ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ

Αγγελόπουλος Σπυρίδων και Χριστοφόρου Ευάγγελος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780, Ζωγράφου
e-mail: spyrosag@central.ntua.gr

Περίληψη

Η διακρίβωση των μαγνητομέτρων είναι μια απαραίτητη διαδικασία για τη σωστή και αξιόπιστη λειτουργία αυτών. Για την επίτευξή της, απαιτείται η εξάλειψη του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου από το χώρο όπου διενεργούνται οι μετρήσεις. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η παθητική ή ενεργητική μαγνητική θωράκισή του. Η παθητική θωράκιση έχει υψηλό κόστος, συντελείται σε ειδικές εγκαταστάσεις και δεν επιφέρει πάντοτε τα επιθυμητά αποτελέσματα, ειδικά κατά την εξάλειψη των μαγνητικών πεδίων υψηλών συχνοτήτων. Αντιθέτως, η ενεργητική μαγνητική θωράκιση αποτελεί μια πιο ευέλικτη λύση, που μπορεί να προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες. Σε αυτήν την περίπτωση, τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τη μέτρηση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου, είναι οι αισθητήρες SQUID, που εμφανίζουν, όμως, κάποια μειονεκτήματα, που σχετίζονται με τη γεωμετρία τους και τις ειδικές συνθήκες λειτουργίας τους. Στο παρόν άρθρο, περιγράφεται η ανάπτυξη μιας νέας διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων, βασιζόμενης στην ενεργητική μαγνητική θωράκιση και στη χρήση νέων μαγνητομέτρων, η οποία μπορεί να αποτελέσει ένα πρωτεύον πρότυπο διακρίβωσης μαγνητομέτρων. Η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στη σχεδίαση και χρήση μαγνητομέτρων υψηλής ακριβείας, που χρησιμοποιούν ως πυρήνα άμορφα μαγνητικά υλικά σε μορφή συρμάτων. Αυτά τα υλικά, όπως είναι τα CoSiB, FeSiB και CoFeSiB, προσφέρουν εξαιρετική απόκριση σε μικρές μεταβολές του εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, πραγματοποιώντας μετρήσεις, με τη χρήση μαγνητομέτρων, για την εύρεση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της διάταξης, είναι δυνατή η επίτευξη της εξάλειψής του, μέσω της χρήσης κατάλληλων πηνίων και μέσω της ανάπτυξης των απαιτούμενων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων προσαρμοστικού ελέγχου για την τροφοδότησή τους. Η προαναφερθείσα μέθοδος προσφέρει ακρίβεια της τάξης του $1pT/Hz^{-1/2}$, μπορεί να προσαρμοστεί αναλόγως της κάθε εφαρμογής και έχει χαμηλό κόστος.

Λέξεις-Κλειδιά: Διακρίβωση Μαγνητομέτρων, Μαγνητικοί αισθητήρες, Μαγνητόμετρα, Άμορφα μαγνητικά υλικά, Πηνία Helmholtz.

Abstract

The process of magnetometer calibration is necessary in order to ensure their proper and reliable operation. To achieve this, it is required to eliminate the existing magnetic field from the site where the measurements are carried out. As a result, it is necessary to use active or passive magnetic shielding methods. Passive magnetic shielding is expensive, it requires special facilities and it does not always produce the desired results, especially in the case of the elimination of high frequency magnetic fields. On the other hand, active magnetic shielding is a more flexible solution, which can be adapted to the circumstances. In this case, the magnetometers that are mainly used for the measurement of the existing magnetic field are the SQUID sensors, which exhibit some disadvantages, regarding their geometry and their specific operating conditions. In this article, the development of a new

magnetic calibration device is proposed, based on the active shielding technique and the use of newly developed magnetometers, which can be able to serve as a primary standard calibration technique. The operation principle is based on the design and use of a high-precision magnetometer, which contains wires of amorphous magnetic materials as cores. These materials, such as CoSiB, FeSiB and CoFeSiB, offer excellent response to the small changes of the externally imposed magnetic field. Therefore, by conducting measurements using the magnetometers, in order to measure the existing magnetic field, it is possible to achieve its elimination, through the use of pairs of the appropriate coils and by developing the required adaptive control electronic circuits, in order to provide the electrical current to the coils. This method offers an accuracy of $1pT/Hz^{-1/2}$. Moreover, it can be adjusted accordingly to each application and it has low cost.

