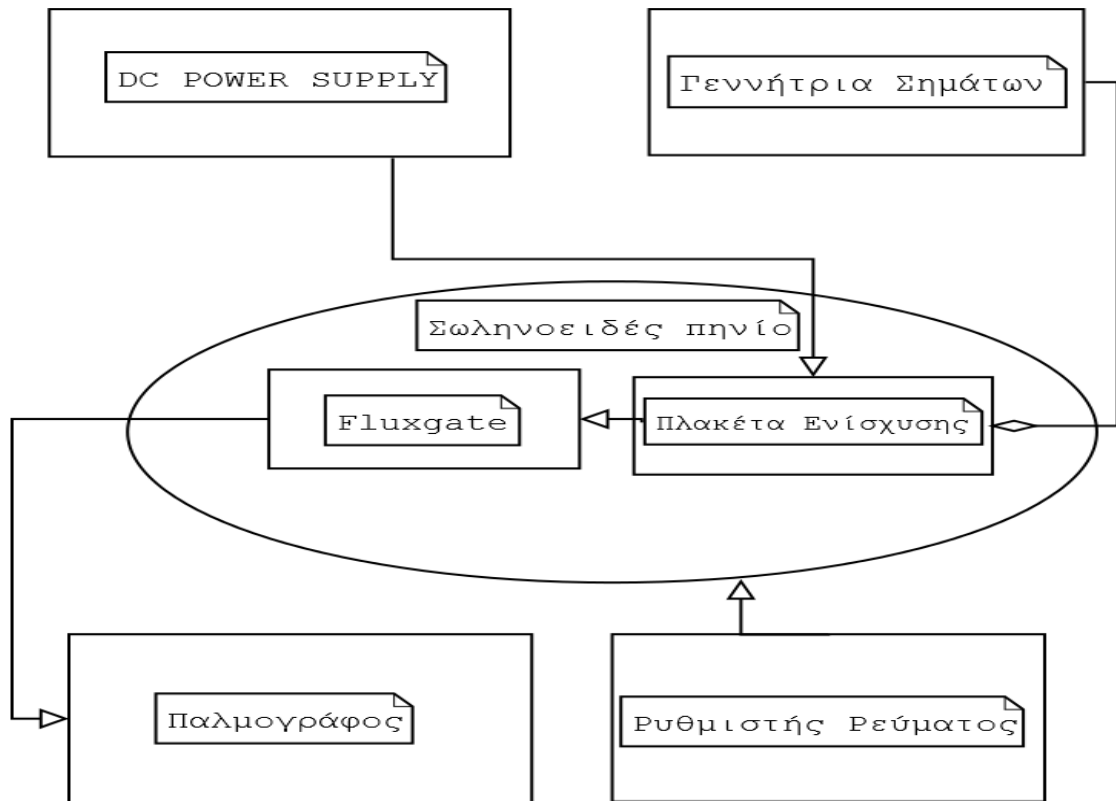
## 5.2 Μετρήσεις με σωληνοειδές πηνίο

Σε αυτήν την παράγραφο θα εξηγηθεί η διαδικασία μέτρησης απόκρισης του αισθητήρα χρησιμοποιώντας έναν σωλήνα στον οποίο έχει τυλιχθεί γύρω του πηνίο, για να μπορεί να δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της κατασκευής. Στο Σχήμα 58 φαίνεται η συγκεκριμένη κατασκευή. Ο σωλήνας έχει μήκος 30cm και διάμετρο 10cm και αποτελείται από 580 περιελίξεις σύρματος χαλκού διαμέτρου 1mm. Στο εσωτερικό του υπάρχει συρόμενη βάση στο μέσο της οποίας τοποθετείται ο μαγνητικός αισθητήρας έτσι ώστε να βρίσκεται στο κέντρο του σωληνοειδούς, τόσο ως προς το μήκος, όσο και ως προς τη διάμετρό του.



Σχήμα 58: Σωληνοειδές πηνίο.

Στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζεται το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων. Για αυτήν τη διάταξη τοποθετήθηκε το κύκλωμα του αισθητήρα μέσα στον σωλήνα ώστε να επιβάλλεται το μαγνητικό πεδίο και να λάβουμε την απόκρισή του για τις διάφορες τιμές του πεδίου.



Σχήμα 59: Μπλοκ διάγραμμα για μέτρηση με σωληνοειδές πηνίο.

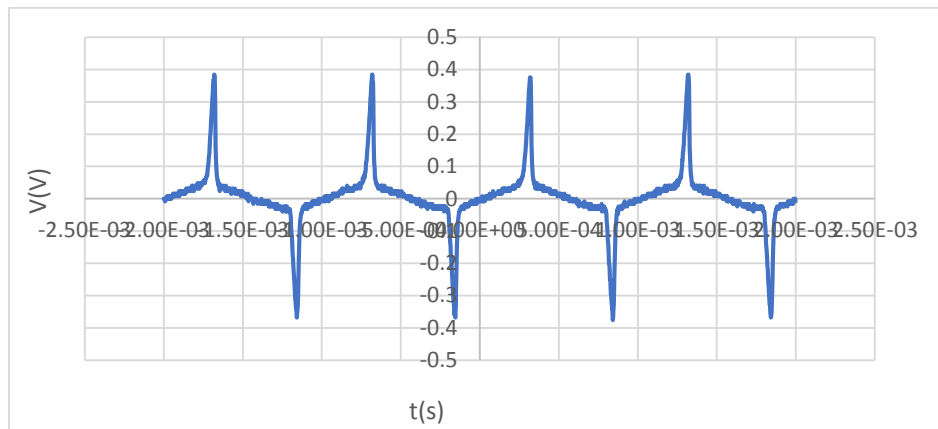
Σαν σήμα εισόδου από τη γεννήτρια σημάτων χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή κυματομορφή πλάτους 150mV και συχνότητας 1kHz. Η πλακέτα ενίσχυσης τροφοδοτήθηκε με  $\pm 15V$ . Συνδέθηκε το σωληνοειδές με τροφοδοτικό ακριβείας ώστε να ελεγχθεί με ακρίβεια η τιμή του ρεύματος τροφοδοσίας του πηνίου, δημιουργώντας την επιθυμητή ένταση μαγνητικού ανά περίπτωση. Το πεδίο που δημιουργείται εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$B = \mu \cdot \frac{n \cdot I}{\ell} \quad 4.1$$

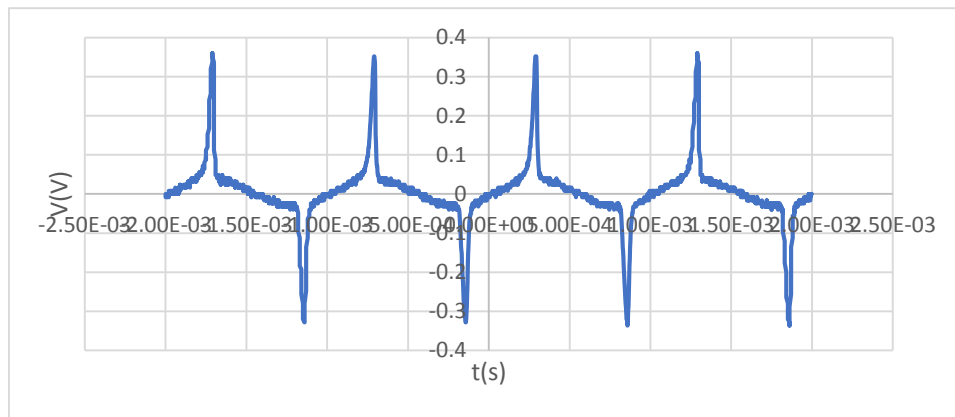
όπου :

- $\mu$ : σχετική μαγνητική διαπερατότητα
- $n$ : σπείρες σωληνοειδούς
- $I$ : η ένταση του παρεχόμενου ρεύματος
- $\ell$ : το μήκος του σωληνοειδούς

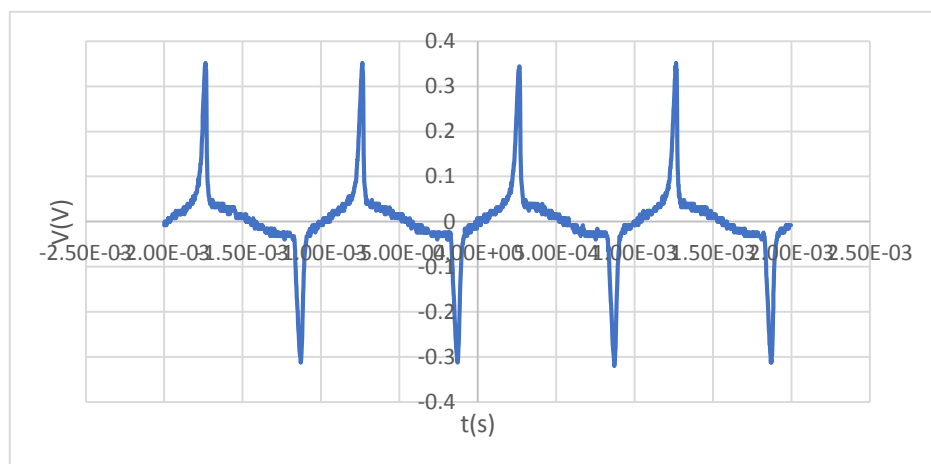
Πραγματοποιήσαμε δύο ομάδες μετρήσεων για ίδιες τιμές ρεύματος, αλλά με διαφορετικές πολικότητες του μαγνητικού πεδίου.



