



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών

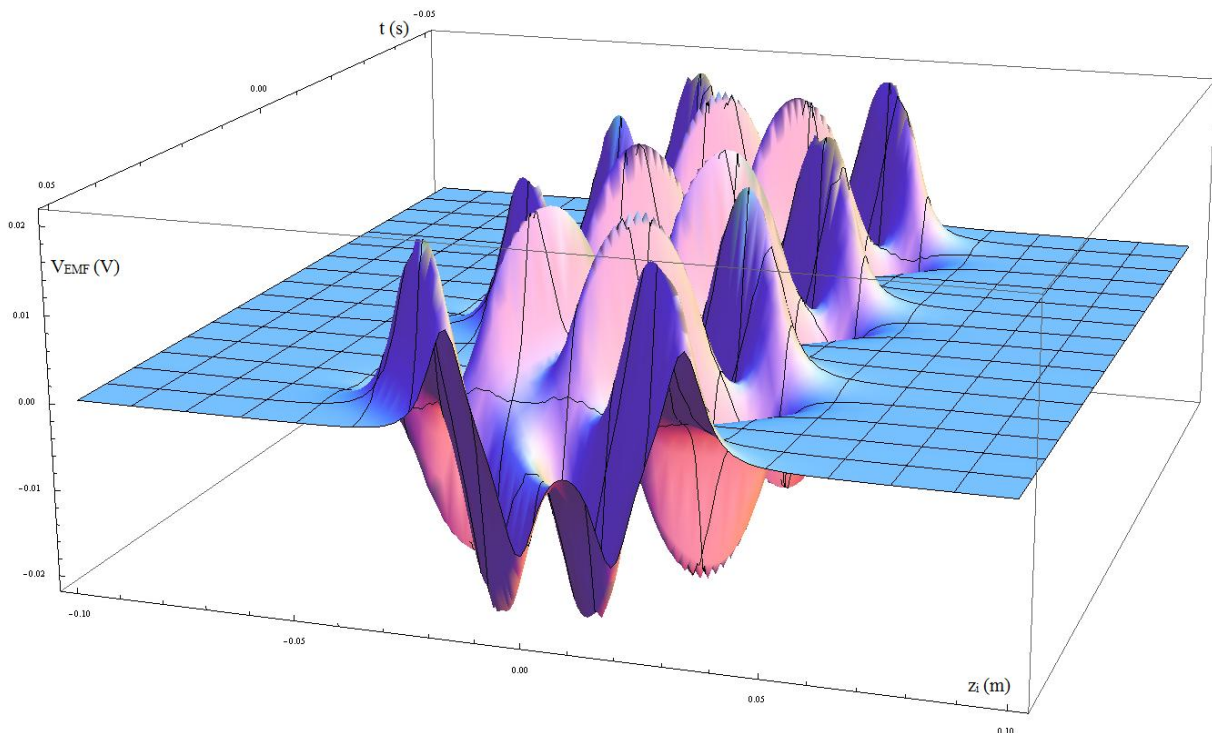
Εθνικό Κέντρο Έρευνας
Φυσικών Επιστημών
ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

Ινστιτούτο Προηγμένων Υλικών,
Φυσικοχημικών Διεργασιών,
Νανοτεχνολογίας και
Μικροσυστημάτων



Διπλωματική εργασία του
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Σχεδιασμός και κατασκευή μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος .



Ερευνητικός επιβλέπων: Μ. Πίσσας Ερευνητής Α' ΙΕΥ ΕΚΕΦΕ «Δ»

Ακαδημαϊκός επιβλέπων: Κ. Ράπτης Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ Μάρτιος 2012

Αθανάσιος Μ. Αναστασίου

Φυσικός Εφαρμογών ΕΜΠ

e-mail: anastasiouthanos@mycosmos.gr

Σχεδιασμός και κατασκευή μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος .

Σχεδίαση εξώφυλλου: Το σχέδιο του εξώφυλλου είναι η τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης V_{EMF} συναρτήσει του χρόνου t και της θέσης ισορροπίας z_i του σημειακού δίπολου όπως προκύπτει από την προσομοίωση στο πρόγραμμα Wolfram Mathematica της διάταξης του μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος για ζεύγος πηνίων αντίθετης σήματος αντίθετης περιέλιξης, σχετικής απόστασης μεταξύ τους ίσης με το μήκος του κάθε πηνίου.

©2012 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

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 το συγγραφέα και το Μιχάλη Πίσσα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα εμπορικά διαθέσιμα μαγνητόμετρα παράγεται από ηλεκτρομαγνήτες ή υπεραγώγιμα πηνία. Αν και οι συγκεκριμένες διατάξεις μπορούν να παράξουν μεγάλα μαγνητικά πεδία (έως και 20 Tesla για υπεραγώγιμους μαγνήτες, και 2 Tesla για ηλεκτρομαγνήτες) λόγω της μόνιμης μαγνήτισης του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη και του παραμένουστος κρίσιμου ρεύματος στα υπεραγώγιμα πηνία δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε με ευκολία το μαγνητικό πεδίο για $-100 \text{ Oe} < H < 100 \text{ Oe}$. Ένας τρόπος για να ξεπεράσουμε αυτό τον περιορισμό είναι να κατασκευάσουμε ένα μαγνητόμετρο στο οποίο το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα απλό πηνίο. Ανάλογα με τις σπείρες του πηνίου και το ρεύμα που το διαρρέει μπορούμε να μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του με μεγάλη ακρίβεια για πεδία κοντά στο μηδενικό πεδίο. Η φυσική αρχή στην οποία στηρίζονται τα μαγνητόμετρα ταλαντευόμενου δείγματος είναι ο νόμος του Faraday. Η μαγνητική ροπή δοκιμίου, το οποίο θεωρούμε ως σημειακό δίπολο, υπολογίζεται από την ηλεκτρεγερτική δύναμη (EFM) που επάγεται σε ένα σύστημα πηνίων όταν το δίπολο εκτελεί αρμονική ταλάντωση σε κοντινή απόσταση. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία έγινε η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος για τον χαρακτηρισμό «μαλακών» μαγνητικών υλικών. Ειδικότερα μελετήθηκε η δυνατότητα κατασκευής μαγνητόμετρου στο οποίο το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται παράλληλα στον άξονα ταλάντωσης του δείγματος. Έγινε ανάλυση της απόκρισης των πηνίων ανίχνευσης του σήματος αναλυτικά και αριθμητικά για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων του μαγνητομέτρου έτσι ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση του σήματος, και ελαχιστοποίηση του όγκου των πηνίων ανίχνευσης. Για το έλεγχο των συσκευών και την καταγραφή των μετρήσεων αναπτύξαμε κατάλληλο πρόγραμμα σε γλώσσα Labview. Τέλος για την αξιολόγηση της διάταξης εκτελέσαμε μία σειρά μετρήσεων χρησιμοποιώντας μαλακά μαγνητικά υλικά, κυρίως σιδηρομαγνητικά υλικά με μικρό συνεκτικό πεδίο. Η ποιότητα των βρόχων υστέρησης που πήραμε είναι πολύ καλή και τέτοια ποιότητα μέτρησης είναι πολύ δύσκολο να πάρουμε από

συμβατικά μαγνητόμετρα ταλαντευόμενου δείγματος για ένταση μαγνητικού πεδίου μικρότερη από 200 Oe.

Λέξεις και φράσεις κλειδιά: Μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος παράλληλης γεωμετρίας, μαγνητική διπολική ροπή, μαγνητική ροή, ηλεκτρεγερτική δύναμη, μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, μαγνητικές περιοχές, τοίχοι Bloch, βρόχος υστέρησης, μαγνήτιση κόρου, παραμένουσα μαγνήτιση, συνεκτικό πεδίο,

Abstract

This thesis refers to the analysis and the building of a Vibrating Sample Magnetometer of parallel geometry suitable for magnetic moment measurements of soft ferromagnetic materials. Most of the vibration sample magnetometers used in magnetic characterization of materials, use electromagnets or superconducting coils to generate strong uniform magnetic field. But when it comes to weak magnetic field with small steps they cannot cope because of the permanent magnetization of the core of the electromagnet or the remaining critical current of the superconducting coil. In the magnetometer we made, the uniform magnetic field is produced by a simple coil; therefore it can generate a magnetic field as weak as needed and change it with really small steps using a high precision current source. The magnetic field is parallel to the direction of the sample's vibration. The operation of this magnetometer is based on Faraday's law of induction: The vibration of the sample inside the magnetic field generates electromotive force at the pick-up coils due to the time change of the magnetic flux. We used two pickup coils at very close distance, wrapped in opposite direction and located between the primary coil and the sample. The induced voltage in the pickup coils is proportional to the sample's magnetic moment. The magnetic moment of the sample is calculated by measuring the voltage from the pick-up coils using a data acquisition card and a lock-in amplifier. Through LabVIEW platform, we extract, plot and save the voltage at the pick-up coils as a function of the external dc magnetic field (hysteresis magnetization loop). We have taken very good results by measuring several soft ferromagnetic samples with low coercive field. Consequently the particular magnetometer can be used in characterizing soft ferromagnetic samples having small coercive fields.

Keywords: Vibrating Sample Magnetometer, parallel geometry, magnetic moment, magnetic flux, electromotive force, soft ferromagnetic materials, magnetic domains, Bloch walls, magnetization curve, hysteresis loop, magnetic saturation, coercivity, remanence.

Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος υπό την επίβλεψη και την καθοριστική καθοδήγηση του Δρ. Μ. Πίσσα την οποία παρείχε σε όλο αυτό το διάστημα. Θεωρώ ότι ήμουν πολύ τυχερός στο να έχω ως ερευνητικό υπεύθυνο στη διπλωματική μου εργασία έναν άνθρωπο που προσπαθεί να κοιτάζει τα πειραματικά αποτελέσματα που έχει στη διάθεσή του, πάντοτε από ασφαλή απόσταση ούτως ώστε να μπορεί να μπαίνει συνεχώς στη διαδικασία της αναζήτησης της φυσικής εξήγησης που κρύβεται πίσω από αυτά.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κ. Ράπτη καθηγητή μου στο μάθημα των Νέων Τεχνολογικών Υλικών 9^{ου} εξαμήνου της Σχολής Ε.Μ.Φ.Ε. ο οποίος με έφερε σε επαφή με τον Δρ. Πίσσα. Με τον τρόπο σκέψης και αντιμετώπισης διαφόρων δυσκολιών στην καθημερινότητα του Ελληνικού Πανεπιστημίου, καταφέρνει αφενός να διδάσκει Φυσική αλλά κυρίως να επιβεβαιώνει καθημερινά το πόσο απαραίτητο είναι το να μένει κανείς πιστός στις αξίες του.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τη σύντροφό μου για την κατανόηση που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια του μακρού (ομολογουμένως) ακαδημαϊκού βίου μου. Η εργασία αυτή είναι ένα μικρό αντάλλαγμα στη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Υπήρξαν οι πρώτοι μου δάσκαλοι και με έμαθαν να προσπαθώ και να καταφέρνω οτιδήποτε βρεθεί στο δρόμο μου όσο δύσκολο ή πολύπλοκο κι αν είναι.

Αθανάσιος Μ. Αναστασίου

Αθήνα, Μάρτιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	σελ. 5
ABSTRACT	σελ. 7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	σελ. 9
1) ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	σελ. 13
2) ΒΑΣΙΚΕΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	σελ. 15
3) ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΑ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	σελ. 21
4) ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΜΑΛΑΚΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	σελ. 37
5) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	σελ. 47
6) ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ	σελ. 59
7) ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΛΑΚΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	σελ. 71
8) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	σελ. 79
9) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ. 81

1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα εμπορικά διαθέσιμα μαγνητόμετρα παράγεται από ηλεκτρομαγνήτες ή υπεραγωγία πηνία. Αν και οι συγκεκριμένες διατάξεις μπορούν να παράξουν μεγάλα μαγνητικά πεδία (έως και 20 Tesla για υπεραγωγίμους μαγνήτες, και 2 Tesla για ηλεκτρομαγνήτες) λόγω της μόνιμης μαγνήτισης του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη και του παραμένουστος κρίσιμου ρεύματος στα υπεραγωγία πηνία δεν μπορούμε να μετρήσουμε τη μαγνητική ροπή υλικών για μαγνητικά πεδία έως 100 Oe. Ένας τρόπος για να ξεπεράσουμε αυτό τον περιορισμό είναι να κατασκευάσουμε ένα μαγνητόμετρο στο οποίο το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα απλό πηνίο. Ανάλογα με τις σπείρες του πηνίου και το ρεύμα που το διαρρέει μπορούμε να μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του με μεγάλη ακρίβεια για πεδία κοντά στο μηδενικό πεδίο.

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος για τον χαρακτηρισμό «μαλακών» μαγνητικών υλικών.

Η φυσική αρχή στην οποία στηρίζονται τα μαγνητόμετρα ταλαντευόμενου δείγματος είναι ο νόμος του Faraday. Η μαγνητική ροπή δοκιμίου, το οποίο θεωρούμε ως σημειακό δίπολο, υπολογίζεται από την ηλεκτρεγερτική δύναμη (EFM) που επάγεται σε ένα σύστημα πηνίων όταν το δίπολο εκτελεί αρμονική ταλάντωση σε κοντινή απόσταση.

Ειδικότερα μελετήθηκε η δυνατότητα κατασκευής μαγνητόμετρου στο οποίο το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται παράλληλα στον άξονα ταλάντωσης του δείγματος. Έγινε ανάλυση της απόκρισης των πηνίων ανίχνευσης του σήματος αναλυτικά και αριθμητικά για τον προσδιορισμό

των βέλτιστων παραμέτρων του μαγνητομέτρου έτσι ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση του σήματος και ελαχιστοποίηση του όγκου των πηνίων ανίχνευσης.

Για την κατασκευή του μαγνητόμετρου χρησιμοποιήσαμε

- α) ένα ταλαντωτή με τροφοδοτικό ημιτονοειδούς τάσης για την ταλάντωση του δοκιμίου
- β) ένα πηνίο με τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος για τη δημιουργία του συνεχούς μαγνητικού πεδίου
- γ) δύο πηνία αντίθετα τυλιγμένα για την ανίχνευση του σήματος
- δ) ένα Lock-in Amplifier για την ανίχνευση του σήματος από τα πηνία ανίχνευσης
- ε) μία κάρτα ψηφιοποίησης σήματος της National Instruments.

Για το έλεγχο των συσκευών και την καταγραφή των μετρήσεων αναπτύξαμε κατάλληλο πρόγραμμα σε γλώσσα Labview. Τέλος για την αξιολόγηση της διάταξης εκτελέσαμε μία σειρά μετρήσεων χρησιμοποιώντας μαλακά μαγνητικά υλικά, κυρίως σιδηρομαγνητικά υλικά με μικρό συνεκτικό πεδίο.

2. Βασικές φυσικές αρχές του μαγνητισμού και των μαγνητικών υλικών

Ανάλογα με την απόκριση που έχουν τα υλικά στο μαγνητικό πεδίο τα κατατάσσουμε σε πέντε κατηγορίες: (α) τα παραμαγνητικά υλικά (β) τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά, (γ) τα διαμαγνητικά υλικά, (δ) τα υπεραγώγιμα υλικά και (ε) τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Λεπτομερείς πληροφορίες για το μαγνητισμό και τα μαγνητικά υλικά μπορεί κάποιος να βρει στις αναφορές 1-3.

Σε μακροσκοπική κλίμακα τα διάφορα υλικά μπορούν να χαρακτηριστούν από τη μαγνητική επιδεκτικότητα ή τη μαγνητική διαπερατότητα οι οποίες ορίζονται από τις σχέσεις των μακροσκοπικών πεδιακών μεγεθών της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} , του μαγνητικού πεδίου, \mathbf{H} , και της μαγνήτισης του υλικού, \mathbf{M} . Θεωρούμε ένα υλικό σε σχήμα σύρματος το οποίο βρίσκεται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} παράλληλο στο μήκος του. Ανεξάρτητα από το είδος του υλικού ισχύει η σχέση

$$\mathbf{B}=\mu_0(\mathbf{H}+\mathbf{M}).$$

Ένα υλικό ονομάζεται παραμαγνητικό όταν ισχύει

$$\mathbf{M}=\chi\mathbf{H},$$

όπου $\chi>0$ είναι μαγνητική επιδεκτικότητα η οποία για μικρά μαγνητικά πεδία είναι ανεξάρτητη του μαγνητικού πεδίου και μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση

$$\chi=C/T,$$

η οποία ονομάζεται νόμος του Curie.

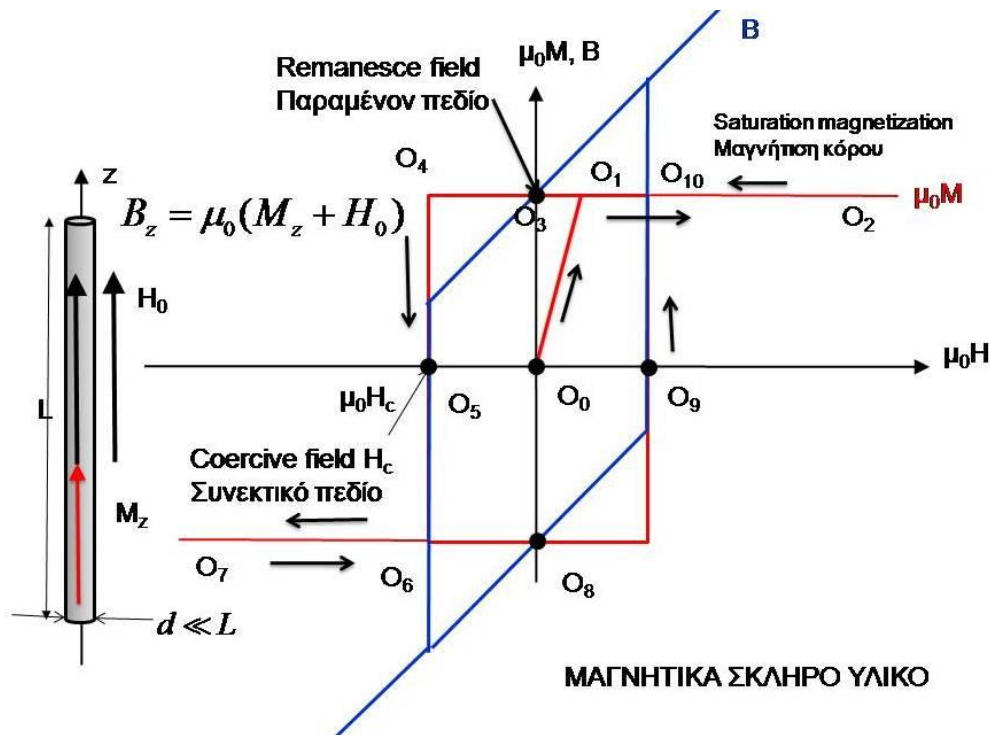
Στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά η ατομικές μαγνητικές ροπές, κάτω από μία θερμοκρασία η οποία ονομάζεται *θερμοκρασία Neel*, είναι αντιπαράλληλα συζευγμένες. Η μαγνητική επιδεκτικότητα των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, για $T < T_N$, αυξάνει γραμμικά με το μαγνητικό πεδίο

$$\chi = \alpha H.$$

Διαμαγνητικά ονομάζονται τα υλικά στα οποία η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική ($\chi < 0$) και συνήθως δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Υπεραγωγοί πρώτου είδους είναι τα υλικά για τα οποία η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό τους μηδενίζεται όταν ψυχθούν κάτω από μία συγκεκριμένη θερμοκρασία παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο Meissner). Οι υπεραγωγοί πρώτου είδους μπορούν να θεωρηθούν ταυτόχρονα τέλεια διαμαγνητικά υλικά ($\mathbf{B} = 0$, στο εσωτερικό τους) και τέλει αγωγοί ($\mathbf{E} = 0$ στο εσωτερικό τους).

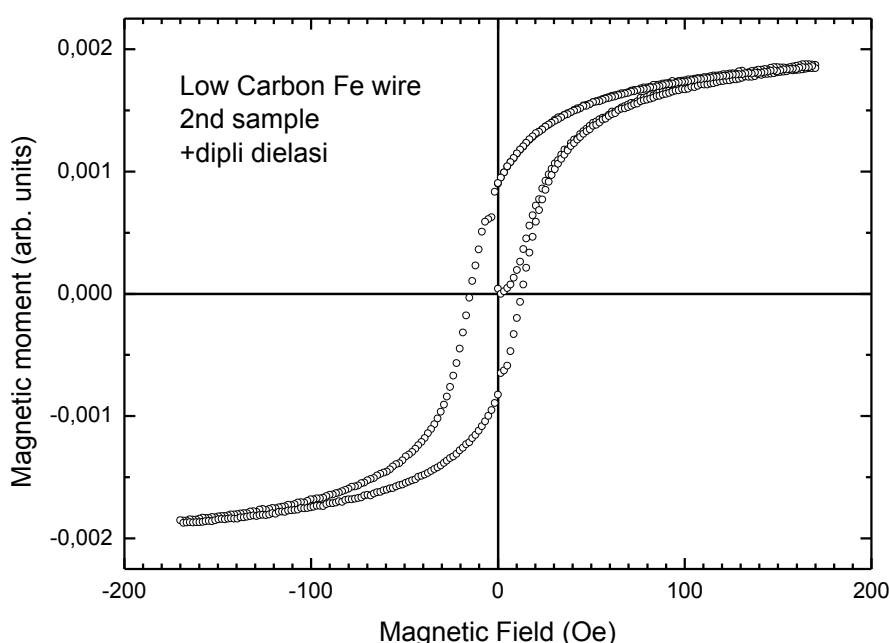
Σιδηρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά για τα οποία η μαγνήτιση τους είναι μη μηδενική, όταν η θερμοκρασία τους είναι κάτω από μία χαρακτηριστική θερμοκρασία (θερμοκρασία Curie) και όταν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είναι ίσο με το μηδέν. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι προσανατολισμένες σε μία κατεύθυνση λόγω των αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής. Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό ξεπεράσει κάποιο κρίσιμο μέγεθος ενεργειακοί λόγοι (ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής ενέργειας $W = -(\mu_0/2) \int \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} dx^3$) επιβάλλουν τη διαίρεσή του σε μαγνητικές περιοχές έτσι ώστε σε μακροσκοπική κλίμακα να εμφανίζει μηδενική μέση μαγνήτιση. Οι μαγνητικές περιοχές με διαφορετική μαγνήτιση χωρίζονται από ένα «τοίχο» ο οποίος ονομάζεται *τοίχος Bloch*, μέσα στον οποίο οι ατομικές μαγνητικές ροπές αλλάζουν φορά με συνεχή τρόπο. Σε

κάθε περιοχή οι ατομικές μαγνητικές ροπές παραμένουν προσανατολισμένες. Εξ αιτίας του φαινομένου του «καρφώματος» των τοίχων Bloch σε ορισμένα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν προσανατολίσουμε όλες τις μαγνητικές περιοχές και αφαιρέσουμε το μαγνητικό πεδίο τότε αυτές παραμένουν προσανατολισμένες. Αυτά τα σιδηρομαγνητικά υλικά ονομάζονται σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά ή μόνιμοι μαγνήτες. Τέτοια υλικά είναι οξείδια ή κράματα με χαμηλή συμμετρία τα οποία περιέχουν μαγνητικά ιόντα με μεγάλη σύζευξη σπιν-τροχιάς.



