

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΗΝΙΩΝ
ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΣΘΕΝΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ
ΠΕΔΙΩΝ ΚΑΙ ΒΑΘΜΙΔΩΝ

Αργύρης Θ. Δελλής

Μάρτιος 2005

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1	ΣΤΟΧΟΣ	3
1.2	ΑΤΟΜΙΚΑ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ	3
1.2.1	ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	3
1.2.2	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ	5
1.3	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ	6
2	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	9
2.1	ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ FLUXGATE	9
2.1.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ FLUXGATE	9
2.1.2	ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ Mag-03MC	11
2.1.3	ΘΟΡΥΒΟΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ Mag-03MC	12
2.2	ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ Lock-In	12
2.2.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ Lock-In	12
3	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΗΝΙΩΝ	15
3.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΩΝ	21
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	23
4.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	23
4.2	ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ	24
4.3	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	24
4.4	ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ	24
4.5	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	34

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΤΟΧΟΣ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση, η κατασκευή και η πιστοποίηση πηνίων που μπορούν να παράγουν ασθενή ομογενή μαγνητικά πεδία και βαθμίδες. Αποτελεί αναπόσπαστο μέρος πειράματος που αποσκοπεί στην κατασκευή ενός ατομικού μαγνητόμετρου για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων της τάξης των fT (10^{-15} T).

1.2 ΑΤΟΜΙΚΑ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ

Η χρήση των μαγνητικών πεδίων ως πηγών για την εξαγωγή πληροφοριών για διάφορα φυσικά φαινόμενα είναι ευρέως διαδεδομένη. Τα τελευταία 30 χρόνια οι υπεραγωγίμες συσκευές SQUID ήταν ασυναγώνιστες για τη μέτρηση ασθενών μαγνητικών πεδίων, καθώς η ευαισθησία τους έφτανε το $1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$. Οι υπεραγωγίμες αυτές διατάξεις έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν θερμοκρασίες υγρού ηλίου (4 K) για να λειτουργήσουν, σε αντίθεση με τα ατομικά μαγνητόμετρα, τα οποία λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, και τα οποία τα τελευταία χρόνια ξεπέρασαν την ευαισθησία των SQUIDs.

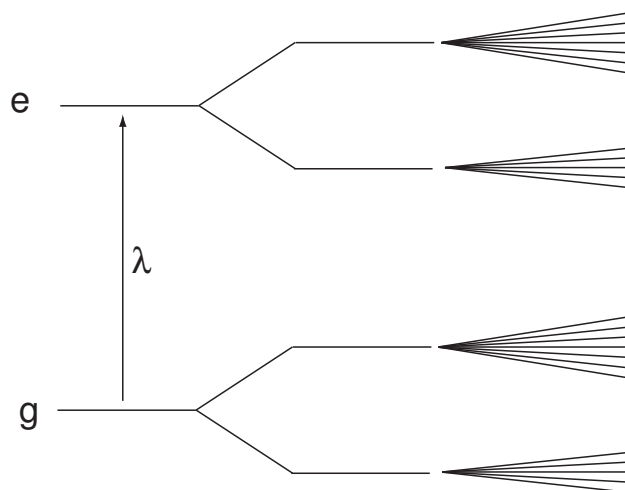
1.2.1 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία των ατομικών μαγνητόμετρων βασίζεται γενικά στην μεταπτωτική κίνηση του ηλεκτρονικού spin μέσα στο προς μέτρηση μαγνητικό πεδίο. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό στα αλκαλικά μέταλλα (Ρουβίδιο, Λίθιο, Καίσιο, Νάτριο, Κάλιο), των οποίων η βασική κατάσταση είναι μια κατάσταση $S_{1/2}$. Επιπλέον, τα αλκαλικά μέταλλα είναι εύκολο να αντληθούν οπτικά. Η οπτική άντληση αναφέρεται στη μεταφορά στροφορμής από μια κυκλικά πολωμένη δέσμη laser στη βασική κατάσταση των ατόμων. Σε ένα ατομικό σύστημα μια οπτική μετάβαση συμβαίνει μόνο όταν δεν παραβιάζονται οι κανόνες επιλογής. Για τον μαγνητικό κβαντικό αριθμό m πρέπει να ισχύει $\Delta m = 0, \pm 1$. Ανάλογα

όμως με την πόλωση του φωτός ο προηγούμενος κανόνας παίρνει τη μορφή του ακόλουθου πίνακα:

Πόλωση	Δm
Αριστερόστροφη	-1
Παράλληλη	0
Δεξιόστροφη	+1

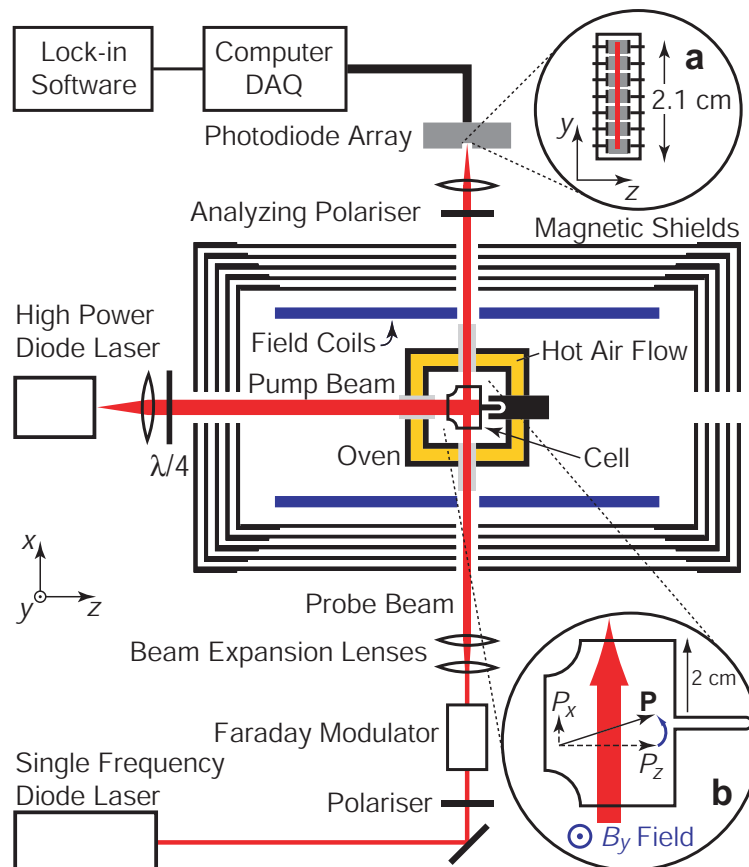
Όταν ένα κελί που περιέχει ατμούς αλκαλικού μετάλλου φωτίζεται με δεξιόστροφα πολωμένη δέσμη από ένα laser τότε ηλεκτρόνια διεγείρονται από τη βασική στην πρώτη διεγερμένη στάθμη. Εφόσον η δέσμη είναι δεξιόστροφα πολωμένη θα επιτρέπονται οι μεταβάσεις για τις οποίες θα ισχύει $\Delta m = +1$. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια αποδιεγείρονται σε χαμηλότερες καταστάσεις και θα κατανέμονται με την ίδια πιθανότητα σε όλες τις καταστάσεις με διαφορετικά m . Λαμβάνοντας όμως υπόψιν τους κανόνες επιλογής καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τελικά όλα τα άτομα καταλήγουν στην κατάσταση με τη μεγαλύτερη προβολή του spin (χβαντικός αριθμός m), δηλαδή προσανατολίζονται. Αν επιβάλλουμε



Σχήμα 1.1: Καταστάσεις Αλκαλικού Μετάλλου.

ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (το προς μέτρηση πεδίο), μπορούμε να προκαλέσουμε ένα μερικό αποπροσανατολισμό της ατομικής πόλωσης, από την μέτρηση του οποίου μπορούμε να εξάγουμε το μέγεθος του πεδίου που τον προκάλεσε. Μία πειραματική διάταξη για την κατασκευή ενός ατομικού μαγνητόμετρου απεικονίζεται στο σχήμα 1.2. Πιο συγκεκριμένα μέσα σε γυάλινο κελί βρίσκονται άτομα Καλίου σε αέρια μορφή που πολώνονται από μία κυκλικά πολωμένη δέσμη laser στη z διεύθυνση. Επειδή όλες οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου πρέπει να βρίσκονται κοντά στο μηδέν η όλη διάταξη τοποθετείται σε μαγνητικά θωρακισμένη περιοχή. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο στη y διεύθυνση (B_y) με αποτέλεσμα να στρέψει το spin των ατόμων στη x διεύθυνση, δημιουργώντας μια συνιστώσα πόλωσης P_x , ανάλογη του πεδίου B_y . Το επίπεδο πόλωσης μιας άλλης, γραμμικά

πολωμένης δέσμης (και σε κάθετη διεύθυνση διάδοσης με την κυκλικά πολωμένη δέσμη) στρέφεται, και η γωνία στροφής είναι ανάλογη του P_x . Με τη μέτρηση της γωνίας στροφής εξάγουμε λοιπόν το μέγεθος του πεδίου B_y . Η διάταξη αυτή, λόγω του μεγάλου χρόνου εγκάρσιου ευρησυχασμού T_2



Σχήμα 1.2: Ατομικό Μαγνητόμετρο.

που την χαρακτηρίζει, μπορεί θεωρητικά να πετύχει την αξιοσημείωτη μαγνητική ευαισθησία των $0.01 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, ενώ πειραματικά έχει πετύχει μαγνητική ευαισθησία $0.5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$.

1.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΩΝ

Οι εφαρμογές των ατομικών μαγνητόμετρων είναι βασικά οι ίδιες με αυτές των υπεραγώγιμων συναγωγιστών τους, των SQUID. Οι διατάξεις αυτές έχουν βρει τις τελευταίες δεκαετίες μια πλειάδα εφαρμογών, η κυριότερη εκ των οποίων είναι η ανίχνευση μαγνητικών πεδίων που παράγουν βιολογικά όργανα όπως η καρδιά (MCG ²) και ο εγκέφαλος (MEG ³). Ο βιομαγνητισμός είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος κλάδος της ιατρικής που αποσκοπεί στην ανάπτυξη εναλλακτικών (και χαμηλού κόστους) βιομαγνητικών αισθητήρων για την ανίχνευση των ασθενών μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τα βιολογικά

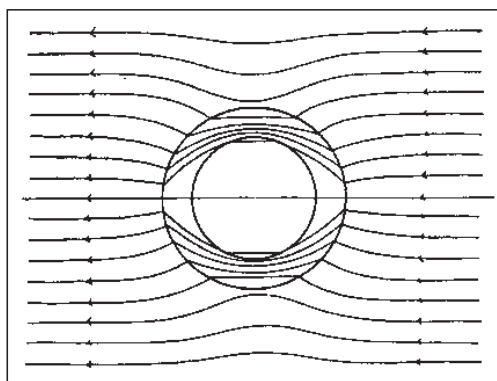
όργανα. Τα πεδία αυτά χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την πρόληψη και την καταπολέμηση ασθενειών. Εκτός όμως από την ιατρική και τον βιομαγνητισμό τα ατομικά μαγνητόμετρα έχουν μία σειρά άλλων εφαρμογές. Στο στρατό ευαίσθητα μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται για ανίχνευση ναρκών ή άλλων εκρηκτικών υλών. Στη βιομηχανία βρίσκουν εφαρμογή στην ανίχνευση ατελειών σε μεταλλικά αντικείμενα (εξαρτήματα αεροπλάνων) οι οποίες δεν μπορούν να εντοπιστούν με τις συνηθισμένες τεχνικές. Τέλος υπάρχει ένα είδος SQUID μικροσκοπίου σάρωσης για την ανίχνευση βραχυκυκλωμάτων σε μικροηλεκτρονικά κυκλώματα.

1.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ

Η μαγνητική θωράκιση έχει μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Χρησιμοποιείται από τον θωρακισμό ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ευαίσθητων πειραμάτων έως τον θωρακισμό δωματίων για τη μελέτη μαγνητικών πεδίων που παράγουν βιολογικοί οργανισμοί. Στη διάταξη του ατομικού μαγνητόμετρου που αναπτύσσουμε η μαγνητική θωράκιση είναι απαραίτητη για να ελαχιστοποιήσουμε την επίδραση των εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, σταθερών ή εναλλασσόμενων, καθότι σκοπεύουμε να κάνουμε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου στην περιοχή κάτω του 1 fT. Ως παράγοντας θωράκισης ορίζεται ο λόγος του μαγνητικού πεδίου εκτός θωράκισης προς τον λόγο του μαγνητικού πεδίου εντός θωρακισμένης περιοχής.

$$S = \frac{B_{out}}{B_{in}} \quad (1.1)$$

Προφανώς $S > 1$. Για μία διάταξη κυλινδρικής μαγνητικής θωράκισης με μόνο ένα στρώμα θωράκισης οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου θα έχουν την μορφή που εικονίζεται στο σχήμα 1.3



Σχήμα 1.3: Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου παρουσία ενός στρώματος θωράκισης.