Keywords: Magnetometer calibration, Magnetic sensors, Magnetometers, Amorphous magnetic materials, Helmholtz coils.

1. Εισαγωγή

Η χρήση των μαγνητομέτρων είναι απαραίτητη σε πολλές εφαρμογές. Αυτές καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος, που περιλαμβάνει τις Επιστήμες, τις μεταφορές, τη βιομηχανία και την ασφάλεια. Τα χρησιμοποιούμενα μαγνητόμετρα πρέπει να λειτουργούν προσφέροντας την επιθυμητή ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Συνεπώς, πρέπει να εκτελούνται διεργασίες συντήρησης και διακρίβωσης των μαγνητομέτρων. Αυτές απαιτούν την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού και τη χρήση ειδικών διατάξεων. Ο χώρος της διεξαγωγής των μετρήσεων και της διακρίβωσης πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένος και να δημιουργεί τις απαιτούμενες ειδικές συνθήκες. Εκτός από τα παραπάνω, οι υπάρχουσες διατάξεις είναι συχνά ογκώδεις και προσφέρουν δυνατότητες μέτρησης σε ένα περιορισμένο εύρος μαγνητομέτρων, ενώ και το κόστος τους κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα.

Ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τις διατάξεις διακρίβωσης είναι, φυσικά, το υπάρχον εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η εξάλειψη αυτού του πεδίου γίνεται εφικτή μέσω της χρήσης ενεργητικής ή παθητικής μαγνητικής θωράκισης. Η παθητική μαγνητική θωράκιση περιλαμβάνει τη χρήση ειδικά διαμορφωμένων χώρων, μακριά από την επίδραση των επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων, οι οποίοι έχουν επενδυθεί με μεταλλικά φύλλα. Το είδος και οι ιδιότητες του υλικού, καθώς και η γεωμετρία του επηρεάζουν την απόδοση της μαγνητικής θωράκισης. Συνεπώς, αυτή η λύση είναι δαπανηρή και δεν διασφαλίζει την πλήρη εξάλειψη όλων των συχνοτήτων (Kelha et al. 1982, Harakawa et al. 1996, Tashiro and Sassada 2005). Τα καλύτερα επίπεδα μαγνητικής θωράκισης που έχουν επιτευχθεί φθάνουν στην εξάλειψη μαγνητικών πεδίων εντάσεως 0.5 nT (Knappe-Grueneberg et al. 2008). Η ενεργητική μαγνητική θωράκιση αποτελεί την εναλλακτική λύση. Η λειτουργία της βασίζεται στη δυναμική δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης, το οποίο έχει ως σκοπό την εξουδετέρωση των μαγνητικών πεδίων που βρίσκονται εξωτερικά της περιοχής όπου διεξάγονται οι μετρήσεις.

Μια συνήθης διάταξη ενεργητικής μαγνητικής θωράκισης περιλαμβάνει τη χρήση μαγνητομέτρων, πηνίων αντιστάθμισης και των απαραίτητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Τα μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που βρίσκεται στην περιοχή όπου θα διεξαχθούν οι εργασίες διακρίβωσης των υπό εξέταση μαγνητομέτρων. Τα μαγνητόμετρα SQUID είναι αυτά που χρησιμοποιούνται

