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 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, προσφέρουν δυνατότητες μέτρησης σε ένα περιορισμένο εύρος μαγνητομέτρων, ενώ και το κόστος τους κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Για τους παραπάνω λόγους, προτείνεται η ανάπτυξη μιας διάταξης διακρίβωσης μαγνητομέτρων, η οποία βασίζεται στην ενεργητική μαγνητική θωράκιση. Η συγκεκριμένη διάταξη προσφέρει υψηλή ευαισθησία κατά τη λήψη των μετρήσεων, κάτι που οφείλεται στην ανάπτυξη νέων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μεγάλης ακριβείας, καθώς και στη χρήση μαγνητομέτρων που βασίζονται σε άμορφα μαγνητικά υλικά. Η πραγματοποίηση των μετρήσεων με χρήση των προαναφερθέντων, σε συνδυασμό με την κατασκευή σωληνοειδών και πηνίων Helmholtz, είναι ικανή να προσφέρει ακρίβεια της τάξης του 1pT/Hz-1/2, διατηρώντας, ταυτόχρονα, τον όγκο της διάταξης, αλλά και το συνολικό κόστος της, σε χαμηλά επίπεδα.

Λέξεις-Κλειδιά: Διακρίβωση Μαγνητομέτρων, Μαγνητόμετρα, Ηλεκτρονικά κυκλώματα, Άμορφα μαγνητικά υλικά, Σωληνοειδή.

Abstract

The use of magnetometers is essential in many applications. They cover a wide range, including Science, Transport, Industry and Security. The magnetometers that are in use, must operate properly, offering the desired precision and repeatability of the measurements. Consequently, maintenance and calibration processes of magnetometers must be performed. These require the existence of the appropriate equipment and the use of special devices. The area of measurement and calibration shall be suitably configured to create the required specific conditions. In addition to the above, existing devices are often bulky, they offer measurement capabilities of a limited range of magnetometers, and their cost is high. For those reasons, it is proposed to develop a magnetometer calibration device based on active magnetic shielding. This device provides high sensitivity when conducting measurements, due to the development of new, high precision electronic circuits, as well as to the use of magnetometers based on amorphous magnetic materials. The completion of the measurements using the above mentioned, combined with the construction of solenoids and Helmholtz coils, is capable of providing accuracy of $1pT/Hz^{-1/2}$ while maintaining the volume of the device, as well as its total cost, at low levels.

Keywords: Magnetometer calibration, Magnetometers, Electronic circuits, Amorphous magnetic materials, Solenoids.

1. Εισαγωγή

Η διακρίβωση των μαγνητομέτρων αποτελεί μια απαραίτητη διαδικασία, η οποία πρέπει να συντελείται τόσο στα νέα μαγνητόμετρα, όσο και στα υφιστάμενα. Αναλόγως του τύπου του μαγνητομέτρου, των απαιτούμενων χαρακτηριστικών ευαισθησίας και του περιβάλλοντος διεξαγωγής των μετρήσεων, διαφέρει και η διαδικασία που ακολουθείται για την επίτευξη της διακρίβωσης. Για τον σκοπό αυτό, απαιτείται ο μηδενισμός του εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο μαγνητόμετρο, κατά τη διαδικασία της διακρίβωσης. Αυτό είναι εφικτό μέσω της χρήσης των τεχνικών μαγνητικής θωράκισης του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων. Η μαγνητική θωράκιση μπορεί να είναι παθητική ή ενεργητική. Στην πρώτη περίπτωση, ο μαγνητικός θόρυβος περιορίζεται μέσω της προσθήκης καταλλήλων υλικών υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, τα οποία μπορούν να αποτρέψουν σε επιθυμητό βαθμό τις τυχόν παρεμβολές. Αυτή η μέθοδος, όμως μπορεί να έχει μεγάλο κόστος, αναλόγως του χώρου που απαιτείται να καλυφθεί. Επίσης, δεν κρίνεται αποτελεσματική στις περιπτώσεις των πολύ χαμηλών συχνοτήτων (Harakawa et al. 1996; Kelha et al. 1982; Knappe-Grueneberg et al. 2008; Sergeant, Dupre, and Melkebeek 2005). Αντίθετα, η ενεργητική μαγνητική θωράκιση μπορεί να μειώσει, ανάλογα με τις απαιτήσεις, σε ικανοποιητικό βαθμό τις μαγνητικές παρεμβολές στις τρεις κατευθύνσεις του χώρου στον οποίο διεξάγονται οι μετρήσεις. Ως τεχνική, βασίζεται στη χρήση σωληνοειδών ή πηνίων Helmholtz, τα οποία μπορούν να αντισταθμίσουν την επιβολή των εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, δημιουργώντας αντίθετα πεδία (Caminiti et al. 2013; Formisano, Lupoli, and Martone 2010; Elrefai and Sasada 2016; Sergeant and Dupre 2006).