Σχήμα 2.1 Μεταβολή της μαγνήτισης και της μαγνητικής επαγωγής, σαν συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου για ένα σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα κύρια χαρακτηριστικά του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι η εξάρτηση της μαγνήτισης από τη διαδρομή που ακολουθούμε κατά την μέτρηση, η παραμένουσα μαγνήτιση, η μαγνήτιση κόρου και το συνεκτικό πεδίο (το σχήμα το προέρχεται από την αναφορά 5)

Στα απλά σιδηρομαγνητικά μέταλλα και κράματα δεν καρφώνονται οι ατομικές ροπές στους τοίχους Bloch με αποτέλεσμα σε αυτά να μηδενίζεται η μακροσκοπική μαγνήτιση όταν αφαιρέσουμε το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτά ονομάζονται *μαλακά μαγνητικά υλικά*. Αν και στη πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιούνται σκληρά μαγνητικά υλικά υπάρχουν αρκετές εφαρμογές στις οποίες καταλληλότερα είναι τα μαλακά μαγνητικά υλικά (μετασχηματιστές, ηλεκτρομαγνήτες).



Σχήμα 2.2 Μεταβολή της μαγνητικής ροπής για ένα δοκίμιο α -Fe με χαμηλή περιεκτικότητα σε C. Το συγκεκριμένο υλικό είναι ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Ο συγκεκριμένος βρόχος μετρήθηκε με τη διάταξη που κατασκευάστηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική.

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής ροπής για ένα σκληρό μαγνητικό υλικό σαν συνάρτηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της καμπύλης (η οποία ονομάζεται βρόχος υστέρησης) είναι η εξάρτηση της μαγνητικής ροπής από την διαδρομή που ακολουθούμε κατά την διάρκεια της μέτρησης.

Αξιοσημείωτο είναι ότι μετά την μαγνήτιση του υλικού έως τον κόρο όταν μηδενίσουμε το μαγνητικό πεδίο τότε η μαγνήτιση είναι μη μηδενική και ονομάζεται *παραμένουσα μαγνήτιση*. Επιπρόσθετα, για να μηδενιστεί η μαγνήτιση θα πρέπει να εφαρμοστεί αρνητικό μαγνητικό πεδίο. Η τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση ονομάζεται *συνεκτικό πεδίο*.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ο βρόχος υστέρησης για ένα μαλακό μαγνητικό υλικό. Στην ουσία η καμπύλη μαγνήτισης μοιάζει με αυτή ενός σκληρού μαγνητικού υλικού παρατηρώντας όμως ότι η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με τις τιμές που έχουμε σε ένα σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό.

Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός των υλικών γίνεται από διατάξεις που ονομάζονται μαγνητόμετρα. Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα εμπορικά διαθέσιμα μαγνητόμετρα παράγεται από ηλεκτρομαγνήτες ή υπεραγωγία πηνία. Αν και οι συγκεκριμένες διατάξεις μπορούν να παράξουν μεγάλα μαγνητικά πεδία (έως και 20 Tesla για υπεραγωγίμους μαγνήτες, 2 Tesla για ηλεκτρομαγνήτες) λόγω της μόνιμης μαγνήτισης του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη και του παραμένουστος κρίσιμου ρεύματος στα υπεραγωγία πηνία δεν μπορούμε να μετρήσουμε τη μαγνητική ροπή υλικών για μαγνητικά πεδία έως 100 Oe. Ένας τρόπος για να ξεπεράσουμε αυτό τον περιορισμό είναι να κατασκευάσουμε ένα μαγνητόμετρο στο οποίο το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα απλό πηνίο. Ανάλογα με τις σπείρες του πηνίου και το ρεύμα που το διαρρέει μπορούμε να μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του με μεγάλη ακρίβεια για πεδία κοντά στο μηδενικό πεδίο.

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος για τον χαρακτηρισμό «μαλακών» μαγνητικών υλικών.

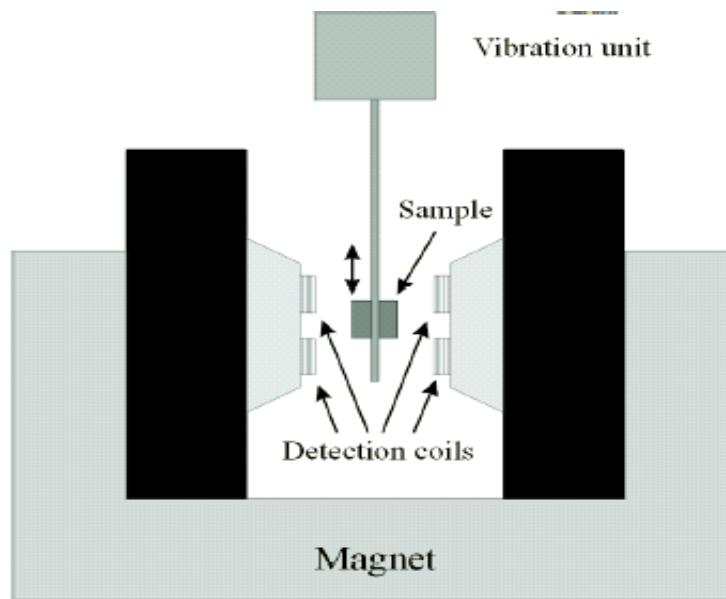
3. Φυσικές Αρχές που Διέπουν τα Μαγνητόμετρα Ταλαντευόμενου Δείγματος (Vibrating sample magnetometer)

Ένα μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος αποτελείται από: α) ένα ηλεκτρομαγνήτη ο οποίος δημιουργεί ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο (ή πηνίο που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα ώστε στο εσωτερικό του να έχουμε ομογενές μαγνητικό πεδίο), β) τα πηνία ανίχνευσης, γ) το μηχανισμό ταλάντωσης του δείγματος (για τη συνέχεια θεωρούμε το δείγμα ως σημειακό μαγνητικό δίπολο) και δ) τις ηλεκτρονικές συσκευές για την καταγραφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που προκαλεί η ταλάντωση του δείγματος στα πηνία ανίχνευσης.

Ανάλογα με την σχέση της διεύθυνσης ταλάντωσης του δείγματος με τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες: τα μαγνητόμετρα στα οποία το δείγμα ταλαντώνεται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο και σε εκείνα που το δείγμα ταλαντώνεται παράλληλα στη διεύθυνση του πεδίου. Μία πλήρη ανάλυση των μεθόδων χαρακτηρισμού μαγνητικών υλικών μπορεί κάποιος να βρει στην αναφορά 3.

A) Μαγνητόμετρα κάθετης γεωμετρίας.

Στα μαγνητόμετρα ταλαντευόμενου δείγματος κάθετης γεωμετρίας το δείγμα βρίσκεται ανάμεσα στους πόλους ενός ηλεκτρομαγνήτη και ταλαντώνεται σε διεύθυνση κάθετη στο πεδίο, μεταξύ δύο ζευγών μετρητικών πηνίων.



Σχήμα 3.1 Μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος (VSM) κάθετης γεωμετρίας.

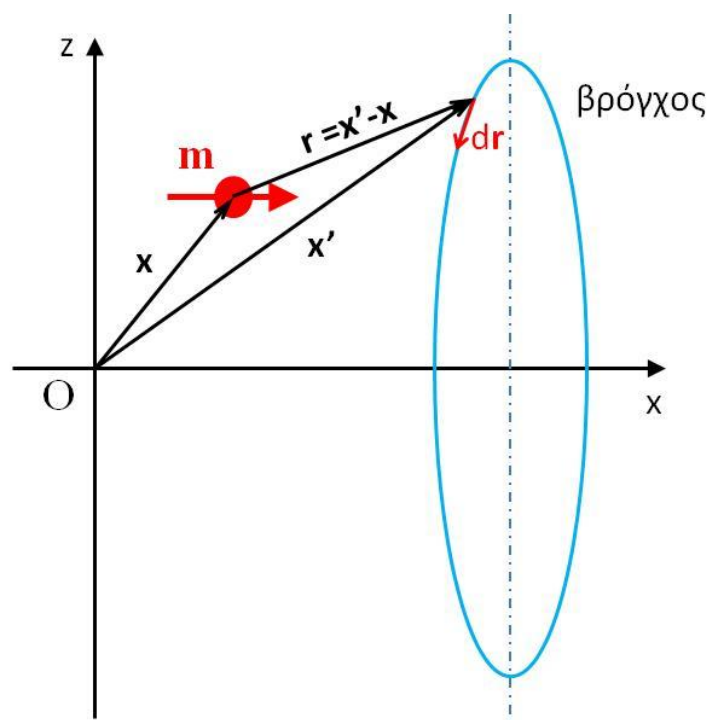
Η τάση που επάγεται στα πηνία ανίχνευσης είναι ανάλογη με τη χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής που προκαλεί το μαγνητικό πεδίο της μαγνητικής ροπής του ταλαντευόμενου δείγματος. Η ένταση του πεδίου είναι ανάλογη της μαγνητικής ροπής. Το σήμα είναι ανάλογο της συχνότητας και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης πηνίου – δείγματος.

Η λειτουργία των μαγνητομέτρων ταλαντευόμενου δείγματος βασίζεται στο νόμο της επαγωγής του Faraday. Η ταλάντωση ενός μόνιμα μαγνητισμένου δοκιμίου (ή ενός δοκιμίου μαγνητισμένου από ένα εξωτερικό πεδίο) κοντά σε ένα βρόχο προκαλεί χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στο βρόχο. Η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής που διαπερνά την επιφάνεια του βρόχου ισούται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στα άκρα του:

$$V_{EMF} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

όπου Φ η μαγνητική ροή που περνά από την επιφάνεια του βρόχου και υπολογίζεται σύμφωνα με το θεώρημα του Stokes από το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του διανυσματικού δυναμικού στην περιφέρεια του βρόχου:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = \int_S (\mathbf{V} \times \mathbf{A}_m) \cdot d\mathbf{a} = \oint_C \mathbf{A}_m \cdot d\mathbf{r} \quad (2)$$



Σχήμα 3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής σημειακού δίπολου και κυκλικού βρόχου.

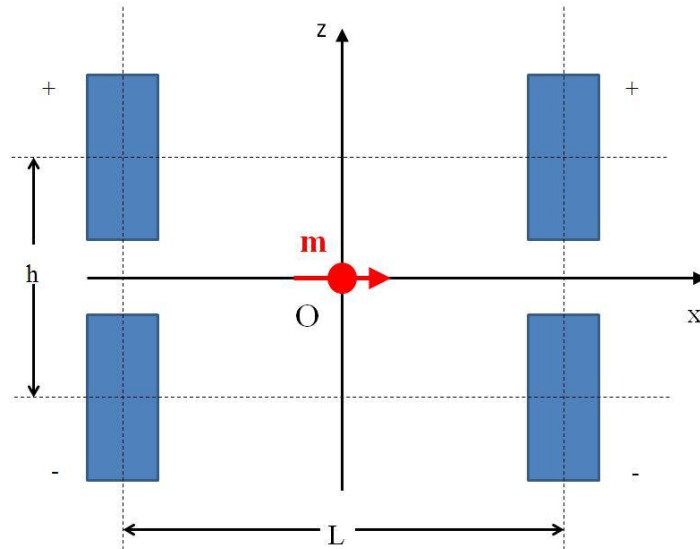
Αντικαθιστώντας τη σχέση που δίνει το διανυσματικό δυναμικό μαγνητικού δίπολου που βρίσκεται στη θέση \mathbf{x} (δες αναφορά 4)

$$\mathbf{A}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times (\mathbf{x}' - \mathbf{x})}{|\mathbf{x}' - \mathbf{x}|^3} \quad (3)$$

και επομένως

$$\Phi = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{\mathbf{m} \times (\mathbf{x}' - \mathbf{x})}{|\mathbf{x}' - \mathbf{x}|^3} \cdot d\mathbf{r} \quad (4)$$

Όπου $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tesla}\cdot\text{m/Ampere}$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.



Σχήμα 3.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πηνίων ανίχνευσης του μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος κάθετης γεωμετρίας.

Στην περίπτωση του μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος το δείγμα μαγνητίζεται από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένας ηλεκτρομαγνήτης. Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι κατά μήκος του άξονα x. Στο διάκενο του μαγνήτη είναι τοποθετημένα 4 πηνία ανίχνευσης των οποίων τα κέντρα έχουν συντεταγμένες $(L/2, 0, h/2)$, $(L/2, 0, -h/2)$, $(-L/2, 0, h/2)$ και $(-L/2, 0, -h/2)$. Το δείγμα ταλαντώνεται κατά μήκος του άξονα z με συχνότητα f και πλάτος A , σύμφωνα με τη σχέση

$$x = A \sin(2\pi ft) \hat{z} \quad (5)$$

Λόγω της ημιτονοειδούς κίνησης της μαγνητικής ροπής η τάση στα πηνία ανίχνευσης θα ισούται με

$$V \cong - \left[\frac{\partial b_x(x-L/2, 0, z-h/2)}{\partial z} - \frac{\partial b_x(x-L/2, 0, z+h/2)}{\partial z} + \frac{\partial b_x(x+L/2, 0, z-h/2)}{\partial z} - \frac{\partial b_x(x+L/2, 0, z+h/2)}{\partial z} \right]_{x=0} (6)$$

$$m_x A (2\pi f) \cos(2\pi ft)$$

Η συνάρτηση:

$$s(x) = - \left[\frac{\partial \left(\left(x - \frac{L}{2} \right), y, \left(z - \frac{h}{2} \right) \right)}{\partial z} - \frac{\partial \left(\left(x - \frac{L}{2} \right), y, \left(z + \frac{h}{2} \right) \right)}{\partial z} + \frac{\partial \left(\left(x + \frac{L}{2} \right), y, \left(z - \frac{h}{2} \right) \right)}{\partial z} - \frac{\partial \left(\left(x + \frac{L}{2} \right), y, \left(z + \frac{h}{2} \right) \right)}{\partial z} \right] (7)$$

ονομάζεται συνάρτηση «ευαισθησίας» του συστήματος των πηνίων ανίχνευσης. Για να επιτύχουμε το μέγιστο σήμα θα πρέπει οι διαστάσεις των πηνίων και η θέση τους να είναι τέτοια ώστε η συνάρτηση $S(x)$ να έχει μέγιστο στο σημείο που βρίσκεται το δίπολο. Η επαγόμενη τάση στα πηνία ανίχνευσης τελικά θα δίνεται από τη σχέση

$$V_{EMF} = m_x A (2\pi f) S(0) \cos(2\pi ft) = V_0 \cos(2\pi ft). \quad (8)$$

B) Μαγνητόμετρα παράλληλης γεωμετρίας.

Όπως έχουμε αναφέρει στα προηγούμενα η φυσική αρχή των μαγνητόμετρων ταλαντευόμενου δείγματος είναι ο νόμος του Faraday,

$$V_{\text{EMF}} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

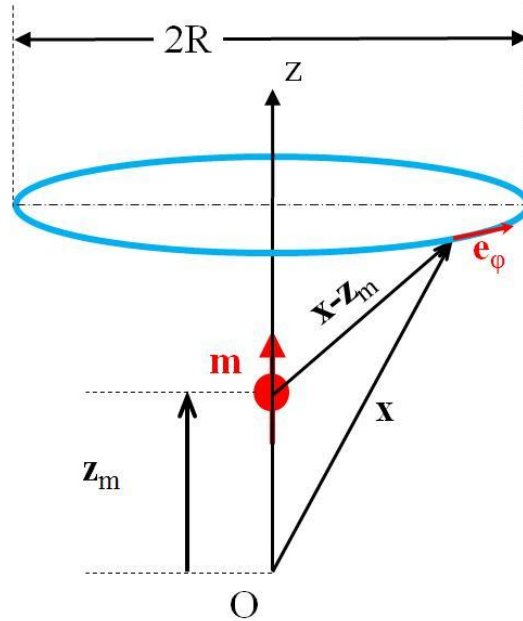
όπου Φ είναι η μαγνητική ροή που περνά από την επιφάνεια του πηνίου αντίχνευσης NL σπειρών και δίνεται από τη σχέση

$$\Phi = NL \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (2)$$

Στην περίπτωση του μαγνητόμετρου παράλληλης γεωμετρίας έχουμε ένα κυλινδρικό πηνίο με το άξονα του να ταυτίζεται με τον άξονα z . Η περιέλιξη του πηνίου είναι $N(z)$ στροφές ανά μονάδα μήκους. Για απλότητα θεωρούμε ότι η συνάρτηση $N(z)$ είναι σταθερή. Στον άξονα z σε απόσταση z_i από την αρχή των αξόνων υπάρχει ένα σημειακό δίπολο μαγνητικής ροπής $\mathbf{m} = m \cdot \mathbf{e}_z$ το οποίο εκτελεί αρμονική ταλάντωση με πλάτος z_0 και συχνότητα f . Η εξίσωση κίνησης του μαγνητικού δίπολου θα δίνεται από τη σχέση

$$z_m(t) = z_i + z_0 \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που προκαλεί η μαγνητική ροπή στα πηνία αντίχνευσης θα υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή σημειακού δίπολου πρώτα σε ένα κυκλικό βρόχο και στη συνέχεια σε ολόκληρο το πηνίο.



Σχήμα 3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής σημειακού δίπολου και κυκλικού βρόχου.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το διανυσματικό δυναμικό σημειακού μαγνητικού δίπολου $\mathbf{m} = m \cdot \mathbf{e}_z$ δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{A}_m(\mathbf{x}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times (\mathbf{x} - \mathbf{z}_m)}{|\mathbf{x} - \mathbf{z}_m|^3} \quad (4)$$

η μαγνητική ροή που προκαλεί σε ένα κυκλικό βρόχο, ακτίνας R του οποίου το κέντρο βρίσκεται στον άξονα z (σχήμα 3.4) θα δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = \\ &= \int_S \nabla \times \mathbf{A}_m \cdot d\mathbf{a} = \oint_C \mathbf{A}_m \cdot d\mathbf{x} \\ &= \frac{\mu_0 m}{4\pi} \oint_C \frac{\hat{\mathbf{e}}_z \times (\mathbf{x} - z_m \hat{\mathbf{e}}_z)}{|\mathbf{x} - z_m \hat{\mathbf{e}}_z|^3} \cdot d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (5)$$

Αν επιπρόσθετα λάβουμε υπόψη ότι

$$d\mathbf{x} = R d\phi \hat{\mathbf{e}}_z, \quad (6)$$

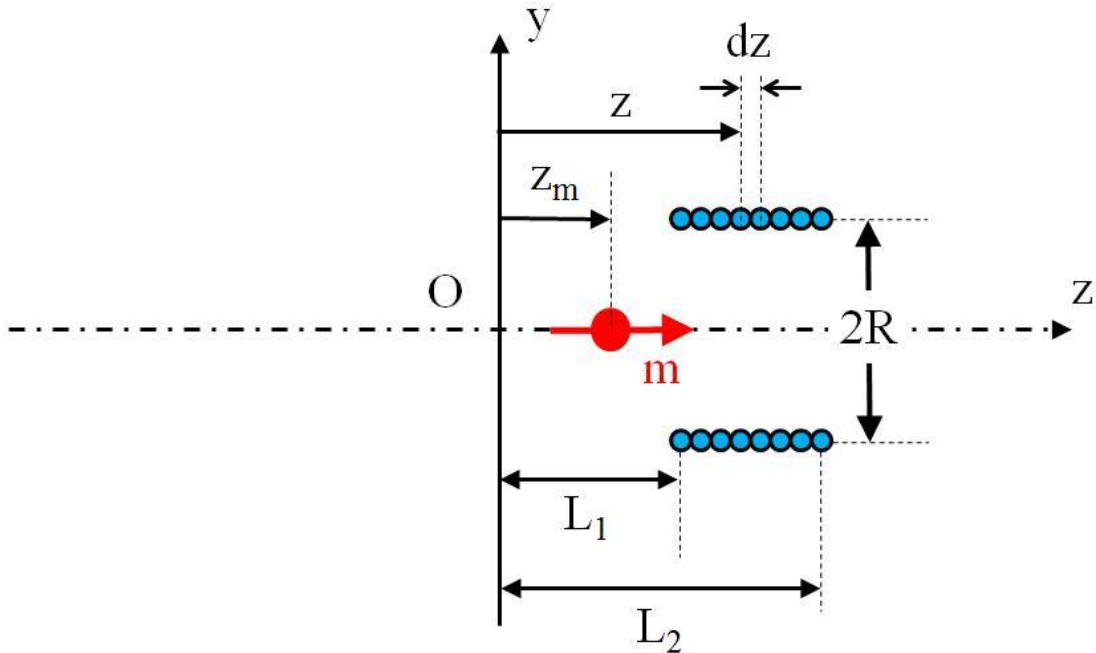
$$|\mathbf{x} - z_m \hat{\mathbf{e}}_z|^3 = [R^2 + (z - z_m(t))^2]^{3/2} \quad (7)$$

και

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{e}}_z \times (\mathbf{x} - z_m \hat{\mathbf{e}}_z) &= \hat{\mathbf{e}}_z \times \mathbf{x} - z_m \hat{\mathbf{e}}_z \times \hat{\mathbf{e}}_z \\ &= \hat{\mathbf{e}}_z \times \mathbf{x} = x \hat{\mathbf{e}}_z \times \hat{\mathbf{e}}_r = x \sin \theta \hat{\mathbf{e}}_\phi = \frac{xR \hat{\mathbf{e}}_\phi}{x} = R \hat{\mathbf{e}}_\phi \end{aligned} \quad (8)$$

η μαγνητική ροή τελικά γράφεται

$$\Phi = \frac{\mu_0 m R^2}{4\pi} \frac{1}{[R^2 + (z - z_m(t))^2]^{3/2}} \int_0^{2\pi} d\phi = \frac{\mu_0}{2} \frac{m R^2}{[R^2 + (z - z_m(t))^2]^{3/2}} \quad (9)$$



Σχήμα 3.5 Γεωμετρικά στοιχεία για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής που προκαλεί σημειακό μαγνητικό δίπολο σε πηνίο μήκους $L_2 - L_1$.

