

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Νεοκλής Χατζηγεωργίου¹, Δημήτριος Κοσσυβάκης¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹
¹Εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου, 15780,
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: neoklis@teamkb.com

Περίληψη

Ο χαρακτηρισμός ενός αισθητήρα αποτελεί αναγκαίο στάδιο σε ότι αφορά τον προσδιορισμό της καταλληλότητάς του για τις διαφορετικές εφαρμογές στις οποίες μπορεί να αξιοποιηθεί. Στην κατεύθυνση αυτή, αποκτούν ιδιαίτερη σημασία τόσο η ανάλυση της πυκνότητας φάσματος θορύβου όσο και η διερεύνηση της απόκρισης συχνότητας του αισθητήρα. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ο χαρακτηρισμός ενός εμπορικά διαθέσιμου μαγνητικού αισθητήρα τύπου ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης. Η πυκνότητα φάσματος θορύβου και η απόκριση συχνότητας προσδιορίστηκαν πειραματικά. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν στη συνέχεια με δεδομένα διαθέσιμα από τον κατασκευαστή.

Λέξεις-Κλειδιά: μαγνητικοί αισθητήρες, ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση, χαρακτηρισμός αισθητήρα, ανάλυση θορύβου, απόκριση συχνότητας

Abstract

The procedure of characterizing a sensor is a necessary step towards identifying its suitability regarding the different applications where it can be employed. In this respect, both analyzing the density of noise spectrum and identifying the frequency response of the sensor are of particular importance. In this work, the characterization of a commercially available anisotropic magnetoresistance sensor was conducted. Noise spectrum density and frequency response were investigated experimentally. The outcomes of the experimental analysis were compared to data available by the manufacturer of the sensor.

Keywords: magnetic sensors, anisotropic magnetoresistance, sensor characterization, noise analysis, frequency response

1. Εισαγωγή

Η διαδικασία χαρακτηρισμού ενός αισθητήρα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας παραγωγής και εμπορικής του διάθεσης, προκειμένου να προσδιοριστεί η καταλληλότητά του σε ότι αφορά το είδος των διαφορετικών εφαρμογών στις οποίες μπορεί να αξιοποιηθεί. Οι πληροφορίες που προκύπτουν μέσα από την εξαγωγή των χαρακτηριστικών του αισθητήρα αποτελούν χρήσιμο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ενσωμάτωσή του σε ευρύτερα συστήματα μέτρησης και ελέγχου [1, 2]. Συνήθως με τον όρο χαρακτηρισμός αναφερόμαστε τόσο στην βαθμονόμηση του αισθητήρα όσο και στον προσδιορισμό της πυκνότητα ισχύος του θορύβου σε σχέση με την συχνότητα αλλά και στην απόκριση συχνότητάς του. Οι παραπάνω διαδικασίες είναι απαραίτητες για να κατανοήσει κανείς τις επιδράσεις του περιβάλλοντος πάνω στη μετρητική διάταξη καθώς επίσης και το κατά πόσο η έξοδός της σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή αντιστοιχεί σε μετρούμενο μέγεθος ή θόρυβο.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες αποτελούν ένα πολύ μεγάλο κομμάτι της σχετικής αγοράς και βρίσκουν μεγάλο πεδίο εφαρμογής τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο [3]. Η μεγάλη πρόοδος που έχει συντελεστεί τα τελευταία χρόνια στους τομείς των μαγνητικών υλικών και της μικροηλεκτρονικής έχει οδηγήσει συνακόλουθα στην κατασκευή ιδιαίτερα αξιόπιστων αισθητηρίων συστημάτων που μπορούν με επιτυχία να καλύψουν μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις (αισθητήρες θέσης, μετατόπισης, πίεσης, ανίχνευσης φερρομαγνητικών αντικειμένων κλπ.) [3, 4]. Προκειμένου να αποφεύγεται κατά τη διάρκεια της μέτρησης η σύγχυση με άλλα υφιστάμενα μαγνητικά πεδία (πεδίο της Γης, πεδία προκαλούμενα από παρακείμενα φερρομαγνητικά αντικείμενα), κοινή πρακτική στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελεί ο σχεδιασμός των διατάξεων κατά τρόπο τέτοιο ώστε να απαιτείται η μέτρηση μαγνητικών πεδίων σχετικά μεγάλου μεγέθους. Τα μαγνητικά πεδία αυτά συνήθως προκαλούνται τεχνητά είτε με την παρουσία μόνιμων μαγνητών είτε με χρήση ηλεκτρομαγνήτη [5].

