



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ**

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥΣ  
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ**

Κολοβός Αντώνιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

ΑΘΗΝΑ 2017



## Περίληψη

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η χρήση δύο μαγνητικών αισθητήρων Hall, σε συνδυασμό με σιδηρομαγνητικό πυρήνα-concentrator για τον προσδιορισμό της έντασης του ρεύματος σε έναν αγωγό καθώς και της θέσης του, από απόσταση. Η προτεινόμενη διάταξη είναι ένας ημικυκλικός concentrator με διάκενο αέρα όπου βρίσκεται ένας αισθητήρας Hall και δύο όμοιες τέτοιες διατάξεις τοποθετούνται σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από τον αγωγό. Αν η μεταξύ τους απόσταση είναι γνωστή σε συνδυασμό με τις τιμές του μαγνητικού πεδίου, είναι δυνατόν να μετρηθεί το ρεύμα στον αγωγό και η απόστασή του από τους αισθητήρες. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στο πρόγραμμα FEMM, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά μιας τέτοιας διάταξης και προσδιορίστηκαν οι παράμετροι για την λειτουργία της.



## Abstract

In this thesis, the use of two magnetic Hall detectors, in conjunction with a ferromagnetic semicircular concentrator, for measuring the current and position of a conductor was examined. The proposed device uses a semicircular core with an air gap, where a Hall effect sensor is placed. Two identical such cores, are placed in two different distances from the conductor. By measuring the magnetic field in these two positions, and knowing the relative distance between them, it is possible to calculate the current and true distance of the conductor. Using finite element analysis (FEMM program) the performance of such a device was measured and characterized.



# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Abstract.....	iii
1 Τεχνικές μέτρησης ηλεκτρικού ρεύματος .....	1
1.1 Το ηλεκτρικό ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό .....	1
1.2 Μαγνητικά Υλικά.....	6
1.3 Μέτρηση του ρεύματος με πτώση τάσης σε αντίσταση .....	10
1.4 Όργανα στρεφόμενου πηνίου (Γαλβανόμετρα) .....	12
1.5 Επαγωγικά όργανα (Μετρητής Ισχύος ΔΕΗ).....	13
1.6 Μετασχηματιστής έντασης .....	15
1.7 Μέτρηση του ρεύματος με μαγνητικό αισθητήρα.....	16
1.8 Συστήματα Κλειστού Βρόχου .....	19
2 Τρόποι μέτρησης μαγνητικού πεδίου .....	21
2.1 Το φαινόμενο Hall.....	21
2.2 Διατάξεις Hall .....	24
2.3 Άλλες μέθοδοι μέτρησης μαγνητικού πεδίου .....	28
3 Η προτεινόμενη διάταξη.....	31
3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Χρήση μαγνητικού πυρήνα .....	33
3.3 Σφάλματα .....	36

4	Εξομοίωση στο FEMM .....	37
4.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	37
4.2	Το πρόγραμμα FEMM .....	38
4.3	Θεμελίωση του προβλήματος .....	40
4.4	Αποτελέσματα.....	43
5	Συμπεράσματα.....	51
	Παράρτημα Α .....	53
6	Βιβλιογραφία .....	59



# 1 Τεχνικές μέτρησης ηλεκτρικού ρεύματος

## 1.1 Το ηλεκτρικό ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό

### Το ηλεκτρικό ρεύμα

Ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται κάθε διατεταγμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων από τη μία περιοχή του χώρου σε μια άλλη. Για την ποσοτική περιγραφή του, χρησιμοποιείται συνήθως το βαθμωτό μέγεθος που ονομάζεται ένταση ηλεκτρικού ρεύματος η οποία ορίζεται ως το φορτίο  $\Delta q$  που ρέει διαμέσου μιας επιφάνειας  $S$  σε χρόνο  $\Delta t$  και μονάδα μέτρησης είναι το Ampere (A):

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ sec}}$$

Με βάση τα παραπάνω, το ρεύμα ορίζεται σαν τον καθαρό ρυθμό μεταφοράς φορτίου. Ο ορισμός αυτός δεν αποκλείει τη συμμετοχή φορέων θετικού ή αρνητικού φορτίου ή και των δύο. Η αγωγιμότητα σε μέταλλα, οφείλεται στην ύπαρξη των ελεύθερων ηλεκτρονίων (ηλεκτρόνια σθένους) ωστόσο σε άλλα μέσα, όπως για παράδειγμα σε μία λυχνία νέου ή σε έναν ηλεκτρολύτη, μπορεί να υπάρχουν και θετικοί φορείς, οι οποίοι κινούνται αντίθετα από τους αρνητικούς (λειτουργούν προσθετικά για το συνιστάμενο ρεύμα). Το συνολικό ρεύμα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$i = \frac{dq^+}{dt} + \frac{dq^-}{dt}, \text{ όπου } \frac{dq^+}{dt} \text{ ο ρυθμός ροής θετικών φορτίων προς τη μία}$$

κατεύθυνση και  $dq^-/dt$  ο ρυθμός ροής αρνητικών φορτίων προς την άλλη κατεύθυνση [1].

Ένα άλλο μέγεθος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή του ηλεκτρικού ρεύματος, είναι η πυκνότητα ρεύματος  $\vec{J}$ . Η πυκνότητα ρεύματος είναι το διανυσματικό μέγεθος έτσι ώστε το ολοκλήρωμα της κάθετης συνιστώσας της σε μία επιφάνεια να δίνει το ρεύμα μέσω αυτής της επιφάνειας [2]:

$$i = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS}, \quad \vec{dS} = \vec{n} dS \quad (1.2)$$

όπου  $\vec{n}$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια και  $dS$  η στοιχειώδης επιφάνεια.

Εναλλακτικά, η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να οριστεί με βάση την ένταση ως εξής:

$$\vec{J} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{I(S)}{S} \quad (1.3)$$

### Το μαγνητικό Πεδίο

Από την αρχαιότητα ήταν γνωστό ότι ορισμένα ορυκτά, όπως ο μαγνητίτης, παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες. Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα χάρη στα πειράματα του Oersted και του Faraday ανακαλύφθηκε ότι και οι ρευματοφόροι αγωγοί παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες, παρόμοιες με αυτές των μόνιμων μαγνητών.

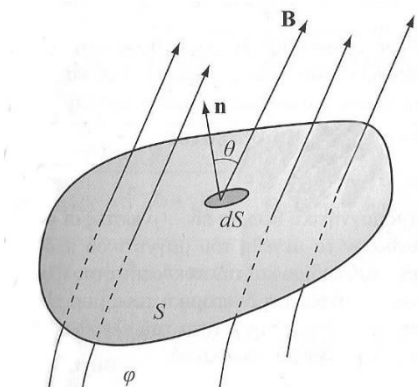
Τα βασικά μεγέθη του μαγνητικού πεδίου είναι η μαγνητική επαγωγή (ή αλλιώς πυκνότητα μαγνητικής ροής), η μαγνητική ροή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Η μαγνητική επαγωγή είναι διανυσματικό μέγεθος και εκφράζει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής σε ένα δεδομένο σημείο του χώρου. Συμβολίζεται με το γράμμα  $B$  και η μονάδα μέτρησης στο SI είναι το Tesla (T). Εφόσον μιλάμε για πυκνότητα μαγνητικής ροής, η μαγνητική ροή  $\varphi$  που διέρχεται από μια επιφάνεια  $S$  ισούται με το επιφανειακό ολοκλήρωμα της μαγνητικής επαγωγής πάνω στην  $S$ :

$$\varphi = \int_S B \vec{n} dS \quad (1.4)$$

όπου  $\vec{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην  $dS$ .

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής στο SI είναι το Weber, και 1 Tesla αντιστοιχεί σε 1 Wb/m<sup>2</sup>. Ένα άλλο βασικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου (διανυσματικό μέγεθος), η οποία μετράται σε Ampere ανά μέτρο (A/m).



Σχήμα 1.1 : Μαγνητική ροή και μαγνητική επαγωγή [3]

Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού στο οποίο βρίσκεται το πεδίο:

$$B = \mu H \quad (1.5)$$

Η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  είναι βαθμωτό μέγεθος και στο κενό ισούται με  $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{H/m}$ <sup>1</sup>. Σε άλλα υλικά, μπορεί να εκφραστεί ως  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , όπου  $\mu_r$  είναι μια αδιάστατη σταθερά που ονομάζεται σχετική μαγνητική διαπερατότητα και εκφράζει το πόσο εύκολα μαγνητίζεται ένα υλικό. Εν γένει η μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού είναι συνάρτηση της έντασης του πεδίου, ωστόσο πολλά

<sup>1</sup> Όπου 1 H (Henry)=1Wb/A, η μονάδα μέτρησης του συντελεστή αυτεπαγωγής

υλικά είναι γραμμικά, όπως το κενό ή κατά προσέγγιση γραμμικά, όπως τα σιδηρομαγνητικά (σε ένα εύρος), οπότε έχουν σταθερή μαγνητική διαπερατότητα.

Οι εξισώσεις του Maxwell συνδέουν τα μεγέθη του μαγνητικού πεδίου ( $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$ ) με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $\mathbf{E}$ ), τη πυκνότητα ρεύματος  $\mathbf{J}$  και την χωρική πυκνότητα ελεύθερου φορτίου  $\rho$  [2]:

- Νόμος του Gauss για το ηλ. πεδίο  $\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \rho$  (1.6)

- Νόμος του Ampere  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial (\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t}$  (1.7)

- Νόμος του Faraday  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  (1.8)

- Νόμος του Gauss για το μαγν. Πεδίο  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  (1.9)

Όπως είναι ορατό από τον νόμο του Ampere, το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος και από τον ρυθμό μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου. Η αλληλεπίδραση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου, όπως εκφράζεται από τους νόμους του Faraday και του Ampere δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον χώρο, που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Στις περιπτώσεις που μελετώνται εδώ, τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται με πολύ βραδείς ρυθμούς σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός. Εναλλακτικά, μπορούμε να πούμε ότι οι διαστάσεις του συστήματός μας είναι πολύ μικρότερες του μήκος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που είναι  $\frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega}$ , όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται πρακτικώς ακαριαία και το ηλεκτρικό πεδίο απομπλέκεται από το μαγνητικό, επομένως μπορεί να εξεταστεί το μόνιμο ή οιονεί στατικό μαγνητικό πεδίο στον χώρο [3].

Με βάση την παραπάνω παραδοχή, ο ρυθμός μεταβολής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ μικρός σε σχέση με την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και ο νόμος του Ampere (1.7) για το μόνιμο μαγνητικό πεδίο απλοποιείται:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.10)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Stokes σε μια κλειστή καμπύλη  $C$  που περιβάλλει μια επιφάνεια  $S$  έχουμε την ολοκληρωτική μορφή του παραπάνω νόμου:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot n dS = \int_S \mathbf{J} \cdot n dS = I$$

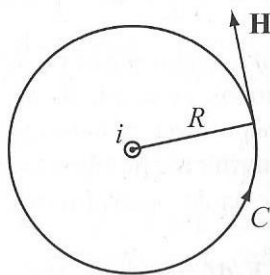
Συνεπώς το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης  $\mathbf{H}$  του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μιας κλειστής καμπύλης  $C$  ισούται με το συνολικό ρεύμα που διέρχεται διαμέσου της επιφάνειας  $S$  που ορίζει η  $C$ .

Είναι δυνατόν τώρα εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση να βρεθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  σε απόσταση  $R$  από το κέντρο ενός ευθύγραμμου αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . Αν θεωρηθεί μια κλειστή κυκλική διαδρομή  $C$  σε μια ακτίνα  $R$ , (Σχήμα 1.2) τότε το  $\mathbf{H}$  θα είναι πάντα κάθετο στην ακτίνα και λόγω συμμετρίας θα έχει σταθερό μέτρο. Επομένως:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = (2\pi R)H = I,$$

δηλαδή:

$$\mathbf{H} = \frac{I}{2\pi R} \quad (1.11)$$



Σχήμα 1.2: Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού [3]

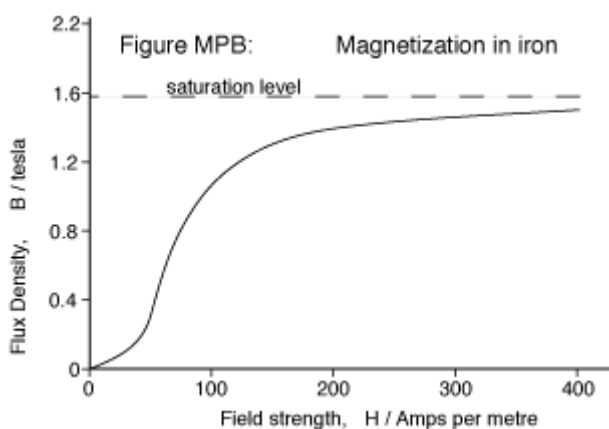
## 1.2 Μαγνητικά Υλικά

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η μαγνητική επαγωγή  $B$ , συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$ , μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού(Σχέση 1.5)

$$B = \mu H, \text{ με } \mu = \mu_0 \mu_r$$

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα υλικά ανάλογα με τη συμπεριφορά τους στο μαγνητικό πεδίο: τα μη μαγνητικά ή διαμαγνητικά υλικά και τα μαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά υλικά. Τα διαμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με το κενό, δηλαδή σταθερή μαγνητική διαπερατότητα και πολύ μικρή τιμή μαγνητικής επαγωγής για λογικές εντάσεις μαγνητικού πεδίου. Τυπικά διαμαγνητικά υλικά είναι ο αέρας, το ξύλο, το νερό, τα πλαστικά και τα περισσότερα μέταλλα εκτός από κράματα που περιέχουν σίδηρο, νικέλιο, κοβάλτιο ή ορισμένα άλλα σπάνια μέταλλα.

Αντιθέτως, τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν πολύ μεγάλες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας, η οποία μπορεί να είναι 2000 έως και 80000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του κενού. Επιπλέον η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του κάθε υλικού:

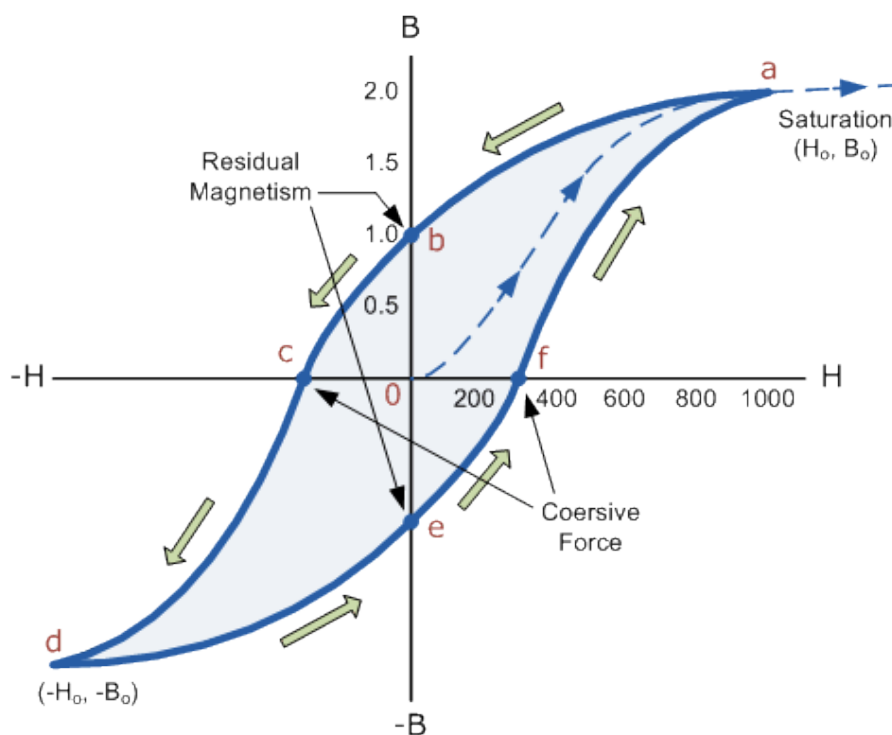


Σχήμα 1.3: Η καμπύλη μαγνήτισης του σιδήρου

Βλέπουμε ότι υπάρχει ένα κατά προσέγγιση γραμμικό τμήμα, όπου η κλίση είναι μεγάλη (μεγάλη και σταθερή μαγνητική διαπερατότητα) και καθώς αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το υλικό φτάνει σε κορεσμό, όπου η μαγνητική διαπερατότητα πέφτει σημαντικά.

Οι καμπύλη μαγνήτισης που φαίνεται παραπάνω, ισχύει για ένα υλικό το οποίο είναι αρχικώς μη μαγνητισμένο, ωστόσο τα σιδηρομαγνητικά υλικά μετά από την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου, διατηρούν κάποιον μαγνητισμό, ακόμα και αν και το πεδίο μηδενιστεί. Αυτό το φαινόμενο είναι πολύ έντονο στα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά (που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών) ωστόσο υπάρχει ακόμα και στα μαλακά υλικά και δημιουργεί το φαινόμενο της υστέρησης, δηλαδή της εξάρτησης του μαγνητικού πεδίου και από την «προϊστορία» του υλικού.

Αν το μαγνητικό κύκλωμα διεγείρεται από εναλλασσόμενα ρεύματα, τότε το φαινόμενο της υστέρησης γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η καμπύλη μαγνήτισης παίρνει την μορφή που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 1.4: Καμπύλη υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

Με βάση το Σχήμα 1.4, ξεκινώντας από ένα μη μαγνητισμένο υλικό, κατά την θετική ημιπερίοδο το υλικό ακολουθεί τη διακεκομμένη γραμμή μέχρι τον κορεσμό στο σημείο a. Στη συνέχεια καθώς η ένταση  $H$  μειώνεται, η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μειώνεται και αυτή, αλλά δεν ακολουθεί την ίδια καμπύλη. Όταν η ένταση φτάσει στο μηδέν, παραμένει κάποιος μαγνητισμός στο υλικό (σημείο b), ενώ για να μηδενιστεί εντελώς ο μαγνητική ροή πρέπει η ένταση να συνεχίσει να μειώνεται μέχρι να φτάσει το σημείο c και η τιμή αυτή ονομάζεται ένταση επαναφοράς  $H_c$ . Ο κύκλος επαναλαμβάνεται για το υπόλοιπο της περιόδου και εν τέλει δημιουργείται ο βρόχος υστέρησης που φαίνεται στο σχήμα. Κάθε φορά που διεγείρεται κάποιο μη γραμμικό μαγνητικό υλικό με εναλλασσόμενο ρεύμα η μαγνητική του συμπεριφορά καθορίζεται από έναν βρόχο υστέρησης της παραπάνω μορφής (abcdef). Κατά μήκος αυτού του βρόχου, το μαγνητικό πεδίο απορροφά περισσότερη ενέργεια από αυτή που προσφέρει, επομένως έχουμε απώλειες ισχύος. Το μέγεθος των απωλειών αυτών είναι ανάλογο του εμβαδού που περικλείεται από το βρόχο, του όγκου του μαγνητικού πεδίου και της συχνότητας διέγερσης  $f$ .

Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα διέγερσης, πέρα από τις απώλειες υστέρησης, εμφανίζονται και απώλειες λόγω δινορευμάτων. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο σε έναν αγωγό επάγει ηλεκτρικά ρεύματα (σύμφωνα με τον νόμο Faraday), οπότε κάνει το ίδιο και σε ένα αγωγίμο μαγνητικό υλικό. Τα ρεύματα αυτά ρέουν κυκλικά στο εσωτερικό του υλικού και θερμαίνουν τη μάζα του, σύμφωνα με τον νόμο του Joule ( $P=R \cdot I^2$ ).

Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων μαζί, ονομάζονται απώλειες πυρήνα, επειδή εμφανίζονται όταν χρησιμοποιείται κάποιος (μη γραμμικός) πυρήνας σε ένα μαγνητικό κύκλωμα. Και οι δύο είναι πολύ σημαντικές όσο αυξάνεται η συχνότητα του ρεύματος διέγερσης  $f$  και για την ελαχιστοποίησή του χρειάζεται ένα μαγνητικό υλικό με όσο το δυνατόν μικρότερο βρόχο υστέρησης και χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στις συχνότητες δικτύου (50Hz) το πιο συνηθισμένο υλικό είναι οι μαγνητικοί χάλυβες, με μεγάλη περιεκτικότητα σε πυρίτιο, που εμφανίζουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή υστέρηση. Για ελαχιστοποίηση των δινορευμάτων, χρησιμοποιούνται με τη μορφή λεπτών ελασμάτων, μονωμένων ηλεκτρικά μεταξύ τους, που ονομάζονται δυναμοελάσματα.



Ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους, οι ηλεκτρικοί χάλυβες, μπορεί να έχουν κάποια προτιμώμενη κατεύθυνση, στην οποία είναι πιο εύκολη η μαγνήτιση του υλικού, λόγω της μικροσκοπικής δομής των κρυστάλλων του υλικού. Αυτού του είδους οι χάλυβες ονομάζονται grain-oriented σε αντίθεση με τους μη κατευθυντικούς (non-oriented steel). Προφανώς για μια δεδομένη εφαρμογή αν δεν συντρέχουν άλλοι λόγοι (όπως κόστος) ένας κατευθυντικός χάλυβας θα εμφανίζει πολύ καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες [3], [4].

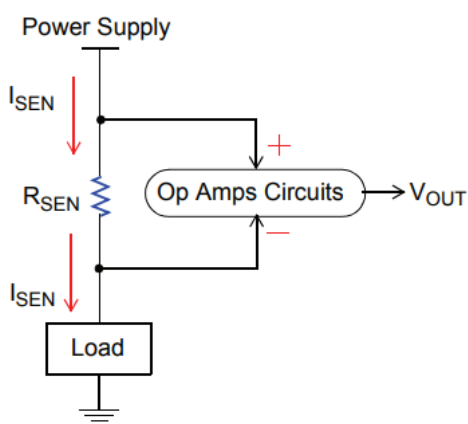
### 1.3 Μέτρηση του ρεύματος με πτώση τάσης σε αντίσταση

Ο πιο απλός ίσως τρόπος για τη μέτρηση του ρεύματος είναι με αντίσταση σε σειρά. Όπως είναι γνωστό από τον νόμο του Ohm, η τάση στα άκρα μιας αντίστασης συνδέεται με το ρεύμα που την διαρρέει με την παρακάτω σχέση:

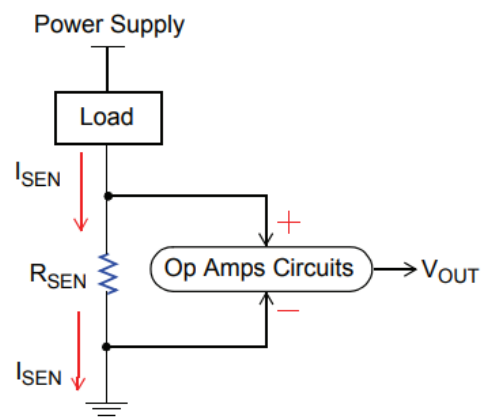
$$V = I \cdot R \quad (1.12)$$

Μπορεί λοιπόν να συνδεθεί μια γνωστή αντίσταση σε σειρά με το κύκλωμα που θέλουμε να μετρήσουμε το ρεύμα και στη συνέχεια να μετρηθεί η πτώση τάσης στα άκρα της, η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να γίνει πολύ ακριβής και χρησιμοποιείται ευρέως σε Αμπερόμετρα χειρός και ψηφιακά πολύμετρα, όπου η πτώση τάσης μπορεί, μετά από κάποια ενίσχυση, να ληφθεί απευθείας από κάποιον μικροεπεξεργαστή.



Σχήμα 1.6: High Side Current Sensing [5]



Σχήμα 1.5: Low side Current Sensing [5]

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος, η αξιόπιστη και ακριβής μέτρηση ακόμα και σε χαμηλά ρεύματα, καθώς και η δυνατότητα για μέτρηση τόσο εναλλασσόμενου, όσο και συνεχούς ρεύματος. Οι συνήθεις τοπολογίες που συναντώνται φαίνονται στο Σχήμα 1.6 και στο Σχήμα 1.5 [5].

Ωστόσο, με την τοποθέτηση μια αντίστασης σε σειρά, μπορούμε να επηρεάσουμε ανεπιθύμητα το κύκλωμα, εισάγοντας επιπλέον πτώση τάσης. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση, όμως αν η πτώση τάσης γίνει πολύ μικρή, εμφανίζονται δυσκολίες στην μέτρησή της και

απαιτούνται πολύπλοκα και ακριβά κυκλώματα ενίσχυσης. Επιπλέον, ειδικά σε μεγάλα ρεύματα, η κατανάλωση ισχύος πάνω στην αντίσταση μπορεί να γίνει σημαντική και να αναπτυχθούν μεγάλες θερμοκρασίες. Για αυτόν τον λόγο αυτή η μέθοδος σπάνια χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλα ρεύματα.

Ο τύπος της αντίστασης που θα επιλεγεί είναι πολύ κρίσιμος για την ακρίβεια της μέτρησης. Πρέπει να έχει πολύ σταθερή τιμή και χαμηλό συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής (ειδικά αν προβλέπεται να θερμανθεί), ενώ τα παρασιτικά της χαρακτηριστικά (αυτεπαγωγή, χωρητικότητα) πρέπει να είναι ελάχιστα, αν προορίζεται για μέτρηση ρευμάτων υψηλών συχνοτήτων.

Τέλος, με αυτή τη μέθοδο δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση ανάμεσα στο κύκλωμα που μετρείται και την διάταξη μέτρησης. Η ασφάλεια μπορεί να αυξηθεί κάπως αν η αντίσταση τοποθετηθεί στην πλευρά της γης (Low side sensing Σχήμα 1.5: Low side Current Sensing). Αυτό συμβαίνει γιατί οι ακροδέκτες μέτρησης της τάσης θα βρίσκονται πάντα σε χαμηλότερο δυναμικό, σε σχέση με την περίπτωση που η αντίσταση τοποθετηθεί στην πλευρά της παροχής (High side sensing Σχήμα 1.6: High Side Current Sensing), καθώς η πτώση τάσης πάνω της συνήθως δεν υπερβαίνει τα 50-100mV.

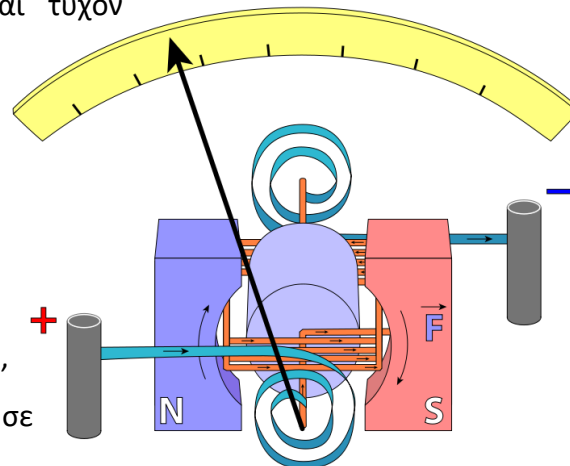
## 1.4 Όργανα στρεφόμενου πηνίου (Γαλβανόμετρα)

Σε αυτά τα όργανα, υπάρχουν μόνιμοι μαγνήτες που δημιουργούν ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο τοποθετείται ένα πηνίο, το οποίο μπορεί να περιστραφεί και διαθέτει ένα ελατήριο επαναφοράς. Όταν το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα, ασκείται ροπή πάνω του και περιστρέφεται κατά μια γωνία  $\phi$ , η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος  $I$ . Αν τοποθετηθεί ένας δείκτης πάνω στο κινητό μέρος και το όργανο βαθμονομηθεί κατάλληλα, έχουμε ένα αναλογικό αμπερόμετρο.

Τα όργανα αυτής της μορφής ήταν από τα πρώτα αμπερόμετρα που ανακαλύφθηκαν και ορισμένες φορές αναφέρονται και ως γαλβανόμετρα ή όργανα D'Arsonval/Weston. Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός ώστε το μαγνητικό πεδίο να είναι ομογενές και να αποσβένονται τυχόν

ταλαντώσεις του συστήματος. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της τάσης, αν είναι γνωστή η αντίσταση του τυλίγματος. Ένα μειονέκτημα είναι ότι απαιτείται συνεχές ρεύμα για την λειτουργία του, όμως έχουν χρησιμοποιηθεί και σε εναλλασσόμενο, με κάποια ανορθωτική διάταξη. Τέτοιου είδους

όργανα άρχισαν να εγκαταλείπονται όταν πρωτοεμφανίστηκαν οικονομικοί μικροεπεξεργαστές και μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC), που επέτρεψαν την δημιουργία ψηφιακών οργάνων [6].



Σχήμα 1.7: Όργανο D'Arsonval

## 1.5 Επαγωγικά όργανα (Μετρητής Ισχύος ΔΕΗ)

Αυτά τα αναλογικά όργανα, χρησιμοποιούνται ευρέως σαν μετρητές ισχύος, σε οικιακές εγκαταστάσεις (τελευταία αντικαθίστανται με ψηφιακούς μετρητές). Διαθέτουν δύο πηνία, ένα τάσης και ένα ρεύματος, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς και η αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή του κινητήρα επαγωγής, οπότε λειτουργούν μόνο στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Αν και ανάλογα με την διάταξη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν αμπερόμετρα, είναι πιο διαδεδομένη η χρήση τους σαν μετρητές ισχύος/ενέργειας.

Στο Σχήμα 1.8 φαίνεται ένας τέτοιος μονοφασικός επαγωγικός μετρητής ισχύος. Υπάρχουν δύο πηνία τυλιγμένα γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα, ο οποίος έχει τέτοιο σχήμα ώστε να δημιουργεί δύο μαγνητικά κυκλώματα. Το πηνίο ρεύματος είναι συνδεδεμένο εν σειρά με το φορτίο και το πηνίο τάσης παράλληλα στην τάση του δικτύου. Στο διάκενο του πυρήνα και έκκεντρα προς τον άξονα συμμετρίας είναι τοποθετημένος ένας ηλεκτρικά αγώγιμος δίσκος από αλουμίνιο, ο οποίος είναι ελεύθερος να περιστραφεί. Στον δίσκο αυτό δημιουργούνται δινορεύματα, τόσο από το πηνίο ρεύματος, όσο και από το πηνίο τάσεως. Αν υποθέσουμε ότι το φορτίο είναι ωμικό, τότε το πηνίο ρεύματος δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που είναι εν φάσει με το ρεύμα του φορτίου και την τάση. Αντίθετα το πηνίο τάσεως δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που βραδυπορεί κατά γωνία  $90^\circ$  ως προς την τάση, λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής του (σε συνδυασμό και με μια βραχυκυκλωμένη χάλκινη σπείρα που τοποθετείται). Τα δύο μαγνητικά πεδία, λοιπόν, διαφέρουν κατά  $90^\circ$ .

Η ροπή που αναπτύσσεται στον δίσκο είναι ανάλογη της πυκνότητας μαγνητικής ροής των δύο πηνίων και υπολογίζεται από την σχέση:

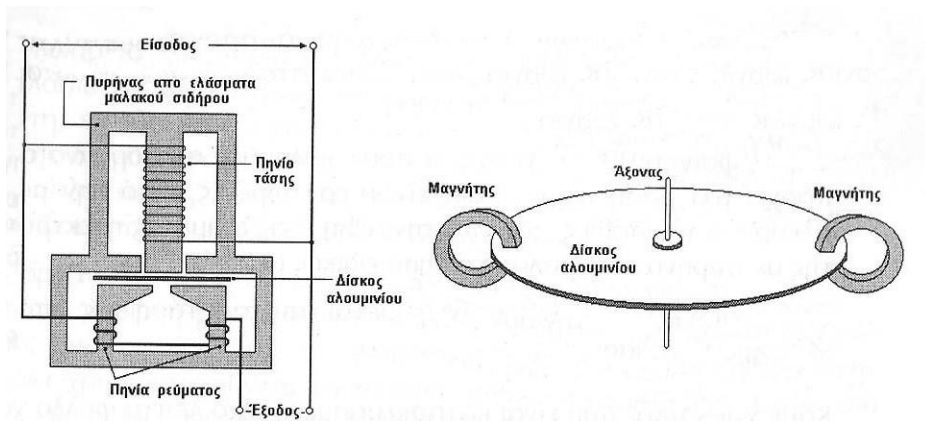
$$M_k = K \cdot I \cdot V \cdot \cos\varphi \quad (1.13)$$

όπου  $\cos\varphi$  ο συντελεστής ισχύος του φορτίου.

Παρατηρούμε τελικά ότι ο ρυθμός περιστροφής του δίσκου είναι ανάλογος της ενεργού (μόνο) ισχύος που απορροφά το φορτίο από το δίκτυο ( $V \cdot I \cdot \cos\varphi$ ). Στην

περιφέρεια του δίσκου είναι τοποθετημένοι κάποιοι μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι όταν περιστρέφεται ο δίσκος, ασκούν επιβραδύνουσα ροπή, με σκοπό τη σβέση των ταλαντώσεων.

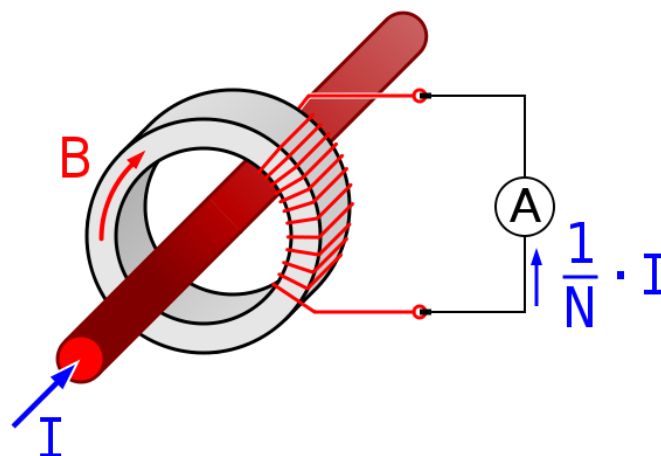
Στον άξονα του δίσκου τοποθετείται μηχανική διάταξη που μετράει τις συνολικές περιστροφές του δίσκου, άρα και την ενέργεια που καταναλώθηκε.



Σχήμα 1.8: Μονοφασικός επαγωγικός μετρητής ενέργειας [16]

## 1.6 Μετασχηματιστής έντασης

Ο μετασχηματιστής έντασης είναι ένα είδος μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της έντασης του ρεύματος. Το πρωτεύον τύλιγμα αποτελείται από μία σπείρα, τον αγωγό στον οποίο θέλουμε να μετρήσουμε το ρεύμα, ενώ το δευτερεύον αποτελείται από περισσότερες σπείρες, τυλιγμένες γύρω από έναν σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Η λειτουργία του είναι όμοια με αυτή ενός απλού μετασχηματιστή ισχύος, μόνο που το πρωτεύον τροφοδοτείται με σταθερό ρεύμα και όχι σταθερή τάση. Το εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον, επάγει ρεύμα στο δευτερεύον, το οποίο είναι ίσο με το ρεύμα στο πρωτεύον διαιρεμένο με τον αριθμό των σπειρών του δευτερεύοντος. Τέτοιου είδους διατάξεις χρησιμοποιούνται ευρέως, στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και στη βιομηχανία, καθώς μπορούν να μετρηθούν πολύ μεγάλα ρεύματα, ακόμα και σε πολύ υψηλές τάσεις με ασφάλεια καθώς υπάρχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του κυκλώματος μέτρησης και του δικτύου [7].



Σχήμα 1.9: Μετασχηματιστής ρεύματος

Βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία μέτρησης ασθενών ρευμάτων, καθώς και η αδυναμία μέτρησης συνεχούς ρεύματος, αφού απαιτείται εναλλασσόμενη μαγνητική ροή για να υπάρξει ρεύμα εξ επαγωγής στο δευτερεύον.