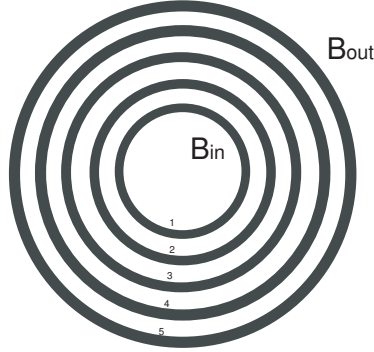
²MCG: Magnetocardiogram

³MEG: Magnetoencephalogram

Για αυτή τη γεωμετρία θωράκισης, ο παράγοντας θωράκισης είναι[6]

$$S = \frac{\mu t}{2R} \quad (1.2)$$

όπου R η ακτίνα του κυλίνδρου, t το πάχος του, και μ η σχετική μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού που χρησιμοποιείται. Όταν η θωράκιση περιλαμβάνει περισσότερα του ενός στρώματα (σχ.1.4) τότε ο

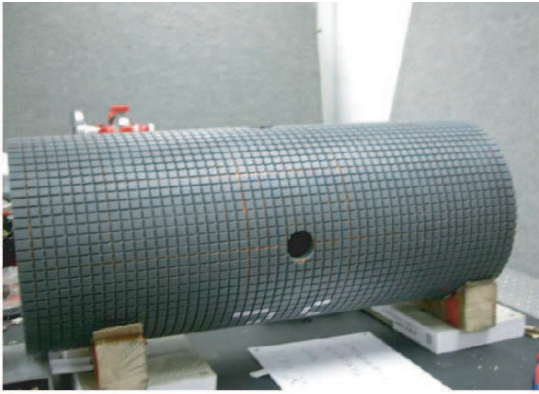


Σχήμα 1.4: Μαγνητική θωράκιση πολλαπλών στρωμάτων.

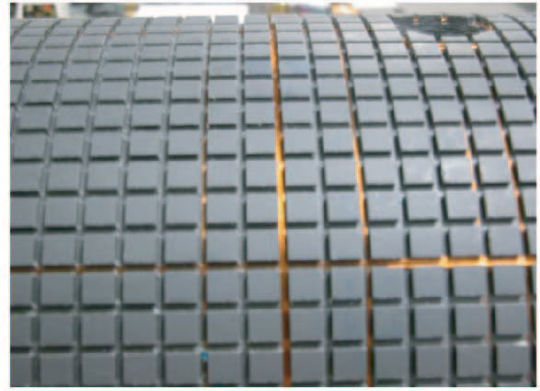
παράγοντας θωράκισης θα έχει τη μορφή [6]:

$$S = \prod_{i=1}^{n-1} S_n S_i [1 - (\frac{R_i}{R_{i+1}})^2] \quad (1.3)$$

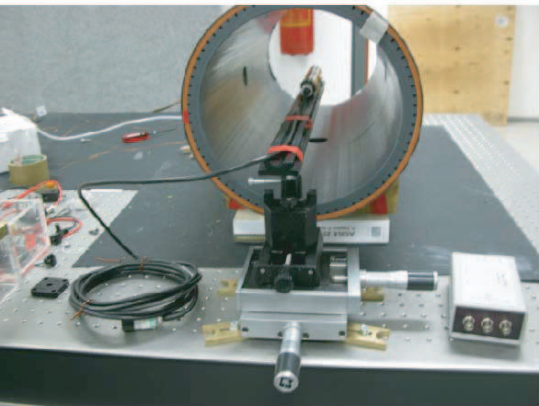
Για τη διάταξη του ατομικού μαγνητόμετρου χρησιμοποιείται μαγνητική θωράκιση 5 στρωμάτων, κατασκευασμένη από κράμα νικελίου-σιδήρου. Από υπολογισμούς έχει εκτιμηθεί ότι ο ολικός παράγοντας θωράκισης της διάταξης θα είναι $S \sim 10^6$. Αν θεωρήσουμε ως εξωτερικό στατικό μαγνητικό πεδίο το $B_{out} \approx 1$ G (τάξη μεγέθους του πεδίου της γης), τότε μέσα στη θωράκιση το πεδίο θα είναι $B_{in} \approx 1$ μ G. Τα πηνία που σχεδιάσαμε έχουν σκοπό τη δημιουργία ενός ίσου και αντίθετου πεδίου με το B_{in} , έτσι ώστε να μηδενιστεί το μαγνητικό πεδίο μέσα στη θωράκιση, όπου βρίσκεται και το ατομικό μαγνητόμετρο. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του μαγνητόμετρου, είναι απαραίτητο να επιβάλλουμε ένα εναλλασσόμενο πεδίο γνωστού πλάτους (της τάξης του fT), ώστε μέσω της αλληλεπίδρασής του με το ατομικό σπιν να καταφέρουμε να το μετρήσουμε, και να είμαστε σε θέση να βγάλουμε ακριβή συμπεράσματα για την μαγνητική ευαισθησία της διάταξης. Με τα τρία εκ των οκτώ πηνίων που κατασκευάσαμε, μπορούμε και παράγουμε στατικά ή εναλλασσόμενα πεδία και στους τρεις άξονες (B_x, B_y, B_z). Με τα υπόλοιπα πέντε είμαστε σε θέση να παράγουμε όλες τις ανεξάρτητες βαθμίδες: $dB_x/dx, dB_x/dy, dB_x/dz, dB_y/dy, dB_y/dz$. Το ότι οι ανεξάρτητες βαθμίδες είναι 5 προκύπτει από τις εξισώσεις $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ και $\nabla \times \mathbf{B} = 0$. Οι βαθμίδες είναι απαραίτητες τόσο για το μηδενισμό εναπομεινάντων βαθμίδων, όσο και για πειράματα μαγνητικής απεικόνισης. Και τα 8 πηνία βρίσκονται πάνω σε πλαστικό κύλινδρο ακτίνας $r = 15$ cm και μήκους $L = 70$ cm. Ο κύλινδρος αυτός βρίσκεται μέσα στον εσώτερο κύλινδρο της μαγνητικής θωράκισης.



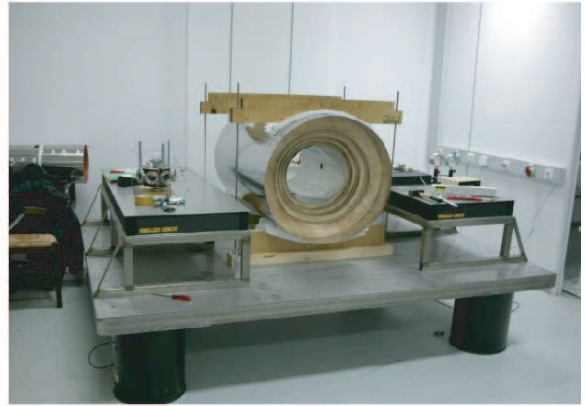
(a)



(b)



(c)



(d)

Σχήμα 1.5: (a)Ο πλαστικός κύλινδρος, (b)Σπείρες πηνίου πάνω στον κύλινδρο, (c)Το μαγνητόμετρο Fluxgate στο εσωτερικό του κυλίνδρου, (d)Ο κύλινδρος με τα πηνία μέσα στη μαγνητική θωράκιση

Κεφάλαιο 2

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

2.1 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ FLUXGATE

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να μετρηθεί με όργανα που στηρίζουν τη λειτουργία τους σε διαφόρων ειδών τεχνολογίες και φυσικά φαινόμενα. Οι αισθητήρες για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σε αυτούς που μπορούν να διακρίνουν τις διανυσματικές συνιστώσες του πεδίου και σε αυτούς που μετράνε μόνο βαθμωτά μεγέθη. Η κατηγορία των αισθητήρων που μετράνε και τις διανυσματικές συνιστώσες χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες

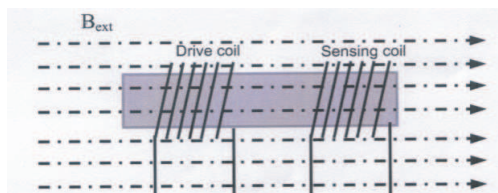
1. Αισθητήρες για μεγάλα μαγνητικά πεδία (μεγαλύτερα του 1 mT) που ονομάζονται μετρητές Gauss
2. Αισθητήρες για μικρά μαγνητικά πεδία (μικρότερα του 1 mT) που ονομάζονται μαγνητόμετρα.

Ο αισθητήρας Fluxgate ανήκει στην δεύτερη υποκατηγορία αισθητήρων. Είναι ίσως ο πιο διαδεδομένος αισθητήρας για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων μικρότερων του 1 mT και οι κύριοι λόγοι είναι: η αξιοπιστία, η ανθεκτικότητα, η μικρή κατανάλωση ενέργειας και το ικανοποιητικό εύρος ζώνης (από dc έως μερικά kHz).

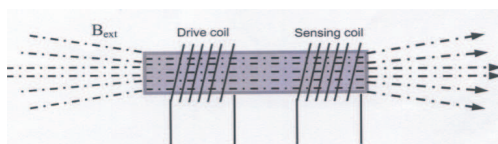
2.1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ FLUXGATE

Ο αισθητήρας Fluxgate αποτελείται από τα εξής τρία κύρια μέρη: (α) τον μαγνητικό πυρήνα, (β) το πηνίο διέγερσης του πυρήνα, και (γ) το πηνίο μέτρησης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Στη λειτουργία του διακρίνονται καταστάσεις: όταν ο μαγνητικός πυρήνας βρίσκεται σε κορεσμό (σχ. 2.1) και όταν ο μαγνητικός πυρήνας δεν βρίσκεται σε κορεσμό (σχ.2.2). Οι καταστάσεις επιτυγχάνονται με την επιβολή ενός αρμονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο διέγερσης. Κατά τη διάρκεια του κορεσμού το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (πεδίο προς μέτρηση) δεν εισέρχεται στον μαγνητικό

πυρήνα αλλά όταν δεν βρίσκεται στον κορεσμό μπορεί να εισέλθει σε αυτόν. Όσο όμως το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εισέρχεται και εξέρχεται στον μαγνητικό πυρήνα η μαγνητική ροή Φ μεταβάλλεται. Η μεταβολή αυτή που είναι ανάλογη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου γίνεται αισθητή από το πηνίο μέτρησης.



Σχήμα 2.1: Όταν ο πυρήνας είναι σε κορεσμό οι δυναμικές γραμμές δεν μπορούν να εισέλθουν στον αισθητήρα.



Σχήμα 2.2: Όταν ο πυρήνας δεν είναι σε κορεσμό οι δυναμικές γραμμές μπορούν να εισέλθουν στον αισθητήρα.

Από τις γνωστές σχέσεις μεταξύ μαγνητικού πεδίου, έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνήτισης

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{M} = \chi\mathbf{H} \quad (2.2)$$

προκύπτει ότι:

$$\mathbf{B} = (\mu_r\mu_0)\mathbf{H} \quad (2.3)$$

όπου:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2.4)$$

Το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να γραφεί ως:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{external} - D\mathbf{M} \Rightarrow \mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0}\mathbf{B}_{external} - D\mathbf{M} \quad (2.5)$$

όπου D ορίζεται ως ο παράγοντας απομαγνήτισης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$\mathbf{M} = \chi\mathbf{H} \quad (2.6)$$

καταλήγουμε στην εξίσωση (σε μια διάσταση)

$$B = \frac{\mu_0}{1 + D(\mu_r - 1)}B_{external} \quad (2.7)$$

Όμως η τάση στα άκρα του πηνίου μέτρησης είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής και δίνεται από την εξίσωση:

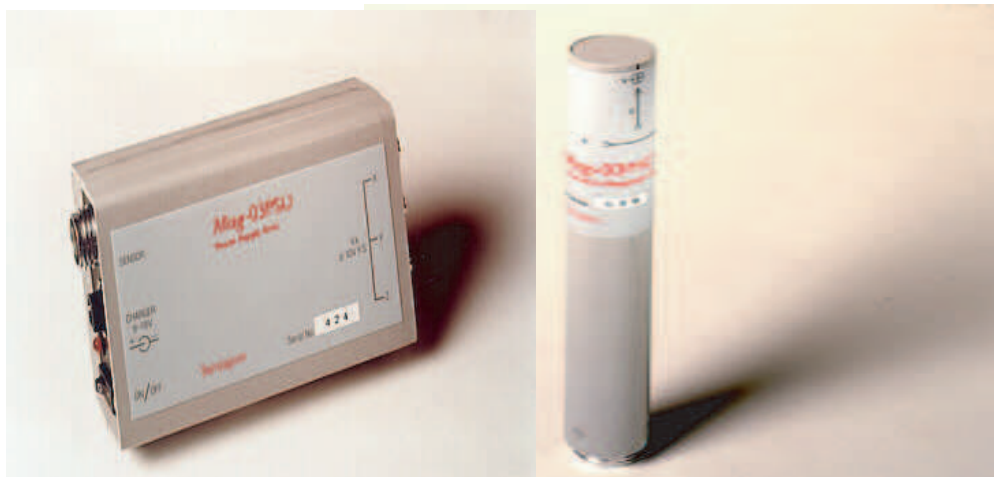
$$V = nA \frac{dB}{dt} \quad (2.8)$$

όπου n ο αριθμός των σπειρών του πηνίου μέτρησης και A η διατομή του. Διαφορίζοντας την εξίσωση (2.7) βρίσκουμε:

$$V = \frac{nA(1-D) \frac{d\mu_r}{dt}}{1 + D(\mu_r - 1)^2} B_{external} \quad (2.9)$$

Καταλήξαμε στην πολύ σημαντική σχέση ότι η μετρούμενη τάση στα άκρα του πηνίου μέτρησης είναι ανάλογη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

2.1.2 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ Mag-03MC



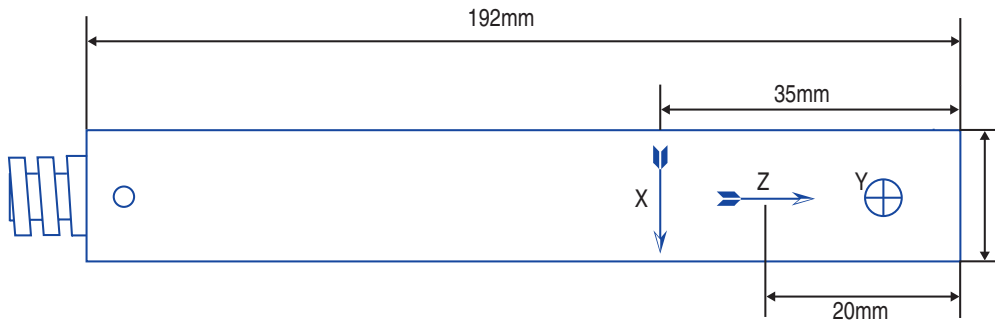
Σχήμα 2.3: Μαγνητόμετρο Mag-03MC.