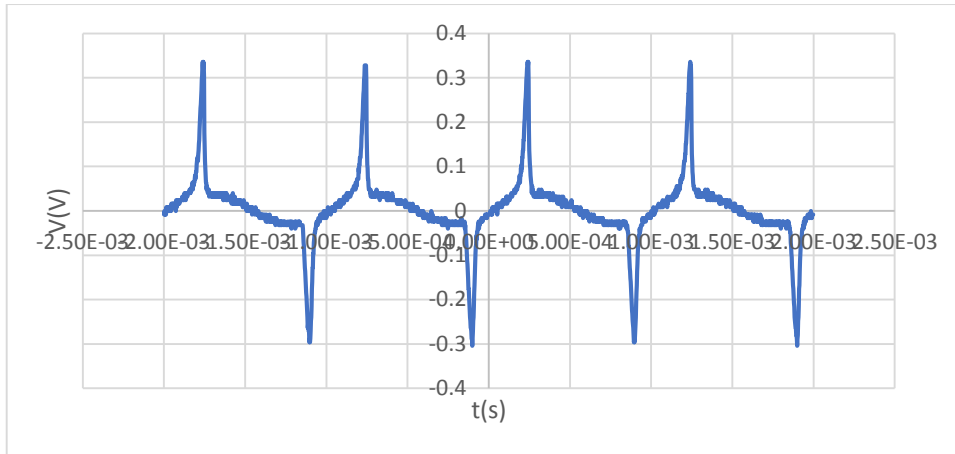
Σχήμα 60: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,018Α.



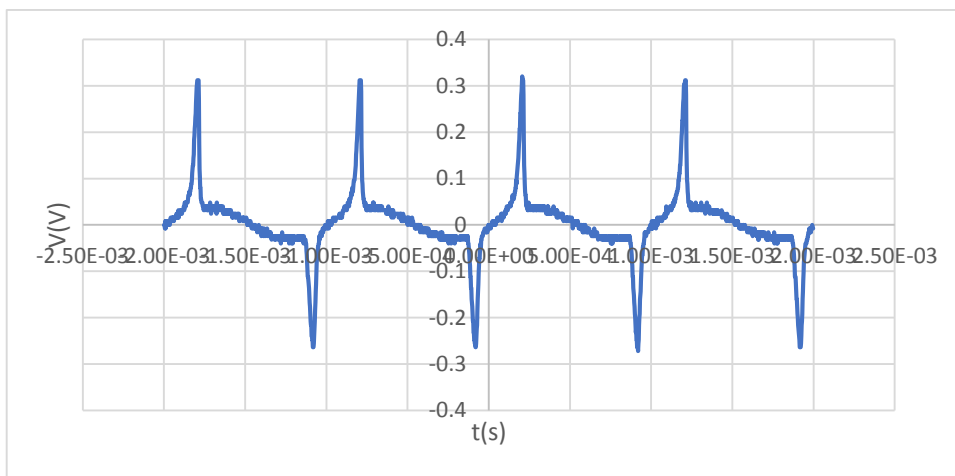
Σχήμα 61: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,11Α.



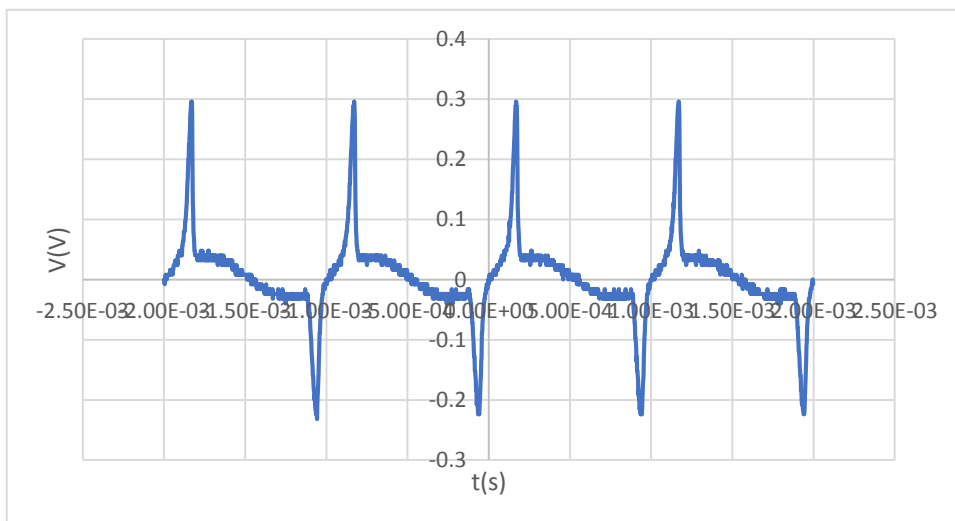
Σχήμα 62: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,2Α.



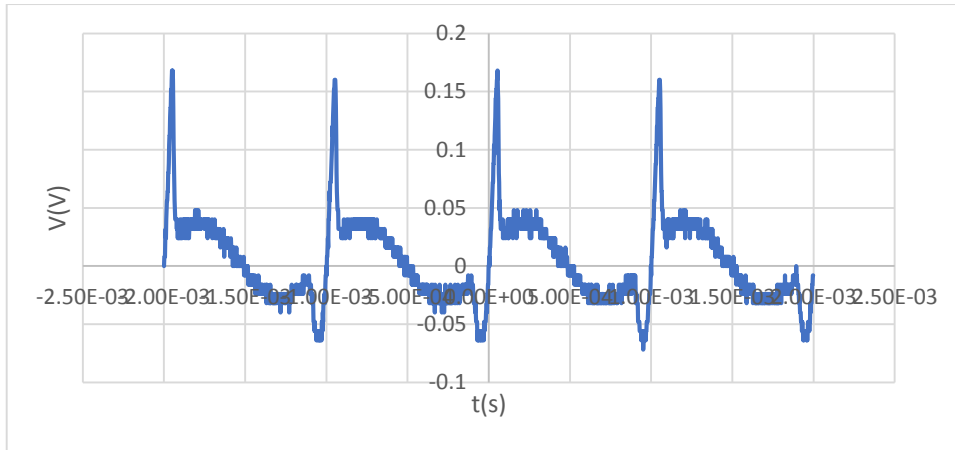
Σχήμα 63: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,3Α.



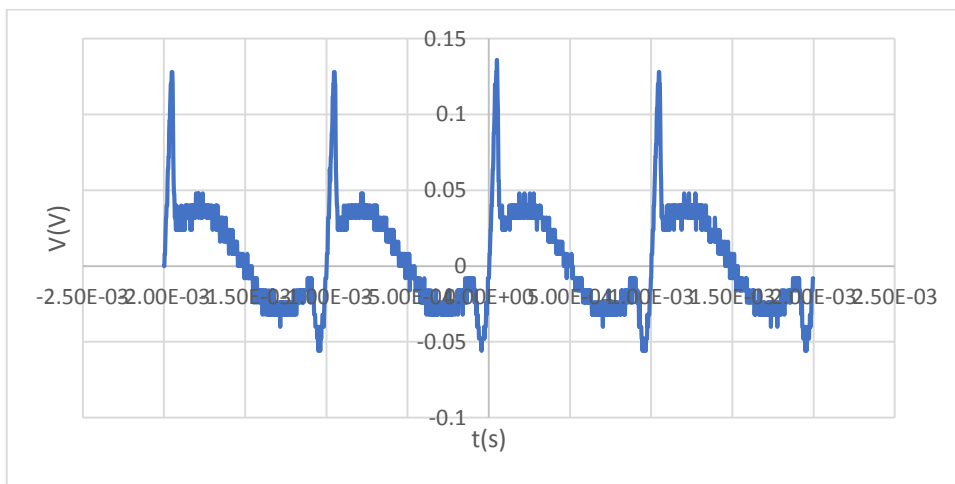
Σχήμα 64: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,4Α.



Σχήμα 65: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,5Α.