## 1.7 Μέτρηση του ρεύματος με μαγνητικό αισθητήρα

### Συγκέντρωση του μαγνητικού πεδίου

Από την ενότητα 2.1 είναι γνωστό ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με τις σχέσεις:

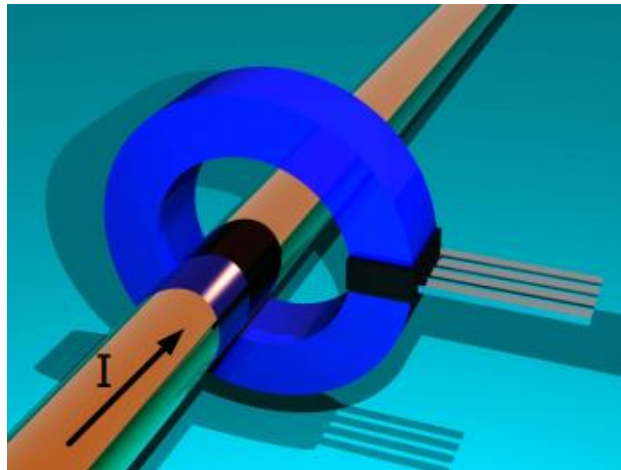
$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (1.14)$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi R} \quad (1.15)$$

Αυτό το μαγνητικό πεδίο, μπορεί να μετρηθεί με κάποιον αισθητήρα και από την έντασή του να εκτιμήσουμε το ρεύμα  $I$ . Ωστόσο, αν επιχειρηθεί μια τέτοια μέτρηση, εμφανίζονται ορισμένα προβλήματα: καταρχάς υπάρχει μεγάλη εξάρτηση λόγω της απόστασης  $R$  από τον αγωγό και το πεδίο που δημιουργείται είναι πολύ μικρής έντασης, γεγονός που κάνει τη μέτρηση δύσκολη και αναξιόπιστη. Για να λυθούν αυτά τα προβλήματα, συχνά χρησιμοποιείται μια διάταξη συγκέντρωσης του πεδίου (Field Concentrator) [8].

Πρόκειται για έναν πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό (ηλεκτρικός χάλυβας) που έχει ως σκοπό να συγκεντρώσει μέσα του τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, δημιουργώντας μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επαγωγής. Συνήθως περικλείει πλήρως τον αγωγό και διαθέτει ένα διάκενο, στο οποίο τοποθετείται ένας μαγνητικός αισθητήρας. Έτσι πετυχαίνουμε ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου (20-70 φορές) και η μαγνητική ροή στο διάκενο είναι σταθερή ανεξάρτητα της ακριβούς θέσης του αγωγού, αφού ο πυρήνας συγκεντρώνει όλη τη μαγνητική ροή.





Σχήμα 1.10: Concentrator γύρω από αγωγό με μαγνητικό αισθητήρα στο διάκενο [9]

Εν γένει θέλουμε η διατομή του πυρήνα να είναι τουλάχιστον ίση με το εμβαδόν του αισθητήρα, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις εξωτερικών μαγνητικών πεδίων και ανακρίβειών στην τοποθέτηση. Εμπειρικά θέλουμε η διατομή του πυρήνα να είναι τουλάχιστον διπλάσια αυτής του αισθητήρα [9]. Σε αυτή τη περίπτωση η πυκνότητα μαγνητικής ροής στον αισθητήρα μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο του Ampere:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi(r - d) + d\mu_r} \quad (1.16)$$

όπου  $r$ , η ακτίνα του τοροειδούς και  $d$  το μήκος του διακένου.

Μπορούμε να ορίσουμε τώρα ως την ενεργό μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα/διακένου ως

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \frac{\mu_r d}{2\pi r} - \frac{d}{r}} \quad (1.17)$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu_e I}{2\pi R} \quad (1.18)$$

Έτσι η (1.16) παίρνει την ίδια μορφή με την εξίσωση για ελεύθερο αγωγό (1.15) και η ενεργός μαγνητική διαπερατότητα ορίζει τον συντελεστή πολλαπλασιασμού της μαγνητικής ροής (flux boost factor ή concertation ratio) .

Επειδή για τις περισσότερες διατάξεις ισχύει ότι  $\mu_r d \gg 2\pi r$ , η ενεργός μαγνητική διαπερατότητα δίνεται από τον λόγο της περιφέρειας  $2\pi r$  ως προς το διάκενο  $d$  [9].

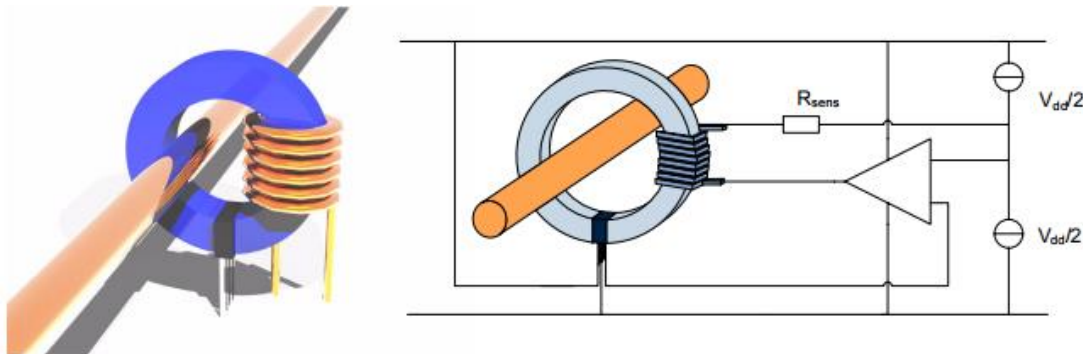
Στις περισσότερες περιπτώσεις, αρκεί απλά να διέρχεται ο αγωγός μέσα από τον πυρήνα, ωστόσο για περισσότερη ακρίβεια σε χαμηλά ρεύματα, είναι δυνατόν να τυλιχθεί ο αγωγός  $N$  φορές γύρω από τον πυρήνα, με αποτέλεσμα η μαγνητική ροή να πολλαπλασιάζεται κατά  $N$ .

Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο, για μεγάλα ρεύματα, η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα θα αρχίσει να μεταβάλλεται, καθώς πλησιάζουμε στον κορεσμό του υλικού. Σε αυτήν την περίπτωση παύει η γραμμικότητα και θα παρουσιαστούν μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις. Επομένως στα χαμηλά μαγνητικά πεδία περιοριζόμαστε από την ευαισθησία του αισθητήρα και στα υψηλότερα, από την γραμμικότητα και τον κορεσμό του πυρήνα.

## 1.8 Συστήματα Κλειστού Βρόχου

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, παρουσιάζει την μέγιστη γραμμικότητα και θερμοκρασιακή σταθερότητα όταν η μαγνητική επαγωγή του είναι κοντά στο μηδέν. Για να διατηρηθεί αυτή η γραμμικότητα ακόμα και για μεγάλες τιμές του ρεύματος, γίνεται να τοποθετηθεί ένα δεύτερο τύλιγμα στον πυρήνα, το οποίο θα διαρρέεται από ρεύμα αντίθετης φοράς, μέχρις ότου η μαγνητική ροή του μετρούμενου αγωγού να αντισταθμιστεί πλήρως.

Με ένα κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα κλειστού βρόχου, το ρεύμα αντιστάθμισης ρυθμίζεται μέχρις ότου η μαγνητική ροή στο διάκενο όπου βρίσκεται ο μαγνητικός αισθητήρας, να μηδενιστεί. Το τύλιγμα αντιστάθμισης, έχει μεγάλο αριθμό σπειρών, ώστε με μικρά ρεύματα οδήγησης, να μπορεί να δημιουργηθεί μεγάλη μαγνητική ροή στον πυρήνα. Εάν το σύστημα είναι σε ισορροπία, μετρώντας το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα, και με βάση τον αριθμό ελιγμάτων, να εκτιμήσουμε το ρεύμα στο πρωτεύον. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 1.11: Διάταξη Κλειστού Βρόχου με κύκλωμα ανάδρασης [9]

Σε αυτό το κύκλωμα αρνητικής ανάδρασης, ο μαγνητικός αισθητήρας, τύπου Hall, έχει τάση εξόδου  $V_{dd}/2$  για 0mT μαγνητικό πεδίο. Ο τελεστικός ενισχυτής δημιουργεί στο τύλιγμα αντιστάθμισης τέτοιο ρεύμα έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού στις εισόδους του να είναι μηδέν, δηλαδή όταν η μαγνητική ροή στο διάκενο μηδενιστεί. Το ρεύμα αντιστάθμισης, μετριέται μέσω της πτώσης τάσης στην αντίσταση  $R_{sense}$ , ενώ μπορεί να είναι πολύ μικρό, χάρη στον μεγάλο αριθμό

ελιγμάτων του δευτερεύοντος. Για παράδειγμα αν έχουμε  $N=1000$  σπείρες, θα μετριέται ρεύμα  $1\text{mA}$  στην  $R_{\text{sense}}$  για κάθε  $1\text{A}$  ρεύμα πρωτεύοντος [9].

Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι το αυξημένο κόστος λόγω της απαίτησης για ένα δεύτερο τύλιγμα και λόγω των πιο σύνθετων κυκλωμάτων. Επιπλέον, πρέπει να δοθεί προσοχή στον σχεδιασμό του κυκλώματος ανάδρασης, για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος.

## 2 Τρόποι μέτρησης μαγνητικού πεδίου

### 2.1 Το φαινόμενο Hall

Το φαινόμενο Hall εμφανίζεται σε αγωγούς που διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα, όταν βρίσκονται μέσα σε κάποιο μαγνητικό πεδίο. Ανακαλύφθηκε από τον φυσικό E. H. Hall το 1879, καθώς προσπαθούσε να μελετήσει την επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο ηλεκτρικό ρεύμα. Στο πείραμά του, είχε ένα φύλλο χρυσού που διαρρέοταν από ρεύμα και στα άκρα του φύλλου, κάθετα στη ροή του ρεύματος, είχε τοποθετήσει ένα γαλβανόμετρο. Όταν εφάρμοζε ένα μαγνητικό πεδίο στο φύλλο, μετρούσε μια ηλεκτρεγερτική δύναμη κάθετα στην ροή του ρεύματος και το μαγνητικό πεδίο. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση Hall [10].

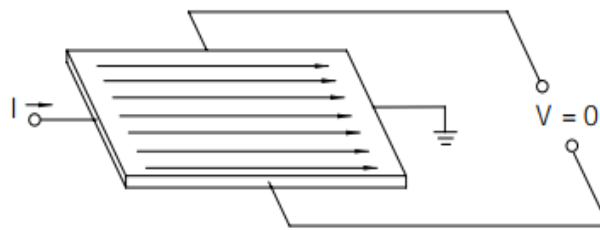
Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από την εφαρμογή της δύναμης Lorentz στους ελεύθερους φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος, στον αγωγό. Η δύναμη Lorentz, ασκείται σε ένα οποιοδήποτε κινούμενο φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Περιγράφεται από τη σχέση:

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + e[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (2.1)$$

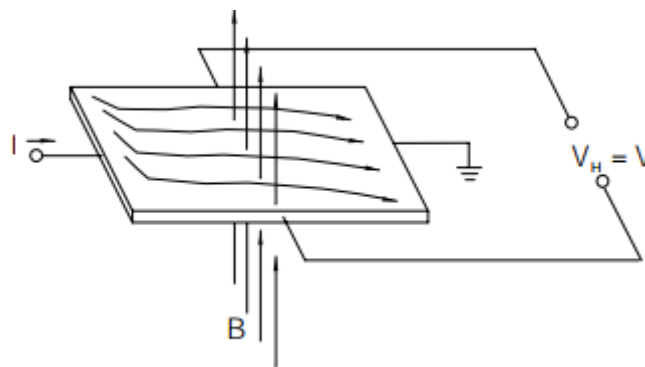
όπου  $e$  το ηλεκτρικό φορτίο του σωματιδίου και  $u$  η ταχύτητά του.

Στην περίπτωση ενός απλού αγωγού, όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο στα άκρα του, δημιουργείται μια διατεταγμένη κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία ακολουθούν την κατεύθυνση που ορίζει το ηλεκτρικό πεδίο, με ταχύτητα την ταχύτητα ολίσθησης  $u_{dx}$ . Εάν αυτός ο αγωγός βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε η δύναμη Lorentz θα ασκείται πάνω στους φορείς του, με κατεύθυνση κάθετη στην ταχύτητά τους και στο μαγνητικό πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι θα αρχίσουν να συσσωρεύονται ηλεκτρόνια στην μια κάθετη όψη του αγωγού και θα υπάρχει έλλειψη φορέων στην απέναντι πλευρά. Ο διαχωρισμός αυτός των φορτίων οδηγεί στην δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου, που αντιτίθεται στην περαιτέρω συσσώρευση φορέων, οπότε το σύστημα φτάνει σε ισορροπία, και το ηλεκτρικό

πεδίο που εμφανίζεται, ονομάζεται πεδίο Hall το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της τάσης Hall.



Σχήμα 2.1: Αγωγός χωρίς μαγνητικό πεδίο [11]



Σχήμα 2.2: Αγωγός με μαγνητικό πεδίο [11]

Στην κατάσταση ισορροπίας, η δύναμη Lorentz που ωθεί τα ηλεκτρόνια στις άκρες του δείγματος, θα εξισορροπείται από την ηλεκτρική δύναμη  $eE_H$  που αντιτίθεται στην επιπλέον συσσώρευση ηλεκτρονίων (βλέπε Σχήμα 2.3). Επομένως θα ισχύει:

$$eE_H = ev_{dx}B_z \quad (2.2)$$

όπου  $E_H$  το πεδίο Hall,  $v_{dx}$  η ταχύτητα ολίσθησης των ηλεκτρονίων και  $B_z$  η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, κάθετη στην ταχύτητα των ηλεκτρονίων. Ωστόσο η ταχύτητα ολίσθησης συνδέεται με την πυκνότητα ρεύματος ως εξής:

$$J_x = env_{dx} \quad (2.3)$$

όπου  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $n$  η χωρική πυκνότητα ελεύθερων φορέων.

Εάν τώρα συνδυάσουμε τις (2.2) και (2.3) μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο Hall:

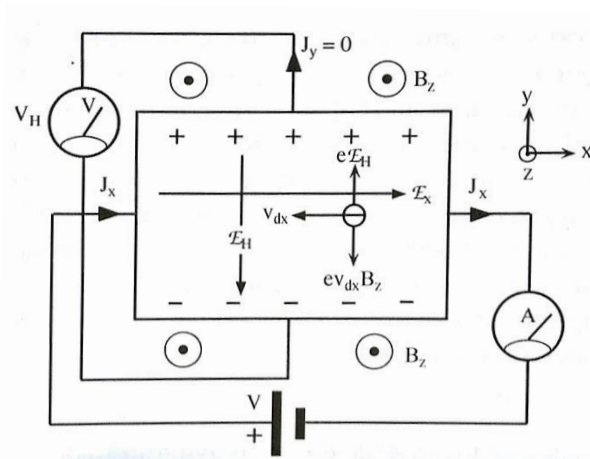
$$E_H = \left(\frac{1}{en}\right)J_x B_z \quad (2.4)$$

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να ορίσουμε τον συντελεστή Hall  $R_H$  ως το μέτρο του πεδίου Hall που δημιουργείται στην διεύθυνση  $y$  ανά μονάδα του εγκάρσιου εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και ανά μονάδα μαγνητικού πεδίου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής Hall, τόσο μεγαλύτερο είναι το πεδίο Hall για δεδομένο ρεύμα  $J_x$  και μαγνητικό πεδίο  $B_z$ .

$$R_H = \frac{E_H}{J_x B_z} \quad (2.5)$$

$$R_H = -\frac{1}{en} \quad (2.6)$$

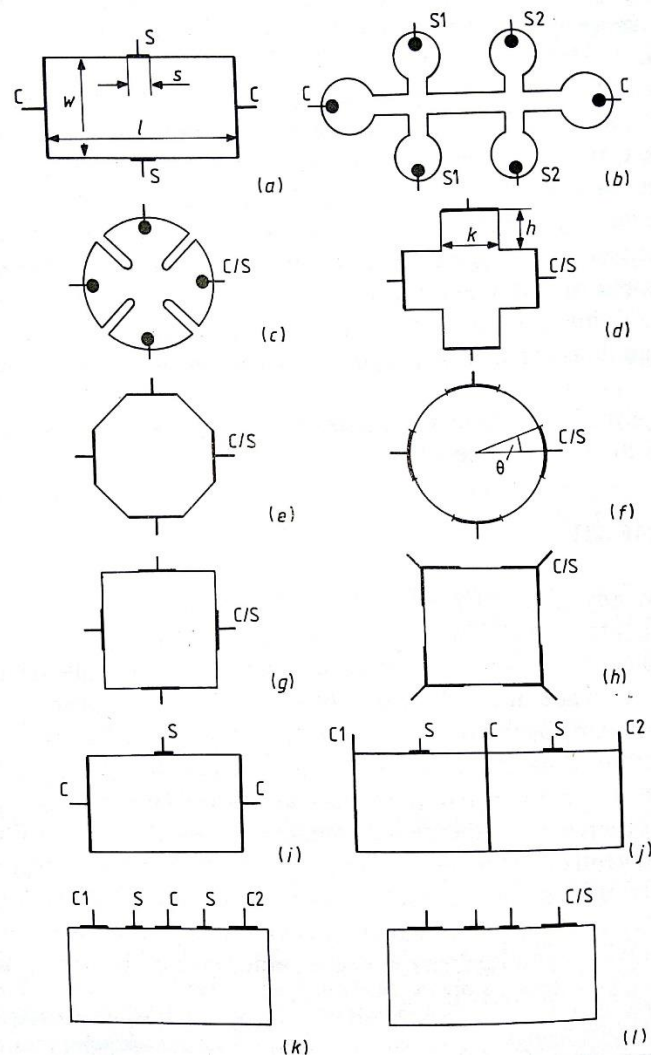
Δεδομένου ότι ο συντελεστής Hall είναι αντιστρόφως ανάλογος της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, έπεται ότι η τιμή του στα μέταλλα θα είναι πολύ μικρότερη από την τιμή του για ημιαγωγούς [12]. Έτσι όλες οι πρακτικές διατάξεις Hall είναι κατασκευασμένες από ημιαγωγούς. Σε αυτήν την περίπτωση, οι παραπάνω εξισώσεις τροποποιούνται, καθώς οι ελεύθεροι φορείς δεν είναι μόνο τα ηλεκτρόνια, αλλά και οι οπές οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως θετικοί φορείς.