Παρόλα αυτά, η συνεχής εξέλιξη στον τομέα των μαγνητικών αισθητήρων οδήγησε στην ανάγκη για την αξιόπιστη μέτρηση και μαγνητικών πεδίων μικρότερου μεγέθους. Εφαρμογές όπου οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης (μαγνητικές πυξίδες κλπ.), η απαίτηση για δυνατότητα μέτρησης μαγνητικών σωματιδίων καθώς και μη καταστροφικοί έλεγχοι με μαγνητικές τεχνικές (δινორρέυματα κλπ.) με μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας αποτελούν μερικά μόνο παραδείγματα περιπτώσεων όπου δημιουργείται εκ των πραγμάτων η αναγκαιότητα για μετρητικά συστήματα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν μαγνητικά πεδία πολύ μικρού μεγέθους [6-8].

Γίνεται κατανοητό ότι, μπροστά στο φάσμα των νέων απαιτήσεων που δημιουργούνται στο πεδίο των μαγνητικών μετρήσεων, ο θόρυβος των μαγνητικών αισθητήρων παίζει όλο και μεγαλύτερο ρόλο στον προσδιορισμό της καταλληλότητας ενός μαγνητικού αισθητήρα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Δεδομένης της ύπαρξης του μαγνητικού πεδίου της γης, είναι αδύνατο χωρίς εξειδικευμένο εξοπλισμό να πραγματοποιηθούν μετρήσεις μαγνητικών μεγεθών απουσία θορύβου, καθώς στην πλειονότητα των περιπτώσεων η μετρητική διάταξη δεν βρίσκεται σε μαγνητικά απομονωμένο περιβάλλον. Επιπλέον πηγή θορύβου για το είδος αυτό των μετρήσεων είναι ο θόρυβος που προκαλείται από τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα ενός αισθητήρα. Ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα και την ευαισθησία του, είναι δυνατόν ο θόρυβος που προκαλείται από τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα να υπερκαλύπτει τον θόρυβο του αισθητήρα αυτού καθαυτού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελούν τα μαγνητόμετρα SQUID που αποτελούν τα πλέον ευαίσθητα συστήματα μέτρησης

Νεοκλής Χατζηγεωργίου¹, Δημήτριος Κοσσυβάκης¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Χαρακτηρισμός Μαγνητομέτρων Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης

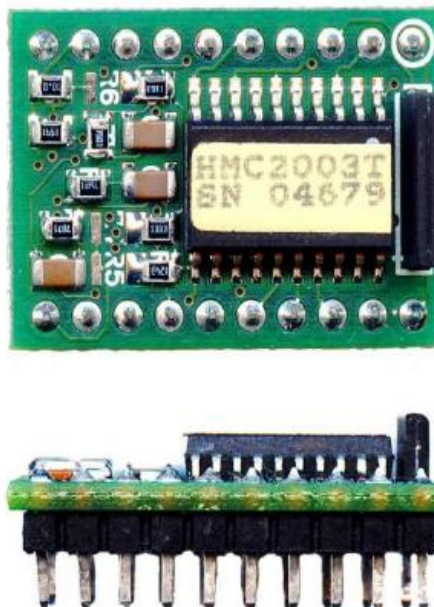
μαγνητικών πεδίων, όπου ο κύριος περιορισμός σε ότι αφορά το θόρυβο προκύπτει από τα απαραίτητα ηλεκτρονικά που τα συνοδεύουν [9, 10].

Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι η ανάλυση θορύβου των μαγνητικών αισθητήρων είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό του εύρους εφαρμογών στο οποίο μπορούν να αξιοποιηθούν [11-13]. Είναι επίσης δεδομένο ότι για τον ίδιο λόγο εξίσου σημαντική είναι και η ενδελεχής διερεύνηση της απόκρισης συχνότητας των μαγνητικών αισθητήρων [14, 15]. Η παρούσα εργασία αφορά τη μελέτη της πυκνότητας φάσματος θορύβου καθώς και της απόκρισης συχνότητας ενός εμπορικά διαθέσιμου μαγνητικού αισθητήρα τύπου ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης. Τόσο ο θόρυβος όσο και η απόκριση του αισθητήρα σε διαφορετικές συχνότητες μελετήθηκαν πειραματικά στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του ΕΜΠ. Τα πειραματικά εξαγόμενα αποτελέσματα τέθηκαν σε σύγκριση με αντίστοιχα δεδομένα διαθέσιμα από τον κατασκευαστή του αισθητήρα.

2. Μεθοδολογία

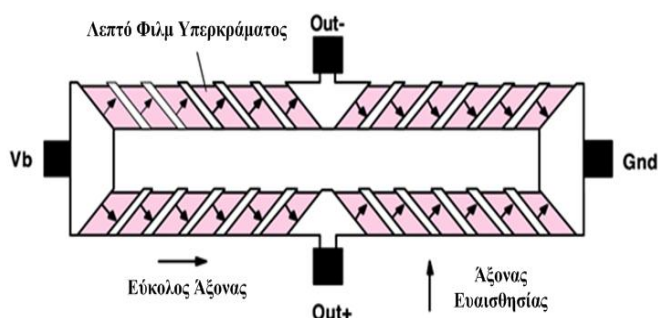
2.1. Αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης HMC2003

Ο αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης HMC2003 (Εικ. 1), κατασκευασμένος από την εταιρεία Honeywell, έχει τη δυνατότητα να μετρά το μαγνητικό πεδίο σε τρεις άξονες (x, y, z). Παρέχει τρεις αναλογικές εξόδους, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο ενός άξονα. Ο αισθητήρας HMC2003 αποτελείται από δύο επί μέρους αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας. Ο πρώτος αισθητήρας (HMC1001) μετρά τη συνιστώσα z του μαγνητικού πεδίου και ο δεύτερος αισθητήρας (HMC1002) μετρά της συνιστώσες x και y αντίστοιχα. Στο κύκλωμα του αισθητήρα, όπως αυτό παραδίδεται από τον κατασκευαστή, περιλαμβάνονται επιπλέον τρεις ενισχυτές χαμηλού θορύβου (ένας ενισχυτής για κάθε συνιστώσα) καθώς και ενεργό βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 1KHz. Η διακριτική του ικανότητα σε ότι αφορά την μέτρηση μαγνητικών πεδίων ανέρχεται στα 40 μ Gauss, ενώ μπορεί να μετρά μαγνητικά πεδία μέγιστης τιμής έως και 2 Gauss [16].