Το επόμενο σημαντικό στοιχείο αποτελεί η επιλογή των μαγνητομέτρων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διακρίβωση. Ο αισθητήρας τύπου SQUID αποτελεί μια συνήθη επιλογή για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται υψηλή ευαισθησία (Shanehsazzadeh and Fardmanesh 2018; Carmina and Octavian 2012; Jahed et al. 2010; Kobayashi, Murakami, and Oyama 2015). Όμως, η λειτουργία του προϋποθέτει τη διαμόρφωση χώρου, στον οποίο θα υπάρχουν συστήματα ψύξης, κατάλληλα ώστε να επιτευχθούν θερμοκρασιακές συνθήκες υπεραγωγιμότητας. Ένας άλλος διαδομένος τύπος μαγνητομέτρου, ο οποίος προσφέρει αρκετά υψηλή ευαισθησία, διατηρώντας, ταυτόχρονα, την φορητότητά του, είναι ο αισθητήρας Fluxgate (Benyosef, Stael, and Bochner 2008; Butta, Yamashita, and Sasada 2011; Ripka 2000; Sasada and Usui 2005).

2. Μεθοδολογία

2.1 Ανάπτυξη αισθητήρα Fluxgate

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας τύπου Fluxgate, μήκους 7cm. Αποτελείται από ένα πηνίο διέγερσης (2 στρώσεων των 550 περιελίξεων,

σύρματος χαλκού Ø0.1mm) και ένα πηνίο λήψης με τα ίδια χαρακτηριστικά. Ως πυρήνας, χρησιμοποιήθηκε άμορφο σύρμα CoFeSiB, διαμέτρου 101μm.

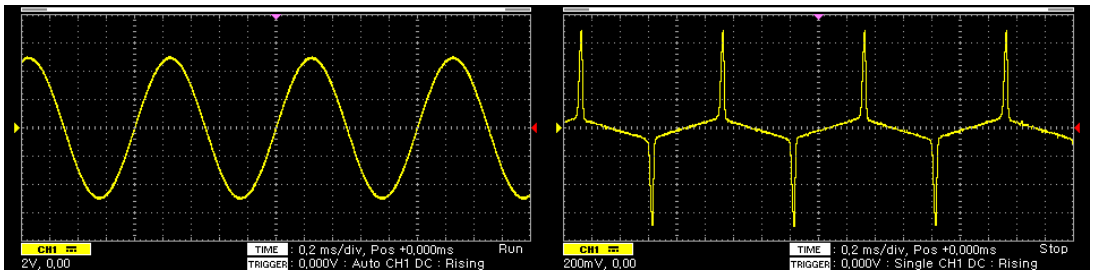
Σχήμα 1: Ο αισθητήρας Fluxgate.

Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου βάσει αυτής της διάταξης στηρίζεται στη μέτρηση της χρονικής μεταβολής Δt μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου. Τροφοδοτώντας το πρωτεύον πηνίο με κατάλληλο σήμα (π.χ. ημιτονοειδές, συχνότητας 1kHz και πλάτους 5Vpp), ο μαγνητικός πυρήνας του αισθητήρα οδηγείται σε κορεσμό. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα να φθάσει στην τιμή μαγνήτισης κορεσμού. Το σήμα που προκύπτει από το δευτερεύον πηνίο είναι ανάλογο της πρώτης παραγώγου της μαγνητικής επαγωγής B ως προς τον χρόνο, δηλαδή Vout≈dB/dt. Επομένως, τα μέγιστα και τα ελάχιστα αυτού του σήματος αντιστοιχούν στις εναλλαγές μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής μαγνήτισης του πυρήνα.

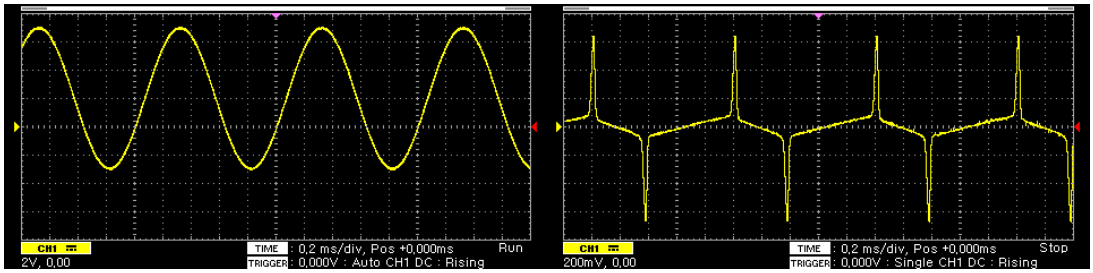
Κατά την απουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, ο μαγνητικός πυρήνας φθάνει στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές μαγνήτισης σε ίσα χρονικά διαστήματα, αφού επηρεάζεται μόνο από το εναλλασσόμενο σήμα που τροφοδοτεί το πρωτεύον πηνίο. Συνεπώς, η χρονική μεταβολή Δt, μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων είναι μηδενική. Αντίθετα, η επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου που θα επιδρά στον μαγνητικό πυρήνα ταυτόχρονα με το σήμα διέγερσης, θα οδηγήσει πιο γρήγορα ή πιο αργά (αναλόγως της φοράς αυτού του πεδίου) τον μαγνητικό πυρήνα σε κορεσμό. Αυτό, θα έχει ως αποτέλεσμα να μεταβληθεί και η χρονική διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου, η οποία πλέον θα είναι διάφορη του μηδενός.

Επομένως, διεξάγοντας την κατάλληλη βαθμονόμηση, είναι δυνατή η συσχέτιση της χρονικής διαφοράς των μεγίστων και ελαχίστων του σήματος εξόδου με το μέτρο και την κατεύθυνση του άγνωστου εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

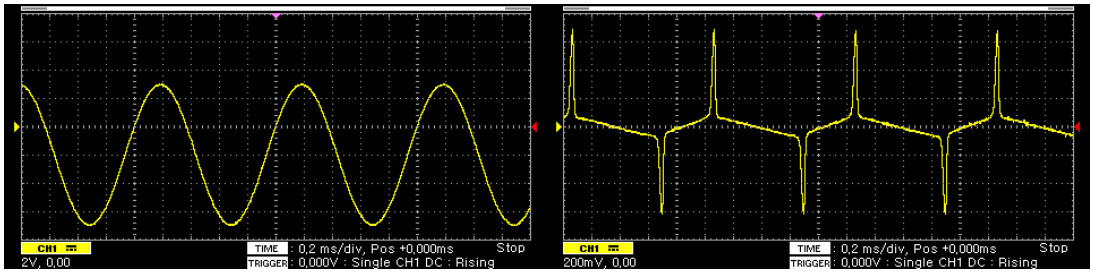
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το σήμα του αισθητήρα fluxgate κατά την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η επιβολή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οδηγεί στη μετατόπιση, δηλαδή στη χρονική διαφορά, μεταξύ των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος.