Το μαγνητόμετρο που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κυλίνδρου περιλαμβάνει τρεις κάθετους αισθητήρες που μας δίνουν τη δυνατότητα για μέτρηση και των τριών κάθετων συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου συγχρόνως.

Οι τρεις αισθητήρες τροφοδοτούνται με 10 - 17 V dc τάση ενώ οι έξοδοί τους δίνουν επίσης dc τάση 0 - 10 V. Στο συγκεκριμένο μαγνητόμετρο 0.1 V τάσης εξόδου αντιστοιχούν σε μαγνητικό πεδίο 0.7 μ T (= 7 mG). Επομένως η σχέση μεταξύ τάσης στην έξοδο του μαγνητόμετρου και μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κυλίνδρου είναι:

$$H_{coil}(fT) = 7 \times 10^3 V_{mag}(\mu V) \quad (2.10)$$

Αυτή η σχέση μεταξύ μαγνητικού πεδίου και τάσης στην έξοδο του μαγνητόμετρου είναι εξαιρετικά γραμμική για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων (από dc ως περίπου 2 kHz).



Σχήμα 2.4: Αισθητήρας Μαγνητόμετρου Mag-03MC.

2.1.3 ΘΟΡΥΒΟΣ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ Mag-03MC

Ένα τυπικό διάγραμμα θορύβου για τους αισθητήρες του μαγνητόμετρου Mag-03MC φαίνεται στο γράφημα 2.5. Σύμφωνα με το γράφημα αυτό, ο θόρυβος συναρτῆσει της συχνότητας είναι $8.282 \text{ pT}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$.

2.2 ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ Lock-In

Οι ενισχυτές Lock-In χρησιμοποιούνται για μέτρηση πολύ μικρών εναλλασσόμενων σημάτων, ἔως και μερικά nV. Οι ακρίβεια των μετρήσεων είναι πολύ μεγάλη ακόμα και όταν το σῆμα υπερκαλύπτεται από θόρυβο. Για να απομονώσει το προς μέτρηση σῆμα ο ενισχυτής χρησιμοποιεί μία τεχνική που είναι γνωστή ως Phase Sensitive Detection (PSD). Για να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση απαιτείται μία συχνότητα αναφοράς. Έτσι όταν για παράδειγμα σε ένα πείραμα γίνεται μια διέγερση σε μια ορισμένη συχνότητα ο ενισχυτής Lock-In ανιχνεύει την απόκριση σε αυτή τη συχνότητα.

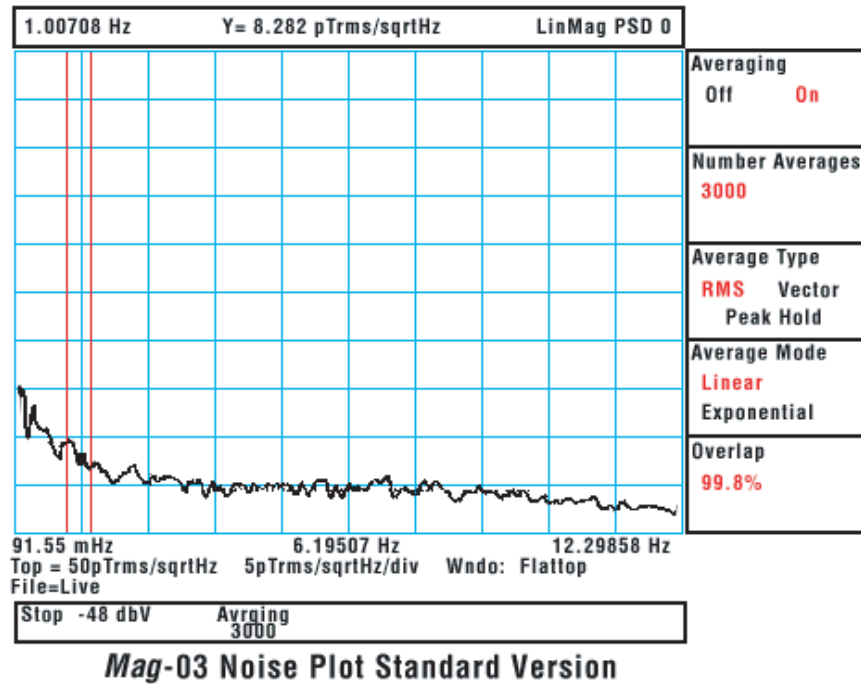
2.2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ Lock-In

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο ο ενισχυτής Lock-In χρειάζεται ένα σῆμα αναφοράς. Έστω λοιπόν ότι το σῆμα αυτό είναι ένα ημίτονο συχνότητας ω_{ref} και διεγείρει ένα στοιχείο του πειράματος. Η απόκριση του στοιχείου αυτού θα είναι της μορφής:

$$V_{res} = V_{o,res} \sin(\omega_{ref}t + \theta_{res}) \quad (2.11)$$

Ο ενισχυτής δημιουργεί ένα δικό του σῆμα με μορφή :

$$V_L = V_{o,L} \sin(\omega_L t + \theta_L) \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.5: Θόρυβος Μαγνητόμετρου.

Το σήμα που προέρχεται από το στοιχείο του πειράματος ενισχύεται από τον ενισχυτή Lock-In και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται μέσω ενός PSD με το σήμα που έχει δημιουργήσει ο Lock-In. Το νέο σήμα που προκύπτει (πολλαπλασιάζοντας τις εξισώσεις (2.11) και (2.12)) είναι:

$$V_{out1} = \frac{1}{2} V_{o,res} V_{o,L} \{ \cos[(\omega_{ref} - \omega_L)t + (\theta_{res} - \theta_L)] - \cos[(\omega_{ref} + \omega_L)t + (\theta_{res} + \theta_L)] \}$$

Στη συνέχεια το νέο αυτό σήμα περνάει από ένα φίλτρο Low-Pass. Στην έξοδο του φίλτρου μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

1. Αν $\omega_{ref} \neq \omega_L$ οπότε και το σήμα στην έξοδο θα είναι μηδενικό
2. και αν $\omega_{ref} = \omega_L$ οπότε το σήμα στην έξοδο θα είναι μη μηδενικό.

Αν ισχύει η δεύτερη περίπτωση τότε το σήμα στην έξοδο του Low-Pass φίλτρου θα έχει τη μορφή:

$$V_{out1} = \frac{1}{2} V_{o,res} V_{o,L} \cos(\theta_{res} - \theta_L) \quad (2.13)$$

Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και ένας δεύτερος PSD ώστε να εισάγει στο σήμα V_{out1} μία διαφορά φάσης 90° και να δημιουργήσει ένα νέο σήμα με μορφή:



Σχήμα 2.6: Ενισχυτής Lock-In.

$$V_{out2} = \frac{1}{2} V_{o,res} V_{o,L} \sin(\theta_{res} - \theta_L) \quad (2.14)$$

Έτσι έχουμε δημιουργήσει δύο εξόδους (V_{out1} και V_{out2}) οι οποίες απεικονίζουν το σήμα σαν ένα διάνυσμα με μέτρο $R = \sqrt{(V_{out1})^2 + (V_{out2})^2}$ και γωνία $\theta = \tan^{-1}(\frac{V_{out1}}{V_{out2}})$.

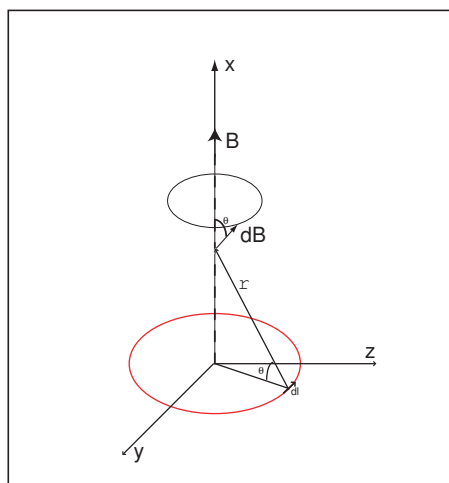
Κεφάλαιο 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΗΝΙΩΝ

Για τον υπολογισμό του σχήματος των οκτώ πηνίων δημιουργήσαμε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα στο MATHEMATICA το οποίο μπορεί να υπολογίσει το μαγνητικό πεδίο μίας οποιασδήποτε κατανομής ρεύματος στηριζόμενο στο νόμο των Biot - Savart,

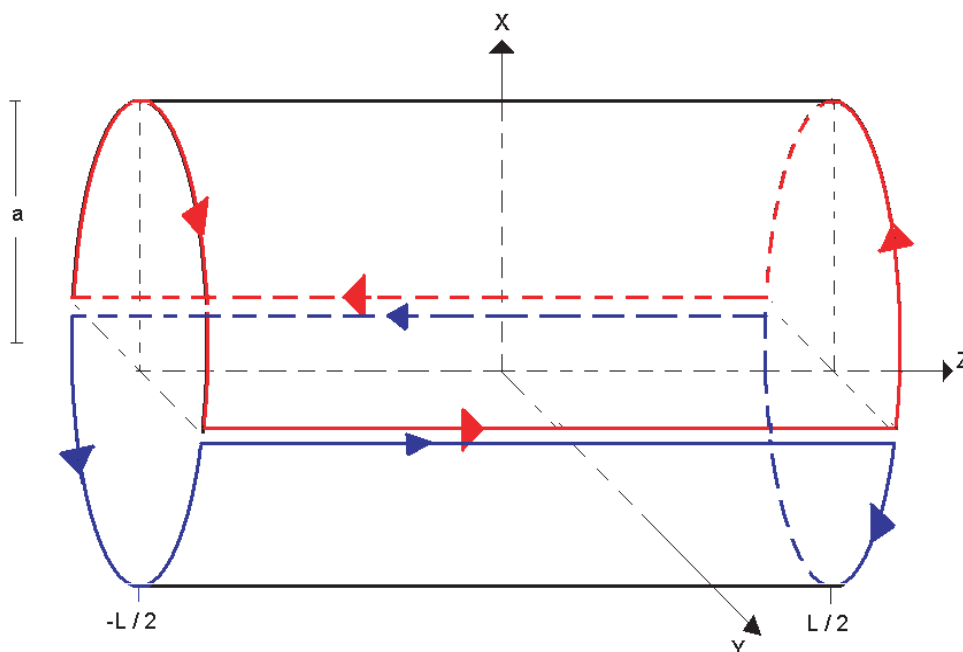
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (3.1)$$

Γνωρίζοντας το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν ορισμένες βασικές κατανομές ηλεκτρικού ρεύματος και τροποποιώντας τις ανάλογα με την περίπτωση, κατέστη δυνατό να εξάγουμε τα επιθυμητά σχήματα. Για παράδειγμα γνωρίζουμε ότι ένας κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός που βρίσκεται στο yz επίπεδο



Σχήμα 3.1: Ρευματοφόρος Βρόχος.