Σχήμα 2.3: Το πεδίο Hall [12]

## 2.2 Διατάξεις Hall

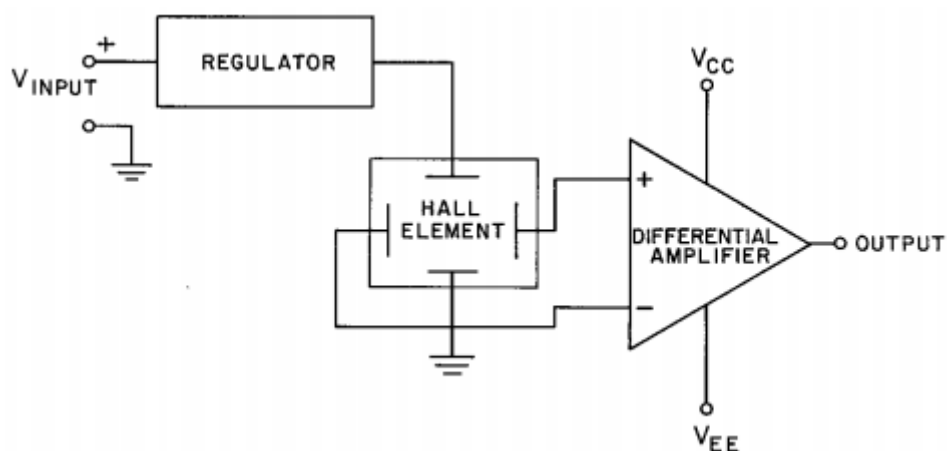
Μια διάταξη Hall μπορεί να θεωρηθεί οποιοδήποτε κομμάτι αγώγιμου υλικού, το οποίο διαθέτει τέσσερις ακροδέκτες. Ωστόσο για να είναι χρησιμοποιήσιμη σε πρακτικές εφαρμογές, μια διάταξη είναι προτιμότερο να έχει την μορφή πλακιδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 . Οι δύο ακροδέκτες που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τάσης Hall, θα πρέπει να τοποθετηθούν έτσι ώστε να αναπτύσσουν ίδιο δυναμικό, σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο. Για απλοποίηση του σχεδιασμού και της κατασκευής, επιλέγονται συμμετρικά σχήματα, με ομοιόμορφο και σταθερό πάχος. Διάφορα σχέδια διατάξεων Hall, το καθένα από τα οποία έχει διαφορετικό πεδίο εφαρμογής, φαίνονται στο σχήμα 2.4 .



Σχήμα 2.4: Διάφορες διατάξεις Hall. Με C (Current) συμβολίζονται οι επαφές ρεύματος και με S οι επαφές Hall (Sense) [10]



Όπως αναφέρθηκε και πρότερα, οι διατάξεις Hall συνήθως κατασκευάζονται από κάποιον ημιαγώγιμο κρύσταλλο, αφού εκεί εμφανίζονται μεγαλύτεροι συντελεστές Hall. Σε έναν ολοκληρωμένο αισθητήρα, πάνω στην ψηφίδα πυριτίου, εκτός από το στοιχείο Hall κατασκευάζονται και τα απαιτούμενα κυκλώματα για την αποτελεσματική λειτουργία του αισθητήρα. Η τάση Hall, είναι της τάξης των 30μV για πεδία 1T, οπότε απαιτείται ένα κύκλωμα ενίσχυσης που θα την φέρει σε ένα εύρος αξιοποιήσιμο από εξωτερικές συσκευές. Επιπλέον απαιτείται και κύκλωμα οδήγησης του στοιχείου με σταθερό ρεύμα, ώστε να μην επηρεάζεται από αστάθειες και μεταβολές της τροφοδοσίας. Αυτά φαίνονται εποπτικά στο σχήμα 2.5.

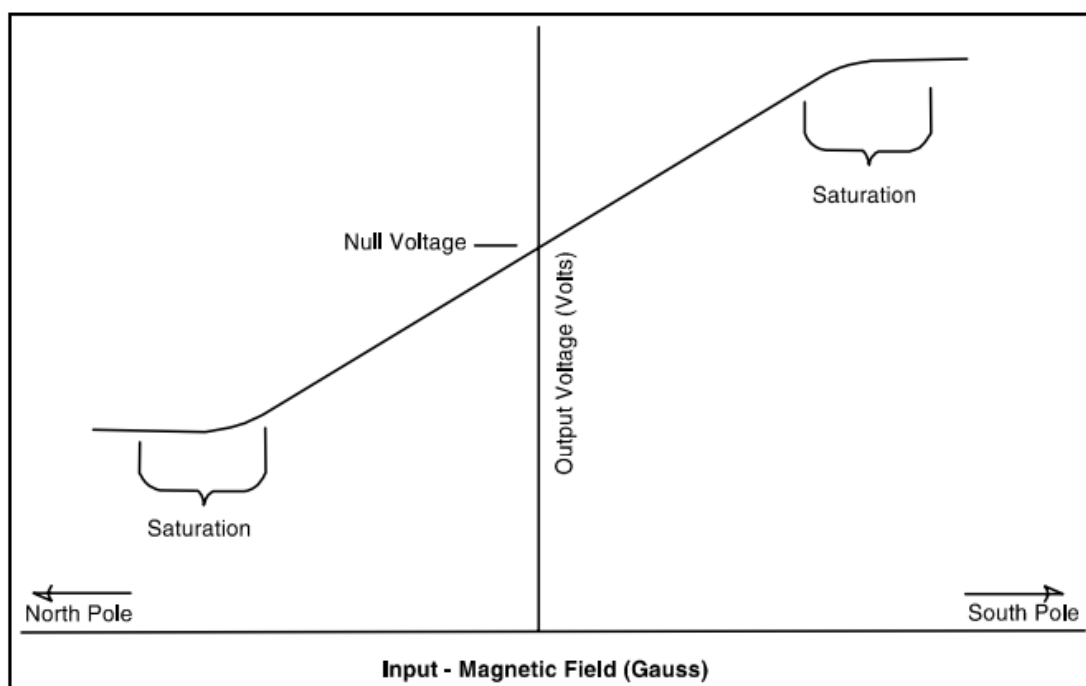


Σχήμα 2.5: Ένας βασικός αισθητήρας Hall

Επιπλέον, ειδικά για μετρήσεις σε ασθενή πεδία, χρειάζεται να γίνει αντιστάθμιση των παρασιτικών φαινομένων της διάταξης, όπως θερμοκρασιακή εξάρτηση ή κατασκευαστικές ατέλειες. Όλα τα παραπάνω κυκλώματα είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε έναν ολοκληρωμένο αισθητήρα, με υπάρχουσες τεχνολογίες κατασκευής Bipolar ή CMOS.

Ένας αισθητήρας όπως αυτός που έχει περιγραφεί παραπάνω, είναι ένας γραμμικός ή αναλογικός αισθητήρας Hall, δηλαδή η έξοδος του είναι μία τάση ανάλογη του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται. Το μαγνητικό πεδίο που μετρείται μπορεί να είναι είτε θετικό, είτε αρνητικό, οπότε και η έξοδος του ενισχυτή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Για να αποφευχθεί η ανάγκη για συμμετρική (θετική και αρνητική) τροφοδοσία εφαρμόζεται μία τάση πόλωσης στον διαφορικό ενισχυτή. Η τάση αυτή εμφανίζεται στην έξοδο του αισθητήρα, όταν βρίσκεται σε μηδενικό

μαγνητικό πεδίο και αναφέρεται ως τάση μηδενισμού (Null Voltage). Όταν το μαγνητικό πεδίο γίνεται θετικό, η έξοδος υπερβαίνει την τάση μηδενισμού και αντιστρόφα. Ωστόσο, η έξοδος του ενισχυτή δεν μπορεί να υπερβεί τα όρια της τροφοδοσίας, οπότε για μεγάλα μαγνητικά πεδία μπορεί ο αισθητήρας να βρεθεί σε κορεσμό (Σχήμα 2.6). Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο κορεσμός συμβαίνει στο στάδιο ενίσχυσης του αισθητήρα και δεν αφορά το στοιχείο Hall, το οποίο δεν επηρεάζεται [11].



Σχήμα 2.6: Έξοδος αναλογικού αισθητήρα Hall

Ένας γραμμικός αισθητήρας Hall, δεν είναι απαραίτητο να έχει την έξοδο που περιγράψαμε παραπάνω. Ορισμένοι οδηγούν την έξοδο του ενισχυτή σε μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) και βγάζουν απευθείας ψηφιακή έξοδο, συνήθως σε κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας, όπως I<sup>2</sup>C, SPI ή RS232, για ευκολότερη ενσωμάτωση σε ψηφιακά κυκλώματα με μικροεπεξεργαστές.

Για εφαρμογές που δεν απαιτείται η μέτρηση της ακριβούς τιμής του μαγνητικού πεδίου, αλλά απλά η παρουσία του, υπάρχουν δυαδικοί (ψηφιακοί) αισθητήρες Hall. Αυτοί έχουν μια ψηφιακή έξοδο που δείχνει απλά την παρουσία ή όχι ενός μαγνητικού πεδίου πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο, και

χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως αισθητήρες θέσης και ταχύτητας, σε συνδυασμό με κάποιον μόνιμο μαγνήτη.

## 2.3 Άλλες μέθοδοι μέτρησης μαγνητικού πεδίου

Αν και οι συσκευές Hall είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, καθώς προσφέρει υψηλή ευαισθησία και χαμηλό κόστος, υπάρχουν και άλλες διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ορισμένες εκ των οποίων, αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

### Συσκευές Μαγνητικής Αντίστασης(Magneto resistive)

Αυτές οι διατάξεις βασίζονται στο φαινόμενο της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης ορισμένων υλικών, όταν βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε πρώτα από τον Λόρδο Κέλβιν το 1851 και η μεταβολή που παρατηρούσε ήταν τής τάξης του 5%. Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί υλικά και διατάξεις που μεταβάλλουν την αντίστασή τους κατά 50%(Giant Magnetoresistance) ή και 99.9%. (Colossal Magnetoresistance). Πέρα από το υλικό κατασκευής, μεγάλο ρόλο στην εμφάνιση του φαινομένου, έχει και η γεωμετρία της διάταξης.

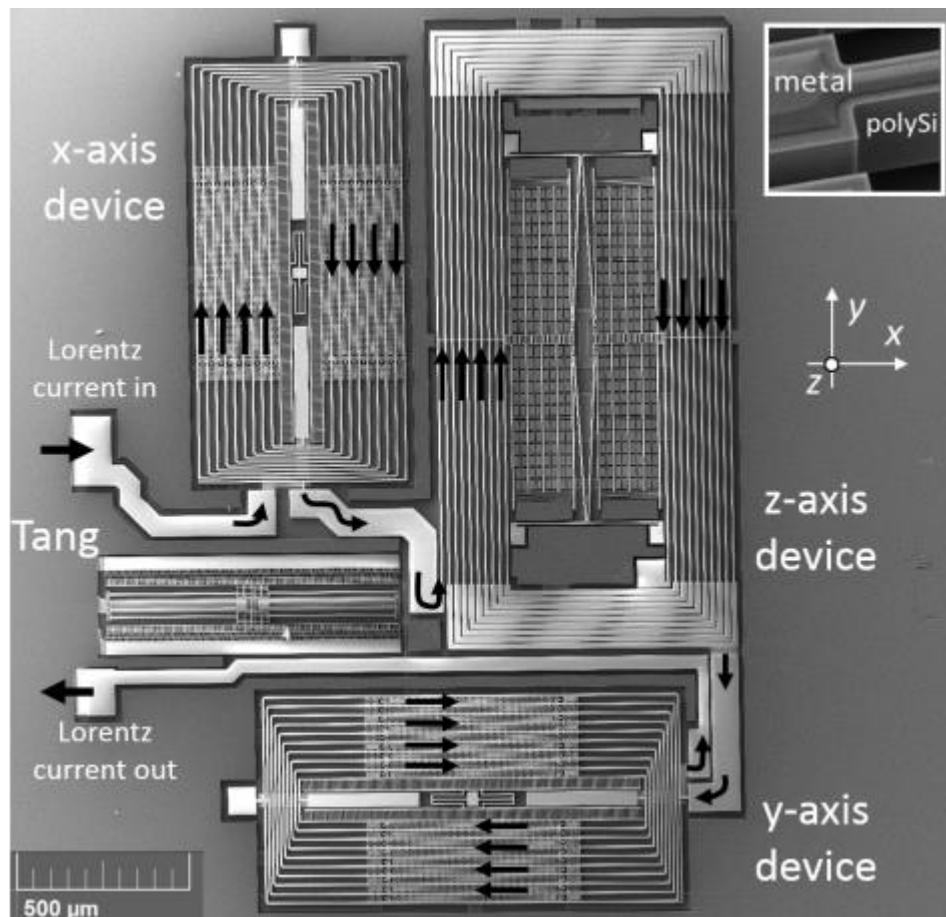
Οι εμπορικοί ανιχνευτές, συνήθως χρησιμοποιούν λεπτό φιλμ από NiFe, το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα για μαζική παραγωγή, ενώ διαθέτουν γρήγορη απόκριση και καλή ανάλυση [13].

### Μαγνητόμετρο MEMS

Οι διατάξεις MEMS(Microelectromechanical systems) ή αλλιώς μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα, είναι μικροσκοπικές ηλεκτρομηχανικές συσκευές που διαθέτουν κινούμενα μέρη, στην κλίμακα των 1-100μm. Συνήθως κατασκευάζονται από πυρίτιο, αξιοποιώντας εν μέρει την τεχνογνωσία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων(λιθογραφία). Λόγω της μικροσκοπικής τους κλίμακας, ο λόγος της επιφάνειάς τους ως προς την μάζα τους είναι μεγάλος και έτσι εμφανίζονται πολύ έντονα οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

Ως μαγνητόμετρα, συνήθως αξιοποιούν τα αποτελέσματα της δύναμης Lorentz, πάνω σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα. Για παράδειγμα, μπορούν να τοποθετηθούν δύο πιεζοαντιστάσεις, σε σχήμα U, υποστηριζόμενες μόνο στο ένα

άκρο, σε συνδυασμό με άλλες δύο στατικές αντιστάσεις σε συνδεσμολογία γέφυρας Wheatstone. Στην γέφυρα εφαρμόζεται μία τάση, άρα οι αντιστάσεις διαρρέονται από ρεύμα και όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο τους ασκείται δύναμη Lorentz, η οποία δημιουργεί μηχανικές τάσεις μέσα στις πιεζοαντιστάσεις, μεταβάλλοντας έτσι την τιμή τους, άρα και την τάση εξόδου της γέφυρας.



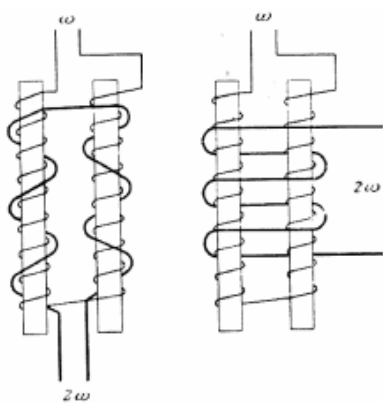
Σχήμα 2.7: Μαγνητόμετρο 3 αξόνων MEMS

Μία άλλη λύση είναι να χρησιμοποιηθούν πάλι πιεζοαντιστάσεις, αλλά τώρα εφαρμόζεται εξωτερική διέγερση μέσω άλλων θερμαντικών αντιστάσεων, μέχρις ότου να βρεθεί η συχνότητα συντονισμού του συστήματος. Εάν τώρα εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο, πάλι λόγω της δύναμης Lorentz, θα υπάρξει μεταβολή της συχνότητας συντονισμού. Τέτοιες διατάξεις έχουν επιτύχει ανάλυση της τάξεως των 217nT [14].

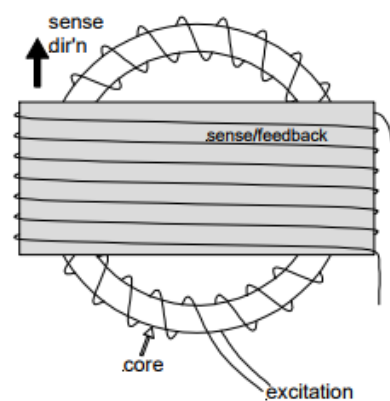
Τέτοιου είδους μαγνητόμετρα, είναι πολύ διαδεδομένα για χρήση σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα, όπου ενσωματώνονται μαζί με επιταχυνσιόμετρα MEMS σε μια συσκευή.

### Μαγνητόμετρα Fluxgate

Τα μαγνητόμετρα Fluxgate, ανακαλύφθηκαν το 1936 και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν στον Β'ΠΠ για ανίχνευση υποβρυχίων μέσα στη θάλασσα ενώ χάρη στη μεγάλη τους ευαισθησία, μετά τον πόλεμο, βοήθησαν στην ανακάλυψη των τεκτονικών πλακών.. Αποτελούνται από έναν μικρό πυρήνα από υλικό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, που διαθέτει δύο τυλίγματα. Στο ένα τύλιγμα εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα διέγερσης, που οδηγεί το πυρήνα εναλλάξ σε κορεσμό, για την θετική και την αρνητική ημιπερίοδο, ενώ στο δευτερεύον τύλιγμα επάγεται ρεύμα, που συγκρίνεται με την κυματομορφή του πρωτεύοντος. Σε μαγνητικά ουδέτερο περιβάλλον, οι δύο κυματομορφές ταυτίζονται, ωστόσο αν υπάρχει κάποιο μαγνητικό πεδίο, τότε ο κορεσμός είναι πιο «εύκολος» προς την κατεύθυνσή του πεδίου και πιο «δύσκολος» στην αντίθετη. Έτσι συγκρίνοντας την κυματομορφή εισόδου και εξόδου, μπορεί να γίνει εκτίμηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην κατεύθυνση μαγνήτισης του πυρήνα.