Σχήμα 2: Σήμα αισθητήρα Fluxgate για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης πλάτους 5Vpp και συχνότητας 1kHz.



Σχήμα 3: Σήμα αισθητήρα Fluxgate για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης πλάτους 5Vpp και συχνότητας 1kHz με DC Offset +1V.



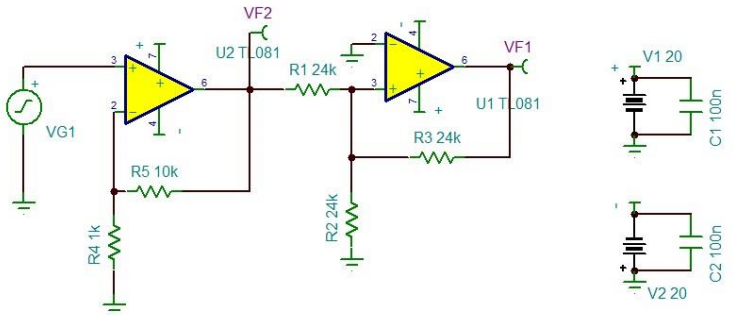
Σχήμα 4: Σήμα αισθητήρα Fluxgate για ημιτονοειδές σήμα διέγερσης πλάτους 5Vpp και συχνότητας 1kHz με DC Offset -1V.

2.2 Ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών

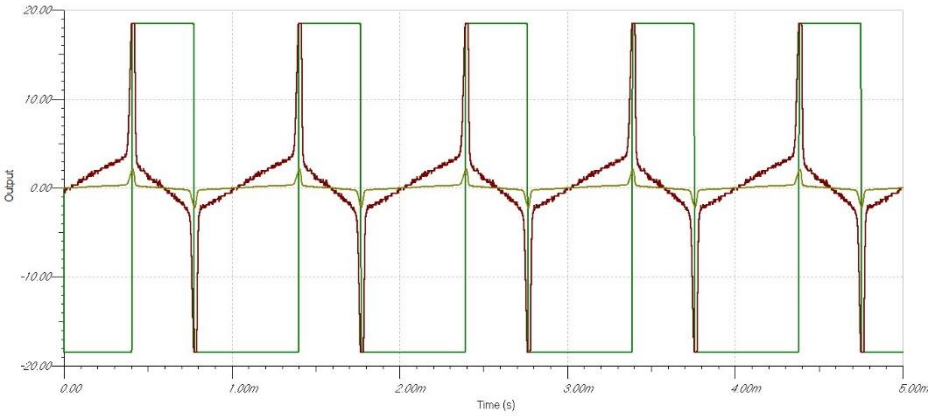
Η μέτρηση της προαναφερθείσας χρονικής διαφοράς μπορεί να γίνει πιο εύκολη εάν αναχθεί σε μέτρηση πλάτους παλμών. Γι' αυτόν τον σκοπό, υλοποιήθηκε ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης των κορυφών και μετατροπής τους σε θετικούς και αρνητικούς παλμούς.

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα βασίστηκε στην τοπολογία Schmitt trigger. Για τη σχεδίαση και προσομοίωση του ηλεκτρονικού κυκλώματος, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό τύπου SPICE, TINA-TI της Texas Instruments.

Για τη δημιουργία του σήματος εισόδου του κυκλώματος, δηλαδή του σήματος που προέρχεται από το πηνίο λήψης του αισθητήρα Fluxgate, εισήχθησαν πραγματικές τιμές που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις με τον συγκεκριμένο αισθητήρα.



