



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Κατασκευή Κυκλώματος Κλειστού Βρόχου για Μαγνητικό Αισθητήρα AMR

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ-ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ Ι. ΤΣΑΛΙΚΙΔΟΥ

Επιβλέπων: Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Κατασκευή Κυκλώματος Κλειστού Βρόχου για Μαγνητικό Αισθητήρα AMR

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΣ-ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ Ι. ΤΣΑΛΙΚΙΔΟΥ

Επιβλέπων: Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Σεπτεμβρίου 2016.

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

.....
Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

.....
Αναστασία-Χριστίνα Τσαλικίδου

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αναστασία-Χριστίνα Ι. Τσαλικίδου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, κατασκευάζουμε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα κλειστού βρόχου για έναν αισθητήρα ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τον AMR αισθητήρα υψηλής ευαισθησίας HMC1001/1002 της Honeywell, η έξοδος του οποίου τροφοδοτεί έναν ενισχυτή οργάνων μέτρησης τύπου chopper, που ενισχύει το σήμα και έχει ελάχιστο θόρυβο και σχεδόν μηδενική απόκλιση (offset). Στη συνέχεια, το σήμα οδηγείται σε έναν ενισχυτή ρεύματος και τελικά περνά σε μία αντίσταση πολύ υψηλής ακριβείας, μέσω της οποίας ανατροφοδοτείται το κύκλωμα. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούμε κύκλωμα κλειστού βρόχου, επιτυγχάνοντας λειτουργία στη γραμμική περιοχή.

Λέξεις Κλειδιά

αισθητήρες, AMR, μαγνητικοί αισθητήρες, HMC1001/1002, ενισχυτής οργάνων μέτρησης, ανάδραση, κυκλώματα κλειστού βρόχου

Abstract

Due to modern needs for taking measurements with higher accuracy, we build a closed-loop anisotropic magnetoresistance sensor. To be more specific, we utilize the high-sensitivity magnetoresistance sensors HMC1001/1002 of Honeywell, the output of which passes through a chopper amplifier. Then, the signal is reinforced by an amplifier, known as instrumentation amplifier. The output of the instrumentation amplifier is fed back to the sensor through a resistor of very high accuracy, which is used for taking measurements by measuring the current through it. By using the closed-loop circuit, we achieve operation in the linear region and noise minimization due to chopper amplifier.

Keywords

Sensors, AMR, magnetic sensors, HMC1001/1002, instrumentation amplifier, chopper amplifier, feedback, closed-loop circuits

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Σωτηριάδη Παύλο-Πέτρο για την βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Νεοκλή Χατζηγεωργίου, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, χωρίς την καθοδήγηση και την υπομονή του οποίου δε θα είχα καταφέρει να φέρω εις πέρας αυτή την εργασία.

Ευχαριστώ τους γονείς μου Γιάννη και Μαρία, στους οποίους είμαι ευγνώμων για όσα μου προσέφεραν και μου δίδαξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Στη συνέχεια, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον σύζυγό μου Γιάννη Αποστολάκη, για την υπομονή που έδειξε κατά τη συγγραφή αυτής της εργασίας και κυρίως για την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αδέρφια μου Μίλαν, Αντιγόνη, Ολυμπία, Κώστα και Άρτεμη, που εξακολουθούν πάντα να αποτελούν τα πρότυπά μου, καθώς και όλους τους φίλους μου για τις καίριες συμβουλές και διορθώσεις τους.

Αναστασία-Χριστίνα Ι. Τσαλικίδου

Αθήνα, 30 Σεπτεμβρίου 2016

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων.....	1
Κατάλογος Πινάκων	3
Κατάλογος Εικόνων.....	4
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή.....	8
1.1 Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου στη φύση	8
1.2 Ιστορική Αναδρομή αισθητήρων μαγνητικού πεδίου	9
1.3 Εφαρμογές Μαγνητικών Αισθητήρων	10
Κεφάλαιο 2^ο : Μαγνητικοί Αισθητήρες–Ιδιότητες & Κατηγοριοποίησή τους... 13	13
2.1 Ιδιότητες Μαγνητικών αισθητήρων	13
2.2 Ταξινόμηση Μαγνητικών Αισθητήρων.....	14
2.2.1 Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου.....	15
2.2.2 Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου γης	18
2.2.3 Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου	24
Κεφάλαιο 3^ο: Οι αισθητήρες AMR HMC1001/2	29
3.1 Τεχνική Περιγραφή	29
3.2 Τύλιγμα Τοποθέτησης/Επανατοποθέτησης (Set/Reset Strap).....	30
3.3 Τύλιγμα Αντιστάθμισης (Offset Strap)	32
3.4 Άλλες μέθοδοι μείωσης της τάσης απόκλισης	34
3.4.1 Μέθοδος με αντίσταση παράκαμψης	34
3.4.2 Μηδενισμός με δυναμικό πόλωσης του ενισχυτή	35
3.4.3 Μηδενισμός με διακοπτόμενη ανατροφοδότηση (Switching Feedback)	35
3.4.4 Μέθοδος με τη χρήση ρεύματος στο τύλιγμα αντιστάθμισης	36
3.5 Υπολογισμός της τάσης εξόδου της γέφυρας του HMC.	36
Κεφάλαιο 4^ο: Παρουσίαση & Ανάλυση του κυκλώματος αισθητήρα κλειστού βρόχου	39
4.1 Παρουσίαση Συνολικού Κυκλώματος.....	39
4.2 Ανάλυση Επιμέρους Σταδίων.....	40
4.2.1 1 ^ο στάδιο: Αισθητήρας	40
4.2.2 2 ^ο στάδιο: Chopper Amplifier.....	40
4.2.3 3ο στάδιο: Ενισχυτής Ρεύματος	49
4.2.4 4 ^ο στάδιο: Ανάδραση.....	58
4.3 Συνολικό Κύκλωμα	60
4.3.1 Block Διάγραμμα-Συνάρτηση Μεταφοράς	60

4.3.2	Συνολικός Θόρυβος Κυκλώματος	61
4.3.3	Προσομοιώσεις στο pSpice	62
Κεφάλαιο 5^ο: Κατασκευή πλακέτας και λήψη μετρήσεων		63
5.1	Σχεδίαση και Κατασκευή πλακέτας	63
5.2	DC Ανάλυση.....	66
5.3	Κανονικοποίηση της τάσης εξόδου σε κλίμακα πεδίου	75
5.4	AC ανάλυση	76
5.5	Ανάλυση Θορύβου	81
Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία		86
6.1	Συμπεράσματα – Πιθανές εφαρμογές.....	86
6.2	Πλάνα για μελλοντική εργασία	86
Βιβλιογραφία		87

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά LMP2022.....	42
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά OPA2674.....	50
Πίνακας 5.1 Τάση στις εξόδους του HMC2003 και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) συναρτήσει του ρεύματος I_L του x πηνίου.....	67
Πίνακας 5.2 Τάση στις εξόδους του αισθητήρα ανοιχτού βρόχου (HMC2003) και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) συναρτήσει του ρεύματος I_L του y πηνίου..	70
Πίνακας 5.3 Τάση στις εξόδους του αισθητήρα ανοιχτού βρόχου (HMC2003) και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) συναρτήσει του ρεύματος I_L του z πηνίου..	72
Πίνακας 5.4 Τάση εξόδου HMC2003 και HMC1001.....	75
Πίνακας 5.5 V_{pp} εισόδου (άκρα αντίστασης 10Ω) και εξόδου (άκρα αντίστασης $R_{feed} = 30\Omega$) για διάφορες τιμές συχνότητας (x-axis).....	79
Πίνακας 5.6 V_{pp} εισόδου (άκρα αντίστασης 10Ω) και εξόδου (άκρα αντίστασης $R_{feed} = 30\Omega$) για διάφορες τιμές συχνότητας (y-axis).....	79
Πίνακας 5.7 V_{pp} εισόδου (άκρα αντίστασης 10Ω) και εξόδου (άκρα αντίστασης $R_{feed} = 30\Omega$) για διάφορες τιμές συχνότητας (z-axis).....	80
Πίνακας 5.8 Peak και Floor (σε dBm και Volts) FFT της εισόδου του συστήματος...	84
Πίνακας 5.9 Peak του FFT της εξόδου του κυκλώματος.....	84
Πίνακας 5.10 Floor του FFT της εξόδου του κυκλώματος.....	85
Πίνακας 5.11 Δευτερεύουσες αρμονικές του FFT της εξόδου του κλυκώματος.....	85

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Ανιχνευτής-αισθητήρας μη επαφής που χρησιμοποιείται σε πληκτρολόγια. Ένας μόνιμος μαγνήτης στο έμβολο (plunger) λειτουργεί την επαφή.....	11
Εικόνα 1.2 Ο αισθητήρας Hall χρησιμοποιείται για την ανίχνευση θέσης του μόνιμου μαγνήτη. Η ροή του ρεύματος στα στατικά πηνία είναι σχεδιασμένη για να ελέγχεται ηλεκτρονικά.....	12
Εικόνα 2.1 Πίνακας Κατηγοριοποίησης Μαγνητικών Αισθητήρων βάσει του εύρους του πεδίου που μπορούν να μετρήσουν.....	15
Εικόνα 2.2 Το φαινόμενο Meissner σε ένα υπεραγώγιμο δακτύλιο με εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. (α) κανονικός (συνήθης) αγωγός, (β) και (γ) Το φαινόμενο Meissner (υπεραγωγός) και (δ) παραμένον ρεύμα.....	16
Εικόνα 2.3 Fluxgate με πυρήνα δακτυλίου.....	19
Εικόνα 2.4 (α) Κυματομορφή τυλίγματος διέγερσης, (β) Παραγόμενο πεδίο από κάθε «ημι-πυρήνα» χωρίς εξωτερικό πεδίο ($H_{ext}=0$), (γ) Παραγόμενο πεδίο από κάθε «ημι-πυρήνα» με επιβολή εξωτερικού πεδίου ($H_{ext}\neq 0$), (δ)Επαγόμενη τάση στο τύλιγμα λήψης (μάυρο) και προκύπτουσα τάση αν ο αισθητήρας είναι συντονισμένος (κόκκινο).....	19
Εικόνα 2.5 Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση ενός λεπτού φερρομαγνητικού υμενίου.....	22
Εικόνα 2.6 Σχηματικό κύκλωμα αισθητήρων AMR.....	23
Εικόνα 2.7 Τυπική απόκλιση AMR αισθητήρα σε επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.....	24
Εικόνα 2.8 Κάθετη διατομή του GMR.....	25
Εικόνα 2.9 Στοιχείο εγγραφής με την κλασική επαγωγική τεχνική και στοιχείο ανάγνωσης με την τεχνική GMR.....	25
Εικόνα 2.10 Κεφαλή GMR.....	26
Εικόνα 2.11 Φαινόμενο Hall σε ρευματοφόρο πλακίδιο.....	27
Εικόνα 2.12 Ο αισθητήρας φαινομένου Hall σε λειτουργία διακόπτη μεταγωγής: (Α) η μαγνητική ροή ενεργοποιεί τον αισθητήρα (ON), (Β) η μαγνητική ροή εμποδίζεται από μεταλλική πλάκα (OFF).....	27
Εικόνα 3.1 Μαγνητοαντίσταση σε διάταξη γέφυρας Wheatstone.....	30
Εικόνα 3.2 Προσανατολισμός μαγνητικών περιοχών της αντίστασης υπερκράματος NiFe του αισθητήρα AMR.....	31
Εικόνα 3.3 Διάγραμμα τάσης απόκλισης και υπολογισμός της.....	34
Εικόνα 3.4 Αντιστάθμιση με αντίσταση παράκαμψης.....	34
Εικόνα 3.5 Αντιστάθμιση μέσω πόλωσης στον τελεστικό ενισχυτή.....	35
Εικόνα 3.6 (α) Διακοπτόμενη έξοδος γέφυρας, (β) Κύκλωμα υλοποίησης διακοπτόμενης μεθόδου.....	35
Εικόνα 3.7 Κύκλωμα οδήγησης ρεύματος.....	36

Εικόνα 3.8 Γέφυρα Wheatstone.....	36
Εικόνα 3.9 Ανάλυση κυκλώματος γέφυρας Wheatstone κατά Thevenin: (α) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης αντίστασης κατά Thevenin (β) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης πηγής τάσης κατά Thevenin, (γ) Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin...	37
Εικόνα 4.1 Συνολικό κύκλωμα αισθητήρα κλειστού βρόχου (ενός άξονα).....	39
Εικόνα 4.2 Προτεινόμενο μοντέλο αισθητήρα.....	40
Εικόνα 4.3 Κλασικό κύκλωμα Ενισχυτή Οργάνων Μέτρησης (Instrumentation Amplifier,IA).....	41
Εικόνα 4.4 Σχηματικό chopper amplifier.....	43
Εικόνα 4.5 Θεωρητική ανάλυση κυκλώματος chopper amplifier.....	44
Εικόνα 4.6 Αρχικός γράφος του κυκλώματος chopper amplifier.....	44
Εικόνα 4.7 I-γράφος (αριστερά) και V-γράφος (δεξιά) του κυκλώματος chopper amplifier.....	45
Εικόνα 4.8 Ισοδύναμο κύκλωμα για την ανάλυση θορύβου.....	46
Εικόνα 4.9 Θόρυβος chopper amplifier συναρτήσει της συχνότητας f.....	47
Εικόνα 4.10 Υλοποίηση Chopper amplifier (LMP2022) στο Spice.....	48
Εικόνα 4.11 Πλάτος (σε V) σε σχέση με το χρόνο (σε ms) της εισόδου (πράσινο) και της εξόδου (κόκκινο) του chopper amplifier (LMP2022)	48
Εικόνα 4.12 Διάγραμμα Bode Πλάτους (πάνω) και Φάσης (κάτω) του ενισχυτή chopper (2ο στάδιο).....	49
Εικόνα 4.13 Σχηματικό ενισχυτή ρεύματος (2ο στάδιο).....	50
Εικόνα 4.14 Αναλυτικό κύκλωμα που δείχνει την απόκριση συχνότητας μικρού σήματος του OPA2674.....	50
Εικόνα 4.15 Θεωρητική ανάλυση κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος.....	51
Εικόνα 4.16 Αρχικός γράφος του κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος.....	52
Εικόνα 4.17 I-γράφος κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος.....	52
Εικόνα 4.18 V-γράφος κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος.....	53
Εικόνα 4.19 Ισοδύναμο κύκλωμα για την ανάλυση θορύβου του ενισχυτή οργάνων μέτρησης του 2ου σταδίου.....	56
Εικόνα 4.20 Υλοποίηση ενισχυτή ρεύματος (OPA2674) στο Spice.....	57
Εικόνα 4.21 Πλάτος (σε mV) σε σχέση με το χρόνο (σε ms) της εισόδου (κόκκινο) και της εξόδου (πράσινο) του ενισχυτή ρεύματος OPA2674.....	57
Εικόνα 4.22 Διάγραμμα Bode Πλάτους (πάνω) και Φάσης (κάτω) του ενισχυτή ισχύος (3ο στάδιο).....	58
Εικόνα 4.23 VPR221.....	58
Εικόνα 4.24 Κύκλωμα ανάδρασης.....	59
Εικόνα 4.25 Block διάγραμμα συνολικού κυκλώματος.....	60
Εικόνα 4.26 Απλουστευμένο block διάγραμμα του συνολικού κυκλώματος.....	61

Εικόνα 4.27: Block διάγραμμα συμπεριλαμβανομένων των πηγών θορύβου.....	62
Εικόνα 4.28 Διάγραμμα Bode Κέρδους (πάνω) & Φάσης (κάτω) του συνολικού κυκλώματος.....	62
Εικόνα 5.1 Αισθητήρες HMC1001/1002, H-bridge (HPR7) για S/R και αντιστάσεις ανάδρασης (VPR221) για τους τρεις άξονες.....	63
Εικόνα 5.2 Chopper amplifier και ενισχυτής ρεύματος για τον ένα άξονα (x axis)...	64
Εικόνα 5.3 Analog-to-Digital Converter ADS1262.....	64
Εικόνα 5.4 Κύκλωμα τροφοδοσίας, Regulators και φίλτρα.....	65
Εικόνα 5.5 Top (αριστερά) και Bottom Layer (δεξιά) της πλακέτας σε 3D μορφή.....	65
Εικόνα 5.6 (α) πηνία Helmholtz, (β) τοποθέτηση πλακέτας για μετρήσεις στον x και y άξονα, (γ) τοποθέτηση πλακέτας για μετρήσεις στον z άξονα.....	66
Εικόνα 5.7 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 στους τρεις άξονες.....	68
Εικόνα 5.8 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) στους τρεις άξονες.....	68
Εικόνα 5.9 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού (HMC2003) και κλειστού βρόχου στον ένα άξονα.....	69
Εικόνα 5.10 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού & κλειστού βρόχου (x-axis) (γύρω από το 0).....	69
Εικόνα 5.11 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 στους τρεις άξονες.....	71
Εικόνα 5.12 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) στους τρεις άξονες.....	71
Εικόνα 5.13 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού (HMC2003) και κλειστού βρόχου στον y άξονα.....	72
Εικόνα 5.14 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού & κλειστού βρόχου (y-axis) (γύρω από το 0).....	72
Εικόνα 5.15 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 στους τρεις άξονες.....	73
Εικόνα 5.16 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) στους τρεις άξονες.....	74
Εικόνα 5.17 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού (HMC2003) και κλειστού βρόχου στον ένα άξονα.....	74
Εικόνα 5.18 I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού & κλειστού βρόχου (x-axis) (γύρω από το 0).....	74
Εικόνα 5.19 Χαρακτηριστική τάσης εξόδου HMC1001-τάσης εξόδου HMC2003...	76
Εικόνα 5.20 Είσοδος (μοβ) και διαφορική έξοδος (ροζ) αισθητήρα (x-axis) για: α) f=50Hz, β) f=100Hz, γ) f=500Hz, δ) f=1000Hz.....	77
Εικόνα 5.21 Είσοδος (μοβ) και διαφορική έξοδος (πράσινο) αισθητήρα (y-axis) για: α) f=50Hz, β) f=100Hz, γ) f=500Hz, δ) f=1500Hz.....	78

Εικόνα 5.22 Είσοδος (μoβ) και διαφορική έξοδος (πράσινο) αισθητήρα (z-axis) για: α) $f=50\text{Hz}$, β) $f=100\text{Hz}$, γ) $f=500\text{Hz}$, δ) $f=1500\text{Hz}$	78
Εικόνα 5.23 Διάγραμμα Bode αισθητήρα κλειστού βρόχου (x,y,z axis).....	81
Εικόνα 5.24 FFT εξόδου του κυκλώματος χωρίς διέγερση.....	82
Εικόνα 5.25 (α) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=100\text{Hz}$	82
Εικόνα 5.25 (β) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=500\text{Hz}$	83
Εικόνα 5.25 (γ) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=1\text{kHz}$	83
Εικόνα 5.25 (δ) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=2\text{kHz}$	83

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου στη φύση

Ο μαγνητικός αισθητήρας αποτελεί θεμελιώδη μορφή αισθητήρα που χρησιμοποιείται ανέκαθεν από τη φύση και τα πλάσματά της. Συγκεκριμένα, το μαγνητικό πεδίο της Γης ασκεί κάποιες δυνάμεις σε αντικείμενα, όπως τα αποδημητικά πουλιά, οι οποίες προέρχονται και από τους δύο μαγνητικούς πόλους της Γης. Το πεδίο είναι ισχυρότερο κοντά στους πόλους και μεταβάλλεται σταθερά με το γεωγραφικό πλάτος, την ώρα της ημέρας, τις ηλιακές κηλίδες, και διάφορες ανωμαλίες του πεδίου.

Μερικά πουλιά, βακτήρια (μαγνητοτακτικά βακτήρια), φάλαινες, μέλισσες, βάτραχοι, σαύρες, ινδικά χοιρίδια, σολομοί και χελώνες, βρίσκουν το δρόμο τους με την αίσθηση του μαγνητικού πεδίου της Γης (μαζί βέβαια με άλλες ενδείξεις). Όταν οι μέλισσες εκτελούν κάποια ημερήσια καθήκοντα μέσα στο περιβάλλον μιας σκοτεινής κυψέλης, γνωρίζουν την ώρα της ημέρας από τις ημερήσιες μεταβολές του πεδίου. Πράγματι, το γήινο μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει έναν ημερήσιο κύκλο στην έντασή του - είναι πιο σταθερό κατά τη νύχτα και πιο δραστήριο την ημέρα, επειδή η ιονόσφαιρα θερμαίνεται και δημιουργούνται ηλεκτρικά ρεύματα.

Μέσα στο σώμα των μελισσών, όπως και σε άλλα πλάσματα, έχουν βρεθεί μικροσκοπικοί κρύσταλλοι μαγνητίτη, μιας φυσικής ουσίας μαγνήτη. Τα κύτταρα που περιέχουν αυτούς τους κρυστάλλους συνδέονται με το νευρικό σύστημα των μελισσών. Οι μέλισσες, όπως οι πέστροφες και κάποια θαλάσσια κήτη ανιχνεύουν μαγνητικά πεδία. Χρησιμοποιούν μάλιστα το μαγνητικό πεδίο της γης για να κατασκευάζουν τις κηρήθρες στις φωλιές τους στην φύση και για να προσανατολίζονται χωρίς να κινδυνεύουν να χάσουν την κυψέλη τους κατά την επιστροφή τους από την συλλογή τροφών.

Τα μικρά της θαλάσσιας χελώνας -όχι μεγαλύτερα από μια παιδική παλάμη,- βρίσκουν το δρόμο τους καθώς βγαίνουν κάτω από την άμμο, κατευθύνονται προς τον ωκεανό που δεν έχουν δει ποτέ τους, και κολυμπούν ακολουθώντας τους μεταναστευτικούς τους δρόμους μέσα στους ωκεανούς. Όταν φτάνουν στα βαθιά νερά, όπου οι σχηματισμοί των κυμάτων δεν είναι αξιόπιστοι πλοηγοί, χρησιμοποιούν ως πλοηγό μόνο το μαγνητικό πεδίο. Με τον τρόπο αυτό διασχίζουν κάπου 9.000 μίλια στον Βόρειο Ατλαντικό πριν επιστρέψουν ως νεαρά άτομα στην ακτή, όπου μεγαλώνουν με παράκτια διατροφή.

Οι φάλαινες εξοκείλουν σε ακτές όπου το γήινο μαγνητικό πεδίο διαφέρει από την συνήθη μορφή του, και μπερδεύει τον προσανατολισμό τους.

Οι χήνες του Καναδά προφανώς "βλέπουν" το μαγνητικό πεδίο. Αυτές δεν χρησιμοποιούν μια βιοπυξίδα για να κατευθυνθούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Μάλλον εκδηλώνουν ένα είδος ανάδρασης όταν ξεστρατίζουν από την επιθυμητή πορεία. Ίσως η όρασή τους θολώνει (όπως η οθόνη της τηλεόρασης από τα παράσιτα), και ξεκαθαρίζει μόνον όταν επιστρέψουν στην σωστή διαδρομή τους.

Ακόμη και οι άνθρωποι έχουν ένα μηχανισμό σε μοριακό επίπεδο, για να ανιχνεύουν τα μαγνητικά πεδία, δεν φαίνεται όμως ότι τον χρησιμοποιούν για να βρίσκουν την κατεύθυνσή τους. Τόσο εμείς όσο και άλλα ζώα έχουμε υποδοχείς στα μάτια και τον εγκέφαλο, δηλαδή πρωτεΐνες που απορροφούν το φως και από την δράση του μαγνητικού πεδίου του φωτός, μας πληροφορούν για το χρώμα και την διάκριση ημέρας και νύχτας. Ο υποδοχέας που μας δημιουργεί το αίσθημα της νύστας κατά την νύχτα, επεξεργάζεται επίσης μαγνητικά σήματα. Τα βιολογικά ρολόγια των ζώων, όχι μόνο τους μετράνε τον χρόνο, αλλά τους κάνουν να αισθάνονται και τα μαγνητικά πεδία.

1.2 Ιστορική Αναδρομή αισθητήρων μαγνητικού πεδίου

Τον 12ο αιώνα, οι ναυτικοί στην Κίνα και την Ευρώπη ανακάλυψαν, ότι ένα κομμάτι τετροξειδίου του σιδήρου ακολουθεί ισχυρά τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου της Γης, έχοντας ανακαλύψει την σημερινή μας πυξίδα. Στην περίπτωση αυτή, το ρόλο του αισθητήρα τον έπαιξε η μαγνητική βελόνη μετατρέποντας το Γήινο μαγνητικό σήμα σε μηχανική περιστροφή.

Στα 1820 ο Oersted ανακάλυψε ότι ένα ηλεκτροφόρο καλώδιο επηρεάζει μια μαγνητική πυξίδα και έτσι άρχισε μια νέα εποχή για το ηλεκτρομαγνητισμό. Η ανακάλυψη του Oersted οδήγησε αρκετούς επιστήμονες της εποχής σε μια σειρά ανακαλύψεων μαγνητικών φαινομένων κυρίως στο 2ο μισό του 19ου αιώνα.

Ένα από τα νέα αυτά μαγνητικά φαινόμενα είναι και το φαινόμενο Hall που ανακαλύφθηκε από τον Edwin H. Hall το 1879. Τότε ως μεταπτυχιακός φοιτητής στο πανεπιστήμιο John Hopkins της Βαλτιμόρης προσπαθούσε να αποδείξει ότι ο μαγνήτης προκαλεί κυκλοφορία ρεύματος και όχι το αντίθετο όπως πίστευαν εκείνη την εποχή. Χρησιμοποιούσε μια διάταξη όπου περνούσε ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από ένα λεπτό χρυσό μεταλλικό φύλλο προστατευμένο με γυαλί. Ευαίσθητα γαλβανόμετρα συνδέονταν κατά πλάτος του φύλλου σε δύο ισοδυναμικά σημεία και όλο το σύστημα τοποθετούνταν μέσα σε ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνήτη. Πειραματιζόμενος ο Hall ανακάλυψε ότι ο μαγνήτης προκαλεί φαινόμενο επίδρασης στο ηλεκτρικό ρεύμα κάτι που δεν είχε παρατηρηθεί ποτέ έως τότε. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται “φαινόμενο Hall”. Το ηλεκτρικό ρεύμα “πέζεται” αλλά δεν κινείται κατευθείαν προς τις πλευρές του μεταλλικού φύλλου από μια κεντρική δύναμη. Αυτή η νέα ηλεκτρεγερτική δύναμη αποδείχθηκε ότι είναι ανάλογη της πυκνότητας του υλικού του μεταλλικού φύλλου και της ταχύτητας των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο Ολλανδός φυσικός H. A. Lorentz ήταν ο πρώτος που εξήγησε αυτή την δύναμη, η οποία ασκείται στους ηλεκτρικούς φορείς παρουσία μαγνητικού πεδίου και που τώρα φέρει το όνομα του.

Το πυρίτιο έγινε ένα ενδιαφέρον υλικό για τους μαγνητικούς αισθητήρες κάπως αργά όταν έγινε ικανοποιητική η τεχνολογία του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Ο λόγος για την αυξανόμενη σημασία του πυριτίου ως χρήσιμο υλικό για τους μαγνητικούς αισθητήρες έναντι άλλων υλικών όπως GaAs και InSb, τα οποία έχουν πολύ υψηλότερη κινητικότητα Hall, είναι η ευκολία της ολοκλήρωσης του, που το καθιστά ικανό όχι μόνο να φιλοξενήσει τον αισθητήρα αλλά και την διάταξη για την ενίσχυση του σήματος εισόδου, πάνω στο ίδιο το ολοκληρωμένο.

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

Η τεχνολογία των μαγνητικών αισθητήρων βελτιώθηκε πολύ από την ανάγκη για αυξημένη ευαισθησία, μικρότερο μέγεθος και για λόγους συμβατότητας με άλλα ηλεκτρονικά συστήματα και εξοπλισμό.

1.3 Εφαρμογές Μαγνητικών Αισθητήρων

Ένας μαγνητικού πεδίου αισθητήρας (π.χ. ο αισθητήρας Hall) είναι ένας μετατροπέας-μηχανή που μετατρέπει το μαγνητικό σήμα σε χρήσιμο ηλεκτρικό σήμα. Τα μαγνητικά φαινόμενα μπορούν να περιγραφούν με βασικές ποσότητες όπως η μαγνητική ένταση H , η μαγνητική πυκνότητα ροής B και η παραμένουσα μαγνήτιση M . Η σχέση ανάμεσα στις παραπάνω ποσότητες δίνεται ως:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Η χρήση των μαγνητικών αισθητήρων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε άμεσες και έμμεσες εφαρμογές. Άμεσες είναι οι εφαρμογές που αφορούν στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και μόνο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Μετρήσεις Πεδίου (απεικόνιση πεδίου) σε μαγνητικά υλικά και συσκευές
- Το Γήινο μαγνητικό πεδίο και η μέτρηση του για πλοήγηση σκαφών κ.α.
- Διάβασμα μνημών (σκληρούς δίσκους H/Y αλλά και φορητών δίσκων).
- Αναγνώριση μαγνητικών ταινιών με μελάνι σε κάρτες τραπεζών κ.α.

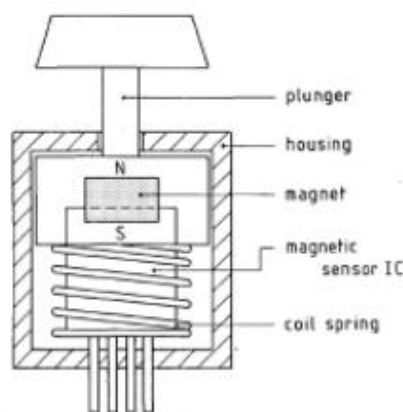
Το πρώτο παράδειγμα άμεσης εφαρμογής μέτρησης είναι αυτό που συμβαίνει στις μαγνητικές κεφαλές καταγραφής. Οι ποσότητες που μας ενδιαφέρουν είναι η διεύθυνση της έντασης του πεδίου και η χωρική του κατανομή. Επίσης, σε διαφορετική κλίμακα οι ίδιες ποσότητες είναι ενδιαφέρουσες στην φυσική υψηλών ενεργειών και στην μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων. Ακόμη, μια εφαρμογή της απευθείας μέτρησης της διεύθυνσης ενός μαγνητικού πεδίου, είναι η απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται σε μαγνητικές συσκευές των φωτοαντιγραφικών μηχανημάτων. Αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούν toner που αποδίδει μαγνητικές ιδιότητες στο χαρτί.

Σε αντίθεση με την απευθείας χρήση, όπου το μαγνητικό πεδίο από μόνο του είναι μια ποσότητα ενδιαφέρουσα, στις έμμεσες εφαρμογές μια μη μαγνητική ποσότητα μετριέται, καθώς το μαγνητικό πεδίο μεσολαβεί ως ενδιάμεσος παράγοντας. Η μη-μαγνητική μετρήσιμη ποσότητα είναι μαγνητικά κωδικοποιημένη και το

μαγνητικό σήμα μεταφέρει την πληροφορία της πραγματικής μη-μαγνητικής ποσότητας. Μερικά παραδείγματα είναι τα ακόλουθα:

- Γραμμική αλλαγή θέσης ή μετρήσεις θέσης.
- Γωνιακή αλλαγή ή μετρήσεις θέσης.
- Ανίχνευση μετάλλων.
- Μετρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος.
- Μετρήσεις ισχύος (σε Watt).
- Αναλογικοί πολλαπλασιαστές.
- Διαμορφωτές.
- Γαλβανικοί απομονωτές.

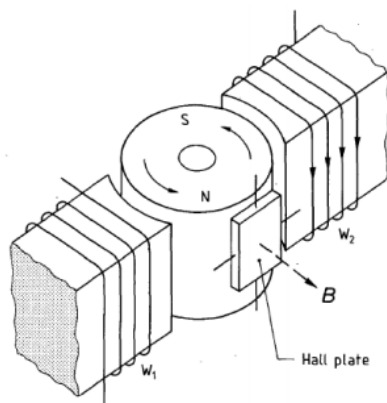
Στα πρώτα δύο παραδείγματα, η μηχανική ποσότητα μετριέται με την χρήση του μαγνητικού σήματος ως μεταφορέα πληροφορίας. Αυτή η μετατροπή μπορεί να είναι επιθυμητή ακόμα και εάν η μηχανική επαφή αγνοηθεί. Στην περίπτωση των μετρήσεων της γραμμικής και γωνιακής θέσης, υπάρχει μια σχέση μεταξύ των κινούμενων μερών που καθορίζεται από την θέση (όχι κατά ανάγκη και με επαφή) των μαγνητικών πηγών (μόνιμοι ή ηλεκτρομαγνήτες) και του μαγνητικού αισθητήρα. Το σήμα εξόδου του αισθητήρα εξαρτάται από την σχετική θέση του αισθητήρα και του μαγνήτη, που κάνει την ανίχνευση δυνατή. Ένα παράδειγμα της γραμμικής ανίχνευσης απεικονίζεται στην Εικόνα 1.1, όπου φαίνεται το πλήκτρο από ένα πληκτρολόγιο. Ο μαγνητικός ολοκληρωμένος αισθητήρας ανιχνεύει την θέση του εμβόλου με την βοήθεια του μόνιμου μαγνήτη που είναι στερεωμένος επάνω στο έμβολο. Συγκρινόμενοι με τους μηχανικούς διακόπτες, οι μαγνητικοί αισθητήρες είναι λιγότερο ευαίσθητοι στην επικοινωνία και δεν ανταποκρίνονται πολύ γρήγορα. Ωστόσο, παρουσιάζουν μεγάλη αξιοπιστία σε βάθος χρόνου, αφού έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



Εικόνα 1.1: Ανιχνευτής-αισθητήρας μη επαφής που χρησιμοποιείται σε πληκτρολόγιο. Ένας μόνιμος μαγνήτης στο έμβολο (plunger) λειτουργεί την επαφή.

Μια ακόμη έμμεση εφαρμογή του μαγνητικού αισθητήρα μπορεί να βρεθεί σε μια ψήκτρα ηλεκτροκινητήρα, σαν αυτή της Εικόνας 1.2, η οποία χρησιμεύει για την γωνιακή ανίχνευση θέσης. Σε αυτή την περίπτωση η θέση του μόνιμου μαγνήτη – περιστροφέα ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου (Hall Sensor). Το σήμα από τον αισθητήρα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για τον συγχρονισμό των

εναλλαγών του ρεύματος στα πηνία W_1 και W_2 . Παρόλο που υπάρχουν καλύτερα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, το συγκεκριμένο απλό σύστημα έχει πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή αντοχή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες και μεγάλη αξιοπιστία. Ψήκτρες σαν αυτή της Εικόνας 1.2 υπάρχουν σήμερα σε πολλές συσκευές όπως στις κεφαλές των βίντεο, στα CD και DVD, καθώς και στα συστήματα πέδησης των αυτοκινήτων (ABS).



Εικόνα 1.2: Ο αισθητήρας Hall χρησιμοποιείται για την ανίχνευση θέσης του μόνιμου μαγνήτη. Η ροή του ρεύματος στα στατικά πηνία είναι σχεδιασμένη για να ελέγχεται ηλεκτρονικά.

Ομοίως, αισθητήρες μαγνητικού πεδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της θέσης σε στροφαλοφόρους άξονες και άλλα κινούμενα μέρη μηχανών. Εάν η θέση ενός άξονα καταγραφεί μαγνητικά με την μέθοδο της ανίχνευσης χωρίς επαφή, τότε τα οφέλη είναι πολλά, αφού μπορεί για παράδειγμα να ορισθεί ακριβώς το σημείο εκκίνησης της περιστροφής του άξονα. Τέτοιες μαγνητικές ανιχνεύσεις χρησιμοποιούνται στις σέρβο-μηχανές και σε κινητήρες.

Στην ανίχνευση της κυκλοφοριακής κίνησης είναι δυνατή η μέτρηση της διακύμανσης του Γήινου μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στην κίνηση των μεταλλικών αυτοκινήτων. Επιπλέον, μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα για το μέγεθος και τη διεύθυνση του ρεύματος μέσα σε έναν αγωγό, χωρίς τη διακοπή της ροής του ρεύματος, μετρώντας το πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού, αφού όπως γνωρίζουμε, ο νόμος του Ampere συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο σε έναν κλειστό (νοητό) βρόχο με το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά μέσα από το βρόχο ως εξής:

$$\Phi_B = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = I_{enc}$$

όπου,

\oint είναι το κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα από το σύνορο (την κλειστή καμπύλη C)

\mathbf{H} είναι το μαγνητικό πεδίο (A/m), $d\mathbf{l}$ είναι το απειροστό διαφορικό στοιχείο του συνόρου C, \mathbf{J} είναι η πυκνότητα ρεύματος (A/m²) μέσα από την επιφάνεια S που περικλείεται από το σύνορο C, $d\mathbf{S}$ είναι το διανυσματικό διαφορικό στοιχείο εμβαδού της επιφάνειας S, με απειροστά μικρό μέγεθος και κατεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια S, και I_{enc} είναι το ρεύμα που διέρχεται μέσα από την καμπύλη C, ή αλλιώς, το ρεύμα που διαπερνά την επιφάνεια S, της οποίας σύνορο είναι ο βρόχος C.

Το πεδίο που συνεργάζεται με το ρεύμα στον αγωγό μπορεί να χρησιμοποιηθεί άριστα για μετρήσεις ισχύος.

Κεφάλαιο 2^ο : Μαγνητικοί Αισθητήρες–Ιδιότητες & Κατηγοριοποίησή τους

2.1 *Ιδιότητες Μαγνητικών αισθητήρων*

Κάθε μια από τις εφαρμογές των μαγνητικών αισθητήρων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιβάλλει τις δικές της απαιτήσεις στις ηλεκτρονικές και μηχανικές ιδιότητες των μετατροπέων – αισθητήρων. Οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύπτουν μια μεγάλη γκάμα από μαγνητικά μεγέθη για τις παραπάνω εφαρμογές.

Αρχικά, το μέγεθος του σήματος εξόδου από τους αισθητήρες ανά μονάδα ευαισθησίας, είναι μια από πιο σημαντικές απαιτήσεις των σύγχρονων αισθητήρων. Εάν το σήμα εξόδου είναι πολύ χαμηλό για να είναι χρήσιμο, φαινόμενο το οποίο παρατηρείται κυρίως σε σταθερούς αισθητήρες, τότε είναι απαραίτητη η ενίσχυσή του. Ένα όριο της μέγιστης και πρακτικής ενίσχυσης προσδιορίζεται από τον λόγο του σήματος προς τον θόρυβο (S/N ratio) του αισθητήρα. Δεν υπάρχει ιδανική ενίσχυση χωρίς να κινδυνεύει το σήμα να πνιγεί στον θόρυβο.

Αντίθετα με τον διακόπτη της Εικόνας 1.1 που έχει δυο καταστάσεις (on/off), οι περισσότερες γραμμικές και γωνιακές ανιχνεύσεις απαιτούν υψηλό βαθμό γραμμικότητας του σήματος της εξόδου σε συνάρτηση με την μέτρηση. Επίσης, είναι επιθυμητό, η τιμή του offset να παραμένει σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα.

Εξαιτίας των εγγενών πλεονεκτημάτων της, η τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχει προσφέρει αρκετά σε ότι αφορά στο μέγεθος και το βάρος των πυριτικών μαγνητικών αισθητήρων, έτσι ώστε αυτά να μην αποτελούν πια πρόβλημα. Από την άλλη πλευρά όμως, οι ολοένα και μικρότερες δομές οδηγούν σε νέες δυσκολίες, όπως για παράδειγμα η χωρική διακριτική ικανότητα των μαγνητικών μετρήσεων.

Μια επιπλέον ιδιότητα, στην οποία δίνεται ιδιαίτερο βάρος είναι η συσκευασία (packaging) των μαγνητικών αισθητήρων. Συνήθως, τα ηλεκτρονικά συστήματα και κυκλώματα κρατούνται μακριά από εχθρικά περιβάλλοντα. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει και με τους αισθητήρες που πρέπει πολλές φορές να έρχονται σε επαφή με δύσκολες συνθήκες (π.χ. θερμότητα, ακτινοβολία κ.α.). Η συσκευασία επομένως, θα πρέπει να πληροί τις δυο παρακάτω συνθήκες:

- Να μην εμποδίζει ή να αλλοιώνει την μέτρηση.
- Να προφυλάσσει τον αισθητήρα από οτιδήποτε θα μπορούσε να αντιταχθεί στην απόδοσή του.