συνήθως για αυτόν το σκοπό (Tinkham 1996, Müller et al. 1997, Nakashima et al. 2010). Βασιζόμενα στο φαινόμενο Josephson, μπορούν να προσεφέρουν υψηλή ακρίβεια κατά τις μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Όμως, η λειτουργία τους προϋποθέτει την ύπαρξη συστήματος ψύξης ηλίου ή αζώτου, κάτι που δυσχεραίνει τη χρήση τους και αυξάνει το κόστος τους. Επίσης, η γεωμετρία τους και κυρίως οι μικρές τους διαστάσεις αυξάνουν την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και οδηγούν στη δημιουργία μεγαλύτερων σφαλμάτων, λόγω της δυσκολίας ευθυγράμμισής τους στην απαιτούμενη κατεύθυνση.

Η αντιστάθμιση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου είναι το δεύτερο σημαντικό στοιχείο μιας διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων. Η συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της εξάλειψης του μαγνητικού πεδίου μέσω της αντιστάθμισής του είναι η χρήση ζευγών πηνίων Helmholtz (Okazaki et al. 2002, Razmkhah et al. 2011). Το κάθε ζεύγος πηνίων Helmholtz αποτελείται από δύο πηνία αντιδιαμετρικώς τοποθετημένα. Το χαρακτηριστικό αυτών είναι ότι η μεταξύ τους απόσταση είναι ίση με την ακτίνα τους, ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία ενός ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου στο χώρο που υπάρχει ανάμεσά τους. Συνεπώς, η τοποθέτηση τριών τέτοιων ζευγών πηνίων Helmholtz έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των μαγνητικών πεδίων και στις τρεις διαστάσεις. Αυτό προϋποθέτει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος με ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο, για την τροφοδοσία των πηνίων. Οπότε, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που θα επιτρέπουν τον έλεγχο του μαγνητικού πεδίου και την προσαρμογή της τροφοδοσίας των πηνίων.

Οι διατάξεις με τα παραπάνω χαρακτηριστικά προσφέρουν το πλεονέκτημα της ακρίβειας κατά τη διακρίβωση των μαγνητομέτρων, αλλά εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα, όπως είναι το μικρό εύρος επιλογών σε διαστάσεις, το υψηλό τους κόστος και η απαίτηση για ειδικές συνθήκες λειτουργίας.

2. Μεθοδολογία

Η διάταξη που προτείνεται στο συγκεκριμένο άρθρο περιλαμβάνει τη χρήση μαγνητομέτρων, ζευγών πηνίων Helmholtz και των απαραίτητων ηλεκτρονικών για τη λειτουργία και την τροφοδότηση των προαναφερθέντων στοιχείων.

2.1 Ανάπτυξη μαγνητομέτρων

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή της διάταξης είναι η ανάπτυξη μαγνητομέτρων, τα οποία θα είναι ικανά να ανιχνεύσουν και να μετρήσουν το υπάρχον μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της διάταξης διακρίβωσης. Γι’ αυτόν το σκοπό, είναι απαραίτητη η σχεδίαση και η ανάπτυξη των μαγνητικών αισθητήρων, αναλόγως της επιθυμητής ακρίβειας.

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

Από την άλλη πλευρά, αισθητήρες διαφορετικών τύπων, όπως είναι οι αισθητήρες Fluxgate, οι αισθητήρες GMI και οι αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο “Domain wall nucleation & propagation” μπορούν να κατασκευασθούν έχοντας τις επιθυμητές