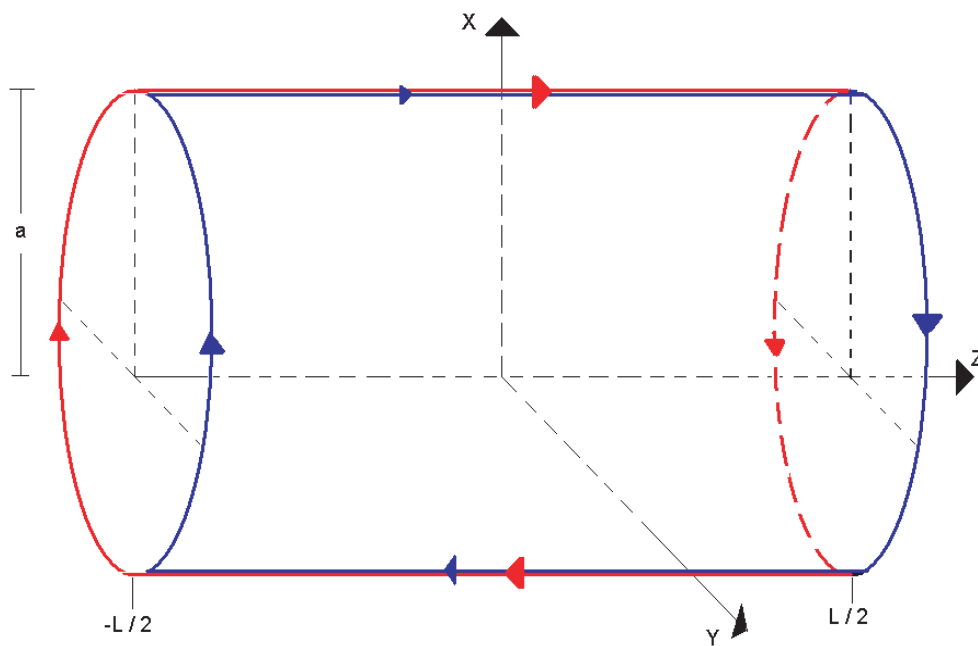
δημιουργεί μαγνητικό πεδίο με διεύθυνση στον x άξονα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Λαμβάνοντας όμως υπόψιν τους τεχνικούς και γεωμετρικούς περιορισμούς ο κυκλικός κυκλικός βρόχος θα πρέπει να τροποποιηθεί χωρίς όμως να αλλάξει δραστικά η μορφή του πεδίου. Μετά τις τροποποιήσεις το σχήμα του πηνίου θα έχει τη μορφή που εικονίζεται στο σχήμα 3.2 Με την ίδια ακριβώς διάταξη αλλά



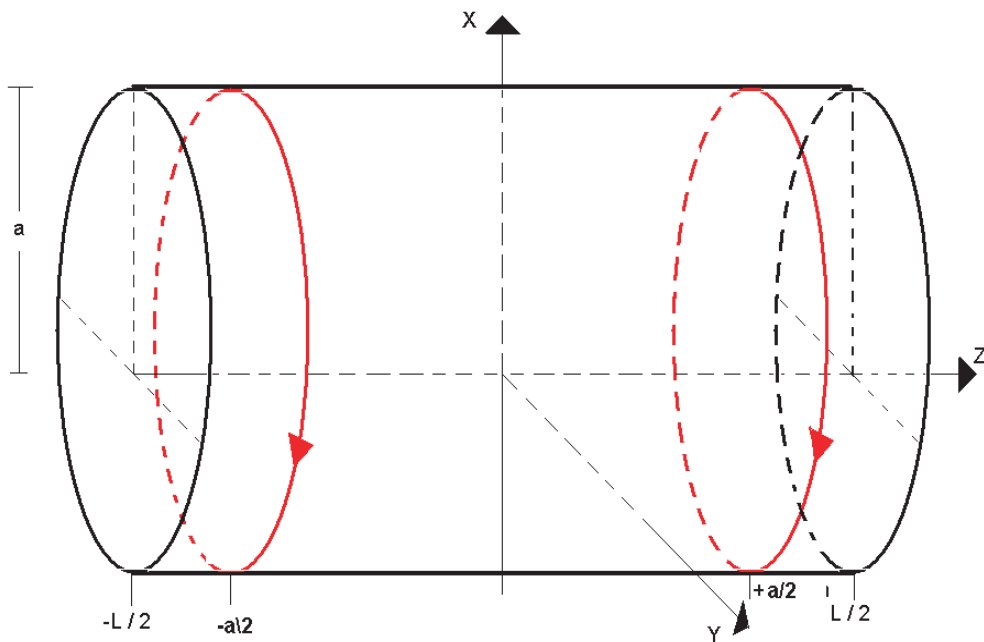
Σχήμα 3.2: Πηνίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου B_x .

στραμμένη κατά 90° δημιουργήσαμε το πηνίο που παρασκευάζει το ομογενές μαγνητικό πεδίο B_y . Η μορφή του εικονίζεται στο σχήμα 3.3 Ακολουθώντας την ίδια τακτική και τροποποιώντας ανάλογα με την περίπτωση γνωστές κατανομές ρεύματος βρήκαμε και τα υπόλοιπα έξι πηνία. Το πηνίο για την δημιουργία ομογενούς πεδίου B_z φαίνεται στο σχήμα 3.4 και είναι ένα πηνίο Helmholtz, δηλαδή δύο κυκλικοί βρόχοι που διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα. Όπως τα πηνία B_x και B_y προκύπτει το ένα από το άλλο με περιστροφή 90° γύρω από των άξονα z ¹ το ίδιο ισχύει και για τα πηνία $\frac{dB_x}{dx}$ και $\frac{dB_y}{dy}$.

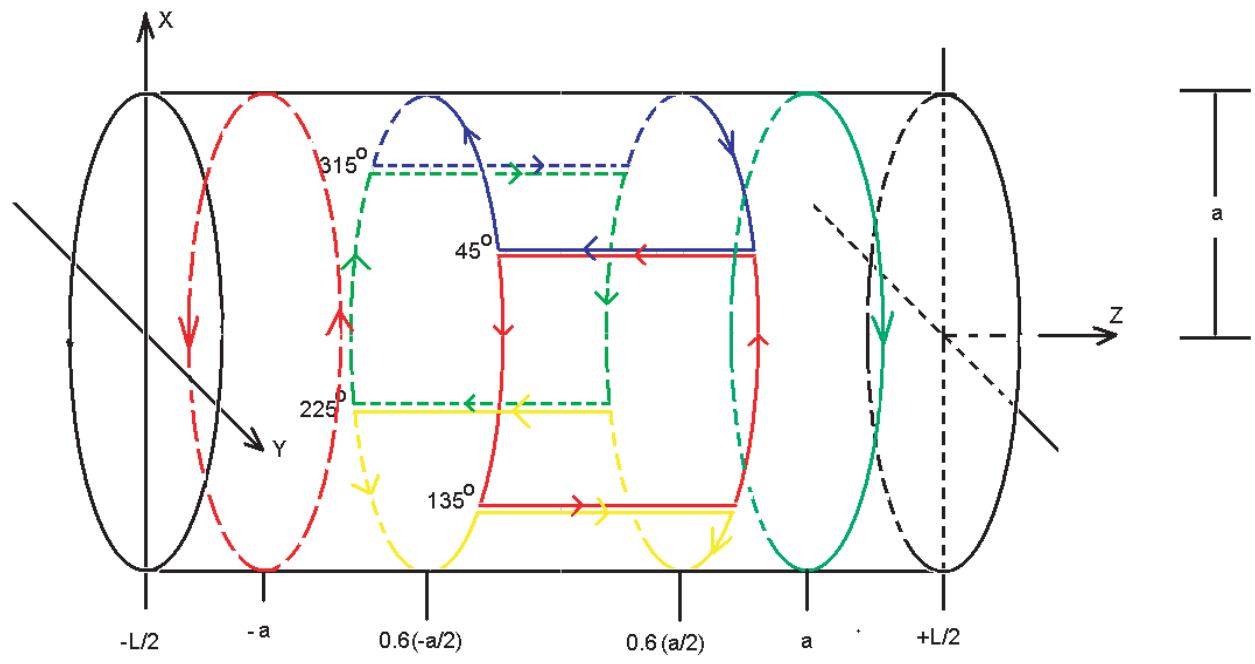
¹Θεωρούμε ως άξονα του κυλίνδρου τον z άξονα.



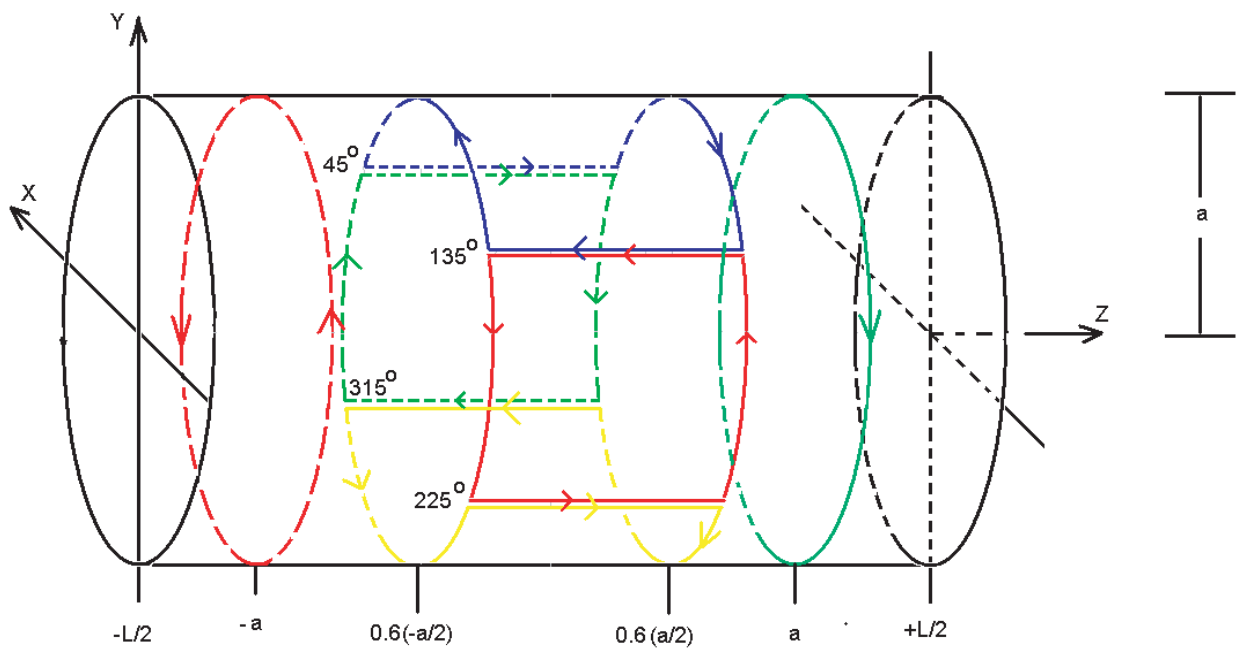
Σχήμα 3.3: Πηγίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου B_y . Η διάταξη είναι όμοια με αυτή για το πεδίο B_x αλλά στραμμένη κατά 180° .



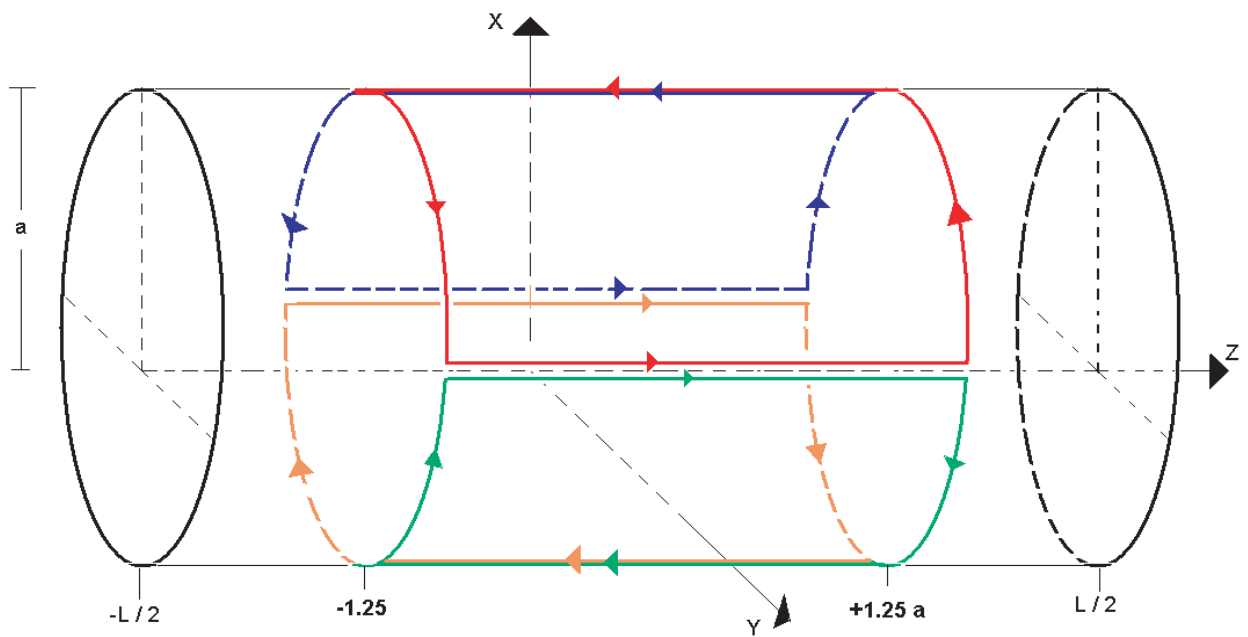
Σχήμα 3.4: Πηνίο Helmholtz για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου B_z .