Εικόνα 1: Κύκλωμα αισθητήρα HMC2003

Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου γίνεται με χρήση διάταξης γέφυρας Wheatstone, η οποία συγκροτείται από τέσσερις επί μέρους μαγνητοαντιστάσεις (Εικ. 2). Για τη μέτρηση κάθε συνιστώσας ο αισθητήρας ενσωματώνει μία γέφυρα Wheatstone, περιλαμβάνει δηλαδή στο εσωτερικό του συνολικά τρεις γέφυρες για τη μέτρηση και των τριών συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια μικρών μεταβολών των αντιστάσεων και κατ' επέκταση μικρών τιμών μαγνητικού πεδίου. Κάθε μαγνητοαντίσταση αποτελείται από μια λεπτή επίστρωση Ni-Fe (permalloy) πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Si) διαμορφωμένη έτσι ώστε να αποτελεί στοιχείο αντίστασης υπό μορφή ταινίας. Η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στη μεγάλη πλευρά του φιλμ προκαλεί περιστροφή του διανύσματος μαγνήτισης και αλλαγή της γωνίας του. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε αλλαγή της τιμής της αντίστασης, θέτοντας τη γέφυρα Wheatstone εκτός ισορροπίας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η μέτρηση της μαγνήτισης σε κάθε έναν από τις τρεις άξονες x, y, και z.



Εικόνα 2: Γέφυρα Wheatstone αποτελούμενη από τέσσερις μαγνητοαντιστάσεις για μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε έναν άξονα

2.2. Συσκευασία και τροφοδοσία του αισθητήρα

Λόγω του ότι το ενδιαφέρον μας εστιάζεται περισσότερο σε εφαρμογές μέτρησης μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας επιλέχθηκε ο αισθητήρας να τοποθετηθεί εντός αλουμινένιου κουτιού προκειμένου αυτό να λειτουργήσει ως μαγνητική θωράκιση σε ότι αφορά τις πιο υψηλές συχνότητες (Εικ. 3):



Εικόνα 3: Συσκευασία αισθητήρα

Σε ότι αφορά την τροφοδοσία του αισθητήρα, αυτή πραγματοποιήθηκε με χρήση μπαταρίας μολύβδου ονομαστικής τάσης 12V και χωρητικότητας 7Ah. Η επιλογή τροφοδοσίας μέσω συσσωρευτή, αν και προσέθεσε επιπλέον βάρος στο σύστημα μέτρησης, επιτρέπει την εύκολη μεταφορά της μετρητικής διάταξης για τη διεξαγωγή πειραμάτων σε εξωτερικούς χώρους και επιπλέον αποκλείει την εισαγωγή θορύβου προερχόμενου από το δημόσιο δίκτυο παροχής ενέργειας στις μετρήσεις. Για τη βέλτιστη τροφοδότηση του συστήματος μέτρησης, μεταξύ του συσσωρευτή και των υπόλοιπων συστημάτων παρεμβλήθηκε κύκλωμα σταθεροποίησης της τάσης, το οποίο παράλληλα εξυπηρετεί και τον υποβιβασμό της τάσης του συσσωρευτή στα απαιτούμενα για τη λειτουργία του αισθητήρα επίπεδα.

2.3. Πηνία Helmholtz

Προκειμένου για την εξάλειψη dc διαταραχών οφειλόμενων στο περιβάλλον μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν ζεύγη πηνίων Helmholtz, η διάταξη των οποίων απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Η διάταξη αποτελείται από δύο ζεύγη πηνίων Helmholtz στις διευθύνσεις x και y, τα οποία χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν το μαγνητικό πεδίο διέγερσης. Τα πηνία διέγερσης περιβάλλονται από τρία επιπλέον ζεύγη πηνίων Helmholtz σε μορφή κύβου στις διευθύνσεις x, y και z. Η εξάλειψη των διαταραχών έγινε με χρήση των τριών εξωτερικών πηνίων ενώ για την εφαρμογή των προς μέτρηση μαγνητικών πεδίων χρησιμοποιήθηκαν τα δύο εσωτερικά ζεύγη.