διαστάσεις και να αποκτήσουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ακρίβειας και ελάττωσης του σφάλματος. Σε αυτό συμβάλλει και η επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως πυρήνας των αναπτυχθέντων μαγνητομέτρων. Για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης διάταξης διακρίβωσης, μια καλή επιλογή των υλικών του πυρήνα είναι τα άμορφα μαλακά μαγνητικά υλικά με τη μορφή συρμάτων. Συνήθη τέτοια υλικά είναι τα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB. Συχνά, αυτά τα υλικά συχνά επενδύονται με μια υαλώδη επίστρωση, που έχει ως σκοπό να αυξήσει τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Οι αισθητήρες Fluxgate αποτελούν μια συνήθη επιλογή για εφαρμογές μαγνητομετρίας. Η ακρίβεια αυτών των αισθητήρων κυμαίνεται από 0.1 έως 10 nT, ενώ χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μαγνητικών πεδίων στο εύρος 0.01 έως 1 mT (Ripka 2000). Η σχεδίαση και ο τρόπος κατασκευής αυτών των αισθητήρων εξαρτάται από την επιθυμητή χρήση. Ο πυρήνας έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση του αισθητήρα. Για τη βέλτιστη δυνατή ευαισθησία, χρησιμοποιούνται ως πυρήνες άμορφα μαγνητικά σύρματα, κατασκευασμένα συνήθως από CoSiB, FeSiB και CoFeSiB (Benyosef et al. 2008).

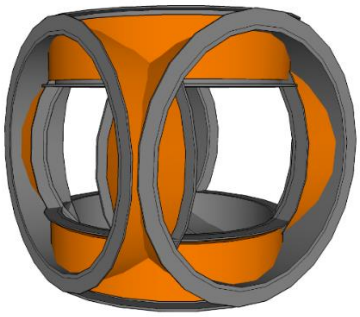
Οι αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο της γιγαντιαίας μαγνητοεμπέδησης (Giant Magneto-Impedance – GMI) παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση, χωρίς όμως να έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές. Η γιγαντιαία μαγνητοεμπέδηση σχετίζεται με τη ραγδαία αλλαγή της ηλεκτρικής εμπέδησης μαλακών φερρομαγνητικών υλικών, λόγω της επίδρασης ενός μαγνητικού πεδίου. Τα φερρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν, συνήθως, μορφή συρμάτων ή υμενίων. Τυπικά υλικά που επιλέγονται και γι' αυτούς τους αισθητήρες είναι τα CoSiB, FeSiB, CoFeSiB, NiFe και τα Mumetals. Η γεωμετρία αυτών επηρεάζει και την ευαισθησία του αισθητήρα, λόγω της αλλαγής που προκαλείται στο βάθος διείσδυσης, το οποίο αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για το συγκεκριμένο τύπο μαγνητικών αισθητήρων. Οι εφαρμογές των αισθητήρων GMI περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη μέτρηση ρεύματος, γωνιακής ταχύτητας και δύναμης (Jantaratana and Sirisathitkul 2008). Η ευαισθησία τους μπορεί να φτάσει και τα 0.3 nT, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασία δωματίου, παρουσιάζοντας χαμηλή κατανάλωση (Chang et al. 2012).

Οι αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο "Domain wall nucleation and propagation", δηλαδή στην πυρήνωση και μετάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων ενός μαγνητικού υλικού, χρησιμοποιούνται, επίσης, σε διάφορες εφαρμογές μέτρησης φυσικών μεγεθών και εντοπισμού μαγνητικών πεδίων. Το σημαντικότερο ρόλο και στους αισθητήρες αυτού του τύπου έχει το υλικό του πυρήνα, στο οποίο στηρίζεται και η λειτουργία τους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι και σε αυτήν την περίπτωση, τα άμορφα σύρματα FeSiB, CoSiB και CoFeSiB. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες προσφέρουν υψηλή ευαισθησία, με χαμηλό κόστος (Hristoforou and Niarchos 1992, Chiriac et al. 2001).