Με βάση την προηγούμενη σχέση εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή σε ένα πηνίο ή σύστημα πηνίων (σχήμα 3.5) από τη σχέση:

$$\Phi = \int_{L_1}^{L_2} \frac{\mu_0}{2} \frac{mR^2}{\left[R^2 + (z - z_m(t))^2 \right]^{3/2}} N(z) dz \quad (10)$$

Αν λάβουμε υπόψη το ολοκλήρωμα:

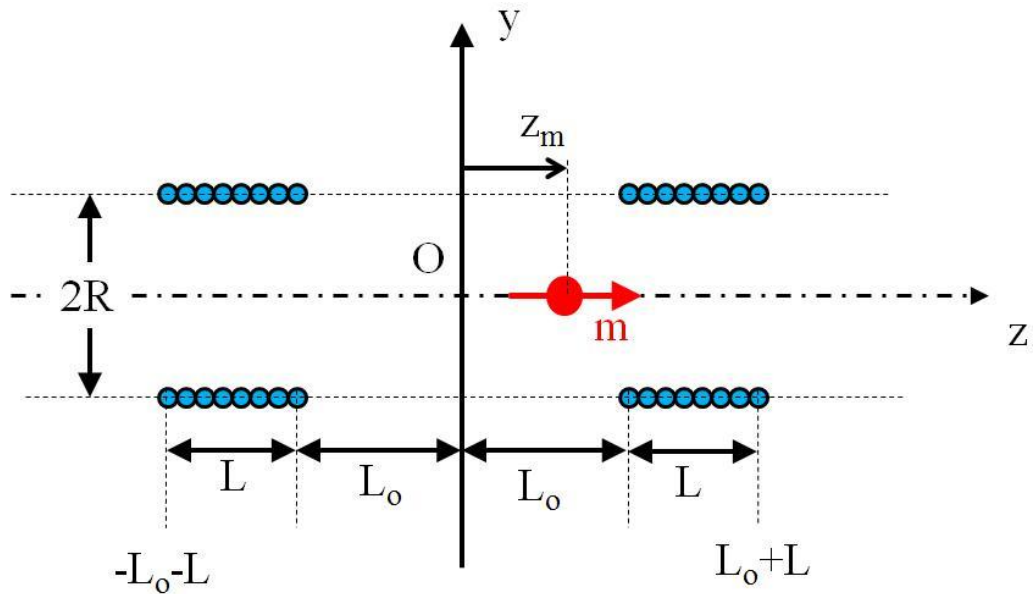
$$\int \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{1}{a^2} \frac{x}{\sqrt{(x^2 + a^2)}} \quad (11)$$

και το γεγονός ότι η συνάρτηση $N(z)$ είναι σταθερή, η μαγνητική ροή θα δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_0 Nm R^2}{2} \frac{1}{R^2} \left\{ \frac{[L_2 - z_m(t)]}{\left[R^2 + (L_2 - z_m(t))^2 \right]^{1/2}} - \frac{[L_1 - z_m(t)]}{\left[R^2 + (L_1 - z_m(t))^2 \right]^{1/2}} \right\} \Rightarrow \\ \Phi &= \frac{\mu_0 Nm}{2} \left\{ \frac{[L_2 - z_m(t)]}{\left[R^2 + (L_2 - z_m(t))^2 \right]^{1/2}} - \frac{[L_1 - z_m(t)]}{\left[R^2 + (L_1 - z_m(t))^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

Στην περίπτωση μας το σύστημα ανίχνευσης αποτελείται από δύο όμοια πηνία αντίθετα τυλιγμένα όποτε η συνολική μαγνητική ροπή θα δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_0 Nm}{2} \left\{ \frac{[L_0 + L - z_m(t)]}{\left[R^2 + [L_0 + L - z_m(t)]^2 \right]^{1/2}} - \frac{[L_0 - z_m(t)]}{\left[R^2 + [L_0 - z_m(t)]^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ &\quad - \frac{\mu_0 Nm}{2} \left\{ \frac{[-L_0 - z_m(t)]}{\left[R^2 + [-L_0 - z_m(t)]^2 \right]^{1/2}} - \frac{[-L_0 - L - z_m(t)]}{\left[R^2 + [-L_0 - L - z_m(t)]^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$



Σχήμα 3.6 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πηνίων αντίχυνσης. Τα πηνία αντίχυνσης αποτελούνται από δύο πηνία μήκους L με N στροφές ανά μονάδα μήκους.

Η μαγνητική ροπή ταλαντώνεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$z_m(t) = z_i + z_0 \sin(2\pi ft) \quad (14)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο του Faraday, η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται στα πηνία αντίχυνσης για $z_0 \ll 1$ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\begin{aligned} V_{EMF} &= -\frac{d\Phi}{dt} \cong -\frac{d}{dt} \left(\Phi(z_i) + \left. \frac{d\Phi}{dz_m} \right|_{z_m=z_i} z_0 \sin(2\pi ft) + \dots \right) \\ &\cong -\left. \frac{d\Phi}{dz_m} \right|_{z_m=z_i} \frac{d[z_0 \sin(2\pi ft)]}{dt} = -2\pi f z_0 \left. \frac{d\Phi}{dz_m} \right|_{z_m=z_i} \cos(2\pi ft) \end{aligned} \quad (15)$$

Η παράγωγος $d\Phi/dz_m$ θα δίνεται από τη σχέση:

$$\left. \frac{d\Phi}{dz_m} \right|_{z_m=z_i} = \frac{\mu_0 Nm}{2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{-[R^2 + [L_0 + L - z_i]^2]^{1/2} + [L_0 + L - z_i]^2 [R^2 + [L_0 + L - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [L_0 + L - z_i]^2]} \\ & - \frac{-[R^2 + [L_0 - z_i]^2]^{1/2} + [L_0 - z_i]^2 [R^2 + [L_0 - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [L_0 - z_i]^2]} \\ & - \frac{-[R^2 + [-L_0 - z_i]^2]^{1/2} + [-L_0 - z_i]^2 [R^2 + [-L_0 - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [-L_0 - z_i]^2]} \\ & + \frac{-[R^2 + [-L_0 - L - z_i]^2]^{1/2} + [-L_0 - L - z_i]^2 [R^2 + [-L_0 - L - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [-L_0 - L - z_i]^2]} \end{aligned} \right\}$$

Άρα το πλάτος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης θα δίνεται από τη σχέση :

$$V_{EMF}^0 = \mu_0 Nm \pi f z_0 \left\{ \begin{aligned} & \frac{-[R^2 + [L_0 + L - z_i]^2]^{1/2} + [L_0 + L - z_i]^2 [R^2 + [L_0 + L - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [L_0 + L - z_i]^2]} \\ & - \frac{-[R^2 + [L_0 - z_i]^2]^{1/2} + [L_0 - z_i]^2 [R^2 + [L_0 - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [L_0 - z_i]^2]} \\ & - \frac{-[R^2 + [-L_0 - z_i]^2]^{1/2} + [-L_0 - z_i]^2 [R^2 + [-L_0 - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [-L_0 - z_i]^2]} \\ & + \frac{-[R^2 + [-L_0 - L - z_i]^2]^{1/2} + [-L_0 - L - z_i]^2 [R^2 + [-L_0 - L - z_i]^2]^{-1/2}}{[R^2 + [-L_0 - L - z_i]^2]} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow$$

$$V_{EMF}^0 = \mu_0 Nm \pi f z_0 G(R, L_0, L, z_i). \quad (17)$$

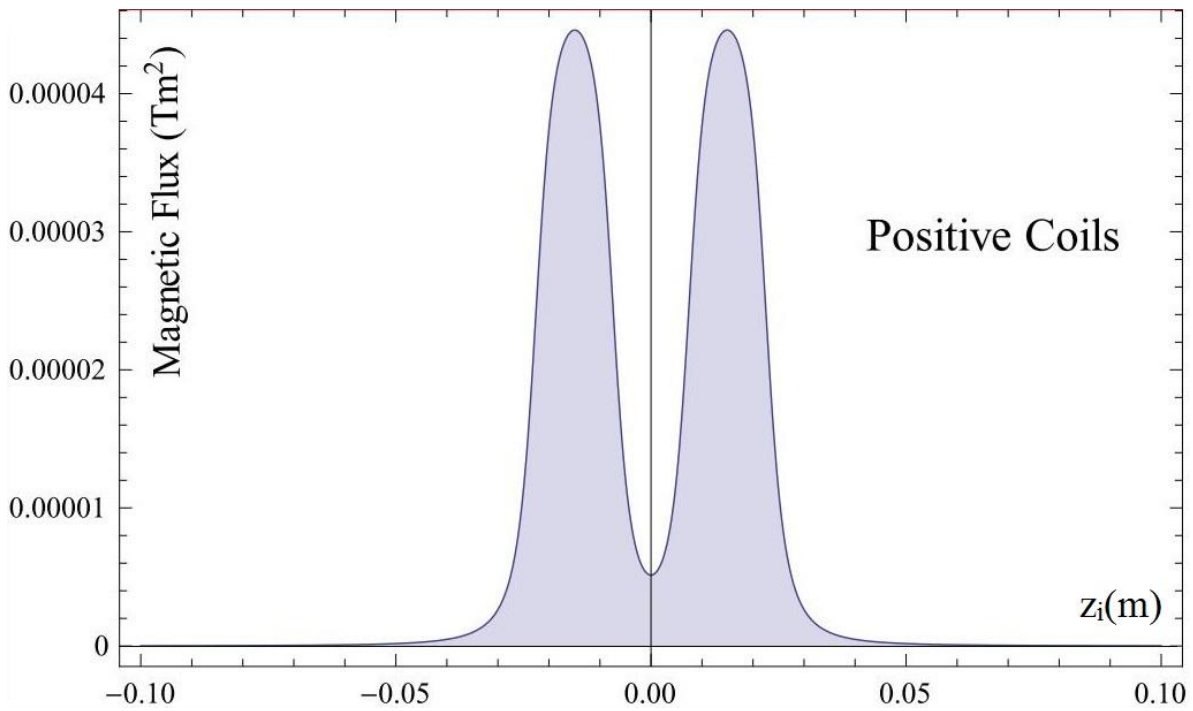
Η συνάρτηση G εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πηνίων. Η φάση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε σχέση με τη φάση ταλάντωσης του δείγματος θα δίνεται από τη σχέση

$$-\cos(2\pi ft) = \sin(2\pi ft - \pi/2) \quad (18)$$

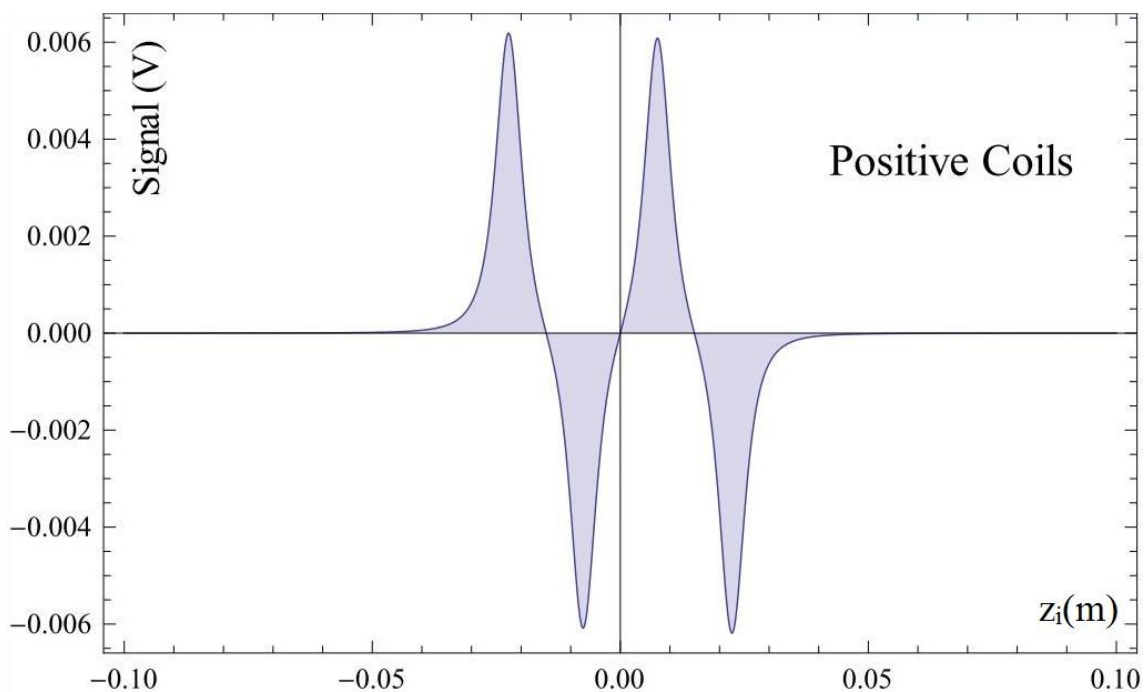
Με βάση τη σχέση που δίνει το πλάτος της επαγόμενης τάσης μπορούμε να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα:

- I. Η τάση είναι ανάλογη με την προβολή της μαγνητικής ροπής στο επίπεδο των πηνίων αντίχνευσης.
- II. Η τάση είναι ανάλογη με τον αριθμό των περιελίξεων ανά μονάδα μήκους.
- III. Η τάση είναι ευθέως ανάλογη με τη συχνότητα ταλάντωσης του δείγματος και το πλάτος ταλάντωσης του δείγματος.
- IV. Τοπικό ακρότατο της συνάρτησης G έχουμε όταν $z_m=0$.

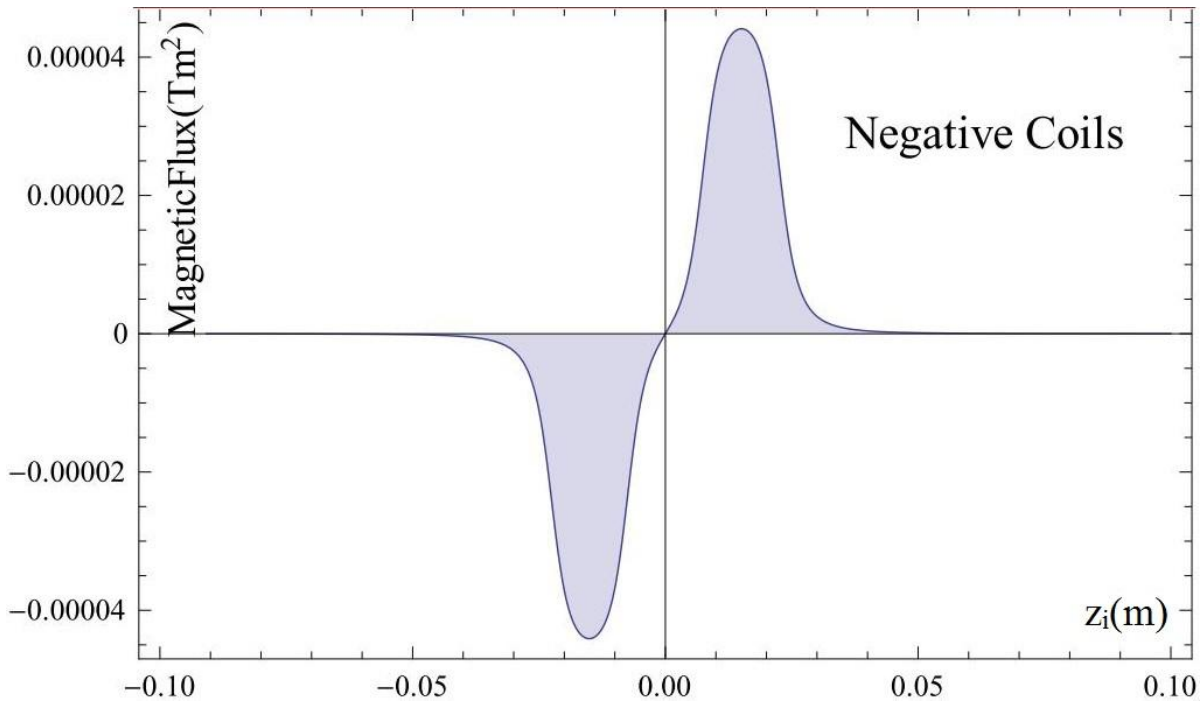
Εισάγοντας τις θεωρητικές σχέσεις για τη μαγνητική ροή και την ηλεκτρεγερτική δύναμη στο Mathematica κατασκευάσαμε τις γραφικές παραστάσεις του πλάτους τους συναρτήσει της απόστασης της θέσης ισορροπίας του δοκιμίου από το μέσο της απόστασης των δύο πηνίων. Ο υπολογισμός έγινε για ομόρροπη και αντίρροπη φορά περιέλιξης των δύο πηνίων αντίχνευσης. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες τιμές: $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Tesla m/A, $f=33$ Hz, $z_0=0.001$ m, και $m=0.005$ Am². Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 3.7-3.10.



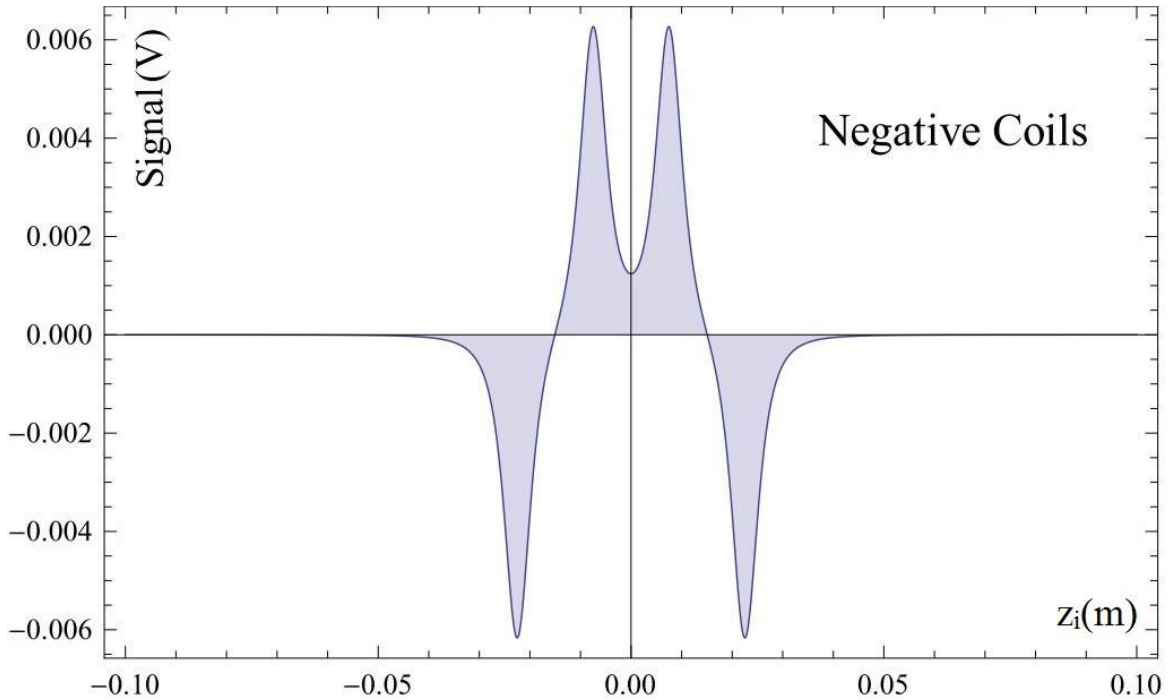
Σχήμα 3.7 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής σε ζεύγος πηνίων ίδιας φοράς περιέλιξης, που προκαλεί σημειακό μαγνητικό δίπολο, συναρτήσει της θέσης ισορροπίας του.



Σχήμα 3.8 Μεταβολή του πλάτους της ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ζεύγος πηνίων ίδιας φοράς περιέλιξης, που προκαλεί σημειακό μαγνητικό δίπολο, συναρτήσει της θέσης ισορροπίας του.



Σχήμα 3.9 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής σε ζεύγος πηνίων αντίθετης περιέλιξης, που προκαλεί σημειακό μαγνητικό δίπολο, συναρτήσει της θέσης ισορροπίας του.



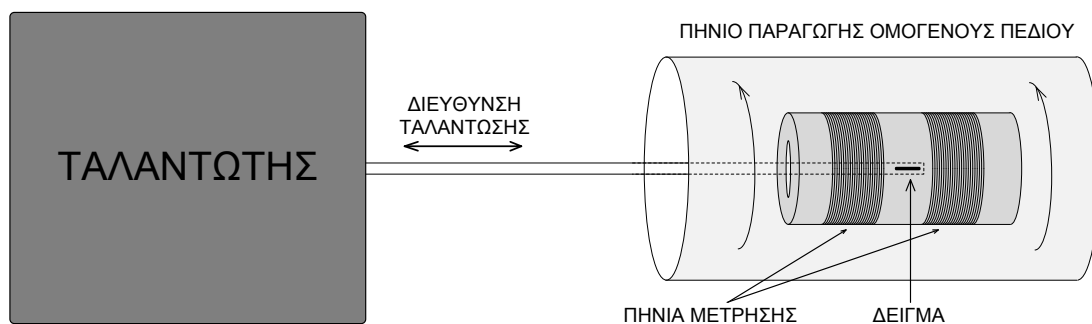
Σχήμα 3.10 Μεταβολή του πλάτους της ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ζεύγος πηνίων αντίθετης περιέλιξης, που προκαλεί σημειακό μαγνητικό δίπολο, συναρτήσει της θέσης ισορροπίας του.

Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση που το ζεύγος των πηνίων έχει όμοια περιέλιξη (σχήματα 3.7 και 3.8) η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται έχει μέγιστα (κατά απόλυτη τιμή) σε τέσσερα σημεία τα οποία είναι τα άκρα του κάθε πηνίου. Στο κέντρο της διάταξης το σήμα έχει μηδενική τιμή που σημαίνει ότι αν η αυτή είναι η θέση ισοροπίας της ταλάντωσης του δείγματος τότε δεν θα έχουμε σήμα από το ζεύγος των πηνίων.

Στην περίπτωση όμως που το ζεύγος των πηνίων έχει αντίθετη περιέλιξη (σχήματα 3.9 και 3.10) έχουμε και πάλι μέγιστη ηλεκτρεγερτική δύναμη στα άκρα των πηνίων αλλά έχουμε και αρκετά μεγάλη τιμή στο κέντρο ανάμεσα στα δύο πηνία περίπου το $1/3$ της μέγιστης τιμής.

4. Σχεδιασμός μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος για το χαρακτηρισμό μαλακών μαγνητικών υλικών

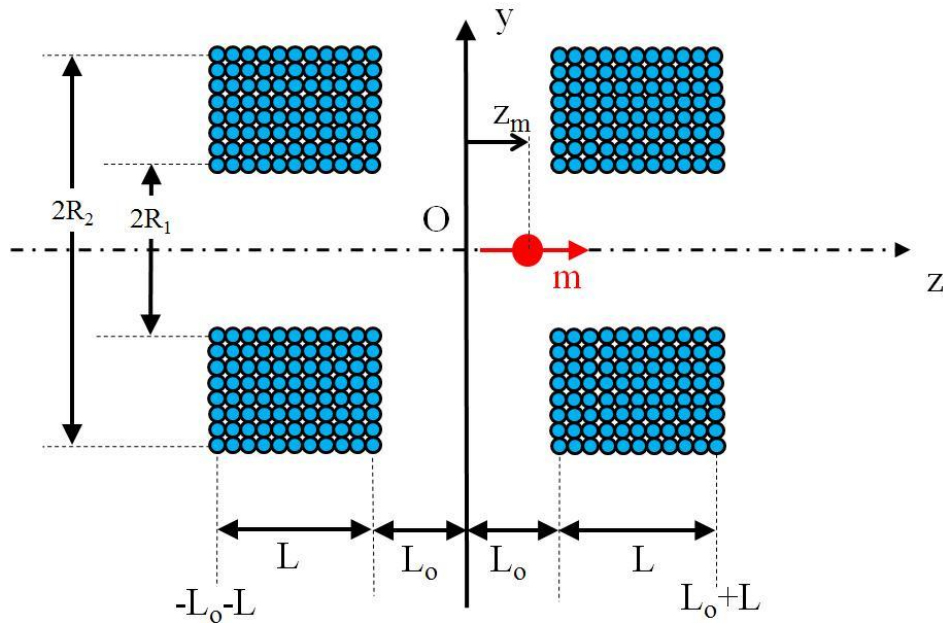
Στο μαγνητόμετρο που επιλέξαμε να κατασκευάσουμε το δείγμα βρίσκεται στο εσωτερικό ενός πηνίου που παράγει (κατά προσέγγιση) ομογενές μαγνητικό πεδίο και ταλαντώνεται σε διεύθυνση παράλληλη στο πεδίο μεταξύ ενός ζεύγους μετρητικών πηνίων.