Για παράδειγμα, ένας μαγνητικός αισθητήρας που χρησιμοποιείται σε ένα στροφαλοφόρο άξονα για μέτρηση γωνιακής θέσης, λειτουργεί σε εξαιρετικά εχθρικό περιβάλλον. Μπορεί να έρχεται σε επαφή με διάφορα καταστροφικά για την σωστή λειτουργία του χημικά (λάδι, υγρασία, νερό), υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές δονήσεις. Η καλή συσκευασία του εν λόγω αισθητήρα, αποτελεί τη βάση για την υψηλή απόδοση και τη σωστή λειτουργία του. Αξίζει να σημειώσουμε, ότι στους

ηλεκτρικούς κινητήρες παίζει σημαντικό ρόλο το μέγεθος και το σχήμα της συσκευασίας του αισθητήρα.

Στην ακόλουθη λίστα συνοψίζουμε τις βασικές ιδιότητες/κριτήρια που πρέπει να ταιριάζουν μεταξύ μιας εφαρμογής και ενός μαγνητικού αισθητήρα:

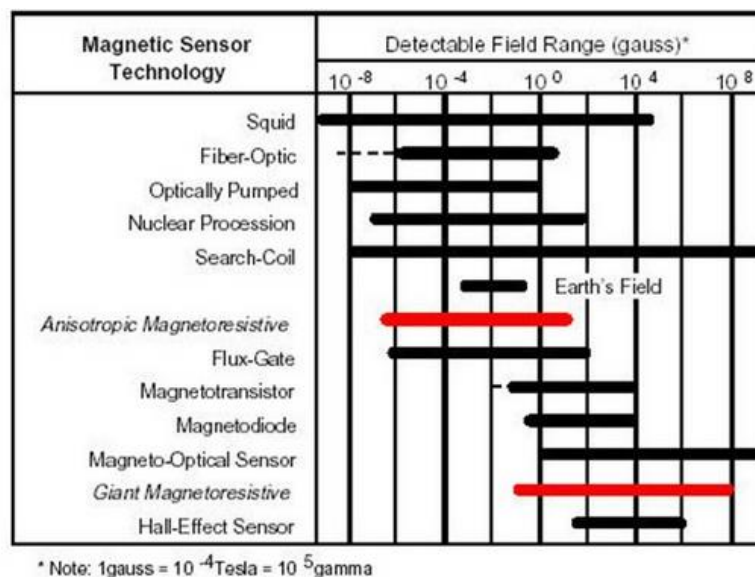
- Μαγνητική κλίμακα
- Μαγνητική ευαισθησία
- Προσανατολισμός της ευαισθησίας με σεβασμό στον προσανατολισμό του αισθητήρα
- Μαγνητική διακριτική ικανότητα
- Χωρική διακριτική ικανότητα των μετρήσεων
- Ικανότητα να μετρηθούν περισσότερες συνιστώσες του μαγνητικού διανύσματος
- Γραμμικότητα
- Υψηλή απόκριση συχνότητας
- Απόκλιση (Offset) του σημείου αναφοράς
- Θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών
- Θερμοκρασιακή κλίμακα στην οποία ο αισθητήρας λειτουργεί
- Μετατόπιση των χαρακτηριστικών
- Μέγεθος αισθητήρα
- Βάρος αισθητήρα μαζί με την συσκευασία
- Κατανάλωση ισχύος και απώλειες
- Αξιοπιστία
- Χρόνος ζωής
- Κόστος παραγωγής και συσκευασίας

2.2 Ταξινόμηση Μαγνητικών Αισθητήρων

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατηγοριοποίηση των αισθητήρων μαγνητικού πεδίου. Μια δυνατότητα είναι η κατηγοριοποίηση με βάση το εξερχόμενο σήμα, που αναλύεται σε τρεις κατηγορίες αισθητήρων: τάσης, ρεύματος και συχνότητας. Ακόμα μια πιθανότητα είναι η κατηγοριοποίηση που βασίζεται σε μηχανισμούς που καθορίζουν την ευαισθησία. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανή κατηγοριοποίηση μπορεί να είναι: αισθητήρες Hall, συσκευές εκτροπής φορέων, συσκευές διαμόρφωσης έκχυσης κ.α.

Η κατηγοριοποίηση των μαγνητικών αισθητήρων που έχει επιλεγεί στην παρούσα ανάλυση βασίζεται στο εύρος των μαγνητικών πεδίων που αυτοί μπορούν να μετρήσουν. Μπορούμε λοιπόν να ταξινομήσουμε τους μαγνητικούς αισθητήρες σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Αρχικά, οι *αισθητήρες ασθενούς μαγνητικού πεδίου* μπορούν να μετρήσουν ασθενή πεδία, δηλαδή πεδία μικρότερα από 1mgauss. Δεύτερον, οι *αισθητήρες μέσου μαγνητικού πεδίου* μετρούν πεδία που βρίσκονται στο εύρος από 1mgauss έως 10gauss. Τέλος, οι *αισθητήρες υψηλού μαγνητικού πεδίου* μπορούν να μετρήσουν πεδία ισχυρότερα από 10gauss.

Το ακόλουθο διάγραμμα περιλαμβάνει τα κυριότερα είδη μαγνητικών αισθητήρων, που κατηγοριοποιούνται με βάση το εύρος του μαγνητικού πεδίου το οποίο μπορούν να μετρήσουν.



Εικόνα 2.1: Πίνακας Κατηγοριοποίησης Μαγνητικών Αισθητήρων βάσει του εύρους του πεδίου που μπορούν να μετρήσουν

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά ορισμένους αισθητήρες από κάθε μία από τις τρεις προαναφερθείσες κατηγορίες.

2.2.1 Αισθητήρες Ασθενούς Μαγνητικού Πεδίου

2.2.1.1 SQUIDS (Superconducting Quantum Inference Devices)

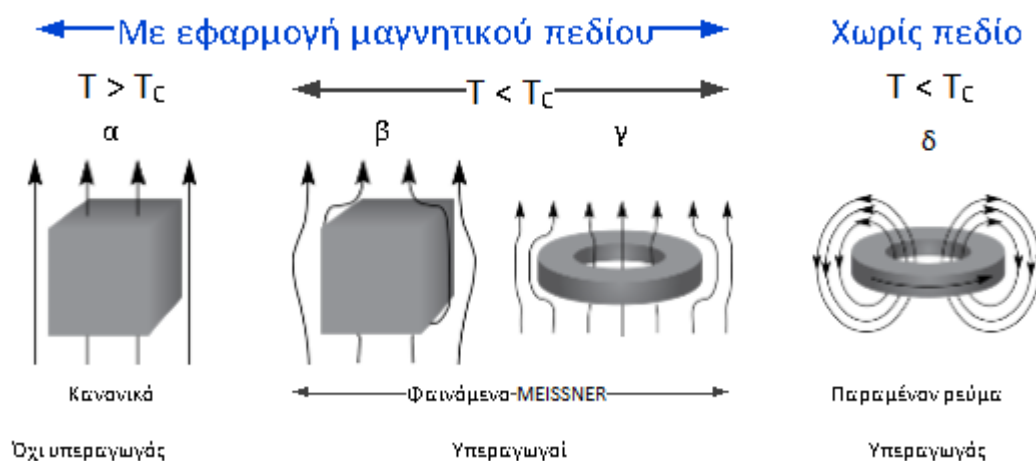
Προκειμένου να κατανοήσουμε ευκολότερα τα μαγνητόμετρα SQUIDS και τη λειτουργία τους, αξίζει να αναφερθούμε πρώτα στην έννοια των υπεραγωγών.

Το 1911, ο Kammerlingh Onnes ανακάλυψε ότι σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η ηλεκτρική αντίσταση του υδράργυρου μηδενίζεται, δηλαδή η αγωγιμότητά του γίνεται άπειρη. Με άλλα λόγια, κάτω από τη θερμοκρασία των 4.2Kelvin, ο υδράργυρος εκδηλώνει «υπεραγωγιμότητα». Η εργαστηριακή εμπειρία έδειξε τελικά, ότι και άλλα μέταλλα, σε μια χαρακτηριστική για το καθένα τιμή θερμοκρασίας (κρίσιμη θερμοκρασία), χάνουν την ηλεκτρική τους αντίσταση. Σύμφωνα με την θεωρία Bardeen-Cooper-Schriber (BCS), ο μηχανισμός που επιτρέπει αυτή την υπεραγωγιμότητα, είναι το ζευγάρι των ηλεκτρονίων με ενέργεια κοντά στη στάθμη Fermi, σε «ζεύγος Cooper», μέσα από την αλληλεπίδραση με το κρυσταλλικό πλέγμα. Το ζευγάρι συνοδεύεται από μία ασθενική έλξη σχετιζόμενη με τις ταλαντώσεις του πλέγματος. Η σύζευξη με το πλέγμα λέγεται και αλληλεπίδραση φωνονίων (phonon).

Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα των υπεραγωγών είναι, ότι το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο κάνει την εμφάνισή του σε αυτούς, δεν συνεπάγεται – όπως συνήθως – υποβάθμιση της ενέργειας, δηλαδή μετατροπή της σε θερμική. Αντίθετα, έχει διαπιστωθεί, ότι ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργούνται σε κλειστά υπεραγωγία

κυκλώματα διατηρούνται επί χρόνια χωρίς απόσβεση, παρόλο που στα κυκλώματα αυτά δεν υπάρχει καμία ηλεκτρική πηγή.

Ένα εντυπωσιακό φαινόμενο που συνοδεύει την εκδήλωση υπεραγωγιμότητας, είναι το **φαινόμενο Meissner**. Ένα υπεραγώγιμο υλικό σε θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη T_c , εάν βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο, απωθεί όλες τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 2.2, παρατηρούμε ότι στην κανονική κατάσταση (Σχήμα 2.2(α)), οι γραμμές της μαγνητικής ροής διαπερνούν το υλικό. Καθώς το υλικό γίνεται υπεραγώγιμο (Σχήμα 2.2(β)), η μαγνητική ροή σταματά να το διαπερνά. Αυτό συμβαίνει σαν συνέπεια των εξισώσεων Maxwell, στις οποίες δεν μπορεί να υπάρξει διαφορά δυναμικού πεδίου μέσα στον υπεραγωγό. Αν ο υπεραγωγός έχει σχήμα δακτυλίου (Σχήμα 2.2(γ)), η μαγνητική ροή που διέρχεται από το εσωτερικό του δακτυλίου εγκλωβίζεται. Τέλος, στο Σχήμα 2.2(δ) παρατηρούμε, ότι αν η μαγνητική ροή διακοπεί, εμφανίζεται επαγόμενο ρεύμα που περιφέρεται γύρω από το δακτύλιο και το οποίο τείνει να διατηρήσει τη μαγνητική ροή σταθερή.



Εικόνα 2.2: Το φαινόμενο Meissner σε ένα υπεραγώγιμο δακτύλιο με εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. (α) κανονικός (συνήθης) αγωγός, (β) και (γ) Το φαινόμενο Meissner (υπεραγωγός) και (δ) παραμένον ρεύμα

Έστω ότι έχουμε ένα υπεραγώγιμο σύρμα σε βρόχο, ο οποίος διακόπτεται με μια περιοχή με κανονική αντίσταση. Θα περίμενε κανείς, ότι ο βρόχος αυτός θα συμπεριφερθεί σαν κανονικός αγωγός, και ότι η τιμή του ρεύματος που τον διαρρέει όταν η διέγερση είναι μηδενική θα μειωθεί γρήγορα. Ωστόσο, το 1962, ο 22χρονος φοιτητής του Cambridge University Brian D. Josephson προέβλεψε, ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι πιθανό να κάνει την εμφάνισή του μεταξύ δυο υπεραγώγιμων υλικών, ακόμα και αν μεταξύ του βρίσκεται ένα μη υπεραγώγιμο υλικό ή ένας μονωτής. Η πρόβλεψή του επιβεβαιώθηκε και τιμήθηκε με το βραβείο Nobel το 1973.

Τα μαγνητόμετρα SQUIDS βασίζονται στο φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, το οποίο περιγράψαμε προηγουμένως. 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.

Η επαφή Josephson είναι φτιαγμένη από δυο υπεραγωγούς που χωρίζονται από ένα πολύ λεπτό μονωτικό στρώμα, ώστε τα ηλεκτρόνια να μπορούν να το διαπερνούν. Τα μαγνητόμετρα SQUID αποτελούνται από δυο μικροσκοπικούς βρόχους υπεραγωγών που λειτουργούν ως επαφές Josephson, με τους οποίους επιτυγχάνεται υπέρθεση (superposition): Κάθε ηλεκτρόνιο κινείται ταυτόχρονα στις δυο κατευθύνσεις. Επειδή το ρεύμα κινείται σε δυο αντίθετες κατευθύνσεις, τα ηλεκτρόνια έχουν την ικανότητα να συμπεριφέρονται σαν qubits (κβαντικά bit), τα οποία θεωρητικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κβαντικούς υπολογισμούς.

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 «τεστάρουν».

Ωστόσο, όπως όλοι οι αισθητήρες, τα μαγνητόμετρα SQUID παρουσιάζουν μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα:

- ✓ Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιεί σαν πεδίο αναφοράς την μαγνητική ροπή που εγκλώβισε κατά τη μετάβαση από την μη υπεραγώγιμη στην υπεραγώγιμη κατάσταση.
- ✓ Η μέγιστη συχνότητα μαγνητικού πεδίου που μπορούν να μετρήσουν είναι τα 100kHz.
- ✓ Έχουν όριο στον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος, το οποίο δεν πρέπει να ξεπεραστεί.

Εν γένει, τα SQUID έχουν την υψηλότερη ανάλυση και ακρίβεια από όλα τα μαγνητόμετρα και οι περισσότεροι περιορισμοί προέρχονται από τα ηλεκτρονικά που τα συνοδεύουν.

2.2.1.2 Πηνία «Ανίχνευσης» (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 πυρήνα αέρα, σε συνδυασμό με μαγνητόμετρα πύλης ροής (fluxgate), τα οποία θα αναλύσουμε αργότερα, χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την DC συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αφαίρεση της μέτρησης των πηνίων ανίχνευσης από τη μέτρηση του fluxgate.

Τα πηνία με σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά είναι λιγότερο σταθερά από αυτά χωρίς σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τέτοιου είδους πηνία πρέπει να είναι μακριά και λεπτά και να έχουν χαμηλή απομαγνήτιση.

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 την μέτρηση και τη μελέτη των δευτερευόντων μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται μετά από διέγερση, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος Barkhausen. Στην ιατρική, χρησιμοποιούνται για την μελέτη και την καταγραφή της κίνησης του ματιού.

Συγκεκριμένα, πηνία ανίχνευσης ενσωματώνονται σε ειδικούς φακούς επαφής ή ελαστικούς δακτύλιους, οι οποίοι τοποθετούνται στο μάτι. Τέλος, στο εύρος ακουστικών συχνοτήτων, μπορούν να λειτουργούν σαν μικρόφωνο.

Η απόκριση συχνότητας των πηνίων ανίχνευσης είναι γραμμική για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, το οποίο εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Τα πηνία πολλών τυλιγμάτων εμφανίζουν κατανομημένες χωρητικότητες και με την υψηλή τους επαγωγή προκαλούν συντονισμό στις χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, στις υψηλές συχνότητες, η έξοδος των πηνίων ανίχνευσης είναι μη γραμμική. Η παρασιτική χωρητικότητα επηρεάζεται από τη συχνότητα και κατά συνέπεια, η απόκριση συχνότητας αλλάζει με τη θερμοκρασία. Η τάση εξόδου είναι ανάλογη με τη συχνότητα, το δε ρεύμα εξόδου έχει μια επίπεδη απόκριση για συχνότητες $f \gg R/2\pi L$. Ο παράγοντας R/L εξαρτάται από την ποσότητα του χαλκού, τον αριθμό των σπειρών και τη διατομή του πηνίου, με την αύξηση της οποίας, αυξάνεται αισθητά και η ευαισθησία του πηνίου.

2.2.2 Αισθητήρες Μέσου Μαγνητικού Πεδίου ή Αισθητήρες Πεδίου γης

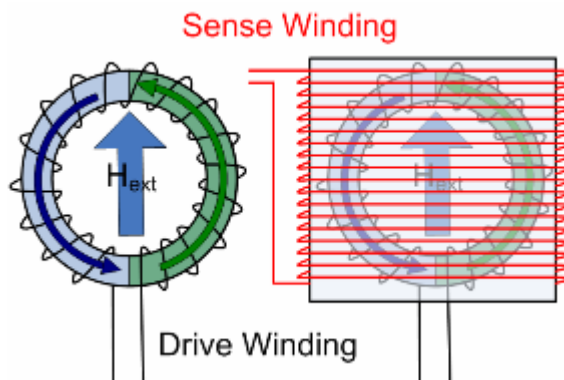
Οι μαγνητικοί αισθητήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν συχνά το μαγνητικό πεδίο της γης, ως αναφορά για να καθορίσουν π.χ. την πορεία ενός οχήματος ή/και να εντοπίσουν ανωμαλίες που το όχημα αυτό προκαλεί στο πεδίο. Όπως διαπιστώνουμε και από την Εικόνα 2.1, ορισμένοι αισθητήρες που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, είναι οι αισθητήρες πύλης ροής (fluxgate) και οι αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR).

2.2.2.1 Αισθητήρες Πύλης Ροής (fluxgate)

Οι αισθητήρες fluxgate, είναι συσκευές που μετρούν το πλάτος και την διεύθυνση μαγνητικού πεδίου συνεχούς ρεύματος (DC) ή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Έχουν πολύ υψηλή ευαισθησία και μπορούν να μετρήσουν πεδία από $10^{-10}T$ έως $10^{-4}T$. Η ανάλυση τους μπορεί να φθάσει τα 10pTesla και 1nTesla για σταθερότητα μακράς διάρκειας. Η απόκλιση λόγω θερμοκρασίας είναι περίπου $0.1nTesla/^{\circ}C$.

Ο πυρήνας του αισθητήρα πύλης ροής είναι ένας μαλακός σιδηρομαγνητικός πυρήνας που περιβάλλεται από δυο συρμάτινα πηνία, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Εναλλασσόμενο ρεύμα περνά από το πρωτεύον πηνίο ή τύλιγμα διέγερσης (drive winding), παράγοντας ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει AC ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο ή τύλιγμα λήψης (sense winding). Το πλάτος και η φάση του ρεύματος δευτερεύοντος πηνίου μετράται και καταγράφεται συνεχώς. Όταν συμβεί κάποια μεταβολή στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (Hex_t), μεταβάλλεται αυτόματα και η έξοδος στο δευτερεύον πηνίο. Η έκταση αυτή της μεταβολής, μπορεί να αναλυθεί, για να προσδιοριστεί το πλάτος και η διεύθυνση της ροής.

Αξίζει να σημειώσουμε, ότι αν ο αισθητήρας πρόκειται να λειτουργήσει σε κλειστό βρόχο, τότε χρησιμοποιείται και ένα τρίτο τύλιγμα ανάδρασης (feedback winding).



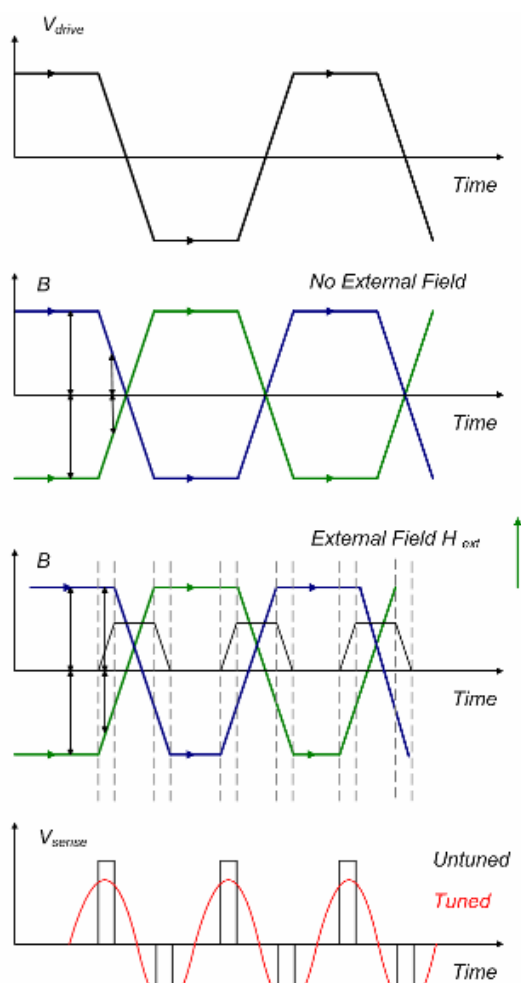
Εικόνα 2.3: Fluxgate με πυρήνα δακτυλίου

Είναι χρήσιμο να σκεφτόμαστε τον πυρήνα δακτυλίου σαν δυο ξεχωριστούς «ημι-πυρήνες», όπως φαίνεται με μπλε και πράσινο στην Εικόνα 2.3. Αυτός ο πυρήνας δακτυλίου μετράει το πεδίο στην κατεύθυνση του H_{ext} . Όταν το ρεύμα ρέει μέσω του τυλίγματος διέγερσης, ο μισός πυρήνας θα παράγει ένα πεδίο στην ίδια κατεύθυνση με το H_{ext} και ο άλλος μισός θα παράγει πεδίο με την αντίθετη κατεύθυνση.

Ένα παράδειγμα κυματομορφής διέγερσης του drive winding φαίνεται στην Εικόνα 2.4(α). Σημειώνουμε, ότι στην πραγματικότητα η μορφή της διέγερσης είναι περισσότερο τετραγωνική, αλλά προκειμένου να δείξουμε καλύτερα τι συμβαίνει στους δυο «ημι-πυρήνες» με ή χωρίς την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, «αλλοιώνουμε» τις μεταβάσεις από το V_{max} στο V_{min} , ώστε να είναι λιγότερο απότομες.

Στην περίπτωση απουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ($H_{ext}=0$), οι δυο «ημι-πυρήνες» μπαίνουν και βγαίνουν από τον κορεσμό ταυτόχρονα. Τα παραγόμενα μαγνητικά πεδία αλληλοαναιρούνται, (βλ. Εικόνα 2.4(β)), και επομένως δεν υπάρχει αλλαγή στη μαγνητική ροή του πεδίου που διέρχεται μέσα από το τυλίγμα λήψης, ούτε και επαγόμενη τάση.

Όταν υπάρχει εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (βλ. Εικόνα 2.4(γ)), ο «ημι-πυρήνας» που παράγει πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης από το εξωτερικό (πράσινη κυματομορφή)



Εικόνα 2.4: (α) Κυματομορφή τυλίγματος διέγερσης, (β) Παραγόμενο πεδίο από κάθε «ημι-πυρήνα» χωρίς εξωτερικό πεδίο ($H_{ext}=0$), (γ) Παραγόμενο πεδίο από κάθε «ημι-πυρήνα» με επιβολή εξωτερικού πεδίου ($H_{ext}\neq 0$), (δ) Επαγόμενη τάση στο τυλίγμα λήψης (μάυρο) και προκύπτουσα τάση αν ο αισθητήρας είναι συντονισμένος (κόκκινο)

βγαίνει από τον κορεσμό πιο γρήγορα από τον «ημι-πυρήνα» που παράγει πεδίο ομόρροπο με το εξωτερικά επιβαλλόμενο (μπλε κυματομορφή). Σε αυτό το χρονικό διάστημα, τα δυο πεδία δεν αλληλοαναιρούνται και επομένως παρατηρείται αλλαγή στη μαγνητική ροή στο τύλιγμα διέγερσης (μαύρη κυματομορφή). Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, αυτή η αλλαγή επάγει μια τάση, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 2.4(δ). Ομοίως, κοντά στο τέλος της μετάβασης, ο «ημι-πυρήνας» που παράγει πεδίο στην ίδια κατεύθυνση με το εξωτερικό Hex, μπαίνει στον κορεσμό γρηγορότερα. Κατά συνέπεια, δημιουργούνται δυο αιχμές (spikes) στην τάση για κάθε μετάβαση στο πηνίο διέγερσης και η συχνότητα λήψης είναι διπλάσια από την συχνότητα διέγερσης.

Το μέγεθος και η φάση των επαγόμενων αιχμών μας δίνουν πληροφορίες για το πλάτος και την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Προκειμένου το σήμα αυτό να είναι ευκολότερα ανιχνεύσιμο, χρησιμοποιείται συχνά ένας πυκνωτής για να συντονιστεί (tune) το τύλιγμα λήψης (βλ. κόκκινη κυματομορφή Εικόνα 2.4(δ)).

Η πρώτη πατέντα σε αισθητήρες fluxgate καταχωρήθηκε από τον H.P. Thomas το 1931. Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο για την ανίχνευση υποβρυχίων και αργότερα για γεωφυσικές εφαρμογές. Σήμερα, αξιοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους πλοήγησης όπως το GPS (Global Positioning System) για τον προσδιορισμό μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας. Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για την ανάλυση, τη χαρτογράφηση και την παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων της γης και άλλων πλανητών. Αισθητήρες fluxgate συναντάμε και στους δορυφόρους και μπορούν να λειτουργήσουν στο φεγγάρι και στο μακρινό διάστημα. Τέλος, μια αξιοσημείωτη εφαρμογή των fluxgate είναι η μέτρηση ρευμάτων χαμηλής έντασης ή/και σύγκριση των τιμών δυο ή περισσότερων ρευμάτων.

2.2.2.2 Αισθητήρες Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης (AMR)

Προκειμένου να αναλύσουμε τους αισθητήρες AMR, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε συνοπτικά στους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, στους οποίους και ανήκουν οι AMR.

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:

- Η *ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση (AMR)*, η οποία κατασκευάζεται σε λεπτά φιλμ
- Η *αντίσταση γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR)*, η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της ανταλλαγής σύζευξης στα υπέρλεπτα μαγνητικά και μη μαγνητικά επίπεδα (supelattices)
- Η *κολοσσιαία μαγνητοαντίσταση (CMR)*, η οποία αποτελεί αρκετά πρόσφατη εφεύρεση και έχει δυνατότητες για πολλές μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα των αισθητήρων.

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

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης είναι 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.

Το φαινόμενο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, στο οποίο στηρίζεται η λειτουργία των αισθητήρων AMR, βασίζεται στον ανισοτροπικό σκεδασμό των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας με ασύζευκτα ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους, π.χ. το 3d τροχιακό των στοιχείων μετάπτωσης Fe, Co, και Ni. Οι ενέργειες των δυο καταστάσεων της στροφορμής της μαγνητικής ροπής ($\pm\mu_B$) διαφέρουν από την κβαντομηχανική ενέργεια ανταλλαγής. Αυτά τα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση του φερρομαγνητισμού και του φερριμαγνητισμού.

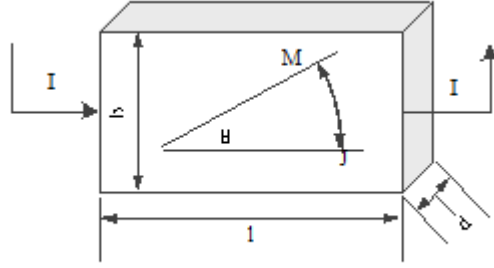
Η θεωρητική ανάλυση του φαινομένου AMR βασίζεται στη στάθμη Fermi και το διάγραμμα πυκνότητας ηλεκτρονίων κατάστασης. Η δυσκολία έγκειται στο ότι το ανισοτροπικό κομμάτι της αντίστασης εξαρτάται από το ακριβές τρισδιάστατο σχήμα της επιφάνειας Fermi (από τη 3d πτυχή της στάθμης Fermi), το οποίο δεν είναι γνωστό με ακρίβεια, με εξαίρεση λίγα μαγνητικά υλικά. Ως εκ τούτου, οι θεωρητικοί αναλυτές δεν έχουν ακόμα καταφέρει να υπολογίσουν το φαινόμενο για περισσότερο από το ένα δέκατο του πλάτους. Κατά συνέπεια, όλα τα δεδομένα για τα υλικά θα πρέπει να βρεθούν εμπειρικά. Το πλάτος και το πρόσημο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης δεν μπορούν να προβλεφθούν με ευκολία.

Ωστόσο, τα περισσότερα υλικά έχουν θετική σταθερά ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι η υψηλή αντίσταση εμφανίζεται όταν η στιγμιαία μαγνήτιση M_s και η πυκνότητα ρεύματος J είναι παράλληλα.

Η περιγραφή της περίπλοκης συμπεριφοράς μιας μαγνητοαντίστασης μπορεί να απλοποιηθεί χωρίζοντας το πρόβλημα σε δυο κομμάτια:

- a) τη σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής αντίστασης ρ και της διεύθυνσης της μαγνήτισης M_s
- b) τη σχέση μεταξύ του εφαρμοζόμενου πεδίου H και του προσανατολισμού της μαγνήτισης.

Το φαινόμενο AMR μπορεί να περιγραφεί πολύ απλά σαν ένα πρόβλημα δυο διαστάσεων. Η Εικόνα 2.5 απεικονίζει τις διαστάσεις (με μήκος l , πλάτος b και πάχος d) ενός λεπτού ορθογωνικού φερρομαγνητικού υμενίου, καθώς και το σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 2.5: Πυκνότητα ρεύματος και στιγμιαία μαγνήτιση ενός λεπτού φερρομαγνητικού υμενίου

Ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο H_y περιστρέφει το M_s κατά γωνία θ από τον εύκολο άξονα μαγνήτισης στο δύσκολο άξονα της ομοαξονικής ανισοτροπίας. Η σταθερά ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εξαρτάται από τη γωνία θ μεταξύ M_s και J ως εξής:

$$\rho(\theta) = \rho_o + (\rho_p - \rho_o)\cos^2\theta = \rho_o + \Delta\rho \cos^2\theta \quad (1)$$

όπου $\rho = \rho_p$ για $M_s // J$ και $\rho = \rho_o$ για $M_s \perp J$. Το πηλίκο $\Delta\rho/\rho_o$ είναι η σταθερά μαγνητοαντίστασης. Η εξίσωση που δίνει την αντίσταση είναι:

$$R(\theta) = \rho(\theta) \frac{l}{bd} (\rho_o + \Delta\rho \cos^2\theta) \quad (2)$$

οπότε η τιμή της τάσης στον άξονα x είναι:

$$U_x = I \frac{l}{bd} (\rho_o + \Delta\rho \cos^2\theta) \quad (3)$$

Ένα άλλο φαινόμενο που σχετίζεται με το AMR καθορίζεται από την ιδιότητα τανυστή του ρ . Κάθετα στο ηλεκτρικό πεδίο E_x βρίσκεται ένα ηλεκτρικό πεδίο E_y , το οποίο προκαλεί πυκνότητα ρεύματος J_x και δίνεται από τη σχέση:

$$E_y = J_x \Delta\rho \sin\theta \cos\theta \quad (4)$$

Λόγω της διεύθυνσής του, το φαινόμενο είναι γνωστό ως *επίπεδο (planar) φαινόμενο Hall*. Η τάση planar Hall εξαρτάται από το $\text{sgn}(\theta)$ και προκύπτει από την (4) ως εξής:

$$U_y = I \frac{\Delta\rho}{d} \sin\theta \cos\theta \quad (5)$$

Επειδή στις περισσότερες γεωμετρικές σχεδιάσεις αισθητήρων AMR είναι $b \ll l$, προκύπτει ότι $U_y \ll U_x$. Το επίπεδο φαινόμενο Hall μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν για αισθητήρες που μετρούν πεδία σε πολύ μικρές διαστάσεις με υψηλή χωρική ανάλυση, όπως για παράδειγμα για εφαρμογές μαγνητικής καταγραφής.

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

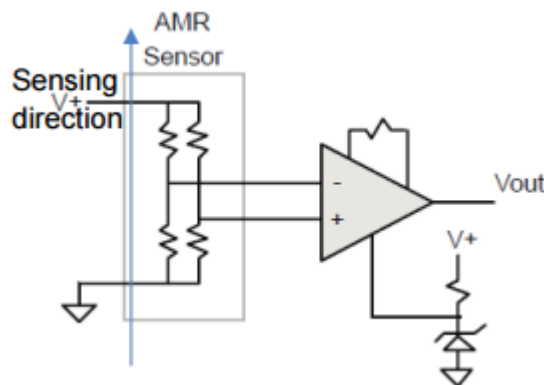
ταινίες και δίσκοι. Διάφορες εφαρμογές τους είναι στη ναυσιπλοΐα, στην ανίχνευση οχημάτων, στη μέτρηση ταχύτητας περιστροφής, στην ανίχνευση ρεύματος και πολλές άλλες.

Ο AMR αισθητήρας είναι κατασκευασμένος από ένα λεπτό υμένιο νικελίου–σιδήρου(NiFe), το οποίο ονομάζεται permalloy. Το υμένιο έχει αποτεθεί πάνω σε πλάκα πυριτίου υπό τη μορφή λωρίδας αντίστασης. Λόγω των ιδιοτήτων του κράματος, το λεπτό υμένιο μεταβάλλει τη φαινόμενη ωμική του αντίσταση κατά 2-3% υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Τυπικά, τέσσερις από αυτούς τους αντιστάτες συνδέονται υπό τη διάταξη γέφυρας Wheatstone, ώστε να μετριέται η μαγνήτιση και η φορά κατά την κατεύθυνση ενός ορισμένου άξονα μέτρησης (Εικόνα 2.6).

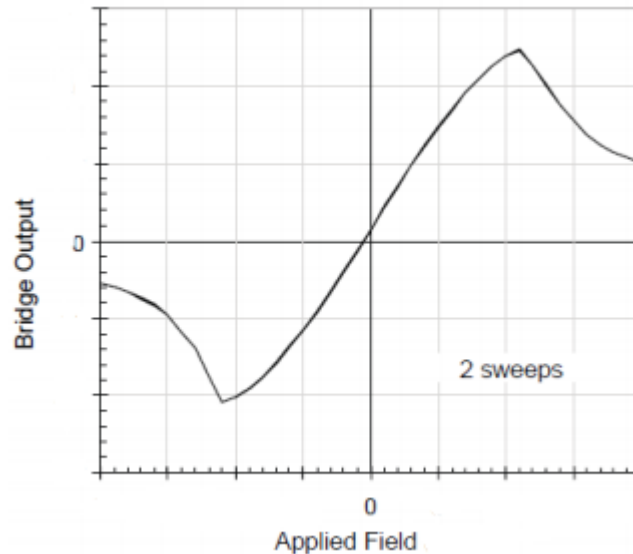
Μια τυπική τιμή λειτουργίας της γέφυρας είναι 1kOhm και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ 1-5MHz. Η αντίδραση του φαινομένου AMR είναι πολύ γρήγορη και δεν περιορίζεται από πηνία ή συχνότητες ταλάντευσης, όπως σε άλλες τεχνολογίες.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των AMR αισθητήρων, είναι πως μπορούν να αναπτυχθούν πάνω σε πλάκα πυριτίου και να εφαρμοστούν σε βιομηχανικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αυτό επιτρέπει στους AMR αισθητήρες να αυτοσυναρμολογούνται με άλλα κυκλώματα και στοιχεία συστημάτων. Αυτά και άλλα χαρακτηριστικά κάνουν τους AMR αισθητήρες να παρέχουν καλώς προβλεπόμενα σήματα εξόδου, να έχουν υψηλή ευαισθησία και εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος, καθώς και να είναι ανεπηρέαστοι από θόρυβο σήματος και να έχουν υψηλή επαναληψιμότητα.



Εικόνα 2.6: Σχηματικό κύκλωμα αισθητήρων AMR

Η λειτουργία του AMR αισθητήρα βασίζεται στην μεταβολή της αντίστασης του λεπτού υμενίου κράματος Ni_3Fe , όταν εκτίθεται σε ένα μεταβαλλόμενο εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο- έτσι προκύπτει ο όρος μαγνητοαντίσταση. Αυτό προκαλεί μια αντίστοιχη μεταβολή στην τάση εξόδου του αισθητήρα (Εικόνα 2.7). Η ευαισθησία της γέφυρας Wheatstone εκφράζεται ως η μεταβολή της τάσης εξόδου ανά O_e (mV/V/ O_e). Ο όρος (V) παραπέμπει στην τάση της γέφυρας V_b .



Εικόνα 2.7. Τυπική απόκλιση AMR αισθητήρα σε επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

Η εφαρμογή των AMR αισθητήρων στην ανίχνευση οχημάτων μπορεί να πάρει πολλές μορφές. Ένας AMR αισθητήρας μονοαξονικής ανίχνευσης μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία ή μη ενός οχήματος. Με την κατάλληλη αποκωδικοποίηση του σήματος, τα διαφορετικά οχήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει του τύπου τους.

Η απόσταση ανίχνευσης ενός οχήματος μπορεί να εκτείνεται έως και 15 μέτρα ανάλογα με την ποσότητα του φερρομαγνητικού υλικού στο όχημα. Ένα σύστημα δύο αισθητήρων με κατάλληλη τοποθέτηση μπορεί να ανιχνεύσει την ύπαρξη, την κατεύθυνση και την ταχύτητα ενός οχήματος, καθώς και να παρέχει την κατάλληλη πληροφορία για την διαχείριση της κυκλοφορίας.

Η μαγνητική διαταραχή ενός μεγάλου φερρομαγνητικού στοιχείου όπως είναι ένα αυτοκίνητο, μπορεί να προσομοιωθεί σαν μια σύνθεση πολλών διπολικών μαγνητών. Αυτά τα δίπολα έχουν προσανατολισμούς που προκαλούν διαταραχές στο μαγνητικό πεδίο της γης. Αυτές οι διαταραχές εμφανίζονται εντονότερα στον κινητήρα και στους άξονες των τροχών, αλλά επίσης ποικίλλουν ανάλογα με την σύσταση και την ποσότητα του φερρομαγνητικού χάλυβα και των υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί στο αυτοκίνητο (σασί, πορτ-μπαγκάζ κλπ.). Το αποτέλεσμα είναι μια χαρακτηριστική διαταραχή στο μαγνητικό πεδίο της γης, που είναι μοναδική ανάλογα με το σχήμα του κάθε οχήματος.

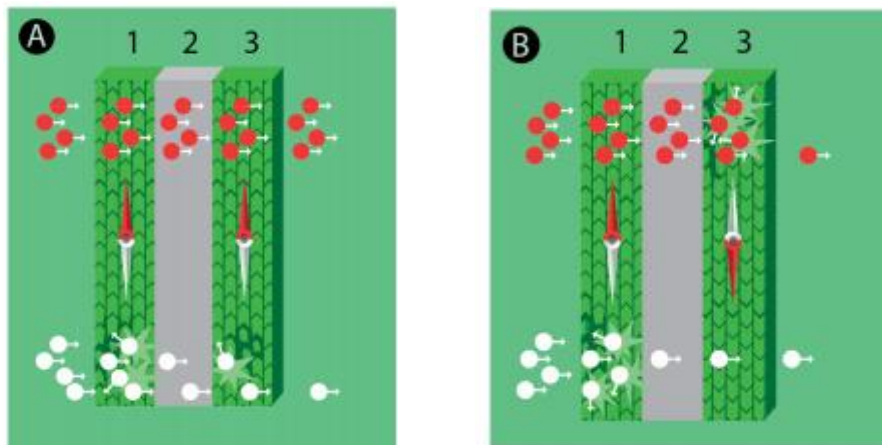
2.2.3 Αισθητήρες Ισχυρού Μαγνητικού Πεδίου

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

2.2.3.1 Αισθητήρες Γιγαντιαίας Μαγνητοαντίστασης (GMR)

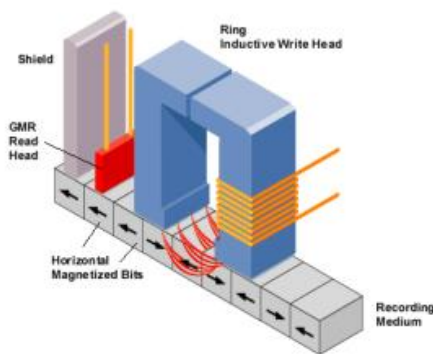
Το φαινόμενο γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) ανακαλύφθηκε το 1988 από πολλές διαφορετικές ερευνητικές ομάδες και οι θεμελιώδεις ιδιότητες μελετήθηκαν με λεπτομέρεια. Τελικά, το 2007 οι Albert Fert και Peter Grunberg τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για την ανακάλυψη του φαινομένου GMR.