Εικόνα 4: Ζεύγη πηνίων Helmholtz για την εξάλειψη των dc διαταραχών και την εφαρμογή του προς μέτρηση μαγνητικού πεδίου

2.4. Εύρεση πυκνότητας φάσματος θορύβου

Ο κατασκευαστής του αισθητήρα παρέχει το γράφημα πυκνότητας φάσματος θορύβου για τον αισθητήρα HMC1001, ο οποίος αποτελεί το βασικό κυκλωματικό στοιχείο του HMC2003. Πρόκειται ουσιαστικά για τη μία από τις τρεις γέφυρες Wheatstone, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων στις τρεις συνιστώσες. Σημειώνεται ότι η γραφική παράσταση η οποία παρέχεται δε λαμβάνει υπόψη τα ηλεκτρονικά συστήματα που συμπεριλαμβάνονται στο κύκλωμα του αισθητήρα. Εξαιτίας

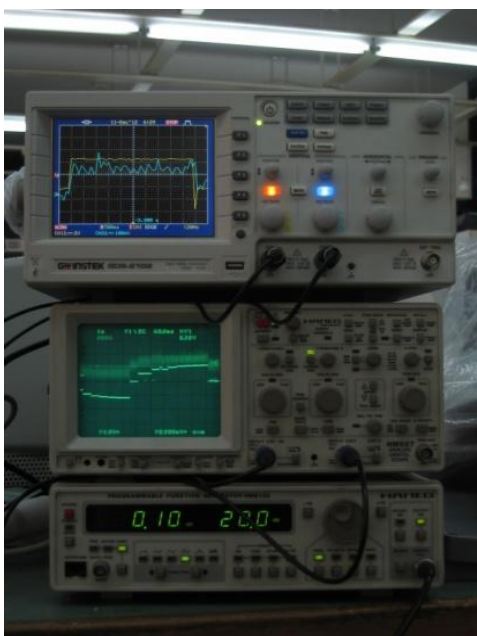
Νεοκλής Χατζηγεωργίου¹, Δημήτριος Κοσσυβάκης¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Χαρακτηρισμός Μαγνητομέτρων Ανισοτροπικής Μαγνητοαντίστασης

διαφορών στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μαγνητοαντιστάσεων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των γεφυρών Wheatstone, η πυκνότητα φάσματος θορύβου μελετήθηκε ξεχωριστά για καθεμία από τις τρεις συνιστώσες.

2.5. Εύρεση απόκρισης συχνότητας

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.1 ο αισθητήρας HMC2003 αποτελείται από δύο επί μέρους αισθητήρια συστήματα, τα HMC1001 και HMC1002. Οι αισθητήρες HMC1001 και HMC1002 έχουν ως συχνότητα αποκοπής τα 5MHz. Στη συνέχεια, η έξοδός τους οδηγείται στους ενισχυτές σήματος τύπου AMP04, οι οποίοι βρίσκονται ενσωματωμένοι στο τελικό κύκλωμα όπως αυτό είναι διαθέσιμο εμπορικά. Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη ενίσχυση επιλέγουμε σε ένα τελεστικό ενισχυτή τόσο περισσότερο μειώνεται το εύρος ζώνης του. Ο HMC2003 έχει επιλεγμένα τα κέρδη των τελεστικών του ενισχυτών έτσι ώστε το αρχικό σήμα εξόδου να ενισχύεται περίπου 68 φορές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους ζώνης της μετρητικής διάταξης, ενώ λόγω και του βαθυπερατού φίλτρου που ενσωματώνεται στο τελικό κύκλωμα η τελική συχνότητα αποκοπής είναι το 1 kHz.

Πέραν αυτού, η τοποθέτηση του αισθητήρα σε αλουμινένιο κουτί, για λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.2, επηρεάζει περαιτέρω το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του, μειώνοντάς επιπλέον τη συχνότητα αποκοπής σε σχέση με την ονομαστική (1KHz). Το αλουμινένιο περίβλημα επιτρέπει στο συνεχές μαγνητικό πεδίο να περνά έως μερικά Hz, ενώ πέραν ενός ορίου συχνότητας λειτουργεί ως κλωβός Faraday. Δρα δηλαδή ως βαθυπερατό φίλτρο και εμποδίζει την εισαγωγή υψίσυχνων μαγνητικών πεδίων εντός του κλωβού. Αναμένεται επομένως για το τελικό σύστημα να βρεθεί διαφορετική συχνότητα αποκοπής σε σχέση με αυτή που προσδιορίζεται στο φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή [16]. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται η εργαστηριακή διάταξη που κατασκευάστηκε για τον προσδιορισμό της απόκρισης συχνότητας του αισθητήρα HMC2003.