Σχήμα 4.1 Μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος.

Αριθμητικός υπολογισμός της μαγνητικής ροής για πηνία ακτίνας $R_1 < R < R_2$.

Έως τώρα προσομοιώσαμε πηνία μίας στρώσης σύρματος. Για να προσομοιώσουμε τα πραγματικά πηνία που χρησιμοποιήσαμε γράψαμε πρόγραμμα σε FORTRAN το οποίο μπορεί και υπολογίζει αριθμητικά τη μαγνητική ροή για πηνία πολλών στρώσεων: από εσωτερική ακτίνα περιέλιξης R_1 έως εξωτερική ακτίνα περιέλιξης R_2 .



Σχήμα 4.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρότυπου για τα πηνία ανίχνευσης. Τα πηνία ανίχνευσης αποτελούνται από δύο πηνία μήκους L με N στροφές ανά μονάδα μήκους και εύρους ακτίνας (R_1, R_2) με N στρώσεις ανά μονάδα μήκους ακτίνας.

Έχουμε τετραγωνική εξάρτηση του εμβαδού των επιμέρους βρόχων ενός πραγματικού πηνίου από την ακτίνα τους που μεγαλώνει καθώς πηγαίνουμε από το εσωτερικό του πηνίου προς το εξωτερικό του.

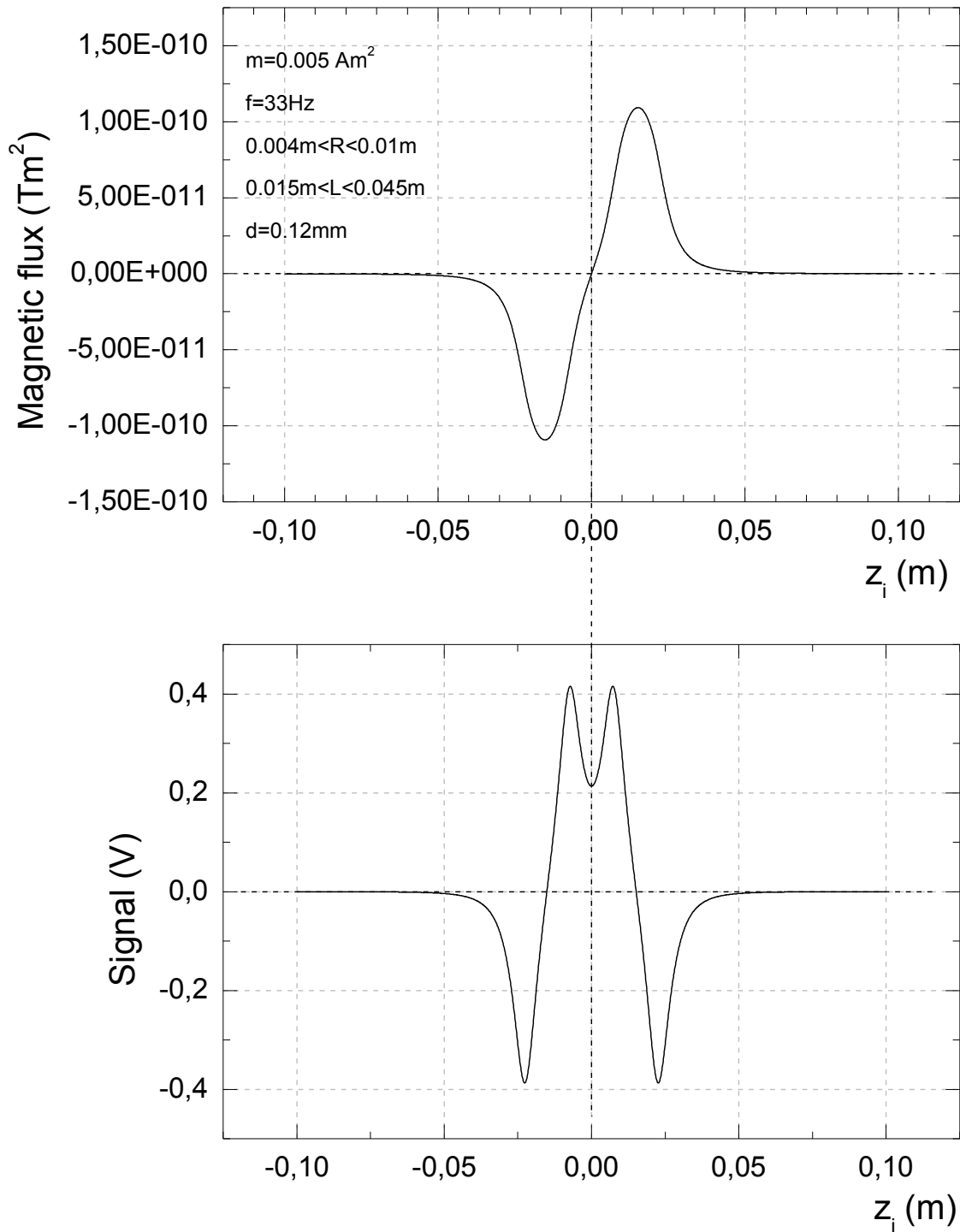
Στο ακόλουθο πρόγραμμα FORTRAN δίνουμε τις απαιτούμενες φυσικές παραμέτρους και τις διαστάσεις των πηνίων και αυτό υπολογίζει αριθμητικά τη μαγνητική ροή όλων των βρόχων των πηνίων καθώς και την επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη. Ακόμη εξάγει τα αποτελέσματα σε αρχείο χαρακτήρων (ASCII) ώστε να μπορούμε να τα προβάλουμε σε μορφή γραφήματος.

Πρόγραμμα προσομοίωσης ζεύγους πηνίων με αντίθετη περιέλιξη και απόσταση μεταξύ των πηνίων ίση με το μήκος κάθε πηνίου

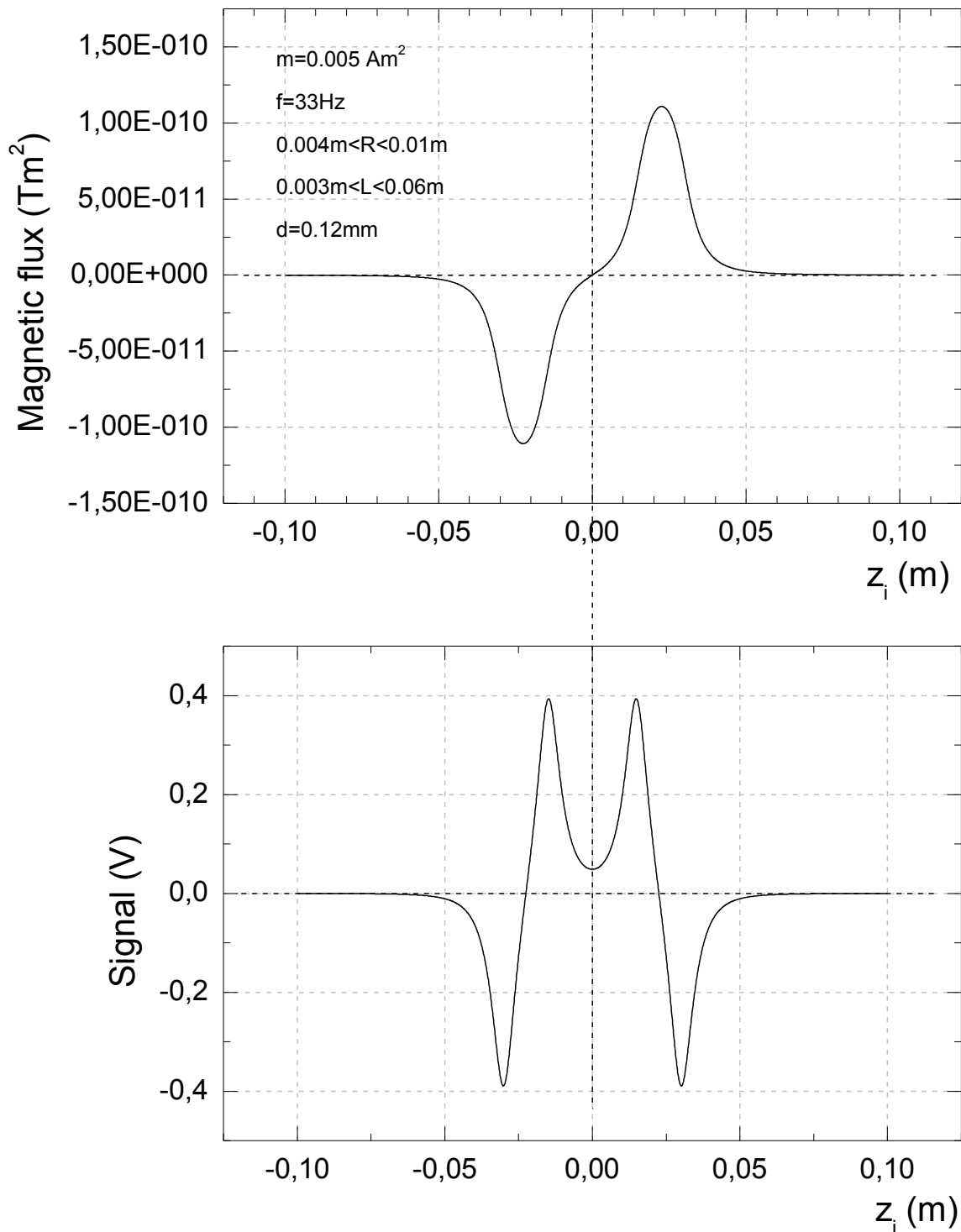
```

program simulnegative
IMPLICIT NONE
real m,m0,pi,rmin,rmax,RSTEP,lmin,lmax,L,LSTEP,r
REAL ZMIN,ZMAX,ZSTEP,VMAX,ZERO,LTEMP,flux
real a,f,V
A=0.005
f=33.0
pi=4.0*atan(1.0)
m0=4*pi*1e-7
! m in A m^2
m=5.0*0.001
rmin=0.004
rmax=0.010
rstep=0.00012
lmin=0.015
lmax=0.045
LSTEP=0.00012
ZMIN=-0.1
ZMAX=0.1
ZSTEP=0.0001
VMAX=0.0
ZERO=ZMAX
flux=0.0
Open(unit=10,file='Zsimulnegative.dat')
! negative
DO 10 z=ZMIN,ZMAX,ZSTEP
  V=0.0
  flux=0.0
  do R=rmin,rmax,rstep
    do L=LMIN,LMAX,LSTEP
      flux=flux+m0*m*(R**2)*
      &(
      & 1/(R**2+(L/2.0-z)**2)**1.5
      & - 1/(R**2+(L/2.0+z)**2)**1.5
      &)
      V=V+m0*m*(R**2)*(3.0/4.0)*(A*F)*
      &(
      & (L/2.0-z)/(R**2+(L/2.0-z)**2)**2.5
      & +(L/2.0+z)/(R**2+(L/2.0+z)**2)**2.5
      &)
    end do
  end do
  flux=flux*LSTEP*rstep
  write(10,'(F10.5,e15.7,1x,e15.7)') z,flux,V
IF (ABS(V).GE.VMAX) THEN
  VMAX=V
  ZERO=Z
ENDIF
ENDIF
10 CONTINUE
write(*,'*') ' ZERO=',ZERO,' VMAX=',VMAX
close(unit=10)
end

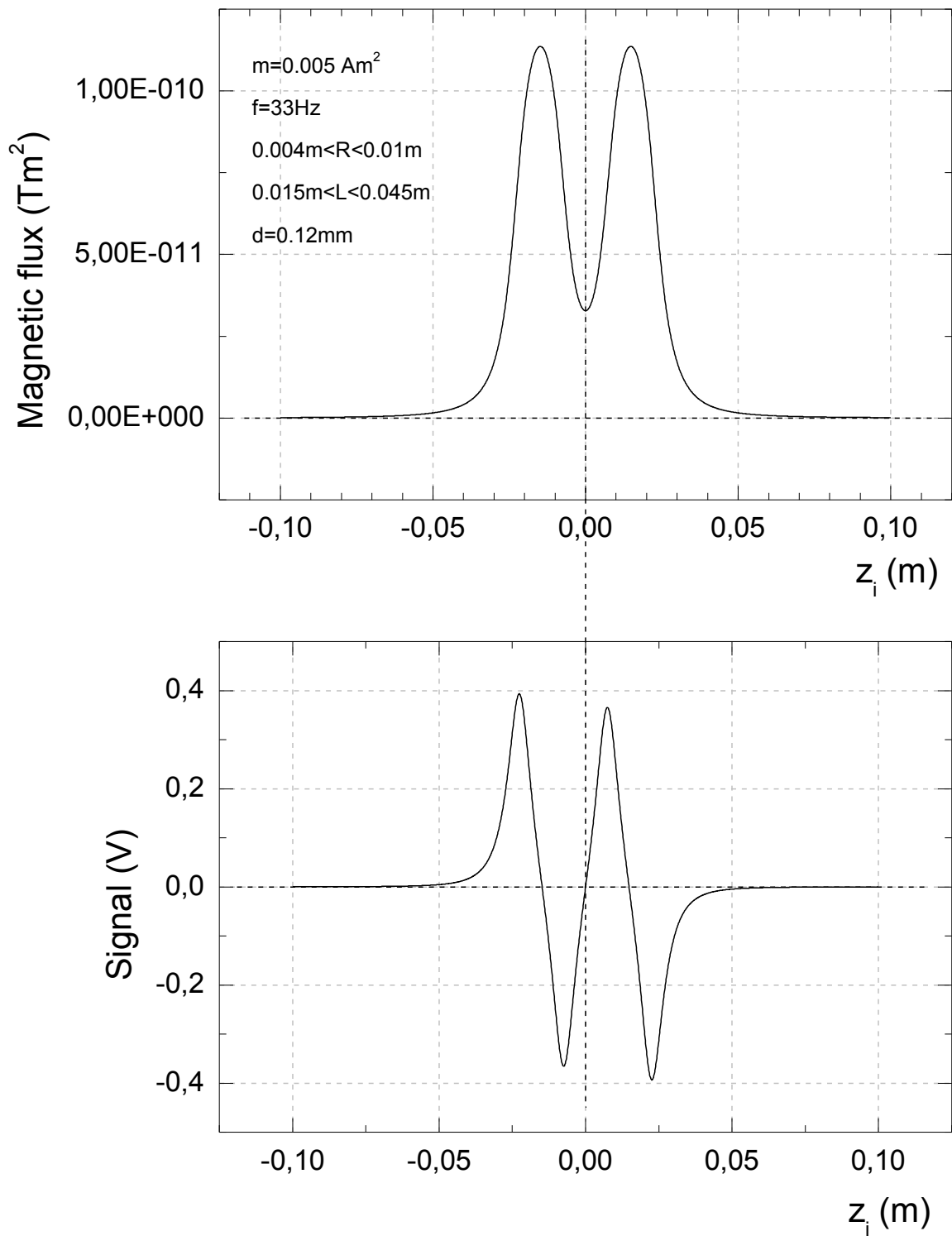
```



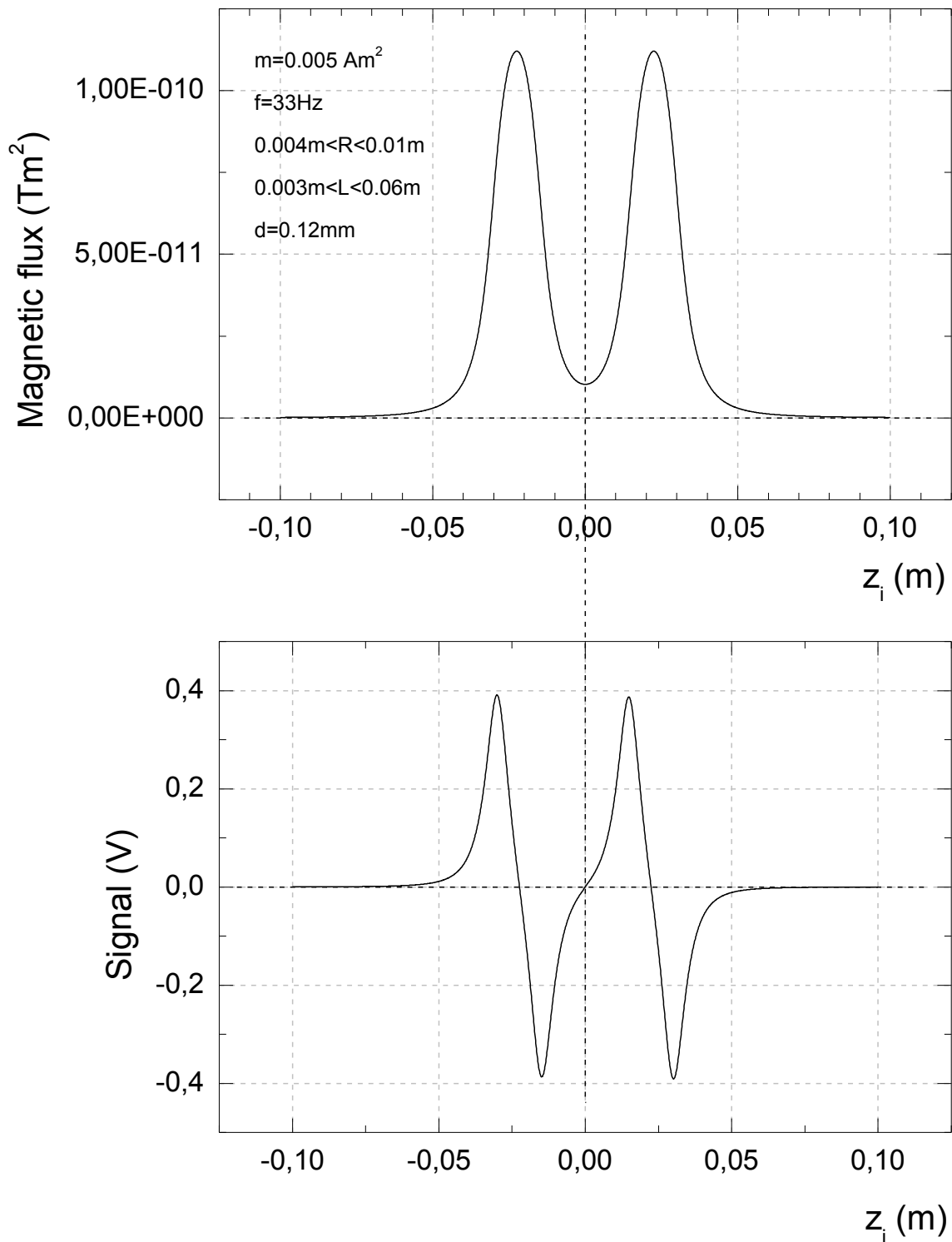
Σχήμα 4.3 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής και του πλάτους του σήματος εξόδου συναρτήσει της απόστασης της θέσης ισορροπίας του δείγματος όπως προκύπτουν από αριθμητικό υπολογισμό (πηνία με αντίθετη περιέλιξη και απόσταση μεταξύ των πηνίων ίση με το μήκος του κάθε πηνίου).



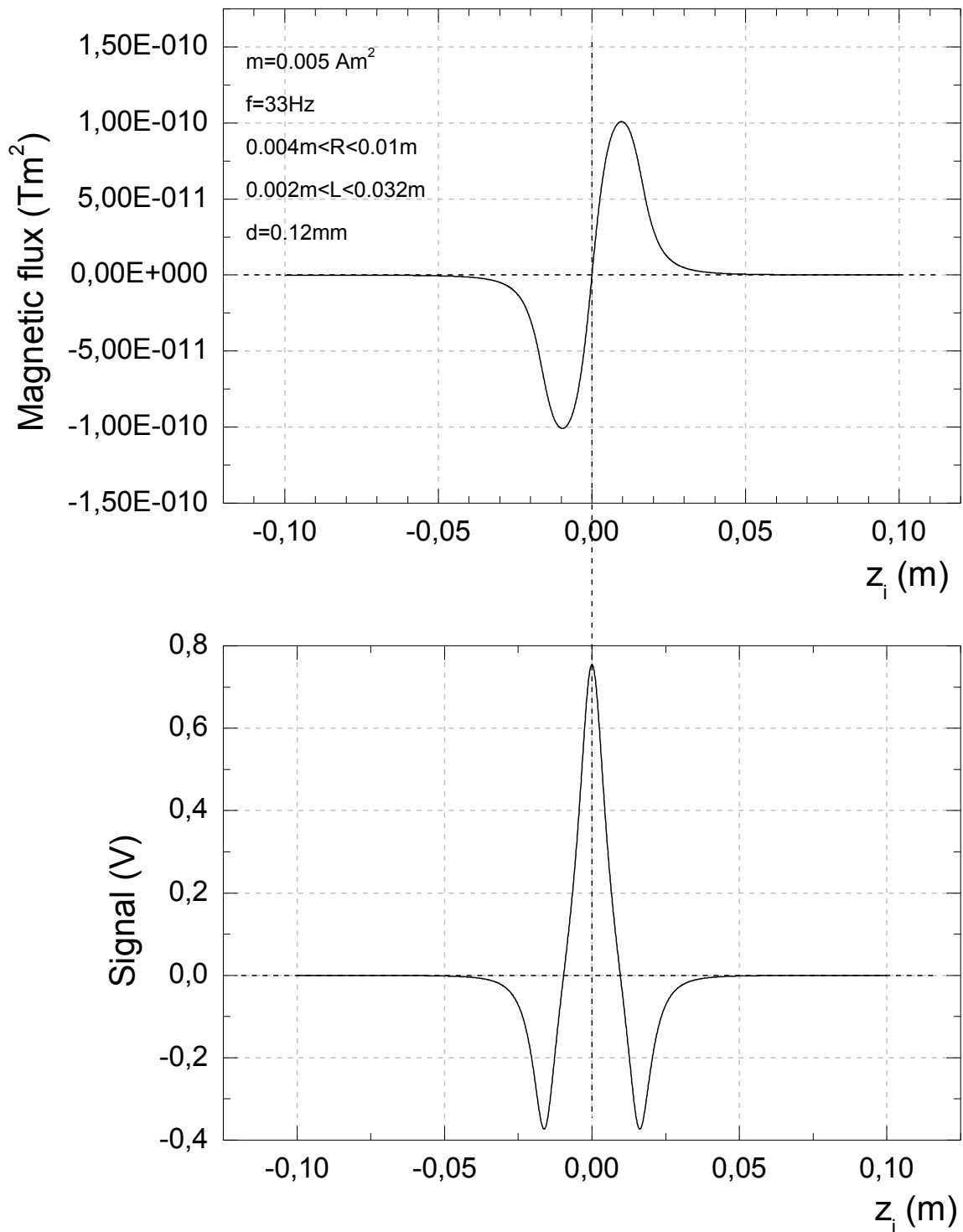
Σχήμα 4.4 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής και του πλάτους του σήματος εξόδου συναρτήσει της απόστασης της θέσης ισορροπίας του δείγματος όπως προκύπτουν από αριθμητικό υπολογισμό (πηνία με αντίθετη περιέλιξη και απόσταση μεταξύ των πηνίων διπλάσια από το μήκος του κάθε πηνίου).