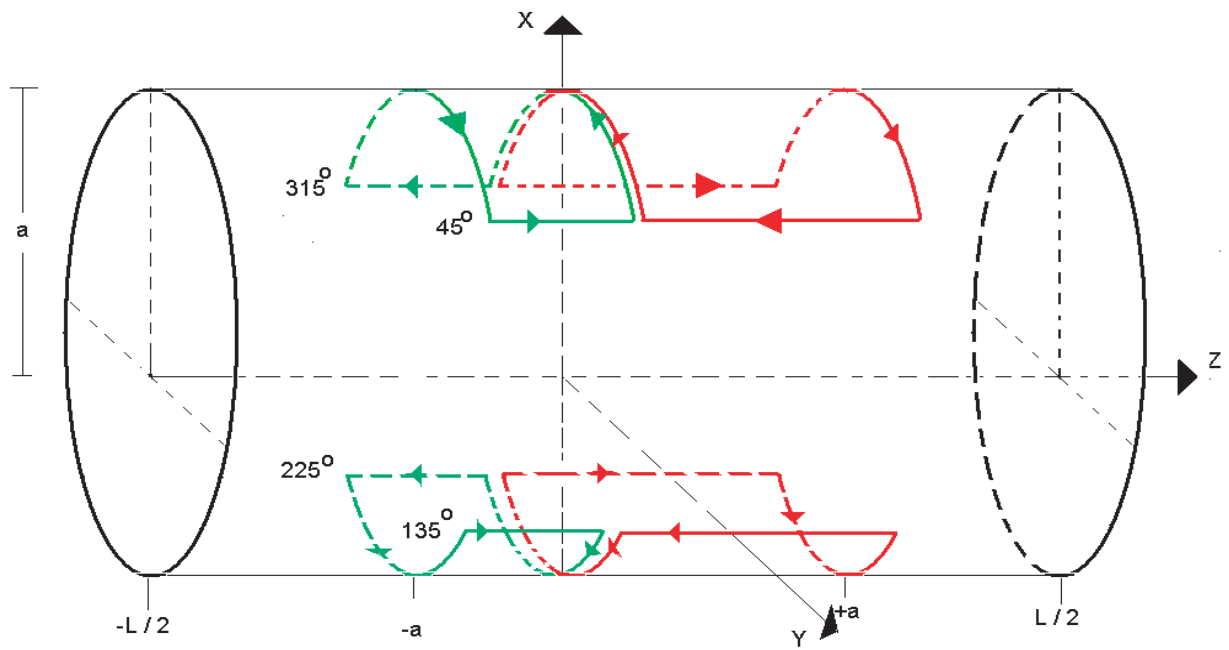
Σχήμα 3.5: Πηνίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου $\frac{dB_x}{dx}$.



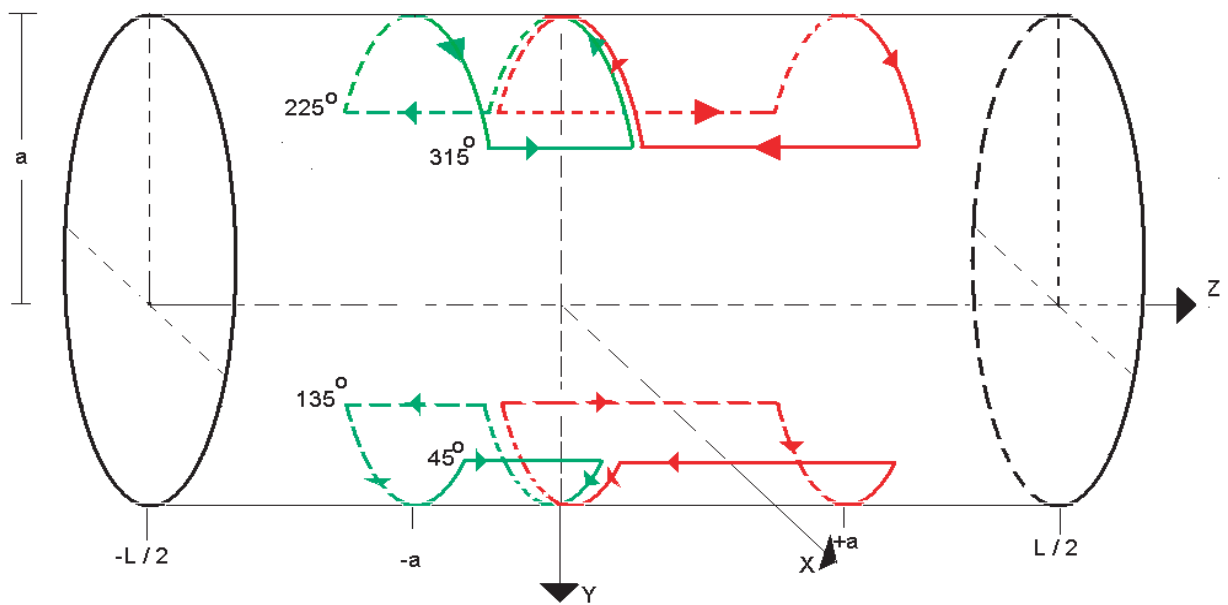
Σχήμα 3.6: Πηνίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου $\frac{dB_y}{dy}$.



Σχήμα 3.7: Πηνίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου $\frac{dB_x}{dy}$.



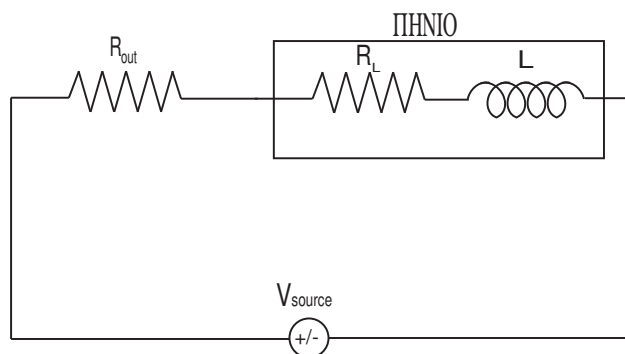
Σχήμα 3.8: Πηγίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου $\frac{dB_x}{dz}$.



Σχήμα 3.9: Πηγίο για την παρασκευή του μαγνητικού πεδίου $\frac{dB_y}{dz}$.

3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΗΝΙΩΝ

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με την ονομασία και τα αντίστοιχα βασικότερα χαρακτηριστικά του κάθε πηνίου: τον αριθμό σπειρών, την ωμική αντίσταση και την αυτεπαγωγή. Ο καθορισμός της αυτεπαγωγής έγινε πειραματικά. Κάθε πηνίο που κατασκευάσαμε έχει ωμική αντίσταση, που μπορούμε να μετρήσουμε με ένα ωμόμετρο. Σε σειρά με το πηνίο και την πηγή τάσης υπάρχει μία αντίσταση ακριβείας 99.6 kΩ. Θεωρώντας το παρακάτω κύκλωμα προκύπτει ότι ο λόγος της πτώσης τάσης στα



Σχήμα 3.10: Ηλεκτρικό κύκλωμα της πειραματικής διάταξης.

άκρα του πηνίου προς την τάση της πηγής είναι:

$$\left(\frac{V_L}{V_{source}}\right)^2 = \frac{R_L^2 + (\omega L)^2}{(R_{out} + R_L)^2 + (\omega L)^2} \quad (3.2)$$

όπου V_L η πτώση τάσης στα άκρα του πηνίου, V_{source} η τάση της πηγής, R_{out} η εξωτερική αντίσταση και R_L η ωμική αντίσταση του πηνίου. Όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι άμεσα μετρήσιμες. Υπολογίζοντας τον λόγο για δύο διαφορετικές συχνότητες (ω), διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις που προκύπτουν από την (εξ.3.2) και λύνοντας ως προς L μπορούμε να υπολογίσουμε την αυτεπαγωγή.

Πηνίο	Αριθμός Σπειρών	Αντίσταση Πηνίου (Ω)	Αυτεπαγωγή (μH)
B_x	2	6.4	35
B_y	2	7.1	35
B_z	5	7.6	45
$\frac{dB_x}{dx}$	αντι-Helmholtz: 4 υπόλοιπο: 2	10.3	30
$\frac{dB_x}{dy}$	2	7.1	25
$\frac{dB_x}{dz}$	3	9.4	35
$\frac{dB_y}{dy}$	αντι-Helmholtz: 4 υπόλοιπο: 2	10.4	30
$\frac{dB_y}{dz}$	3	9.5	25

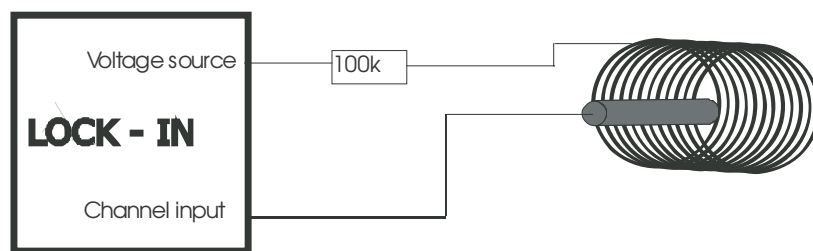
Πίνακας 3.1: Βασικότερα χαρακτηριστικά των πηνίων

Κεφάλαιο 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό κάθε πηνίου πρέπει να λάβουμε υπόψιν τους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Οι κυριότεροι είναι: το μαγνητικό πεδίο της Γής και οι εξωτερικές πηγές που πιθανόν να παράγουν συνεχή ή και εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία. Για να αποφύγουμε το σφάλμα που προκαλούν οι δύο αυτοί παράγοντες στις μετρήσεις για τη χαρτογράφηση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό κάθε πηνίου χρησιμοποιήσαμε την διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Διάταξη για τη χαρτογράφηση των μαγνητικών πεδίων: Το σχήμα δείχνει ένα πηνίο που στο εσωτερικό του βρίσκεται το μαγνητόμετρο Fluxgate. Το πηνίο τροφοδοτείται από τη γεννήτρια του ενισχυτή Lock-in και το μαγνητόμετρο συνδέεται στην είσοδό του.

Κάθε πηνίο τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση μερικών μV συγκεκριμένης συχνότητας και η έξοδος του μαγνητόμετρου συνδέεται στην είσοδο ενός ενισχυτή Lock-in. Όπως είπαμε και στην ενότητα (2.2) ο ενισχυτής Lock-in ενισχύει μικρά εναλλασσόμενα σήματα που έχουν την ίδια συχνότη-

τα με τη συχνότητα ανοφοράς του. Ως πηγή εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιήσαμε την εσωτερική γεννήτρια του ενισχυτή Lock-in. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην χαρτογράφηση του πεδίου το μαγνητόμετρο τοποθετήθηκε πάνω σε μία βάση που είχε δυνατότητα να κινείται και στις τρεις διαστάσεις με μικρομετρικό τρόπο. Έτσι, με την κατάλληλη ευθυγράμμιση του μαγνητόμετρου, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια το πεδίο σε κάθε θέση.

4.2 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ

Για να πραγματοποιηθεί η χαρτογράφηση του μαγνητικού πεδίου θα πρέπει πρώτα να ευθυγραμμίσουμε τους τρεις αισθητήρες του μαγνητόμετρου με τον κύλινδρο. Η ευθυγράμμιση θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούνται δύο προϋποθέσεις:

- οι συνιστώσες (B_x, B_y, B_z) να έχουν τοπικό μέγιστο στο κέντρο του κυλίνδρου
- οι βαθμίδες στο κέντρο να μηδενίζονται.

Λόγω όμως των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών ήταν αδύνατο και τα οκτώ σωληνοειδή να τοποθετηθούν στις ακριβείς θέσεις που προβλέπουν οι θεωρητικοί υπολογισμοί. Το γεγονός αυτό είχε ως συνέπεια μια μετατόπιση στα κέντρα των σωληνοειδών και άρα δυσκολία να ικανοποιηθούν και οι δύο προηγούμενες προϋποθέσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι η ομοιογένεια των τριών συνιστωσών είναι μεγάλη, η πρώτη προϋπόθεση μπορεί να αγνοηθεί και να τηρηθεί μόνο η δεύτερη. Έτσι ως κέντρο της διάταξης και των οκτώ σωληνοειδών θεωρήσαμε το σημείο εκείνο στο οποίο οι βαθμίδες $\frac{dB_x}{dx}$, $\frac{dB_y}{dy}$ και $\frac{dB_z}{dz}$ μηδενίζονται.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Στην ενότητα αυτή θα παρατεθούν γραφικές παραστάσεις που περιλαμβάνουν γραφήματα με τις θεωρητικές (κόκκινα σημεία) και πειραματικές (μαύρα σημεία) τιμές του μαγνητικού πεδίου σε μία μικρή περιοχή στο κέντρο του κυλίνδρου που μας ενδιαφέρει (η μπλε ευθεία προκύπτει από την εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων). Περιλαμβάνεται ακόμα και ένα γράφημα του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της τάσης στα άκρα του κάθε πηνίου, με σκοπό να πιστοποιήσουμε τη γραμμικότητα του πεδίου. Η όλη διάταξη των σωληνοειδών βρισκόταν εκτός μαγνητικής θωράκισης. Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα οι πειραματικές και οι θεωρητικές τιμές των μαγνητικών πεδίων βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη συμφωνία, της τάξης του 1.5%.