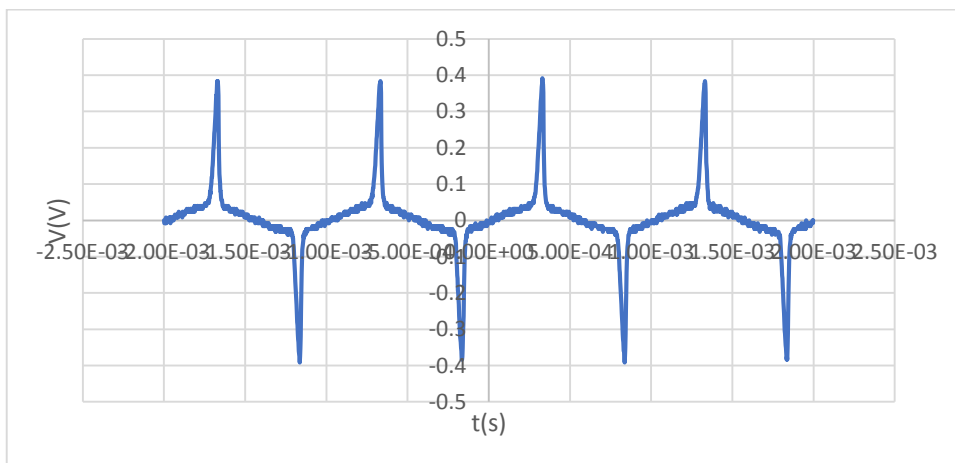


Σχήμα 66: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,65A.

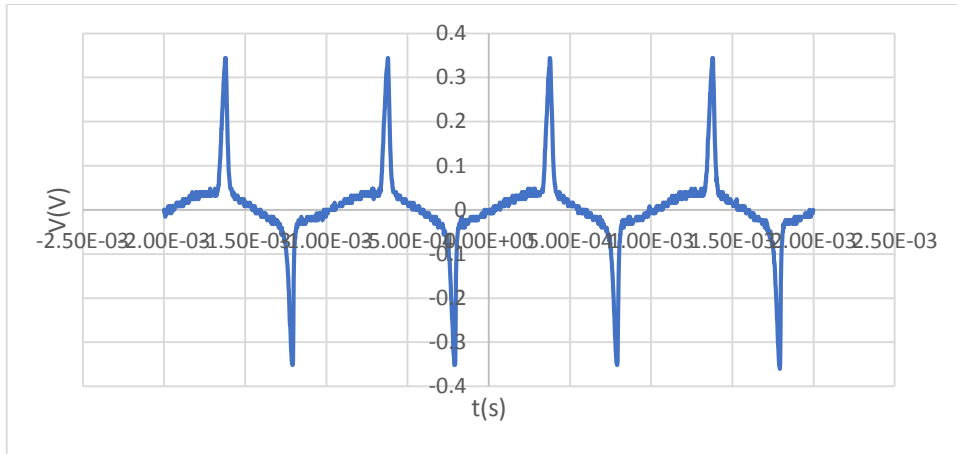


Σχήμα 67: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης 0,662A.

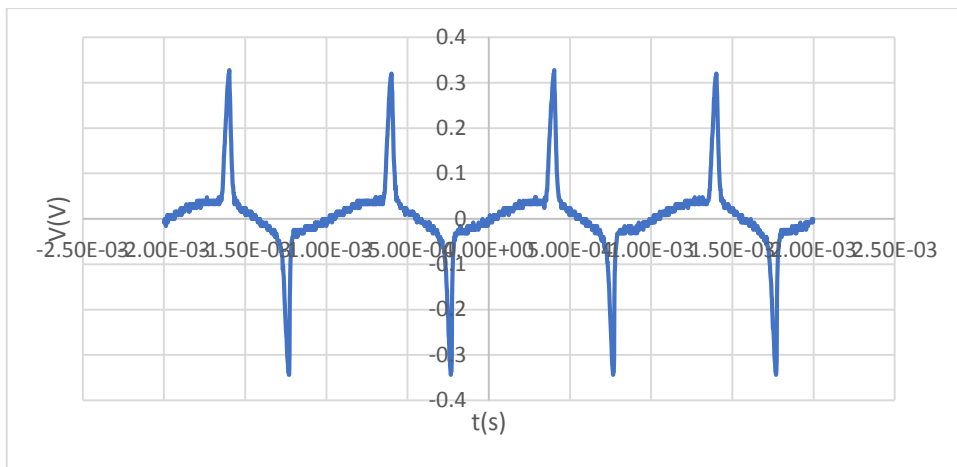
Σε αυτό το σημείο αλλάχθηκε η πολικότητα του πεδίου και καταγράφηκαν οι παρακάτω μετρήσεις.



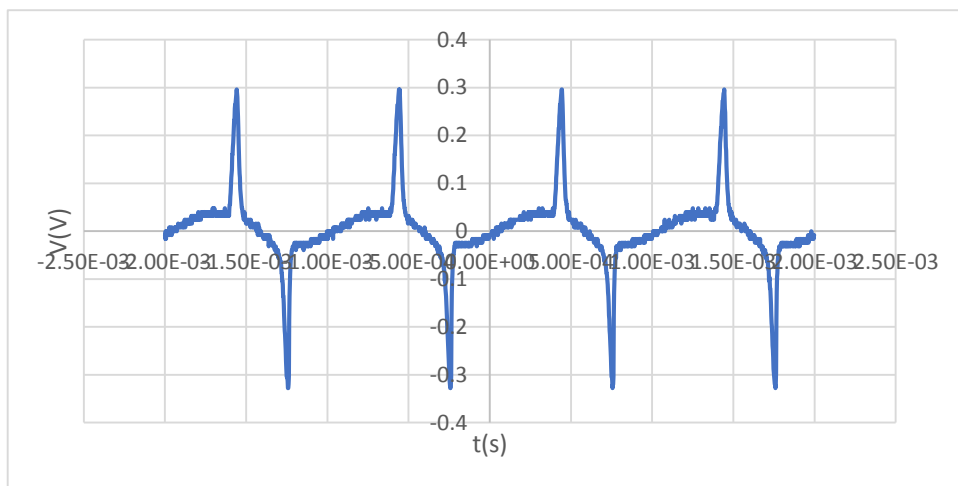
Σχήμα 68: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,019A.



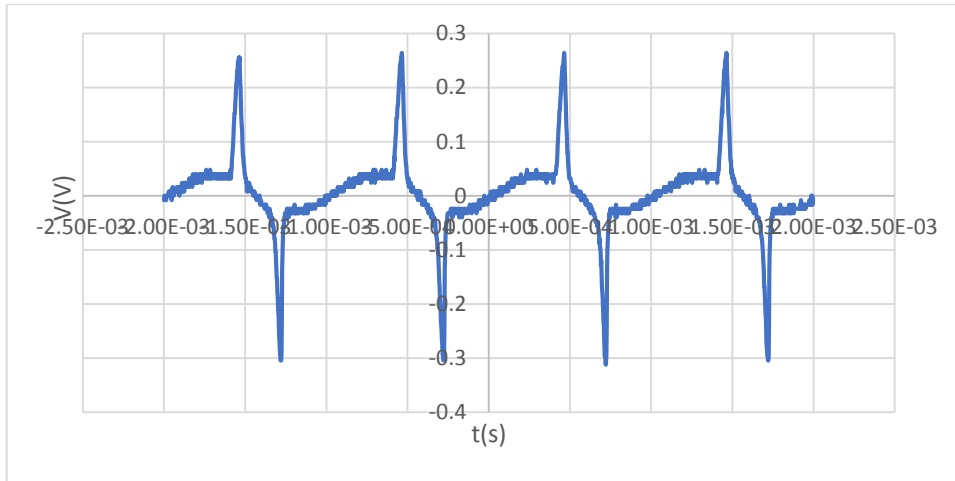
Σχήμα 69: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,2Α.



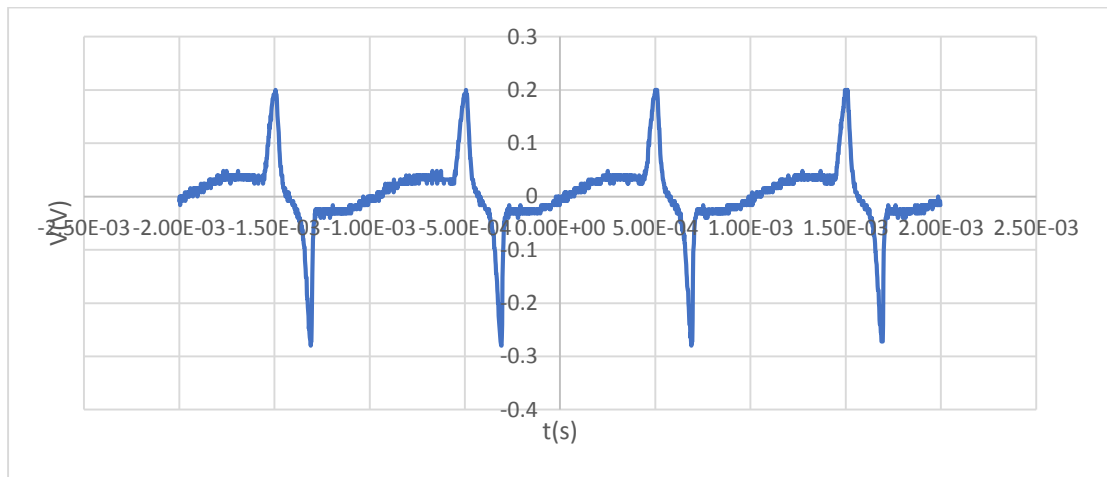
Σχήμα 70: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,3Α.