Σχήμα 4.5 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής και του πλάτους του σήματος εξόδου συναρτήσει της απόστασης της θέσης ισορροπίας του δείγματος όπως προκύπτουν από αριθμητικό υπολογισμό (πηνία με ίδιας φοράς περιέλιξη και απόσταση μεταξύ των πηνίων ίση με το μήκος του κάθε πηνίου).



Σχήμα 4.6 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής και του πλάτους του σήματος εξόδου συναρτήσει της απόστασης της θέσης ισορροπίας του δείγματος όπως προκύπτουν από αριθμητικό υπολογισμό (πηνία με ίδια φοράς περιέλιξη και απόσταση μεταξύ των πηνίων διπλάσια από το μήκος του κάθε πηνίου).



Σχήμα 4.7 Μεταβολή του πλάτους της μαγνητικής ροής και του πλάτους του σήματος εξόδου συναρτήσει της απόστασης της θέσης ισορροπίας του δείγματος όπως προκύπτουν από αριθμητικό υπολογισμό (πηγία με αντίθετη περιέλιξη και απόσταση μεταξύ των πηνίων πολύ μικρή).

Για το πρόγραμμα αυτό θεωρούμε ότι το κάθε πηνίο αποτελείται από σπείρες που είναι κατανεμημένες σε σειρές και στήλες. Παίρνουμε μία σπείρα από το ένα πηνίο και τη συμμετρική της από το άλλο και υπολογίζουμε για αυτό το ζεύγος σπειρών το πλάτος της μαγνητικής ροής και το πλάτος της επαγόμενης τάσης.

Για να βρούμε τη συνολική μαγνητική ροή και τη συνολική επαγόμενη τάση εξόδου, αθροίζουμε για όλες τις σειρές και όλες τις στήλες.

Παρατηρούμε ότι οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν με αυτόν τον αριθμητικό υπολογισμό μοιάζουν με εκείνες από το Mathematica που αφορούσαν μία στρώση (αντιστοιχεί με μία σειρά εδώ). Παρατηρούμε αντίστοιχα ακρότατα, αν και τώρα οι (απόλυτες) τιμές όλων των ακρότατων δεν είναι ίσες.

Εδώ συγκρίναμε και τη σχετική απόσταση των δύο πηνίων και παρατηρούμε ότι είναι προτιμότερο να είναι ίση με το μήκος του κάθε πηνίου παρά διπλάσια. Στην περίπτωση που τα πηνία είναι μακρύτερα το ένα από το άλλο, παρατηρούμε ότι η περιοχή κοντά στο $z = 0$ διευρύνεται με αποτέλεσμα στα αντίθετης περιέλιξης πηνία να μικραίνει το σήμα εξόδου ενώ στα πηνία ίδιας περιέλιξης που το σήμα είναι μηδενικό έχουμε μεγαλύτερο εύρος περιοχής με σήμα κοντά στο μηδέν.

Όσον αφορά τη σχετική περιέλιξη του ζεύγους των μετρητικών πηνίων τα συμπεράσματα είναι ίδια με την προσομοίωση μέσω του Mathematica αφού οι γραφικές παραστάσεις έχουν ίδια μορφολογία.

Διαλέξαμε να τοποθετήσουμε το δοκίμιο στο κέντρο της διάταξης επειδή το κέντρο των πηνίων είναι ευκολότερο να το προσδιορίσουμε με

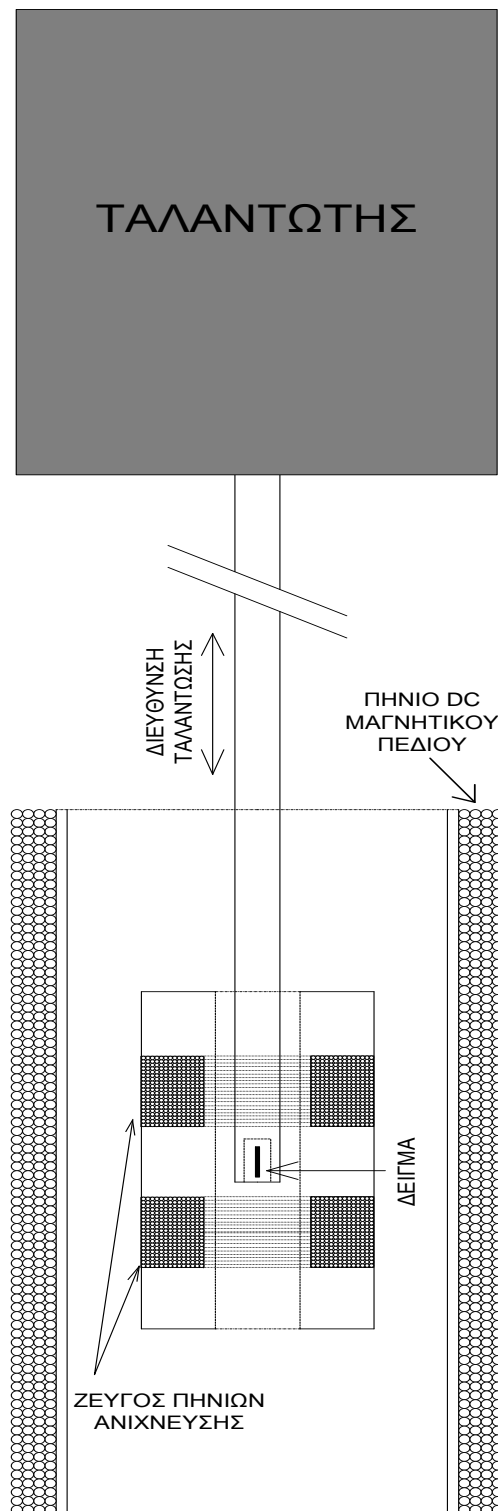
εξωτερική μέτρηση. Ένας ακόμη λόγος ήταν ότι το κέντρο απέχει περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη θέση από τα σημεία όπου το σήμα είναι μηδενικό οπότε θα είχαμε σχετικά μεγαλύτερα περιθώρια να μετρήσουμε σήμα και ας μην πετύχουμε ακριβώς τη θέση που θέλουμε καθοριστικό κυρίως για το στήσιμο της διάταξης.

Το πρόγραμμα που παραθέσαμε εδώ καθώς και το σχήμα 4.3 αφορούν τη γεωμετρία του ζεύγους πηνίων μέτρησης που χρησιμοποιήσαμε για τις μετέπειτα μετρήσεις: αντίθετης περιέλιξης πηνία και με σχετική απόσταση των πηνίων ίση με το μήκος του κάθε πηνίου. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις (σχήματα 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7), όπου χρειάζεται, αλλάξαμε μόνο τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος και το πρόσημο του δεύτερου πηνίου στις σχέσεις που υπολογίζουν τη μαγνητική ροή και το σήμα εξόδου.

Μία ακόμη παρατήρηση που ενισχύει την απόφαση να τοποθετήσουμε το δείγμα στο κέντρο είναι πως ενώ δεν έχουμε μέγιστο σήμα εξόδου στη θέση $z_i = 0$ η τιμή του είναι περίπου το $\frac{1}{2}$ της μέγιστης που βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 10mm δεξιά και αριστερά (σχήμα 4.3.β).

Τέλος, στο σχήμα 4.7.β παρατηρούμε ότι για πηνία με αντίθετη περιέλιξη και σχετική απόσταση μεταξύ των πηνίων πολύ μικρή (4mm) έχουμε μία στενή κορυφή μεγάλης έντασης για το πλάτος του σήματος εξόδου. Δεν είχαμε τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε τέτοιο ζεύγος πηνίων και για αυτό το λόγο αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε τη γεωμετρία του ζεύγους πηνίων που αντιστοιχεί στο σχήμα 4.3 όπως προείπαμε.

5. Κατασκευή μαγνητόμετρου ταλαντευόμενου δείγματος.



Σχήμα 5.1 Μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος.

Ένα μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος (σχήμα 5.1) αποτελείται από τον ταλαντωτή του δείγματος, τα πηνία ανίχνευσης και το πηνίο δημιουργίας του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Για την κατασκευή του μαγνητόμετρου χρησιμοποιήσαμε

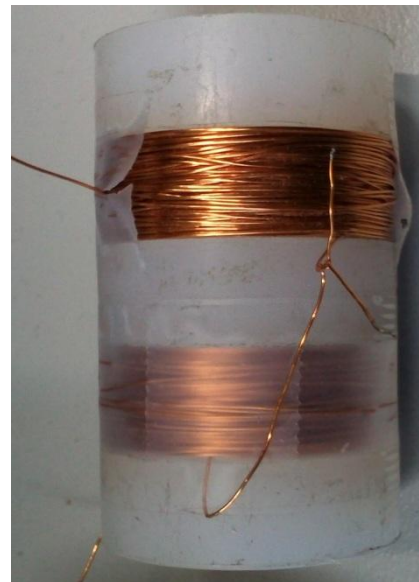
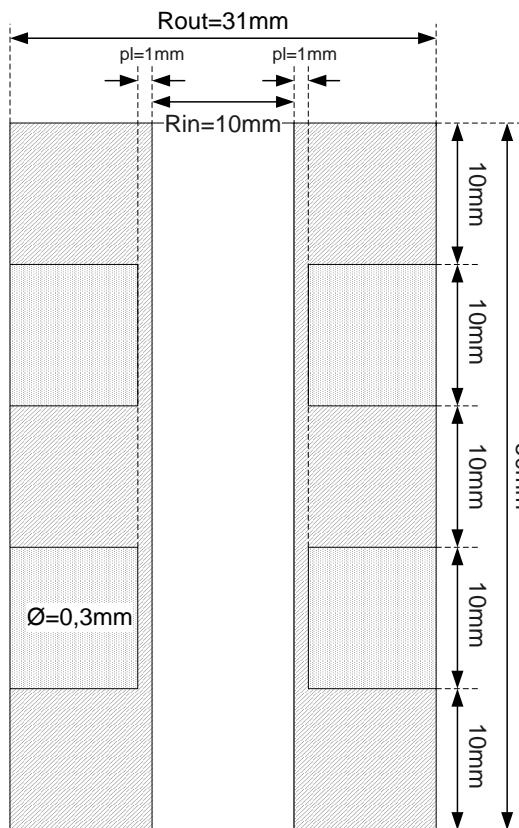
- α) ένα ταλαντωτή με τροφοδοτικό ημιτονοειδούς τάσης για την ταλάντωση του δοκιμίου (σχήμα 5.2)
- β) ένα πηνίο με τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος για τη δημιουργία του συνεχούς μαγνητικού πεδίου
- γ) δύο πηνία αντίθετα τυλιγμένα για την ανίχνευση του σήματος
- δ) ένα Lock-in Amplifier για την ανίχνευση του σήματος από τα πηνία ανίχνευσης
- ε) μία κάρτα ψηφιοποίησης σήματος της National Instruments.



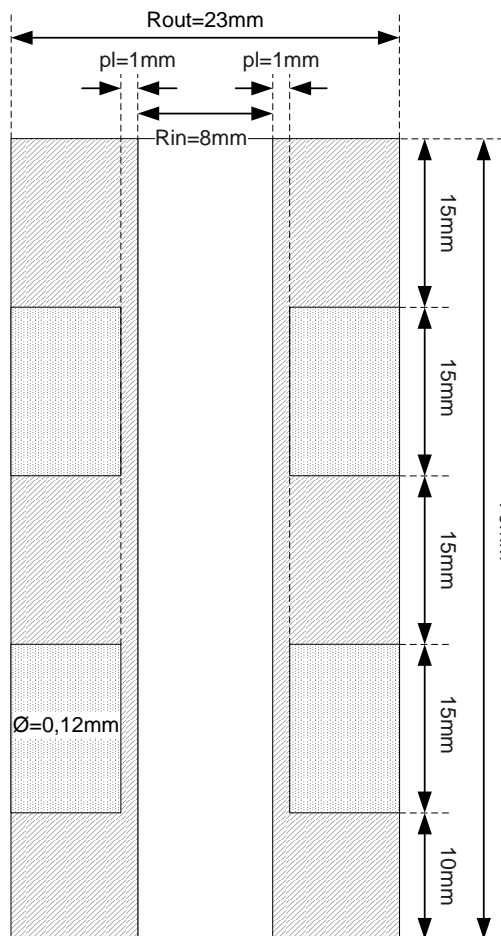
Σχήμα 5.2 Ηλεκτρομαγνητικός ταλαντωτής για την ταλάντωση του δείγματος.

Στο μηχανουργείο του ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ κατασκευάσαμε ένα κύλινδρο με δύο ομοαξονικές εσοχές (σχήμα 5.3) στις οποίες τυλίξαμε αγωγίμο σύρμα με αντίθετη φορά. Επίσης είχαμε και ένα παλαιότερο με λεπτότερο σύρμα (σχήμα 5.4). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά των πηνίων που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματά μας.

	Νέο ζεύγος πηνίων μέτρησης	Παλαιότερο ζεύγος πηνίων μέτρησης	Απλό εξωτερικό πηνίο
Υλικό	PVC γαλακτώδες	PVC λευκό	PVC γκρι
Εξωτερική διάμετρος	31 mm	23 mm	66 mm
Εσωτερική διάμετρος	10 mm	8 mm	46 mm
Συνολικό μήκος	50 mm	70 mm	200 mm
Επιμέρους πηνία	2	2	1
Υλικό σύρματος περιέλιξης	Χαλκός	Χαλκός	Χαλκός
Διατομή σύρματος	0.3 mm	0.12 mm	0.7 mm
Συνολική αντίσταση	31 Ω	75 Ω	18 Ω
Μήκος επιμέρους πηνίων	10 mm	15 mm	120 mm
Απόσταση επιμέρους πηνίων	10 mm	15 mm	-
Εύρος ακτίνας περιέλιξης	6 – 15.5 mm	5 - 11.5 mm	25 – 33 mm



Σχήμα 5.3 Διαστάσεις νέου ζεύγους πηνίων ανίχνευσης με χάλκινο σύρμα διαμέτρου διατομής 0.3mm Στη φωτογραφία φαίνεται το ζεύγος πηνίων που κατασκευάσαμε.



Σχήμα 5.4 Διαστάσεις παλαιού ζεύγους πηνίων ανίχνευσης με χάλκινο σύρμα διαμέτρου διατομής 0.12mm. Στη φωτογραφία φαίνεται αφού ξετυλίξαμε τις σπείρες για να μετρήσουμε τις εσωτερικές διαστάσεις των πηνίων (είχαν ολοκληρωθεί οι μετρήσεις)

Για τον καθορισμό των διαστάσεων των πηνίων λάβαμε υπόψη τους θεωρητικούς υπολογισμούς των κεφαλαίων 3 και 4. Από πρακτική άποψη ένα σύρμα με μικρή διατομή είναι δύσκολο να το χειριστούμε. Η διάμετρος του χάλκινου σύρματος που χρησιμοποιήθηκε (0.3 mm) ήταν σχετικά μεγάλη με άμεσο αποτέλεσμα περιορισμό στον αριθμό των σπειρών (περίπου 3000 m^{-1}). Για το λόγο αυτό αποφασίσαμε να δοκιμάσουμε και το παλαιότερο πηνίο που ήταν κατασκευασμένο με λεπτότερο σύρμα χαλκού (0.12 mm).

Για την στήριξη του δείγματος στον ταλαντωτή κατασκευάσαμε κυλινδρικές ράβδους από plexiglass διαμέτρου 5mm και μήκους περίπου 15 cm (σχήμα 5.5) . Οι συγκεκριμένοι ράβδοι από τη μία μεριά είχαν μία κυλινδρική κοιλότητα βάθους 5 mm για την στήριξη του δείγματος ενώ από την άλλη κατασκευάσαμε κατάλληλο σπείρωμα για την στήριξη της ράβδου στον ταλαντωτή. Το δείγμα στερεωνόταν στην κυλινδρική κοιλότητα με βαμβάκι ή κερί.



Σχήμα 5.5 Ράβδοι στήριξης από σωλήνα Plexiglass διαμέτρου 5mm.

Σειρά είχε η επιλογή των ηλεκτρονικών οργάνων που θα χρησιμοποιούνταν για την υλοποίηση της διάταξης.

Για να λειτουργήσουμε τον ταλαντωτή χρησιμοποιήσαμε μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (Agilent, δεξ σχήμα 5.6) της οποίας η λειτουργία μπορούσε να γίνει με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή



Σχήμα 5.6 Η πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδότησης του ταλαντωτή.

Οι αρχικές λειτουργίες της διάταξης έγιναν χρησιμοποιώντας ένα μικρό μόνιμο μαγνήτη σαν δείγμα. Από τους θεωρητικούς υπολογισμούς γνωρίζουμε ότι σήμα στο μέσον της απόστασης των κέντρων των πηνίων ανίχνευσης θα πρέπει να εμφανίζει τοπικό ελάχιστο. Μεταβάλλοντας τη θέση του δείγματος σε σχέση με το κέντρο με μικρά βήματα επαληθεύσαμε ότι πράγματι το σήμα έχει τη μορφή που αναμέναμε (δες σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7 Οι πρώτες δοκιμαστικές μετρήσεις με δείγμα ένα κομμάτι μόνιμου μαγνήτη στο ζεύγος πηνίων με την πυκνότερη τύλιξη σύρματος.

Αυτός ο έλεγχος επαλήθευσε ότι τα πηνία ανίχνευσης είχαν τυλιχτεί με τη σωστή φορά.



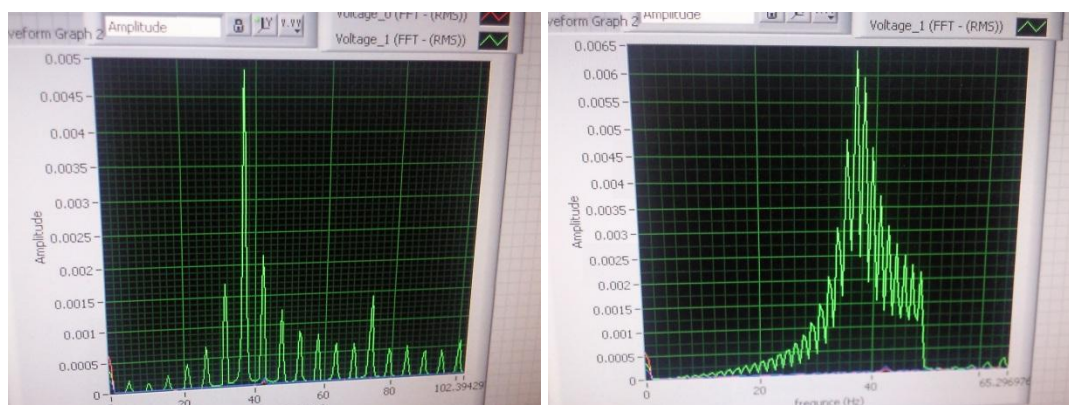
Σχήμα 5.8 Δοκιμαστική συνδεσμολογία του μετρητικού ζεύγους πηνίων (pick-up coils) με την λιγότερο πυκνή τύλιξη σύρματος.

Μεταβάλλοντας χειροκίνητα την συχνότητα της ημιτονοειδούς τάσης από 0 έως 100 Hz και μετρώντας το σήμα των πηνίων αντίχνευσης με ένα ψηφιακό βολτόμετρο προσδιορίσαμε τη βέλτιστη συχνότητα λειτουργίας του ταλαντωτή. Βέλτιστή λειτουργία είχαμε όταν η συχνότητα ήταν $f = 33$ Hz.



Σχήμα 5.9 Το ψηφιακό βολτόμετρο που χρησιμοποιήσαμε για τις πρώτες μετρήσεις.

Ακόμη, επαληθεύσαμε ότι το σήμα εξόδου είναι ανάλογο του πλάτους της ταλάντωσης. Όμως είχαμε μέγιστο πλάτος ταλάντωσης $A = 5mm$ για συχνότητα $f = 33$ Hz κάτι που εξαρτάται από τη λειτουργία του ταλαντωτή.



Σχήμα 5.10 Είχαμε μέγιστο σήμα για συχνότητα ταλάντωσης 33 Hz.

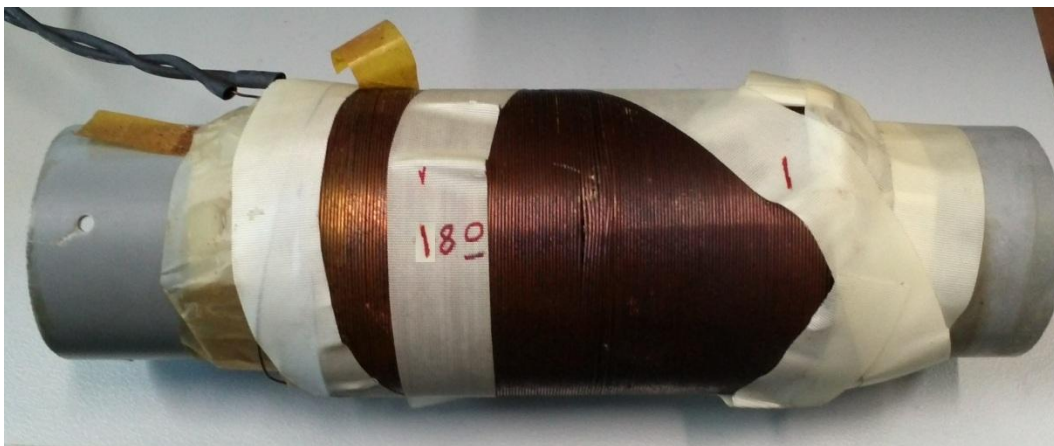
Για την τροφοδοσία του πηνίου δημιουργίας του dc-μαγνητικού πεδίου (πρωτεύον πηνίο) χρησιμοποιήσαμε μία πηγή σταθερού ρεύματος μεγάλης ακρίβειας της εταιρίας (KETHELEY) (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 Η πηγή σταθερού ρεύματος με την οποία τροφοδοτήσαμε το πηνίο που δημιουργεί το DC μαγνητικό πεδίο για τη μαγνήτιση του δείγματος.

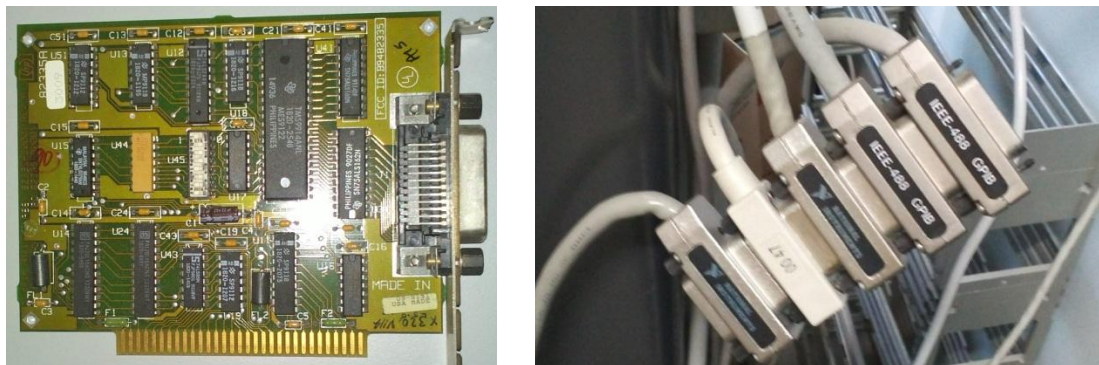
Για τη βαθμολόγηση του πρωτεύοντος πηνίου (σχήμα 5.12) χρησιμοποιήσαμε ένα φορητό Gaussmeter της εταιρίας Lackshore. Βρέθηκε ότι στο κέντρο του σωληνοειδούς, για ένταση ρεύματος 1 A, η μαγνητική επαγωγή ήταν 170 Gauss. Επίσης παρατηρήσαμε ότι κοντά στη θέση όπου θα ταλαντώνεται το δείγμα δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι όταν το πρωτεύων πηνίο διαρρεόταν από ρεύμα μεγάλης έντασης για μεγάλο χρονικό διάστημα θερμαινόταν με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του. Επειδή όμως η τροφοδοσία γινόταν από πηγή σταθερού ρεύματος δεν είχαμε διακυμάνσεις του dc-μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 5.12 Το εξωτερικό πηνίο που είναι υπεύθυνο για τη μαγνήτιση του δείγματος (το χτύπημα στο κέντρο των περιελίξεων έγινε μετά το τέλος των μετρήσεων).