Σχήμα 2.8: Rod Core Fluxgate *Invalid source specified.*



Σχήμα 2.9: Ring Core Fluxgate *Invalid source specified.*

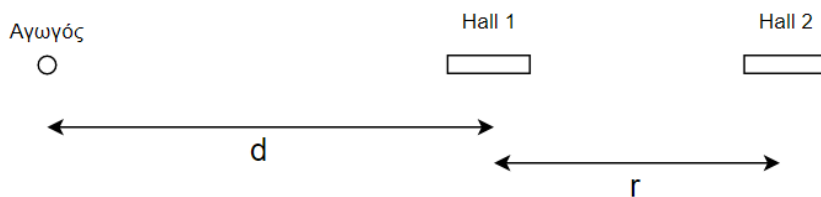
Τα fluxgate μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες σε επιστημονικά όργανα, δορυφόρους, πυξίδες ναυσιπλοΐας κ.α. ενώ έχουν σμικρυνθεί σε σημείο που μπορούν να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Μπορούν να προσφέρουν πολύ υψηλή ακρίβεια, ακόμα και 0.01% του μαγνητικού πεδίου της γης.

### 3 Η προτεινόμενη διάταξη

#### 3.1 Εισαγωγή

Μέχρι τώρα είδαμε ότι στους περισσότερους μαγνητικούς τρόπους μέτρησης του ρεύματος απαιτείται κάποιος κλειστός πυρήνας, ώστε να αντισταθμίζεται η έντονη εξάρτηση από την απόσταση του αγωγού από τον αισθητήρα. Σε αυτήν την εργασία θα εξεταστεί η χρήση ημικυκλικού πυρήνα-concentrator σε συνδυασμό με δύο μαγνητικούς αισθητήρες σε διαφορετικές αποστάσεις. Με συνδυασμό των δύο μετρήσεων και κατάλληλη βαθμονόμηση του συστήματος, είναι δυνατόν να μετρηθεί τόσο το ρεύμα στον αγωγό, όσο και η απόσταση της διάταξης από τον αγωγό.

Στην πιο απλή περίπτωση, μπορούν να τοποθετηθούν 2 μαγνητικοί αισθητήρες Hall, με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση  $r$ , σε μία τυχαία απόσταση  $d$  από τον αγωγό στον οποίο θέλουμε να μετρήσουμε το ρεύμα.



Σχήμα 3.1: Διάταξη μέτρησης με δύο αισθητήρες Hall σε διαφορετικές αποστάσεις

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής που μετράει ο κάθε αισθητήρας θα είναι:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad (3.1)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi (d + r)} \quad (3.2)$$

Σε αυτές τις δύο εξισώσεις είναι γνωστά τα  $B$ ,  $r$ ,  $\mu_0$ , επομένως είναι απλό να υπολογιστεί το ρεύμα στον αγωγό  $I$  και η απόσταση  $d$ :

$$d = \frac{B_2}{B_1 - B_2} r \quad (3.3)$$

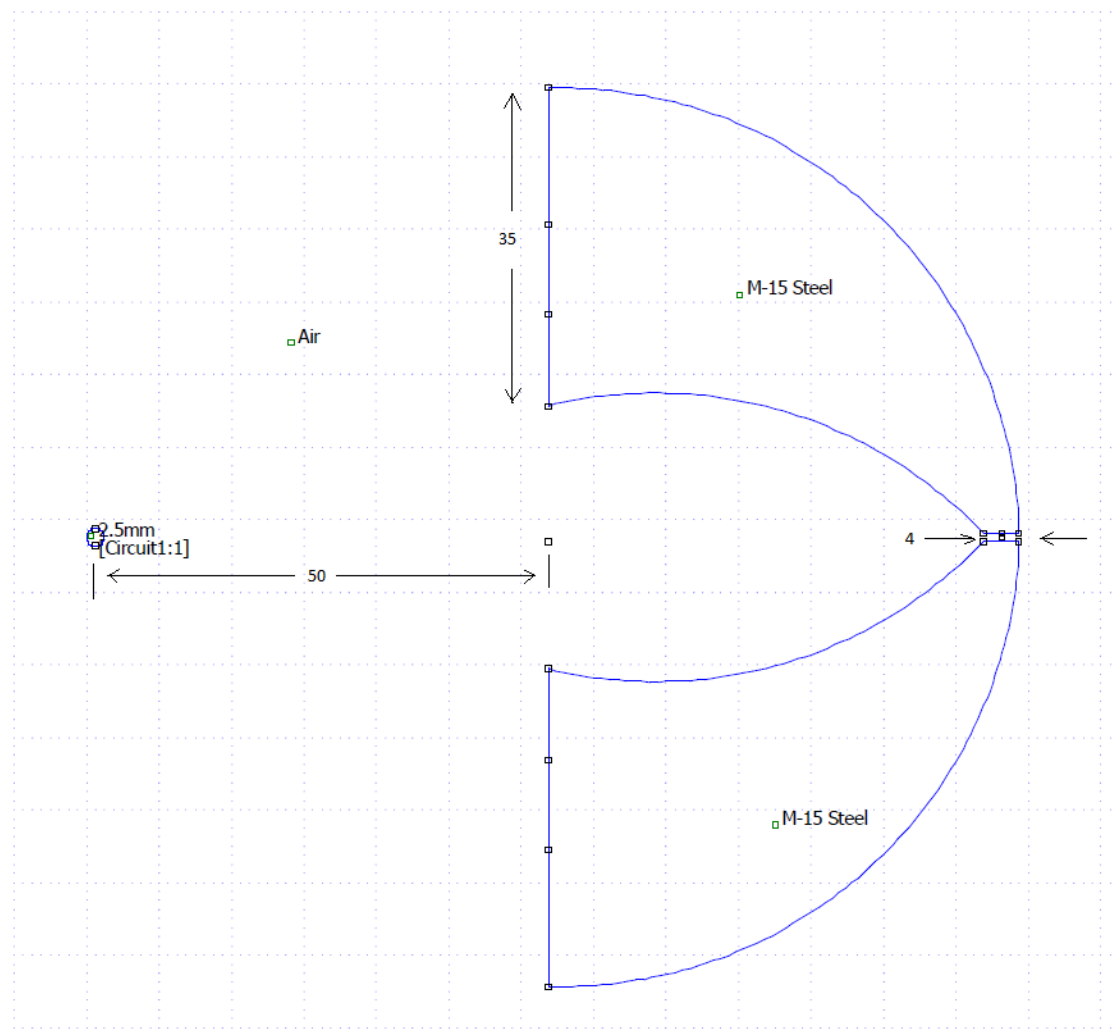
$$I = \frac{2\pi \cdot B_1}{\mu_0} \cdot d = \frac{2\pi \cdot B_1}{\mu_0} \cdot \frac{B_2}{B_1 - B_2} r \quad (3.4)$$

Αυτή η μέτρηση μπορεί να γίνει από απόσταση, χωρίς να χρειάζεται άμεση πρόσβαση στον αγωγό και μέσα από άλλα υλικά, για παράδειγμα μέσα από τοίχο, αρκεί αυτά να είναι διαμαγνητικά. Επιπλέον, λόγω της μη χρήσης σιδηρομαγνητικού πυρήνα δεν υπάρχουν σημαντικά θέματα γραμμικότητας, σε πολύ μεγάλα ρεύματα. Ωστόσο, παρουσιάζεται το πρακτικό πρόβλημα ότι η μαγνητική ροή στους αισθητήρες, θα είναι πολύ μικρή, ειδικά για μικρά ρεύματα κάτω του 1 A, που εμφανίζονται σε οικιακές καταναλώσεις.



### 3.2 Χρήση μαγνητικού πυρήνα

Για να ενισχυθεί η μαγνητική ροή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μαγνητικός πυρήνας (Field Concentrator). Για να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα ενός κλειστού πυρήνα, όπως το ότι πρέπει να διαταραχθεί μηχανικά ο αγωγός για την τοποθέτησή του, θα εξεταστεί η χρήση ενός ημικυκλικού πυρήνα, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από απόσταση. Το σχέδιο του πυρήνα φαίνεται στο σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Η προτεινόμενη διάταξη

Λόγω της συνθετότητας της διάταξης, η μελέτη έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στο πρόγραμμα FEMM, και αναλύεται περισσότερο στην

επόμενη ενότητα. Στο διάκενο που δημιουργείται από τον πυρήνα, μπορεί να τοποθετηθεί ένας αισθητήρας Hall, ή και άλλου είδους μαγνητικός αισθητήρας, αν επιθυμείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Για την εκτίμηση της θέσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο ανεξάρτητοι, γεωμετρικά ίδιοι πυρήνες, τοποθετημένοι ο ένας παράλληλα στον άλλον, με μόνη διαφορά την απόσταση από τον αγωγό  $r$ . Σε αυτήν την περίπτωση το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο θα είναι:

$$B = \alpha \cdot \mu_0 \frac{I}{d} \quad (3.5)$$

όπου  $\alpha$  μια αδιάστατη σταθερά που εξαρτάται από την διάταξη, όπως το μήκος της βάσης, τις διαστάσεις του διακένου, την σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού κ.α. Η τιμή αυτής της σταθεράς μπορεί να βρεθεί μέσω εξομοιώσεων ή πειραματικά.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αν τοποθετηθούν δύο τέτοιοι πυρήνες σε διαφορετικές αποστάσεις από τον αγωγό, με μεταξύ τους απόσταση  $r$ , θα ισχύει:

$$B_1 = \alpha \cdot \mu_0 \frac{I}{d} \quad (3.6)$$

$$B_2 = \alpha \cdot \mu_0 \frac{I}{d + r} \quad (3.7)$$

Επομένως:

$$d = r \frac{B_2}{B_1 - B_2} \quad (3.8)$$

$$I = \frac{B_1}{\alpha \mu_0} \cdot d = \frac{r}{\alpha \mu_0} \cdot \frac{B_1 B_2}{B_1 - B_2} \quad (3.9)$$

Είναι εμφανές ότι και στην περίπτωση της χρήσης μαγνητικού πυρήνα, οι εξισώσεις είναι όμοιες, ωστόσο χρειάζεται να προσδιοριστεί η σταθερά  $\alpha$ . Αυτό μπορεί να γίνει είτε πειραματικά, είτε μέσω εξομοιώσεων ή και με συνδυασμό των δύο. Στο επόμενο κεφάλαιο, ακολουθεί μελέτη της παραπάνω διάταξης σε πρόγραμμα προσομοίωσης σε Η/Υ ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροί της.

### 3.3 Σφάλματα

Ένας σημαντικός παράγοντας, είναι η ακρίβεια της όλης διάταξης, ή αλλιώς το πώς τα σφάλματα στη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου και των παραμέτρων ( $\alpha, r$ ) επηρεάζουν το ολικό σφάλμα της μέτρησης.

Το κυριότερο σφάλμα, είναι αυτό του μαγνητικού αισθητήρα Hall, έστω  $\epsilon_H$  (σχετικό σφάλμα), που αφορά τις μετρήσεις των  $B_1$  και  $B_2$ . Οι εξισώσεις, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω είναι:

$$d = r \frac{B_2}{B_1 - B_2} \quad (3.8)$$

$$I = \frac{B_1}{\alpha \mu_0} \cdot d = \frac{r}{\alpha \mu_0} \cdot \frac{B_1 B_2}{B_1 - B_2} \quad (3.9)$$

Για πολλαπλασιασμό και διαίρεση, το σχετικό σφάλμα πολλαπλασιάζεται, ενώ για πρόσθεση/αφαίρεση μένει σταθερό. Επομένως με βάση την (3.9), έχουμε το συνολικό σφάλμα λόγω του αισθητήρα ως  $(\epsilon_H)^3$ . Αυτό θα πολλαπλασιαστεί με το σχετικό σφάλμα της απόστασης και της σταθεράς  $\alpha$ .

Παρατηρείται τελικά η πολύ έντονη εξάρτηση του ολικού σφάλματος, από το σφάλμα της μέτρησης του μαγνητικού πεδίου. Αυτό είναι κατανοητό, αφού για το τελικό αποτέλεσμα, δεν αρκεί απλά η απόλυτη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, αλλά και η σχετική διαφορά του πεδίου ανάμεσα στις δύο θέσεις των αισθητήρων. Για πρακτική εφαρμογή απαιτείται αισθητήρας Hall υψηλών προδιαγραφών.

## 4 Εξομοίωση στο FEMM

### 4.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Στα προηγούμενα κεφάλαια, αναφέρθηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στην γενική περίπτωση. Η εφαρμογή τους όμως είναι δύσκολη, και εκτός από πολύ απλές γεωμετρίες, είναι αδύνατον να βρεθεί κλειστού τύπου αναλυτική λύση. Για την μελέτη πιο σύνθετων προβλημάτων χρησιμοποιούνται συχνά αριθμητικές μέθοδοι στον υπολογιστή, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η ιδέα των πεπερασμένων στοιχείων, είναι να χωρίσει τη γεωμετρία του προβλήματος, σε ένα μεγάλο αριθμό πολύ απλούστερων σχημάτων (π.χ. τρίγωνα). Σε αυτά τα σχήματα, οι διαφορικές εξισώσεις έχουν απλές λύσεις και συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από όλα τα απλούστερα στοιχεία, έχουμε το τελικό αποτέλεσμα για το αρχικό πρόβλημα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή, μετατρέπει ένα δύσκολο σε επίλυση πρόβλημα, σε πολλά ευεπίλυτα προβλήματα και συνδυάζει τα αποτελέσματα με μεθόδους γραμμικής άλγεβρας.

## 4.2 Το πρόγραμμα FEMM

Για την εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα FEMM (Finite Element Method Magnetics), το οποίο μπορεί να λύσει προβλήματα μαγνητοστατικά<sup>2</sup>, ηλεκτροστατικά, ροής ρεύματος ή θερμότητας, σε δύο διαστάσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Όπως εξηγήθηκε και στην ενότητα 1.1, για αρκετά χαμηλές συχνότητες (όχι ραδιοσυχνότητες) οι εξισώσεις του Maxwell γίνονται:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.5)$$

Με  $\mu = \mu(B)$  στην γενικότερη περίπτωση.

Το FEMM χωρίζει το πρόβλημα σε ένα πλέγμα τριγώνων, και σε κάθε στοιχείο, προσπαθεί να βρει ένα πεδίο που ικανοποιεί τις τρεις παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιώντας το μαγνητικό (διανυσματικό) δυναμικό  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.1)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, ο νόμος του Gauss ικανοποιείται και ο νόμος του Ampere γίνεται:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4.2)$$

---

<sup>2</sup> Και μαγνητικά προβλήματα, αρμονικού χρόνου, για χαμηλές συχνότητες.

Για ένα γραμμικό και ισότροπο υλικό<sup>3</sup> η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2 A = J \quad (4.3)$$

Το FEMM διατηρεί και την αρχική μορφή, (ελλειπτική μερική διαφορική εξίσωση) ώστε να μπορούν να επιλυθούν προβλήματα με μη γραμμικά μαγνητικά υλικά  $\mu=\mu(B)$ . Το πλεονέκτημα της παραπάνω μορφής με το μαγνητικό δυναμικό είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιηθούν, έχουν συνδυαστεί σε μία εξίσωση. Αν βρεθεί το **A** τότε και το **B** και το **H** μπορούν να βρεθούν παραγωγίζοντας το **A** [15].

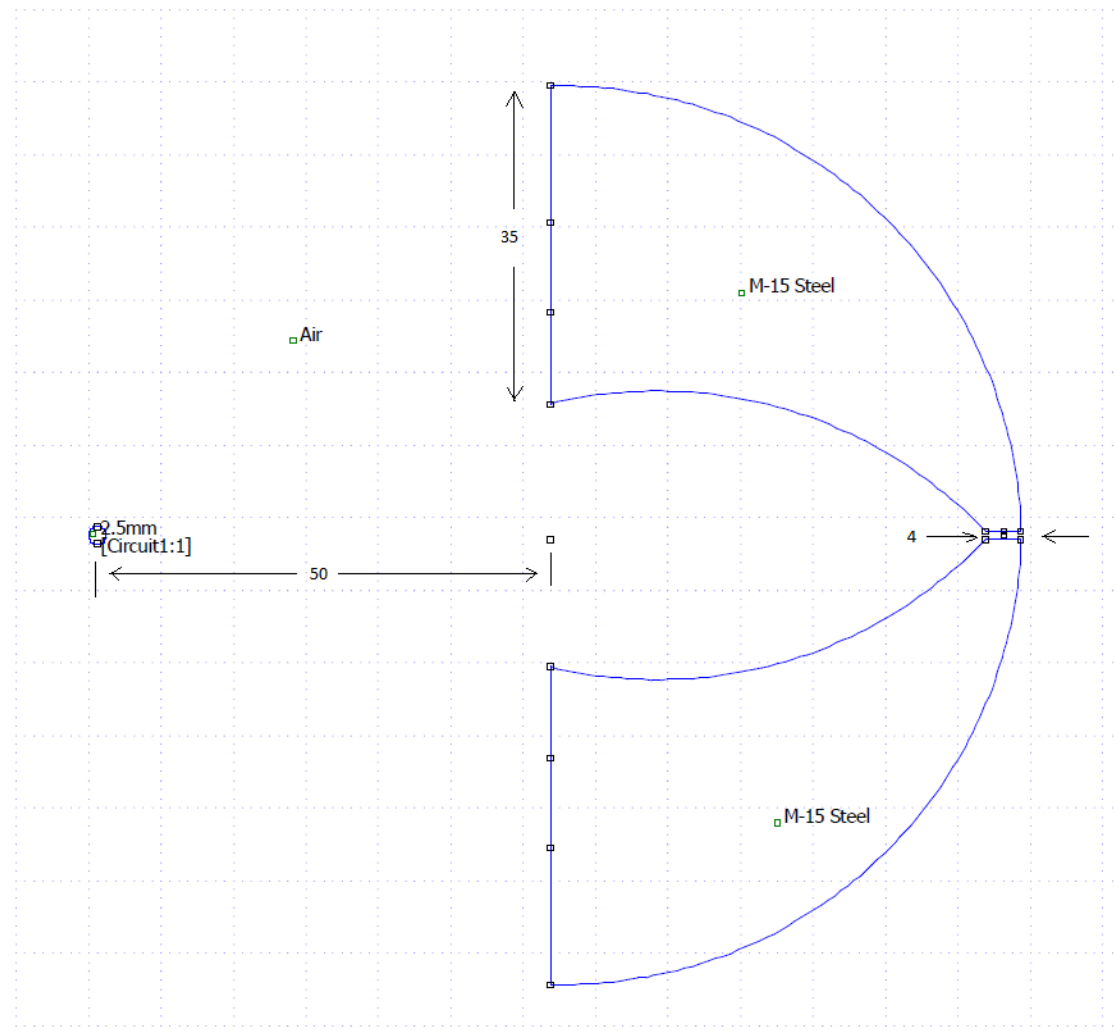
Εκτός από καθαρά μαγνητοστατικά προβλήματα, το FEMM μπορεί να προσομοιώσει και εναλλασσόμενα πεδία, αρκεί η συχνότητα να είναι αρκετά μικρή ώστε να ισχύουν οι προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.1, δηλαδή να μην πρόκειται για ραδιοσυχνότητες. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζονται και οι απώλειες λόγω υστέρησης και δινορευμάτων.