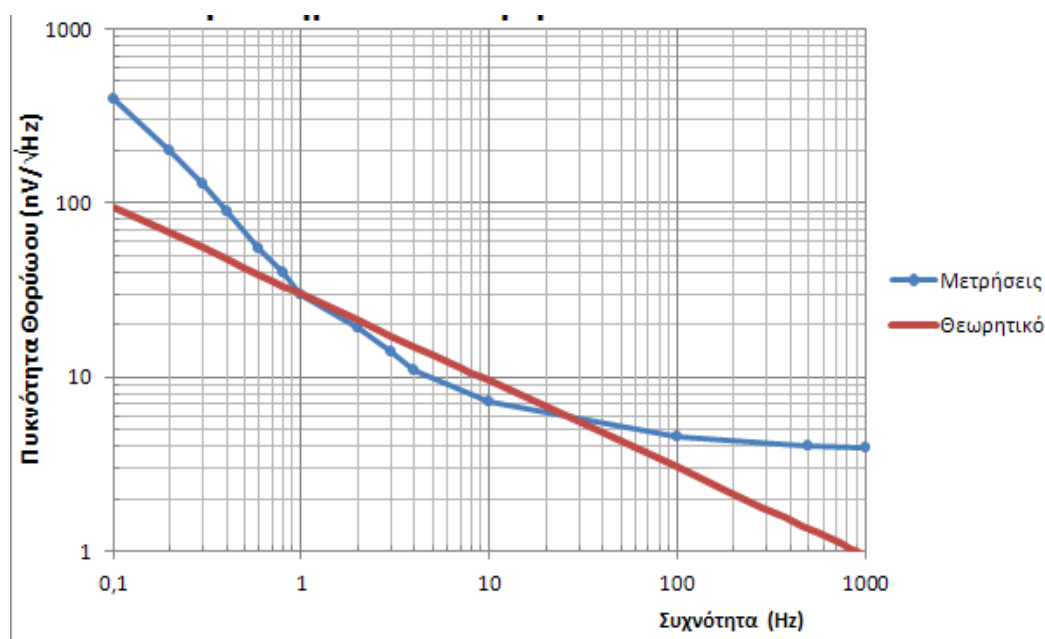
Εικόνα 5: Εργαστηριακή διάταξη για τον προσδιορισμό της απόκρισης συχνότητας του αισθητήρα ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης HMC2003

3. Αποτελέσματα

Στις επόμενες ενότητες παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν την πειραματική εξαγωγή της πυκνότητας φάσματος θορύβου του αισθητήρα και της απόκρισης συχνότητας αυτού.

3.1. Πυκνότητα φάσματος θορύβου

Στην Εικόνα 6 δίνεται η πυκνότητα φάσματος θορύβου όπως αυτή υπολογίστηκε βάση της πειραματικής διαδικασίας. Ενδεικτικά δίνεται η καμπύλη που προέκυψε από τη μελέτη της z συνιστώσας μέτρησης του αισθητήρα. Για λόγους σύγκρισης, στο ίδιο γράφημα παρατίθεται και η αντίστοιχη καμπύλη που δίνεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα.