Τα όργανα του μαγνητόμετρου ελεγχόταν από ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω μίας κάρτας PCI GPIB (IEEE-488) της National Instrument (σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13 Η PCI κάρτα του υπολογιστή και τα βύσματα των διαφόρων οργάνων ενωμένα μεταξύ τους πριν συνδεθούν με τον υπολογιστή.

Για την ψηφιοποίηση του σήματος των πηνίων ανίχνευσης, χρησιμοποιήσαμε την κάρτα συλλογής δεδομένων (data acquisition card) NI 9162/BNC της National Instruments (σχήμα 5.14) με δυνατότητα ταυτόχρονης συλλογής δεδομένων από τέσσερα κανάλια. Η συγκεκριμένη κάρτα συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω θύρας USB. Με αυτήν τη κάρτα είχαμε τη δυνατότητα να συλλέγουμε τα δεδομένα από τα πηνία ανίχνευσης απευθείας στον υπολογιστή χωρίς την παρέμβαση κάποιου άλλου οργάνου.



Σχήμα 5.14 Κάρτα συλλογής δεδομένων (data acquisition card) USB NI 9162 της National Instruments με ακροδέκτες BNC.

Για να συγκρίνουμε και να ελέγξουμε τα δεδομένα που λαμβάναμε με την κάρτα της National Instruments χρησιμοποιήσαμε επιπρόσθετα και ένα ενισχυτή Lockin (Model SR830 DSP Stanford Research Systems σχήμα 5.15) για την μέτρηση του σήματος από τα πηνία ανίχνευσης.



Σχήμα 5.15 Ο Lock-In Amplifier (Model SR830 DSP) της εταιρίας Stanford Research Systems.

Ο ενισχυτής Lock-In (γνωστός και ως ανιχνευτής ευαίσθητος στη φάση του σήματος **phase-sensitive detector**) μπορεί να μετρήσει και να ενισχύσει ένα σήμα ορισμένης συχνότητας f το οποίο βρίσκεται σε φάση με ένα σήμα αναφοράς το οποίο διεγείρει τη μετρητική διάταξη. Στην περίπτωση μας είναι η ημιτονοειδής τάση που κινεί το δείγμα. Σε

ένα ενισχυτή Lockin, αρχικά το σήμα υφίσταται προ-ενίσχυση, διαμορφώνεται με το σήμα αναφοράς [η διαμόρφωση παράγει ένα dc-σήμα ($f-f=0$) και ένα σήμα συχνότητας $2f$ ($f+f=2f$)] και κατόπιν περνά από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο εξαιρετικά στενού εύρους συχνοτήτων με αποτέλεσμα να διέρχεται μόνο το σήμα του είναι σε φάση με το σήμα αναφοράς (το dc-σήμα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην ενισχύεται ο θόρυβος. Το τελικό dc-σήμα ενισχύεται από 0-10 volts για κάθε κλίμακα σήματος.

6. Ανάπτυξη λογισμικού για τη λειτουργία του μαγνητόμετρου

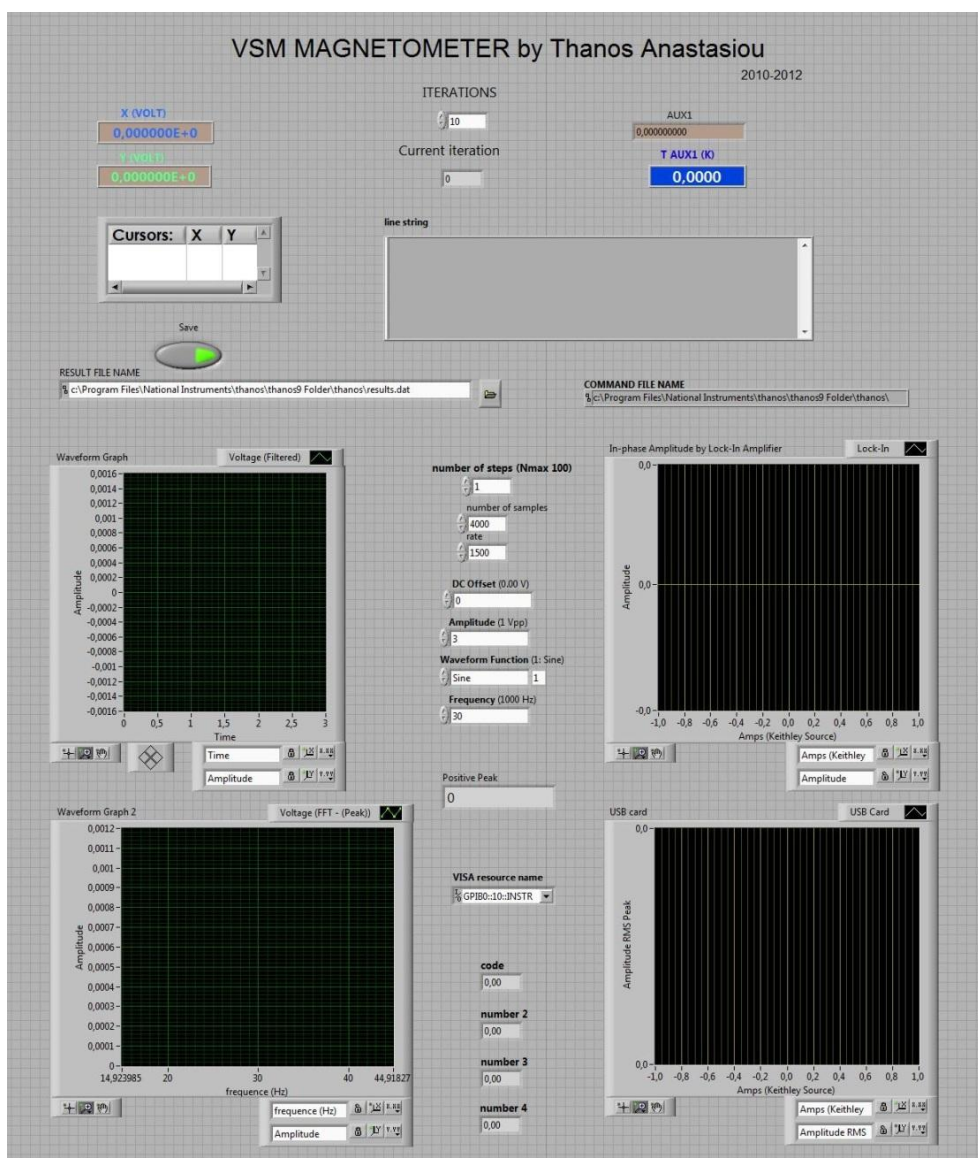
Για το έλεγχο των οργάνων και την καταγραφή των μετρήσεων αναπτύξαμε κατάλληλο λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW της National Instruments. Η γλώσσα LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) είναι ένα προγραμματιστικό περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού για τον έλεγχο εργαστηριακών συσκευών, γραφικής απεικόνισης και αποθήκευσης των μετρήσεων. Στη συγκεκριμένη γλώσσα οι εντολές έχουν αντικατασταθεί με γραφήματα και το πρόγραμμα μοιάζει με ηλεκτρικό κύκλωμα. Επίσης προσφέρει και πολλές διευκολύνσεις όπως ρουτίνες για την απεικόνιση των μετρήσεων, την επεξεργασία τους (φιλτράρισμα, fast Fourier transform κλπ) και την αποθήκευση τους σε αρχείο. Για την κατασκευή του προγράμματος του μαγνητόμετρου ακολουθήσαμε τη μεθοδολογία των «εντολών προς εκτέλεση». Το πρόγραμμα διαβάζει ένα αρχείο χαρακτήρων το οποίο περιέχει τις εντολές με τις παραμέτρους κάθε μέτρησης και τις εκτελεί τη μία μετά την άλλη. Αυτή η μεθοδολογία μας δίνει την δυνατότητα να μετράμε με διαφορετικά βήματα dc-μαγνητικού πεδίου τον βρόγχο μαγνήτισης ή/και διαφορετικές παραμέτρους μέτρησης (πχ στα σημεία που αναμένουμε μικρότερο σήμα χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων).

Ο προγραμματισμός στο LabVIEW γίνεται μέσα από δύο οθόνες: το Front Panel και το Block Diagram. Κάθε εργαλείο που χρησιμοποιούμε εμφανίζεται και στις δύο οθόνες. Στο Front Panel έχουμε την αλληλεπίδραση με το χρήστη που κάνει τη μέτρηση ενώ στο Block Diagram βλέπουμε τη ροή της πληροφορίας και τον τρόπο λειτουργίας της εικονικής διάταξης. Βέβαια, κάθε εργαλείο έχει δικό του μενού για τη λεπτομερή ρύθμιση της λειτουργίας του.

A) Front Panel

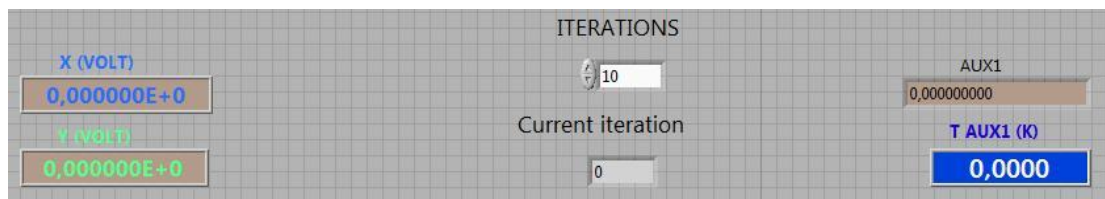
Το Front Panel αποτελεί την εξωτερική οθόνη από την οποία τρέχουμε το πρόγραμμα. Από αυτήν την οθόνη με την βοήθεια «κουμπιών ελέγχου» σε πραγματικό χρόνο ρυθμίζουμε την λειτουργία των οργάνων του μαγνητόμετρου και τις παραμέτρους του πειράματος.

Στην ίδια οθόνη εμφανίζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων x-y. Τα συγκεκριμένα παράθυρα έχουν ενσωματωμένα εργαλεία μεγέθυνσης και ανάγνωσης.

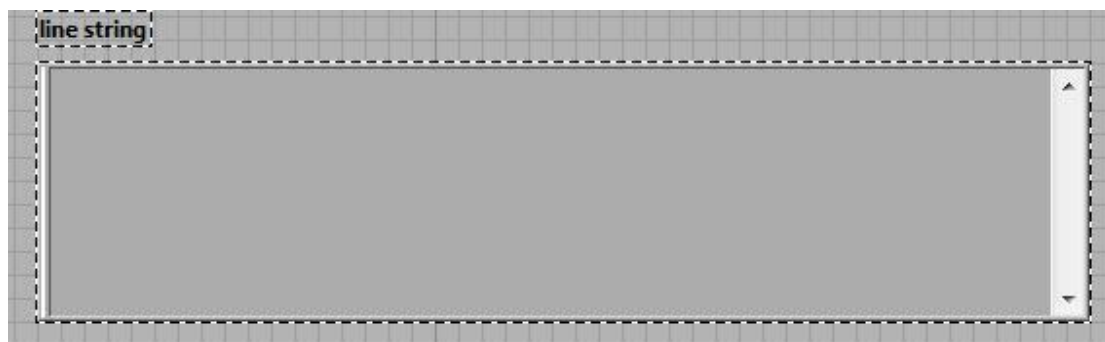


Σχήμα 6.1 Το Front Panel του προγράμματος που δημιουργήσαμε στο LabVIEW.

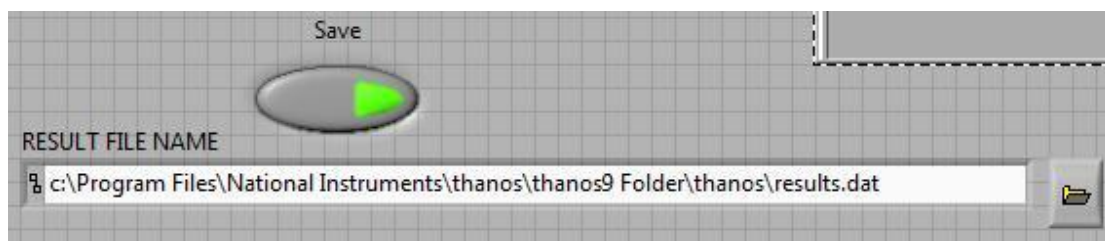
Ακολουθεί επεξήγηση των επιμέρους τμημάτων του Front Panel:



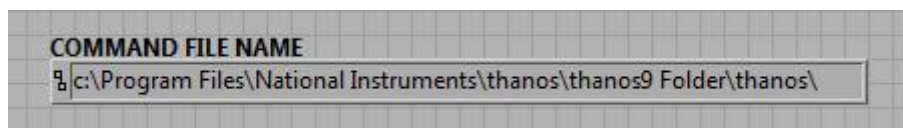
Σχήμα 6.2 Αριστερά βλέπουμε ανά πάσα στιγμή τις τρέχουσες τιμές που μετρά ο Lock in Amplifier. Στο κέντρο ορίζουμε αρχικά τον αριθμό των επαναλήψεων της μέτρησης από τον Lock in Amplifier και από κάτω βλέπουμε την τρέχουσα τιμή. Δεξιά έχουμε την τρέχουσα τιμή δύο ακόμη μεγεθών που λαμβάνουμε από το ίδιο όργανο.



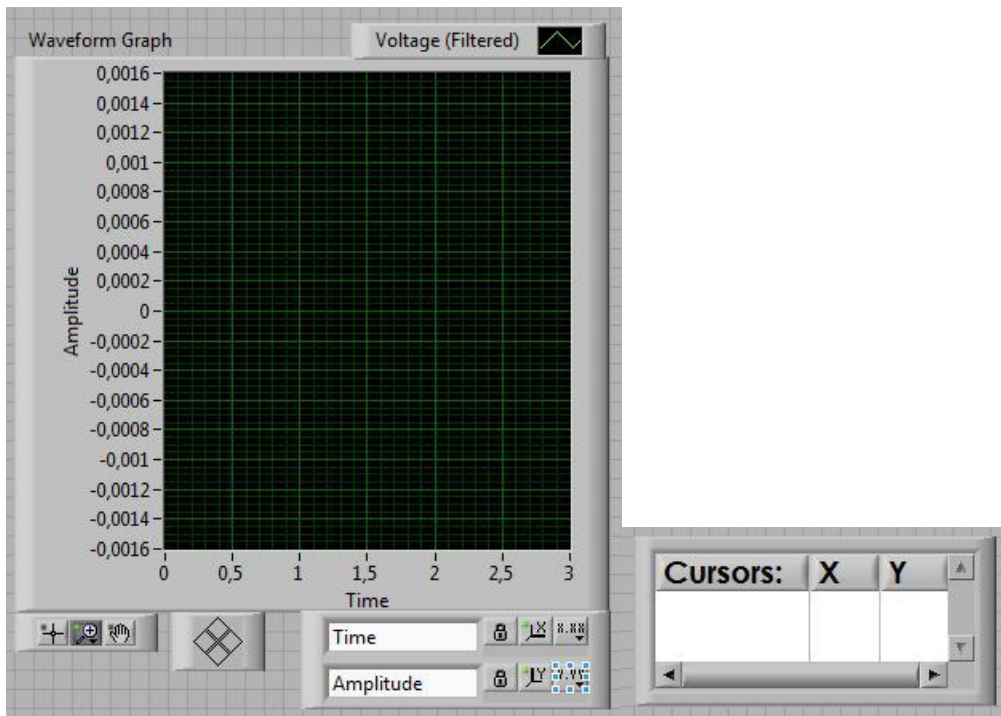
Σχήμα 6.3 Σ' αυτό το παράθυρο χαρακτήρων εμφανίζονται οι εντολές για την εκτέλεση των μετρήσεων.



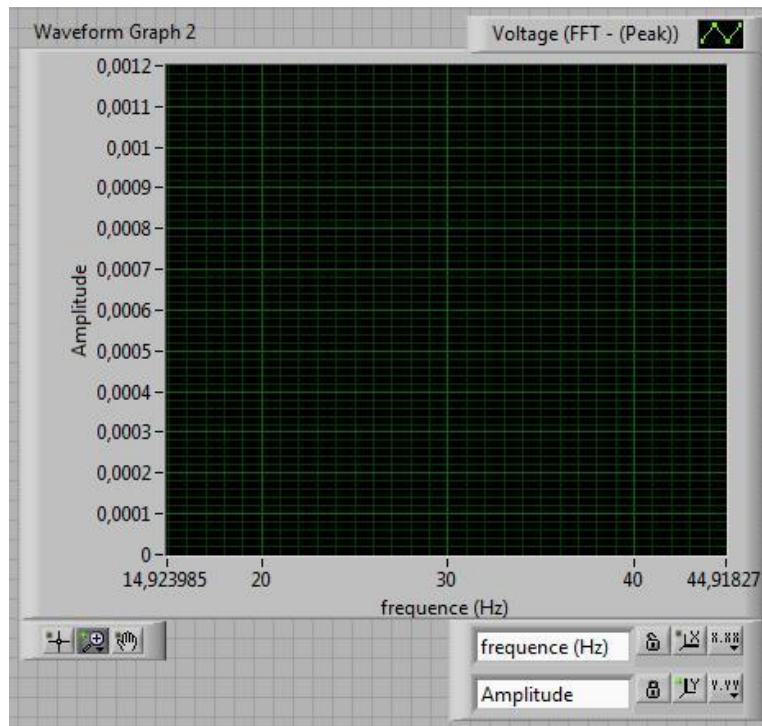
Σχήμα 6.4 Η διεύθυνση του αρχείου εξόδου των αποτελεσμάτων όπου καταγράφεται το σήμα εξόδου τόσο από την κάρτα όσο και από τον Lock in Amplifier. Παρατηρούμε και το κουμπί Save από το οποίο ελέγχουμε αν θα καταγραφεί ή όχι η τρέχουσα μέτρηση.



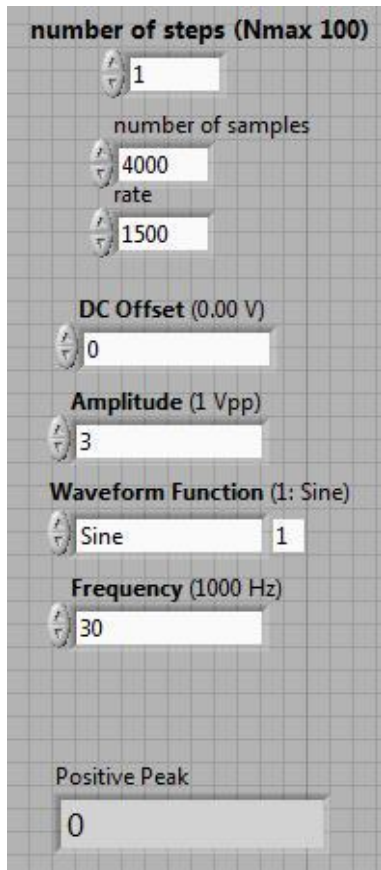
Σχήμα 6.5 Η διαδρομή στο δίσκο όπου το πρόγραμμα θα ψάξει για το αρχείο χαρακτήρων που περιέχει τις εντολές με τις παραμέτρους της μέτρησης.



Σχήμα 6.6 Σ' αυτό το γράφημα σχεδιάζονται η κυματομορφή από τη γεννήτρια ημιτονοειδούς σήματος.



Σχήμα 6.7 Σ' αυτό το γράφημα σχεδιάζονται η κυματομορφή του σήματος από τα πηνία αντίχνευσης όπως την μετρά η κάρτα της National Instruments αφού πρώτα έχει φιλτραριστεί αριθμητικά από μία ρουτίνα που λειτουργεί ως πολύ στενό ζωνοπερατό φίλτρο (συγκρατούμε μόνο τη στενή περιοχή γύρω από τα 33 Hz).



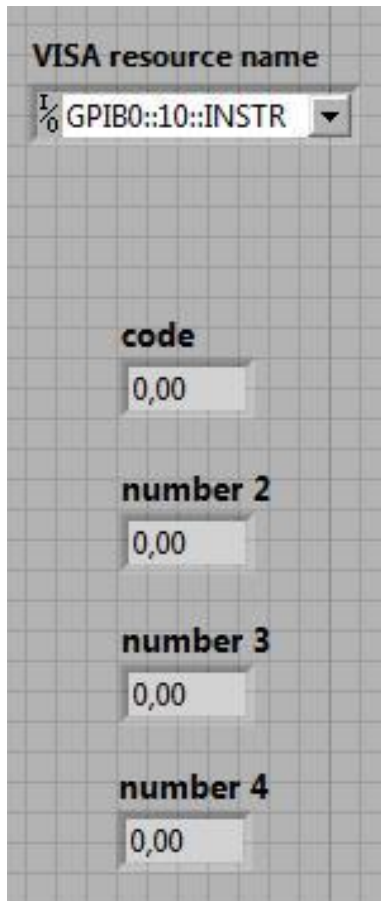
Σχήμα 6.8 Τα τρία πρώτα εργαλεία σχετίζονται με τον ορισμό μεταβλητών που χρειάζονται για τη λειτουργία της κάρτα που μετρά το σήμα εξόδου των πηνίων.

Κατά σειρά τον αριθμό των επαναλήψεων με μέγιστη τιμή τις 100 επαναλήψεις, τον αριθμό των δειγμάτων και τη συχνότητα δειγματοληψίας.

Τα επόμενα τέσσερα εργαλεία σχετίζονται με τον ορισμό παραμέτρων λειτουργίας της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί τον ταλαντωτή.

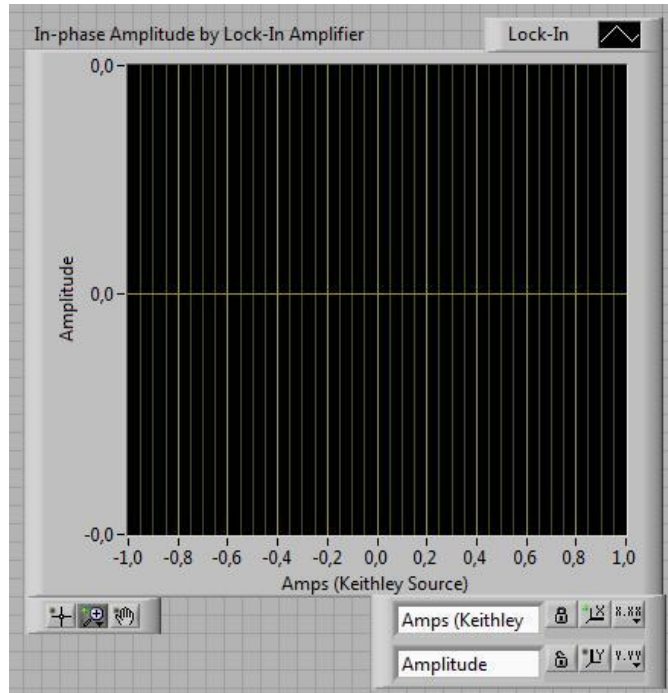
Κατά σειρά τη μέση τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος, το πλάτος, την κυματομορφή (το είδος του παλμού) και τη συχνότητα.