---

<sup>3</sup> Που ικανοποιεί και τη σχέση  $\text{div}(A)=0$

### 4.3 Θεμελίωση του προβλήματος

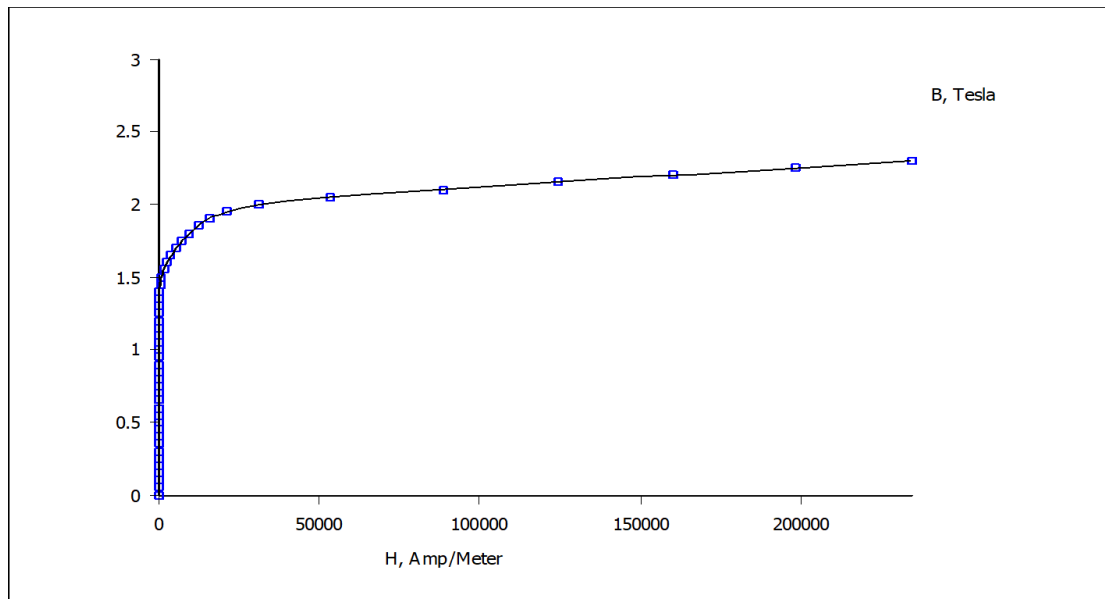
Η βασική διάταξη είναι αυτή που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.1: Το πρόβλημα που μελετήθηκε

Σαν υλικό του πυρήνα επιλέχθηκε ένας τυπικός ηλεκτρικός χάλυβας (μη προσανατολισμένος), ο M-15 electrical steel. Στα χαρακτηριστικά του, όπως είναι καταχωρημένα στο FEMM, το πάχος των δυναμοελασμάτων είναι 0,635mm. Η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού είναι η ακόλουθη:





Σχήμα 4.2: Καμπύλη Μαγνήτισης M-15 Electrical Steel

Το πλάτος του διακένου επιλέχθηκε 4mm. Με μικρότερα διάκενα είναι δυνατόν να πετύχουμε αύξηση της μαγνητικής ροής, ωστόσο για να είναι ομοιόμορφο το πεδίο θέλουμε το πλάτος του διακένου να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το πλάτος του αισθητήρα. Υποθέσαμε ένα τυπικό πλάτος αισθητήρα 2mm, οπότε 4mm για το διάκενο. Το πλάτος όλης της διάταξης είναι 10mm.

Το πρόγραμμα FEMM μπορεί να δημιουργήσει μόνο του ένα σύνολο συνοριακών συνθηκών, που προσομοιώνουν ασυμπτωτικά τον ελεύθερο χώρο (IABC Open Boundary) [15] και αυτές επιλέχθηκαν και τέθηκαν σε επαρκή απόσταση από την διάταξη, ώστε τα αποτελέσματα να ταιριάζουν με αυτά που θα παρουσιαστούν σε ελεύθερο χώρο. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι κοντά στην διάταξη δεν θα πρέπει να υπάρχουν σιδηρομαγνητικά υλικά, είτε άλλες πηγές μαγνητικού πεδίου.

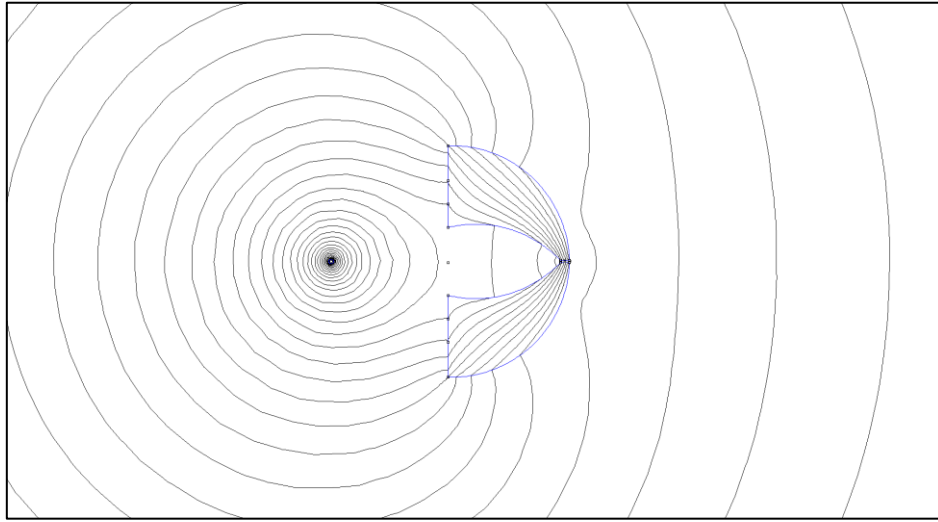
Σκοπός καταρχάς είναι να εξεταστούν οι τιμές μαγνητικής επαγωγής που εμφανίζονται στο μέσο του διακένου, εκεί δηλαδή που θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας Hall, και πώς μεταβάλλονται για διάφορες τιμές του μήκους του διακένου, του ρεύματος στον αγωγό και του μήκους της βάσης. Στη συνέχεια και εφόσον επιβεβαιωθεί ότι η μαγνητική επαγωγή είναι επαρκής για μέτρηση με αισθητήρες Hall, θα επιλεγθούν οι διαστάσεις και θα υπολογιστεί η σταθερά  $\alpha$  ώστε να μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα και η απόσταση.

Η ανάλυση που έγινε είναι για συνεχές ρεύμα (DC), ωστόσο, τα αποτελέσματα ισχύουν και για εναλλασσόμενα ρεύματα, καθώς η μόνη διαφορά είναι οι απώλειες δινορευμάτων και υστέρησης που εμφανίζονται στον πυρήνα, ωστόσο αυτές είναι αμελητέες, εφόσον βέβαια αυτός είναι κατασκευασμένος από δυναμοελάσματα. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπεριφορά της διάταξης σε υψηλές συχνότητες, αρμονικές παραμορφώσεις ή μεταβατικά φαινόμενα δεν έχει μελετηθεί και πιθανότατα θα αποκλίνει σημαντικά από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ.

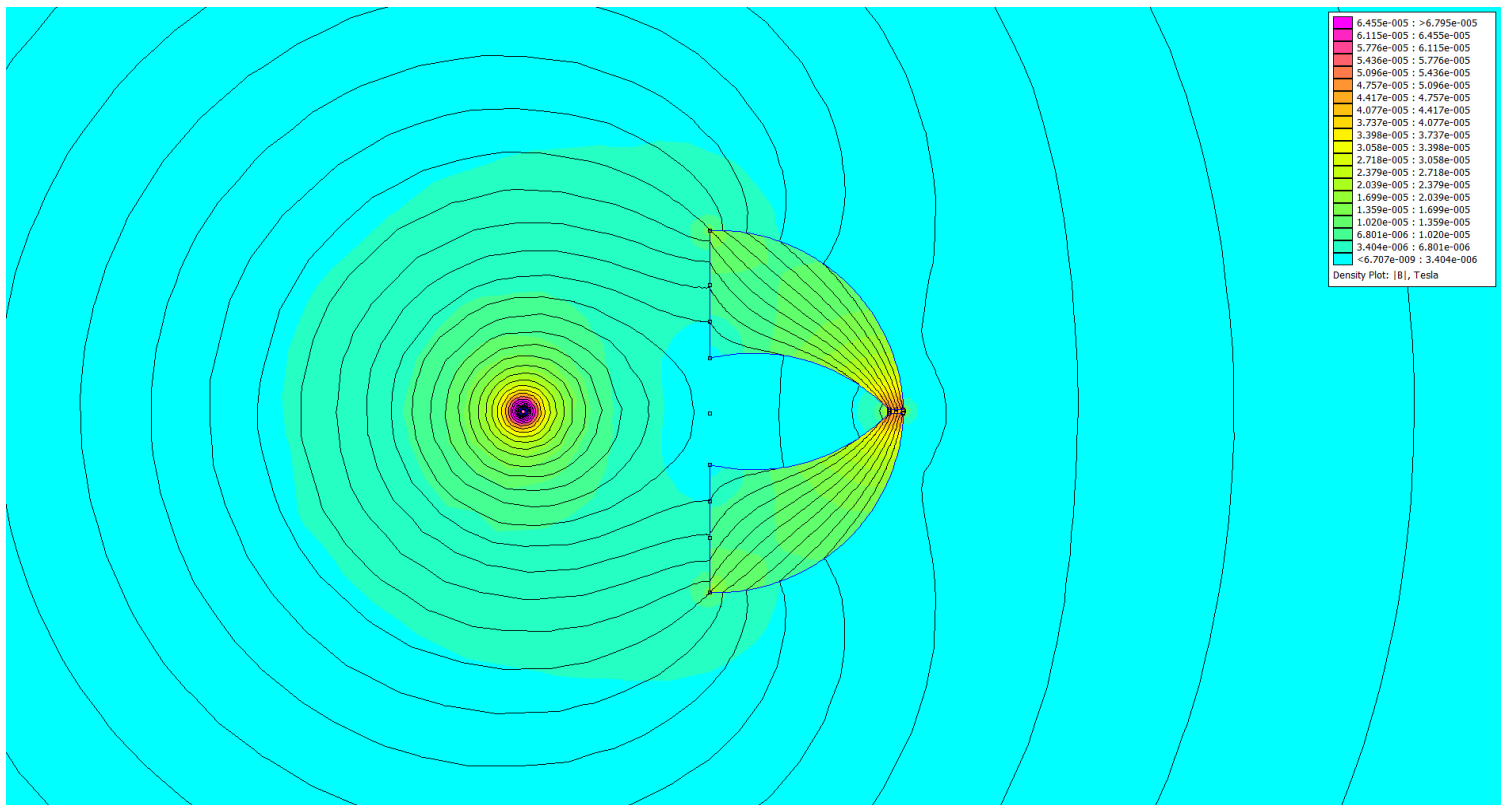
## 4.4 Αποτελέσματα

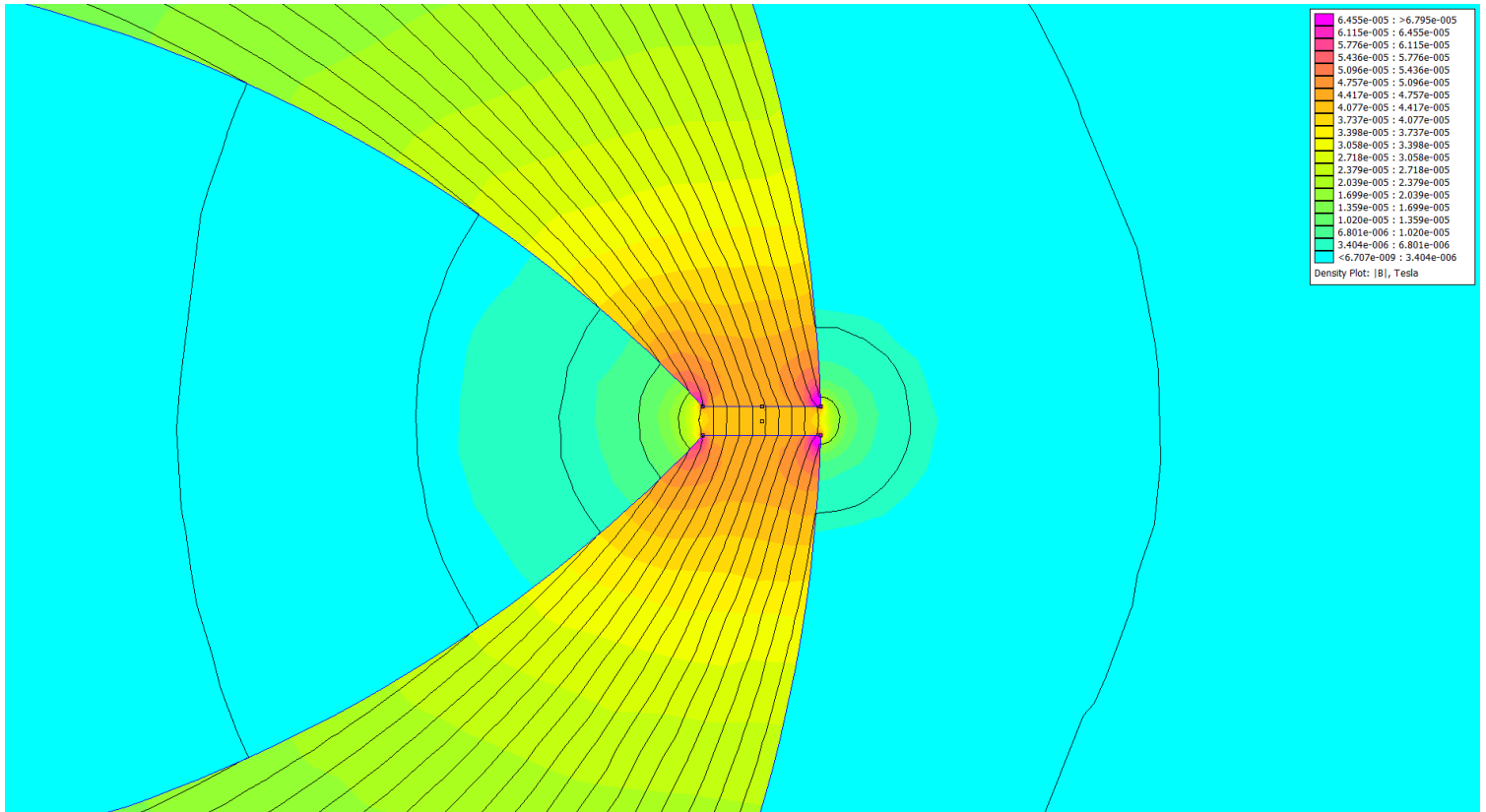
### Μελέτη διαστάσεων διάταξης

Για αρχή, γίνεται μια βασική μελέτη, για ρεύμα  $I=1A$ , και τις διαστάσεις που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα, δηλαδή μήκος διακένου 1mm, πλάτος βάσης 35mm και απόσταση αγωγού από τη βάση 50mm.