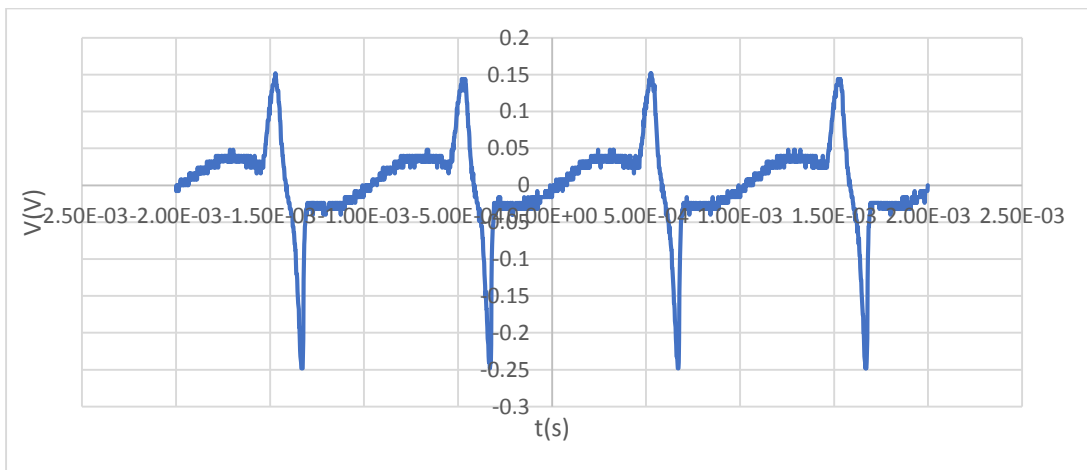
Σχήμα 71: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,4Α.



Σχήμα 72: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,5Α.

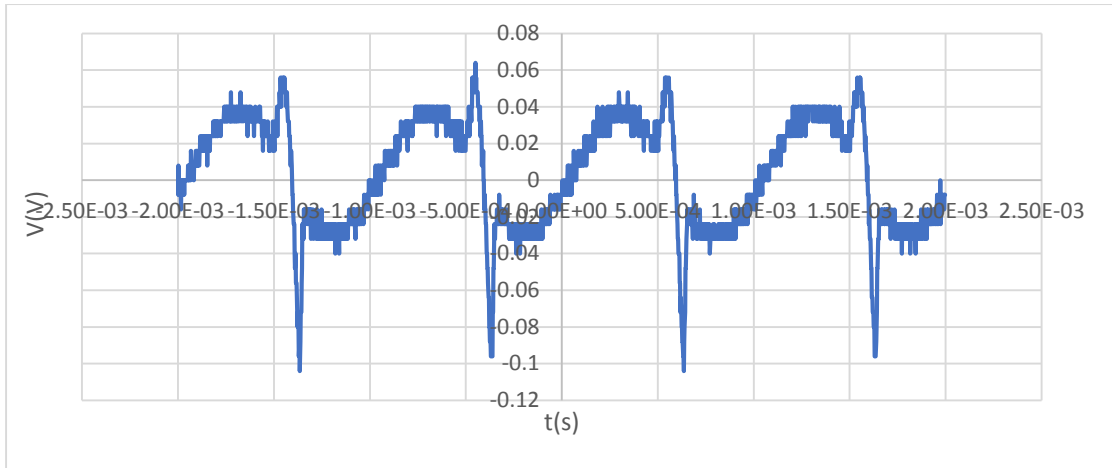


Σχήμα 73: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,6Α.



Σχήμα 74: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,646Α.

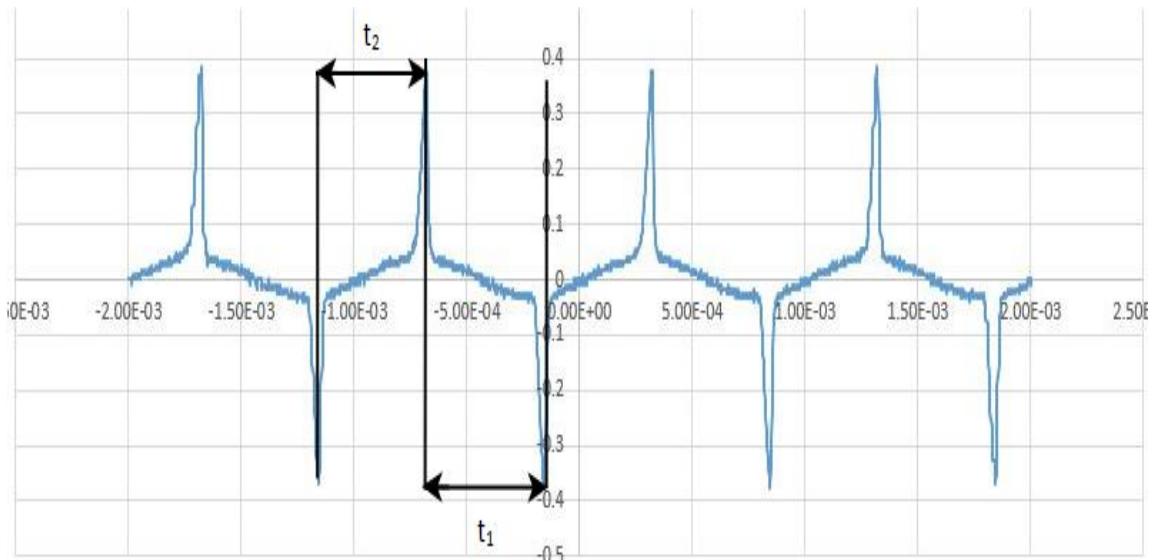




Σχήμα 75: Έξοδος αισθητήρα με ρεύμα διέγερσης -0,704A.

Παρατηρώντας τα σήματα εξόδου βλέπουμε ότι όταν αυξάνεται το ρεύμα στο σωληνοειδές οι κορυφές μετακινούνται αριστερά και δεξιά, δηλαδή αλλάζει η χρονική τους διαφορά. Αυτό εξηγείται μέσω του βρόχου υστέρησης του μαγνητικού πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, ο μαγνητικός πυρήνας φτάνει στον κόρο για μία συγκεκριμένη θετική και αρνητική τιμή επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Όταν το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο είναι εναλλασσόμενο, αυτή η μεταβολή είναι συμμετρική. Όμως, η επιβολή ενός επιπρόσθετου συνεχούς μαγνητικού πεδίου οδηγεί ταχύτερα ή αργότερα στον κορεσμό του πυρήνα, κάτι που οδηγεί σε αντίστοιχη χρονική μετατόπιση των κορυφών του λαμβανόμενου σήματος.

Για να καταγραφεί πώς αλλάζουν οι αποστάσεις των κορυφών συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται, μετρήθηκε η διαφορά  $\Delta t = t_1 - t_2$  σε διάφορες τιμές πεδίου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στους πίνακες 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Σχήμα 76: Αποστάσεις κορυφών σήματος εξόδου.

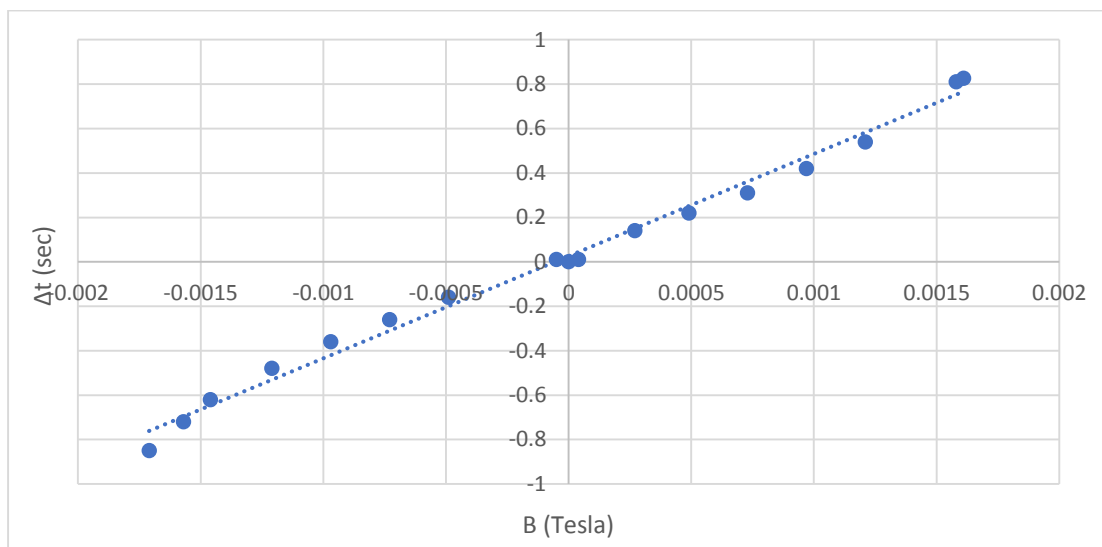
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα μετρήσεων για θετικό ρεύμα διέγερσης.