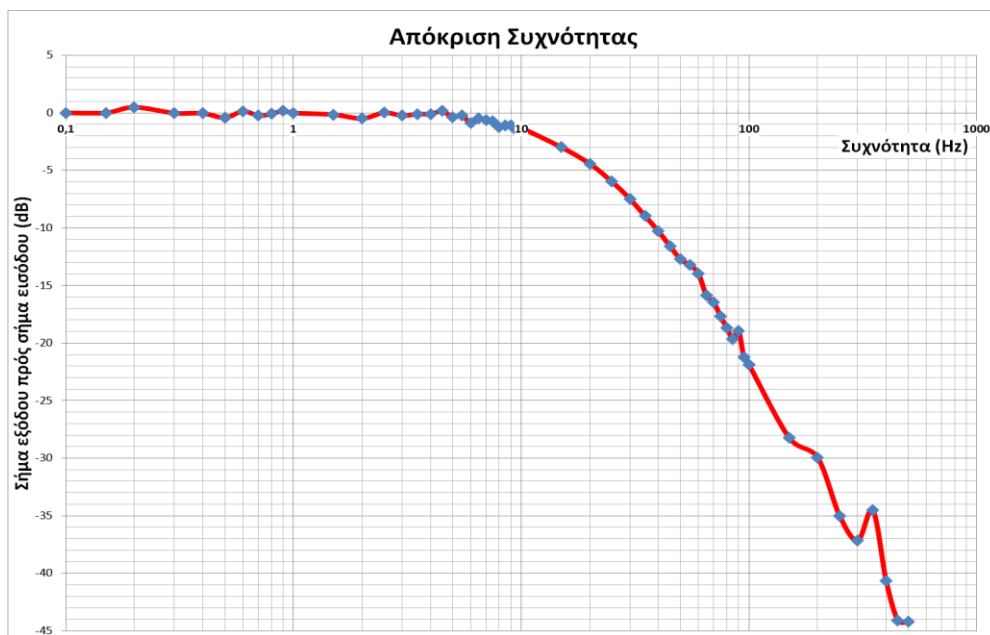
Εικόνα 6: Σύγκριση εργαστηριακής καμπύλης της πυκνότητας φάσματος θορύβου του αισθητήρα με τα διαθέσιμα από τον κατασκευαστή δεδομένα

Από την Εικόνα 6 είναι προφανές ότι υπάρχει απόκλιση μεταξύ της πειραματικά εξαγόμενης καμπύλης και της καμπύλης που παρέχεται από τον κατασκευαστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο κατασκευαστής παρέχει την καμπύλη πυκνότητας φάσματος θορύβου για τον αισθητήρα χωρίς τα συνακόλουθα ηλεκτρονικά του υποσυστήματα. Η εμπορικά διαθέσιμη έκδοση, η οποία και εξετάστηκε, ενσωματώνει επιπλέον τρεις τελεστικούς ενισχυτές τύπου AMP04 καθώς και βαθυπερατό φίλτρο. Κατά συνέπεια, η πειραματικά εξαγόμενη καμπύλη αφορά το συνολικό σύστημα που αποτελείται από τον αισθητήρα μαζί με τα ηλεκτρονικά του υποσυστήματα και γι' αυτό είναι λογικό να εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά από τη θεωρητική καμπύλη της Εικόνας 6.

3.2. Απόκριση συχνότητας

Στην Εικόνα 7 δίνεται το γράφημα απόκρισης συχνότητας του αισθητήρα HMC2003, όπως υπολογίστηκε πειραματικά. Διαπιστώνεται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η προσθήκη του αλουμινένιου κουτιού στη διάταξη μετατοπίζει τη συχνότητα αποκοπής προς χαμηλότερες συχνότητες αντί του 1 kHz που είναι η ονομαστική τιμή η οποία

δίνεται στο φύλλο προδιαγραφών του αισθητήρα. Η νέα συχνότητα αποκοπής όπως προέκυψε μέσα από την πειραματική διαδικασία προσδιορίζεται στα 13Hz.