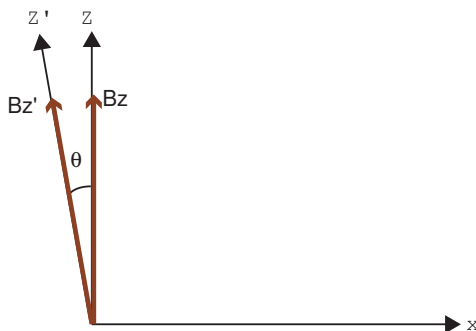
4.4 ΠΗΓΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Οι βασικότερες πηγές σφάλματος στις μετρήσεις μας προέρχονται από το μαγνητόμετρο Fluxgate. Σύμφωνα με το διάγραμμα θορύβου συναρτήσει της συχνότητας (σχ.2.5) ο θόρυβος είναι $8.282 \text{ pT}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Επομένως αν οι μετρήσεις γίνονται σε ένα εύρος Δf γύρω από μία συγκεκριμένη συχνότητα f , ο θόρυβος εξαιτίας του μαγνητόμετρου θα είναι

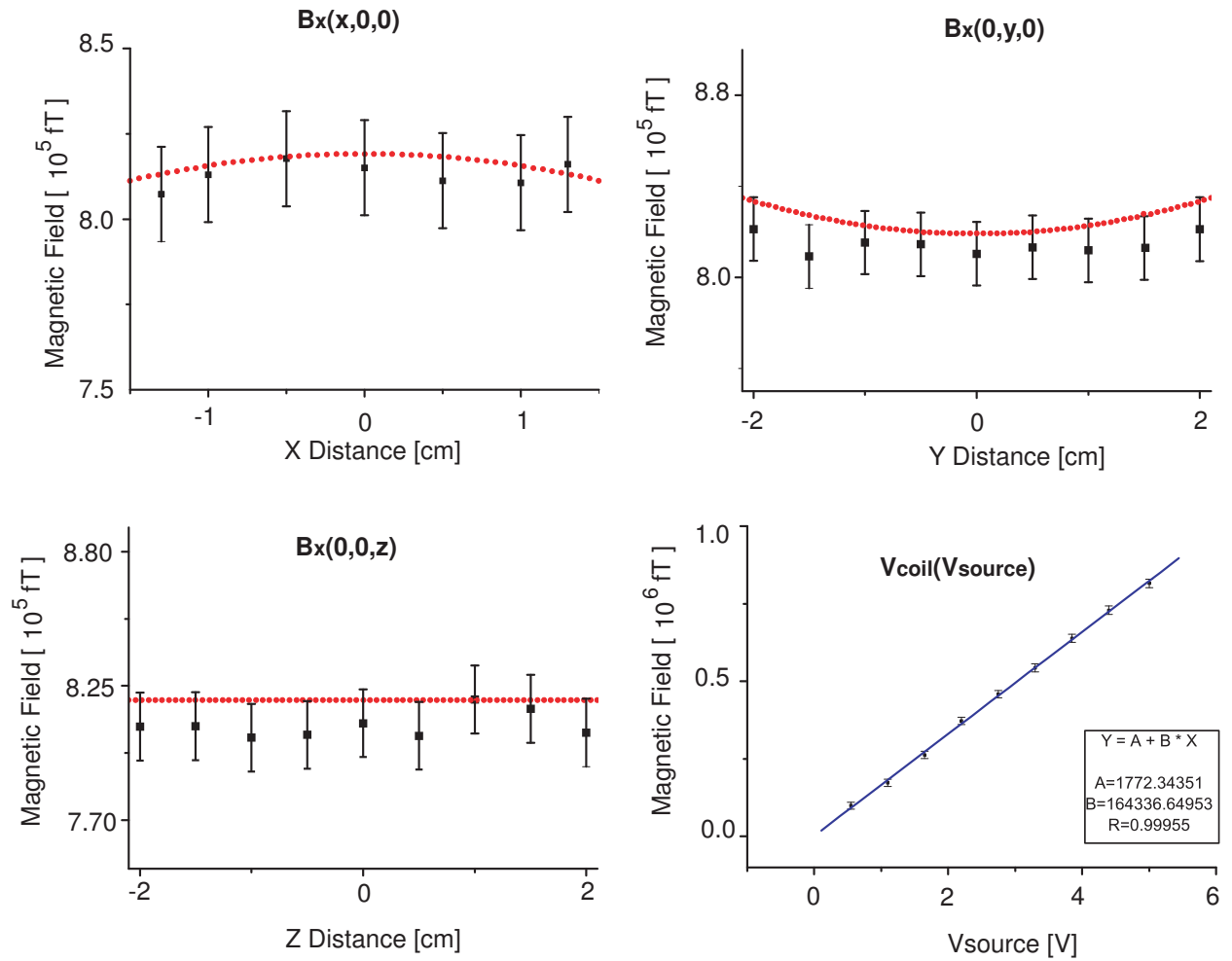
$$N = (8.282 \text{ pT}_{rms}/\sqrt{\text{Hz}})\sqrt{\Delta f} \quad (4.1)$$

Επομένως για εύρος συχνοτήτων $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ ο θόρυβος είναι: $\sim 8 \text{ pT}_{rms}$. Εκτός όμως από τον θόρυβο το μαγνητόμετρο έχει και σφάλμα στην ορθογωνιότητα των αξόνων 0.5° όπως φαίνεται στο σχήμα (4.2).

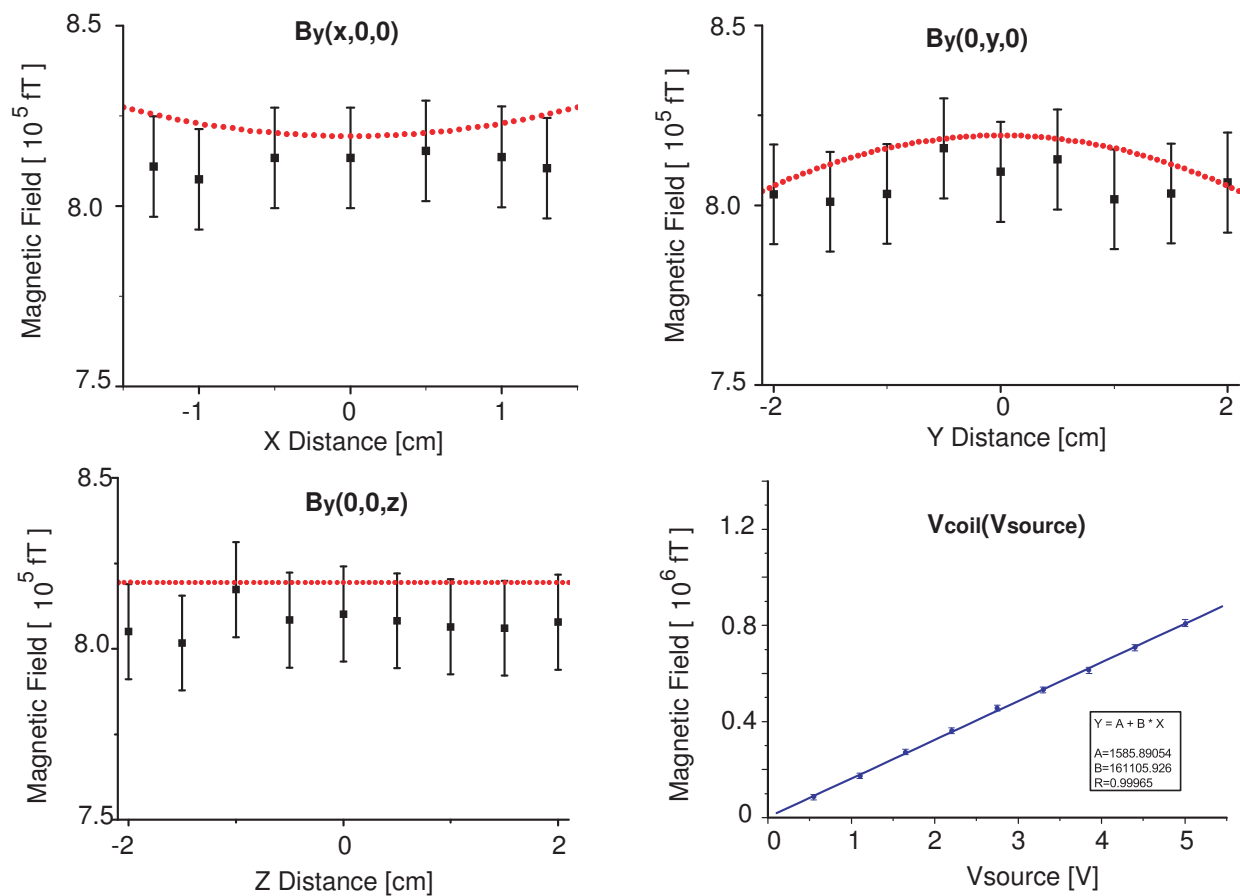


Σχήμα 4.2: Σφάλμα Ορθογωνιότητας

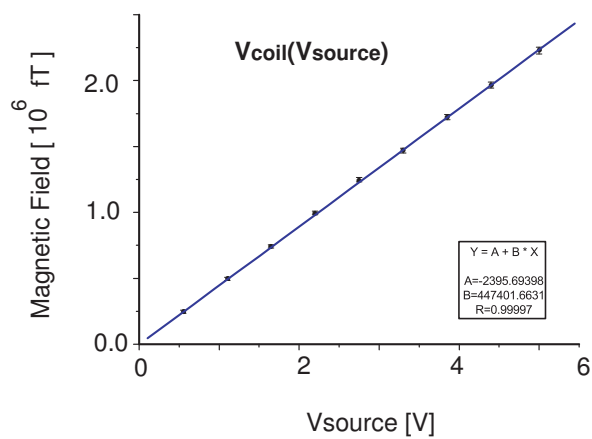
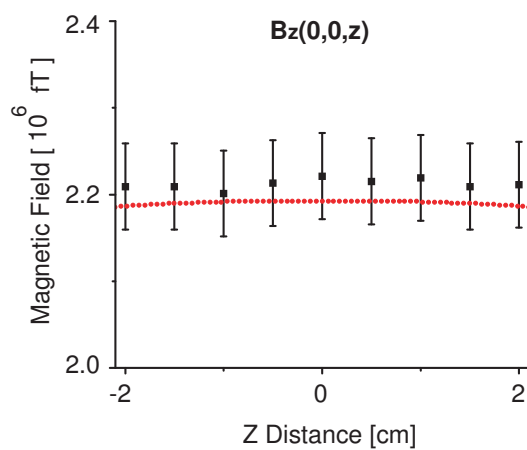
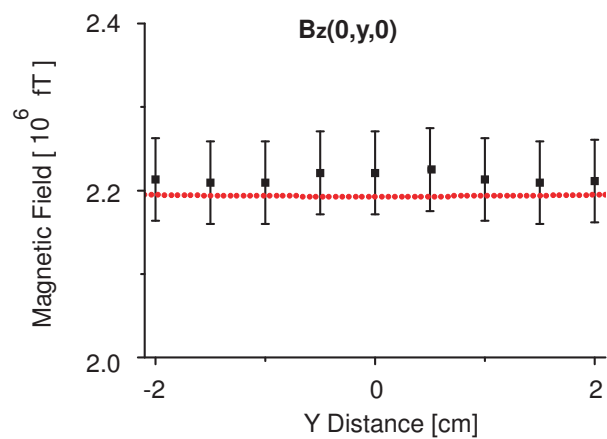
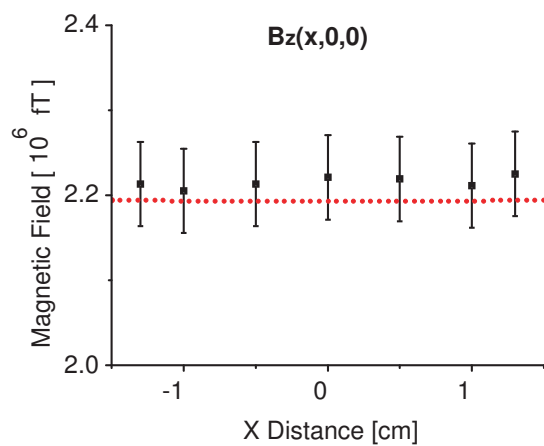
Επομένως αν η μετρούμενη τιμή του μαγνητικού πεδίου είναι B'_z και το σφάλμα στην ορθογωνιότητα είναι 0.5° , τότε η πραγματική τιμή του μαγνητικού πεδίου είναι $B_z = 0.01B'_z$. Άρα το σφάλμα της μέτρησης είναι $\Delta B = \pm 0.01 \cdot B'_z$. Ο PSD και το φίλτρο Low-Pass του ενισχυτή Lock-In ανιχνεύουν εκτός από το σήμα με συχνότητα ω_{ref} και σήματα των οποίων οι συχνότητες βρίσκονται σε ένα εύρος συχνοτήτων πολύ κοντά στην ω_{ref} . Άμεση συνέπεια αυτού είναι και η ανίχνευση του θορύβου. Για μια σταθερά χρόνου $\tau = 1 \text{ s}$, το εύρος συχνοτήτων που ανιχνεύονται είναι $\Delta f = 1 \text{ Hz}$, οπότε, σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο θόρυβος στην έξοδο του Lock-In που οφείλεται στο μαγνητόμετρο θα είναι $1 \mu\text{V}$. Δεδομένου ότι ο θόρυβος που οφείλεται στον ίδιο τον ενισχυτή είναι της τάξης του $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, που αντιστοιχεί σε 35 fT , η συνεισφορά του στον ολικό θόρυβο της μέτρησης είναι αμελητέα. Επομένως το συνολικό σφάλμα στις μετρήσεις μας δίνεται από τη σχέση $\Delta B = \pm \sqrt{(0.01B'_z)^2 + (8000)^2 + 35^2}$.