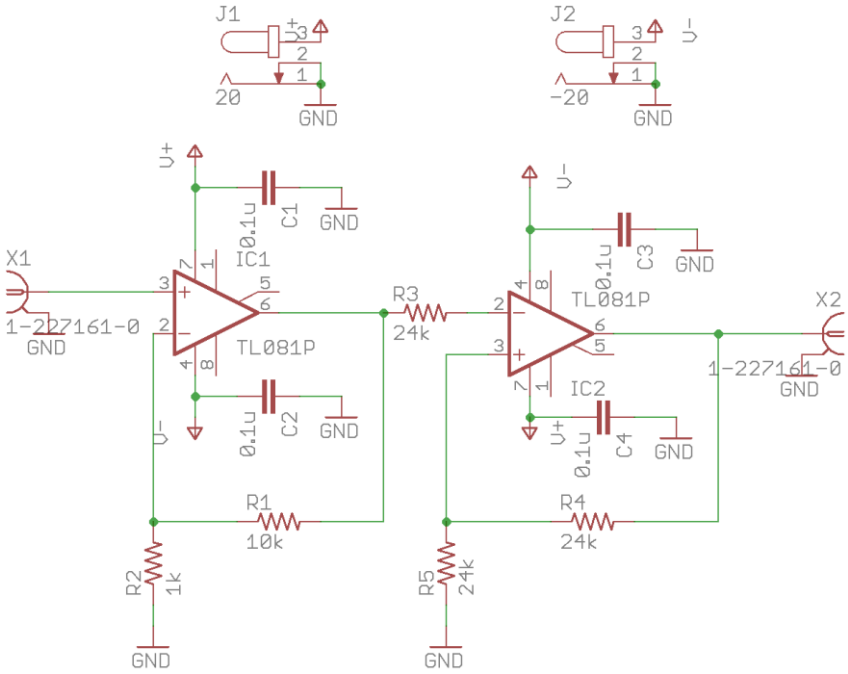
Σχήμα 5: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών και παραγωγής αντίστοιχων παλμών.



Σχήμα 6: Αποτέλεσμα προσομοίωσης - Σήμα εισόδου (κόκκινο χρώμα) και εξόδου (πράσινο χρώμα).

2.3 Σχεδίαση πλακέτας ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης

Για τη σχεδίαση της πλακέτας του ηλεκτρονικού κυκλώματος μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Autodesk Eagle. Το σχέδιο του κυκλώματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7: Σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος στο Eagle.

Για την είσοδο και έξοδο του σήματος, επελέγησαν υποδοχές τύπου BNC, ώστε η σύνδεση με τις υπόλοιπες συσκευές να γίνει με χρήση ομοαξονικού καλωδίου. Τέλος, για την τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκαν υποδοχές 2.1mm, οι οποίες συναντώνται ευρέως στα τροφοδοτικά.

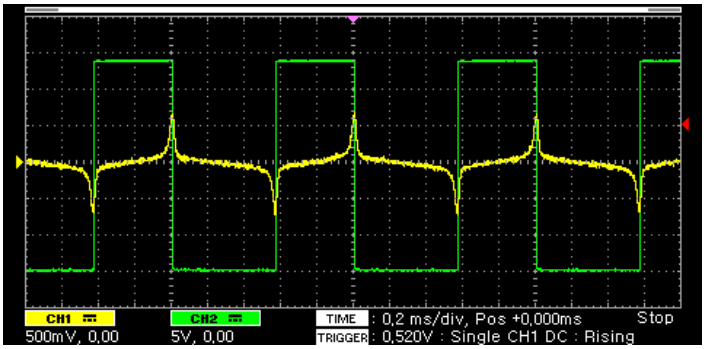
Τέλος, κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων του Ε.Μ.Π. η πλακέτα, στην οποία τοποθετήθηκαν καταλλήλως όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και οι υποδοχές.

3. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

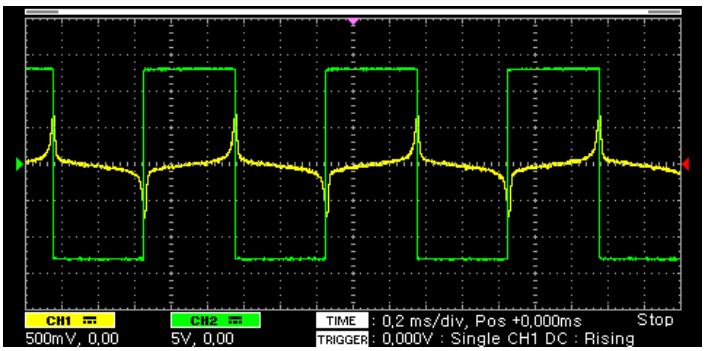
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων: Μία γεννήτρια συχνοτήτων παρείχε το κατάλληλο σήμα διέγερσης στο πρωτεύον πηνίο του αισθητήρα Fluxgate (ημιτονοειδές, 1V, 1kHz). Η οδήγηση του μαγνητικού πυρήνα σε τιμές θετικού και αρνητικού μαγνητικού κορεσμού δημιουργεί το προαναφερθέν σήμα εξόδου, το οποίο λαμβάνεται από το δευτερεύον πηνίο του αισθητήρα. Αυτό το σήμα οδηγείται στην κατασκευασμένη πλακέτα μέτρησης, η οποία παράγει τους αντίστοιχους παλμούς. Τέλος, για τη μέτρηση του πλάτους των παλμών, χρησιμοποιήθηκε ένα Arduino, με κατάλληλο κώδικα που αναπτύχθηκε για την μετατροπή σε τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου.

Σχήμα 8: Συνολική διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων.

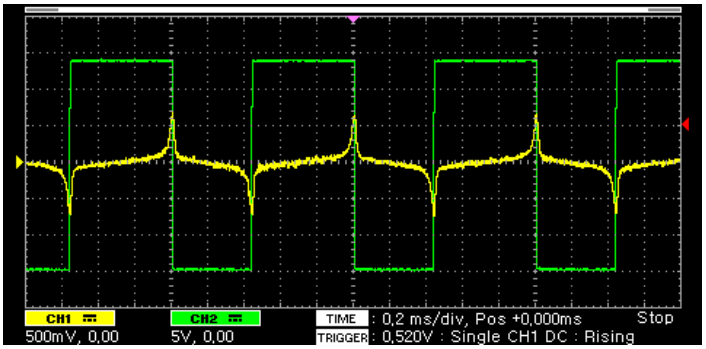
Κάποιες από τις μετρήσεις, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 9: Σήμα εξόδου αισθητήρα Fluxgate (κίτρινο χρώμα) και σήμα κυκλώματος μέτρησης (πράσινο χρώμα) για DC offset -500mV.



Σχήμα 10: Σήμα εξόδου αισθητήρα Fluxgate (κίτρινο χρώμα) και σήμα κυκλώματος μέτρησης (πράσινο χρώμα) για DC offset 0V.



Σχήμα 11: Σήμα εξόδου αισθητήρα Fluxgate (κίτρινο χρώμα) και σήμα κυκλώματος μέτρησης (πράσινο χρώμα) για DC offset +500mV.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι είναι εφικτή η κατασκευή μιας διάταξης μέτρησης του μαγνητικού πεδίου που βασίζεται στη χρονική μετατόπιση των διαδοχικών μεγίστων και ελαχίστων του σήματος που λαμβάνεται από ένα μαγνητόμετρο τύπου Fluxgate. Η μετατροπή του υπό μέτρηση σήματος σε παλμούς διευκολύνει σε σημαντικό βαθμό τη μέτρηση, αφού πλέον αυτή ανάγεται σε μέτρηση πλάτους παλμών. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που απαιτείται είναι εύκολα υλοποιήσιμο και έχει χαμηλό κόστος. Μπορεί να εντοπίζει τα μέγιστα και ελάχιστα με ικανοποιητικό slew rate και να παράγει τους αντίστοιχους παλμούς. Ο συνδυασμός μίας τέτοιας διάταξης με ένα σύστημα παραγωγής μαγνητικού πεδίου, αποτελούμενο από κατάλληλα πηνία Helmholtz, μπορεί να αποτελέσει μία πλήρη διάταξη διακρίβωσης, η οποία θα είναι ικανή, τόσο να μετρά το υπάρχον μαγνητικό πεδίο στους τρεις άξονες, όσο και να το αντισταθμίζει άμεσα και με ακρίβεια.