Το ακόλουθο σχήμα, στο οποίο βλέπουμε την κάθετη διατομή της δομής ενός GMR, μας βοηθάει να κατανοήσουμε το λόγο για τον οποίο εμφανίζεται η γιγαντιαία μαγνητοαντίσταση GMR. Παρατηρούμε, ότι ένα μη μαγνητικό στρώμα (γκρι) περικλείεται από δυο μαγνητικά στρώματα (πράσινα) με παράλληλη (A) και αντιπαράλληλη (B) ευθυγράμμιση των μαγνητικών τους ροπών. Ηλεκτρόνια με διαφορετικό spin (κόκκινα και άσπρα) επιχειρούν να περάσουν την τριστρωματική διάταξη. Διαπιστώνουμε, ότι στην περίπτωση που τα δυο στρώματα έχουν αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές, σκεδάζεται μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρονίων, οδηγώντας σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης.



Εικόνα 2.8: Κάθετη διατομή του GMR

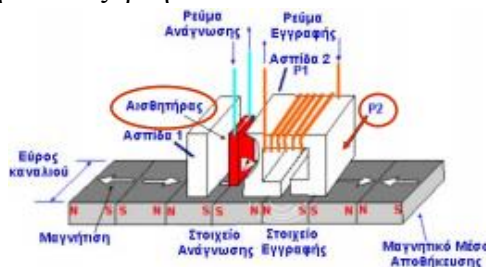
Το 1997 η εταιρεία IBM ανακοινώνει τον πρώτο σκληρό δίσκο υπολογιστή (16.8 Gbyte 3.5-inch, επιφανειακή πυκνότητα: 2.69 Gbits/in²), του οποίου η ογκώδης κεφαλή ανάγνωσης-εγγραφής έχει αντικατασταθεί από δυο ανεξάρτητα στοιχεία: ένα στοιχείο εγγραφής με την κλασική επαγωγική τεχνική και ένα στοιχείο ανάγνωσης με την τεχνική GMR, όπου χρησιμοποιείται μια βαλβίδα spin (βλ. Εικόνα 2.9). Πρόκειται για την πρώτη σημαντική εφαρμογή των αντιστάσεων GMR.



Εικόνα 2.9: Στοιχείο εγγραφής με την κλασική επαγωγική τεχνική και στοιχείο ανάγνωσης με την τεχνική GMR

Κατά τη διάρκεια της ανάγνωσης πληροφορίας, η αλλαγή κατεύθυνσης ή η αντιστροφή μαγνητικής ροής από bit σε bit, συνεπάγεται αλλαγή κατεύθυνσης της μαγνήτισης που βλέπει ο αισθητήρας. Κατά συνέπεια, αλλάζει η αντίστασή του. Το μετρήσιμο μέγεθος είναι η τάση στην έξοδο

του αισθητήρα που προκύπτει ως το γινόμενο της αντίστασής του με το ρεύμα ανάγνωσης. Το σήμα αυτό ενισχύεται από ηλεκτρονικές διατάξεις χαμηλού θορύβου και οδηγείται στο ηλεκτρονικό τμήμα ανίχνευσης δεδομένων του σκληρού δίσκου. Το κύριο πλεονέκτημα της ύπαρξης δυο ξεχωριστών στοιχείων είναι ότι, κάθε στοιχείο μπορεί να βελτιστοποιηθεί ανεξάρτητα από το άλλο.



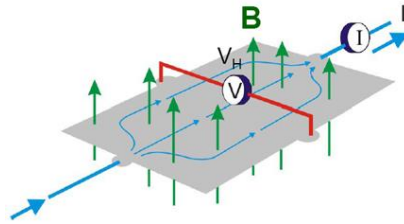
Εικόνα 2.10: Κεφαλή GMR

Πλέον, οι GMR κεφαλές ανάγνωσης χρησιμοποιούνται ευρέως στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και οι επιδόσεις τους ξεπερνιούνται συνεχώς, οδηγώντας στη συνεχή μείωση του μεγέθους των επιτραπέζιων υπολογιστών αλλά κυρίως των φορητών υπολογιστών. Το σημαντικότερο όφελος της χρήσης GMR κεφαλών είναι η μεγάλη τους ευαισθησία σε μαγνητικά πεδία, γεγονός το οποίο συνεπάγεται ανίχνευση μαγνητικών πεδίων από μικρότερες μαγνητικές περιοχές (bits). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μεγαλύτερες ταχύτητες, ενώ ο ηλεκτρονικός θόρυβος υπερκεράζεται από το πραγματικά δυνατό GMR σήμα. Τέλος, εκτός από το μέγεθος και το κόστος των φορητών υπολογιστών που έχουν μειωθεί αισθητά, τα στοιχεία GMR προσφέρουν σταθερή και αμετάβλητη λειτουργία για πολλά χρόνια και με χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

2.2.3.2 Αισθητήρες Φαινομένου 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. Η πρώτη εφαρμογή εκτός εργαστηρίου ήταν το 1950 ως αισθητήρας ισχύος σε φούρνους μικροκυμάτων. Το 1968 έγινε η πρώτη εφαρμογή αισθητήρων σε ηλεκτρολογία. Σήμερα εφαρμογές που αξιοποιούν το φαινόμενο Hall χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος συσκευών, όπως υπολογιστές, ραπτομηχανές, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, ακόμα και ιατρικά μηχανήματα.

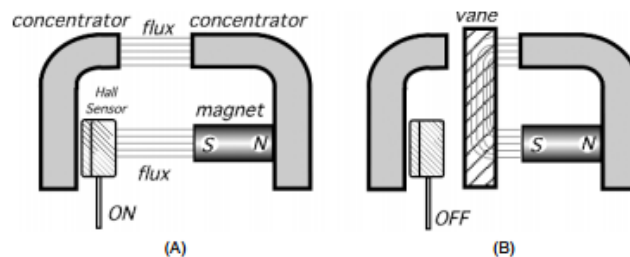
Το φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1879 από τον Dr. Edwin Hall, ο οποίος προσπαθούσε να επιβεβαιώσει την θεωρία που προτάθηκε από τον Kelvin σχετικά με τη ροή των ηλεκτρονίων τριάντα χρόνια νωρίτερα. Διαπίστωσε, ότι όταν τοποθετήσουμε σε μαγνητικό πεδίο B ένα ρευματοφόρο πλακίδιο, τότε στα άκρα του αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού (τάση Hall V_H) σε διεύθυνση που είναι κάθετη στο ρεύμα I και στο μαγνητικό πεδίο (βλ. Εικόνα 2.11). 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.



Εικόνα 2.11: Φαινόμενο Hall σε ρευματοφόρο πλακίδιο

Βασισμένος στην αρχή λειτουργίας του φαινομένου Hall, ένας χαρακτηριστικός αισθητήρας Hall έχει τρία καλώδια ή τερματικά: ένα για τη γείωση, ένα για την τάση μπαταρίας ή αναφοράς και ένα για το σήμα εξόδου. Για να παραγάγει ένα σήμα εξόδου, ο αισθητήρας πρέπει να τροφοδοτηθεί με μια τάση αναφοράς από τον υπολογιστή του οχήματος (που μπορεί να είναι 5 έως 12V ανάλογα με την εφαρμογή). Η τάση τροφοδότησης είναι απαραίτητη για να δημιουργηθεί το φαινόμενο που πραγματοποιείται μέσα στον αισθητήρα.

Ένας αισθητήρας Hall μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διακόπτης μεταγωγής με ένα κινούμενο αντικείμενο. Συγκεκριμένα, όταν το μαγνητικό παράθυρο είναι ανεμπόδιο και κανένα έλασμα δεν παρεμβάλλεται ανάμεσα στο μαγνήτη και τον αισθητήρα Hall, ο «διακόπτης Hall» είναι «ανοικτός» (ON) (Εικόνα 2.12 (A)), με αποτέλεσμα να παράγει μια σταθερή τάση εξόδου. Η τάση εξόδου μειώνεται για να πλησιάσει σε μηδέν όταν εισάγεται ένα μεταλλικό έλασμα (φερρομαγνητική πλάκα) στο μαγνητικό παράθυρο και εμποδίζει το μαγνητικό πεδίο (Εικόνα 2.12 (B)). Τότε, θεωρούμε ότι ο αισθητήρας είναι «κλειστός» (OFF). Αξιοποιώντας την λειτουργία «διακόπτη», ο αισθητήρας Hall χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου, καθώς και για την ανίχνευση της θέσης ενός αντικειμένου.



Εικόνα 2.12: Ο αισθητήρας φαινομένου Hall σε λειτουργία διακόπτη μεταγωγής: (A) η μαγνητική ροή ενεργοποιεί τον αισθητήρα (ON), (B) η μαγνητική ροή εμποδίζεται από μεταλλική πλάκα (OFF)

Οι περισσότεροι σύγχρονοι κινητήρες είναι εφοδιασμένοι με αισθητήρα Hall για να εντοπίζεται η θέση και οι στρόφες του εκκεντροφόρου και του στροφαλοφόρου άξονα. Αυτοί οι αισθητήρες διαφέρουν σε μέγεθος και σε σχεδίαση αλλά είναι όμοιοι στην αρχή και τον τρόπο λειτουργίας. Οι διαφορές αυτές εντοπίζονται κυρίως στην τάση λειτουργίας και τον τρόπο που τοποθετούνται ανάλογα με την σχεδίαση του εκάστοτε κινητήρα.

Ο αισθητήρας Hall είναι ένας πολύ ακριβής τρόπος για να γνωρίζει ο 'εγκέφαλος' του οχήματος ανά πάσα στιγμή την θέση και τη ταχύτητα των δυο αυτών αξόνων. Οι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν διάκενα και ελάσματα. Το διάκενο αφήνει να περάσει το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από ένα μόνιμο μαγνήτη. Όταν το έλασμα περάσει από το μαγνητικό πεδίο, τότε το διακόπτει και

δημιουργείται μια αλλαγή στην τάση την οποία ο 'εγκέφαλος' την αισθάνεται. Όταν περνάει από το έλασμα τότε η τάση πέφτει πρακτικά στο μηδέν. Ενώ όταν παρεμβάλλεται το έλασμα, η τάση ανεβαίνει σε μια συγκεκριμένη τιμή.

Σε αντίθεση με τα μαγνητόμετρα fluxgate και τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, οι αισθητήρες Hall παρέχουν πολύ χαμηλότερη ακρίβεια στις μετρήσεις, γεγονός το οποίο αποτελεί και το βασικό τους μειονέκτημα.

Κεφάλαιο 3^ο: Οι αισθητήρες AMR HMC1001/2

3.1 Τεχνική Περιγραφή

Οι αισθητήρες HMC1001 και HMC1002 της Honeywell είναι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (AMR) πολύ υψηλής ευαισθησίας. Ο συνδυασμός τους μας παρέχει τη δυνατότητα να μετράμε μαγνητικό πεδίο στις τρεις διαστάσεις, αφού ο πρώτος μετρά τη συνιστώσα Z και ο δεύτερος τις συνιστώσες X και Y. Διαμορφωμένοι ως γέφυρα Wheatstone τεσσάρων στοιχείων, μπορούν να μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια μικρές μεταβολές των αντιστάσεων. Αυτοί οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης μετατρέπουν μαγνητικά πεδία σε διαφορική τάση εξόδου και είναι ικανοί να «αντιλαμβάνονται» μαγνητικά πεδία με εύρος μικρότερο από 30μGauss. Εκτός από υψηλή ευαισθησία, οι αισθητήρες HMC1001 και HMC1002 προσφέρουν χαμηλό κόστος και υψηλή αξιοπιστία στις μετρήσεις των ασθενών μαγνητικών πεδίων.

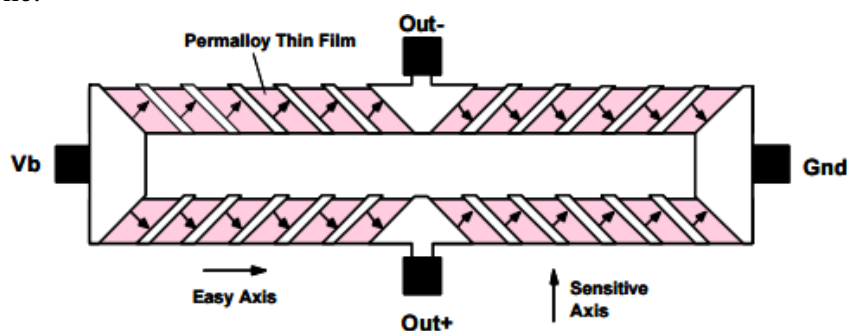
Οι αισθητήρες AMR αποτελούνται από τέσσερις απλές αντιστάσεις AMR σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. Με μια απλή εφαρμογή τάσης στα άκρα της γέφυρας (από 0 έως 10 Volts), μπορούν να μετρούν οποιοδήποτε φυσικό ή εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του εύκολου άξονα. Εκτός από το δικτύωμα της γέφυρας, ο αισθητήρας AMR περιέχει και δυο μεταλλικά σπειρώματα, μαγνητικά συζευγμένα: το τύλιγμα αντιστάθμισης (offset strap) και το τύλιγμα τοποθέτησης/επανατοποθέτησης (set/reset strap). Πρόκειται για πατέντες της Honeywell που περιορίζουν την ανάγκη για εξωτερικά πηνία γύρω από τις συσκευές και τις οποίες θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

Όπως προαναφέραμε, οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης είναι φτιαγμένοι από μια λεπτή επίστρωση νικελίου-σιδήρου Ni-Fe (permalloy) πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Si) διαμορφωμένη έτσι, ώστε να αποτελεί στοιχείο αντίστασης υπό μορφή ταινίας. Παρουσία μαγνητικού πεδίου, προκαλείται αλλαγή στην τιμή της αντίστασης γέφυρας, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μεταβολή της τάσης εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στη μεγάλη πλευρά του φιλμ συνεπάγεται περιστροφή του διανύσματος μαγνήτισης και αλλαγή της γωνίας του. Αυτό με τη σειρά του, προξενεί μια αλλαγή της τιμής της αντίστασης ΔR και κατά συνέπεια θέτει τη γέφυρα Wheatstone εκτός ισορροπίας, οπότε αντίστοιχα μεταβάλλεται και η τάση στην έξοδό της.

Κατά την κατασκευή, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης (ο οποίος αποτελεί την προτιμώμενη διεύθυνση για το μαγνητικό πεδίο), τίθεται σε μια κατεύθυνση κατά μήκος του φιλμ. Αυτό επιτρέπει τη μεγιστοποίηση των αλλαγών στην αντίσταση με επιβολή πεδίου στο υπέρκρμα Ni-Fe του φιλμ. Ωστόσο, η επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου (μεγαλύτερου από 10 Gauss) κατά μήκος του εύκολου άξονα, μπορεί να διαταράξει ή ακόμα και να αντιστρέψει την πολικότητα μαγνήτισης του φιλμ, το οποίο έχει ως επακόλουθο την αλλαγή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα. Μετά από μια τέτοια διαταραχή, χρειάζεται να εφαρμοστεί ένα ισχυρό στιγμιαίο μαγνητικό πεδίο, ώστε να αποκατασταθούν τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η

πολικότητα του σήματος εξόδου της γέφυρας εξαρτάται από την κατεύθυνση μαγνήτισης του φιλμ και είναι συμμετρική του μηδενικού πεδίου.

Οι αντιστάσεις AMR της γέφυρας Wheatstone είναι ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους έτσι, ώστε να έχουν έναν κοινό άξονα ευαισθησίας, ο οποίος παρέχει θετική μεταβολή στην τάση με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση ευαισθησίας. Επειδή η έξοδος μόνο είναι σε αναλογία με το μονοδιάστατο άξονα (αρχή ανισοτροπίας), επιπρόσθετες γέφυρες αισθητήρα που τοποθετούνται σε ορθογώνιους άξονες, επιτρέπουν ακριβή μέτρηση της διεύθυνσης του αυθαίρετου πεδίου. Ο συνδυασμός γεφυρών αισθητήρων σε δυο και τρεις ορθογώνιους άξονες επιτρέπει εφαρμογές όπως προσανατολισμό, πλοήγηση και μαγνητομετρία. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η αναπαράσταση των στοιχείων μαγνητοαντίστασης της γέφυρας Wheatstone.



Εικόνα 3.1: Μαγνητοαντίσταση σε διάταξη γέφυρας Wheatstone

3.2 Τύλιγμα Τοποθέτησης/Επανατοποθέτησης (Set/Reset Strap)

Όπως προαναφέραμε, γύρω από τον αισθητήρα AMR υπάρχουν δυο πηνία: το ένα για set/reset και το άλλο για αντιστάθμιση. Το τύλιγμα Set/Reset (S/R) έχει μικρή αντίσταση ώστε να επιτρέπει βραχείς αλλά υψηλού ρεύματος παλμούς τοποθέτησης/επανατοποθέτησης. Η περιέλιξη αυτή πρέπει να χρησιμοποιείται περιοδικά, έτσι ώστε να θέτει τις μαγνητικές περιοχές της μαγνητοαντίστασης στον εύκολο άξονα μαγνήτισης για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της μέτρησης.

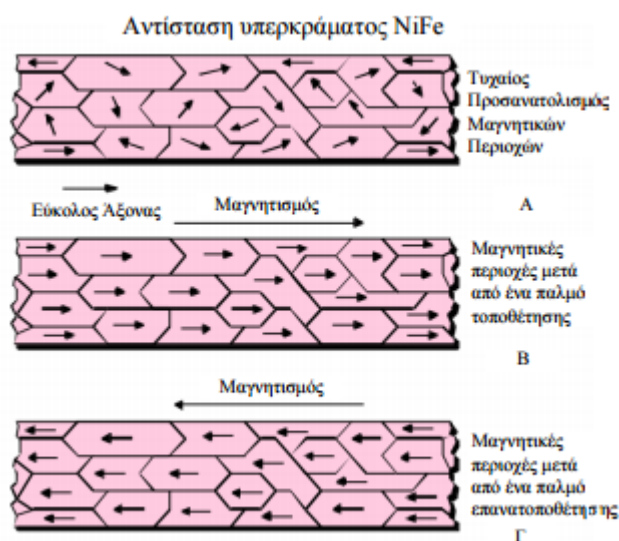
Ένας παλμός τοποθέτησης ορίζεται ως ένας θετικός παλμός ρεύματος, ο οποίος εισέρχεται στη σύνδεση S/R+ του τυλίγματος. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα είναι ο αισθητήρας να ευθυγραμμιστεί με τον εμπρόσθιο εύκολο άξονα μαγνήτισης, έτσι ώστε η αισθητήρια γέφυρα να έχει θετική πολικότητα. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου με θετική κλίση στον άξονα ευαισθησίας (δύσκολο άξονα μαγνήτισης) αναμένουμε μια θετική κλίση της τάσης στα άκρα εξόδου της γέφυρας.

Ένας παλμός επανατοποθέτησης ορίζεται ως ένας αρνητικός παλμός ρεύματος, ο οποίος εισέρχεται στη σύνδεση S/R- του τυλίγματος. Το αναμενόμενο αποτέλεσμα θα είναι ο αισθητήρας να ευθυγραμμιστεί με τον οπίσθιο εύκολο άξονα μαγνήτισης, έτσι ώστε η αισθητήρια γέφυρα να έχει αρνητική πολικότητα. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου με θετική κλίση στον άξονα ευαισθησίας (δύσκολο άξονα μαγνήτισης), αναμένουμε μια αρνητική κλίση της τάσης στα άκρα εξόδου της γέφυρας.

Συνήθως, πρώτα εφαρμόζεται ένα παλμός επανατοποθέτησης και ύστερα από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου εφαρμόζεται ένας παλμός τοποθέτησης. Με αυτή την ώθηση των μαγνητικών περιοχών προς την τελείως αντίθετη κατεύθυνση είναι μεγάλη η πιθανότητα οποιαδήποτε μαγνητική διαταραχή που προϋπήρχε να διαγραφεί πλήρως από το ζεύγος των παλμών. Για πιο απλά κυκλώματα, τα οποία προορίζονται για εφαρμογές με λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις για αφαίρεση του θορύβου και ακρίβεια στις μετρήσεις, ένας μόνο παλμός μίας πολικότητας μπορεί να εφαρμοστεί περιοδικά. Πολλοί μονοπολικοί παλμοί πλησιάζουν σε απόδοση τον ένα διπολικό παλμό.

Στο ακόλουθο σχήμα, παρατηρούμε τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών της αντίστασης υπερκράματος NiFe του αισθητήρα σε τρεις περιπτώσεις: Α) όταν ο αισθητήρας εκτίθεται σε ένα τυχαίο μαγνητικό πεδίο, τότε τα στοιχεία του ακολουθούν τυχαίες κατευθύνσεις, Β) όταν εφαρμόζεται παλμός τοποθέτησης (set), τότε παράγεται ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο ευθυγραμμίζει ξανά τις μαγνητικές περιοχές προς μία κατεύθυνση, Γ) όταν εφαρμόζεται αρνητικός παλμός επανατοποθέτησης (reset), τότε η κατεύθυνση των μαγνητικών περιοχών αντιστρέφεται και κατά συνέπεια αλλάζει η πολικότητα της εξόδου του αισθητήρα.

Η κατάσταση αυτών των μαγνητικών περιοχών μπορεί να παραμείνει αναλλοίωτη για χρόνια, αρκεί να μην εκτεθούν σε κάποιου είδους μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 3.2: Προσανατολισμός μαγνητικών περιοχών της αντίστασης υπερκράματος NiFe του αισθητήρα AMR

Ισχυρά εξωτερικά πεδία, τα οποία υπερβαίνουν το όριο των 10 με 20 gauss, μπορεί να προέρχονται από μια πληθώρα εφαρμογών. Οι πιο κοινές πηγές ισχυρού πεδίου είναι οι συσκευές με μόνιμους μαγνήτες, όπως για παράδειγμα τα μεγάφωνα, οι εν λειτουργία αγωγοί υψηλού ρεύματος, όπως αγωγοί των ηλεκτροσυγκολλήσεων, τα όπως είναι οι οθόνες καθοδικού σωλήνα (CRT) και οι εν λειτουργία μετασχηματιστές ισχύος. Οι μαγνήτες παρουσιάζουν στους πόλους πεδία τα οποία μπορεί να υπερβούν τις εκατοντάδες ακόμα και χιλιάδες gauss. Αυτά τα υψηλής πυκνότητας μαγνητικά πεδία δεν καταστρέφουν μόνιμα το αισθητήριο στοιχείο, αλλά το στοιχείο διαταράσσεται και αποκλίνει από την απαιτούμενη διεύθυνση του εύκολου άξονα

μαγνήτισης. Το αποτέλεσμα αυτού του επαναμαγνητισμού του αισθητήριου στοιχείου της μαγνητοαντίστασης είναι η μείωση της ευαισθησίας ή η εμφάνιση «καθυστερήσεων» στην έξοδό του. Με τη χρήση των παλμών S/R επανέρχονται τα μαγνητικά δίπολα του αισθητήρα στον κατάλληλο άξονα.

Όπως έχουμε προαναφέρει, οι αισθητήρες τύπου AMR αποτελούνται από φερρομαγνητικά υλικά με κρυσταλλική δομή. Η ίδια δομή του φιλμ που κάνει τον αισθητήρα ευαίσθητο στα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, έχει το μειονέκτημα να αλλάζει τη μαγνητική διεύθυνση των μαγνητικών περιοχών μέσω της θερμικής ενέργειας, με αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου να αυξάνει ο εσωτερικός θόρυβος του αισθητήρα. Παρόλο που ο θόρυβος αυτός είναι πολύ μικρός, επηρεάζει την ακρίβεια μέτρησης σε μαγνητικά πεδία της τάξης μερικών milli-gauss ή χαμηλότερα. Με τη συχνή εφαρμογή παλμών S/R, ο εσωτερικός θόρυβος περιορίζεται στην ελάχιστη δυνατή τιμή.

Συνοπτικά η περιέλιξη S/R μπορεί να διεγερθεί με παλμό μεγάλης τιμής ρεύματος προκειμένου:

- Να επιτρέψει στον αισθητήρα να εκτελεί μετρήσεις υψηλής ευαισθησίας και να επανακτά την ευαισθησία του μετά από την έκθεση σε ισχυρά εξωτερικά πεδία τα οποία επαναμαγνητίζουν τον αισθητήρα.
- Να αντιστρέφει την πολικότητα της καμπύλης απόκρισης εξόδου.
- Να προκαλεί εναλλαγή των μαγνητικών διπόλων του υλικού κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, για βελτίωση της γραμμικότητας και μείωση του φαινομένου αλληλεπίδρασης των αξόνων (cross-axis) και των επιπτώσεων της θερμοκρασίας.
- Να προκαλεί μείωση και εξάλειψη της τάσης απόκλισης (στο μηδενικό πεδίο) λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών.

Στο κύκλωμα που θα παρουσιαστεί στην παρούσα διπλωματική, γίνεται χρήση γέφυρας τύπου H (H-bridge) προκειμένου να εφαρμοστεί στον αισθητήρα κατάλληλος, εξωτερικός παλμός τοποθέτησης/επανατοποθέτησης. Λεπτομέρειες θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Τύλιγμα Αντιστάθμισης (Offset Strap)

Το τύλιγμα αντιστάθμισης είναι μεταλλικό σπείρωμα το οποίο είναι μαγνητικά συζευγμένο με τον άξονα ευαισθησίας (δύσκολο άξονα μαγνήτισης). Έχει μια αντίσταση περίπου στα 3Ω και χρειάζεται μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος με μέγιστο 200mA για κάθε gauss επαγόμενου πεδίου. Το τύλιγμα μπορεί εύκολα να χειριστεί ρεύματα για αναίρεση ή ενίσχυση του πεδίου μέσα από μια γραμμική περιοχή μέτρησης. Όμως, κατά τη χρήση του απαιτείται προσοχή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που μπορούν να αναπτυχθούν στο πλακίδιο. Στις πιο πολλές εφαρμογές μπορεί το τύλιγμα αντιστάθμισης να μην χρησιμοποιηθεί, αφήνοντας τα άκρα του ανοικτοκυκλωμένα.

Το τύλιγμα αντιστάθμισης επιτρέπει πολλές διαφορετικές λειτουργίες κατά τη χρήση του. Ορισμένες από αυτές τις χρήσεις είναι:

- Αφαίρεση ενός εξωτερικού ανεπιθύμητου πεδίου.

- Μηδενισμός της τάσης απόκλισης της γέφυρας.
- Ακύρωση πεδίου κλειστού βρόχου.
- Αυτό-βαθμονόμηση (auto-calibration) του κέρδους της γέφυρας.

Όπως γνωρίζουμε, οι αισθητήρες AMR βρίσκουν συνήθως εφαρμογή υπό τη μορφή γέφυρας Wheatstone. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες, παρότι εμφανίζουν μια πλειάδα πλεονεκτημάτων, έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι παρουσιάζουν μη μηδενική τάση εξόδου στην περίπτωση μηδενικής εισόδου. Η τάση αυτή είναι γνωστή ως τάση offset και μπορεί να προκαλέσει μείωση της απόδοσης του αισθητήρα αν δεν αντιμετωπιστεί. Λόγω της αρχής λειτουργίας των γεφυρών Wheatstone, το ζητούμενο στην περίπτωση αισθητήρων AMR είναι η κατασκευή τεσσάρων μαγνητοαντιστάσεων κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι τιμές των στοιχείων να είναι ανά δύο απόλυτα όμοιες και να συμπεριφέρονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο στα υπό μέτρηση μαγνητικά πεδία. Η τάση offset εμφανίζεται στους κόμβους εξόδου της γέφυρας. Μια τέτοια τάση είναι ανεπιθύμητη, διότι εμποδίζει την αλλαγή της τιμής ή της πολικότητας του αισθητήρα, ακόμα και αν το υπό μέτρηση μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται.

Στην περίπτωση των αισθητήρων AMR η τάση offset εμφανίζεται λόγω ασυμφωνίας (mismatching) μεταξύ των τιμών των μαγνητοαντιστάσεων που σχηματίζουν τη γέφυρα Wheatstone εξαιτίας μικρών ατελειών κατά τη διάρκεια κατασκευής του αισθητήρα. Ακόμα και με αντιστάσεις εκατοντάδων έως χιλιάδων ohm ένα σφάλμα της τάξης κλάσματος του ohm μπορεί να προκαλέσει αισθητές μεταβολές στην τάση εξόδου της γέφυρας. Για παράδειγμα, στον αισθητήρα HMC1021 οι αντιστάσεις της γέφυρας R_1, R_2, R_3 και R_4 είναι 1100Ω η κάθε μια. Η τάση εξόδου της γέφυρας δίνεται από τον τύπο:

$$V_{out} = V_B \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

όπου $V_{out} = V_{off}$ στην περίπτωση μηδενικής διέγερσης.

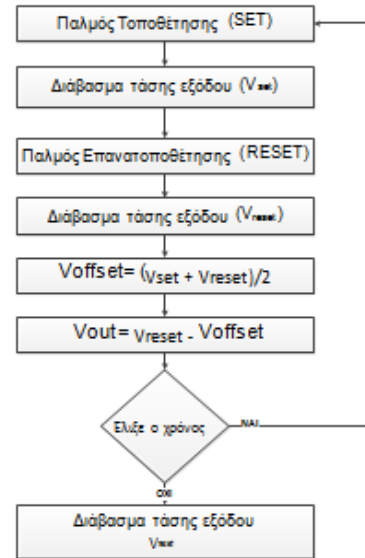
Έτσι για παράδειγμα, εάν οι αντιστάσεις R_1 και R_4 είναι 1101Ω και οι R_2 και R_3 παραμείνουν στα 1100Ω, με μία τάση τροφοδότησης $V_B=5$ Volts, τότε η V_{off} είναι 2.27millivolts. Θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει αυτή την τάση πολύ μικρή, η πραγματικότητα ωστόσο είναι διαφορετική. Όταν μετρήσουμε με ένα ιδανικό HMC1021 μία συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της γης της τάξης των 100 millgauss, η τάση εξόδου του αισθητήρα με μια τάση τροφοδοσίας $V_B=5$ Volts, θα είναι 0.5 mV. Αν συγκρίνουμε τώρα την V_{off} λόγω της κατασκευαστικής ατέλειας και της μετρούμενης τιμής, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τάση απόκλισης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη μετρούμενη τιμή. Για το λόγο αυτό η τάση απόκλισης V_{off} δεν πρέπει να αγνοείται και χρειάζεται να συνηθιστεί στους υπολογισμούς και στην συνέχεια να αφαιρείται από τις μετρήσεις.

Το θετικό στην περίπτωση μας είναι ότι η τάση απόκλισης της γέφυρας είναι σταθερή σε όλο το χρονικό διάστημα της χρήσιμης ζωής του αισθητήρα. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει μια φορά και έπειτα να εξαλειφθεί με χρήση μιας εκ των μεθόδων που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Ένα άλλο θετικό στοιχείο σε ότι αφορά την τάση απόκλισης είναι ότι είναι ευθέως ανάλογη με την τάση τροφοδοσίας της γέφυρας, δηλαδή μπορεί να δοθεί σε κανονικοποιημένη μορφή.

Ένας εύκολος τρόπος να εξαλείψουμε την τάση απόκλισης της γέφυρας (στην περίπτωση που έχει μικρή τιμή), είναι να παίρνουμε σταθερές μετρήσεις μαγνητικού πεδίου μεταξύ κάθε τοποθέτησης και επανατοποθέτησης. Μιας και με την τοποθέτηση και την επανατοποθέτηση αλλάζει η πολικότητα της τάσης εξόδου της γέφυρας, υπολογίζουμε την τάση απόκλισης της γέφυρας βρίσκοντας τη διαφορά των δύο τάσεων και διαιρώντας το αποτέλεσμα με 2, δηλαδή:

$$V_{offset} = \frac{V_{set} - (-V_{reset})}{2} = \frac{V_{set} + V_{reset}}{2}$$

Στη συνέχεια, την υπολογισθείσα αυτή τιμή την αφαιρούμε από την V_{reset} και λαμβάνουμε την τάση εξόδου (βλ. Εικόνα 3.3).



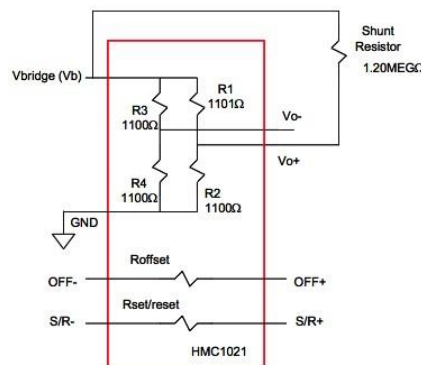
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα τάσης απόκλισης και υπολογισμός της

3.4 Άλλες μέθοδοι μείωσης της τάσης απόκλισης

Στην περίπτωση που η τάση απόκλιση της γέφυρας λάβει μεγάλες τιμές, υπάρχουν πολλές επιπλέον μέθοδοι για τη μείωση της. Επιγραμματικά αναφέρουμε τις εξής:

3.4.1 Μέθοδος με αντίσταση παράκαμψης

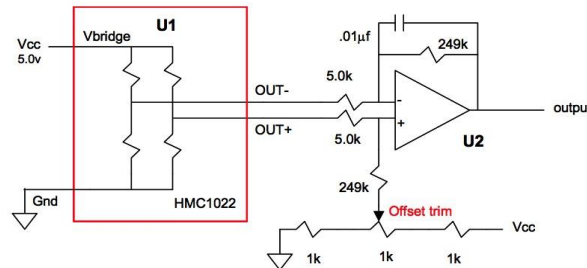
Όπως βλέπουμε και στο ακόλουθο σχήμα, πρόκειται για μια απλή προσθήκη αντίστασης παράλληλης σε ένα ή περισσότερα πόδια της γέφυρας, έτσι ώστε να την επαναφέρει στην ισορροπία.



Εικόνα 3.4: Αντιστάθμιση με αντίσταση παράκαμψης

3.4.2 Μηδενισμός με δυναμικό πόλωσης του ενισχυτή

Με τη μέθοδο αυτή δεν επηρεάζουμε την απόδοση της γέφυρας. Χρησιμοποιούμε τον ίδιο τον τελεστικό ενισχυτή για τη διόρθωση της τάσης απόκλισης της γέφυρας (βλ. Εικόνα 3.5).

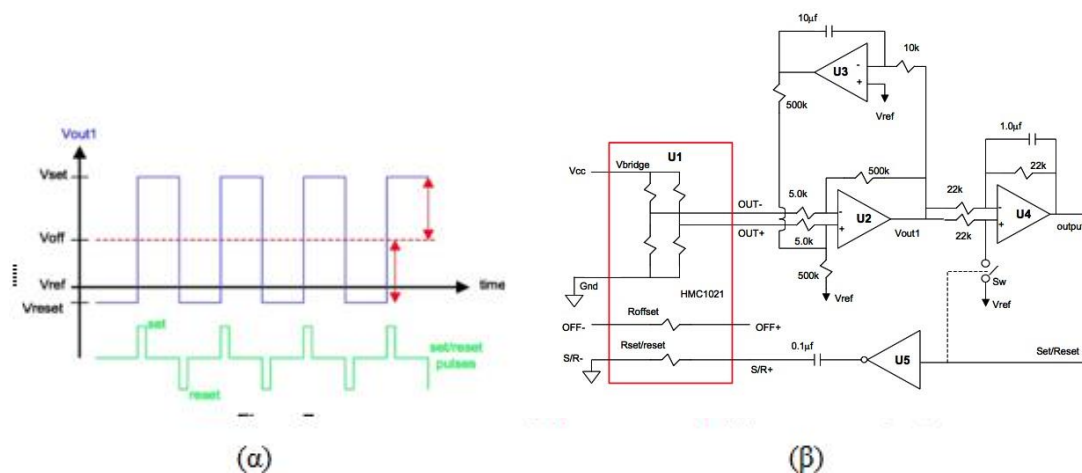


Εικόνα 3.5: Αντιστάθμιση μέσω πόλωσης στον τελεστικό ενισχυτή

3.4.3 Μηδενισμός με διακοπτόμενη ανατροφοδότηση (Switching Feedback)

Στην παρούσα μέθοδο, με την εναλλαγή από set σε reset και αντίθετα, δημιουργείται μια τετραγωνική κυματομορφή στην έξοδο της γέφυρας με τη χρήση ενός ολοκληρωτή στην ανάδραση. Έτσι, ο ολοκληρωτής παίρνει το μέσο όρο από τις εναλλαγές και δημιουργεί την κατάλληλη τάση για ανάδραση.

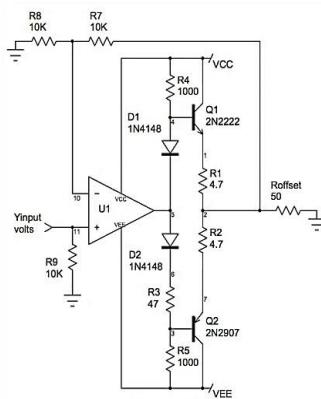
Όπως βλέπουμε στο κυκλωματικό διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.6(β), το πρώτο στάδιο της ενίσχυσης πραγματοποιείται μέσω ενός ενισχυτή οργάνων (instrumentation amplifier) (U₂), που η έξοδός του σημειώνεται σαν V_{out1}. Στο δεύτερο στάδιο της ενίσχυσης το κύκλωμα λειτουργεί σαν ολοκληρωτής που ανατροφοδοτεί το εξερχόμενο σήμα V_{out1}, αφαιρώντας από μέσα την αλλαγή και επαναφέροντάς το σε μια συνεχή τιμή, η οποία αντιστοιχεί στην τάση απόκλισης της γέφυρας. Μέσω της αφαίρεσης της τάσης απόκλισης από την τάση εξόδου, έχουμε ένα σήμα απαλλαγμένο από την απόκλιση της γέφυρας. Το τελευταίο στάδιο ενίσχυσης (U₄) έχει σκοπό να αφαιρέσει την εναλλαγή από την τάση εξόδου, δηλαδή να αφαιρέσει την εναλλαγή πολικότητας από την τάση V_{out1}, αφήνοντας στην έξοδό του μόνο την τάση που αντιστοιχεί στο ενισχυμένο μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 3.6: (α) Διακοπτόμενη έξοδος γέφυρας, (β) Κύκλωμα υλοποίησης διακοπτόμενης μεθόδου

3.4.4 Μέθοδος με τη χρήση ρεύματος στο τύλιγμα αντιστάθμισης

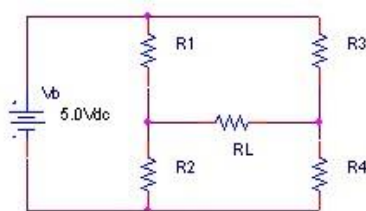
Με τη μέθοδο αυτή ελέγχουμε την απόκλιση μέσω ελέγχου του ρεύματος που διαπερνά το τύλιγμα ισοστάθμισης. Εκτός από την αφαίρεση της τάσης απόκλισης της γέφυρας, η μέθοδος αυτή επιτρέπει και την αφαίρεση μόνιμων μαγνητικών πεδίων. Επίσης χρησιμοποιείται στην ενεργή αναβαθμολόγηση του αισθητήρα. Για ρεύματα που ξεπερνούν τις ικανότητες του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος, το οποίο παρουσιάζει χαμηλό κόστος.



Εικόνα 3.7: Κύκλωμα οδήγησης ρεύματος

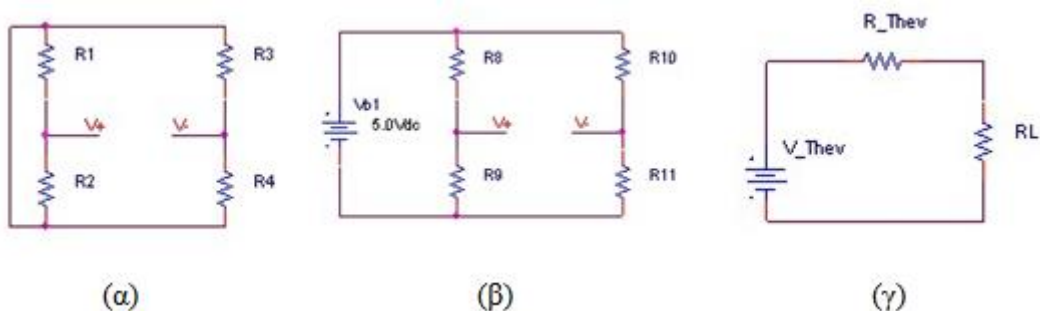
3.5 Υπολογισμός της τάσης εξόδου της γέφυρας του HMC.