I	B	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	Δt
0.018	0.00004	0.49	0.5	0.01
0.11	0.00027	0.43	0.57	0.14
0.2	0.00049	0.39	0.61	0.22
0.3	0.00073	0.35	0.66	0.31
0.4	0.00097	0.29	0.71	0.42
0.5	0.00121	0.23	0.77	0.54
0.65	0.00158	0.1	0.91	0.81
0.662	0.00161	0.08	0.91	0.826

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μετρήσεων για αντίθετη πολικότητα πεδίου.

I	B	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	Δt
-0.019	-0.00005	0.49	0.5	0.01
-0.2	-0.00049	0.58	0.42	-0.16
-0.3	-0.00073	0.63	0.37	-0.26
0.4	-0.00097	0.68	0.32	-0.36
-0.5	-0.00121	0.74	0.26	-0.48
-0.6	-0.00146	0.81	0.19	-0.62
-0.646	-0.00157	0.86	0.14	-0.72
-0.704	-0.00171	0.92	0.07	-0.85

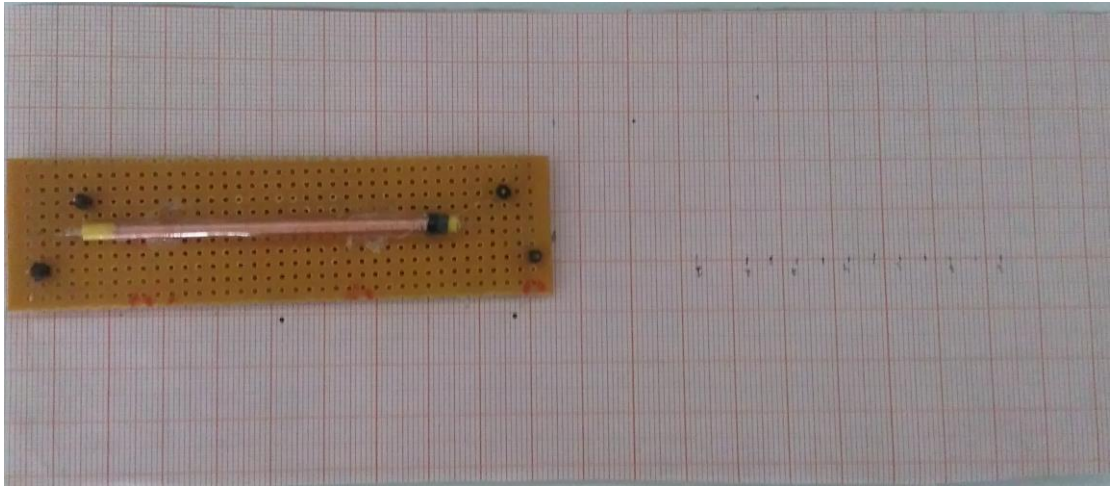
Όπως παρατηρείτε στους παραπάνω πίνακες, η διαφορά  $\Delta t$  για ίδιες τιμές ρεύματος, αλλά με διαφορετικό πρόσημο, είναι σχεδόν ίδιες. Στο Σχήμα 77 παρουσιάζεται η καμπύλη διαφοράς αποστάσεων κορυφών συναρτήσει εφαρμοζόμενου εξωτερικού πεδίου. Παρατηρείτε ότι αυτή η σχέση είναι σχεδόν γραμμική με ένα μικρό περιθώριο σφάλματος, το οποίο μπορεί να προκύψει από τα διαφορετικά σφάλματα κατασκευής, ανάγνωσης ή σφάλματα μέτρησης.



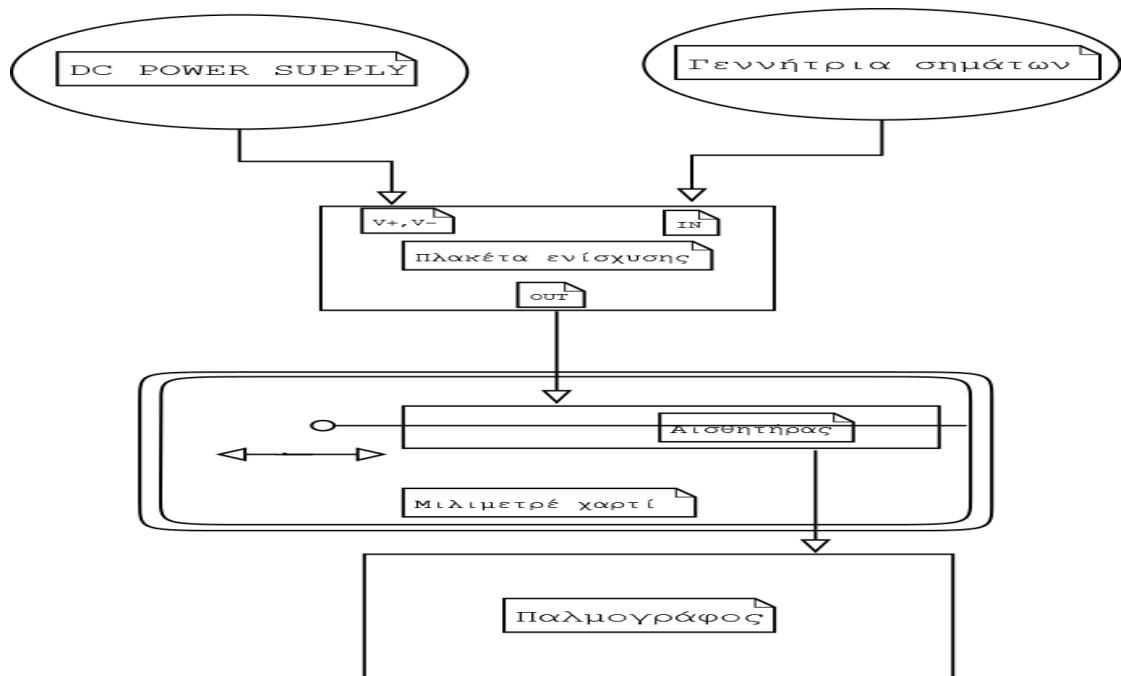
Σχήμα 77: Καμπύλη  $\Delta t = t_1 - t_2$  συναρτήσει εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου.

### 5.3 Μετρήσεις για αισθητήρα θέσης

Σε αυτήν την ενότητα θα χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας σαν αισθητήρας θέσης. Για αυτόν τον λόγο, θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω διάταξη και το μπλοκ διάγραμμα.

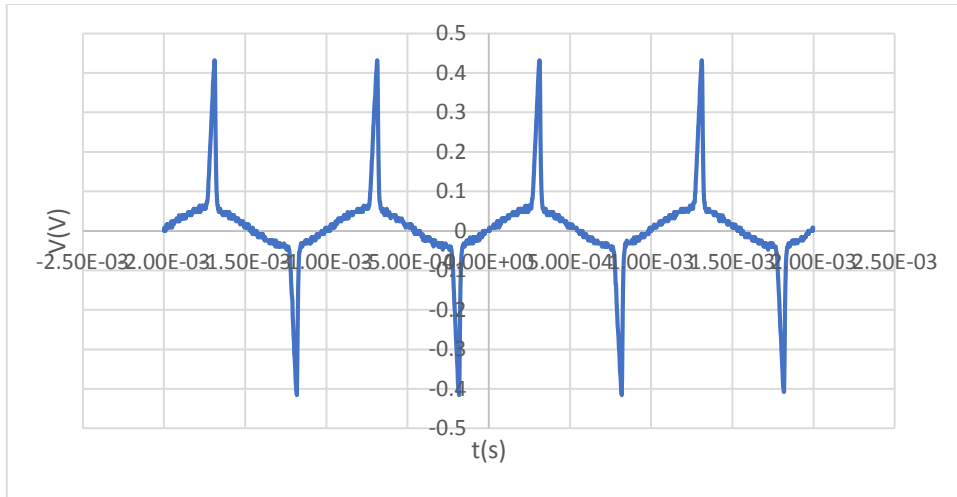


Σχήμα 78: Διάταξη μέτρησης μετακίνησης πυρήνα.