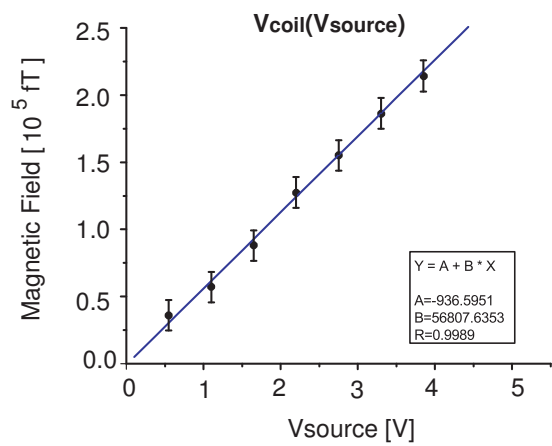
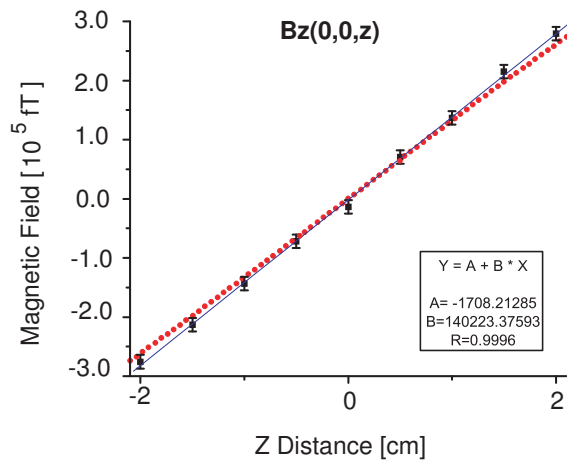
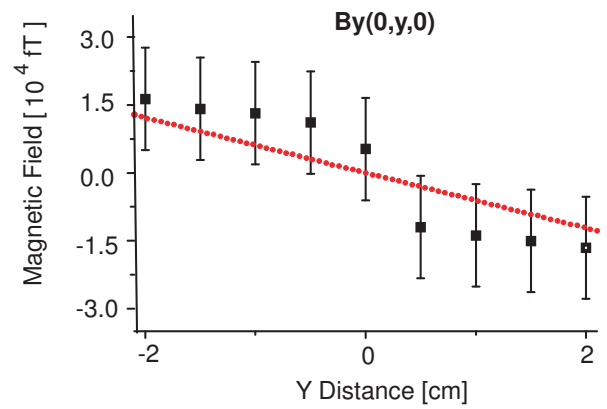
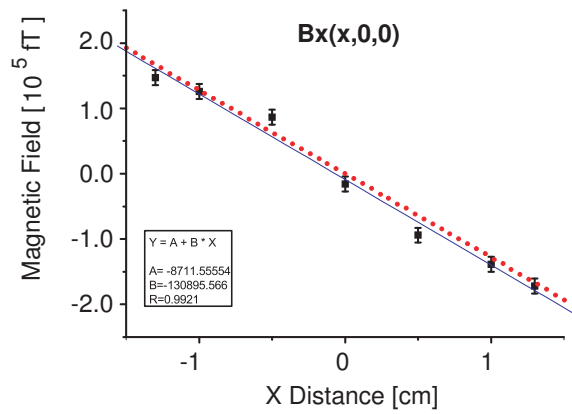
Σχήμα 4.3: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής του ομογενούς μαγνητικού πεδίου B_x εκτός μαγνητικής θωράκισης.



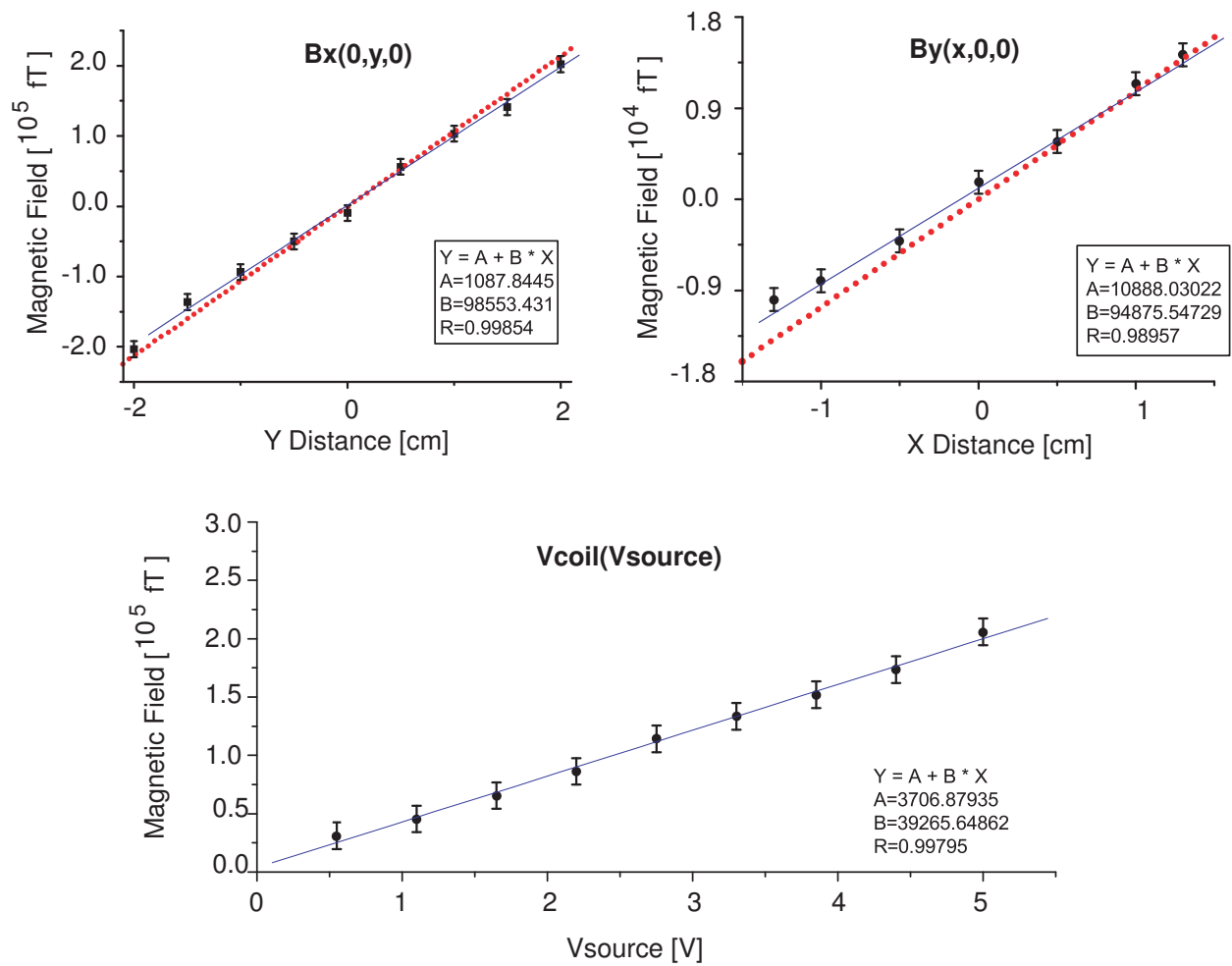
Σχήμα 4.4: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής του ομογενούς μαγνητικού πεδίου B_y εκτός μαγνητικής θωράκισης.



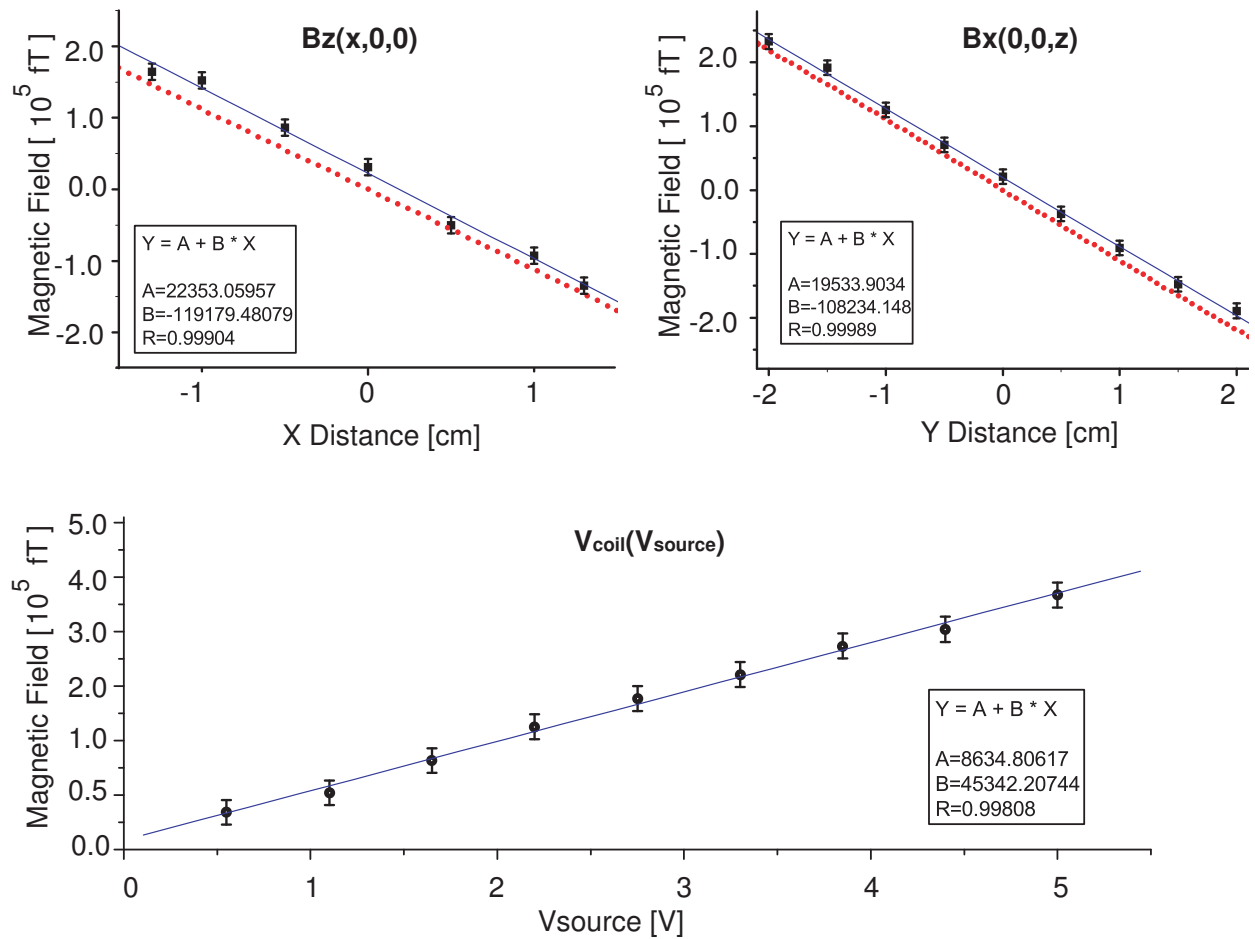
Σχήμα 4.5: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής του ομογενούς μαγνητικού πεδίου B_z εκτός μαγνητικής θωράκισης.