2.2 Ανάπτυξη διάταξης διακρίβωσης

Τα ζεύγη των πηνίων Helmholtz αποτελούν το κύριο στοιχείο της διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων, καθώς είναι υπεύθυνα για την εξάλειψη του μαγνητικού πεδίου από το εσωτερικό της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, τα ζεύγη πηνίων Helmholtz αποτελούνται από δύο σωληνοειδή πηνία αντιδιαμετρικώς τοποθετημένα, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση ισούται με την ακτίνα τους. Με τη χρήση των πηνίων Helmholtz είναι δυνατός ο μηδενισμός του μαγνητικού πεδίου στο χώρο που αυτά περικλείουν. Συνεπώς, η χρήση τριών ζευγών πηνίων Helmholtz, τα οποία είναι ανά δύο κάθετα μεταξύ τους, μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη του μαγνητικού πεδίου και στις τρεις διαστάσεις, προσφέροντας,

με αυτόν τον τρόπο, έναν τριδιάστατο χώρο στον οποίο δεν θα επιδρά το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 1: Ζεύγη πηνίων Helmholtz για εξάλειψη του μαγνητικού πεδίου σε τρεις διαστάσεις.

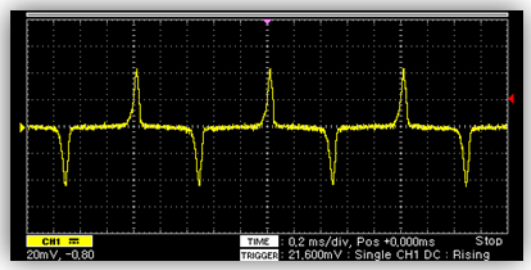
Τα πηνία Helmholtz χρειάζονται την κατάλληλη τροφοδότησή τους με ηλεκτρικό ρεύμα, ώστε να είναι ικανά να παράγουν το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο αντιστάθμισης, το οποίο θα μηδενίσει το εξωτερικώς επιβαλλόμενο και ανεπιθύμητο μαγνητικό πεδίο. Το ηλεκτρικό ρεύμα παρέχεται μέσω ενός συστήματος τροφοδότησης ακριβείας. Επίσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος ηλεκτρονικών για τον προσαρμοστικό έλεγχο της τροφοδότησης των πηνίων και συνεπώς, τη ρύθμιση του μαγνητικού πεδίου που θα δημιουργείται και θα αντισταθμίζει το υπάρχον. Ο προσαρμοστικός έλεγχος περιλαμβάνει την αλλαγή της έντασης του παρεχόμενου ρεύματος σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό την κατάλληλη ρύθμιση του παραγόμενου πεδίου. Το μαγνητόμετρο που υπάρχει στο εσωτερικό της διάταξης προσφέρει τα απαραίτητα δεδομένα για το μέγεθος του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου. Αυτή η πληροφορία αποτελεί την ανατροφοδότηση του συστήματος προσαρμοστικού ελέγχου, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στην ένταση του ρεύματος που παρέχεται στα πηνία Helmholtz.

Το σύστημα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της διάταξης βασίζεται στα δεδομένα που προέρχονται από το πηνίο λήψης του χρησιμοποιούμενου μαγνητομέτρου. Πιο συγκεκριμένα, ο πυρήνας του πηνίου, που είναι κατασκευασμένος από άμορφο μαγνητικό υλικό, φθάνει στον κορεσμό, όταν επιβάλλεται ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, με ένταση μεγαλύτερη από αυτή του πεδίου κορεσμού για το συγκεκριμένο υλικό. Λόγω του ότι πρόκειται για μαλακό μαγνητικό υλικό, κατά την απουσία επιβολής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το υλικό θα παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά κατά τη θετική και την αρνητική ημιπερίοδο του σήματος διέγερσης. Συνεπώς, τα σημεία στα οποία φθάνει σε κορεσμό, τα μέγιστα και τα ελάχιστα, δηλαδή, του λαμβανόμενου σήματος από το πηνίο λήψης του μαγνητομέτρου, θα ισαπέχουν ως προς τον άξονα του χρόνου.