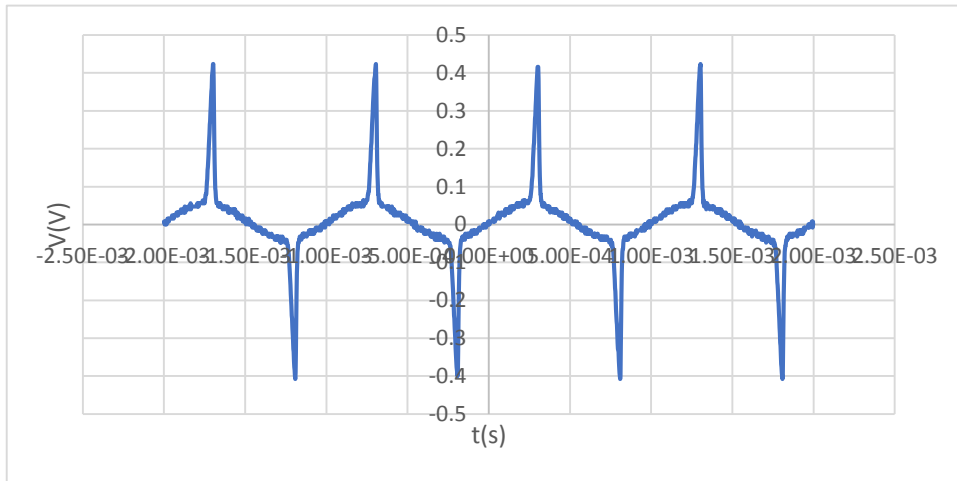


Σχήμα 79: Μπλοκ διάγραμμα για μετρήσεις με αισθητήρα θέσης.

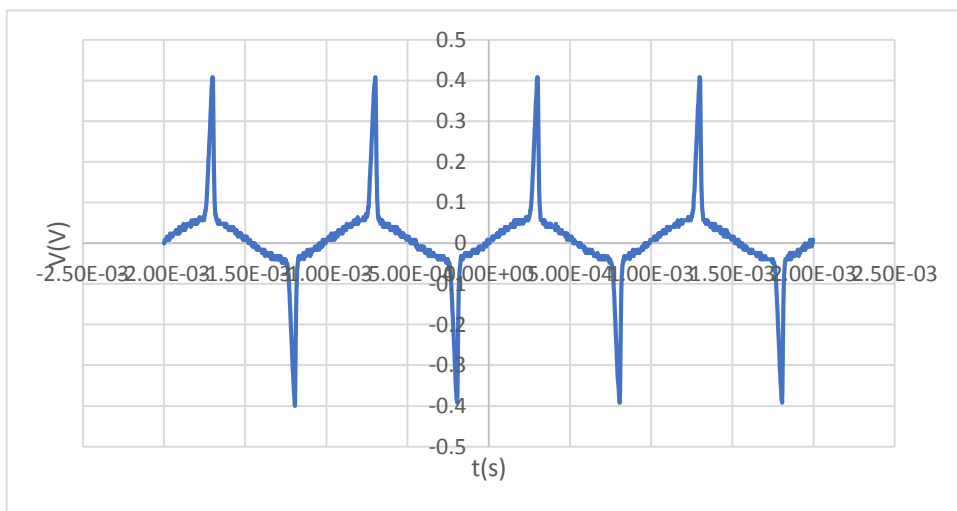
Για αυτές τις μετρήσεις μετακινείτε ο μαγνητικός πυρήνας άμορφου σύρματος CoFeSiB προς τα έξω με σταθερό βήμα και μετράτε η απόκριση του αισθητήρα. Σαν σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδή κυματομορφή πλάτους 150mV και συχνότητας 1kHz. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα σήματα εξόδου για διάφορες μετακινήσεις του πυρήνα από την αρχική του θέση.



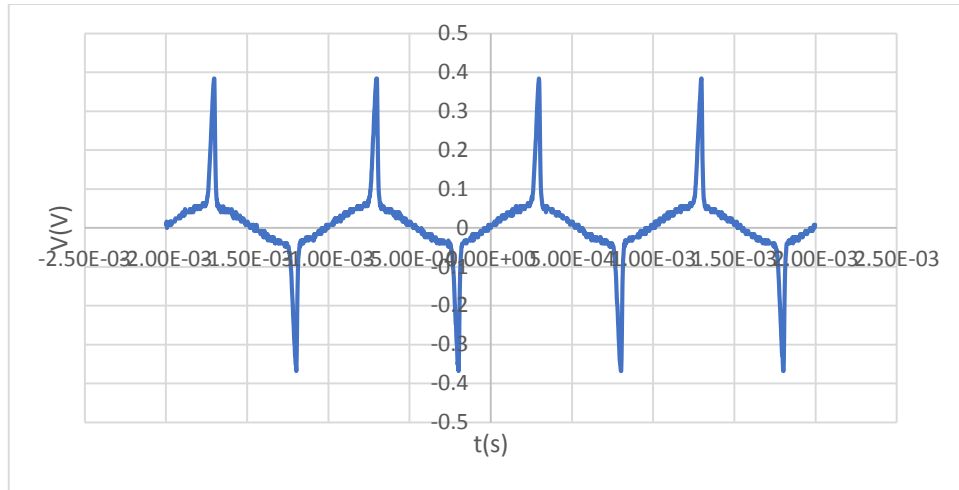
Σχήμα 80: Αρχικό σήμα εξόδου χωρίς μετακίνηση του πυρήνα.



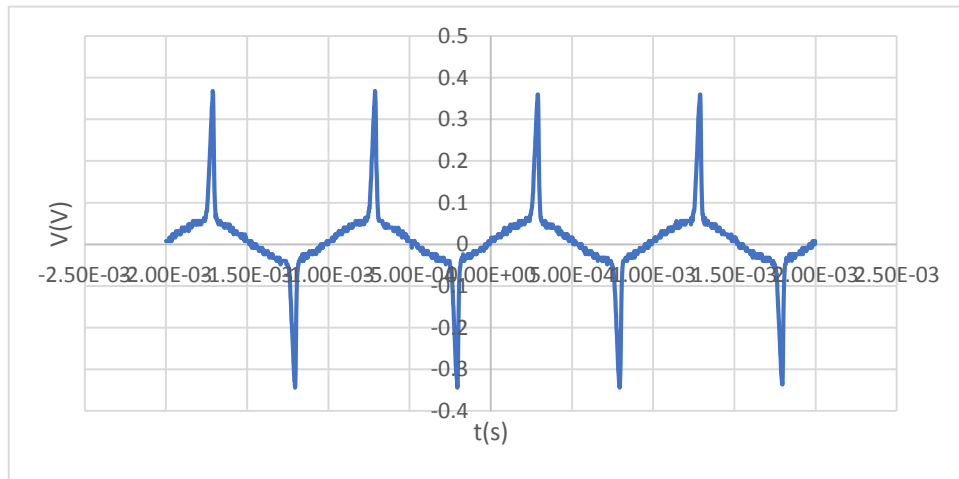
Σχήμα 81: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 0.5 cm προς τα έξω.



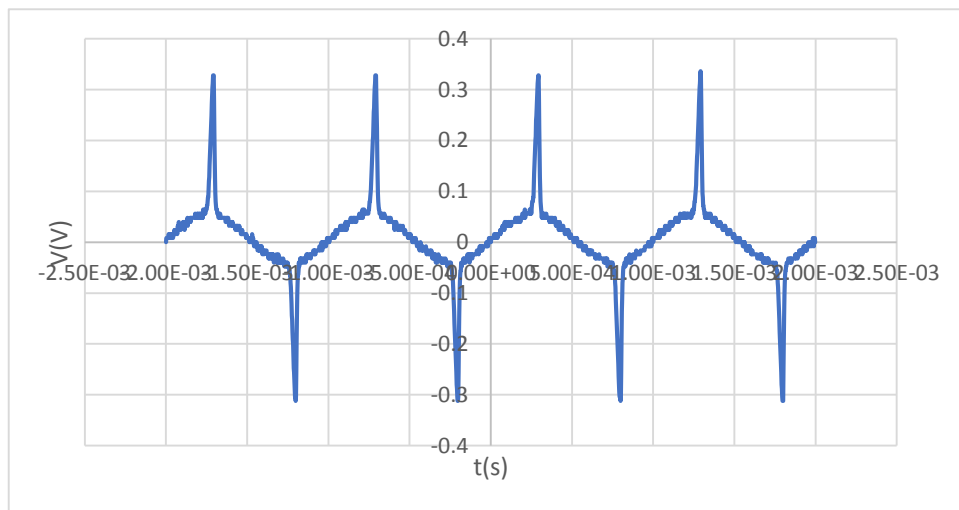
Σχήμα 82: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 1 cm προς τα έξω.