Τέλος το Positive Peak μας δίνει την τρέχουσα μέγιστη τιμή του σήματος όπως τη μετρά η κάρτα συλλογής δεδομένων NI 9162/BNC την οποία το πρόγραμμα εγγράφει στο αρχείο εξόδου.

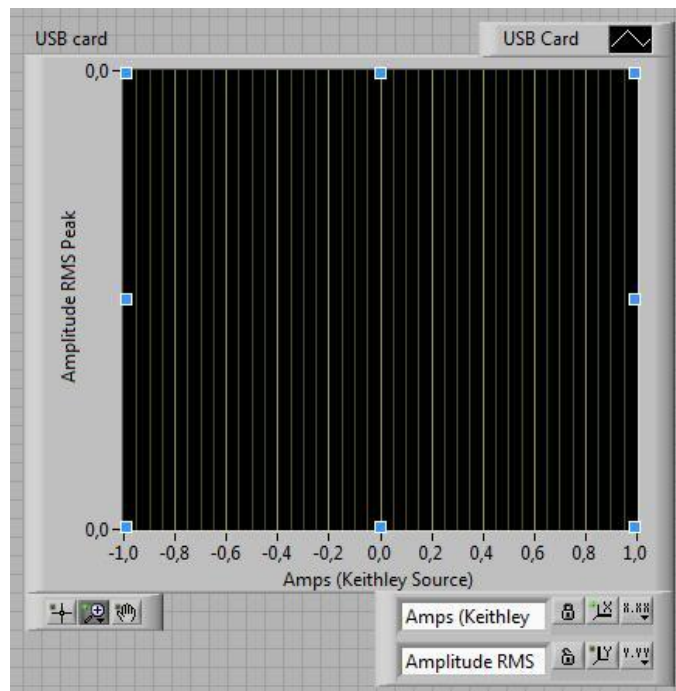


Σχήμα 6.9 Το VISA resource name είναι το εργαλείο στο οποίο ορίζουμε την ηλεκτρονική διεύθυνση της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί τον ταλαντωτή.

Τα υπόλοιπα τέσσερα εργαλεία εμφανίζουν τις τρέχουσες τιμές κάποιων άλλων παραμέτρων που προκύπτουν από την ανάλυση του αρχείου εισόδου το οποίο περιέχει πληροφορίες για τη διακύμανση του DC μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης.



Σχήμα 6.10 Αυτό το γράφημα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του πλάτους του σήματος που μετρά ο ενισχυτής Lockin, από τα πηνία ανίχνευσης σαν συνάρτηση του ρεύματος που ρέει στο πηνίο δημιουργίας του dc-μαγνητικού πεδίου.

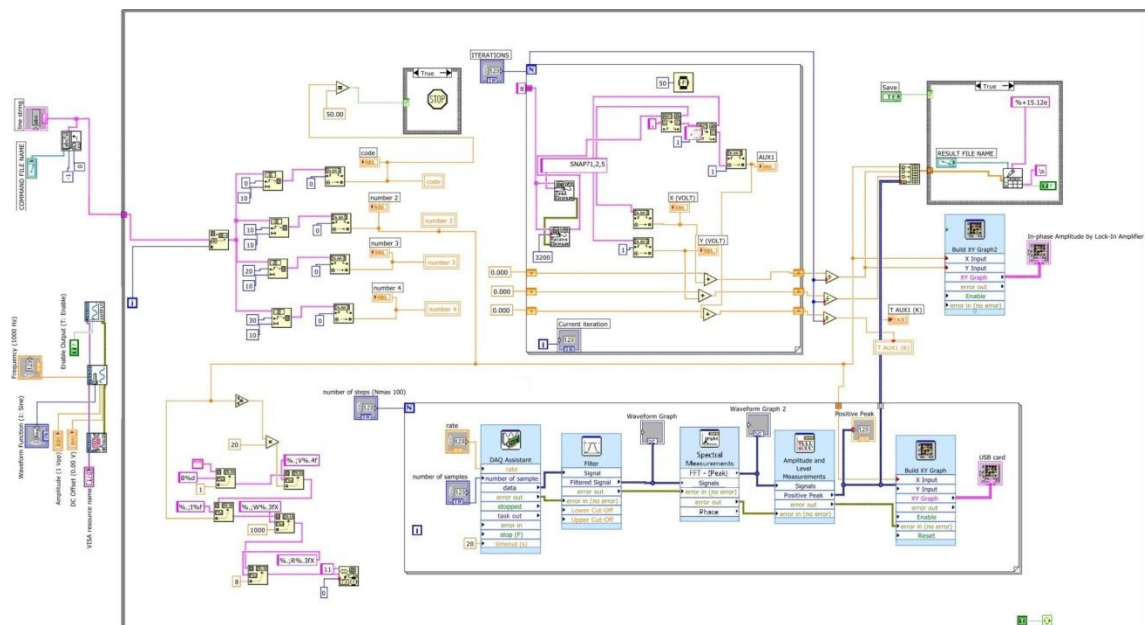


Σχήμα 6.11 Αυτό το γράφημα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του πλάτους του σήματος από τα πηνία ανίχνευσης σαν συνάρτηση του ρεύματος που ρέει στο πηνίο δημιουργίας του dc-μαγνητικού πεδίου, όπως αυτό καταγράφεται από τη κάρτα συλλογής δεδομένων NI 9162/BNC

B) Block Diagram

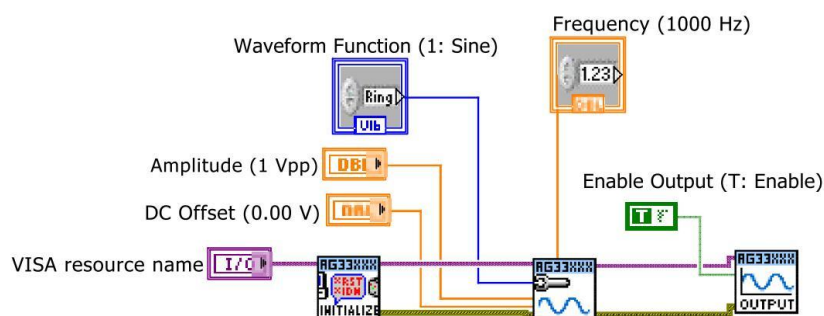
Το Block Diagram αποτελεί την οθόνη μέσα από την οποία γίνεται ο κυρίως προγραμματισμός στο LabVIEW.

Σε αυτήν την οθόνη τοποθετούμε τα διάφορα όργανα, τα ενώνουμε μεταξύ τους με εικονικά καλώδια τα οποία μεταφέρουν τις πληροφορίες και επίσης τοποθετούμε όσα εργαλεία χρειαζόμαστε για την λήψη, την επεξεργασία και την παρουσίαση των δεδομένων – αποτελεσμάτων.

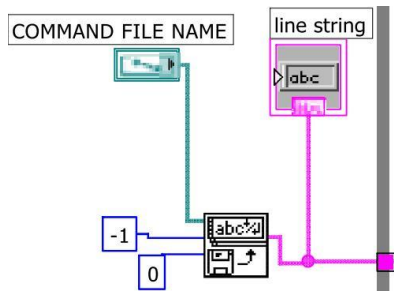


Σχήμα 6.12 Το Block Diagram του προγράμματος που δημιουργήσαμε στο LabVIEW.

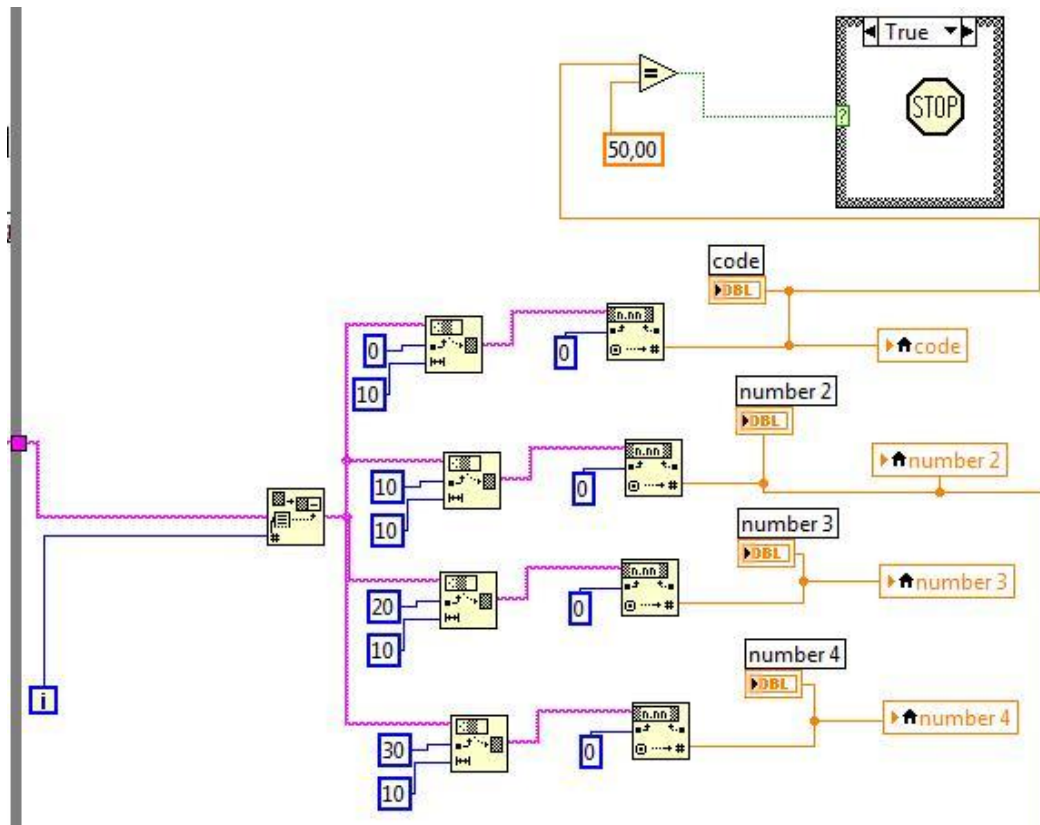
Ακολουθεί επεξήγηση των επιμέρους τμημάτων του Block Diagram:



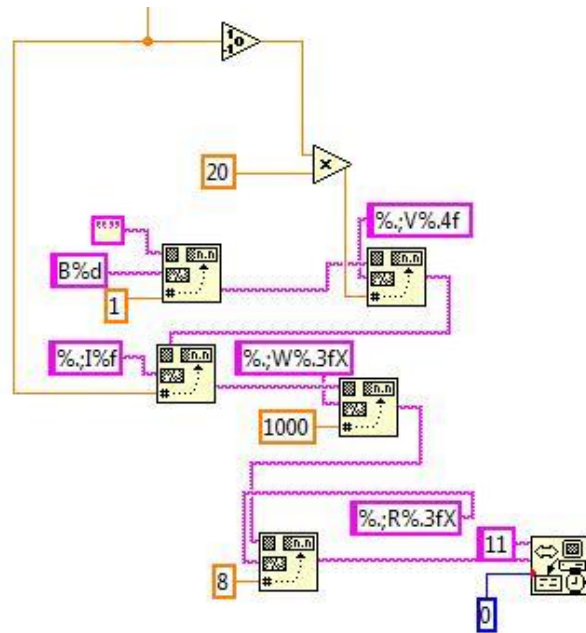
Σχήμα 6.13 Τα εργαλεία ελέγχου της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί τον ταλαντωτή.



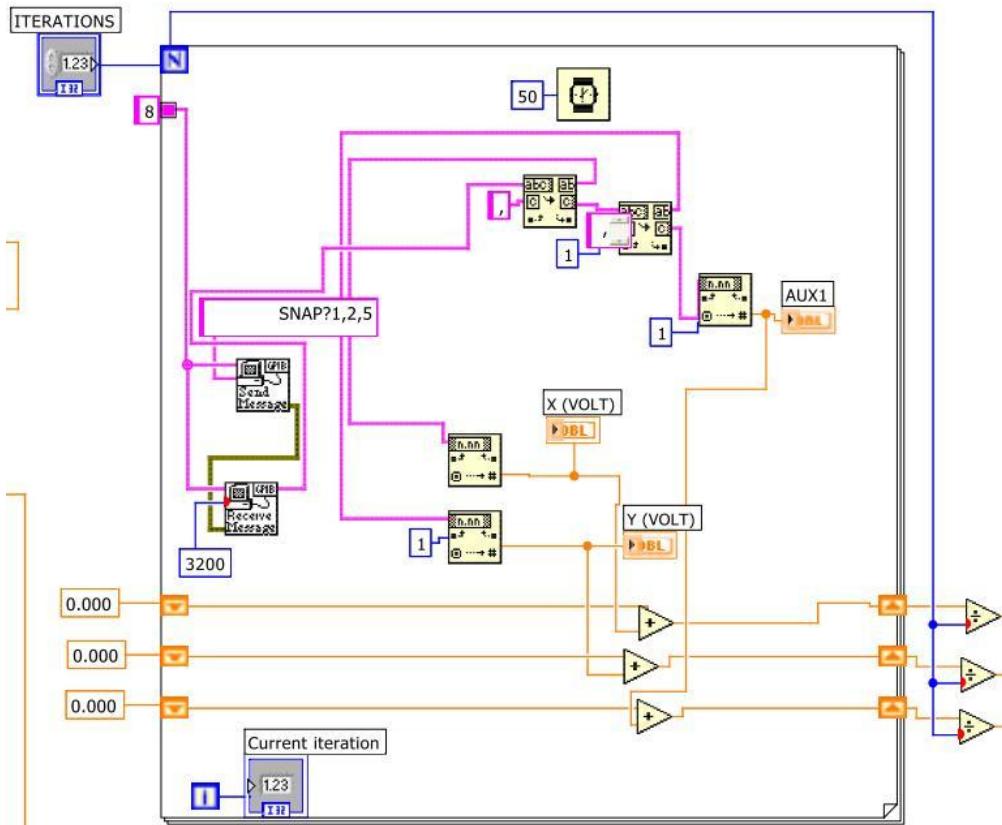
Σχήμα 6.14 Αυτό το τμήμα του κώδικα χρησιμοποιείται για να διαβάσει τις εντολές από το αρχείο εντολών, που αντιστοιχούν στο dc μαγνητικό πεδίο (ένταση ρεύματος στο πηνίο).



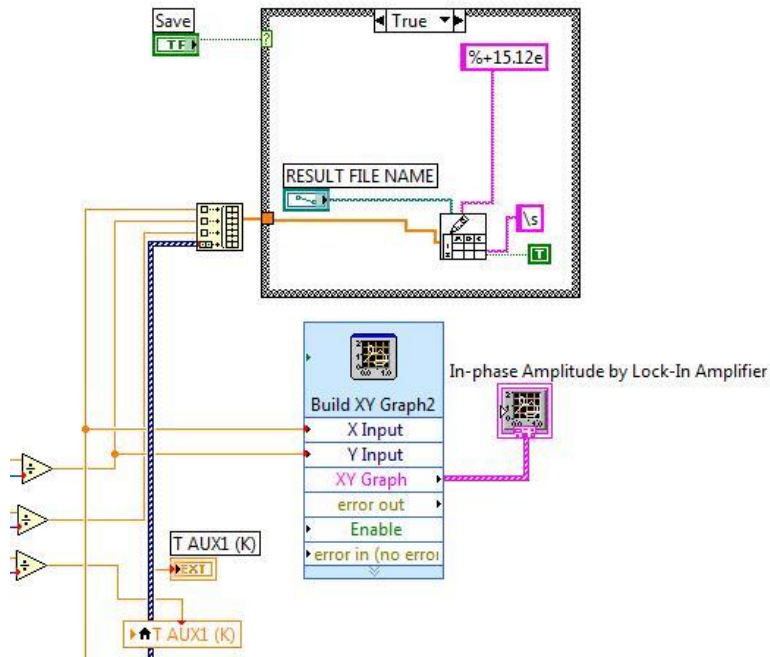
Σχήμα 6.15 Ο διαχωρισμός των δεδομένων εισόδου και τα στοιχεία διαμοιρασμού τους για τη χρήση τους από το υπόλοιπο πρόγραμμα. Πάνω φαίνεται ένα στοιχείο ελέγχου που καθορίζει πότε θα σταματήσει το πρόγραμμα (όταν η τιμή code = 50 έχουμε τον τερματισμό του προγράμματος). Η τιμή number 2 αντιπροσωπεύει το μέτρο της έντασης του ρεύματος του DC μαγνητικού πεδίου.



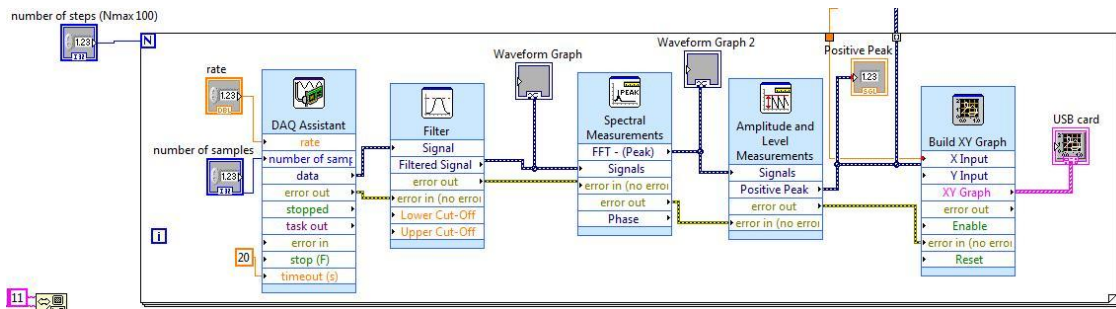
Σχήμα 6.16 Κώδικας για την ερμηνεία των εντολών του αρχείου εντολών.



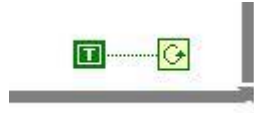
Σχήμα 6.17 Το πλαίσιο ελέγχου λειτουργίας του ενισχυτή Lock in και η έξοδος των μέσων τιμών του σήματος σε κάθε θέση για χρήση από το υπόλοιπο πρόγραμμα. Το πλαίσιο αυτό θα εκτελεστεί όσες φορές ορίσαμε εμείς στο εργαλείο που φαίνεται στο σχήμα 6.2 στο κέντρο (ITERATIONS).



Σχήμα 6.18 Στο πάνω μέρος του σχήματος έχουμε τη συγκέντρωση των δεδομένων μέτρησης από την κάρτα και τον Lock in Amplifier και την προώθησή τους στο πλαίσιο που περιέχει τις εντολές για να εξαχθούν ως αρχείο χαρακτήρων (ASCII FILE) του οποίου το όνομα ελέγχουμε από το Front Panel. Το εργαλείο save πάνω αριστερά αφορά το κουμπί του Front Panel που ελέγχει αν το πρόγραμμα θα εξάγει τα αποτελέσματα σε αρχείο ή όχι. Από κάτω βλέπουμε το συνδυασμό εργαλείων που εμφανίζουν το γράφημα με την καμπύλη μαγνήτισης από τα δεδομένα του Lock in Amplifier στο Front Panel.



Σχήμα 6.19 Κώδικας σε γλώσσα labview για τον έλεγχο της κάρτας ψηφιοποίησης και συλλογής του σήματος από τα πηνία ανίχνευσης NI 9162/BNC της National Instruments. DAQ Assistant είναι το εργαλείο ελέγχου των παραμέτρων λειτουργίας της κάρτας, Filter είναι το στενό ζωνοπερατό φίλτρο που χρησιμοποιήσαμε, Waveform Graph είναι το εργαλείο για το γράφημα που φαίνεται στο σχήμα 6.6, Spectral Measurements είναι το εργαλείο το οποίο απομονώνει την κορυφή που μας ενδιαφέρει από το σήμα των πηνίων, Waveform Graph 2 είναι το εργαλείο για το γράφημα που φαίνεται στο σχήμα 6.7, Amplitude & Level Measurements είναι το εργαλείο το οποίο μετρά την τιμή της κορυφής που απομονώσαμε από το σήμα των πηνίων, Positive Peak είναι η τιμή που βλέπουμε στο σχήμα 6.8, Build XY Graph και USB card είναι τα εργαλεία που εμφανίζουν το γράφημα με την καμπύλη μαγνήτισης από τα δεδομένα της κάρτας μετρήσεων στο Front Panel



Σχήμα 6.20 Κώδικας ελέγχου του πλαισίου μέσα στο οποίο βρίσκονται η πλειοψηφία των εργαλείων και όσο έχει την τιμή *T* (*true*) συνεχίζει το πρόγραμμα να εκτελείται.

7. Αντιπροσωπευτικές μετρήσεις μαλακών μαγνητικών υλικών

Μετά την κατασκευή της διάταξης, ανάπτυξης του λογισμικού και ελέγχου για λογικά σφάλματα εκτελέσαμε μετρήσεις της μαγνήτισης αντιπροσωπευτικών μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών, σαν συνάρτηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα στοιχεία των δειγμάτων που χρησιμοποιήσαμε:

	Μήκος	Μάζα	Διάμετρος
Σίδηρος	15 mm		
Σίδηρος	15 mm		
Σίδηρος (διέλαση)	15 mm	12.0 mg	-
Σίδηρος (2xδιέλαση)	15 mm	7.2 mg	-
A-Σίδηρος 99.99% καθ	11 mm	68.0 mg	1.0 mm
Άμορφο CoFeSiB	10 mm–11 mm	9.4 mg	6 κομμάτια
Permalloy Ni/Fe 80/20	-	96.0 mg	-
Manganate LaSrMnO	-	52.4 mg	-

Ειδικότερα τα τέσσερα πρώτα δείγματα προέκυψαν από κράμα σιδήρου άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χωρίς άλλα στοιχεία και χρησιμοποιήσαμε διέλαση στα δύο τελευταία από αυτά για να αυξήσουμε το συνεκτικό πεδίο και να φανεί καλύτερα ο βρόγχος υστέρησης.