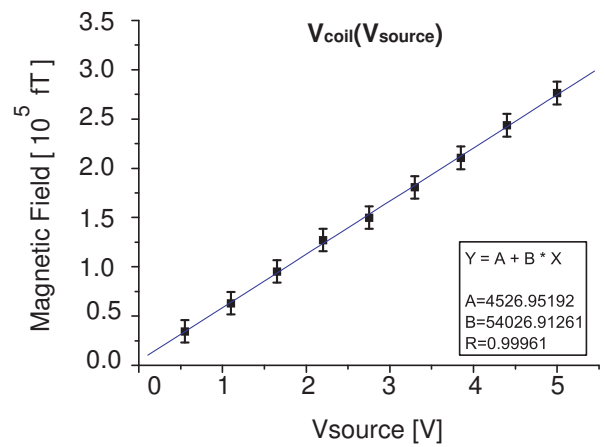
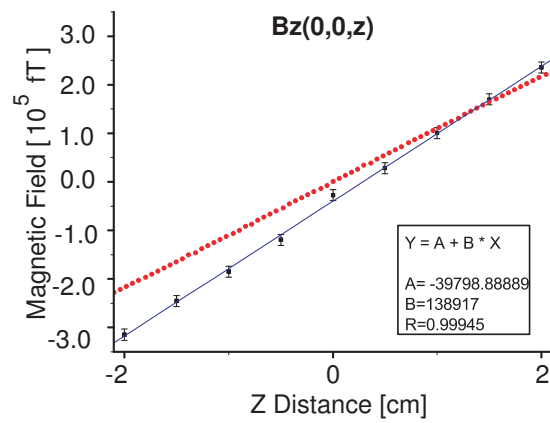
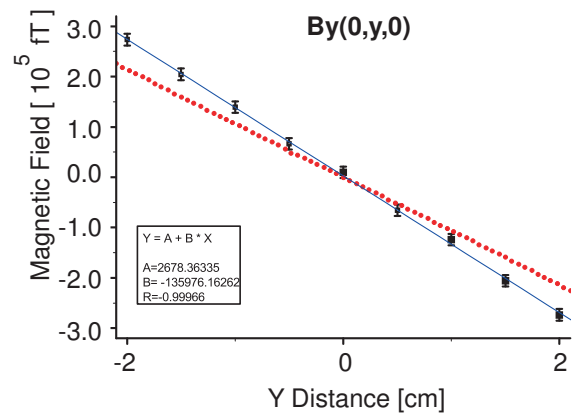
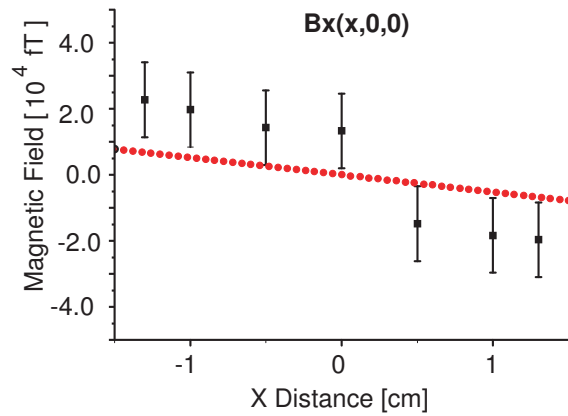
Σχήμα 4.6: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής της βαθμίδας $\frac{dB_x}{dx}$ εκτός μαγνητικής θωράκισης.



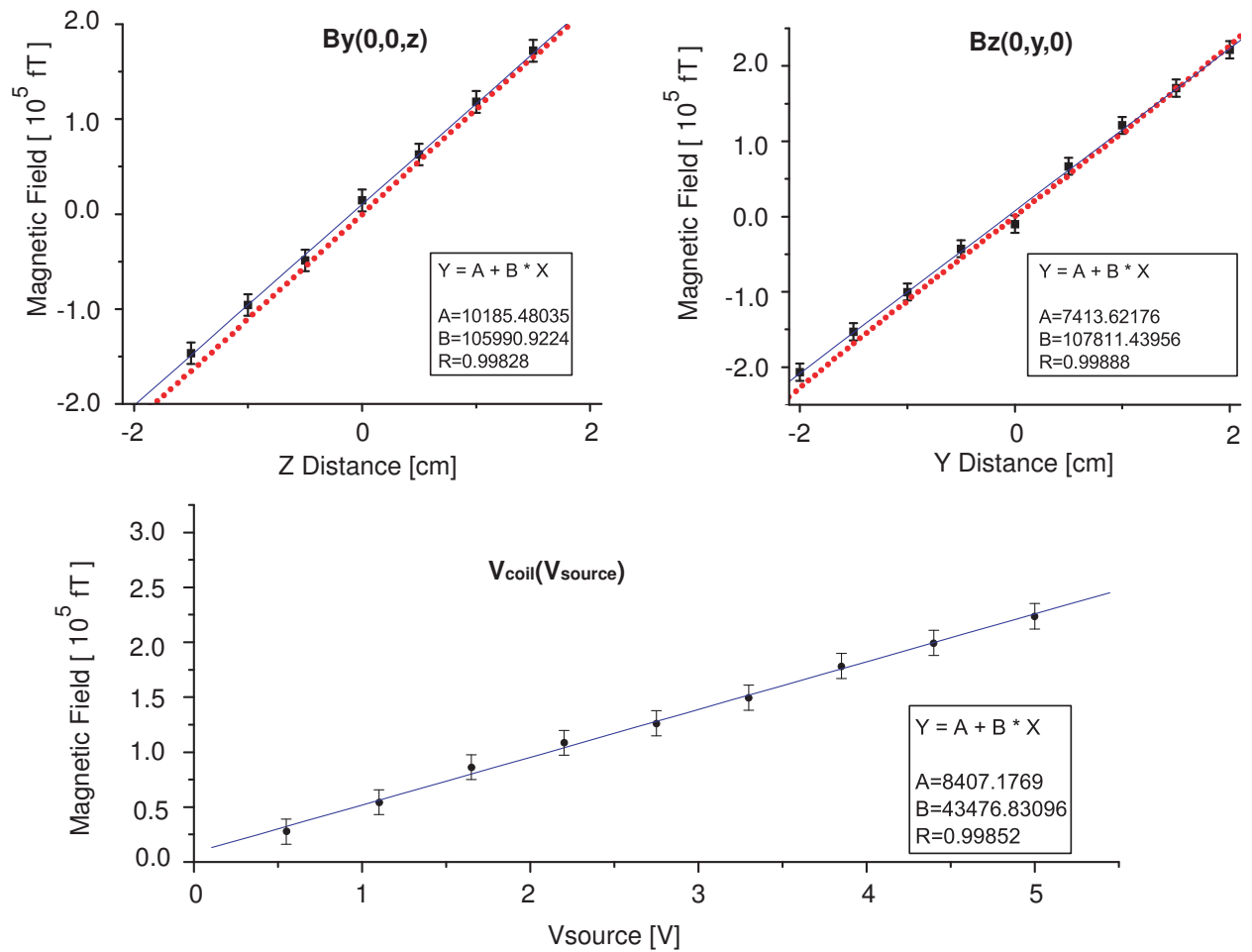
Σχήμα 4.7: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής της βαθμίδας $\frac{dB_x}{dy}$ εκτός μαγνητικής θωράκισης.



Σχήμα 4.8: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής της βαθμίδας $\frac{dB_x}{dz}$ εκτός μαγνητικής θωράκισης.



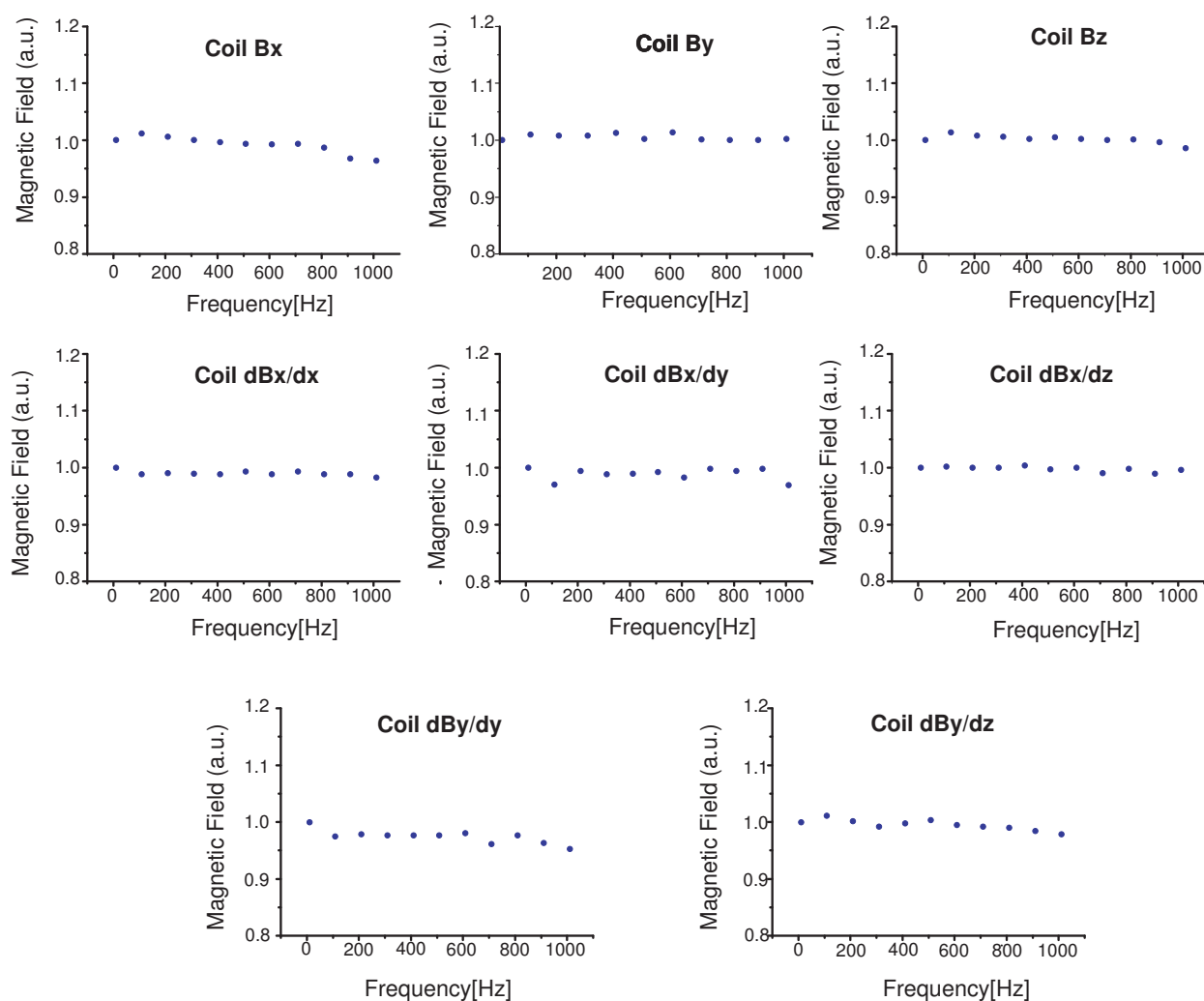
Σχήμα 4.9: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής της βαθμίδας $\frac{dB_y}{dy}$ εκτός μαγνητικής θωράκισης.



Σχήμα 4.10: Πειραματικές και θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου για το πηνίο παρασκευής της βαθμίδας $\frac{dB_y}{dz}$ εκτός μαγνητικής θωράχισης.

4.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Επειδή το μαγνητόμετρο δεν θα λειτουργεί μόνο σε μία συχνότητα, αλλά σε ένα εύρος από μερικά Hz έως 1 kHz κρίθηκε σκόπιμο να γνωρίζουμε την εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη συχνότητα. Επειδή η εξάρτηση της επαγωγικής αντίστασης από τη συχνότητα είναι $Z_L = \omega L$, προκύπτει ότι για $L \sim 50 \mu\text{H}$ και $f \sim 1 \text{ kHz}$ θα είναι $Z_L \sim 0.05 \Omega$, δηλαδή αμελητέα. Επομένως δεν περιμένουμε καμία μεταβολή του μαγνητικού πεδίου με τη συχνότητα ως το 1 kHz (που είναι και το μέγιστο εύρος ζώνης του ατομικού μαγνητόμετρου), κάτι που επιβεβαιώνεται από τις παρακάτω μετρήσεις.



Σχήμα 4.11: Εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη συχνότητα

Βιβλιογραφία

- [1] I.K. Kominis, T.W. Kornack, J.C. Allred, M.V. Romalis, *A subfemtoTesla multichannel atomic magnetometer*, Nature **422**, 596 (2003)
- [2] G. Bison, R. Wynands, A. Weis, *A laser pumped magnetometer for the mapping of human cardiomagnetic fields*, Appl Phys **76**, 325 (2003)
- [3] J.P. Wikswo, *Applications of SQUID Magnetometers to Biomagnetism and Nondestructive Evaluation*
- [4] O.V. Nielsen et.al., *Development, construction and analysis of the 'Oersted' fluxgate magnetometer*, Meas.Sci.Technol. **6**, 1099 (1995)
- [5] F. Primdahl, *The fluxgate magnetometer*, J.Phys. **12**, 241 (1979)
- [6] T.J. Summer, L.M.Pendlebury, K.F. Smit, *Conventional Magnetic Shielding*, Appl. Phys. **20**, 1095 (1987)
- [7] Stanford Research Systems, *DSP Lock In Amplifier MODEL SR830*
- [8] PerkinElmer instruments, *Specifying Lock-in Amplifiers*, Technical Note TN 1001 (www.signalrecovery.com)