Όπως γνωρίζουμε, οι αισθητήρες HMC1001/1002 είναι κατασκευασμένοι σε δομή γέφυρας Wheatstone. Η ανάλυση της γέφυρας Wheatstone είναι απλοϊκή και την αναλύουμε έτσι, ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε στην συνέχεια την αντίσταση εξόδου και τον θερμικό θόρυβο που εμφανίζεται από τα ηλεκτρονικά.



Εικόνα 3.8: Γέφυρα Wheatstone

Για την πιο εύκολη ανάλυση της, στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται το ισοδύναμο κατά Thévenin κύκλωμα.



Εικόνα 3.9. Ανάλυση κυκλώματος γέφυρας Wheatstone κατά Thevenin: (α) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης αντίστασης κατά Thevenin (β) Κύκλωμα εύρεσης της ισοδύναμης πηγής τάσης κατά Thevenin και (γ) Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin

Έχοντας το ισοδύναμο κατά Thevenin κύκλωμα, η ανάλυση γίνεται ιδιαίτερα απλή. Η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin (βλ. Εικόνα 3.9(α)), προκύπτει:

$$R_{Thev} = R_1 // R_2 + R_3 // R_4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{Thev} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (3.1)$$

Η τάση Thevenin του κυκλώματος (Εικόνα 3.9(β)) είναι ίση με:

$$V_{Thev} = V_+ - V_- = V_b$$

$$\text{όπου } V_+ = \frac{V_b R_2}{R_1 + R_2} \text{ και } V_- = \frac{V_b R_4}{R_3 + R_4}.$$

Επομένως:

$$V_{Thev} = V_+ - V_- = \frac{V_b R_2}{R_1 + R_2} - \frac{V_b R_4}{R_3 + R_4} = V_b \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{Thev} = V_b \cdot \frac{R_2(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3.2)$$

Η τάση που θα μετράει ο τελεστικός ενισχυτής με πεπερασμένη αντίσταση εισόδου R_{in} (η οποία φαίνεται σαν R_L στην έξοδο της γέφυρας στην Εικόνα 3.9(γ)) προκύπτει ύστερα από απλή εφαρμογή διαιρέτη τάσης. Συγκεκριμένα, βρίσκουμε ότι:

$$V_L = \frac{V_{Thev} R_L}{R_L + R_{Thev}} = \frac{V_b R_L \cdot \frac{R_2(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}}{R_L + V_b \cdot \frac{R_2(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_L = \frac{V_b R_L (R_2(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2))}{(R_L(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + V_b (R_2(R_3 + R_4) - R_4(R_1 + R_2)))} \quad (3.3)$$

Αν θεωρήσουμε, ότι οι αντιστάσεις είναι ίσες και ότι οι R_1 και R_4 μεταβάλλονται κατά $-\Delta R$, ενώ οι R_2 και R_3 κατά $+\Delta R$, η (3.2) λαμβάνει τη μορφή:

$$(3.2) \Rightarrow V_{Thev} = \frac{V_b ((R + \Delta R)(R + \Delta R + R - \Delta R) - (R - \Delta R)(R - \Delta R + R + \Delta R))}{(R - \Delta R + R + \Delta R)(R + \Delta R + R - \Delta R)}$$

$$\Rightarrow V_{Thev} = \frac{V_b(2R(R + \Delta R) - 2R(R - \Delta R))}{4R^2} = V_b \cdot 2R \cdot \frac{2\Delta R}{4R^2}$$

$$\Rightarrow V_{Thev} = V_b \frac{\Delta R}{R} \quad (3.4)$$

Με όμοιο τρόπο βρίσκουμε την τάση Thevenin για την περίπτωση που μεταβάλλεται κατά ΔR μόνο μια αντίσταση (έστω η R_2):

$$V_{Thev} = \frac{V_b((R + \Delta R)2R - R(2R + \Delta R))}{(2R + \Delta R)2R} = \frac{V_b \cdot R \cdot \Delta R}{(2R + \Delta R)2R}$$

$$\Rightarrow V_{Thev} = \frac{V_b \cdot \Delta R}{4R + 2\Delta R} \quad (3.5)$$

Εν συνεχεία, μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος τάσης που θα έχουμε, αν αντί για μια μεταβλητή αντίσταση χρησιμοποιήσουμε τέσσερις, ως εξής:

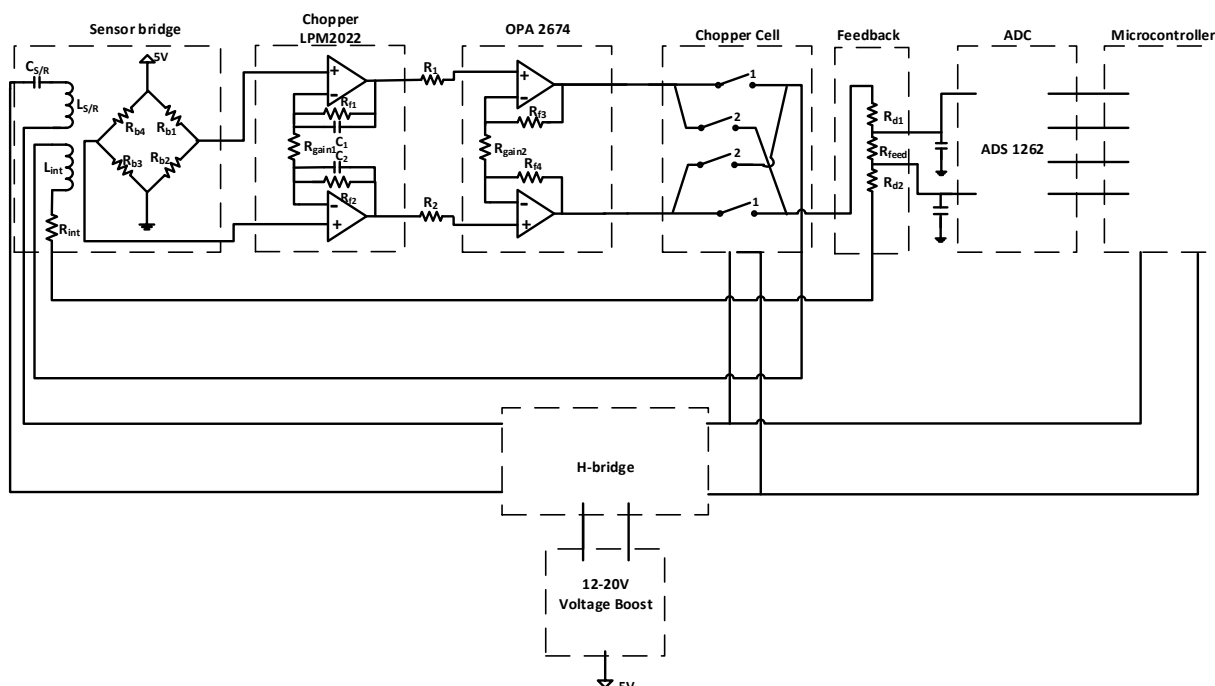
$$(3.4), (3.5) \Rightarrow A = \frac{V_b \frac{\Delta R}{R}}{\frac{V_b \cdot \Delta R}{4R + 2\Delta R}} = \frac{4R + 2\Delta R}{R} \approx 4$$

Όταν επομένως έχουμε τέσσερις μεταβλητές αντιστάσεις (δύο που να μεταβάλλονται κατά ΔR και δύο που να μεταβάλλονται κατά $-\Delta R$), επιτυγχάνουμε μέγιστη απόδοση και γραμμικότητα της γέφυρας. Οι αντιστάσεις ποτέ δεν έχουν ακριβώς τις ίδιες τιμές, και για το λόγο αυτό είδαμε προηγουμένως πώς να αντισταθμίζουμε την τάση απόκλιση της γέφυρας. Αν έχουμε το chip του αισθητήρα χωρίς τα ηλεκτρονικά του σε μαγνητικά θωρακισμένο θάλαμο, μπορούμε υπολογίσουμε ακριβώς τις αντιστάσεις αυτές.

Κεφάλαιο 4^ο: Παρουσίαση & Ανάλυση του κυκλώματος αισθητήρα κλειστού βρόχου

4.1 Παρουσίαση Συνολικού Κυκλώματος

Στην παρούσα διπλωματική, θα κατασκευάσουμε έναν αισθητήρα κλειστού βρόχου, για τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε τους αισθητήρες HMC1001/1002, προκειμένου να μετρήσουμε το μαγνητικό πεδίο στις τρεις διαστάσεις. Στο ακόλουθο σχήμα παρατηρούμε το συνολικό κύκλωμα που έχουμε σχεδιάσει (για τον ένα άξονα), μέρος του οποίου θα μελετήσουμε αναλυτικότερα στη συνέχεια.



Εικόνα 4.1: Συνολικό κύκλωμα αισθητήρα κλειστού βρόχου (ενός άξονα)

Όπως βλέπουμε, θεωρούμε πως το ισοδύναμο κύκλωμα του αισθητήρα είναι η γέφυρα Wheatstone από την οποία αυτός αποτελείται, και για την οποία μιλήσαμε εκτενώς στην Ενότητα 3.5. Η έξοδος του αισθητήρα εισέρχεται σε έναν chopper amplifier, ο οποίος ενισχύει κατά πολύ το σήμα. Με τον ενισχυτή οργάνων μέτρησης του επόμενου σταδίου, επιδιώκουμε τη ενίσχυση του ρεύματος του σήματος. Η αντίσταση ανάδρασης που χρησιμοποιούμε δημιουργεί ένα κύκλωμα κλειστού βρόχου, το οποίο συμβάλλει –όπως θα δούμε– στην σημαντική βελτίωση της γραμμικότητας του αισθητήρα.

Η γέφυρα τύπου H χρησιμοποιείται προκειμένου να εφαρμοστεί στον αισθητήρα κατάλληλος εξωτερικός παλμός τοποθέτησης/επανατοποθέτησης (S/R), (βλ. Ενότητα 3.2). Με την H-bridge επιτυγχάνεται αλλαγή των μαγνητικών διπόλων του υλικού λόγω του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο στον δύσκολο άξονα μαγνήτισης. Επειδή κάθε φορά που εφαρμόζεται το S/R, η γέφυρα τύπου H θα αλλάζει την πολικότητα της γέφυρας και ο κόμβος θα πέφτει αναγκαστικά σε αστάθεια, το chopper

cell της Εικόνας 4.1 είναι απαραίτητο, προκειμένου να αναστρέφεται πάλι η πολικότητα και να διατηρείται ο κλειστός βρόχος σε ευστάθεια.

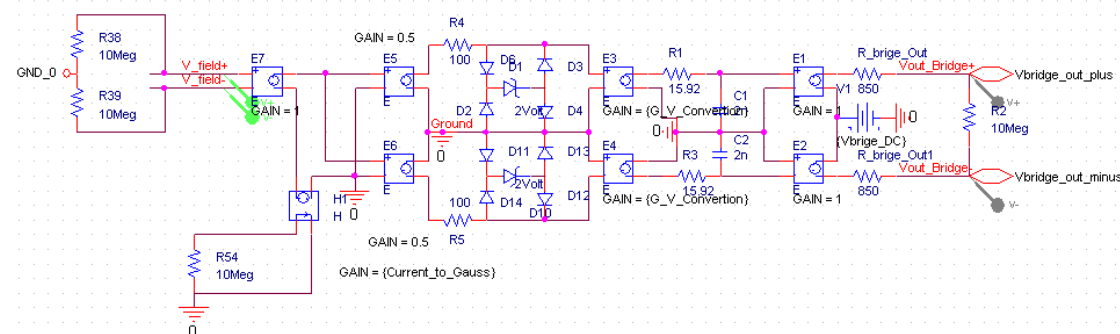
Τέλος, αναφορικά με το ψηφιακό κομμάτι της σχεδίασης, ο ADC και ο μικροελεγκτής εφαρμόζουν τη δειγματοληψία και μετατρέπουν την έξοδο σε ψηφιακή μορφή.

4.2 Ανάλυση Επιμέρους Σταδίων

4.2.1 1^ο στάδιο: Αισθητήρας

4.2.1.1 Προτεινόμενο μοντέλο μαγνητικού αισθητήρα

Στην Εικόνα 4.2 παρατηρούμε το κύκλωμα που υλοποιήσαμε στο Spice για να προσομοιώσουμε τον αισθητήρα, ο οποίος αποτελεί γέφυρα Wheatstone με τιμή αντίστασης γέφυρας ίση με $R_b = 850 \Omega$. Στο κύκλωμα έχουμε συμπεριλάβει την μετατροπή το πεδίου (Gauss) που λαμβάνεται ως είσοδος σε τάση. Το δικτύωμα των διόδων αποτελεί το κύκλωμα περιορισμού της τάσης, ενώ το φίλτρο που βλέπουμε στη συνέχεια υλοποιεί τη συχνότητα 3dB στα 5MHz. Η έξοδος λαμβάνεται στα άκρα της γέφυρας Wheatstone.



Εικόνα 4.2: Προτεινόμενο μοντέλο αισθητήρα

4.2.1.2 Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα

Ο αισθητήρας αποτελεί βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης με συχνότητα 3dB στα $f_{3dB} = 5\text{MHz}$, οπότε η συνάρτηση μεταφοράς του είναι:

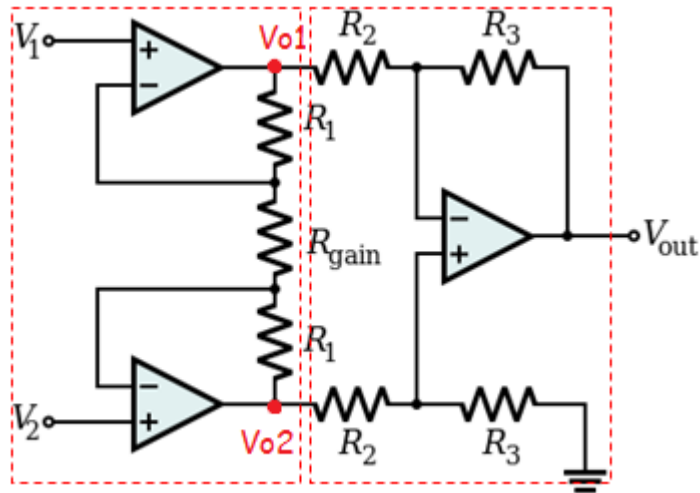
$$H_{sensor}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} = \frac{10^7 \pi}{s + 10^7 \pi} \quad (4.1)$$

4.2.2 2^ο στάδιο: Chopper Amplifier

4.2.2.1 Ενισχυτής Οργάνων Μέτρησης

Ο ενισχυτής οργάνων μέτρησης είναι ένα είδος διαφορικού ενισχυτή, οποίος παρέχει πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου, χαμηλό DC offset, χαμηλό θόρυβο, πολύ μεγάλο κέρδος ανοιχτού βρόχου και πολύ υψηλό λόγο απόρριψης κοινού σήματος (CMRR). Επιπλέον, επιτρέπει την πολύ εύκολη ρύθμιση του κέρδους με τη μεταβολή της τιμής μιας μόνο αντίστασης. Εν γένει, ενισχυτές οργάνων μέτρησης χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα του κυκλώματος τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κύκλωμα ενισχυτή οργάνων μέτρησης. Όπως μπορούμε να δούμε, αποτελείται από δυο στάδια. Το πρώτο στάδιο σχηματίζεται από δυο τελεστικούς ενισχυτές και τις σχετικές αντιστάσεις. Οι ενισχυτές αυτού του σταδίου χρησιμοποιούν αναστρέφουσα συνδεσμολογία και πρακτικά αποτελούν απομονωτές τάσης (buffers). Το δεύτερο στάδιο συνίσταται από έναν τελεστικό ενισχυτή, ο οποίος μαζί με τις τέσσερις αντιστάσεις που τον συνοδεύουν, αποτελεί έναν ενισχυτή διαφορών.



Εικόνα 4.3: Κλασικό κύκλωμα Ενισχυτή Οργάνων Μέτρησης (Instrumentation Amplifier, IA)

Η ανάλυση του κυκλώματος της Εικόνας 4.3 είναι αρκετά απλή, εάν υποθέσουμε ότι οι τελεστικοί μας ενισχυτές είναι ιδανικοί. Τα εικονικά βραχυκυκλώματα στις εισόδους των ΤΕ του πρώτου σταδίου προκαλούν την εμφάνιση των τάσεων εισόδου V_1 και V_2 στους δυο ακροδέκτες της αντίστασης R_{gain} . Συνεπώς, η διαφορική τάση εισόδου $V_2 - V_1 = V_{in}$ εμφανίζεται στα άκρα της R_{gain} και προκαλεί ροή ρεύματος $i = V_{in}/R_{gain}$ διαμέσου της R_{gain} και των δυο αντιστάσεων R_1 . Αυτό το ρεύμα με τη σειρά του προκαλεί μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου των ΤΕ, η οποία προκύπτει εύκολα ίση με:

$$V_{o2} - V_{o1} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) (V_2 - V_1)$$

Άρα το κέρδος του πρώτου σταδίου του ΙΑ είναι:

$$A_1 = 1 + \frac{2R_1}{R_{gain}} \quad (4.2)$$

Ο ενισχυτής διαφορών του δεύτερου σταδίου «αντιλαμβάνεται» αυτή τη διαφορά τάσης $V_{o2} - V_{o1}$ και παρέχει μια ανάλογη τάση εξόδου V_{out} :

$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{R_3}{R_2} (V_{o2} - V_{o1}) = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) (V_2 - V_1) \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{out} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) V_{in} \end{aligned}$$

Συνεπώς, το συνολικό διαφορικό κέρδος τάσης δίνεται από την σχέση:

$$A_d = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right)$$

Είναι συνήθως τακτική να λαμβάνεται το απαιτούμενο συνολικό κέρδος ή τουλάχιστον ένα μεγάλο ποσοστό του διαφορικού κέρδους στο πρώτο στάδιο του ενισχυτή και να επιτελείται η διαφορική λειτουργία στο δεύτερο στάδιο του ενισχυτή. Για το λόγο αυτό, το δεύτερο στάδιο του ενισχυτή οργάνων μέτρησης σχεδιάζεται συνήθως για αρκετά μικρό διαφορικό κέρδος.

Επιπλέον, τις περισσότερες φορές οι σχεδιαστές των ενισχυτών οργάνων μέτρησης υλοποιούν τις αντιστάσεις ανάδρασης R_1, R_2 και R_3 μέσα στο ολοκληρωμένο ενώ η αντίσταση R_{gain} υλοποιείται με εξωτερική αντίσταση ώστε να ρυθμίζεται εύκολα το κέρδος του ενισχυτή. Παρ' όλα αυτά, όταν η αντίσταση R_{gain} παίρνει τιμές μέσα σε ένα συνεχές εύρος τιμών, είναι αρκετά δύσκολο να πετύχουμε ένα συγκεκριμένο κέρδος όταν αυτό επιθυμείται. Για το λόγο αυτό, η αντίσταση R_{gain} παίρνει συνήθως μερικές διακριτές τιμές, ώστε το κέρδος να ορίζεται στις αντίστοιχες προκαθορισμένες από τον σχεδιαστή τιμές.

Σημειώνουμε, ότι για την υλοποίηση του chopper amplifier, χρησιμοποιούμε μόνο το πρώτο στάδιο του ενισχυτή οργάνων μέτρησης, το κέρδος του οποίου βρήκαμε ότι υπολογίζεται από την Σχέση (4.2).

4.2.2.2 Επιλογή Ολοκληρωμένου για τη σχεδίαση του σταδίου

Στόχος του σταδίου αυτού είναι να ενισχύσουμε το σήμα που λαμβάνουμε από την έξοδο του αισθητήρα και να κρατήσουμε το θόρυβο $1/f$ σε χαμηλά επίπεδα. Για την κατασκευή του κυκλώματος του chopper amplifier, χρησιμοποιούμε το ολοκληρωμένο LMP2022 της Texas Instruments, το οποίο περιλαμβάνει δύο τελεστικούς ενισχυτές.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζουμε ορισμένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου, τα οποία μας οδήγησαν στην επιλογή του.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά LMP2022

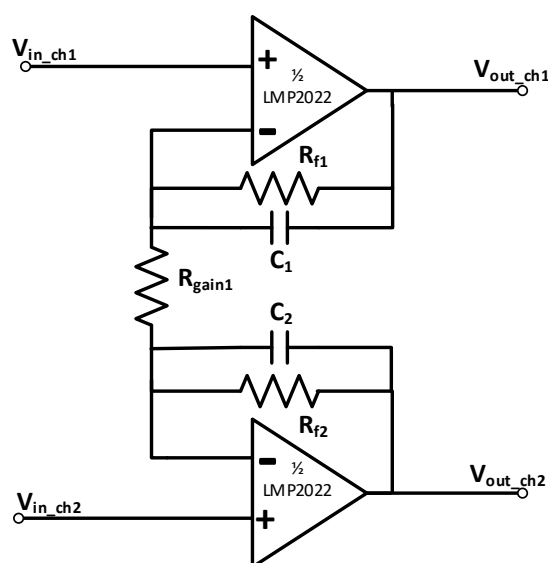
Χαρακτηριστικά	Τιμές ($T_A = 25^\circ\text{C}$ και $V_s = 5\text{V}$)
Input Offset Voltage	-0.4μV/°C
Input Offset Voltage Drift	-0.004μV/°C
Input Voltage Noise	11nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ για κέρδος τάσης $A_v = 1000\text{V/V}$
Power supply range	2.2V-5.5V
Gain Bandwidth (GBW)	5MHz
CMRR	190dB
PSRR	130dB

Όπως διαπιστώνουμε, ο LMP2022 παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή τάση απόκλισης (offset voltage) και πολύ μικρή μεταβολή της τάσης απόκλισης, χαρακτηριστικά τα οποία τον καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή ακρίβεια στη λήψη μετρήσεων. Επιπλέον, το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο χρησιμοποιεί τεχνικές για αυτόματη διόρθωση του μηδενός, προκειμένου να μετράει και να διορθώνει διαρκώς το σφάλμα της τάσης απόκλισης εισόδου (input offset error

voltage), εξασφαλίζει εντυπωσιακό λόγο απόρριψης κοινού σήματος (CMRR) και λόγο απόρριψης τάσης τροφοδοσίας (PSRR), ενώ ταυτόχρονα δε δημιουργεί επιπλέον θόρυβο 1/f (flicker noise) και περιορίζει την ανάγκη για «καλιμπράρισμα» σε πολλά κυκλώματα. Λόγω του πολύ μικρού θορύβου της τάσης εισόδου και του μηδενικού θορύβου 1/f, οι ενισχυτές LMP2022 είναι κατάλληλοι για εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων, όπου το σήμα εισόδου έχει πολύ μικρό πλάτος και επομένως απαιτείται μεγάλη ενίσχυση (π.χ. ζυγαριές ακριβείας βιομηχανικού τύπου). Επίσης, είναι ιδανικοί για αισθητήρες θέσης, αισθητήρες γέφυρας, αισθητήρες πίεσης, ιατρικό εξοπλισμό και άλλες εφαρμογές υψηλής ακριβείας με μικρό περιθώριο για σφάλμα. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών, καθιστούν τον LMP2022 ιδανική επιλογή για ενισχυτές επενεργητών υψηλού κέρδους (transducer amplifiers), για ADC απομονωτές, για DAC I-V μετατροπείς, καθώς και για άλλες εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια και μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

4.2.2.3 AC Ανάλυση- Εξαγωγή Συνάρτησης μεταφοράς

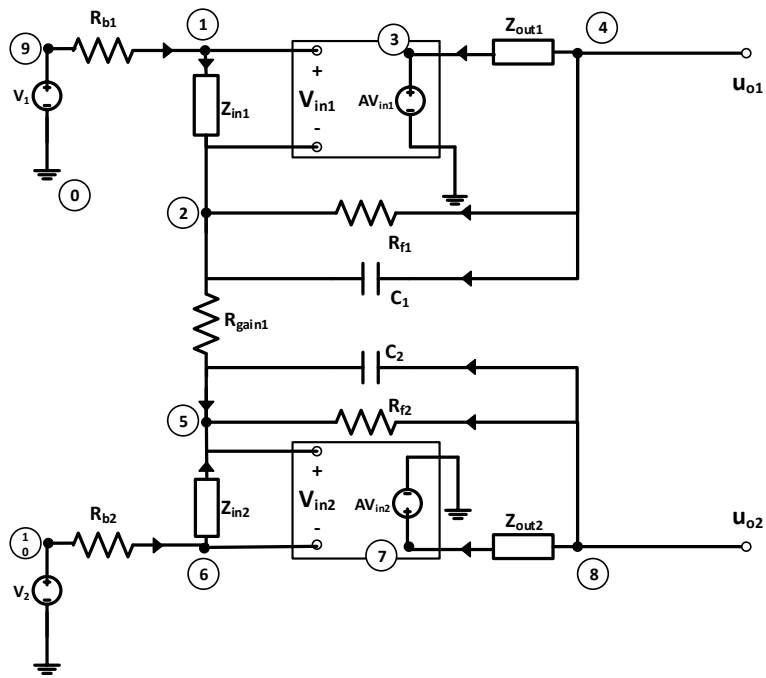
Όπως και στις περισσότερες εφαρμογές του, έτσι και στην περίπτωση μας, ο ενισχυτής LMP2022 χρησιμοποιείται σε συνδεσμολογία ενισχυτή οργάνων μέτρησης (βλ. Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Σχηματικό chopper amplifier

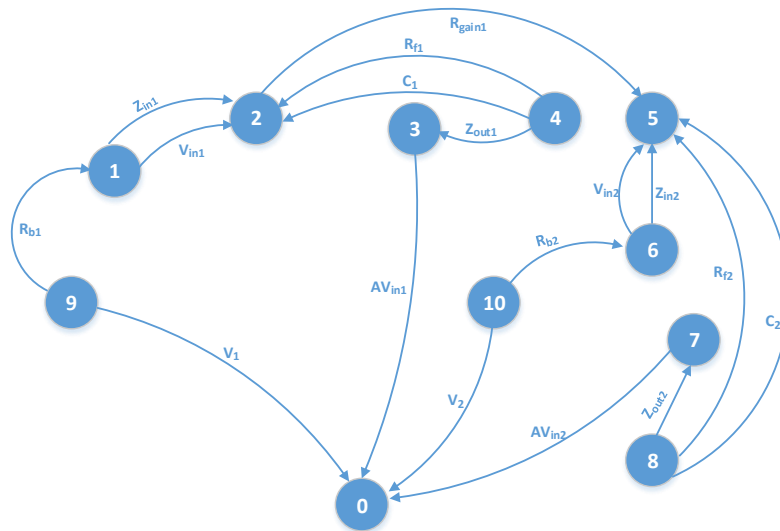
Παρατηρούμε ότι στην γνωστή μας πλέον συνδεσμολογία του instrumentation amplifier, έχει προστεθεί από ένας πυκνωτής παράλληλα σε κάθε αντίσταση ανάδρασης, όπως προτείνεται και στο datasheet του ολοκληρωμένου. Οι πυκνωτές αυτοί μας επιτρέπουν να επιτύχουμε μείωση του συνολικού θορύβου, ενώ μειώνουν ταυτόχρονα το εύρος ζώνης (bandwidth) του κυκλώματος.

Για να κάνουμε την AC ανάλυση του παραπάνω σταδίου, το μετατρέπουμε στο ισοδύναμο σχήμα της Εικόνας 4.5. Για το σκοπό αυτό, θεωρούμε τους ενισχυτές σαν δίθυρα με αντιστάση εισόδου (Z_{in}) και εξόδου (Z_{out}). Οι αντιστάσεις R_{b1} και R_{b2} είναι οι αντιστάσεις της γέφυρας Wheatstone του αισθητήρα, όπως φαίνεται και στο ολικό κύκλωμα της Εικόνας 4.1.

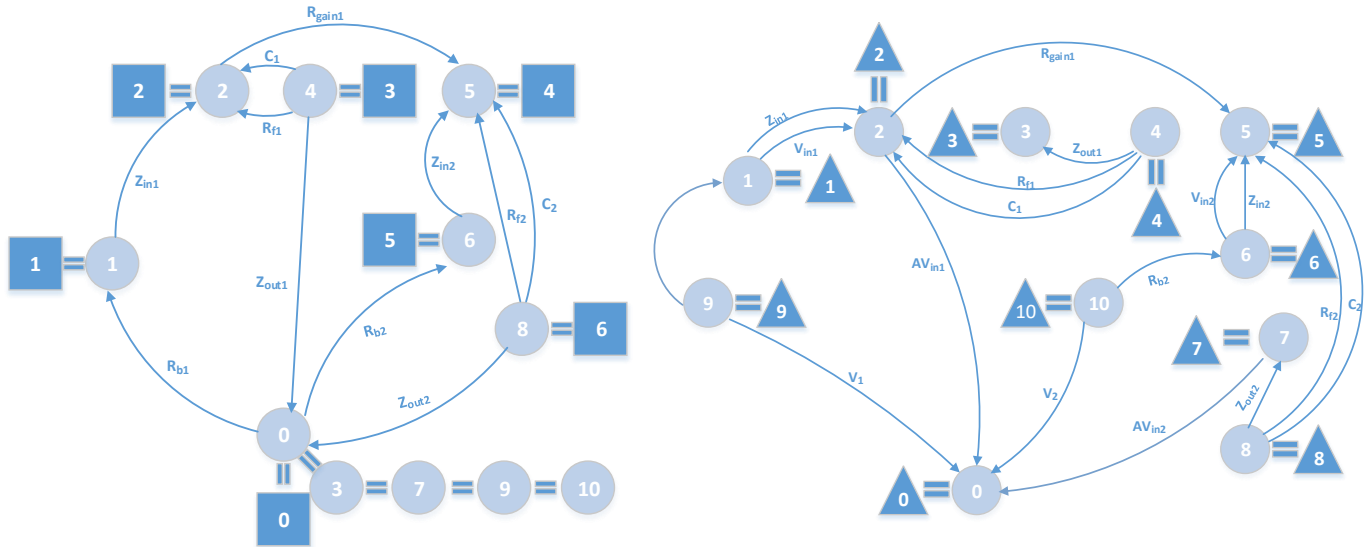


Εικόνα 4.5: Θεωρητική ανάλυση κυκλώματος chopper amplifier

Χρησιμοποιούμε την τροποποιημένη μέθοδο κόμβων, για να παράγουμε την ζητούμενη συνάρτηση μεταφοράς. Για το σκοπό αυτό, από τον αρχικό γράφο της Εικόνας 4.6, δημιουργούμε τον I και V γράφο της Εικόνας 4.7.



Εικόνα 4.6: Αρχικός γράφος του κυκλώματος chopper amplifier



Εικόνα 4.7: I-γράφοι (αριστερά) και V-γράφοι (δεξιά) του κυκλώματος chopper amplifier

Για τα στοιχεία του κυκλώματος της Εικόνας 4.5, έχουμε ότι:

$$R_{b1} = R_{b2} = R_b$$

$$Z_f = C_f // R_f, \text{ όπου } C_f = C_1 = C_2 \text{ και } R_f = R_{f1} = R_{f2}$$

$$Z_{in1} = Z_{in2} = R_{in} // C_{in} = R_{in} / (1 + sC_{in}R_{in})$$

$$Z_{out1} = Z_{out2} = Z_{out}$$

Θεωρώ την είσοδο V_1 και V_2 ως το άθροισμα και τη διαφορά αντίστοιχα του κοινού σήματος V_{cm} και του μισού του διαφορικού σήματος V_{sig} :

$$V_1 = V_{cm} + \frac{1}{2}V_{sig}$$

$$V_2 = V_{cm} - \frac{1}{2}V_{sig}$$

Κάνοντας την ανάλυση, παρατηρούμε, ότι η διαφορική έξοδος ($V_{out} = u_{o1} - u_{o2}$) του παρόντος σταδίου είναι ανεξάρτητη από την τάση κοινού σήματος, δηλαδή $V_{out}(V_{cm}) = 0$. Επομένως η συνάρτηση μεταφοράς είναι ίση με το λόγο V_{out}/V_{sig} , οποίος ισούται με:

$$H_1(s) = \frac{V_{out}}{V_{sig}} = \frac{(AZ_{in} + Z_{out})R_{gain1} + 2AZ_{in}Z_f}{((A + 1)Z_{in} + R_b + Z_f + Z_{out})R_{gain1} + 2(Z_{out} + Z_f)(R_b + Z_{in})} \quad (4.3)$$

Το κέρδος A του ενισχυτή προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευστή και δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{A_0}{(s - p_0)(s - p_1)}$$

Στο datasheet του ολοκληρωμένου βρίσκουμε ότι: $A_0 = 160db = 10^{\frac{160}{20}} = 10^8$ (open loop gain) και οι πόλοι p_0 και p_1 βρίσκονται στα 5MHz και 10mHz αντίστοιχα. Επομένως:

$$A = \frac{10^8}{\left(1 + \frac{s}{10^7\pi}\right)\left(1 + \frac{s}{2\pi 10^{-2}}\right)}$$

Από το datasheet βρίσκουμε τις καθορισμένες τιμές για τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου:

$$R_{in} = 10M\Omega, C_{in} = 10pF$$

$$Z_{out} = R_{out} = 100\Omega$$

Η αντίσταση της γέφυρας Wheatstone του αισθητήρα ισούται με $R_b = 850\Omega$. Επίσης επιλέγουμε τις R_{gain1} και R_f έτσι, ώστε το κέρδος κλειστού βρόχου του chopper amplifier (που δίνεται από τη Σχέση (4.2)) να είναι πολύ μεγάλο. Επιλέγουμε:

$$R_{gain1} = 200\Omega$$

$$R_f = 40k\Omega$$

Υπενθυμίζουμε ότι έχουμε τοποθετήσει πυκνωτή C_f παράλληλα στην R_f , γεγονός το οποίο επηρεάζει την τιμή του κέρδους κλειστού βρόχου ως εξής:

$$A_D = 1 + \frac{2R_f // C_f}{R_{gain1}} = 1 + \frac{2R_f}{R_{gain1}(1 + sC_fR_f)}$$

Μια προτεινόμενη από το datasheet του ολοκληρωμένου τιμή για τον πυκνωτή C_f είναι 22nF. Το κέρδος είναι επομένως εξαρτώμενο της συχνότητας και ισούται με:

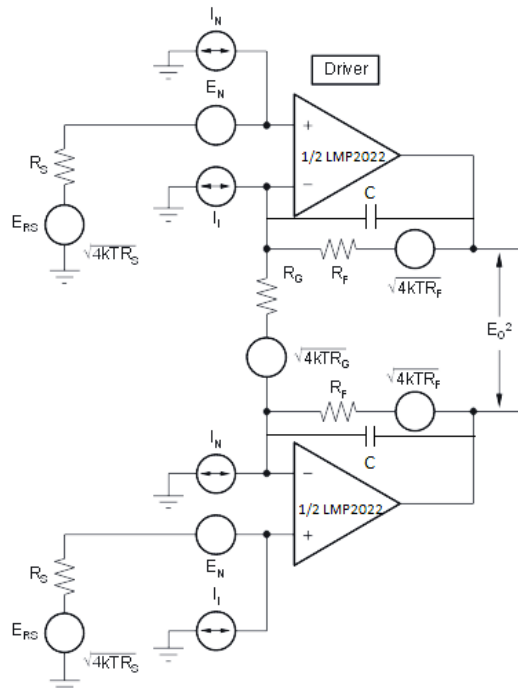
$$A_D = 1 + \frac{400}{1 + 88 \cdot 10^{-5}s} = \frac{401 + 88 \cdot 10^{-5}s}{1 + 88 \cdot 10^{-5}s}$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην σχέση (4.3) λαμβάνουμε την συνάρτηση μεταφοράς του chopper amplifier:

$$H_1(s) = 0.056 \frac{s^4 + 3.15 \cdot 10^7 s^3 + 3.5 \cdot 10^{11} s^2 + 1.98 \cdot 10^{23} s + 9.01 \cdot 10^{28}}{(s + 1.12 \cdot 10^8)(s + 2.65 \cdot 10^7)(s + 3.96 \cdot 10^6)(s + 1059.75)} \quad (4.4)$$

4.2.2.4 Ανάλυση Θορύβου

Το ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό του θορύβου στην έξοδο του σταδίου (output noise voltage) φαίνεται στη συνέχεια:



Εικόνα 4.8: Ισοδύναμο κύκλωμα για την ανάλυση θορύβου

Από την ανάλυση του παραπάνω κυκλώματος, παίρνουμε τον ολικό θόρυβο εξόδου E_o , που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_o = \sqrt{2 \cdot A_D^2 \cdot (E_N^2 + (I_N \cdot R_S)^2 + 4kTR_S) + 2(I_I R_F)^2 + 2(4kTR_F A_D)} \quad (4.9)$$

Για τις πηγές θορύβου E_N , I_N και I_I του ολοκληρωμένου, γνωρίζουμε από το datasheet ότι:

$$E_N = \frac{13nV}{\sqrt{Hz}}$$

$$I_N = \frac{350fA}{\sqrt{Hz}}$$

$$I_I = 350fA/\sqrt{Hz}$$

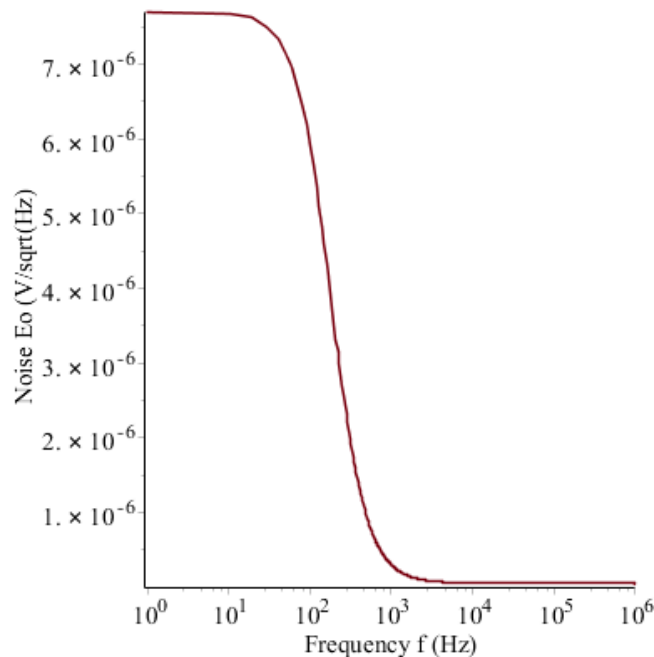
Επίσης, έχουμε ότι:

$$A_D = \frac{401 + 88 \cdot 10^{-5} s}{1 + 88 \cdot 10^{-5} s}, \quad 4kT = 16,568 \cdot 10^{-18} \frac{V^2}{Hz}, \quad R_S = R_b = 850\Omega, \quad R_f = 40k\Omega.$$

Αντικαθιστούμε τις παραπάνω τιμές στη σχέση (4.9) και θέτοντας $s=0$, βρίσκουμε το θόρυβο στην dc ανάλυση:

$$E_o = 7.709\mu V/\sqrt{Hz}$$

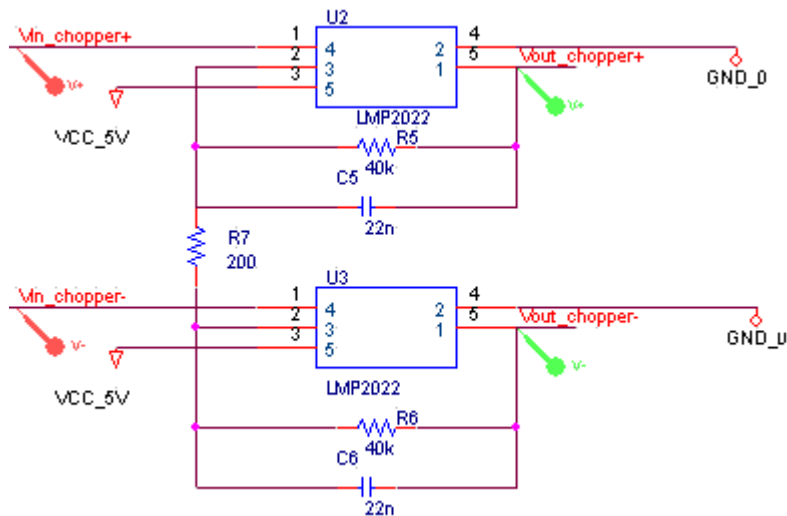
Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται πώς μεταβάλλεται το πραγματικό μέρος του θορύβου για διάφορες τιμές της συχνότητας f .