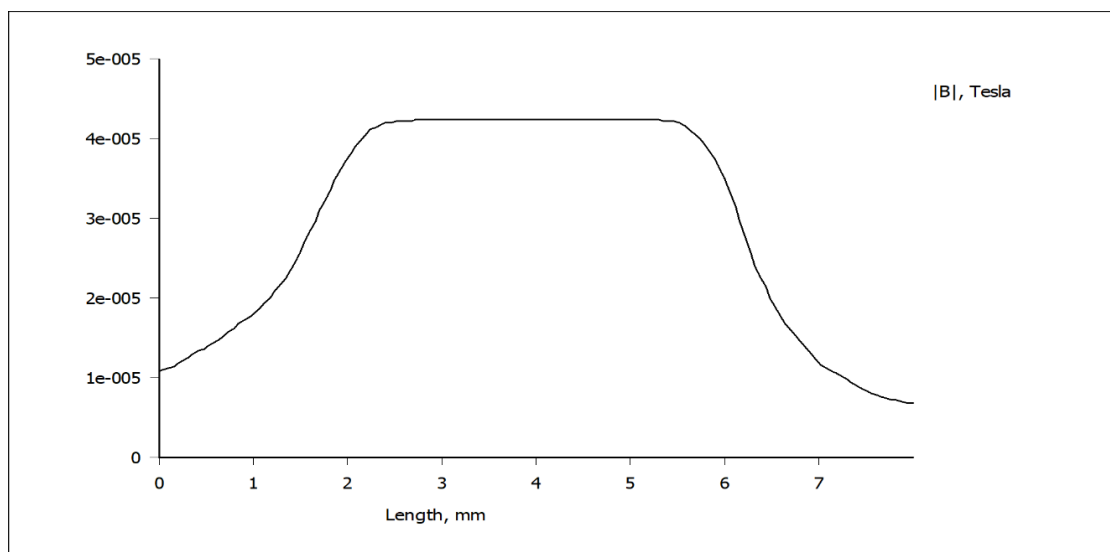
Σχήμα 4.3: Όψεις όλης της διάταξης





Σχήμα 4.4: Όψη του διακένου

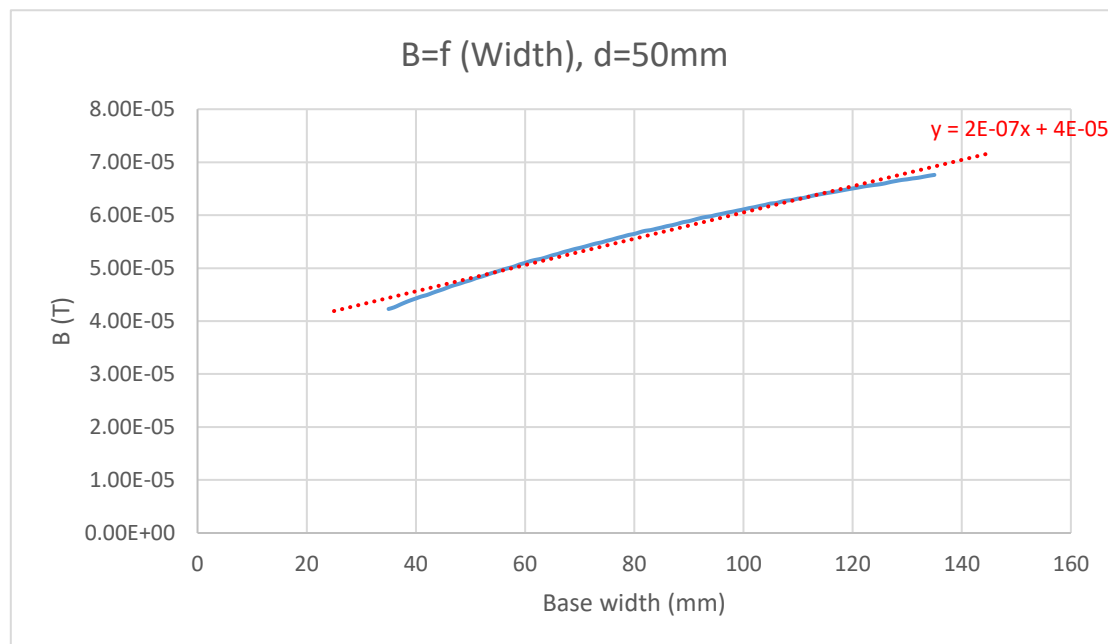
Όπως ήταν αναμενόμενο, ο πυρήνας συγκεντρώνει μέσα του τις δυναμικές γραμμές και τις «κατευθύνει» προς το διάκενο. Η μαγνητική επαγωγή στο μέσο του διακένου είναι  $B=42,3\mu\text{T}$  και το πεδίο είναι αρκετά ομοιόμορφο κατά μήκος του, μέχρις ότου να φτάσουμε στις άκρες του, όπου παρατηρείται ελαφρά θυσσάνωση.



Σχήμα 4.5: Μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του διακένου

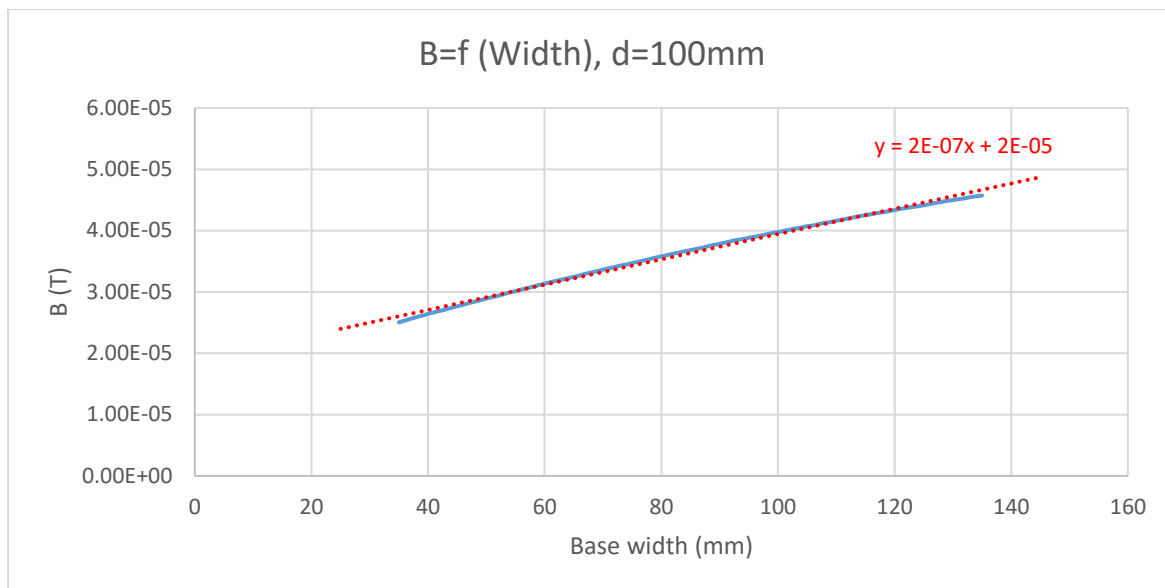
Αν σχεδιαστεί η μαγνητική επαγωγή κατά μήκος και πλάτος του διακένου (Σχήμα 4.5) επιβεβαιώνουμε την ομοιομορφία, γεγονός που σημαίνει ότι η ακριβής θέση του αισθητήρα δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, όσο οι διαστάσεις του είναι αρκετά μικρότερες από το πλάτος του διακένου.

Στην συνέχεια εξετάζεται η εξάρτηση από το πλάτος της βάσης για  $I=1A$  και μήκος διακένου 1mm (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Μαγνητική επαγωγή συναρτήσει του πλάτους της βάσης, για  $I=1A$ , διάκενο 1mm και απόσταση  $d=50mm$

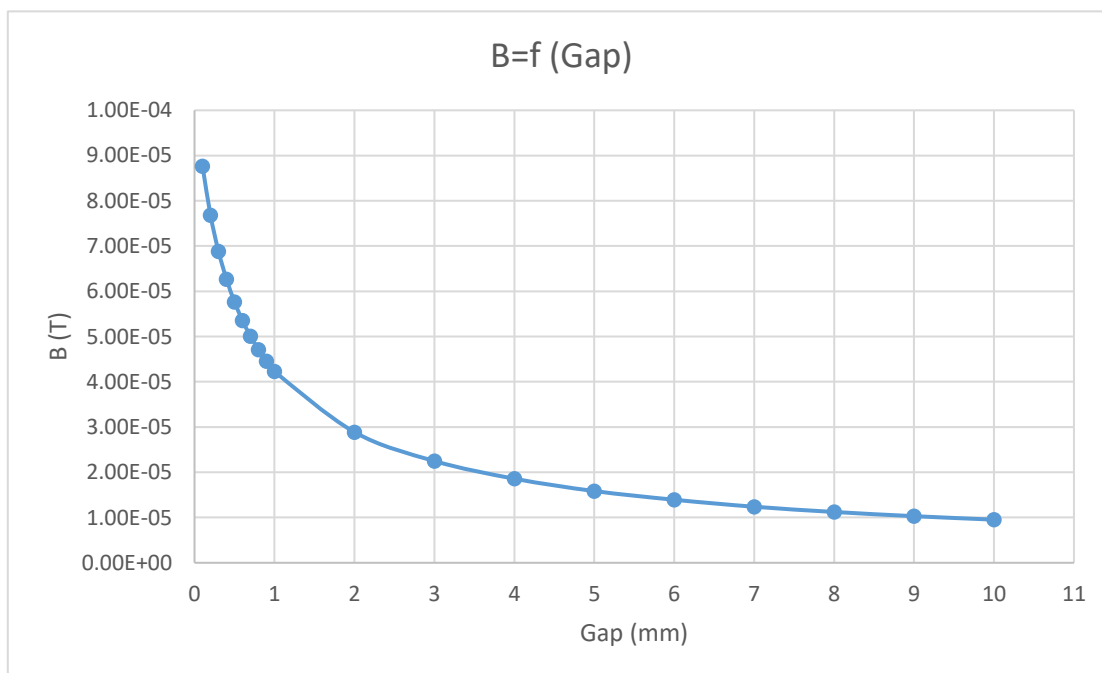
Είναι ορατό ότι υπάρχει μια εξάρτηση της μαγνητικής επαγωγής από το πλάτος της βάσης. Με γραμμική παρεμβολή μπορούμε να εκτιμήσουμε την εξάρτηση αυτή στα  $0,2\mu T/mm$  η οποία είναι αρκετά ασθενής. Ωστόσο αυτές οι τιμές ισχύουν για απόσταση αγωγού-πυρήνα  $d=50mm$ . Αν αυξηθεί η απόσταση στα 100mm (Σχήμα 4.7), θα παρατηρήσουμε ότι η εξάρτηση αυτή παραμένει ουσιαστικά ίδια, αλλά μειώνονται οι απόλυτες τιμές της μαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 4.7: : Μαγνητική επαγωγή συναρτήσει του πλάτους της βάσης, για  $I=1\text{A}$ , διάκενο  $1\text{mm}$  και απόσταση  $d=100\text{mm}$

Με βάση τα παραπάνω, αν επιθυμούνται μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής ροής στο διάκενο, μπορεί να αυξηθεί το πλάτος της βάσης, ωστόσο η εξάρτηση είναι σχετικά ασθενής (σημαντικά μικρότερη από μια τάξη μεγέθους), για εύλογες τιμές των διαστάσεων. Για το υπόλοιπο των εξομοιώσεων, επιλέχθηκε πλάτος  $35\text{mm}$ , ως μια ενδεικτική λύση για φορητές εφαρμογές.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε την εξάρτηση από το μήκος του διακένου (Σχήμα 4.8)



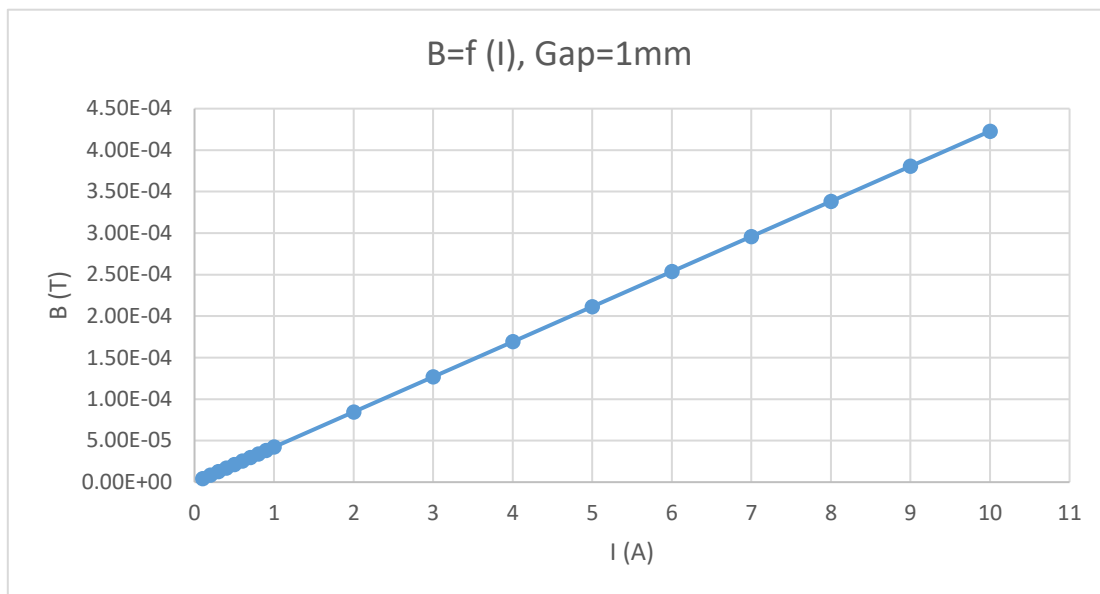
Σχήμα 4.8 Μαγνητική επαγωγή συναρτήσει του μήκους του διακένου, για  $I=1\text{A}$

Είναι ορατό ότι εδώ η εξάρτηση είναι πολύ έντονη, ειδικά για μήκη κάτω του 1mm, οπότε πρέπει να ελαχιστοποιηθεί όσο γίνεται το μήκος του διακένου. Ο περιοριστικός παράγοντας εδώ είναι οι διαστάσεις του πακέτου του αισθητήρα Hall, οι οποίες για έναν μικρό αισθητήρα μπορεί να είναι 0.8-1mm. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να επιλεγεί όσο το δυνατόν μικρότερο πάχος, για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση.

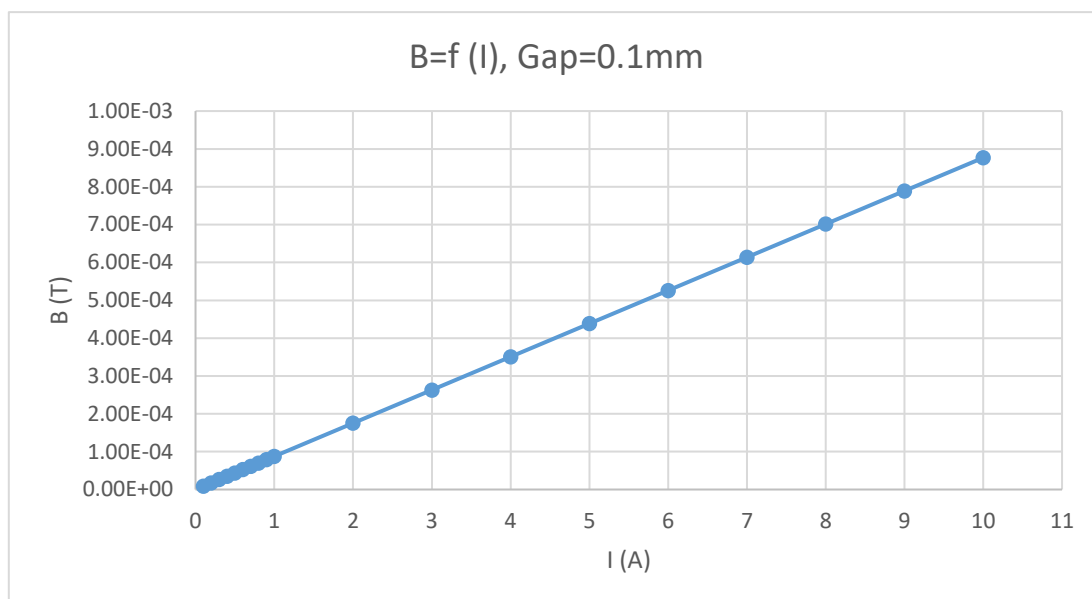
Στην συνέχεια έγιναν εξομοιώσεις για μήκος διακένου 0.1-1mm (βήμα 0.1mm) και 1-10mm (βήμα 1mm). Για κάθε μήκος διακένου εξετάστηκαν τιμές ρεύματος 0.1-1A (βήμα 0.1A) και 1-10A (βήμα 1A). Ορισμένα ενδεικτικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1 και εποπτικά στα σχήματα Σχήμα 4.9, Σχήμα 4.10, ενώ οι πλήρεις τιμές βρίσκονται στο Παράρτημα Α.

Gap (mm)	I (A)	B (T)
0.1	0.1	8.77E-06
0.1	0.5	4.38E-05
0.1	1	8.77E-05
0.5	0.1	5.77E-06
0.5	0.5	2.88E-05
0.5	1	5.77E-05
0.7	0.1	5.01E-06
0.7	0.5	2.50E-05
0.7	1	5.01E-05
1	0.1	4.23E-06
1	0.5	2.11E-05
1	1	4.23E-05
1	10	4.23E-04
5	0.1	1.59E-06
5	0.5	7.93E-06
5	1	1.59E-05
10	0.1	9.53E-07
10	0.5	4.77E-06
10	1	9.53E-06

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα εξομοιώσεων για διάφορες τιμές του ρεύματος και μήκους διακένου, για απόσταση  $d=50mm$



Σχήμα 4.9: Εξάρτηση της μαγνητικής επαγωγής από το ρεύμα, για απόσταση  $d=50\text{mm}$ , Διάκενο  $1\text{mm}$



Σχήμα 4.10: Εξάρτηση της μαγνητικής επαγωγής από το ρεύμα, για απόσταση  $d=50\text{mm}$ , Διάκενο  $0.1\text{mm}$

Από τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι οι ελάχιστες τιμές ακόμα και για ρεύμα  $0.1\text{A}$  είναι γύρω στα  $4\text{-}5\mu\text{T}$ , που είναι μετρήσιμες με αισθητήρα Hall. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται η γραμμικότητα της μαγνητικής ροής ως προς το ρεύμα, ακόμα και για μεγάλες τιμές του ρεύματος (δοκιμάστηκε μέχρι  $100\text{A}$ ). Αυτό σημαίνει ότι δεν



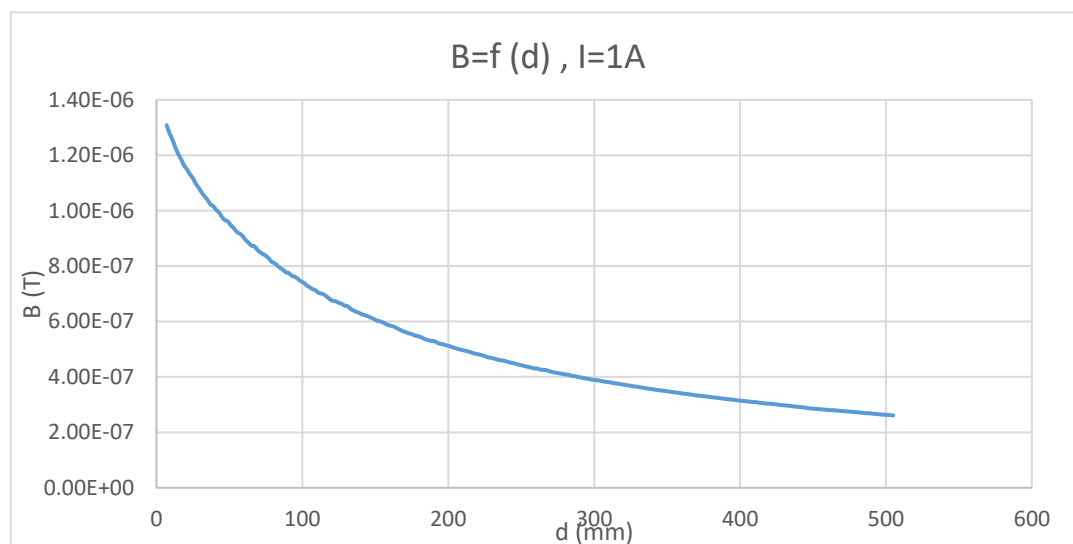
τίθεται θέμα κορεσμού του μαγνητικού υλικού, όπως σε περιπτώσεις κλειστού πυρήνα, λόγω των πολύ μικρότερων μαγνητικών επαγωγών που εμφανίζονται<sup>4</sup>.