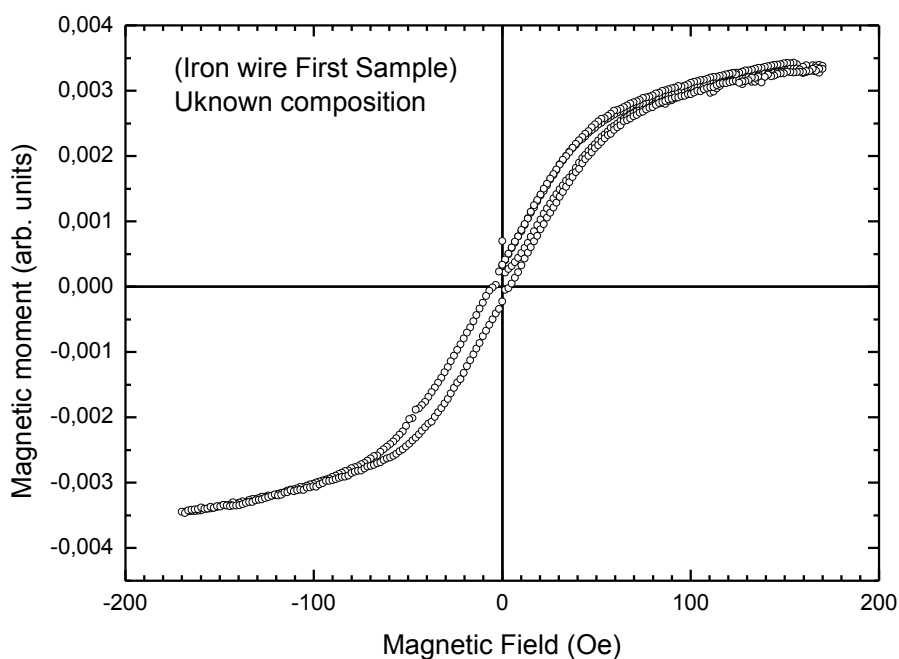
Ο α-Σίδηρος είναι από σύρμα της εταιρίας Goodfellow Cambridge Limited υψηλής καθαρότητας 99.99+%.

Το άμορφο $(Co_{50}Fe_{50})_{78}Si_9B_{13}$ προέρχεται από πολύ λεπτό σύρμα από το οποίο πήραμε 6 κομμάτια, μήκους 10 με 11 mm το καθένα.

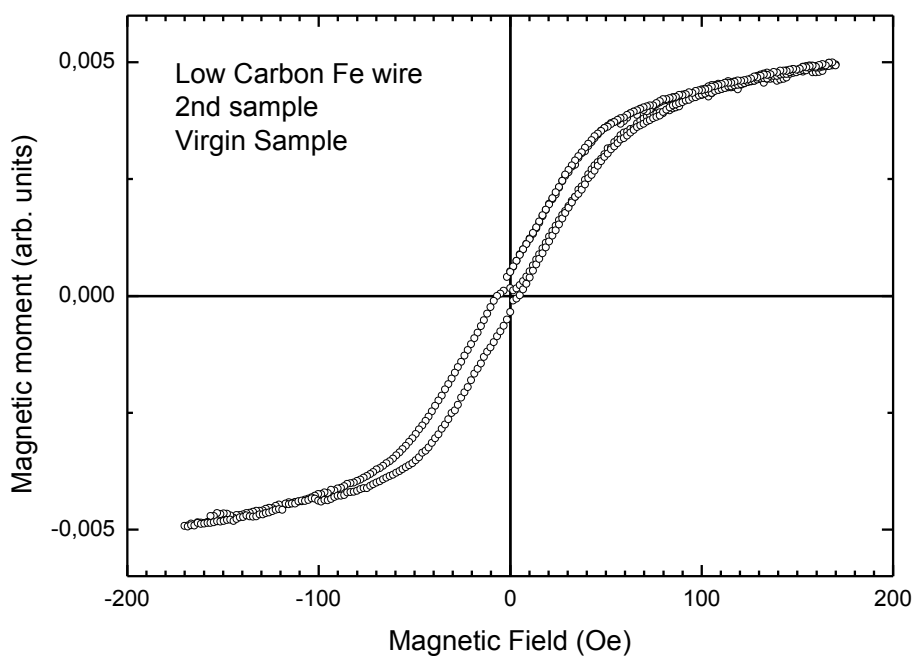
Το *Permalloy* είναι ένα κομμάτι χωρίς ιδιαίτερα κανονικό σχήμα (όχι σύρμα) με σύσταση *Ni/Fe* 80/20.

Το *Manganate* $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ με $x = 0.2$ και αυτό δεν έχει κανονικό σχήμα.

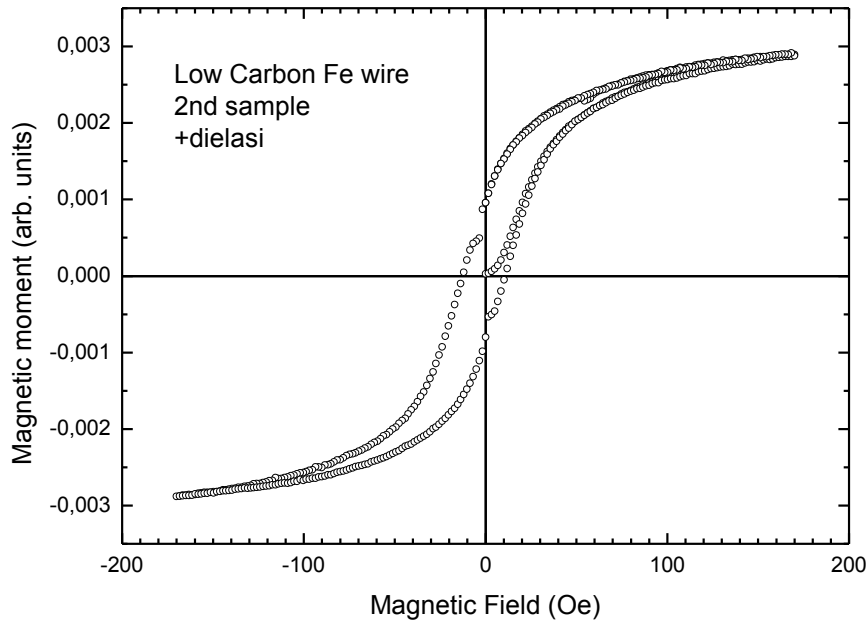
Στη συνέχεια παραθέτουμε τις καμπύλες μαγνήτισης όπως προέκυψαν από τη διάταξη που κατασκευάσαμε.



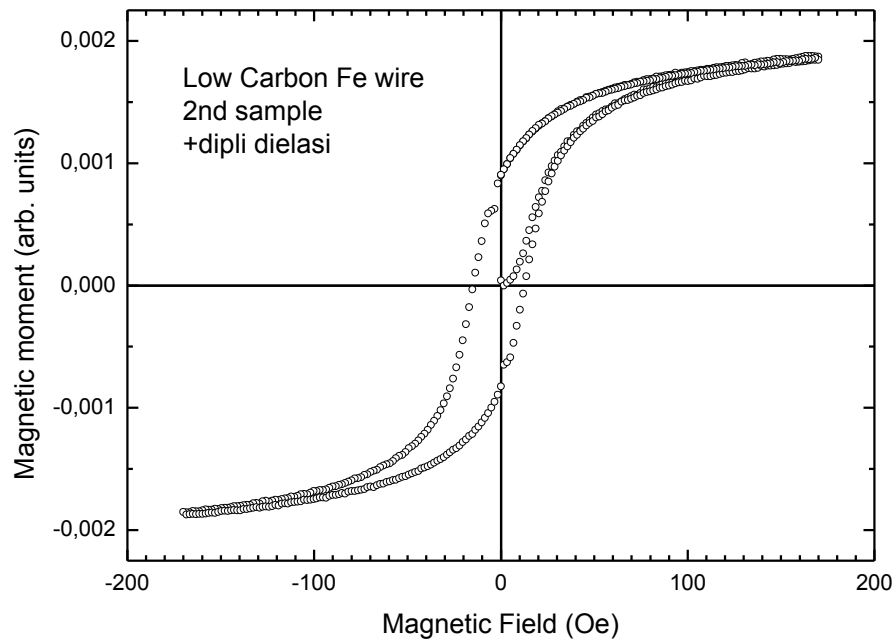
Σχήμα 7.1 Βρόχος υστέρησης δείγματος σιδήρου άγνωστης σύστασης σε DC μαγνητικό πεδίο από -170 έως 170 Oe.



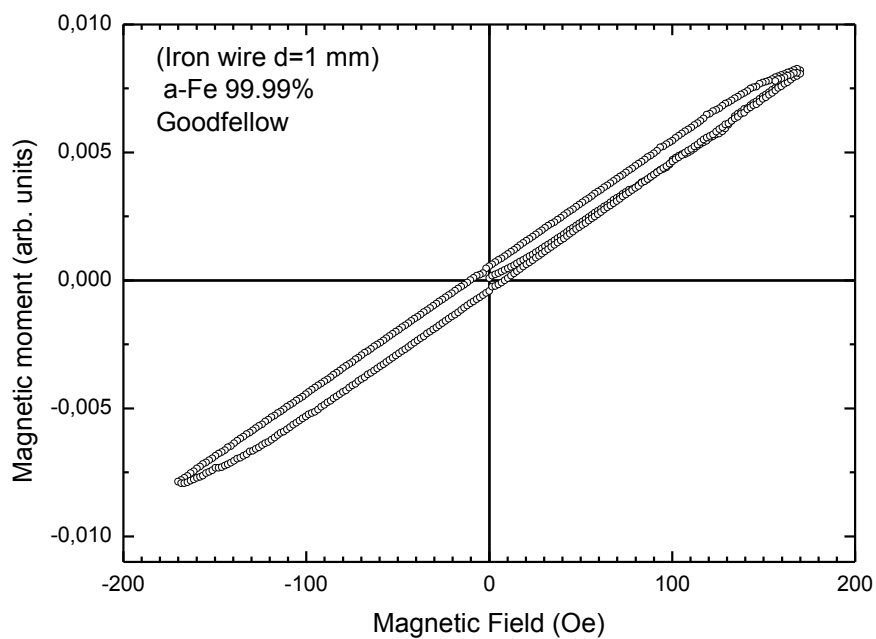
Σχήμα 7.2 Βρόχος υστέρησης 2^{ου} δείγματος σιδήρου άγνωστης σύστασης σε DC μαγνητικό πεδίο από -170 έως 170 Oe (παρθενική καμπύλη μαγνήτισης).



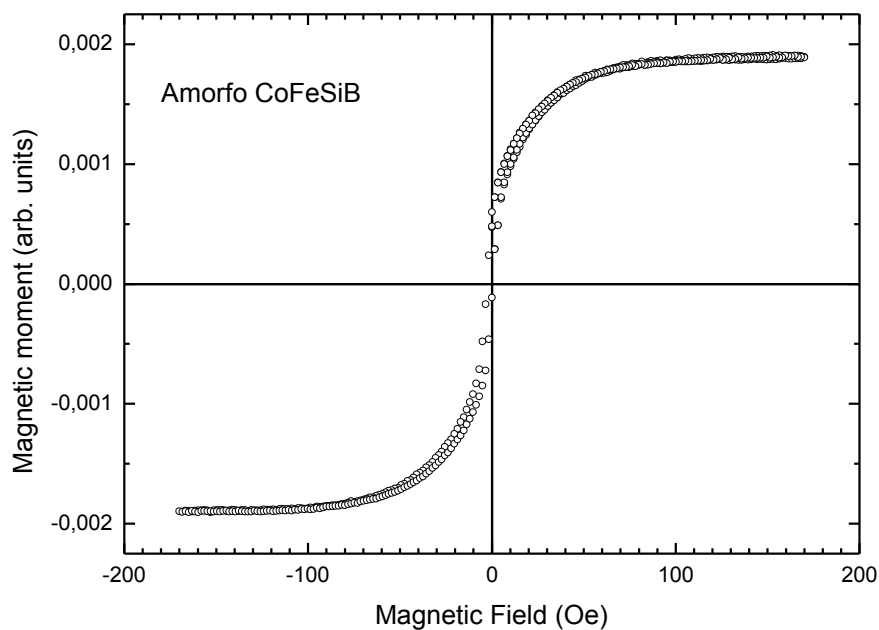
Σχήμα 7.3 Βρόχος υστέρησης 2^{ου} δείγματος σιδήρου άγνωστης σύστασης σε DC μαγνητικό πεδίο από -170 έως 170 Oe μετά από διέλαση ώστε να γίνει πεπλατυσμένο.



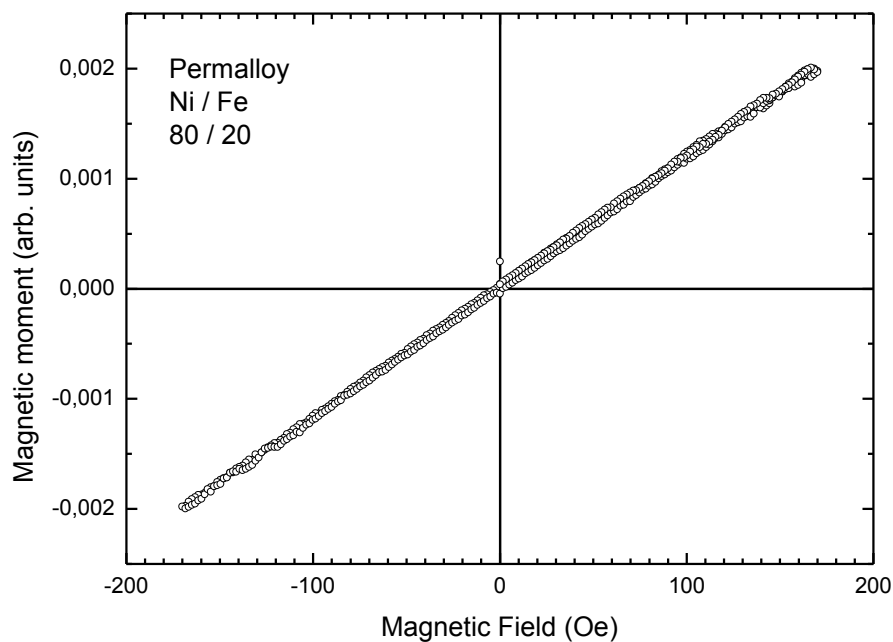
Σχήμα 7.4 Βρόχος υστέρησης 2^{ου} δείγματος σιδήρου άγνωστης σύστασης σε DC μαγνητικό πεδίο από -170 έως 170 Oe μετά από δεύτερη διέλαση ώστε να γίνει ακόμα λεπτότερο.



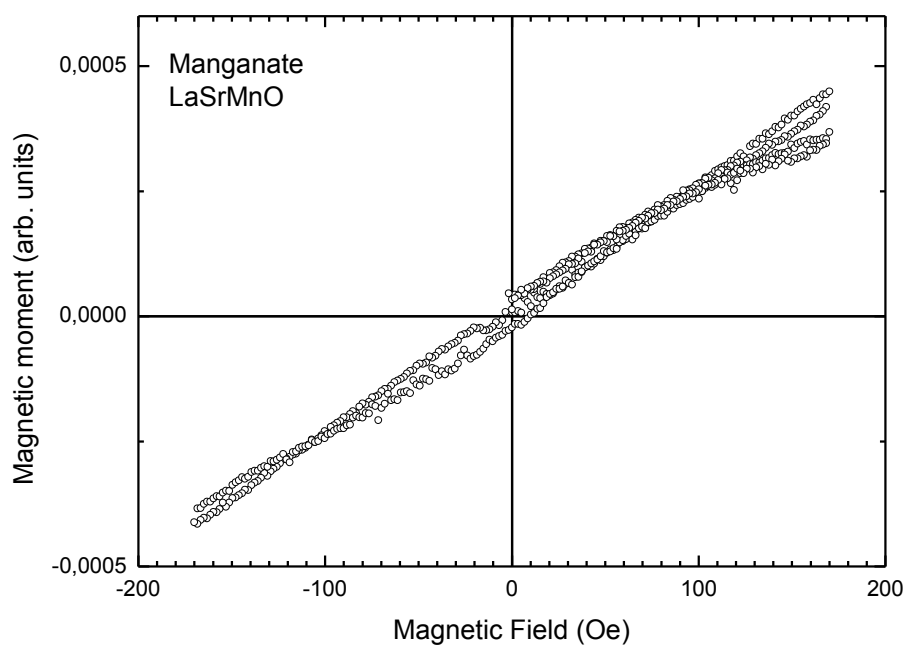
Σχήμα 7.5 Καμπύλη μαγνήτισης δείγματος καθαρού σιδήρου (99.99% καθαρότητας) σε DC μαγνητικό πεδίο από -170 έως 170 Oe.



Σχήμα 7.6 Καμπύλη μαγνήτισης δείγματος άμορφου $(Co_{50}Fe_{50})_{78}Si_9B_{13}$ σε DC μαγνητικό πεδίο από -170 έως 170 Oe.



Σχήμα 7.7 Καμπύλη μαγνήτισης δείγματος *Permalloy Ni/Fe 80/20* σε *DC* μαγνητικό πεδίο από *-170* έως *170 Oe*.



Σχήμα 7.8 Καμπύλη μαγνήτισης δείγματος *La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃* σε *DC* μαγνητικό πεδίο από *-170* έως *170 Oe*.

Στα σχήματα 7.1 και 7.2 φαίνεται ο «παρθενικός» κλάδος του βρόγχου υστέρησης και ο βρόχος υστέρησης συναρτήσει του dc-μαγνητικού πεδίου δύο δειγμάτων α-σιδήρου χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Όπως αναμένεται στο συγκεκριμένο δείγμα εμφάνισε πολύ μικρό συνεκτικό πεδίο (5-10 Oe) και μικρή παραμένουσα μαγνήτιση.

Στα σχήματα 7.3 και 7.4 φαίνεται ο «παρθενικός» κλάδος του βρόγχου υστέρησης και ο βρόχος υστέρησης συναρτήσει του dc-μαγνητικού πεδίου του δείγματος του οποίου η μέτρηση φαίνεται στο σχήμα 7.2, έπειτα από διέλαση. Από τις συγκεκριμένες μετρήσεις παρατηρούμε ότι η διέλαση οδήγησε σε αύξηση του συνεκτικού πεδίου και της παραμένουσας μαγνήτισης. Η αύξηση του συνεκτικού πεδίου μπορεί αποδοθεί στην μετακίνηση των εξαρμόσεων στα όρια των κρυσταλλιτών λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η ποιότητα των μετρήσεων είναι πολύ καλή και είναι πολύ δύσκολο να πάρουμε τέτοια ποιότητα μετρήσεων στην περιοχή για $-20 < H < 20$ Oe σε ένα συμβατικό μαγνητόμετρο.

Στο σχήμα 7.5 φαίνεται ο «παρθενικός» κλάδος του βρόγχου υστέρησης και ο βρόχος υστέρησης συναρτήσει του dc-μαγνητικού πεδίου για ένα δείγμα σιδήρου α-Fe καθαρότητας 99.9%. Παρόλο το μικρό συνεκτικό πεδίο και την μικρή παραμένουσα μαγνήτιση η μέτρηση για το συγκεκριμένο δείγμα δεν εμφανίζει κορεσμό της μαγνητικής ροπής. Τη μη εμφάνιση κορεσμού μπορούμε να την αποδώσουμε σε φαινόμενα απομαγνήτισης. Το συγκεκριμένο δείγμα μετρήσαμε στο μαγνητόμετρο ταλαντευόμενου δείγματος του Ινστιτούτου Επιστήμης Υλικών και βρήκαμε ότι το πεδίο που χρειαζόταν για να φτάσει σε κόρο ήταν της τάξης των 3000 Oe, μεγαλύτερο από το πεδίο που μπορεί να παράξει το πρωτεύον πηνίο του μαγνητόμετρου μας.

Στο σχήμα 7.6 φαίνεται ο «παρθενικός» κλάδος του βρόχου υστέρησης και ο βρόχος υστέρησης συναρτήσει του dc-μαγνητικού πεδίου για ένα δείγμα άμορφου $(Co_{50}Fe_{50})_{78}Si_9B_{13}$. Είναι γνωστό στη βιβλιογραφία [1,2] ότι τα συγκεκριμένα υλικά εμφανίζουν πολύ μικρό συνεκτικό πεδίο και παραμένουσα μαγνήτιση σε συμφωνία με τις μετρήσεις μας.

Τέλος στα σχήματα 7.7 και 7.8 φαίνονται οι μετρήσεις για ένα δείγμα Permalloy Ni/Fe (80/20) και ένα δείγμα περοβσκίτη του μαγγανίου $La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3$. Τα συγκεκριμένα δείγματα δεν εμφανίζουν κορεσμό της μαγνητικής ροπής λόγω φαινομένων απομαγνήτισης.

8. Συμπεράσματα

Τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μαγνητικών υλικών είναι εφοδιασμένα με ηλεκτρομαγνήτες ή υπεραγώγιμα πηνία. Οι συγκεκριμένες συσκευές μπορούν να παράξουν μεγάλα μαγνητικά πεδία γεγονός που τις κάνει κατάλληλες για μετρήσεις «σκληρών» μαγνητικών υλικών. Το παραμένον πεδίο στον οπλισμό του ηλεκτρομαγνήτη και το παραμένον κρίσιμο ρεύμα στα υπεραγώγιμα πηνία εμποδίζουν το μηδενισμό του μαγνητικού πεδίου και καθιστούν πολύ δύσκολή τη μεταβολή του με μικρά βήματα για μικρά μαγνητικά πεδία. Για να μετρηθούν μαγνητικά υλικά με μικρό συνεκτικό πεδίο (μαλακά μαγνητικά υλικά) μία μέθοδος είναι να χρησιμοποιηθεί ένα απλό πηνίο για την παραγωγή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό αποφασίσαμε να κατασκευάσουμε μια διάταξη μικρού κόστους, ικανή για τη μέτρηση «μαλακών» μαγνητικών υλικών.

Το κεντρικό τμήμα της διάταξης ήταν δύο ομοαξονικά πηνία αντίθετα τυλιγμένα στα οποία αναπτυσσόταν η ηλεκτρεγερτική δύναμη λόγω της ταλάντωσης της μαγνητικής ροπής του δείγματος παράλληλα στον άξονα των πηνίων (μαγνητόμετρο παράλληλης γεωμετρίας), σύμφωνα με το νόμο του Faraday.

Για την παραγωγή του DC μαγνητικού πεδίου, μαγνήτισης του δείγματος, χρησιμοποιήσαμε ένα απλό πηνίο το οποίο τροφοδοτούνταν από ένα dc-τροφοδοτικό μεγάλης ακρίβειας. Αυτό μας έδωσε τη δυνατότητα να παράγουμε σχετικά μικρής έντασης μαγνητικό πεδίο αλλά με πολύ μικρό και μεγάλης ακρίβειας βήμα στην αύξηση και τη μείωσή

του. Για την ταλάντωση του δείγματος χρησιμοποιήσαμε έναν ηλεκτρομαγνητικό ταλαντωτή.

Για τον έλεγχο των συσκευών της διάταξης, τη συλλογή και τη ψηφιοποίηση του σήματος, την επεξεργασία των δεδομένων και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων αναπτύξαμε κατάλληλο λογισμικό σε γλώσσα Labview.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που εκτελέσαμε έδειξαν ότι η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το λεπτομερή και με ακρίβεια μαγνητικό χαρακτηρισμό μαλακών μαγνητικών υλικών με μικρό συνεκτικό πεδίο. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι αν για τη ψηφιοποίηση του σήματος χρησιμοποιήσουμε μία κάρτα συλλογής δεδομένων χαμηλού κόστους αντί του ενισχυτή Lockin, τότε η συγκεκριμένη συσκευή είναι μία φτηνή αποτελεσματική διάταξη χαρακτηρισμού μαλακών μαγνητικών υλικών.

9. Βιβλιογραφία

1. Introduction to Magnetic Materials B. D. Cullity and, C. D. Graham, Second Edition
2. Magnetism and Magnetic Materials, Michael Coey, Cambridge University Press.
3. Measurement and Characterization of Magnetic Materials, Fausto Fiorillo, (Elsevier, 2004).
4. Ηλεκτροδυναμική D. Griffiths, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.
5. Σημειώσεις εργαστηρίου μαγνητικών μετρήσεων M. Πίσσας (2010).