Εικόνα 4.9: Θόρυβος chopper amplifier συναρτήσει της συχνότητας f

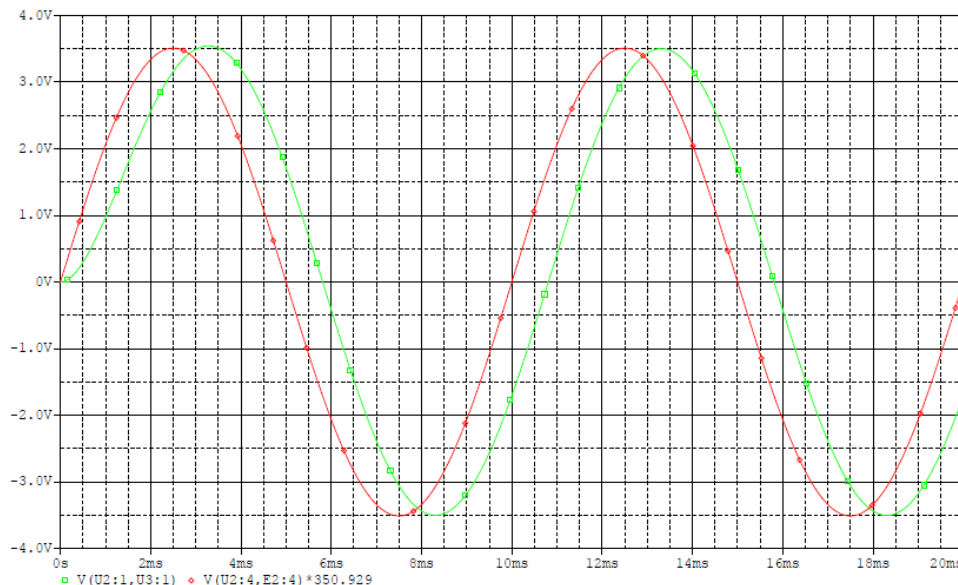
4.2.2.5 Προσομοιώσεις στο pSpice

Υλοποιούμε στο πρόγραμμα OrCAD Capture το κύκλωμα της Εικόνας 4.4, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.10: Υλοποίηση Chopper amplifier (LMP2022) στο Spice

Θέτοντας στην διαφορική είσοδο ημιτονική πηγή συχνότητας 1kHz και πλάτους 10mV, τρέχουμε την παραπάνω προσομοίωση στο χρόνο (time domain) και παρατηρούμε την έξοδο σε σχέση με την είσοδο (Εικόνα 4.11).



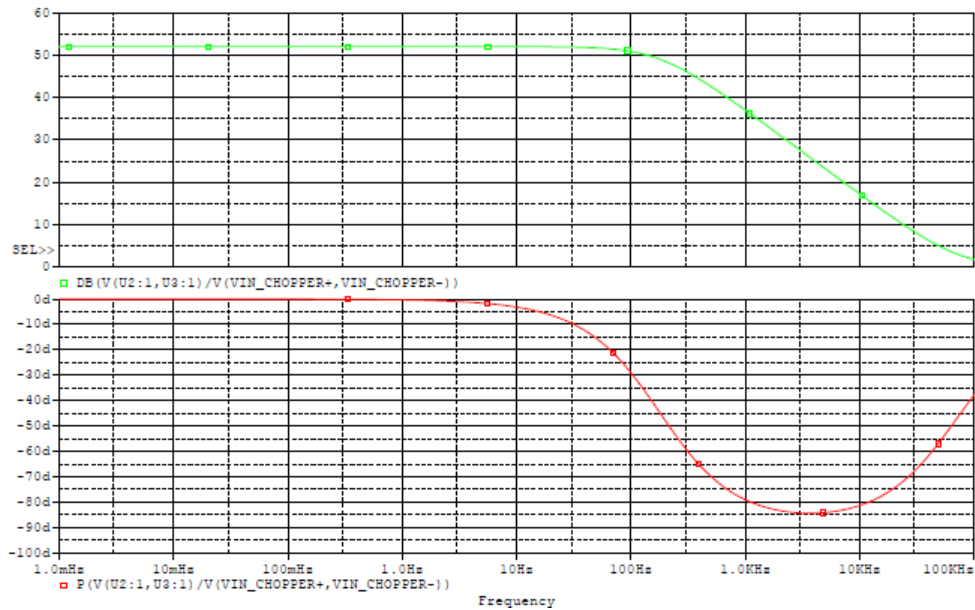
Εικόνα 4.11: Πλάτος (σε V) σε σχέση με το χρόνο (σε ms) της εισόδου (πράσινο) και της εξόδου (κόκκινο) του chopper amplifier (LMP2022)

Παρατηρούμε, ότι η έξοδος έχει ενισχυθεί 350 φορές σε σχέση με την είσοδο, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από το κέρδος A_D , για το οποίο έχουμε ήδη βρει:

$$A_D = \frac{|401 + 88 \cdot 10^{-5} \cdot s|}{|1 + 88 \cdot 10^{-5} \cdot s|} = \frac{|401 + 88 \cdot 10^{-5} \cdot j2\pi 100|}{|1 + 88 \cdot 10^{-5} \cdot j2\pi 100s|} = 350.929$$

εφόσον $s = j\omega = j2\pi f$ και $f = 100\text{Hz}$. Επιπλέον, παρατηρούμε καθυστέρηση της εξόδου σε σχέση με την είσοδο, η οποία οφείλεται στον πρώτο πόλο του ολοκληρωμένου LMP2022, ο οποίος –όπως αναφέραμε και στην ενότητα 4.2.2.3– βρίσκεται στα 10mHz.

Στη συνέχεια, επιλέγουμε AC πηγή ($10mV_{AC}, 2.5V_{DC}$) και τρέχουμε την προσομοίωση στην επιλογή “AC sweep/noise” προκειμένου να παράγουμε το διάγραμμα Bode πλάτους και φάσης (βλ. Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.12: Διάγραμμα Bode Πλάτους (πάνω) και Φάσης (κάτω) του ενισχυτή chopper (2^ο στάδιο)

Αφού το διαφορικό κέρδος του chopper είναι ίσο με $A_D = 350.929$, το κέρδος σε dB ισούται με $20 \log 350.929 = 50.9 \approx 51$, όπως ακριβώς δείχνει και το διάγραμμα Bode πλάτους της Εικόνας 4.12. Από το ίδιο διάγραμμα, προκύπτει ότι η συχνότητα γονάτου είναι ίση με $f_{3dB} = 179.5Hz$. Παρόλο που στα χαρακτηριστικά του LMP2022 είδαμε ότι το εύρος ζώνης του είναι 5MHz, εδώ είναι φανερά χαμηλότερο, γεγονός το οποίο οφείλεται στη προσθήκη του πυκνωτή ανάδρασης C_f .

4.2.3 3ο στάδιο: Ενισχυτής Ρεύματος

4.2.3.1 Επιλογή Ολοκληρωμένου για τη σχεδίαση

Στο στάδιο αυτό, λαμβάνουμε ως είσοδο το ενισχυμένο πλέον σήμα του προηγούμενου σταδίου και χρησιμοποιώντας ξανά τη συνδεσμολογία ενισχυτή οργάνων μέτρησης επιτυγχάνουμε ενίσχυση της τιμής του ρεύματος. Για το σκοπό αυτό, επιλέγουμε το ολοκληρωμένο OPA2674 της Texas Instruments, το οποίο γνωρίζουμε ότι παρέχει ψηλό ρεύμα εξόδου και ιδιαίτερα χαμηλή παραμόρφωση, όπως απαιτείται σε xDSL και Power Line Modem driver εφαρμογές. Συγκεκριμένα, όταν λειτουργεί υπό τάση +12V, καταναλώνει 9mA/ch, ενώ στην έξοδο παρέχει έως 500mA (σε βραχυκύκλωμα). Στην περίπτωση μας, που στο ολοκληρωμένο παρέχεται τάση +5V, το ρεύμα εξόδου φθάνει την τυπική τιμή των 260mA. Άλλα χαρακτηριστικά του OPA2674 που οδήγησαν στην επιλογή του, είναι το σχετικά υψηλό slew rate, το υψηλό εύρος ζώνης στην περίπτωση μεγάλου σήματος, το οποίο ενεργοποιείται όταν εφαρμόζουμε στο κύκλωμά μας το S/R, καθώς και το ακόμα μεγαλύτερο εύρος ζώνης μικρού σήματος, το οποίο μας χρησιμεύει όταν το σύστημά μας φτάσει σε ευστάθεια και παρατηρούνται μόνο μικρές διαταραχές του εξωτερικού πεδίου.

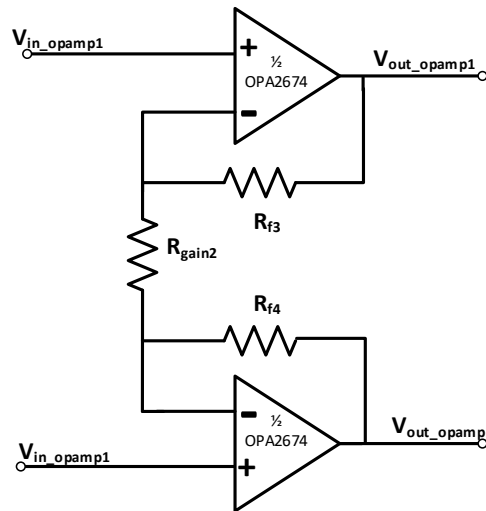
Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά του OPA2674:

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά OPA2674

Χαρακτηριστικά	Τιμές ($T_A = 25^\circ\text{C}$ και $V_S = 5\text{V}$)
Output Current	$\pm 260\text{mA}$
Bandwidth for 0.1dB Gain Flatness	34MHz
Large-Signal Bandwidth	190MHz
Slew Rate	900V/ μs
Input Voltage Noise	$2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

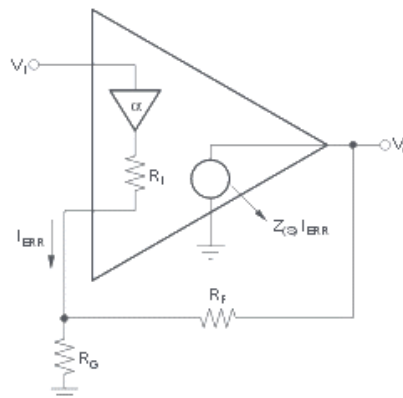
4.2.3.2 AC Ανάλυση-Εξαγωγή Συνάρτησης Μεταφοράς

Στο ακόλουθο σχήμα παραθέτουμε το κύκλωμα που υλοποιήσαμε για την επιθυμητή ενίσχυση ρεύματος.



Εικόνα 4.13: Σχηματικό ενισχυτή ρεύματος (2^ο στάδιο)

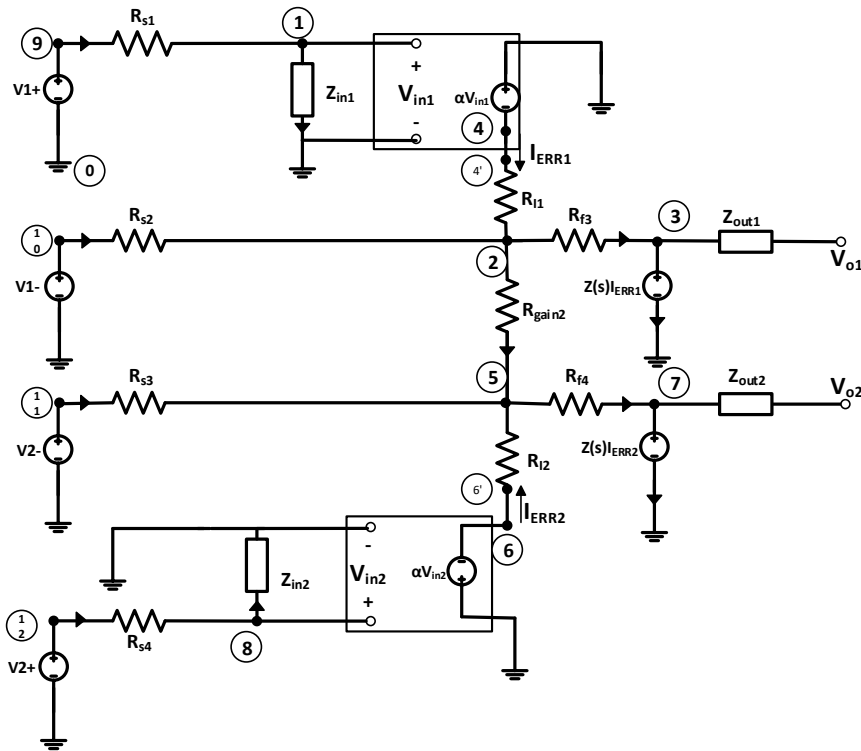
Για την ανάλυση του παραπάνω σχήματος, χρησιμοποιούμε την εσωτερική δομή του ενισχυτή OPA2674, η οποία παρατίθεται στο αντίστοιχο datasheet και έχει τη μορφή:



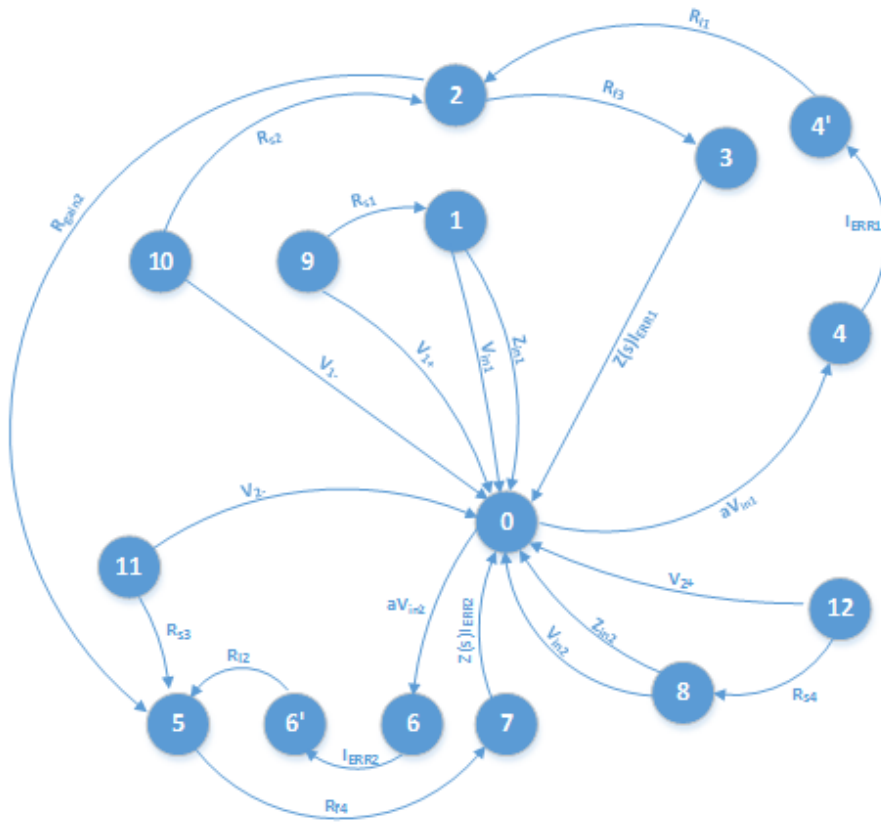
Εικόνα 4.14: Αναλυτικό κύκλωμα που δείχνει την απόκριση συχνότητας μικρού σήματος του OPA2674

όπου: α =το κέρδος του buffer από την μη αναστρέφουσα είσοδο στην αναστρέφουσα είσοδο, R_I =εμπέδηση εξόδου του buffer, I_{ERR} = σήμα ρεύματος σφάλματος ανατροφοδότησης (feedback error current signal), $Z(s)$ = κέρδος διαντίστασης ανοιχτού βρόχου (από το I_{ERR} στο V_o) συναρτήσει της συχνότητας.

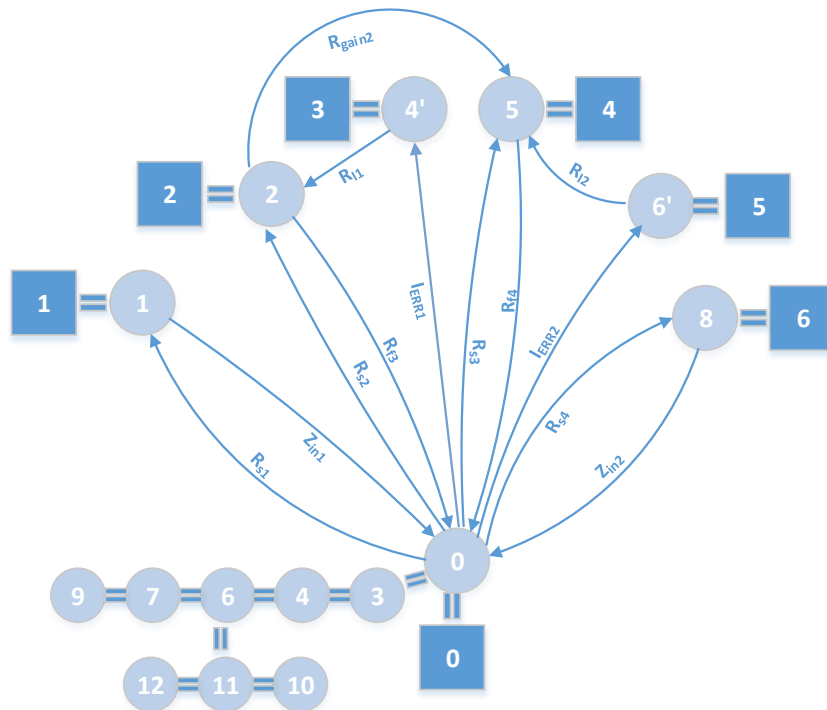
Από το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα, παράγουμε τον ολικό αρχικό γράφο της Εικόνας 4.16, καθώς και τους I και V γράφους (Εικόνα 4.17 & 4.18) που χρησιμοποιούμε για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς. Σημειώνουμε, ότι οι αντιστάσεις R_{s1} και R_{s4} του παρακάτω σχήματος αντιστοιχούν στις αντιστάσεις R_1 και R_2 που βρίσκονται ανάμεσα στο 2^ο (chopper) και το 3^ο στάδιο της Εικόνας 4.1. Τις αντιστάσεις R_{s2} και R_{s3} τις χρησιμοποιούμε για να ρυθμίσουμε κατάλληλα το offset.



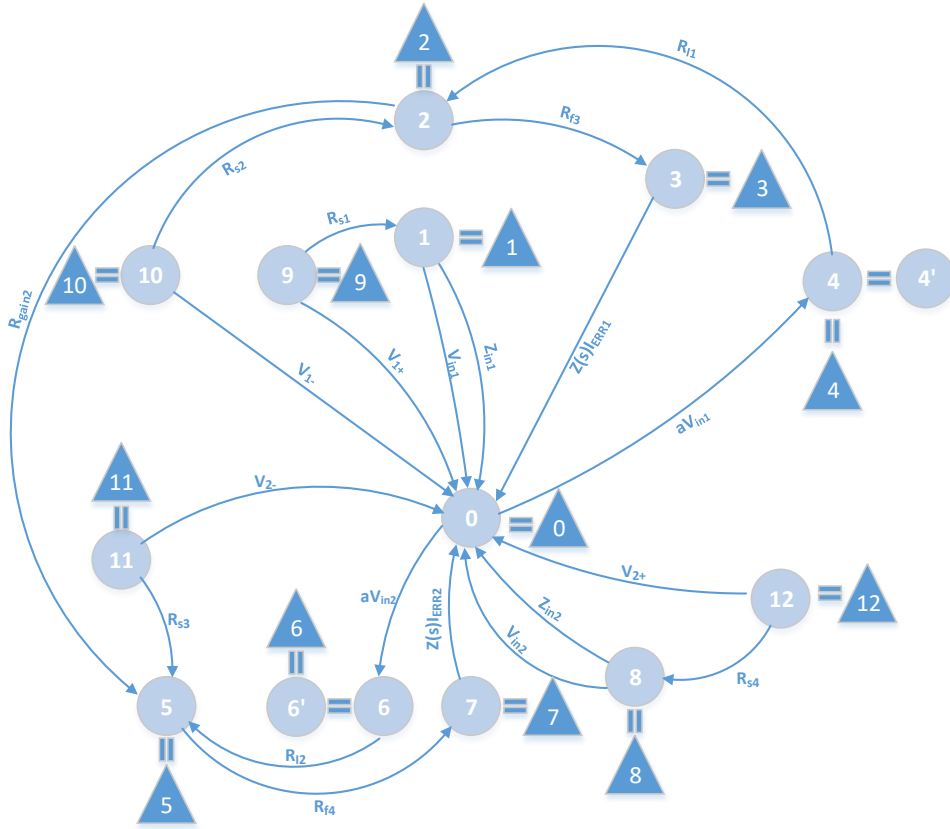
Εικόνα 4.15: Θεωρητική ανάλυση κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος



Εικόνα 3.16: Αρχικός γράφος του κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος



Εικόνα 4.17: I-γράφος κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος



Εικόνα 4.18: V-γράφος κυκλώματος ενισχυτή ρεύματος

Για τα στοιχεία του κυκλώματος της Εικόνας 4.15, έχουμε ότι:

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = R_s$$

$$R_{f3} = R_{f4} = R_f$$

$$R_{I1} = R_{I2} = R_I$$

$$Z_{in1} = Z_{in2} = R_{in} // C_{in} = R_{in} / (1 + sC_{in}R_{in})$$

$$Z_{out1} = Z_{out2} = Z_{out}$$

Η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή, γι' αυτό τη θεωρούμε μηδενική και την αγνοούμε στην ανάλυσή μας ($Z_{out} = 0$).

Όπως και προηγουμένως, ορίζουμε τις εισόδους ως εξής:

$$V_{1+} = V_{cm1} + \frac{1}{2}V_{sig1}$$

$$V_{2+} = V_{cm1} - \frac{1}{2}V_{sig1}$$

$$V_{1-} = V_{cm2} + \frac{1}{2}V_{sig2}$$

$$V_{2-} = V_{cm2} - \frac{1}{2}V_{sig2}$$

Κάνοντας την ανάλυση, βρίσκουμε την έξοδο του σταδίου συναρτήσει των V_{cm1} , V_{sig1} , V_{cm2} και V_{sig2} . Η έξοδος προκύπτει ανεξάρτητη των δυο κοινών σημάτων, δηλαδή: $V_{out}(V_{cm1}) = V_{out}(V_{cm2}) = 0$.

Επομένως, η διαφορική έξοδος $V_{out} = V_{O1} - V_{O2}$ είναι ίση με το ακόλουθο άθροισμα:

$$V_{out} = V_{out1}(V_{sig1}) + V_{out2}(V_{sig2})$$

Όπου:

$$V_{out1} = - \frac{Z(s)a \left(\left(R_f + \frac{1}{2} R_{gain2} \right) R_s + \frac{1}{2} R_{gain2} R_f \right) Z_{in}}{\left(\left(\left(R_I + \frac{1}{2} R_{gain2} \right) R_f + \frac{1}{2} R_{gain2} (Z(s) + R_I) \right) R_s + \frac{1}{2} R_{gain2} R_I R_f \right) (R_s + Z_{in})} V_{sig1}$$

και:

$$V_{out2} = - \frac{Z(s)R_f R_{gain2}}{\left((R_f + Z(s) + R_I) R_s + R_I R_f \right) R_{gain2} + 2R_I R_s R_f} V_{sig2}$$

Επειδή δεν έχουμε συμπεριλάβει ακόμα στην ανάλυση μας το offset, θεωρούμε μηδενικά τα dc σήματα, και επομένως θεωρούμε ότι η έξοδος εξαρτάται μόνο από το V_{sig1} , δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς του σταδίου ισούται με:

$$H_2(s) = \frac{V_{out1}}{V_{sig1}} = \frac{Z(s)a \left(\left(R_f + \frac{1}{2} R_{gain2} \right) R_s + \frac{1}{2} R_{gain2} R_f \right) Z_{in}}{\left(\left(\left(R_I + \frac{1}{2} R_{gain2} \right) R_f + \frac{1}{2} R_{gain2} (Z(s) + R_I) \right) R_s + \frac{1}{2} R_{gain2} R_I R_f \right) (R_s + Z_{in})} \quad (4.5)$$

Από το datasheet του ολοκληρωμένου OPA2674, λαμβάνουμε τις εξής τιμές για την μη αναστρέφουσα αντίσταση εισόδου και την αντίσταση αναστρέφουσας εξόδου R_I :

$$R_{in} = 250k\Omega \text{ και } C_{in} = 2pF$$

$$R_I = 22\Omega$$

Το κέρδος a του ενισχυτή προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευστή (βλ. Datasheet) και δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{A_0}{1 + s/\omega_o}$$

όπου $A_0 = 80db = 10^{\frac{80}{20}}$ και ο πόλος βρίσκεται στα 168MHz, άρα $\omega_o = 2\pi f = 336 \cdot 10^6 \pi \text{ rad/sec}$.

Επομένως:

$$a = \frac{10^6}{1 + \frac{s}{336 \cdot 10^6 \pi}} = \frac{336 \cdot 10^{12} \pi}{s + 336 \cdot 10^6 \pi}$$

Επιπλέον, επιλέγουμε κατάλληλα τις αντιστάσεις R_f και R_{gain2} , ώστε το συνολικό διαφορικό κέρδος του ενισχυτή οργάνων μέτρησης του συγκεκριμένου σταδίου να είναι σχετικά μικρό. Επιλέγουμε:

$$R_f = 1600\Omega$$

$$R_{gain} = 400\Omega$$

Γνωρίζοντας ότι για τον ενισχυτή οργάνων μέτρησης ισχύει: $A_D = 1 + 2 \frac{R_f}{R_{gain}}$, προκύπτει $A_D = 9$.

Από το datasheet του ολοκληρωμένου βρίσκουμε επίσης ότι το κέρδος διαντίστασης ανοιχτού βρόχου $Z(s)$ ισούται με:

$$Z(s) = LoopGain \cdot (R_f + R_I \cdot NG) \quad (4.6)$$

Όπου:

$$NG = NoiseGain = 1 + \frac{R_f}{R_{gain}} = 1 + \frac{1600}{400} = 5$$

και το LoopGain προσδιορίζεται από το διάγραμμα Bode ανοιχτού βρόχου του κυκλώματος και είναι της μορφής:

$$LoopGain = \frac{A_0(s + z_0)}{(s + p_0)(s + p_1)}$$

Για τις τιμές των αντιστάσεων R_f και R_{gain} , προκύπτει ότι $A_0 = 13.25dB = 10^{\frac{13.25}{20}} = 4.5973$. Επιπλέον, από το διάγραμμα Bode παρατηρούμε, ότι το μηδενικό z_0 βρίσκεται στα 1.156GHz, ενώ οι πόλοι p_0 και p_1 βρίσκονται στα 9.9MHz και 3.61GHz αντίστοιχα. Άρα:

$$\begin{aligned} LoopGain &= 4.5973 \cdot \frac{1 + \frac{s}{4.26 \cdot 10^9}}{\left(1 + \frac{s}{6.22 \cdot 10^7}\right) \left(1 + \frac{s}{2.268 \cdot 10^{10}}\right)} = \\ &= \frac{8.933 \cdot 10^8 \cdot (s + 4.26 \cdot 10^9)}{(s + 6.22 \cdot 10^7)(s + 2.268 \cdot 10^{10})} \quad (4.7) \end{aligned}$$

Από την (4.6) και την (4.7), καταλήγουμε στην εξής σχέση για το $Z(s)$:

$$Z(s) = \frac{0.502 \cdot 10^6 \cdot (s + 4.26 \cdot 10^9)}{(s + 6.22 \cdot 10^7)(s + 2.268 \cdot 10^{10})}$$

Τέλος, επιλέγουμε αντίσταση R_s ίση με $R_s = 100\Omega$. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή κατά την ανάλυση του θορύβου –την οποία θα δούμε στη συνέχεια– παρατηρήσαμε, ότι με αυτήν την τιμή ο θόρυβος διατηρείται σε ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα.

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην συνάρτηση μεταφοράς $H_2(s)$ (Σχέση (4.5)) προκύπτει:

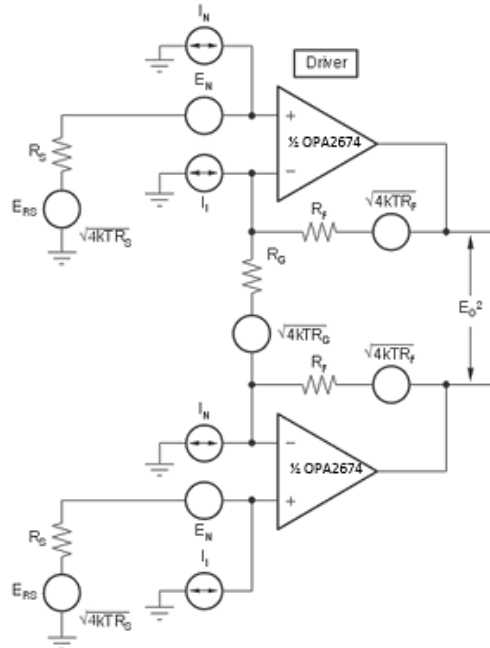
$$H_2(s) = - \frac{3.077 \cdot 10^{28} (s + 4.26 \cdot 10^9)}{(s + 1.06 \cdot 10^9)(s + 2.44 \cdot 10^{10})(s + 1.13 \cdot 10^8)(s + 5.00 \cdot 10^9)} \quad (4.8)$$

Για λόγους πληρότητας υπολογίζουμε και το άθροισμα των εξόδων $V_{out_sum} = V_{o1} + V_{o2}$ (συναρτήσεσι των $V_{cm1}, V_{cm2}, V_{sig1}$ και V_{sig2}), το οποίο είναι ίσο με το μέσο της τάσης τροφοδοσίας, έτσι ώστε η διακύμανση (swing) να είναι ίδια πάνω και κάτω, δηλαδή το θετικό μέρος του παλμού να έχει ίδιο πλάτος με το αρνητικό, προκειμένου να μην μπαίνει ο τελεστικός στον κόρο. Όπως αναμένεται και από την ανάλυση του instrumentation amplifier, το V_{out_sum} είναι ανεξάρτητο των διαφορικών σημάτων V_{sig} . Έτσι, προκύπτει ότι:

$$V_{out_sum} = - \frac{2Z(s)(R_s + R_f)Z_{in}a}{((R_f + Z(s) + R_I)R_s + R_I R_f)(R_s + Z_{in})} V_{cm1} - \frac{2Z(s)R_f}{(R_f + Z(s) + R_I)R_s + R_I R_f} V_{cm2}$$

4.2.3.3 Ανάλυση Θορύβου

Το ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό του θορύβου στην έξοδο του σταδίου (output noise voltage) δίνεται στο datasheet του ολοκληρωμένου:



Εικόνα 4.19: Ισοδύναμο κύκλωμα για την ανάλυση θορύβου του ενισχυτή οργάνων μέτρησης του 2^{ου} σταδίου

Από την ανάλυση του παραπάνω κυκλώματος, παίρνουμε τον ολικό θόρυβο εξόδου E_o , που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_o = \sqrt{2 \cdot A_D^2 \cdot (E_N^2 + (I_N \cdot R_s)^2 + 4kTR_s) + 2(I_I R_f)^2 + 2(4kTR_f A_D)} \quad (4.9)$$

Για τις πηγές θορύβου E_N , I_N και I_I του ολοκληρωμένου, γνωρίζουμε από το datasheet ότι:

$$E_N = 2nV/\sqrt{Hz}$$

$$I_N = 16pA/\sqrt{Hz}$$

$$I_I = 24pA/\sqrt{Hz}$$

Επίσης, έχουμε ότι:

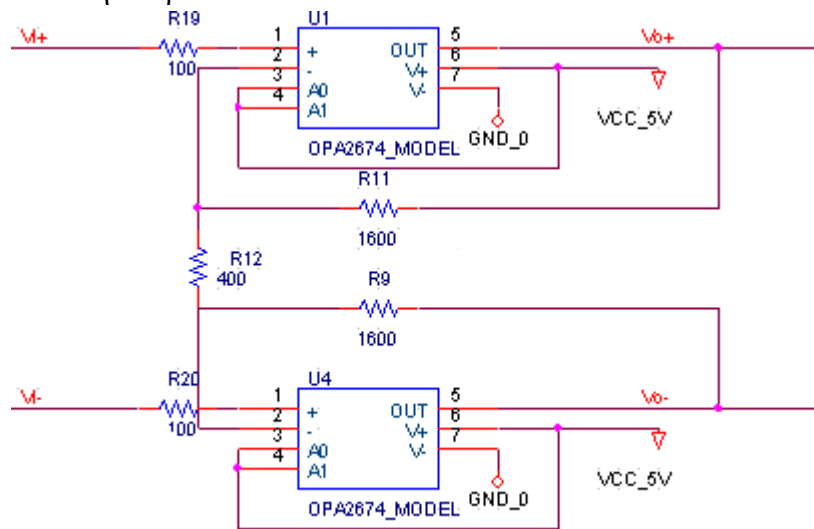
$$A_D = 9, \quad 4kT = 16,568 \cdot 10^{-18} \frac{V^2}{Hz}, \quad R_s = 100\Omega, \quad R_f = 1600\Omega \text{ και } R_G = 400\Omega.$$

Εκτελώντας τις πράξεις της σχέσης (4.9), ο ολικός θόρυβος στην έξοδο του ενισχυτή προκύπτει:

$$E_o = 68.973nV/\sqrt{Hz}$$

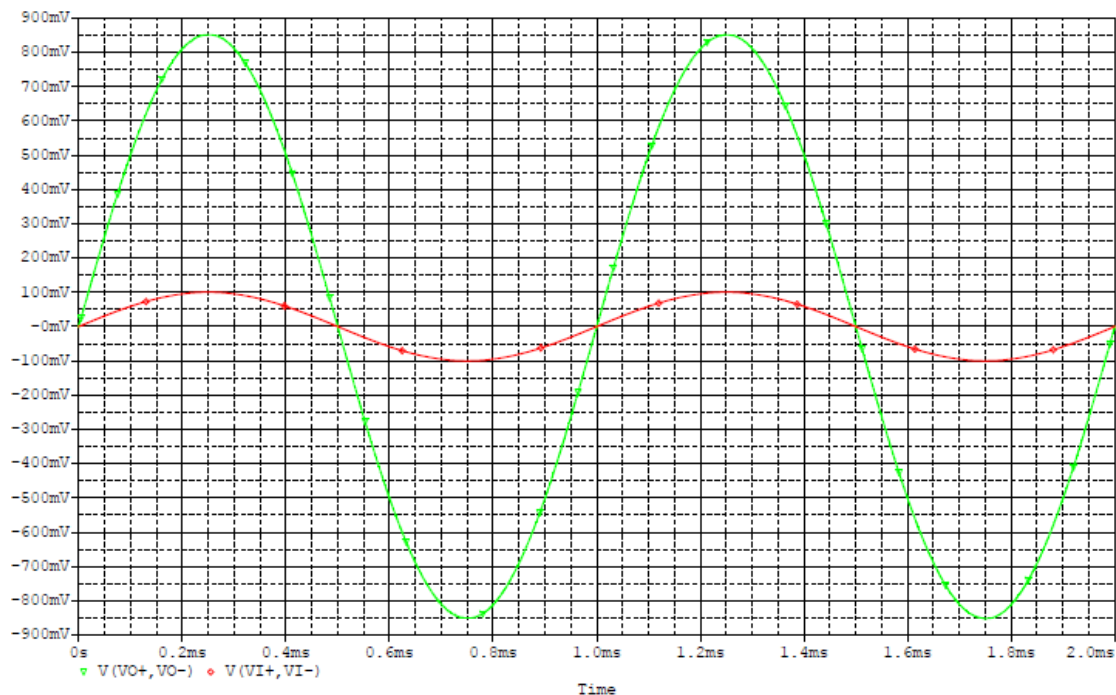
4.2.3.4 Προσομοιώσεις στο pSpice

Υλοποιούμε στο πρόγραμμα OrCAD Capture το κύκλωμα της Εικόνας 4.13 όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.20: Υλοποίηση ενισχυτή ρεύματος (OPA2674) στο Spice

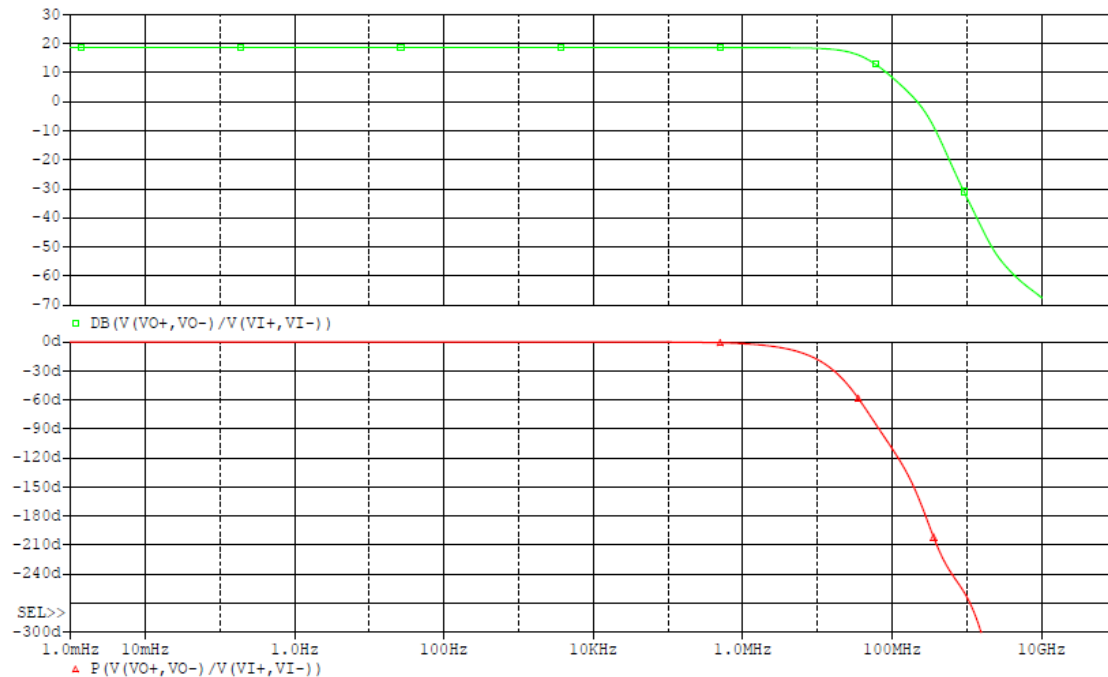
Θέτοντας στη διαφορική είσοδο ημιτονική πηγή συχνότητας 1kHz και πλάτους 100mV, τρέχουμε την παραπάνω προσομοίωση στο χρόνο (time domain) και παρατηρούμε την έξοδο σε σχέση με την είσοδο.



Εικόνα 4.21: Πλάτος (σε mV) σε σχέση με το χρόνο (σε ms) της εισόδου (κόκκινο) και της εξόδου (πράσινο) του ενισχυτή ρεύματος OPA2674

Παρατηρούμε, ότι το σήμα εισόδου υπόκειται ενίσχυση 8,5 φορές, γεγονός το οποίο συμφωνεί με την θεωρητική ανάλυση, όπου βρήκαμε ότι κέρδος του παρόντος σταδίου είναι $A_D = 9$ (βλ. §4.3.2.1).

Στη συνέχεια, επιλέγουμε AC πηγή ($5mV_{AC}, 2.5V_{DC}$) και τρέχουμε την προσομοίωση στην επιλογή “AC sweep/noise” προκειμένου να παράγουμε το διάγραμμα Bode πλάτους και φάσης (βλ. Εικόνα 4.22).