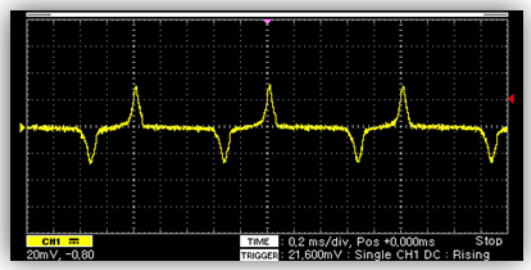
Αντιθέτως, κατά την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το υλικό του πυρήνα του μαγνητομέτρου θα εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά κατά τη θετική και αρνητική ημιπερίοδό του, διότι το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο θα επηρεάζει το σημείο κορεσμού του πυρήνα. Αντιστοίχως, τροποποιείται και το σήμα που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης του μαγνητομέτρου. Συγκεκριμένα, η απόσταση μεταξύ των μεγίστων και των ελαχίστων του σήματος θα έχει πλέον μεταβληθεί ως προς τον άξονα του χρόνου, αφού το υλικό του πυρήνα φθάνει ταχύτερα ή αργότερα στο σημείο του κορεσμού. Συνεπώς, η ύπαρξη ή μη ενός εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου ανάγεται στη μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ των κορυφών του σήματος που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης του μαγνητομέτρου.

Για τη μέτρηση αυτής της χρονικής διαφοράς απαιτείται ένας μετρητής ακριβείας, ο οποίος αποτελεί την πηγή δεδομένων για το ηλεκτρονικό κύκλωμα του προσαρμοστικού ελέγχου. Επίσης, για μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την εύρεση των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος, είναι απαραίτητη η προσθήκη ηλεκτρονικών φίλτρων και η ενίσχυση του σήματος.

Στα Σχήματα 2 και 3 εμφανίζεται το ληφθέν σήμα που προέκυψε, μέσω της χρήσης ενός αναπτυχθέντος μαγνητομέτρου τύπου Fluxgate με πυρήνα CoFeSiB.



Σχήμα 2: Σήμα αισθητήρα Fluxgate για μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 3: Σήμα αισθητήρα Fluxgate για εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Σε αυτά τα σχήματα, γίνεται εμφανής η μεταβολή του σήματος που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης κατά την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στο Σχήμα 2, τα μέγιστα και τα ελάχιστα του σήματος ισαπέχουν ως προς τον οριζόντιο άξονα του χρόνου. Αντιθέτως, στο Σχήμα 3, οι διαδοχικές κορυφές παύουν να ισαπέχουν. Η εύρεση της ακριβούς θέσης αυτών των κορυφών και η μέτρηση της μεταξύ τους χρονικής διαφοράς, οδηγεί στην εύρεση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, ο εκμηδενισμός αυτής της διαφοράς, μέσω της επιβολής ενός μαγνητικού πεδίου αντιστάθμισης, οδηγεί και στην εξάλειψη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

3. Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη μιας διάταξης διακρίβωσης προϋποθέτει την εξάλειψη των εξωτερικώς επιβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων από αυτήν. Για την αποφυγή χρήσης ειδικών εγκαταστάσεων που βασίζονται στην παθητική μαγνητική θωράκιση, κρίνεται αναγκαία η χρήση διατάξεων ενεργητικής μαγνητικής θωράκισης, οι οποίες εξαλείφουν με δυναμικό τρόπο τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία, ασκώντας ένα μαγνητικό πεδίο για την αντιστάθμισή τους.