4. Βιβλιογραφία

Benyosef L., Chaves Stael G. and Bochner M., "*Optimization of the Magnetic Properties of Materials for Fluxgate Sensors*", Materials Research, 11 (2): 145–49, 2008.

Butta M., Yamashita S. and Sasada I., "*Reduction of Noise in Fundamental Mode Orthogonal Fluxgates by Optimization of Excitation Current*" IEEE Transactions on Magnetics 47 (10): 3748–51, 2011.

Caminiti I., Formisano A., Lupoli M. and Martone R., "*A New Approach to Design Flexible Magnetic Active Shielding*", IEEE Transactions on Magnetics 49 (2): 791–94, 2013.

Carmina R. and Octavian B., "*First-Order SQUID Gradiometer with Electronic Subtraction for Magnetocardiography*", 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 577–80, 2012.
Elrefai, A. L. and Sasada I. "*Magnetic Particle Detection System Using Fluxgate Gradiometer on a Permalloy Shielding Disk*", IEEE Magnetics Letters 7: 1–4, 2016.
Formisano, A., Lupoli M. C. and Martone R., "*Flexible Measures in Magnetic Active Shielding*", Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 1–1, 2010.
Harakawa, K., Kajiwara G., Kazami K., Ogata H. and Kado H., "*Evaluation of a High Performance Magnetically Shielded Room for Biomagnetic Measurement*" IEEE Transactions on Magnetics 32 (6): 5256–60, 1996.
Jahed, N., Sarreshtedari F., Forooghi F., Fardmanesh M., Schubert J. and Banzet M., "*Comparison of Noise Reduction Techniques in RF SQUID Magnetic Detection Systems*", 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, 446–49, 2010.
Kelha, V., Pukki J., Peltonen R., Penttinen A., Ilmoniemi R. and Heino J., "*Design, Construction, and Performance of a Large-Volume Magnetic Shield*", IEEE Transactions on Magnetics 18 (1): 260–70, 1982
Grueneberg K, 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 (7): 07E925, 2008.
Kobayashi, K., Murakami T. and Oyama D., *"Wide Dynamic Range SQUID Magnetometer with Noise Cancellation for Magnetocardiogram without Magnetically Shielded Room",* 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG), 1–1, 2015.
Ripka, P., "*New Directions in Fluxgate Sensors*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215–216 (June): 735–39, 2000.
Sasada, I. and Usui T., "*A High Performance Orthogonal Fluxgate Magnetometer Based on the Fundamental Mode of Operation*", INTERMAG Asia 2005. Digests of the IEEE International Magnetics Conference, 2005, 969–70, 2005.
Sergeant, P. and Dupre L., "*Software Control of an Active Magnetic Shield*" IEEE Proceedings - Science, Measurement and Technology 153 (1): 13–21, 2006.
Sergeant P., Dupre L. and Melkebeek J., "*Active and Passive Magnetic Shielding for Stray Field Reduction of an Induction Heater with Axial Flux*" IEEE Proceedings - Electric Power Applications 152 (5): 1359–64, 2005.
Shanehsazzadeh, F. and Fardmanesh M., "*Low Noise Active Shield for SQUID-Based Magnetocardiography Systems*" IEEE Transactions on Applied Superconductivity 28 (4): 1–5, 2018.