Εικόνα 4.22: Διάγραμμα Bode Πλάτους (πάνω) και Φάσης (κάτω) του ενισχυτή ισχύος (3^ο στάδιο)

Αφού το διαφορικό κέρδος του συγκεκριμένου σταδίου είναι ίσο με $A_D = 9$, το κέρδος σε dB ισούται με $20 \log 9 = 18.61 \approx 19$, όπως ακριβώς δείχνει και το διάγραμμα Bode πλάτους της Εικόνας 4.20. Από το ίδιο διάγραμμα, προκύπτει ότι η συχνότητα γονάτου είναι ίση με $f_{3dB} = 39.44 \text{ MHz}$.

4.2.4 4^ο στάδιο: Ανάδραση

4.2.4.1 Επιλογή αντίστασης ανάδρασης

Για το στάδιο της ανάδρασης επιλέγουμε την αντίσταση ακριβείας VPR221 της Vishay Precision Group. Πρόκειται για αντίσταση με 4 ακροδέκτες, που χαρακτηρίζεται από υψηλή σταθερότητα και μικρή απόκλιση σφάλματος.



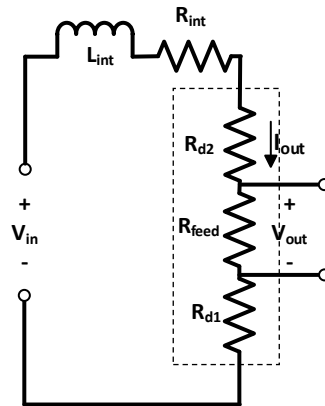
Εικόνα 4.23: VPR221

4.2.4.2 Συνάρτηση Μεταφοράς

Για την θεωρητική ανάλυση, θεωρούμε την αντίσταση ως το άθροισμα τριών αντιστάσεων R_{d1}, R_{feed} και R_{d2} , όπου R_{d1} και R_{d2} οι παρασιτικές αντιστάσεις των ακροδεκτών της R_{feed} . Η R_{feed} αποτελεί την αντίσταση ανάδρασης, στα άκρα της οποίας λαμβάνουμε την έξοδο, ενώ οι R_{d1} και R_{d2} βρίσκονται εκατέρωθεν της και έχουν τιμή περίπου ίση με 2Ω .

Όπως φαίνεται και στο ολικό κύκλωμα της Εικόνας 4.1, η διαφορική έξοδος του προηγούμενου σταδίου (ενισχυτής ρεύματος) εισέρχεται σε ένα chopper cell, που αποτελείται από διακόπτες που εναλλάσσουν την φορά με την οποία τα άκρα της εξόδου του ενισχυτή ρεύματος συνδέονται με το στάδιο της ανάδρασης. Ωστόσο, ο

chopper cell δεν επηρεάζει την θεωρητική ανάλυση του κυκλώματος, γι' αυτό συμπεριλαμβάνουμε απλά τις εσωτερικές αντιστάσεις των γραμμών του ($0,82\Omega$) στις αντιστάσεις R_{d1} και R_{d2} και θεωρούμε, ότι η έξοδος του ενισχυτή ρεύματος συνδέεται απευθείας στην είσοδο του σταδίου ανάδρασης, το οποίο βλέπουμε στη συνέχεια.



Εικόνα 4.24: Κύκλωμα ανάδρασης

Η αντίσταση R_{int} και το πηνίο L_{int} βρίσκονται στο εσωτερικό του αισθητήρα και έχουν τις τιμές:

$$R_{int} = 3\Omega \text{ και } L_{int} = 36nH$$

Για τις αντιστάσεις έχουμε:

$$R_{d1} = 2 + 0,82 = 2,82\Omega = R_{d2}, R_{feed} = 30\Omega$$

Με διαίρετη τάσης προκύπτει εύκολα ότι:

$$V_{out} = \frac{R_{feed}}{R_{d1} + R_{d2} + R_{feed} + R_{int} + sL_{int}} V_{in}$$

$$H_{feed}(s) = \frac{1}{R_{d1} + R_{d2} + R_{feed} + R_{int} + sL_{int}} \quad (4.10) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow H_{feed}(s) = \frac{1}{38,64 + 36 \cdot 10^{-9} \cdot s} \quad (4.11)$$

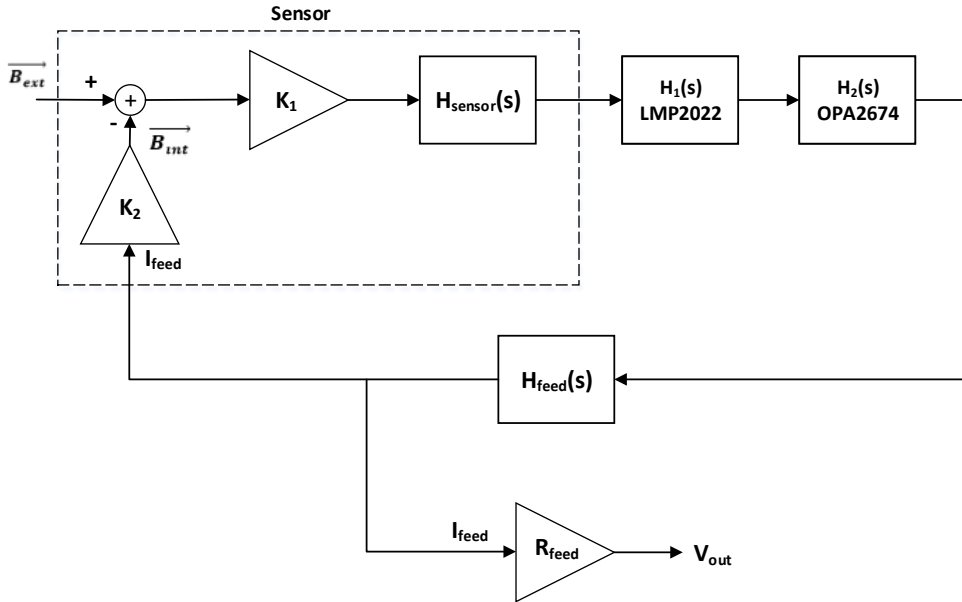
Επιπλέον, για το ρεύμα εξόδου I_{feed} ισχύει:

$$I_{feed} = \frac{V_{in}}{R_{d1} + R_{d2} + R_{feed} + R_{int} + sL_{int}}$$

4.3 Συνολικό Κύκλωμα

4.3.1 Block Διάγραμμα-Συνάρτηση Μεταφοράς

Στην Εικόνα 4.25 παρατηρούμε το block διάγραμμα του προς ανάλυση κυκλώματος, με τη βοήθεια του οποίου θα εξάγουμε την συνολική συνάρτηση μεταφοράς.



Εικόνα 4.25: Block διάγραμμα συνολικού κυκλώματος

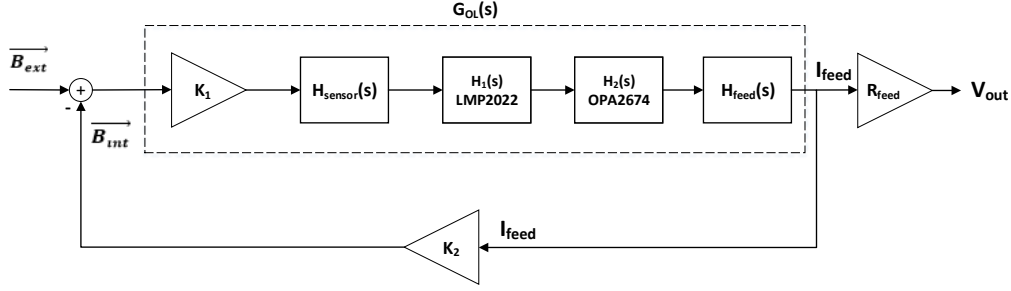
Όπως φαίνεται, η είσοδος του συστήματός μας είναι μαγνητικό πεδίο (σε gauss), και συγκεκριμένα αποτελείται από ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και από ένα εσωτερικό πεδίο που προκύπτει από το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση ανάδρασης. Απαιτείται επομένως να μετατρέψουμε το μαγνητικό πεδίο σε τάση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του πολλαπλασιαστή K_1 , ο οποίος ισούται με την ευαισθησία (sensitivity) του αισθητήρα HMC1001 επί την επιβαλλόμενη τάση. Η ευαισθησία είναι ίση με $3.2mV/V/gauss$, ενώ γνωρίζουμε ότι η τάση τροφοδοσίας του συστήματός μας είναι 5V. Επομένως ισχύει:

$$K_1 = 3.2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 = 16 \cdot 10^{-3} V/gauss$$

Ο πολλαπλασιαστής K_2 εισάγεται για να μετατρέψει το ρεύμα εξόδου I_{feed} στο εσωτερικό μαγνητικό πεδίο B_{int} , το οποίο με τη σειρά του θα προστεθεί ως είσοδος στο σύστημά μας. Από το datasheet του αισθητήρα, βρίσκουμε ότι το εφαρμοζόμενο offset field λαμβάνει την τυπική τιμή των 51mA/gauss. Έτσι, θεωρούμε το K_2 ως το αντίστροφο του offset field (σε Ampere), ώστε όταν πολλαπλασιαστεί με αυτό το ρεύμα εξόδου, να προκύψει μαγνητικό πεδίο (gauss). Έχουμε λοιπόν:

$$K_2 = \frac{1}{51 \cdot 10^{-3}} gauss/A$$

Στην παρακάτω Εικόνα, παρουσιάζουμε ξανά το block διάγραμμα, αλλά με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούμε εύκολα να εξάγουμε την συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου G_{OL} , καθώς και τη συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου G_{CL} , η οποία προκύπτει μετά από την προσθήκη της ανάδρασης K_2 .



Εικόνα 4.26: Απλουστευμένο block διάγραμμα του συνολικού κυκλώματος

Η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου είναι:

$$G_{OL}(s) = K_1 \cdot H_{sensor}(s) \cdot H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_{feed}(s)$$

ενώ η συνάρτηση κλειστού βρόχου που προκύπτει μετά την επιβολή της ανάδρασης είναι:

$$G_{CL}(s) = \frac{G_{OL}(s)}{1 + K_2 \cdot G_{OL}(s)}$$

Οι συναρτήσεις μεταφοράς $H_{sensor}(s)$, $H_1(s)$, $H_2(s)$ και $H_{feed}(s)$ των επιμέρους σταδίων έχουν προσδιοριστεί στις προηγούμενες ενότητες και δίνονται από τις σχέσεις (4.1), (4.3), (4.5) και (4.10) αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας σε όλες τις σχέσεις τα γνωστά πλέον στοιχεία, λαμβάνουμε την συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου ως εξής:

$$G_{OL}(s) = \frac{-2.387 \cdot 10^{40} (s + 4.26 \cdot 10^9)(s + 7.07 \cdot 10^7)(s + 4.56 \cdot 10^5)}{(s + 1.12 \cdot 10^8)(s + 5 \cdot 10^9)(s + 2.44 \cdot 10^{10})(s + 1.06 \cdot 10^9)(s + 1.07 \cdot 10^9)} \cdot \frac{(s^2 - 3.797 \cdot 10^7 s + 2.79 \cdot 10^{15})}{(s + 2.65 \cdot 10^7)(s + 3.95 \cdot 10^6)(s + 1059.68)(3.14 \cdot 10^7)(s + 1.13 \cdot 10^8)}$$

ενώ η συνάρτηση κλειστού βρόχου προκύπτει:

$$G_{CL}(s) = \frac{numer(G(s))}{denom(G(s))}$$

όπου:

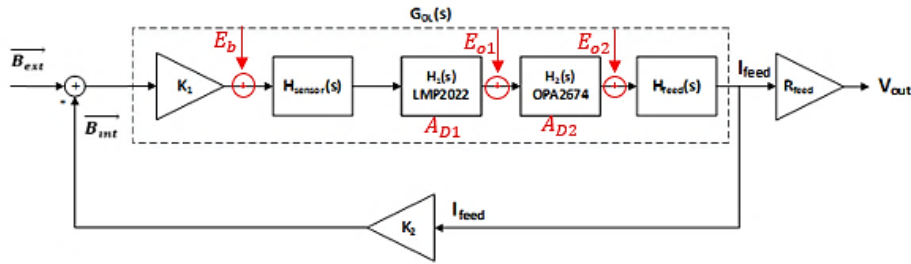
$$numer(G(s)) = -2.387 \cdot 10^{40} (s + 4.26 \cdot 10^9)(s + 7.07 \cdot 10^7)(s + 4.56 \cdot 10^5) \cdot (s^2 - 3.797 \cdot 10^7 s + 2.79 \cdot 10^{15})$$

Και:

$$denom(G(s)) = (s + 2.44 \cdot 10^{10})(s + 5.00 \cdot 10^9)(s + 1.07 \cdot 10^9)(s + 1.055 \cdot 10^9)(s + 1.13 \cdot 10^8)(s + 1.12 \cdot 10^8)(s + 3.14 \cdot 10^7)(s + 2.65 \cdot 10^7)(s + 3.95 \cdot 10^6)(s + 1059.68)$$

4.3.2 Συνολικός Θόρυβος Κυκλώματος

Θεωρούμε ότι ο συνολικό θόρυβος του κυκλώματος διαμορφώνεται από τον θόρυβο του αισθητήρα και το θόρυβο των ενισχυτών LMP2022 και OPA2674. Βάσει αυτής της παραδοχής, το block διάγραμμα της Εικόνας 4.26 διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.27, όπου $E_b = 400nV/\sqrt{Hz}$ ο θόρυβος της γέφυρας του αισθητήρα, $A_{D1} = 401, E_{o1} = 7.709\mu V/\sqrt{Hz}$ το κέρδος και ο θόρυβος της εξόδου αντίστοιχα του chopper amplifier (Ενότ. 4.2.2.3 και 4.2.2.4) και $A_{D2} = 9, E_{o2} = 68.973nV/\sqrt{Hz}$ το κέρδος και ο θόρυβος εξόδου αντίστοιχα του ενισχυτή ρεύματος (Ενότ. 4.2.3.2 και 4.2.3.3). Ο θόρυβος υπολογίζεται μόνο για τη dc ανάλυση, όπου $s=0$.



Εικόνα 4.27: Block διάγραμμα συμπεριλαμβανομένων των πηγών θορύβου

Εφαρμόζουμε την αρχή της επαλληλίας για κάθε πηγή θορύβου και έχουμε:

$$E_{total} = \frac{H_{feed}}{1 + K_1 K_2 A_{D1} A_{D2} H_{feed}} R_{feed} [A_{D1} A_{D2} E_b + A_{D2} E_{o1} + E_{o2}] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow E_{total} = 92.476 E_b + 0.2306 E_{o1} + 0.0256 E_{o2}$$

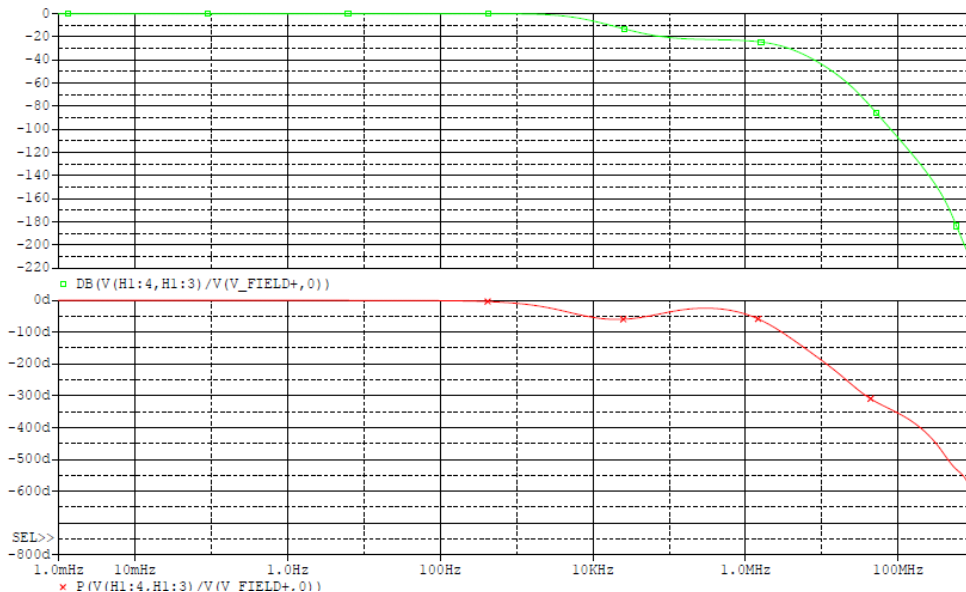
$$\Leftrightarrow E_{total} = 28.7699 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Για να μετατρέψουμε την παραπάνω τιμή σε πεδίο, διαιρούμε με την τιμή $\alpha = 1,6478V/Gauss$, για λόγους που θα αναλυθούν στην Ενότητα 5.3. Έτσι έχουμε:

$$E_{total} = 23.528 \mu Gauss / \sqrt{Hz}$$

4.3.3 Προσομοιώσεις στο *Spice*

Τρέχουμε στο *Spice* το συνολικό κλειστό κύκλωμα που έχουμε υλοποιήσει, αφού εφαρμόσουμε στην είσοδο κατάλληλο εξωτερικό πεδίο. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το διάγραμμα Bode (πλάτους και φάσης), το οποίο προέκυψε ως γνωστόν από το λόγο της εξόδου προς την είσοδο.



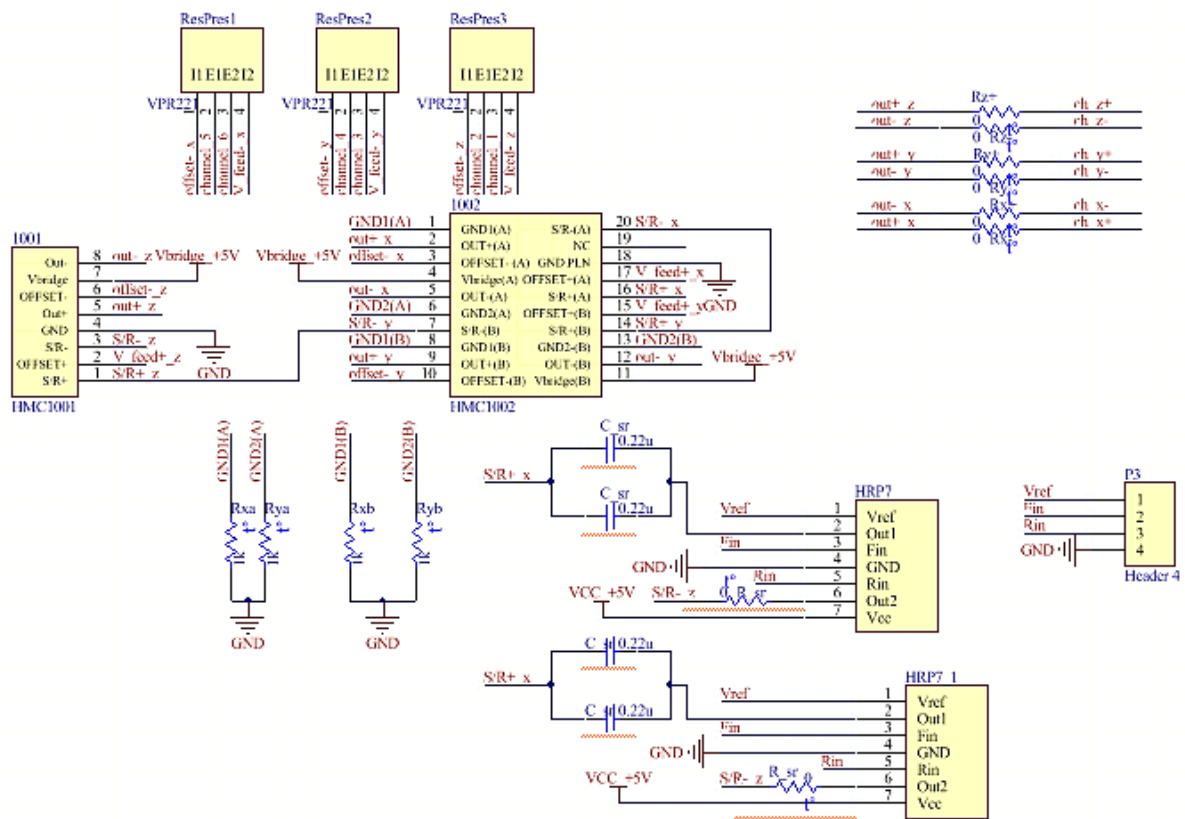
Εικόνα 4.28: Διάγραμμα Bode Κέρδους (πάνω) και Φάσης (κάτω) του συνολικού κυκλώματος

Παρατηρούμε, ότι το κέρδος κλειστού βρόχου είναι μοναδιαίο (0dB), γεγονός το οποίο –όπως θα εξηγήσουμε– είναι λογικό. Στο κλειστό κύκλωμα μπαίνουν δυο πεδία (το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο και το εσωτερικό πεδίο λόγω της ανάδρασης) (βλ Εικόνα 4.25), τα οποία πρέπει να είναι ίδια, προκειμένου να αφαιρούνται και να έχω ευστάθεια. Το κέρδος στα 0dB επιβεβαιώνει ότι όντως τα δυο πεδία είναι ίσα και αλληλοαφαιρούνται. Επιπλέον, από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η συχνότητα γονάτου του συνολικού κλειστού κυκλώματος ισούται με $f_{3dB} = 5.6kHz$.

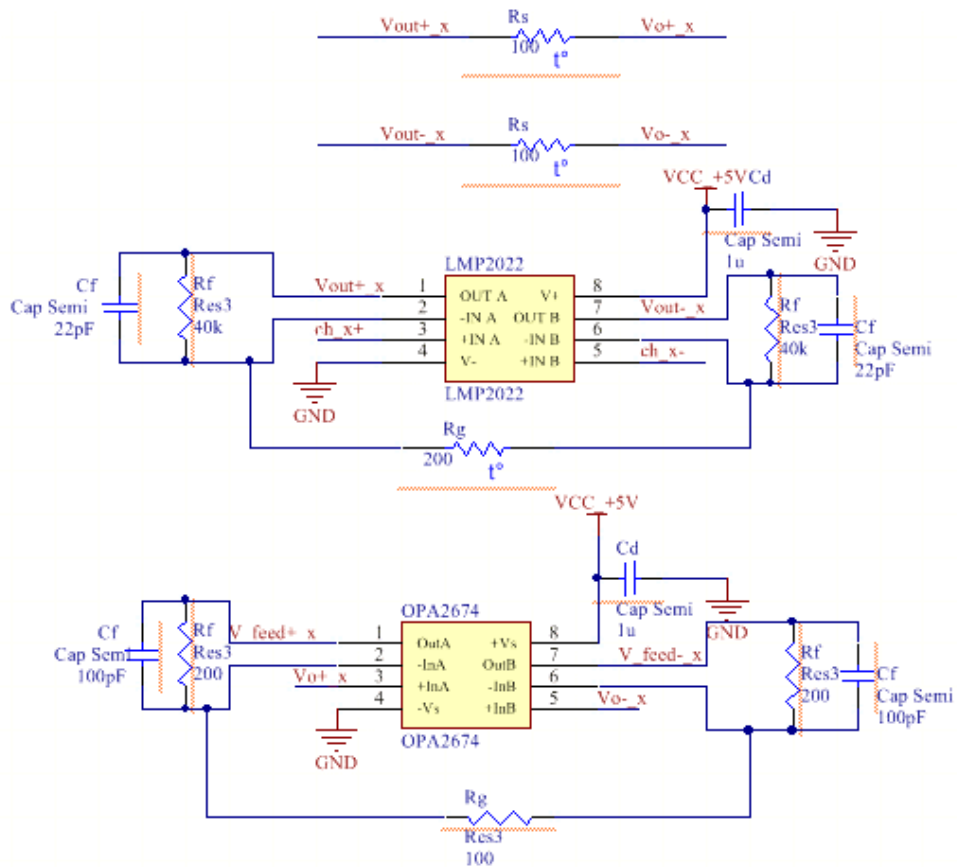
Κεφάλαιο 5^ο: Κατασκευή πλακέτας και λήψη μετρήσεων

5.1 Σχεδίαση και Κατασκευή πλακέτας

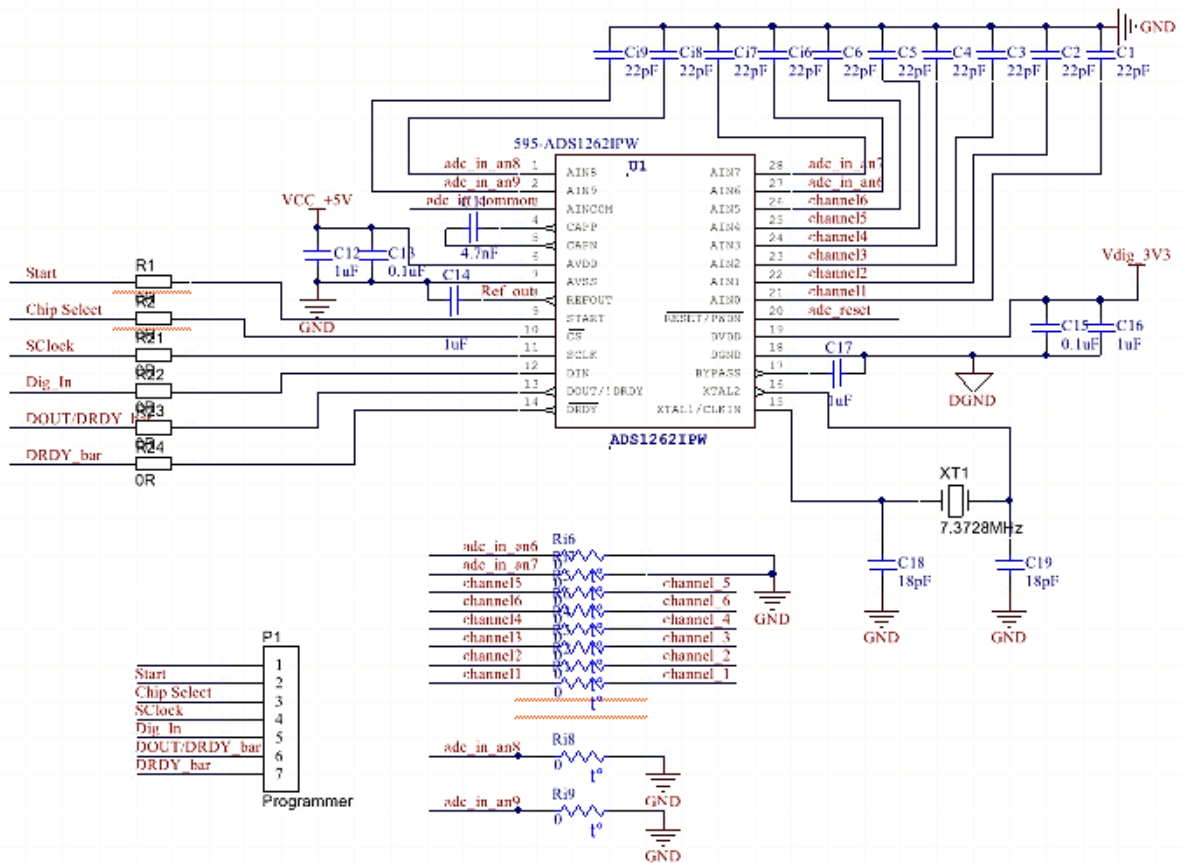
Προκειμένου να σχεδιάσουμε το συνολικό κύκλωμα στις τρεις διαστάσεις με τη χρήση των δυο αισθητήρων HMC1001/1002, χρησιμοποιήσαμε το Altium Designer. Στις Εικόνες 5.1, 5.2, 5.3 και 5.4, βλέπουμε το σχηματικό όλου του κυκλώματος, συμπεριλαμβανομένου του ψηφιακού μέρους και του H-bridge που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του S/R. Τέλος, στην Εικόνα 5.5 βλέπουμε σε 3D μορφή την πάνω (top layer) και την κάτω (bottom layer) πλευρά της four-layer πλακέτας που σχεδιάσαμε στο PCB του Altium Designer.



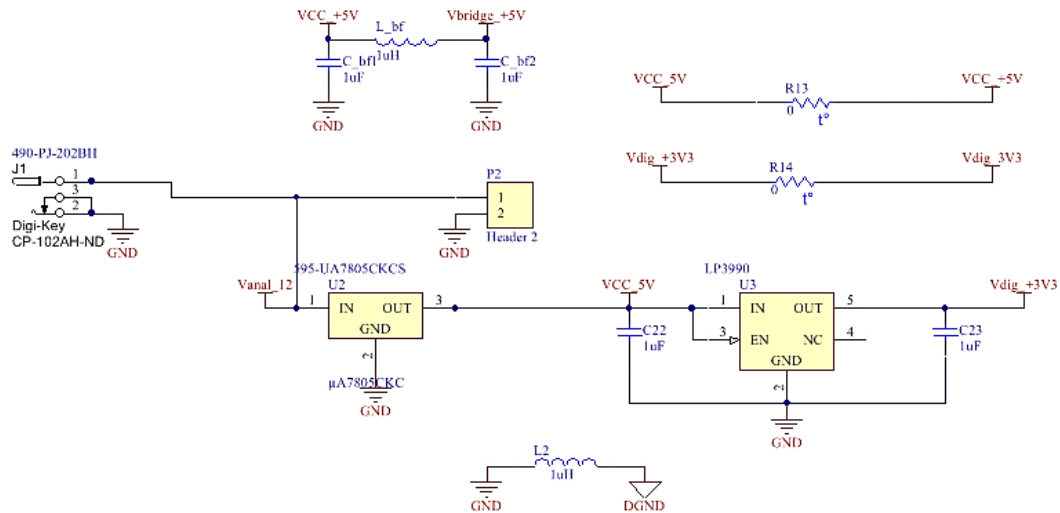
Εικόνα 5.1: Αισθητήρες HMC1001/1002, H-bridge (HRP7) για S/R και αντιστάσεις ανάδρασης (VPR221) για τους τρεις άξονες



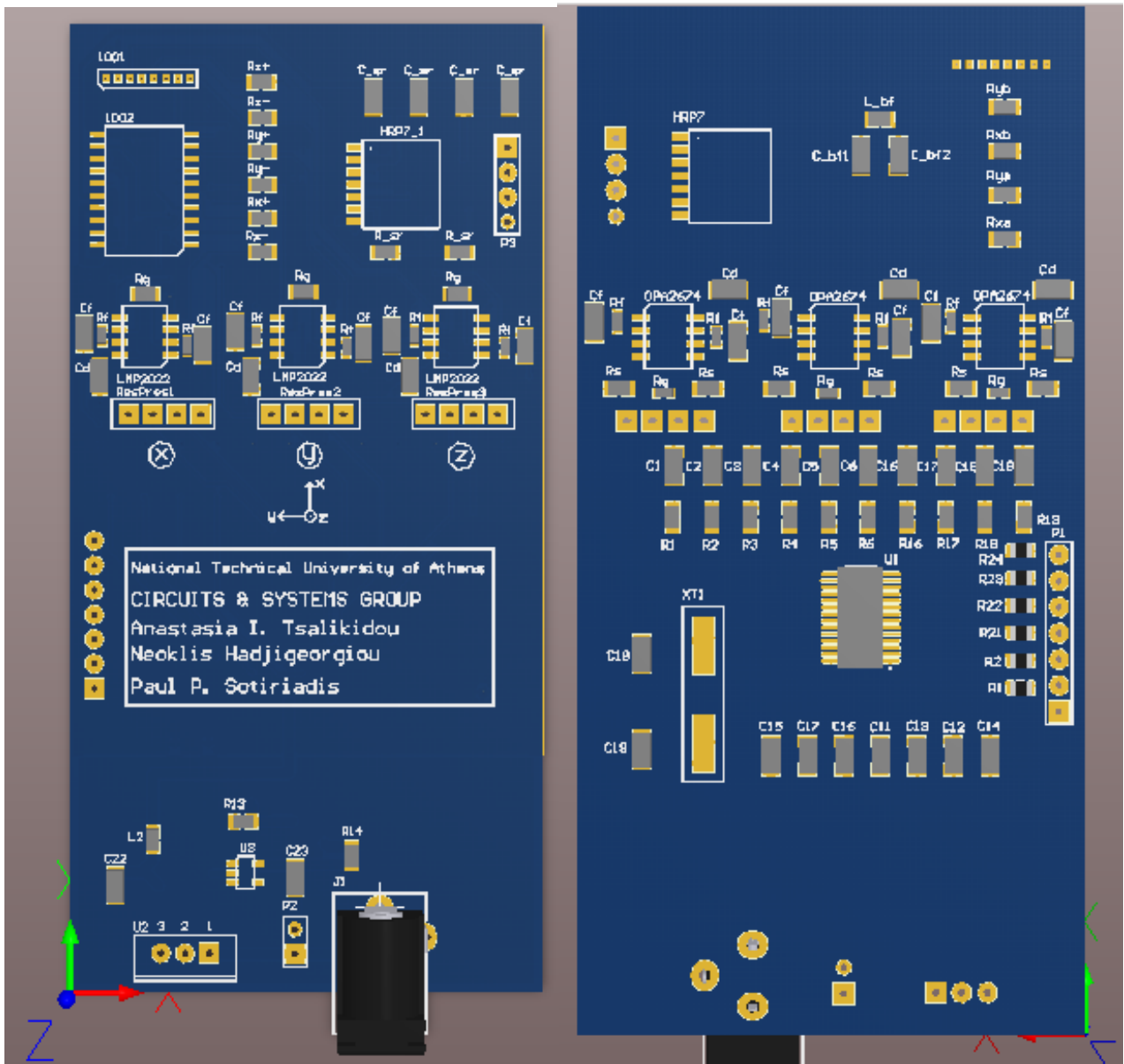
Εικόνα 5.2: Chopper amplifier και ενισχυτής ρεύματος για τον ένα άξονα (x axis)



Εικόνα 5.3: Analog-to-Digital Converter ADS1262



Εικόνα 5.4: Κύκλωμα τροφοδοσίας, Regulators και φίλτρα



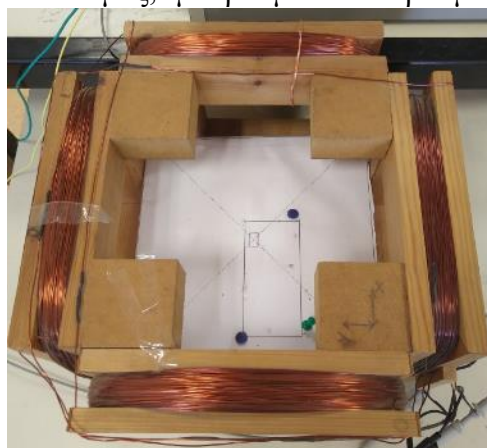
Εικόνα 5.5: Top Layer (αριστερά) και Bottom Layer (δεξιά) της πλακέτας σε 3D μορφή

5.2 DC Ανάλυση

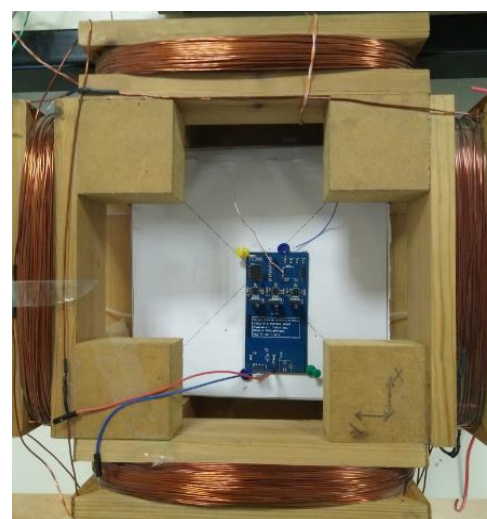
Έχοντας πλέον κατασκευάσει την πλακέτα μας, μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που δίνει ο αισθητήρας κλειστού βρόχου, με τις μετρήσεις που θα πάρουμε από τον αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 της Honeywell¹, ο οποίος περιέχει τους αισθητήρες HMC1001/1002 και μετρά το μαγνητικό πεδίο στους τρεις άξονες.

Αρχικά, τοποθετούμε την πλακέτα μας και τον αισθητήρα HMC2003 μέσα σε ένα κλωβό στον οποίο έχουμε τυλίξει δυο πηνία Helmholtz, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6 (α). Οι αισθητήρες τοποθετούνται έτσι, ώστε διεγείροντας καθένα από αυτά τα πηνία να μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο που καταγράφει ο x και ο y άξονας αντίστοιχα (HMC1002) (Εικόνα 5.6 (β)). Επειδή δεν έχουμε στη διάθεσή μας τρίτο πηνίο για τον z άξονα, περιστρέφουμε κατάλληλα τον αισθητήρα (Εικόνα 5.6 (γ)) και διεγείρουμε το αντίστοιχο πηνίο για να καταγράψουμε και το μαγνητικό πεδίο στον z άξονα (HMC1001).

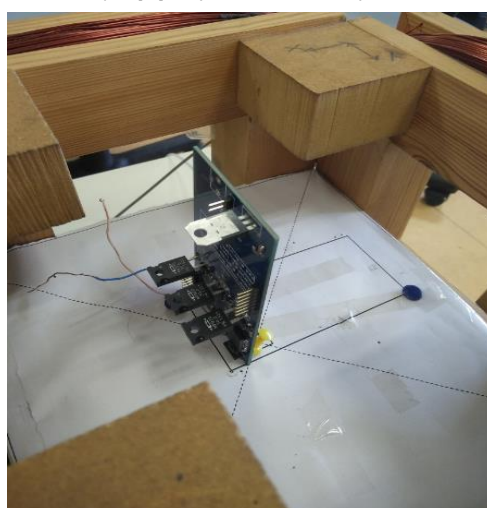
Για τη dc ανάλυση τροφοδοτούμε το κύκλωμά μας με τάση 5V και τον αισθητήρα ανοιχτού βρόχου με τάση 12V. Διεγείρουμε πρώτα το x πηνίο, δηλαδή το πηνίο που μεταβάλλει το μαγνητικό πεδίο στον x άξονα, με τη χρήση τροφοδοτικού ρεύματος ακριβείας. Καταγράφουμε την έξοδο του HMC2003 και του αισθητήρα κλειστού βρόχου και στους τρεις άξονες (βλ. Πίνακα 5.1). Σημειώνεται, ότι η έξοδος του κυκλώματός μας λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης ανάδρασης R_{feed} .



Εικόνα 5.6 (α): πηνία Helmholtz



Εικόνα 5.6 (β): τοποθέτηση πλακέτας για μετρήσεις στον x και y άξονα



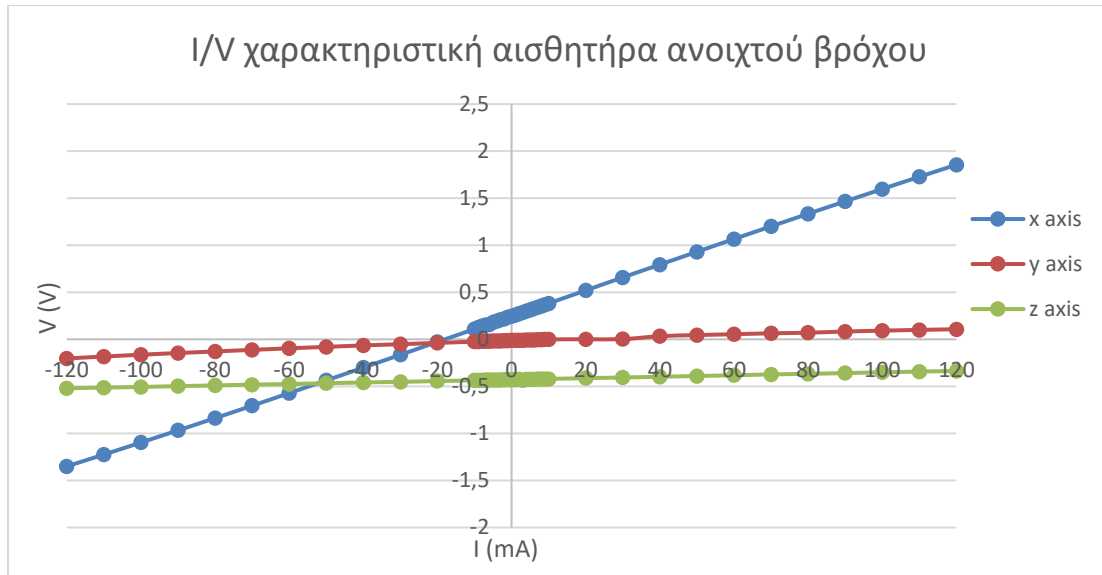
Εικόνα 5.6 (γ): τοποθέτηση πλακέτας για μετρήσεις στον z άξονα

¹ «Εντοπισμός θέσης πλοίου με μαγνητικές τεχνικές», Αθήνα 2004, σ.47,64.