Συνεπώς, η χρήση των διατάξεων διακρίβωσης προϋποθέτει την ανάπτυξη των κατάλληλων μαγνητομέτρων, τα οποία θα προσφέρουν την επιθυμητή ακρίβεια μέτρησης του μαγνητικού πεδίου. Με τη μέθοδο που αναλύεται στο παρόν άρθρο, επιτυγχάνεται η εξάλειψη των μαγνητικών πεδίων που υφίστανται στο χώρο εντός της διάταξης διακρίβωσης. Το βασικό στοιχείο μιας τέτοιας διάταξης είναι τα πηνία Helmholtz και η ύπαρξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων προσαρμοστικού ελέγχου για την τροφοδότηση των πηνίων με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Σαν αποτέλεσμα, χρησιμοποιώντας μια τέτοια διάταξη, είναι δυνατός ο εκμηδενισμός του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την ανάγκη κατασκευής ειδικών χώρων ή εξασφάλισης απαραίτητων συνθηκών, έχοντας ως συνέπεια την αύξηση της απόδοσης του συστήματος και τη μείωση του κόστους ανάπτυξης και λειτουργίας του.

4. Βιβλιογραφία

Chang H., Yang M., Liu J. and Yu Y., *"Highly Sensitive GMI Sensor with an Equivalent*

Chiriac H., Hristoforou E., Neagu M. and Darie I., "On the domain wall propagation in glass covered amorphous wires", Materials Science and Engineering, A304-306, p.p. 1011-3, 2001.

Harakawa K., Kajiwara G., Kazami K., Ogata H., Kado H., *"Evaluation of a high-performance magnetically shielded room for biomagnetic measurement"*, IEEE Transactions On Magnetics, 32, p.p. 5226-5229, 1996.

Hristoforou E. and Niarchos D., *"Mechanical Sensors Based on Re-Entrant Flux Reversal"*, IEEE Transactions On Magnetics, 28, p.p. 2190-2192, 1992.

Kelha V., Pukki, Peltonen R., Penttinen A., Ilmoniemi R. and Heino J., *"Design, construction, and performance of a large-volume magnetic shield"*, IEEE Transactions On Magnetics, 18, p.p. 260-269, 1982.

Knappe-Grüneberg S., Schnabel A., Wuebbeler G. and Burghoff M., *"Influence of demagnetization coil configuration on residual field in an extremely magnetically shielded room: Model and measurements",* Journal of Applied Physics, 103, p.p. 925-927, 2008.

L.C. Benyosef, G. Stael, M. Bochner, *"Optimization of the Magnetic Properties of Materials for Fluxgate Sensors"*, Materials Research, 11, p.p. 145-149, 2008.

Müller P., Ustinov A. V. and Schmidt V. V., *"The Physics of Superconductors: Introduction to Fundamentals and Applications"*, 1997, Springer – Verlag.

Nakashima Y., Suzuki Y., Sasada I., Shimada M. and Takeda T., *"Experimental Study of the Active Compensation to a Full-Size Separate-Shell Magnetic Shield"*, IEEE Transactions On Magnetics, 46, p.p. 2318-2321, 2010.

Noise 0.3 nT", 2012 Spring Congress on Engineering and Technology (S-CET), p.p. 1-4, 2012.

Okazaki Y., Yanase S. and Sugimoto N., *"Active magnetic shielding with magneto-impedance sensor"*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 13, p.p. 437-440, 2002.

P. Jantaratana and C. Sirisathitkul, *"Low-cost Sensors Based on the GMI Effect in Recycled Transformer Cores"*, Sensors, 8, p.p. 1575-1584, 2008.

Polyakov Y., Semenov V. and Tolpygo S., *"3D active demagnetization of cold magnetic shields"*, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, 21, p.p. 724-727, 2011.

Razmkhah S., Eshraghi M.J., Forooghi F., Sarreshtedari F., Fardmanesh M., *"Fundamental mode fluxgate magnetometers for active magnetic shielding"*, Electrical Engineering ICEE, 2011.

Ripka P., *"New directions in fluxgate sensors"*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215/216, p.p. 735-739, 2000.

Tashiro K. and Sasada I., *"A low-cost magnetic shield consisting of nonoriented silicon steel"*, IEEE Transactions On Magnetics, 41, p.p. 4081-4083, 2005.

Tinkham M., *"Introduction to superconductivity"*, 2nd ed., 1996, McGraw-Hill.