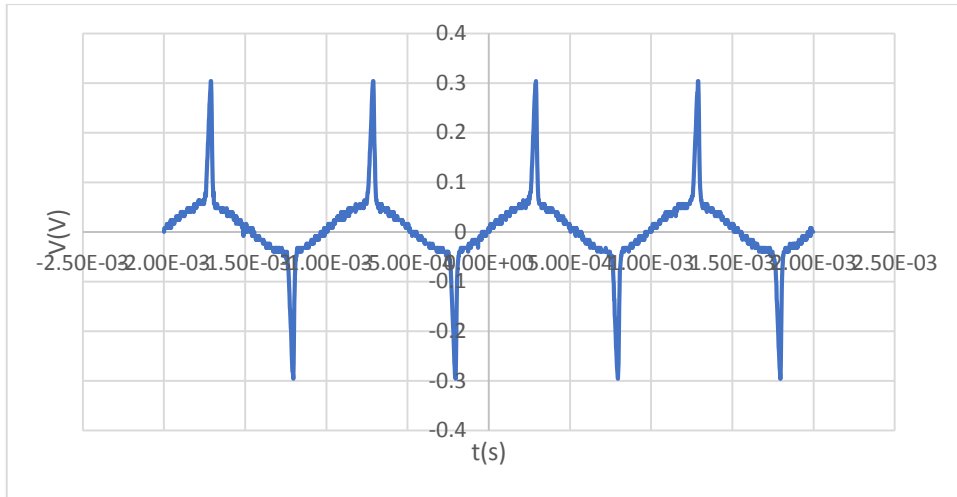
Σχήμα 83: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 1.5 cm προς τα έξω.



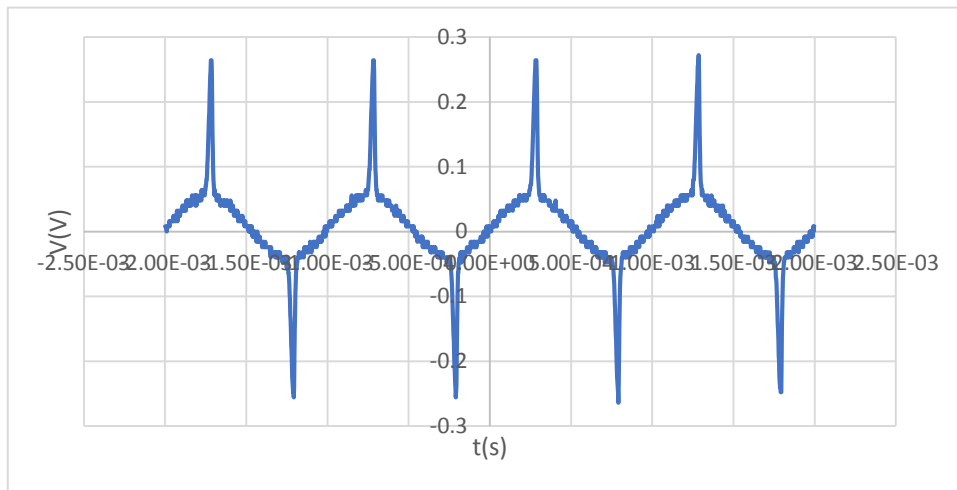
Σχήμα 84: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 2 cm προς τα έξω.



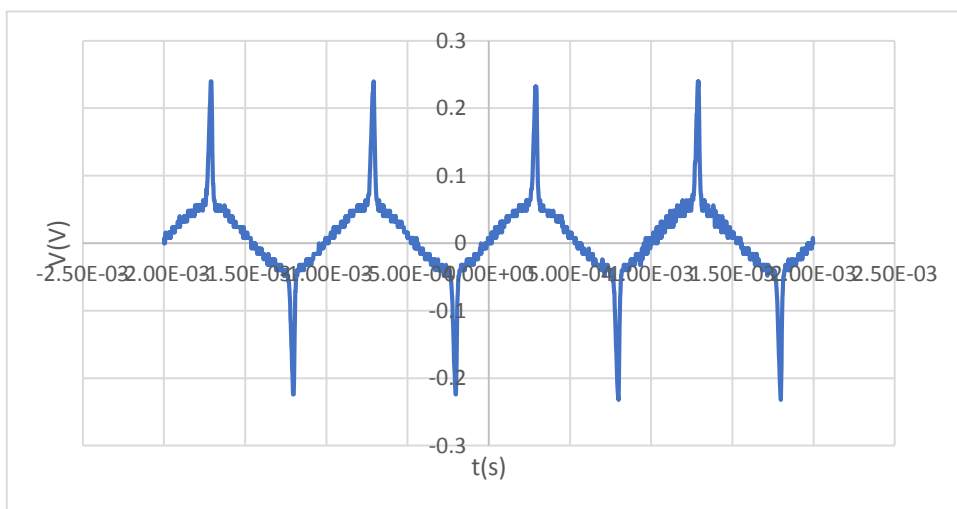
Σχήμα 85: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 2.5 cm προς τα έξω.



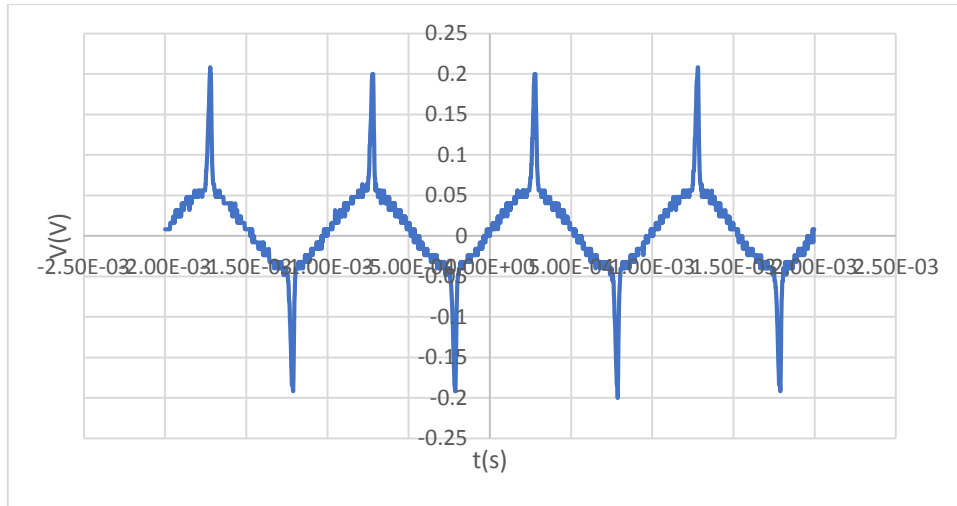
Σχήμα 86: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 3 cm προς τα έξω.



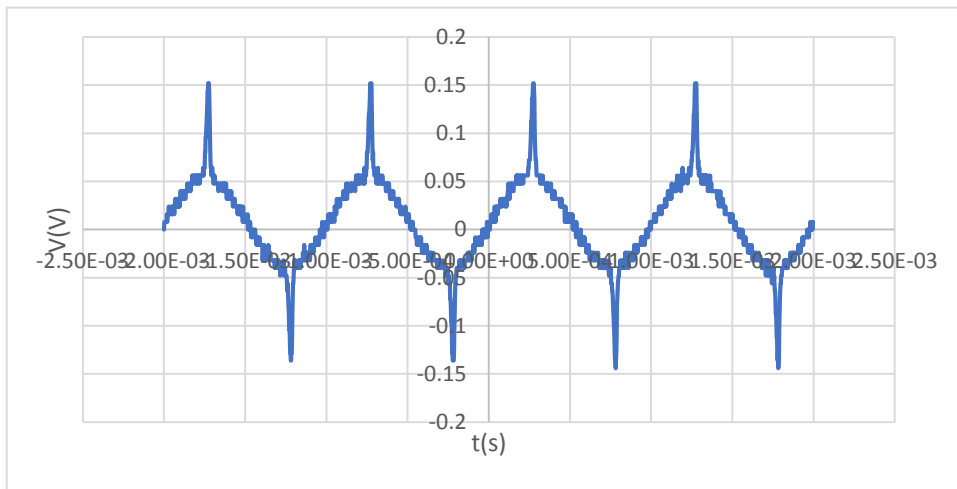
Σχήμα 87: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 3.5 cm προς τα έξω.



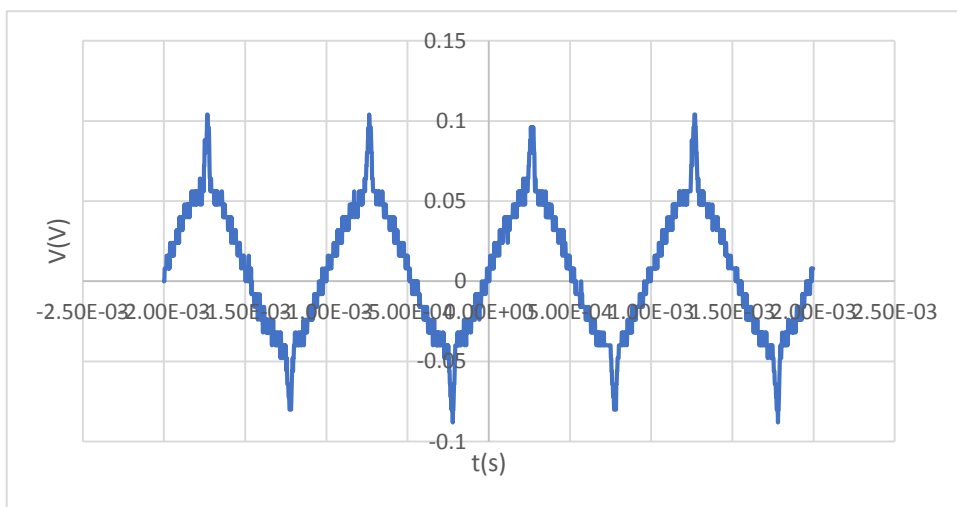
Σχήμα 88: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 4 cm προς τα έξω.