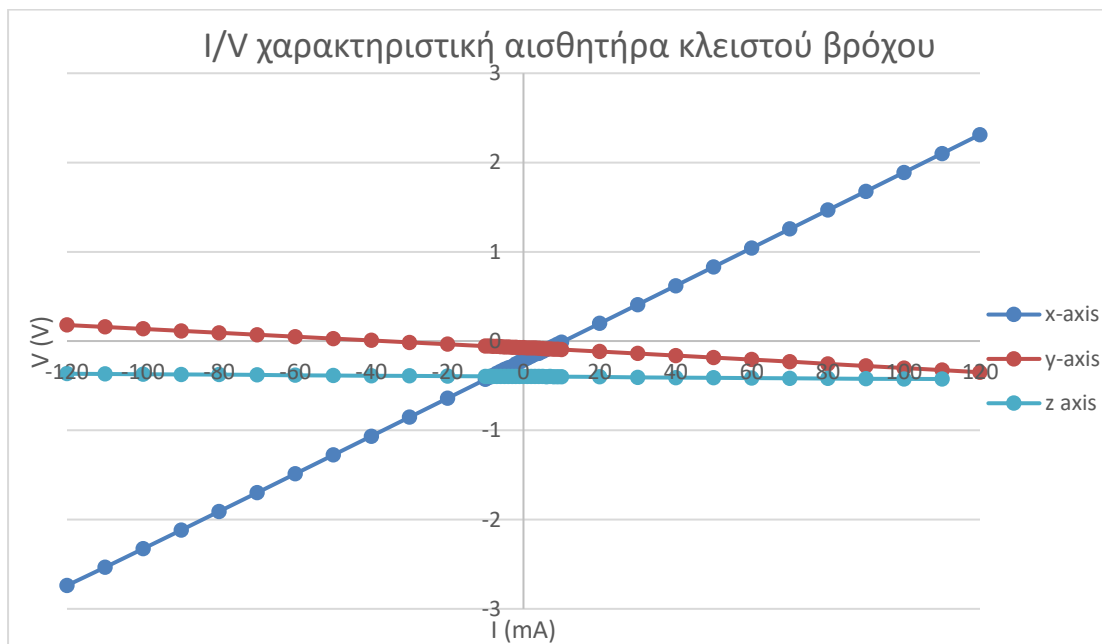
Πίνακας 5.1: Τάση στις εξόδους του HMC2003 και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) συναρτήσει του ρεύματος I_L του x πηνίου

I_L (mA)	x-axis Vout(V) HMC2003	y-axis Vout(V) HMC2003	z-axis Vout(V) HMC2003	x-axis Vout(V) MySensor	y-axis Vout(V) MySensor	z-axis Vout(V) MySensor
-120	-1,350	-0,204	-0,520	-2,738	0,180	-0,366
-110	-1,225	-0,183	-0,513	-2,535	0,158	-0,369
-100	-1,097	-0,164	-0,506	-2,327	0,136	-0,372
-90	-0,968	-0,146	-0,498	-2,119	0,114	-0,374
-80	-0,838	-0,129	-0,490	-1,909	0,093	-0,376
-70	-0,706	-0,112	-0,482	-1,699	0,071	-0,379
-60	-0,572	-0,096	-0,475	-1,488	0,049	-0,384
-50	-0,437	-0,080	-0,467	-1,270	0,028	-0,386
-40	-0,301	-0,065	-0,459	-1,066	0,007	-0,389
-30	-0,165	-0,052	-0,452	-0,854	-0,015	-0,390
-20	-0,028	-0,038	-0,444	-0,642	-0,036	-0,393
-10	0,109	-0,025	-0,436	-0,430	-0,057	-0,395
-9	0,125	-0,023	-0,434	-0,408	-0,057	-0,395
-8	0,139	-0,021	-0,434	-0,387	-0,059	-0,396
-7	0,152	-0,02	-0,433	-0,362	-0,061	-0,396
-6	0,155	-0,019	-0,432	-0,341	-0,064	-0,397
-5	0,179	-0,018	-0,432	-0,320	-0,065	-0,398
-4	0,193	-0,017	-0,432	-0,299	-0,068	-0,397
-3	0,206	-0,016	-0,431	-0,278	-0,069	-0,397
-2	0,219	-0,015	-0,430	-0,257	-0,071	-0,397
-1	0,233	-0,013	-0,430	-0,236	-0,073	-0,397
0	0,245	-0,012	-0,429	-0,214	-0,075	-0,397
1	0,260	-0,011	-0,428	-0,191	-0,077	-0,397
2	0,273	-0,010	-0,427	-0,170	-0,079	-0,398
3	0,286	-0,009	-0,436	-0,149	-0,079	-0,398
4	0,300	-0,008	-0,426	-0,131	-0,082	-0,398
5	0,314	-0,007	-0,425	-0,108	-0,085	-0,398
6	0,327	-0,006	-0,424	-0,089	-0,087	-0,399
7	0,341	-0,005	-0,423	-0,068	-0,089	-0,398
8	0,354	-0,003	-0,422	-0,046	-0,091	-0,399
9	0,368	-0,002	-0,422	-0,023	-0,093	-0,399
10	0,382	-0,001	-0,421	-0,0001	-0,095	-0,399
20	0,52	0,001	-0,413	0,197	-0,117	-0,402
30	0,658	0,002	-0,406	0,408	-0,140	-0,407
40	0,794	0,033	-0,398	0,619	-0,162	-0,410
50	0,930	0,045	-0,390	0,831	-0,185	-0,412
60	1,066	0,054	-0,382	1,043	-0,208	-0,415
70	1,200	0,064	-0,373	1,255	-0,230	-0,417
80	1,334	0,070	-0,367	1,467	-0,256	-0,420
90	1,466	0,083	-0,359	1,677	-0,279	-0,423
100	1,597	0,092	-0,351	1,888	-0,302	-0,424
110	1,727	0,100	-0,343	2,100	-0,325	-0,425
120	1,855	0,107	-0,336	2,312	-0,350	-0,427

Από τον παραπάνω πίνακα, λαμβάνουμε τα ακόλουθα γράφηματα, στα οποία απεικονίζεται η τάση στην έξοδο του αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 (βλ. Εικόνα 5.7) και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (βλ. Εικόνα 5.8) στους τρεις άξονες, συναρτήσει του ρεύματος με το οποίο τροφοδοτείται το x πηνίο.



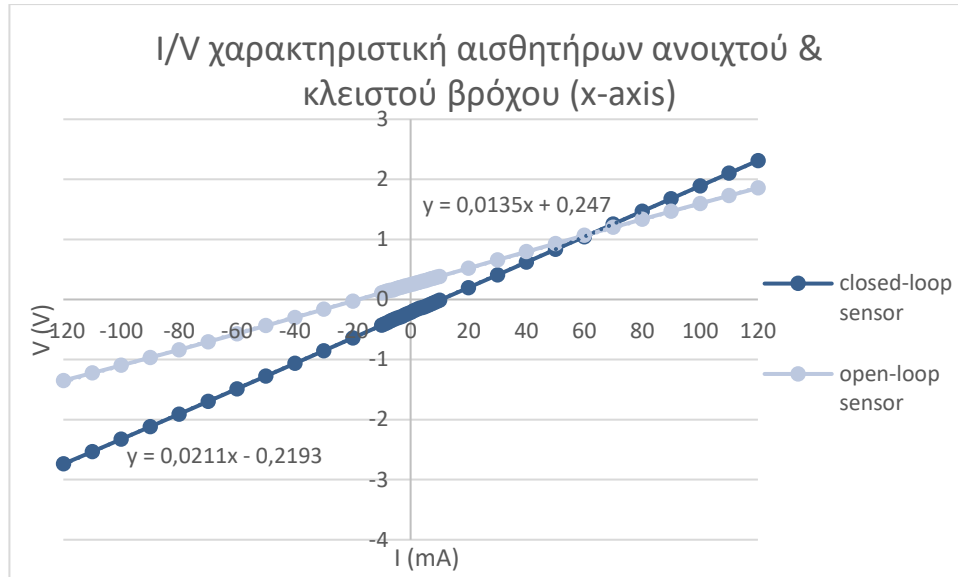
Εικόνα 5.7: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 στους τρεις άξονες



Εικόνα 5.8: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) στους τρεις άξονες

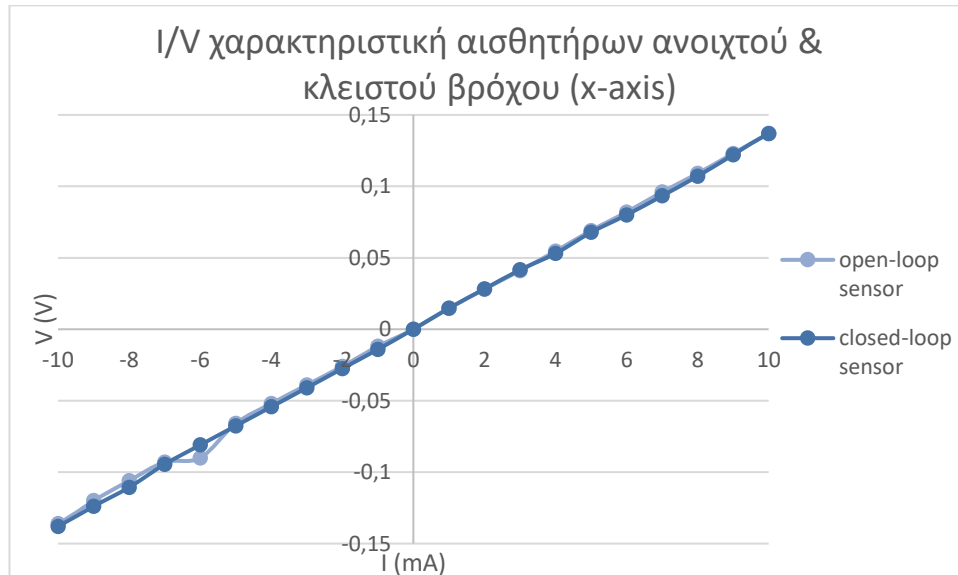
Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρούμε μεταβολές της τάσης εξόδου του αισθητήρα μόνο στον ένα άξονα (x-axis), ενώ στους άλλους δυο άξονες η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή. Οι μικρές μεταβολές στην τιμή των y και z αξόνων οφείλεται πρωτίστως λανθασμένη τοποθέτηση του αισθητήρα μέσα στον κλωβό και δευτερευόντως σε σφάλμα του κατασκευαστή του αισθητήρα.

Στο παρακάτω γράφημα απομονώνουμε τις I/V χαρακτηριστικές του x άξονα για τους αισθητήρες ανοιχτού και κλειστού βρόχου, για να μπορέσουμε να τις παρατηρήσουμε καλύτερα και να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους.



Εικόνα 5.9: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού (HMC2003) και κλειστού βρόχου στον ένα άξονα

Ο αισθητήρας κλειστού βρόχου καταγράφει τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια, γεγονός το οποίο μπορούμε να επιβεβαιώσουμε και από το ακόλουθο γράφημα, στο οποίο βλέπουμε τη γραμμικότητά του στην περιοχή γύρω από το μηδέν. Για να μπορούμε να συγκρίνουμε τις δυο γραφικές με μεγαλύτερη ακρίβεια, αφαιρούμε το dc πεδίο ώστε να περνούν από το 0 και μετατοπίζουμε τη μία ώστε να πέφτει ακριβώς πάνω στην άλλη εξισώνοντας την κλίση τους.



Εικόνα 5.10: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού & κλειστού βρόχου (x-axis) (γύρω από το 0)

Η μη-γραμμικότητα που παρατηρούμε μετά τα 4mA στον αισθητήρα κλειστού βρόχου οφείλεται σε σφάλμα κατά τη λήψη μετρήσεων, αφού κατά πάσα πιθανότητα μετακινήθηκε κάποιο αντικείμενο στο χώρο του εργαστηρίου και επηρέασε τις μετρήσεις μας.

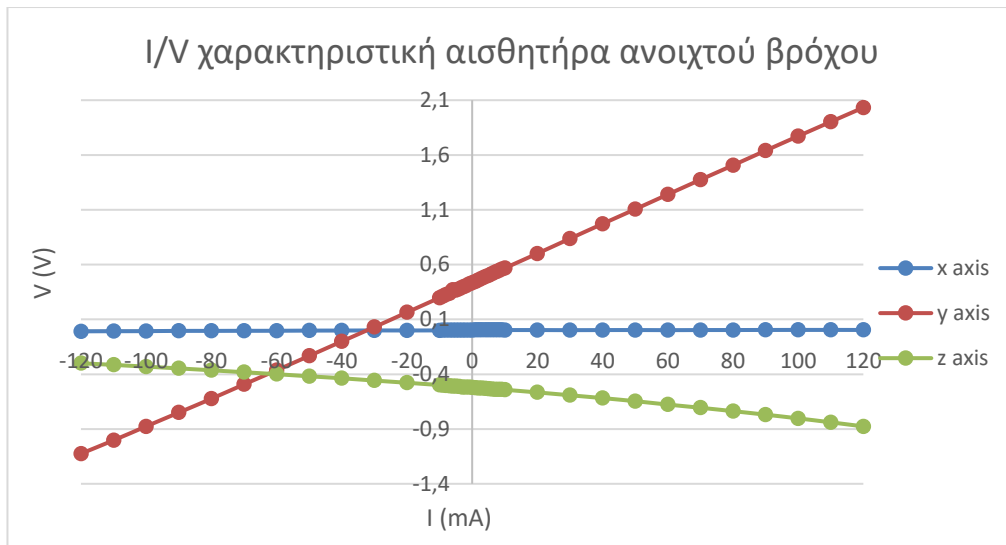
Επαναλαμβάνουμε την ίδια ακριβώς διαδικασία τροφοδοτώντας τα αντίστοιχα πηνία για τους άξονες y και z. Παραθέτουμε τους πίνακες με τις μετρήσεις που λήφθηκαν, καθώς και τα ζητούμενα γραφήματα I/V χαρακτηριστικής.

Πίνακας 5.2: Τάση στις εξόδους του αισθητήρα ανοιχτού βρόχου (HMC2003) και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) συναρτήσει του ρεύματος I_L του y πηνίου

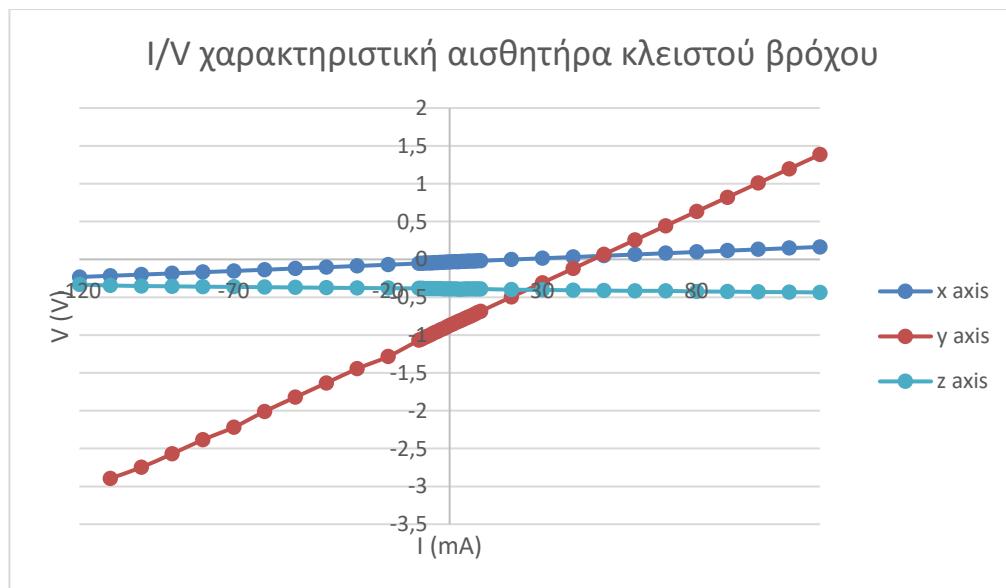
I_L (mA)	x-axis Vout(V) HMC2003	y-axis Vout(V) HMC2003	z-axis Vout(V) HMC2003	x-axis Vout(V) MySensor	y-axis Vout(V) MySensor	z-axis Vout(V) MySensor
-120	-0,0090	-1,125	-0,300	-0,2331	-2,78996	-0,333
-110	-0,0077	-1,003	-0,315	-0,2168	-2,89541	-0,345
-100	-0,0070	-0,876	-0,331	-0,2016	-2,74933	-0,352
-90	-0,0047	-0,750	-0,347	-0,1856	-2,5710	-0,356
-80	-0,0047	-0,624	-0,364	-0,1694	-2,3846	-0,361
-70	-0,0040	-0,493	-0,382	-0,1530	-2,2198	-0,364
-60	-0,0037	-0,364	-0,340	-0,1370	-2,0100	-0,368
-50	-0,0020	-0,233	-0,419	-0,1205	-1,8218	-0,371
-40	-0,0017	-0,101	-0,437	-0,1038	-1,6343	-0,375
-30	-0,0005	0,030	-0,458	-0,0874	-1,4460	-0,378
-20	-0,0010	0,164	-0,478	-0,0708	-1,2850	-0,381
-10	-0,0002	0,298	-0,499	-0,0542	-1,0697	-0,383
-9	0,0005	0,312	-0,501	-0,0523	-1,0509	-0,385
-8	0,0007	0,325	-0,504	-0,0506	-1,0315	-0,387
-7	0,0012	0,339	-0,506	-0,0487	-1,0125	-0,387
-6	0,0013	0,369	-0,508	-0,0470	-0,9925	-0,388
-5	0,0027	0,367	-0,510	-0,0446	-0,9725	-0,388
-4	0,0025	0,380	-0,513	-0,0426	-0,9533	-0,389
-3	0,0020	0,393	-0,517	-0,0409	-0,9342	-0,389
-2	0,0027	0,406	-0,519	-0,0392	-0,9148	-0,390
-1	0,0022	0,421	-0,519	-0,0375	-0,8961	-0,390
0	0,0030	0,435	-0,521	-0,0355	-0,8751	-0,392
1	0,0040	0,447	-0,524	-0,0340	-0,8580	-0,393
2	0,0040	0,461	-0,526	-0,0323	-0,8379	-0,393
3	0,0039	0,475	-0,528	-0,0305	-0,8187	-0,394
4	0,0040	0,489	-0,531	-0,0289	-0,7999	-0,394
5	0,0043	0,502	-0,533	-0,0271	-0,7812	-0,391
6	0,0050	0,515	-0,535	-0,0254	-0,7630	-0,391
7	0,0051	0,529	-0,538	-0,0239	-0,7454	-0,391
8	0,0055	0,543	-0,540	-0,0222	-0,7246	-0,390
9	0,0057	0,556	-0,540	-0,0206	-0,70512	-0,391
10	0,0030	0,568	-0,542	-0,0189	-0,68642	-0,391
20	0,0030	0,701	-0,566	-0,0023	-0,4982	-0,400
30	0,0020	0,837	-0,592	0,0143	-0,3100	-0,404
40	0,0027	0,972	-0,618	0,0309	-0,1223	-0,408
50	0,0031	1,105	-0,646	0,0475	0,0665	-0,412
60	0,0021	1,240	-0,677	0,0643	0,2545	-0,416
70	0,0030	1,374	-0,706	0,0810	0,4432	-0,416
80	0,0031	1,506	-0,737	0,0976	0,6317	-0,424
90	0,0038	1,640	-0,769	0,1146	0,8196	-0,426

100	0,0041	1,772	-0,803	0,1314	1,0079	-0,431
110	0,0042	1,903	-0,839	0,1480	1,1958	-0,433
120	0,0037	2,033	-0,876	0,1647	1,3836	-0,437

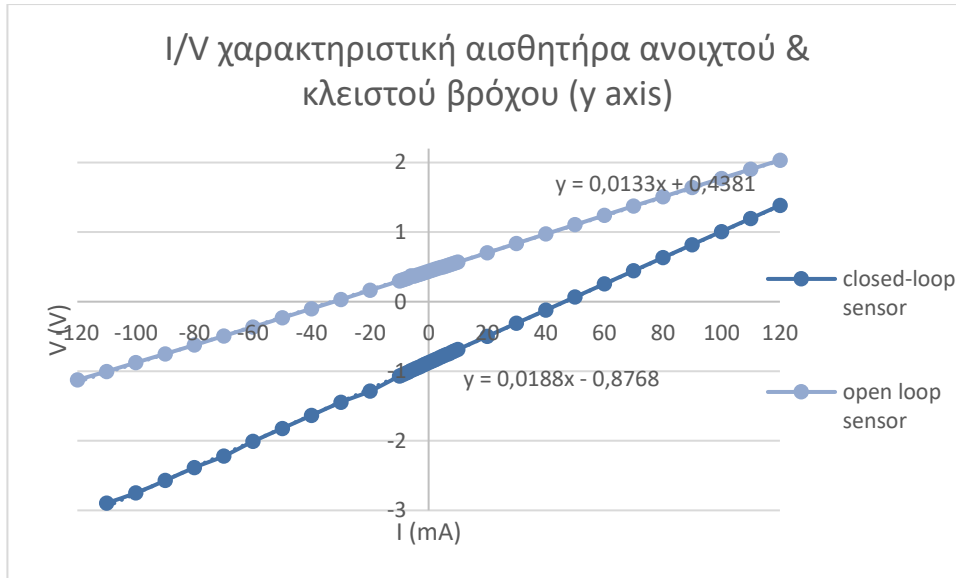
Από τον παραπάνω πίνακα, λαμβάνουμε τα γράφηματα της τάσης στην έξοδο του αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 (βλ. Εικόνα 5.11) και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (βλ. Εικόνα 5.12) στους τρεις άξονες, συναρτήσει του ρεύματος με το οποίο τροφοδοτείται το γ πηνίο. Στην Εικόνα 5.13 απομονώνουμε τις χαρακτηριστικές που μας ενδιαφέρουν (y-axis), ενώ στην Εικόνα 5.14 παρατηρούμε την γραμμικότητα των δυο αισθητήρων (ανοιχτού και κλειστού βρόχου) στην περιοχή γύρω από το 0.



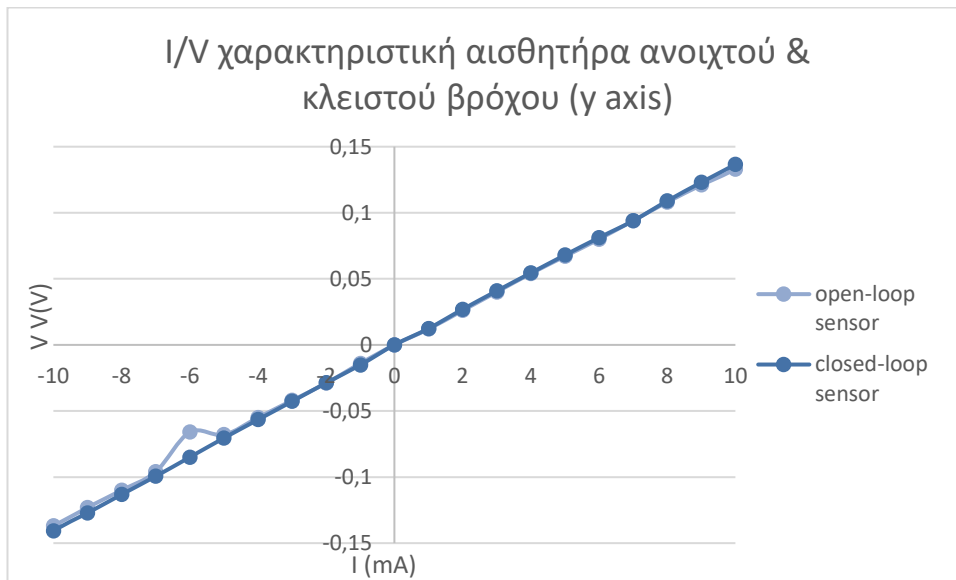
Εικόνα 5.11: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 στους τρεις άξονες



Εικόνα 5.12: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) στους τρεις άξονες



Εικόνα 5.13: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού (HMC2003) και κλειστού βρόχου στον y άξονα



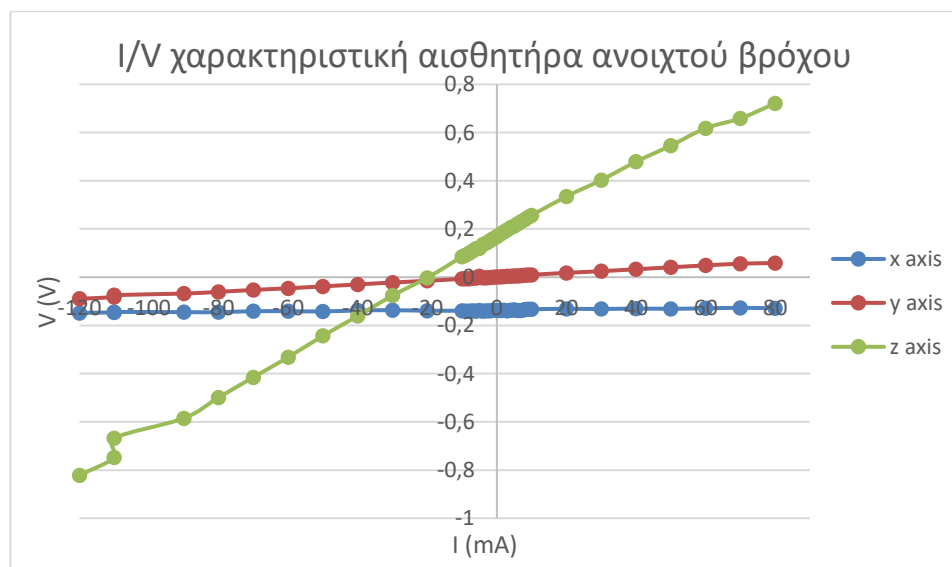
Εικόνα 5.14: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού & κλειστού βρόχου (y-axis) (γύρω από το 0)

Όπως προαναφέραμε, η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον z άξονα, αφού στρέψουμε κατάλληλα τους αισθητήρες μέσα στον κλωβό με τα πηνία Helmholtz.

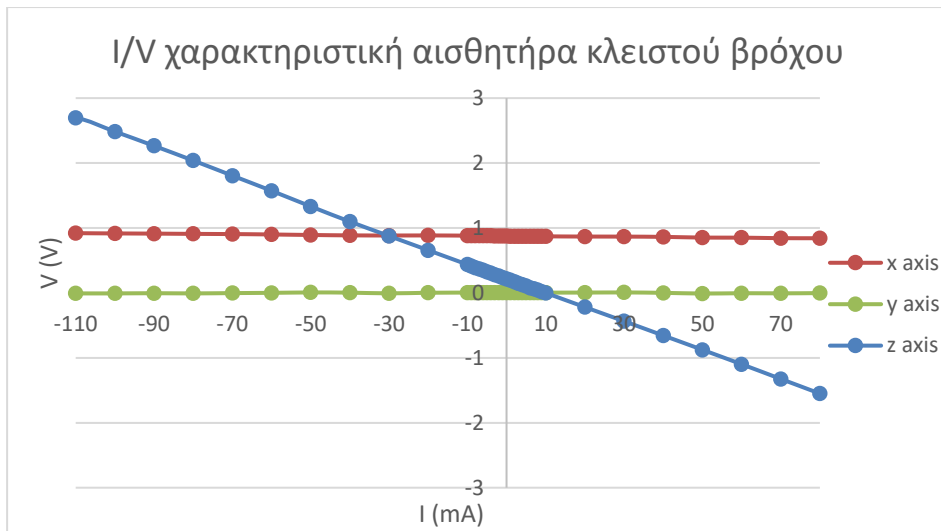
Πίνακας 5.3: Τάση στις εξόδους του αισθητήρα ανοιχτού βρόχου (HMC2003) και του αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) συναρτήσει του ρεύματος I_L του z πηνίου

I_L (mA)	x-axis Vout(V) HMC2003	y-axis Vout(V) HMC2003	z-axis Vout(V) HMC2003	x-axis Vout(V) MySensor	y-axis Vout(V) MySensor	z-axis Vout(V) MySensor
-120	-0,148	-0,090	-0,822	0,925	-0,007	2,665
-110	-0,146	-0,082	-0,747	0,920	-0,008	2,695
-110	-0,144	-0,074	-0,668	0,916	-0,008	2,485
-90	-0,145	-0,068	-0,585	0,913	-0,005	2,265
-80	-0,145	-0,061	-0,499	0,909	-0,008	2,039
-70	-0,141	-0,053	-0,415	0,906	-0,003	1,806
-60	-0,141	-0,046	-0,332	0,900	0,001	1,573
-50	-0,142	-0,038	-0,243	0,892	0,007	1,332

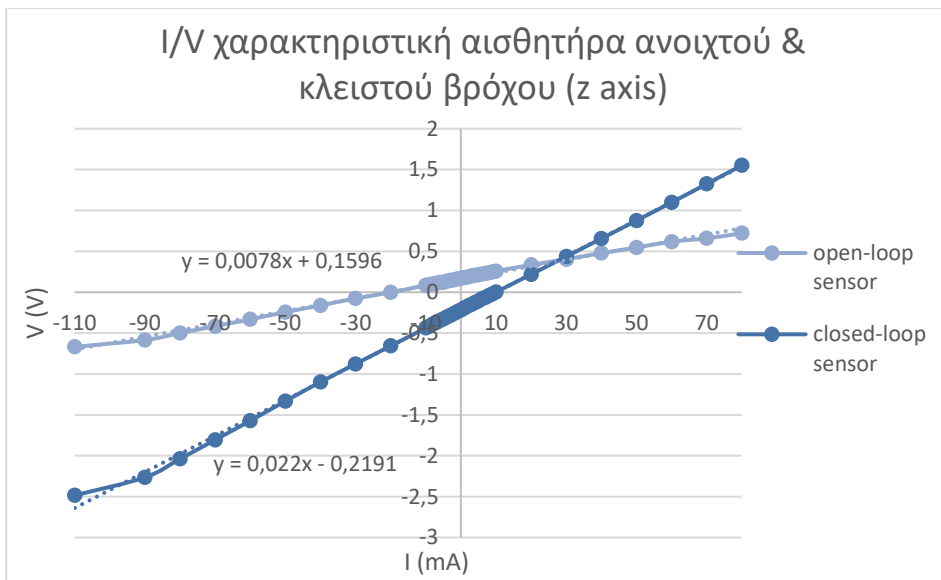
-40	-0,138	-0,030	-0,161	0,886	0,004	1,098
-30	-0,137	-0,022	-0,076	0,884	-0,007	0,877
-20	-0,139	-0,015	-0,002	0,885	0,002	0,657
-10	-0,139	-0,007	0,085	0,882	0,005	0,437
-9	-0,140	-0,007	0,092	0,882	0,006	0,415
-8	-0,141	-0,006	0,100	0,881	0,006	0,390
-7	-0,139	-0,005	0,109	0,881	0,006	0,369
-6	-0,140	-0,004	0,118	0,881	0,006	0,347
-5	-0,138	-0,004	0,119	0,881	0,006	0,325
-4	-0,141	-0,003	0,135	0,880	0,006	0,303
-3	-0,139	-0,002	0,142	0,879	0,005	0,282
-2	-0,139	-0,001	0,152	0,877	0,004	0,260
-1	-0,137	-0,0001	0,161	0,877	0,004	0,238
0	-0,138	0,0009	0,169	0,875	0,004	0,217
1	-0,138	0,002	0,179	0,874	0,003	0,195
2	-0,137	0,003	0,188	0,874	0,003	0,170
3	-0,139	0,004	0,196	0,874	0,003	0,149
4	-0,137	0,004	0,206	0,873	0,003	0,127
5	-0,135	0,005	0,213	0,873	0,003	0,106
6	-0,138	0,006	0,222	0,872	0,003	0,08
7	-0,138	0,007	0,231	0,872	0,004	0,064
8	-0,134	0,008	0,239	0,871	0,004	0,042
9	-0,133	0,009	0,249	0,871	0,004	0,020
10	-0,133	0,010	0,257	0,871	0,004	-0,001
20	-0,131	0,018	0,335	0,868	0,005	-0,219
30	-0,132	0,025	0,403	0,867	0,007	-0,436
40	-0,13	0,033	0,479	0,863	0,001	-0,656
50	-0,131	0,041	0,546	0,852	-0,010	-0,876
60	-0,129	0,049	0,618	0,851	-0,005	-1,098
70	-0,127	0,056	0,659	0,843	-0,007	-1,325
80	-0,129	0,059	0,721	0,842	-0,003	-1,551



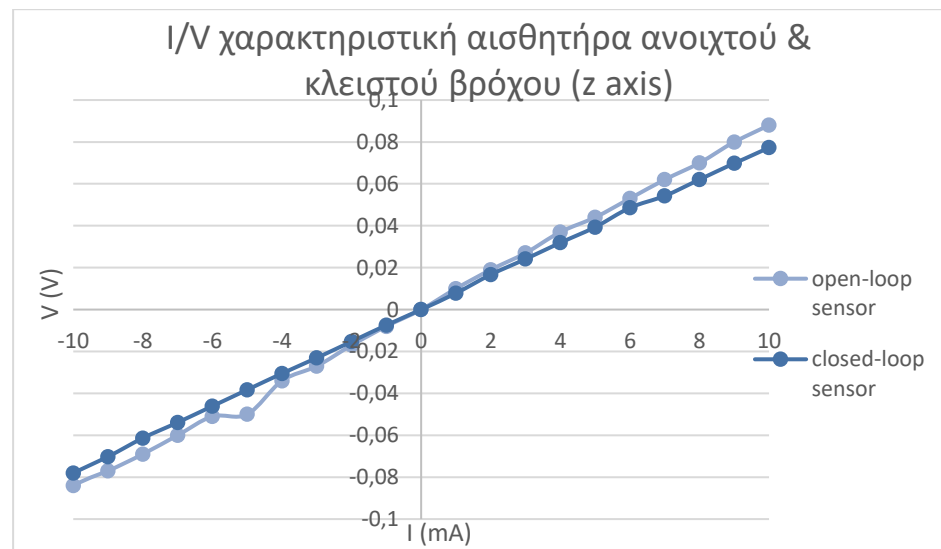
Εικόνα 5.15: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού βρόχου HMC2003 στους τρεις άξονες



Εικόνα 5.16: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα κλειστού βρόχου (MySensor) στους τρεις άξονες



Εικόνα 5.17: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού (HMC2003) και κλειστού βρόχου στον ένα άξονα



Εικόνα 5.18: I/V χαρακτηριστική αισθητήρα ανοιχτού & κλειστού βρόχου (x-axis) (γύρω από το 0)

Από τις Εικόνες 5.14 και 5.18, επιβεβαιώνουμε ότι οι μετρήσεις που μας δίνει ο αισθητήρας κλειστού βρόχου είναι πολύ ακριβείς, αφού η I/V χαρακτηριστική του παρουσιάζει πολύ καλή γραμμικότητα και στους δυο άξονες (y και z).

5.3 Κανονικοποίηση της τάσης εξόδου σε κλίμακα πεδίου

Επειδή αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να μετρήσουμε το μαγνητικό πεδίο που εισέρχεται στον αισθητήρα, κρίνεται απαραίτητο να μετατρέψουμε την τάση εξόδου (σε Volt) που έχουμε καταγράψει στην παράγραφο 5.1 σε Gauss.

Ο αισθητήρας HMC2003 είναι καλιμπραρισμένος από το εργοστάσιο, δηλαδή η ανάλυσή του είναι ρυθμισμένη, έτσι ώστε 1V να αντιστοιχεί σε 1Gauss. Παρόλο που ο συγκεκριμένος αισθητήρας δεν είναι ο ιδανικός, επειδή δεν παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια, τον χρησιμοποιούμε ως αναφορά για την μετατροπή τάσης σε πεδίο στον δικό μας αισθητήρα. Συγκεκριμένα, κόβουμε τον κλάδο ανάδρασης του κυκλώματός μας και συνδέουμε την διαφορική είσοδο του HMC2003 σε σειρά με την αντίσταση ανάδρασης R_{feed} , ώστε ο HMC2003 να διαρέεται από το ρεύμα I_{feed} .

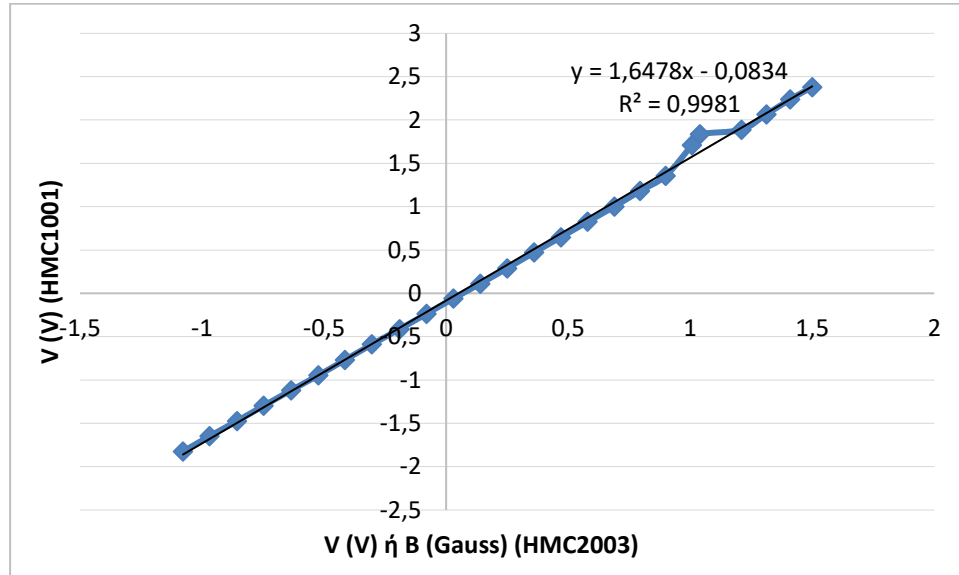
Τοποθετούμε τη συνδεσμολογία μέσα στον κλωβό, και τροφοδοτούμε εκ νέου το αντίστοιχο πηνίο με τη βοήθεια του τροφοδοτικού ρεύματος ακριβείας. Τροφοδοτούμε κατάλληλα τους αισθητήρες και καταγράφουμε τη διαφορική τάση εξόδου τους για διάφορες τιμές του ρεύματος του πηνίου.

Πίνακας 5.4: Τάση εξόδου HMC2003 και HMC1001

I (mA)	Vout (HMC2003) (V ή Gauss)	Vout (HMC1001) (V)
-120	-1,50	2,38
-110	-1,41	2,24
-100	-1,31	2,07
-90	-1,21	1,89
-80	-1,04	1,83
-70	-1,01	1,71
-60	-0,90	1,36
-50	-0,79	1,18
-40	-0,69	1,00
-30	-0,58	0,83
-20	-0,47	0,65
-10	-0,36	0,47
0	-0,25	0,29
10	-0,14	0,11
20	-0,03	-0,06
30	0,08	-0,24
40	0,19	-0,41
50	0,30	-0,59
60	0,42	-0,77
70	0,52	-0,95
80	0,64	-1,12
90	0,75	-1,30
100	0,86	-1,47

110	0,97	-1,65
120	1,08	-1,82

Από τον παραπάνω πίνακα παράγουμε την χαρακτηριστική τάσης εξόδου του HMC1001 και τάσης εξόδου του HMC2003, από όπου θα λάβουμε την νέα κλίση.



Εικόνα 5.19: Χαρακτηριστική τάσης εξόδου HMC1001-τάσης εξόδου HMC2003

Παρατηρούμε ότι $a_{new} = 1,6478V/Gauss$, οπότε διαιρώντας τις τιμές της τάσης εξόδου του αισθητήρα μας με την τιμή αυτή, λαμβάνουμε την αντίστοιχη τιμή πεδίου (σε Gauss).