Εικόνα 7: Σύγκριση εργαστηριακής καμπύλης της πυκνότητας φάσματος θορύβου του αισθητήρα με τα διαθέσιμα από τον κατασκευαστή δεδομένα

4. Συμπεράσματα – Πρόταση

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας φάσματος θορύβου και της απόκρισης συχνότητας ενός αισθητήρα αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικά στάδια σε ότι αφορά τον προσδιορισμό της καταλληλότητάς του για το εύρος εφαρμογών στο οποίο μπορεί ο αισθητήρας να αξιοποιηθεί. Η παρούσα εργασία αφορά τον προσδιορισμό της πυκνότητας φάσματος θορύβου και της απόκρισης συχνότητας ενός εμπορικά διαθέσιμου αισθητήρα ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης. Τα αποτελέσματα εξάχθηκαν πειραματικά και συγκρίθηκαν με δεδομένα διαθέσιμα από τον κατασκευαστή του αισθητήρα (Honeywell Inc.). Οι αποκλίσεις που παρουσιάστηκαν μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των διαθέσιμων από τον κατασκευαστή δεδομένων αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

5. Βιβλιογραφία

- [1] Sundararajan A.D., Rezaul Hasan S.M., “Release etching and characterization of MEMS capacitive pressure sensors integrated on a standard 8-metal 130 nm CMOS process”, *Sensors and Actuators (A)*, 212, pp. 68-79, 2014.
- [2] Min Gu G., Kyun Shin Y., Son J., Kim J., “Design and characterization of a photo-sensor based force measurement unit”, *Sensors and Actuators (A)*, pp. 49-56, 2012.
- [3] Ripka P., “Magnetic Sensors & Magnetometers”, Artech House, 2001.
- [4] Fraden J., “Handbook of Modern Sensors: Physics, Design and Applications”, 4th Edition, Springer, 2010.

- [5] Caruso M.J., Bratland T., Smith C.H., Schneider R., “A New Perspective on Magnetic Field Sensing”, Honeywell International Inc.
- [6] Caruso M.J., “Applications of Magneto-resistive Sensors in Navigation Systems”, Honeywell international Inc.
- [7] Xu J., Mahajan K., Xue W., Winter J., Zborowski M., Chalmers J., “Simultaneous, single particle, magnetization and size measurements of micron sized, magnetic particles”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324, pp. 4189-4199, 2012.
- [8] Almeida G., Gonzalez J., Rosado L., Vilaca P., Santos T.G., “Advances in NDT and Materials Characterization by Eddy Currents”, *Procedia CIRP*, pp. 359-364, 2013.
- [9] Tanaka S., Hatsukade Y., Ohtani T., Suzuki S., “SQUID sensor application for small metallic particle detection”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321, pp. 880-883, 2009.
- [10] Zrubek V., Manka J., “Optimization of noise parameters of SQUID magnetometers with external negative feedback”, *Cryogenics*, 35, pp. 451-454, 1995.
- [11] Pannetier M., Fermon C., Le Goff G., Simola J., Kerr E., Coey J.M.D., “Noise in small magnetic systems-applications to very sensitive magneto-resistive sensors”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291, pp. 1158-1160, 2005.
- [12] Shen Y., Gao J., Shen L., Gray D., Li J., Finkel P., Viehland D., Zhuang X., Saez S., Dolabjian C., “Analysis of the environmental magnetic noise rejection by using two simple magnetoelectric sensors”, *Sensors and Actuators (A)*, 171, pp. 63-68, 2011.
- [13] Lu C.C., Liu Y.T., Jhao F.Y., Jeng J.T., “Responsivity and noise of a wire-bonded CMOS micro-fluxgate sensor”, *Sensors and Actuators (A)*, 179, pp. 39-43, 2012.
- [14] Gao J., Wang Y., Li M., Shen Y., Li J., Viehland D., “Quasi-static ($f < 10-2$ Hz) frequency response of magnetoelectric composites based magnetic sensor”, *Materials Letters*, 85, pp. 84-87, 2012.
- [15] Zeng K., Paulose M., Ong K.G., Grimes C.A., “Frequency-domain characterization of magnetoelastic sensors: a microcontroller-based instrument for spectrum analysis using a threshold-crossing counting technique”, *Sensors and Actuators (A)*, 121, pp. 66-71, 2005.
- [16] 3-Axis Magnetic Sensor Hybrid HMC2003, Honeywell International Inc.