Σχήμα 89: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 4.5 cm προς τα έξω.

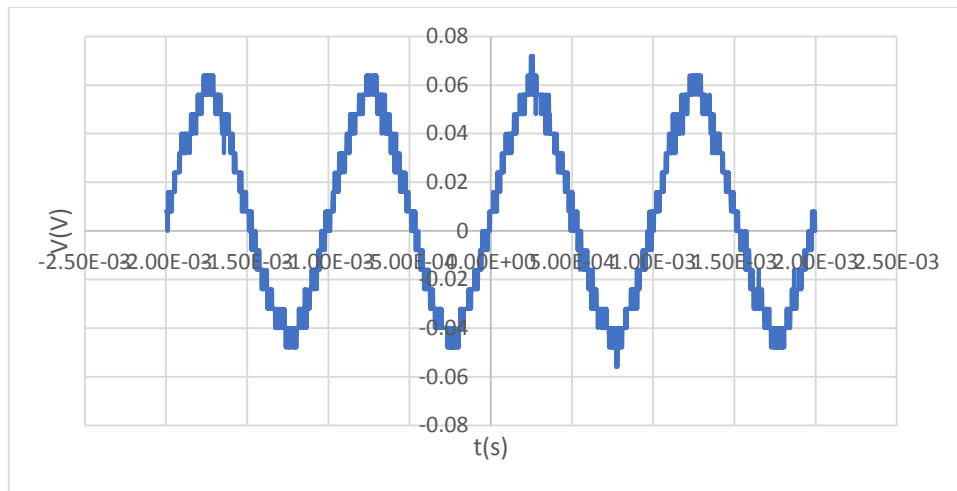


Σχήμα 90: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 5 cm προς τα έξω.



Σχήμα 91: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 5.5 cm προς τα έξω.



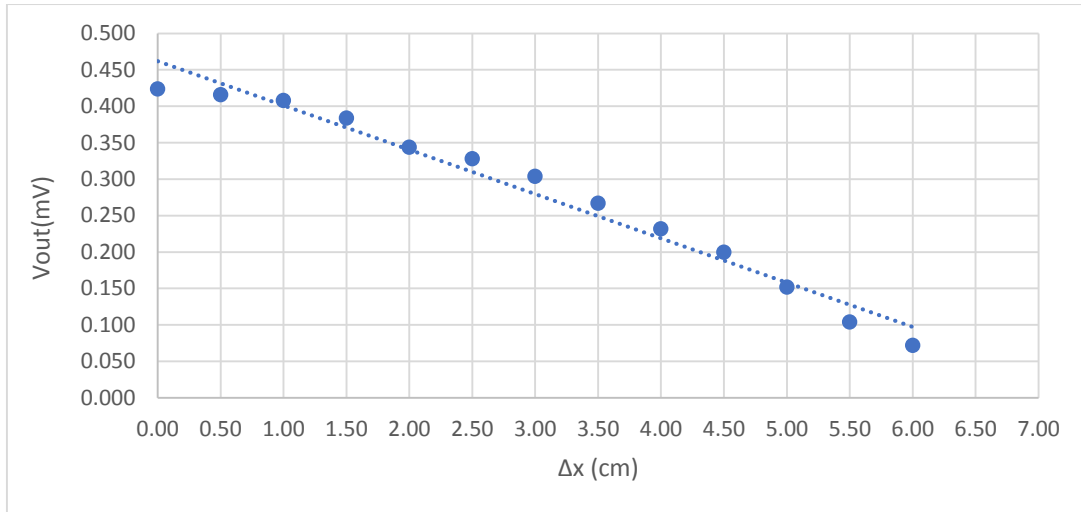


Σχήμα 92: Σήμα εξόδου για μετακίνηση πυρήνα κατά 6 cm προς τα έξω.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Όπως παρατηρείτε , υπάρχει μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ μετακίνησης  $\Delta x$  του πυρήνα και του σήματος εξόδου. Ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει μέχρι έξι εκατοστά μετακίνηση του πυρήνα, το οποίο είναι λογικό αν αναλογιστούμε ότι ο πυρήνας έχει μήκος επτά εκατοστά. Τέλος, τυχόν αποκλίσεις οφείλονται σε διάφορα σφάλματα μετρήσεων και κατασκευής.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μετρήσεων για αισθητήρα θέσης.

$\Delta x(\text{cm})$	$V_{\text{max}}(\text{mV})$
0.00	0.424
0.5	0.416
1.00	0.408
1.50	0.384
2.00	0.344
2.50	0.328
3.00	0.304
3.50	0.267
4.00	0.232
4.50	0.200
5.00	0.152
5.50	0.104
6.00	0.072



Σχήμα 93: Σήμα εξόδου αισθητήρα συναρτήσει της μετακίνησης του πυρήνα.

## 6 Συμπεράσματα

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι είναι εφικτή η κατασκευή ενός αισθητήρα Fluxgate και του ενισχυτικού σταδίου. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η μη φορητότητα του και η έλλειψη ψηφιακού σταδίου εξόδου. Από την άλλη κατασκευάστηκε ένας πολύ δυνατός και σταθερός στάδιο ενίσχυσης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές.

Για την μη φορητότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί συσκευή Arduino που μπορεί να συνθέσει το σήμα εισόδου που χρειάζεται για την λειτουργία του αισθητήρα. Ακόμα, για μικρότερο κόστος, μπορούμε να σχεδιαστεί ένα απλό κύκλωμα σήματος εισόδου. Για το στάδιο τροφοδοσίας μπορεί να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες. Επίσης για να συμπυκνωθεί περισσότερο το μέγεθος της πλακέτας μπορεί να χρησιμοποιηθούν SMD ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

Επίσης θα ήταν χρήσιμη η ψηφιοποίηση του τελικού σήματος με σκοπό την άμεση επεξεργασία των αποτελεσμάτων αλλά και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων. Τέλος για να αυξηθεί η ευαισθησία του αισθητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθούν άλλες διάταξης του όπως το Race-track ή ακόμα και να διεγερθεί ο αισθητήρας από τον πυρήνα.



## 7 Βιβλιογραφία

- [1] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* Springer, 2010.
- [2] D. Patranabi, “Sensors and Tranducers”,*PHI Learning Pvt. Ltd*, 2003.
- [3] J. Vetelino, “Introduction to sensors. Boca Raton”, *CRC Press*, 2011.
- [4] P. T. Moseley and J. Crocker, “Sensor Materials”. *CRC Press*, 1996.
- [5] Δημήτριος Ν. Μαυροκουκουλάκης, Πτυχιακή Εργασία : *Μαγνητική αισθητήρες και εφαρμογές*,2008.
- [6] W. Göpel, J. Hesse, J.N. Zemel, *Sensors, A Comprehensive Survey*, Volume 5: Magnetic Sensors, *VCH*, 2008.
- [7] P.Ripka, A. Tipek, *Master Book On Sensors, Part B/Modular Courses On Modern Sensors*, Leonardo Da Vinci Project CZ/PP – 134026/ BEN Technical Literature,2003.
- [8] Παναγιώτης Δ. Δημητρόπουλος, Διδακτορική Διατριβή: *Μικροαισθητήρες Fluxgate βελτιστοποίηση & εφαρμογές* , 2001.
- [9] M. J. Caruso, “Applications of magnetic sensors for low cost compass systems,” in Position Location and Navigation Symposium, *IEEE 2000*, 2000, pp. 177-184.
- [10] “The Nobel Prize in Physics 2007.”  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2007/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/).
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Search\\_coil](https://en.wikipedia.org/wiki/Search_coil)
- [12] Κριτσωτάκης Ιωάννης : Πτυχιακή Εργασία : *Αισθητήρας- Μετατροπείς*. 2006.
- [13] <http://wiki.squid-cache.org/SquidFaq/AboutSquid>
- [14] [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3574/1/05\\_chapter\\_04.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3574/1/05_chapter_04.pdf)
- [15] <http://www.porlidas.gr/VoltAmp/VoltAmpGr.htm>
- [16] <http://www.ti.com/>
- [17] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa549.pdf>