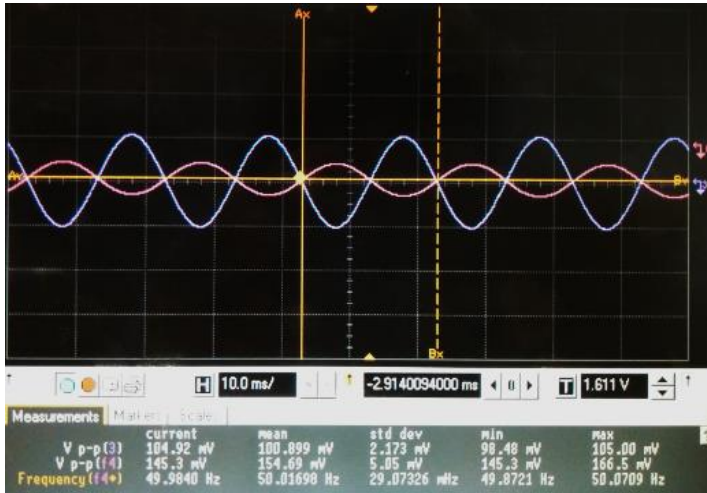
5.4 AC ανάλυση

Για να κάνουμε την AC ανάλυση του κυκλώματός μας, το συνδέουμε με τον τελεστικό ενισχυτή ισχύος OPA548 της Texas Instruments. Πρόκειται για ένα χαμηλού κόστους ολοκληρωμένο, το οποίο είναι ιδανικό για την οδήγηση μεγάλου εύρους φορτίων. Χάρη στο ενσωματωμένο σε αυτό μονολιθικό κύκλωμα, το ολοκληρωμένο παρέχει εξαιρετική ακρίβεια ασθενούς σήματος, καθώς και υψηλή τάση και ρεύμα στην έξοδο.

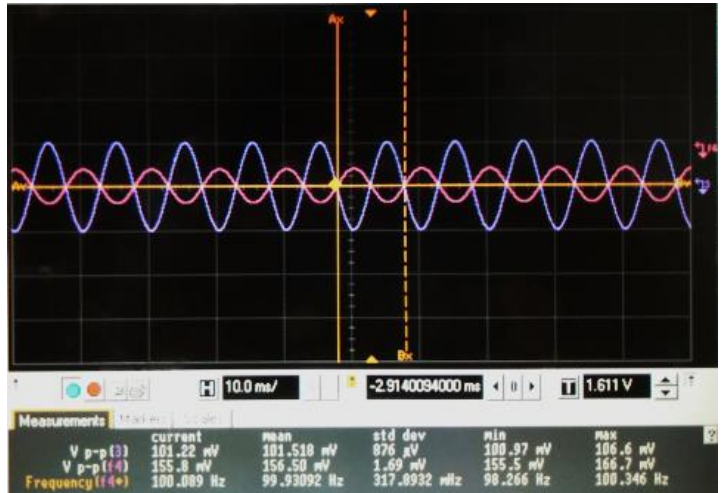
Ο OPA548 χρησιμοποιείται σε συνδεσμολογία μετατροπέα τάσης σε ρεύμα, ώστε να τροφοδοτήσουμε με την έξοδό του το πηνίο, διεγείροντάς το. Συνδέουμε τον ενισχυτή ισχύος με ημιτονικό σήμα πλάτους $100mV_{pp}$ μέσω της γεννήτριας. Τον τροφοδοτούμε με τάση $\pm 25V$ και το κύκλωμά μας το τροφοδοτούμε ως γνωστόν με τάση $5V$.

Σε ένα κανάλι του παλμογράφου, συνδέουμε την έξοδο του τελεστικού ισχύος, δηλαδή τα άκρα αντίστασης 10Ω που έχουμε συνδέσει σε αυτή. Η έξοδος του τελεστικού ισχύος θεωρείται και είσοδος του κυκλώματος του αισθητήρα. Επιπλέον, συνδέουμε δυο probes (ως προς τη γη) στα άκρα της αντίστασης R_{feed} και λαμβάνουμε τη διαφορική έξοδο ως τη διαφορά των ημιτόνων που καταγράφουν τα δυο probes.

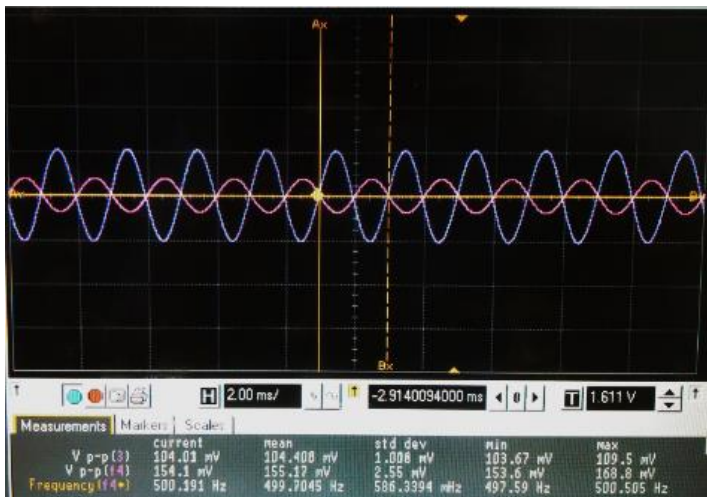
Έχοντας τροφοδοτήσει το x πηνίο, παραθέτουμε την εικόνα που μας έδωσε ο παλμογράφος για τον x άξονα, για μερικές ενδεικτικές τιμές συχνότητας της γεννήτριας.



(α) $f=50\text{Hz}$



(β) $f=100\text{Hz}$



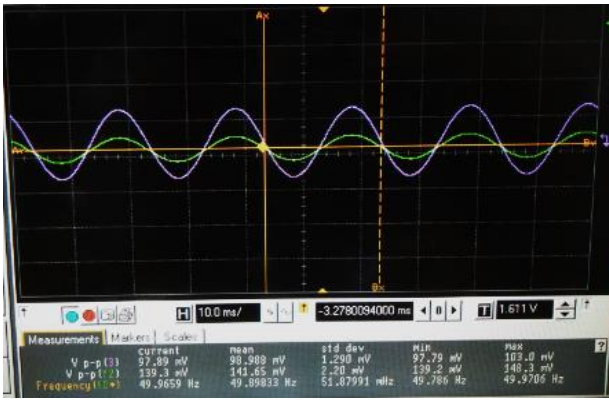
(γ) $f=500\text{Hz}$



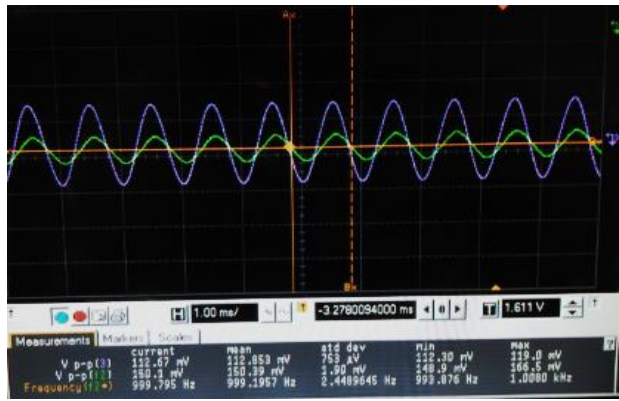
(δ) $f=1000\text{Hz}$

Εικόνα 5.20: Είσοδος (μoβ) και διαφορική έξοδος (ροζ) αισθητήρα (x-axis) για: α) $f=50\text{Hz}$, β) $f=100\text{Hz}$, γ) $f=500\text{Hz}$, δ) $f=1000\text{Hz}$

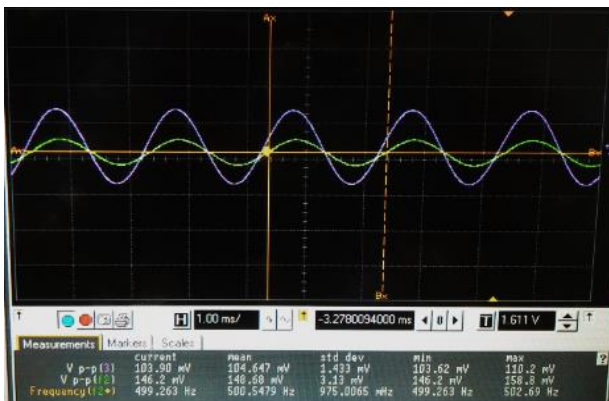
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για τον y άξονα και περιστρέφοντας στη συνέχεια κατάλληλα τον αισθητήρα για τον z άξονα, καταγράφουμε την εικόνα του παλμογράφου για τους δυο αυτούς άξονες στις Εικόνες 5.21 και 5.22.



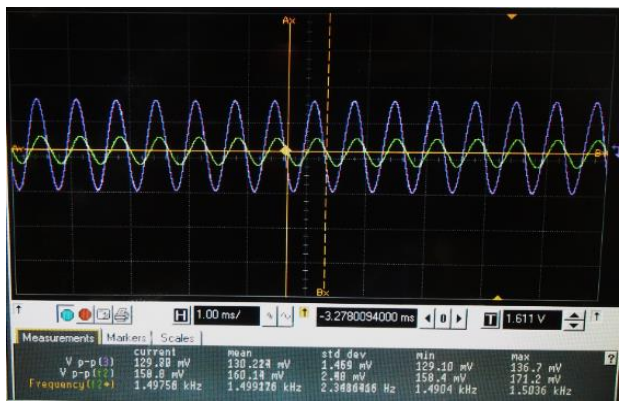
(α) $f=50\text{Hz}$



(β) $f=100\text{Hz}$

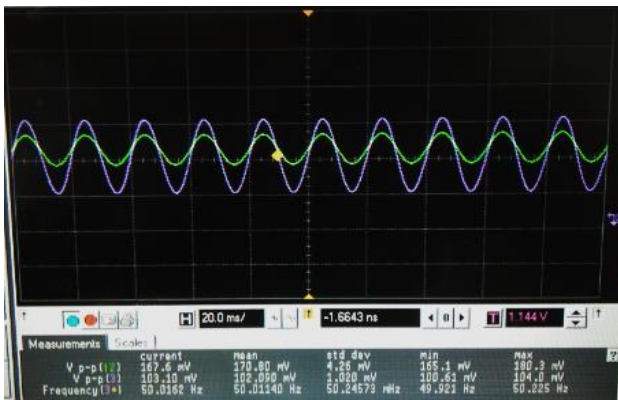


(γ) $f=500\text{Hz}$

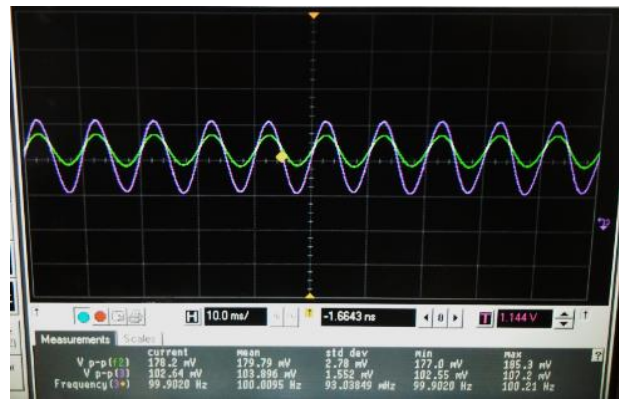


(δ) $f=1500\text{Hz}$

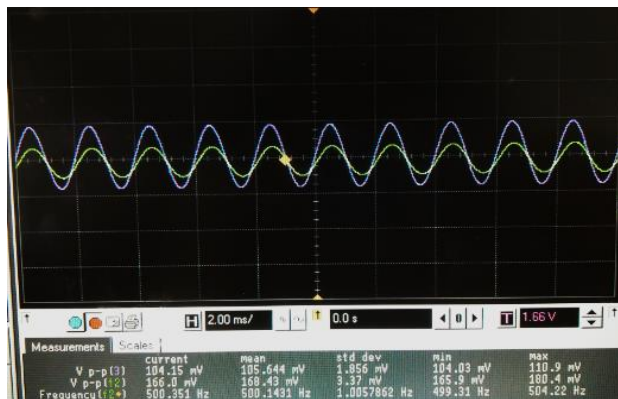
Εικόνα 5.21: Είσοδος (μωβ) και διαφορική έξοδος (πράσινο) αισθητήρα (y-axis) για: α) $f=50\text{Hz}$, β) $f=100\text{Hz}$, γ) $f=500\text{Hz}$, δ) $f=1500\text{Hz}$



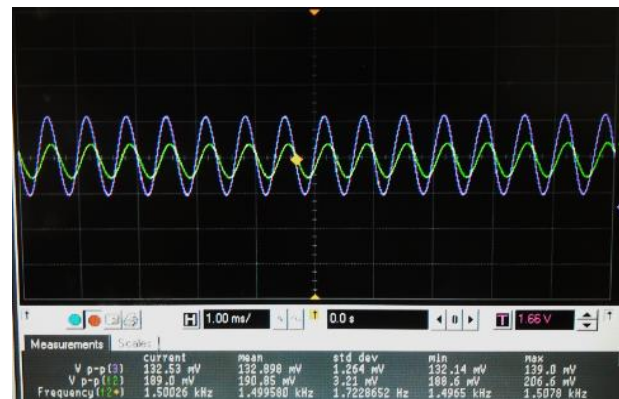
(α) $f=50\text{Hz}$



(β) $f=100\text{Hz}$



(γ) $f=500\text{Hz}$



(δ) $f=1500\text{Hz}$

Εικόνα 5.22: Είσοδος (μωβ) και διαφορική έξοδος (πράσινο) αισθητήρα (z-axis) για: α) $f=50\text{Hz}$, β) $f=100\text{Hz}$, γ) $f=500\text{Hz}$, δ) $f=1500\text{Hz}$

Στους ακόλουθους πίνακες συνοψίζουμε τις μετρήσεις V_{pp} (εισόδου και εξόδου) που λήφθηκαν για διάφορες τιμές της συχνότητας της γεννήτριας για τους τρεις άξονες. Στους πίνακες αυτούς προσθέτουμε και μια στήλη, στην οποία μετατρέπουμε την τάση εξόδου σε πεδίο, διαιρώντας το με την κλίση $\alpha_{new} = 1,6478V/Gauss$ που υπολογίσαμε στην παράγραφο 5.3. Σημειώνουμε, ότι μετρήσεις λαβάνονται ως τα 2kHz, επειδή από αυτή τη συχνότητα και μετά η τάση εξόδου του μετατροπέα πάει στον κόρο, δηλαδή η αντίσταση του πηνίου επί το ρεύμα που το διαρρέει γίνεται μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας του τελεστικού, με αποτέλεσμα ο τελεστικός να κάνει αποκοπή του ημιτόνου.

Πίνακας 5.5: V_{pp} εισόδου (άκρα αντίστασης 10Ω) και εξόδου (άκρα αντίστασης Rfeed=30Ω) για διάφορες τιμές συχνότητας (x-axis)

f (Hz)	Vin (Vpp) (x axis)	Vout (Vpp) (x axis)	Bout (Gauss)
20	0,102	0,194	0,117
50	0,102	0,190	0,115
100	0,101	0,1912	0,116
150	0,101	0,189	0,115
200	0,102	0,190	0,115
300	0,102	0,187	0,113
400	0,103	0,187	0,113
500	0,104	0,186	0,113
600	0,105	0,184	0,111
700	0,107	0,183	0,111
800	0,109	0,183	0,111
900	0,111	0,183	0,111
1000	0,114	0,185	0,112
1100	0,116	0,182	0,110
1200	0,119	0,184	0,112
1300	0,123	0,185	0,112
1400	0,127	0,187	0,113
1500	0,133	0,189	0,115
1600	0,139	0,193	0,117
1700	0,146	0,199	0,120
1800	0,154	0,205	0,124
1900	0,163	0,212	0,129
2000	0,175	0,223	0,135

Πίνακας 5.6: V_{pp} εισόδου (άκρα αντίστασης 10Ω) και εξόδου (άκρα αντίστασης Rfeed=30Ω) για διάφορες τιμές συχνότητας (y-axis)

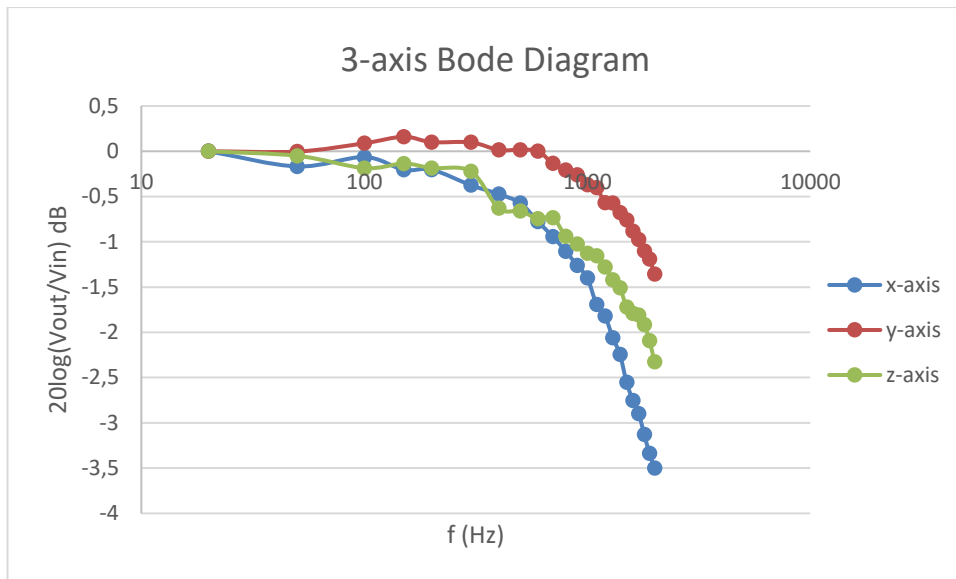
f (Hz)	Vin (Vpp) (y axis)	Vout (Vpp) (y axis)	Bout (Gauss)
20	0,103	0,182	0,110
50	0,104	0,183	0,111
100	0,101	0,180	0,109
150	0,101	0,182	0,110
200	0,102	0,182	0,110
300	0,102	0,182	0,110
400	0,103	0,182	0,110
500	0,104	0,183	0,111

600	0,104	0,184	0,111
700	0,107	0,185	0,112
800	0,108	0,186	0,113
900	0,110	0,188	0,114
1000	0,113	0,191	0,116
1100	0,114	0,192	0,117
1200	0,118	0,195	0,118
1300	0,121	0,200	0,121
1400	0,125	0,204	0,124
1500	0,129	0,209	0,127
1600	0,135	0,215	0,130
1700	0,141	0,222	0,135
1800	0,148	0,230	0,139
1900	0,156	0,24	0,146
2000	0,167	0,252	0,153

Πίνακας 5.7: V_{pp} εισόδου (άκρα αντίστασης 10Ω) και εξόδου (άκρα αντίστασης Rfeed=30Ω) για διάφορες τιμές συχνότητας (z-axis)

f (Hz)	Vin (Vpp) (z axis)	Vout (Vpp) (z axis)	Bout (Gauss)
20	0,101	0,175	0,106
50	0,101	0,174	0,106
100	0,102	0,173	0,105
150	0,102	0,174	0,106
200	0,102	0,173	0,105
300	0,103	0,174	0,106
400	0,103	0,166	0,101
500	0,104	0,167	0,101
600	0,105	0,167	0,101
700	0,108	0,172	0,104
800	0,109	0,170	0,103
900	0,113	0,174	0,106
1000	0,113	0,172	0,104
1100	0,116	0,176	0,107
1200	0,119	0,178	0,108
1300	0,123	0,181	0,110
1400	0,127	0,185	0,112
1500	0,133	0,189	0,115
1600	0,139	0,196	0,119
1700	0,145	0,204	0,124
1800	0,154	0,214	0,130
1900	0,163	0,222	0,135
2000	0,175	0,232	0,141

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραπάνω πινάκων, παράγουμε το διάγραμμα Bode για τους τρεις άξονες σε λογαριθμική κλίμακα.



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα Bode κυκλώματος αισθητήρα κλειστού βρόχου (x,y,z axis)

Όπως αναμενόταν, η συμπεριφορά του αισθητήρα είναι παρόμοια και στους τρεις άξονες. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι στις χαμηλές συχνότητες το κέρδος του συνολικού κλειστού συστήματος διατηρείται σχετικά σταθερό, ενώ στα 400Hz ξεκινάει μια σταδιακή πτώση. Σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση, το κύκλωμα παρουσιάζει συχνότητα γονάτου ίση με $f_{3dB} = 5,6kHz$ (βλ. Εικόνα 4.27), ωστόσο κάτι τέτοιο δεν μπορούμε να το δούμε, αφού όπως προαναφέραμε, είμαστε αναγκασμένοι να σταματήσουμε τη λήψη μετρήσεων στα 2kHz.

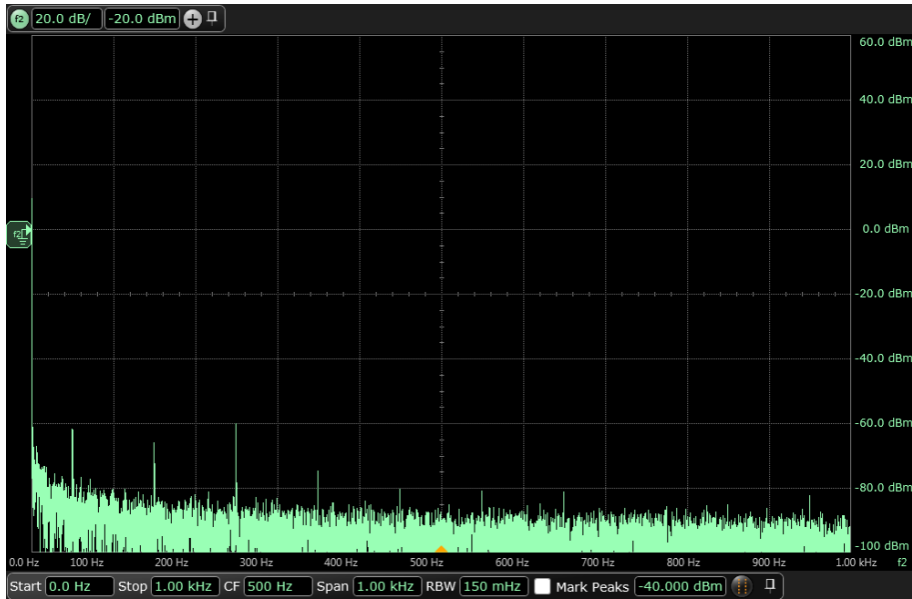
Αξίζει επίσης να σημειώσουμε, ότι αρχικά πήραμε τις αντίστοιχες μετρήσεις χωρίς να έχουμε προσθέσει τους πυκνωτές C_f στην ανάδραση των δυο σταδίων ενίσχυσης και παρατηρήσαμε ότι ο λόγος V_{out}/V_{in} παρέμενε σταθερός έως και τα 3kHz. Επειδή μας ενδιαφέρουν πεδία χαμηλών συχνοτήτων, προσθέσαμε τους πυκνωτές στις αναδράσεις των LMP2022 και OPA2674 για να περιορίσουμε το bandwidth και αυξήσουμε το περιθώριο φάσης.

5.5 Ανάλυση Θορύβου

Για την ανάλυση θορύβου του κυκλώματος, εφαρμόζουμε μετασχηματισμό Fourier στην είσοδο και την έξοδο του αισθητήρα, κάνοντας χρήση της FFT συνάρτησης στον παλμογράφο. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σε μη θωρακισμένο χώρο.

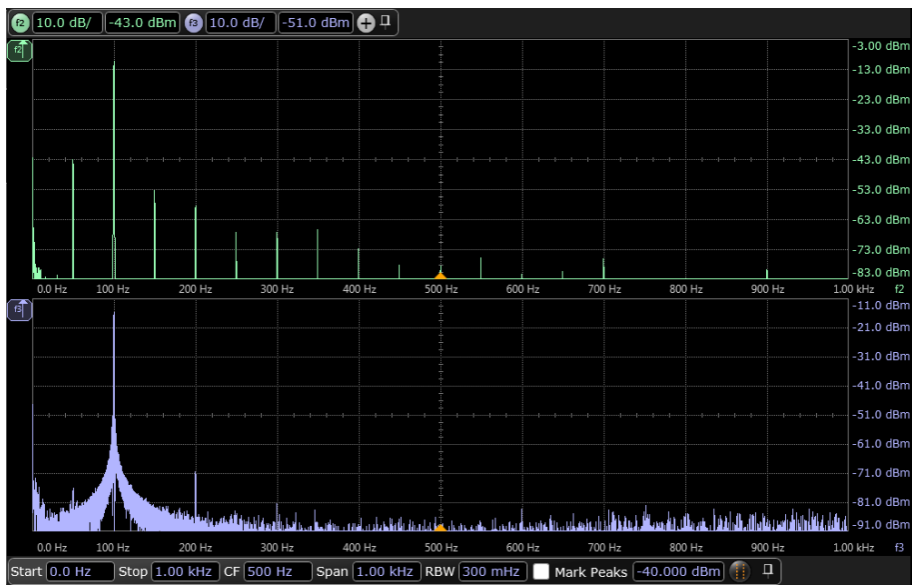
Επειδή, όπως έχουμε παρατηρήσει, ο αισθητήρας παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και στους τρεις άξονες, αρκεί να κάνουμε ανάλυση θορύβου μόνο στον έναν άξονα. Επιλέγουμε τυχαία τον άξονα y.

Αρχικά, εφαρμόζουμε FFT στην έξοδο του κυκλώματος, έχοντας τροφοδοτήσει μόνο τον αισθητήρα, χωρίς να διεγείρουμε το πηνίο μέσω της γεννήτριας. Έτσι, η εικόνα που έδωσε ο παλμογράφος (βλ. Εικόνα 5.24) απεικονίζει το θόρυβο του συστήματος που οφείλεται μόνο στα ηλεκτρονικά του κυκλώματος.

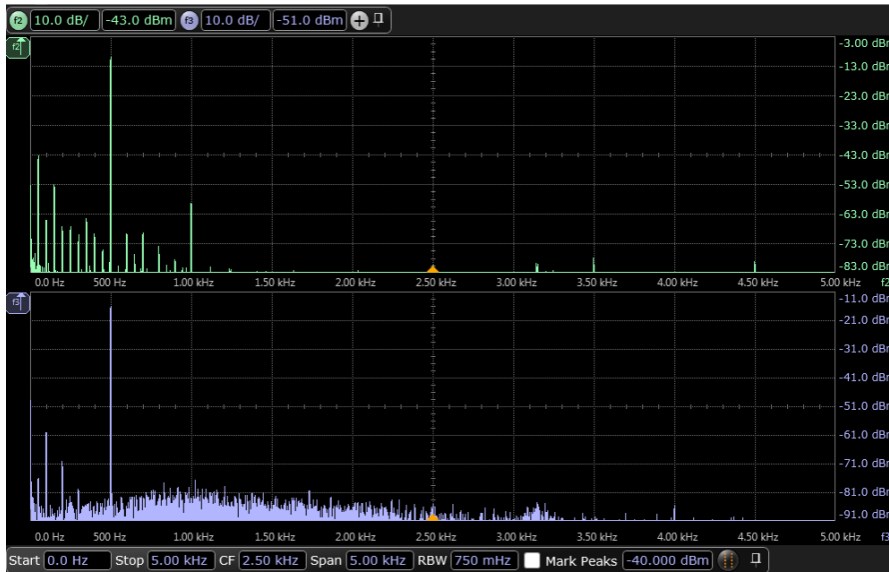


Εικόνα 5.24: FFT εξόδου του κυκλώματος χωρίς διέγερση

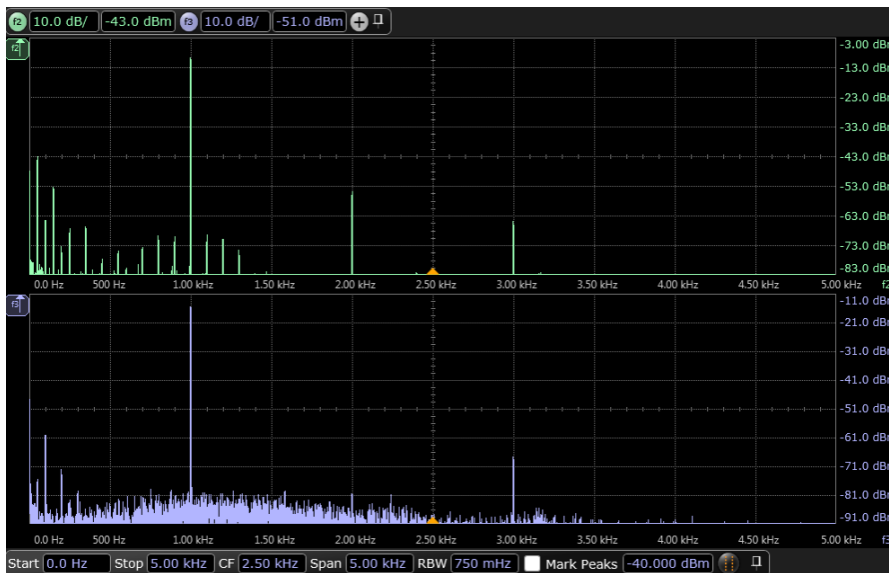
Στη συνέχεια διεγείρουμε το πηνίο μέσω της γεννήτριας με ημιτονικό σήμα πλάτους 100mV_{pp}. Παραθέτουμε ενδεικτικά την εικόνα που έδωσε ο παλμογράφος για το φάσμα εισόδου και εξόδου του κυκλώματος, για διάφορες τιμές τις συχνότητας.



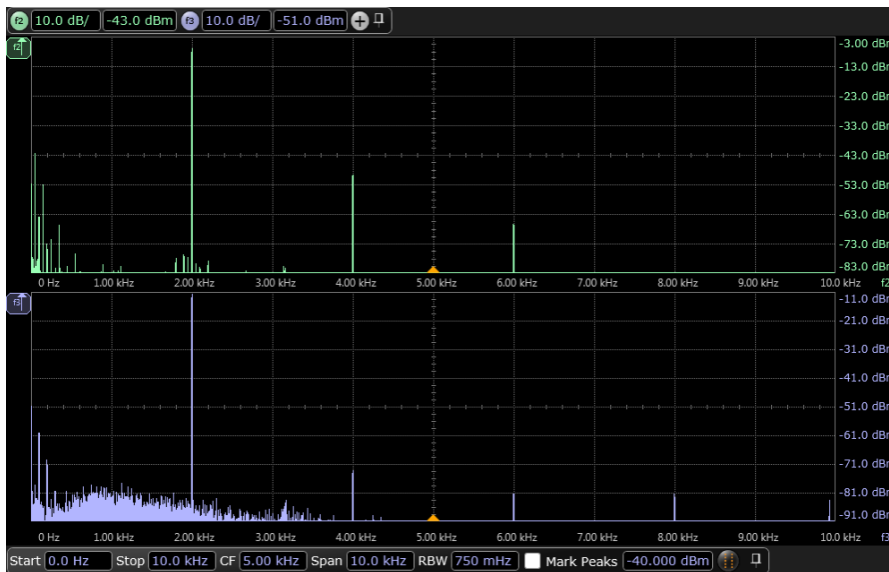
Εικόνα 5.25 (α) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=100\text{Hz}$



Εικόνα 5.25 (β) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=500\text{Hz}$



Εικόνα 5.25 (γ) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=1\text{kHz}$



Εικόνα 5.25 (δ) FFT εισόδου (κάτω) και εξόδου (πάνω) του κυκλώματος για $f=2\text{kHz}$

Τόσο στο φάσμα εισόδου όσο και στο φάσμα εξόδου, το peak εμφανίζεται στην εκάστοτε συχνότητα που επιβάλλουμε μέσω της γεννήτριας. Επιπλέον, το floor του θορύβου σε είσοδο και έξοδο διατηρείται πάντοτε σε φυσιολογικά, χαμηλά επίπεδα.

Παρατηρούμε, ότι το φάσμα εισόδου εμφανίζει ορισμένες μικρές αρμονικές (spikes), οι οποίες οφείλονται στη μη γραμμικότητα του τελεστικού ενισχυτή που χρησιμοποιούμε για τη μετατροπή της τάσης σε ρεύμα, και συγκεκριμένα στους όρους δεύτερης και τρίτης τάξης που αυτός εμφανίζει. Ωστόσο, στο φάσμα εξόδου οι αρμονικές αυτές γίνονται πιο ισχυρές, ενώ εμφανίζονται και κάποιες επιπλέον αρμονικές γύρω από την επιβαλλόμενη συχνότητα, γεγονός το οποίο αιτιολογείται από την παρουσία των τελεστικών ενισχυτών στο κύκλωμά μας.

Στις χαμηλές συχνότητες παρατηρούμε ισχυρές αρμονικές στα 50Hz και τα 100Hz. Πρόκειται για την 1^η και τη 2^η αρμονική του δικτύου που επίσης διαμορφώνουν το σήμα.

Στους παρακάτω πίνακες συμπεριλαμβάνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του fft της εισόδου και της εξόδου του συστήματος, δηλαδή το peak, το floor και τις ισχυρές δευτερεύουσες αρμονικές, καθώς και τη συχνότητα στην οποία αυτές εμφανίζονται.

Οι τιμές θορύβου που δίνει ο παλμογράφος είναι σε dBm. Για να τις μετατρέψουμε σε dBm/Hz διαιρούμε με το RBW του FFT, το οποίο φαίνεται και στις εικόνες που έχουμε παραθέσει. Έτσι, στην περίπτωση της λογαριθμικής κλίμακας, πρέπει να αφαιρέσουμε από το θόρυβο την τιμή $10 \log RBW$. Για τις μετρήσεις των 50Hz και 100Hz, έχουμε: $RBW = 300mHz \rightarrow 10 \log(0,3) = -5.23dB$, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις έχουμε: $RBW = 750mHz \rightarrow 10 \log(0,75) = -1.25dB$. Αφού αφαιρέσουμε τις τιμές αυτές από τις αντίστοιχες τιμές peak και floor, προχωρούμε στη μετατροπή σε V/\sqrt{Hz} και εν συνεχεία σε $Gauss/\sqrt{Hz}$, διαιρώντας ως γνωστόν με $\alpha_{new} = 1,6478V/Gauss$.

Πίνακας 5.8: Peak και Floor FFT της εισόδου του συστήματος

f(Hz)	Peak (input) (dBm)	Peak (input) (dBm/Hz)	Vrms (peak) (V/\sqrt{Hz})	Floor (input) (dBm)	Floor (input) (dBm/Hz)	Vrms (floor) ($\mu V/\sqrt{Hz}$)
50	-16,86	-11,63	0,059	-90,57	-85,34	12,091
100	-15,84	-10,61	0,066	-91,16	-85,93	11,298
500	-16,00	-14,75	0,041	-86,63	-85,38	12,036
1000	-15,44	-14,19	0,044	-90,73	-89,48	7,507
1500	-14,57	-13,32	0,048	-90,00	-88,75	8,166
2000	-11,67	-10,42	0,067	-94,49	-93,24	4,869

Πίνακας 5.9: Peak του FFT της εξόδου του κυκλώματος

f(Hz)	Peak (output) (dBm)	Peak (output) (dBm/Hz)	Vrms (peak) (V/\sqrt{Hz})	Brms (peak) ($Gauss/\sqrt{Hz}$)
50	-11,71	-6,48	0,106	0,064
100	-10,40	-5,17	0,123	0,075
500	-10,18	-8,93	0,080	0,049
1000	-9,92	-8,67	0,082	0,050
1500	-10,43	-9,18	0,078	0,047
2000	-7,03	-5,78	0,115	0,069

Πίνακας 5.10: Floor του FFT της εξόδου του κυκλώματος

f(Hz)	Floor (output) (dBm)	Floor (output) (dBm/Hz)	Vrms (floor) ($\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$)	Brms (floor) ($\mu\text{Gauss}/\sqrt{\text{Hz}}$)
50	-92,14	-86,91	10,092	6,1246
100	-91,69	-86,46	10,629	6,4503
500	-85,53	-84,28	13,661	8,2904
1000	-90,94	-89,69	7,328	4,4471
1500	-89,71	-88,46	8,443	5,1246
2000	-94,59	-93,34	4,814	2,9213

Πίνακας 5.11: Ισχυρότερες δευτερεύουσες αρμονικές του FFT της εξόδου του κυκλώματος

f(Hz)	2 nd harmonic (dBm)	f (Hz) 2 nd harmonic	3 rd harmonic (dBm)	f (Hz) 3 rd harmonic
50	-60,14	100	-	-
100	-53,57	150	-58,73	200
500	-59,59	1000	-	-
1000	-54,92	2000	-64,99	3000
1500	-43,00	3000	-	-
2000	-49,67	4000	-66,55	6000

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα & Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα – Πιθανές εφαρμογές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάσαμε έναν χαμηλού κόστους AMR αισθητήρα σε συνδεσμολογία κλειστού βρόχου, επιτυγχάνοντας μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια, λειτουργία στη γραμμική περιοχή και χαμηλό θόρυβο. Σημειώνουμε, ότι πολλές από τις μετρήσεις που λήφθηκαν θα ήταν καλύτερες, αν τα πηνία Helmholtz που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μεγαλύτερες γεωμετρικές διαστάσεις, ώστε το πεδίο στην περιοχή μέτρησης να είναι περισσότερο γραμμικό.

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας, όπως και κάθε μαγνητικός αισθητήρας, μπορεί να βρει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως για παράδειγμα στη βιομηχανία για την ανίχνευση αλλαγής θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης (έλεγχος κραδασμών) ή ως πυξίδα, στην βιοϊατρική για την κατασκευή ιατρικών μηχανημάτων, καθώς και στον στρατιωτικό τομέα για την ανίχνευση ναρκών, την αναγνώριση οχημάτων, την πλόγηση βλήματος κλπ. Επιπλέον, επειδή τις τελευταίες δεκαετίες, η προστασία του περιβάλλοντος έχει προαχθεί σε θέμα ζωτικής σημασίας, ο μαγνητικός αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση παραγόντων που επηρεάζουν την περιβαλλοντική σταθερότητα, όπως για παράδειγμα την παρακολούθηση και καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τη μέτρηση του πεδίου του διαστήματος, τη μέτρηση των οχημάτων που βρίσκονται στις οδικές αρτηρίες των κατοικημένων περιοχών κ.ο.κ.

6.2 Πλάνα για μελλοντική εργασία

Στόχος μας στο μέλλον είναι να συμπεριλάβουμε στο κύκλωμά μας το ψηφιακό κομμάτι, να προγραμματίσουμε δηλαδή τον μικροελεγκτή που θα ελέγχει το δειγματολήπτη. Έτσι, θα έχουμε επιτύχει την αυτοματοποίηση των μετρήσεων και θα έχουμε τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του αισθητήρα σε κυκλώματα με ψηφιακή είσοδο. Επιπλέον, με τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή θα μπορούμε να μετράμε αποκλίσεις της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη βελτίωση των μετρήσεών μας.

Βιβλιογραφία

1. Bartland, T., Caruso, M., Schneider, R., Smith, C., *A New Perspective on Magnetic Field Sensing*. Nonvolatile Electronics, 1998.
2. Fraden, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 3rd ed. New York: Springer-Verlag, Inc., 2004.
3. Honeywell. *1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002 HMC1021/1022 Datasheet*, n.d.
4. Hristoforou, Evangelos. *Magnetic Effects in Sensing Applications*. Laboratory of Physical Metallurgy, National Technical University of Athens, n.d.
5. Imperial College London, *How a fluxgate works* [online]. Available from: <<http://www.imperial.ac.uk/space-and-atmospheric-physics/research/areas/space-magnetometer-laboratory/space-instrumentation-research/magnetometers/fluxgate-magnetometers/how-a-fluxgate-works/>> [accessed 17/01/2016].
6. Ripka, Pavel. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House Inc., 2001.
7. Texas Instruments. *Dual Wideband High Output Current Operational Amplifier with Current Limit OPA2674 Datasheet*, 2003-2008.
8. Texas Instruments. *LMP202x Zero Drift, Low Noise, EMO-Hardened Amplifiers Datasheet*, 2008-2014.
9. Αγγελακέρης, Μάκης. *Όταν οι αντιστάσεις γιγαντώνονται*. Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2008.
10. Κατσίκας, Χρήστος. *Αισθητήρας μαγνητικού πεδίου βασισμένος στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
11. Πετούσης, Βλάσσης. *Η ελάττωση της τάσης offset σε αισθητήρες ρεύματος βασισμένους στο φαινόμενο Hall*. Βόλος: Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2011.
12. Χατζηγεωργίου, Νεοκλής. *Εντοπισμός θέσης πλοίου με μαγνητικές τεχνικές*. Αθήνα: Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.