Η διάταξη στη συγκεκριμένη μορφή, χωρίς δεύτερο αισθητήρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση ρεύματος, αξιοποιώντας μόνο την γραμμική εξάρτηση της μαγνητικής επαγωγής από το ρεύμα. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε μια σταθερή απόσταση από τον αγωγό, ο οποίος δεν διαρρέεται από το ρεύμα. Στην συνέχεια το όργανο πρέπει να βαθμονομηθεί, για τουλάχιστον δύο τιμές ρεύματος, για παράδειγμα μηδέν και 1A. Αφού έχει γίνει η βαθμονόμηση, είναι δυνατόν να μετρηθεί αξιόπιστα το ρεύμα, εφόσον η απόσταση από τον αγωγό δεν μεταβληθεί.

Για να είναι εφικτή η μέτρηση χωρίς να χρειάζεται βαθμονόμηση μετά από κάθε μετατόπιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λύση που έχει αναλυθεί πιο πάνω με βάση 2 όμοιους αισθητήρες σε διαφορετική απόσταση.

#### Εξάρτηση από απόσταση

Στην συνέχεια γίνονται προσομοιώσεις για να εξεταστεί η εξάρτηση της μαγνητικής ροής από την απόσταση:



Σχήμα 4.11 Εξάρτηση της μαγνητικής ροής από την απόσταση, για  $I=1A$ , διάκενο 1mm

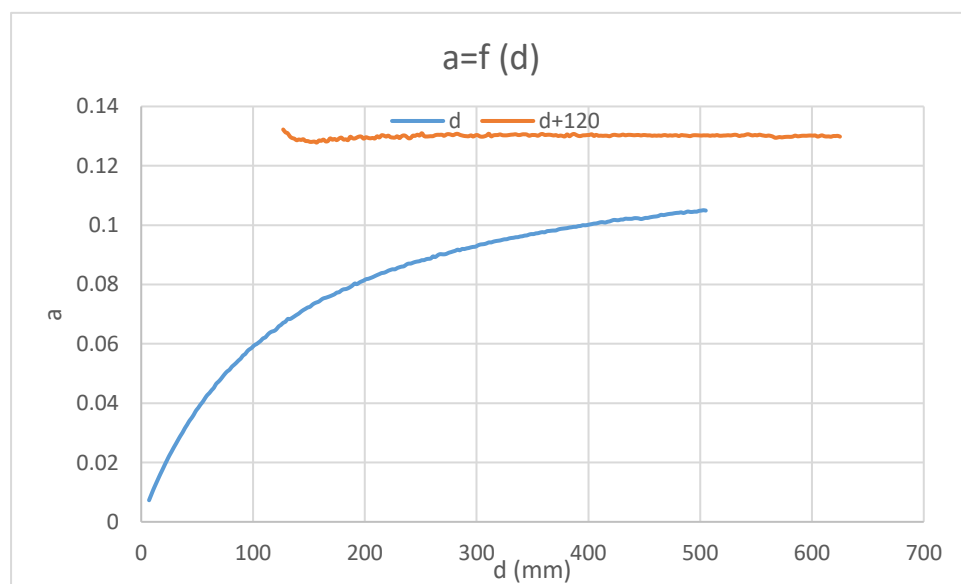
<sup>4</sup> Για παράδειγμα στα 100A  $B=4,22mT$  ενώ το υλικό αρχίζει να εμφανίζει κορεσμό, στα 1,5T περίπου.

Επιβεβαιώνεται, όπως υποτέθηκε, ότι κατά προσέγγιση η μαγνητική ροή είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης.

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε τώρα την σταθερά  $\alpha$  ως εξής:

$$\alpha = \frac{B \cdot d}{\mu_0 \cdot I} \quad (4.4)$$

Εδώ υπάρχει ένα θέμα σχετικά με το τι ορίζουμε ως απόσταση  $d$ . Μέχρι τώρα, η απόσταση αυτή θεωρούταν η απόσταση από τον αγωγό έως τη βάση του πυρήνα. Ωστόσο αν το  $\alpha$  υπολογιστεί με αυτόν τον ορισμό, υπάρχει μια σημαντική μεταβολή, ειδικά στις πιο μικρές αποστάσεις. Με πειραματισμό, βρίσκουμε ότι η μικρότερη τυπική απόκλιση των τιμών βρίσκεται αν θεωρήσουμε ως απόσταση  $d$  στην παραπάνω εξίσωση την απόσταση αγωγού-βάσης συν 120mm(Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12: Μεταβολή της σταθερας  $\alpha$  με την απόσταση

Εν τέλει η διορθωμένη τιμή του  $\alpha$  είναι  $\alpha=0,13$  με τυπική απόκλιση  $\sigma=0.000585$ .

## 5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας ό,τι παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, προσομοιώνοντας την συμπεριφορά του ημικυκλικού πυρήνα, αποδείχθηκε ότι οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής που εμφανίζονται στο διάκενο είναι αρκετά μεγάλες, ώστε να επαρκούν οι αισθητήρες Hall, ακόμα και για τιμές του ρεύματος, κάτω του 1A. Επιπλέον, η όλη διάταξη εμφανίζει πολύ καλή γραμμικότητα του μαγνητικού πεδίου ως προς το ρεύμα, ακόμα και για μεγάλες τιμές του ρεύματος. Η υπόθεση που έγινε ότι η μαγνητική επαγωγή ακολουθεί την σχέση 3.5, επιβεβαιώθηκε, αρκεί να γίνει η διόρθωση όσον αφορά την απόσταση  $d$ , όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

$$B = \alpha \cdot \mu_0 \frac{I}{d} \quad (3.5)$$

Επομένως είναι εφικτό να κατασκευαστεί σύστημα μέτρησης του ρεύματος, όπως έχει περιγραφεί. Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί, που πρέπει να αναφερθούν. Καταρχάς, όπως και κάθε μαγνητική μέτρηση του ρεύματος, πρέπει ο αγωγός προς μέτρηση, να είναι μόνος του, δηλαδή χωρίς την επιστροφή(ουδέτερος), ειδάλλως, το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο θα είναι μηδέν, αφού τα ρεύματα στους δύο αγωγούς είναι ίσα και αντίθετα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι πρέπει η απόσταση αγωγού-διάταξης να είναι αρκετά μικρότερη της απόστασης αγωγού-ουδετέρου. Ύστερα, απαιτείται αισθητήρας Hall με υψηλή ευαισθησία και πολύ καλή ακρίβεια, αφού όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3, αυτή επηρεάζει ιδιαίτερα πολύ το ολικό σφάλμα. Τέλος απαιτείται προσεκτική βαθμονόμηση και μηδενισμός της διάταξης, καθώς θα υπάρχει μεγάλη ευαισθησία σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία, όπως αυτό της γης, το οποίο είναι στην τάξη των 30μΤ.



## Παράρτημα Α

Πίνακας 2: Τιμές μαγνητικής επαγωγής για διάκενο 0.1-1mm, ρεύμα 0.1-10Α

Gap (mm)	Current (A)	B (T)		Gap (mm)	Current (A)	B (T)
1	0.1	4.23E-06		0.5	0.1	5.77E-06
1	0.2	8.46E-06		0.5	0.2	1.15E-05
1	0.3	1.27E-05		0.5	0.3	1.73E-05
1	0.4	1.69E-05		0.5	0.4	2.31E-05
1	0.5	2.11E-05		0.5	0.5	2.88E-05
1	0.6	2.54E-05		0.5	0.6	3.46E-05
1	0.7	2.96E-05		0.5	0.7	4.04E-05
1	0.8	3.38E-05		0.5	0.8	4.61E-05
1	0.9	3.81E-05		0.5	0.9	5.19E-05
1	1	4.23E-05		0.5	1	5.77E-05
1	2	8.46E-05		0.5	2	1.15E-04
1	3	1.27E-04		0.5	3	1.73E-04
1	4	1.69E-04		0.5	4	2.31E-04
1	5	2.11E-04		0.5	5	2.88E-04
1	6	2.54E-04		0.5	6	3.46E-04
1	7	2.96E-04		0.5	7	4.04E-04
1	8	3.38E-04		0.5	8	4.61E-04
1	9	3.81E-04		0.5	9	5.19E-04
1	10	4.23E-04		0.5	10	5.77E-04
0.9	0.1	4.46E-06		0.4	0.1	6.27E-06
0.9	0.2	8.91E-06		0.4	0.2	1.25E-05
0.9	0.3	1.34E-05		0.4	0.3	1.88E-05
0.9	0.4	1.78E-05		0.4	0.4	2.51E-05
0.9	0.5	2.23E-05		0.4	0.5	3.14E-05
0.9	0.6	2.67E-05		0.4	0.6	3.76E-05
0.9	0.7	3.12E-05		0.4	0.7	4.39E-05
0.9	0.8	3.57E-05		0.4	0.8	5.02E-05
0.9	0.9	4.01E-05		0.4	0.9	5.64E-05
0.9	1	4.46E-05		0.4	1	6.27E-05
0.9	2	8.91E-05		0.4	2	1.25E-04
0.9	3	1.34E-04		0.4	3	1.88E-04
0.9	4	1.78E-04		0.4	4	2.51E-04
0.9	5	2.23E-04		0.4	5	3.14E-04
0.9	6	2.67E-04		0.4	6	3.76E-04
0.9	7	3.12E-04		0.4	7	4.39E-04
0.9	8	3.57E-04		0.4	8	5.02E-04
0.9	9	4.01E-04		0.4	9	5.64E-04
0.9	10	4.46E-04		0.4	10	6.27E-04

Gap (mm)	Current (A)	B (T)		Gap (mm)	Current (A)	B (T)
0.8	0.1	4.71E-06		0.3	0.1	6.88E-06
0.8	0.2	9.43E-06		0.3	0.2	1.38E-05
0.8	0.3	1.41E-05		0.3	0.3	2.06E-05
0.8	0.4	1.89E-05		0.3	0.4	2.75E-05
0.8	0.5	2.36E-05		0.3	0.5	3.44E-05
0.8	0.6	2.83E-05		0.3	0.6	4.13E-05
0.8	0.7	3.30E-05		0.3	0.7	4.82E-05
0.8	0.8	3.77E-05		0.3	0.8	5.51E-05
0.8	0.9	4.24E-05		0.3	0.9	6.19E-05
0.8	1	4.71E-05		0.3	1	6.88E-05
0.8	2	9.43E-05		0.3	2	1.38E-04
0.8	3	1.41E-04		0.3	3	2.06E-04
0.8	4	1.89E-04		0.3	4	2.75E-04
0.8	5	2.36E-04		0.3	5	3.44E-04
0.8	6	2.83E-04		0.3	6	4.13E-04
0.8	7	3.30E-04		0.3	7	4.82E-04
0.8	8	3.77E-04		0.3	8	5.51E-04
0.8	9	4.24E-04		0.3	9	6.19E-04
0.8	10	4.71E-04		0.3	10	6.88E-04
0.7	0.1	5.01E-06		0.2	0.1	7.68E-06
0.7	0.2	1.00E-05		0.2	0.2	1.54E-05
0.7	0.3	1.50E-05		0.2	0.3	2.30E-05
0.7	0.4	2.00E-05		0.2	0.4	3.07E-05
0.7	0.5	2.50E-05		0.2	0.5	3.84E-05
0.7	0.6	3.01E-05		0.2	0.6	4.61E-05
0.7	0.7	3.51E-05		0.2	0.7	5.38E-05
0.7	0.8	4.01E-05		0.2	0.8	6.15E-05
0.7	0.9	4.51E-05		0.2	0.9	6.91E-05
0.7	1	5.01E-05		0.2	1	7.68E-05
0.7	2	1.00E-04		0.2	2	1.54E-04
0.7	3	1.50E-04		0.2	3	2.30E-04
0.7	4	2.00E-04		0.2	4	3.07E-04
0.7	5	2.50E-04		0.2	5	3.84E-04
0.7	6	3.01E-04		0.2	6	4.61E-04
0.7	7	3.51E-04		0.2	7	5.38E-04
0.7	8	4.01E-04		0.2	8	6.15E-04
0.7	9	4.51E-04		0.2	9	6.91E-04
0.7	10	5.01E-04		0.2	10	7.68E-04
0.6	0.1	5.35E-06		0.1	0.1	8.77E-06
0.6	0.2	1.07E-05		0.1	0.2	1.75E-05
0.6	0.3	1.61E-05		0.1	0.3	2.63E-05
0.6	0.4	2.14E-05		0.1	0.4	3.51E-05
0.6	0.5	2.68E-05		0.1	0.5	4.38E-05
0.6	0.6	3.21E-05		0.1	0.6	5.26E-05
0.6	0.7	3.75E-05		0.1	0.7	6.14E-05

Gap (mm)	Current (A)	B (T)		Gap (mm)	Current (A)	B (T)
0.6	0.8	4.28E-05		0.1	0.8	7.01E-05
0.6	0.9	4.82E-05		0.1	0.9	7.89E-05
0.6	1	5.35E-05		0.1	1	8.77E-05
0.6	2	1.07E-04		0.1	2	1.75E-04
0.6	3	1.61E-04		0.1	3	2.63E-04
0.6	4	2.14E-04		0.1	4	3.51E-04
0.6	5	2.68E-04		0.1	5	4.38E-04
0.6	6	3.21E-04		0.1	6	5.26E-04
0.6	7	3.75E-04		0.1	7	6.14E-04
0.6	8	4.28E-04		0.1	8	7.01E-04
0.6	9	4.82E-04		0.1	9	7.89E-04
0.6	10	5.35E-04		0.1	10	8.77E-04

Πίνακας 3: Τιμές μαγνητικής επαγωγής για διάκενο 1-10mm, ρεύμα 0.1-10A

Gap (mm)	Current (A)	B (T)		Gap (mm)	Current (A)	B (T)
1	0.1	4.23E-06		6	0.1	1.39E-06
1	0.2	8.46E-06		6	0.2	2.79E-06
1	0.3	1.27E-05		6	0.3	4.18E-06
1	0.4	1.69E-05		6	0.4	5.57E-06
1	0.5	2.11E-05		6	0.5	6.96E-06
1	0.6	2.54E-05		6	0.6	8.36E-06
1	0.7	2.96E-05		6	0.7	9.75E-06
1	0.8	3.38E-05		6	0.8	1.11E-05
1	0.9	3.81E-05		6	0.9	1.25E-05
1	1	4.23E-05		6	1	1.39E-05
1	2	8.46E-05		6	2	2.79E-05
1	3	1.27E-04		6	3	4.18E-05
1	4	1.69E-04		6	4	5.57E-05
1	5	2.11E-04		6	5	6.96E-05
1	6	2.54E-04		6	6	8.36E-05
1	7	2.96E-04		6	7	9.75E-05
1	8	3.38E-04		6	8	1.11E-04
1	9	3.81E-04		6	9	1.25E-04
1	10	4.23E-04		6	10	1.39E-04
2	0.1	2.89E-06		7	0.1	1.24E-06
2	0.2	5.78E-06		7	0.2	2.48E-06
2	0.3	8.67E-06		7	0.3	3.72E-06
2	0.4	1.16E-05		7	0.4	4.95E-06
2	0.5	1.44E-05		7	0.5	6.19E-06
2	0.6	1.73E-05		7	0.6	7.43E-06
2	0.7	2.02E-05		7	0.7	8.67E-06

Gap (mm)	Current (A)	B (T)		Gap (mm)	Current (A)	B (T)
2	0.8	2.31E-05		7	0.8	9.91E-06
2	0.9	2.60E-05		7	0.9	1.11E-05
2	1	2.89E-05		7	1	1.24E-05
2	2	5.78E-05		7	2	2.48E-05
2	3	8.67E-05		7	3	3.72E-05
2	4	1.16E-04		7	4	4.95E-05
2	5	1.44E-04		7	5	6.19E-05
2	6	1.73E-04		7	6	7.43E-05
2	7	2.02E-04		7	7	8.67E-05
2	8	2.31E-04		7	8	9.91E-05
2	9	2.60E-04		7	9	1.11E-04
2	10	2.89E-04		7	10	1.24E-04
3	0.1	2.25E-06		8	0.1	1.12E-06
3	0.2	4.50E-06		8	0.2	2.25E-06
3	0.3	6.75E-06		8	0.3	3.37E-06
3	0.4	9.00E-06		8	0.4	4.49E-06
3	0.5	1.12E-05		8	0.5	5.61E-06
3	0.6	1.35E-05		8	0.6	6.74E-06
3	0.7	1.57E-05		8	0.7	7.86E-06
3	0.8	1.80E-05		8	0.8	8.98E-06
3	0.9	2.02E-05		8	0.9	1.01E-05
3	1	2.25E-05		8	1	1.12E-05
3	2	4.50E-05		8	2	2.25E-05
3	3	6.75E-05		8	3	3.37E-05
3	4	9.00E-05		8	4	4.49E-05
3	5	1.12E-04		8	5	5.61E-05
3	6	1.35E-04		8	6	6.74E-05
3	7	1.57E-04		8	7	7.86E-05
3	8	1.80E-04		8	8	8.98E-05
3	9	2.02E-04		8	9	1.01E-04
3	10	2.25E-04		8	10	1.12E-04
4	0.1	1.86E-06		9	0.1	1.03E-06
4	0.2	3.72E-06		9	0.2	2.06E-06
4	0.3	5.57E-06		9	0.3	3.09E-06
4	0.4	7.43E-06		9	0.4	4.12E-06
4	0.5	9.29E-06		9	0.5	5.15E-06
4	0.6	1.11E-05		9	0.6	6.18E-06
4	0.7	1.30E-05		9	0.7	7.21E-06
4	0.8	1.49E-05		9	0.8	8.24E-06
4	0.9	1.67E-05		9	0.9	9.27E-06
4	1	1.86E-05		9	1	1.03E-05
4	2	3.72E-05		9	2	2.06E-05
4	3	5.57E-05		9	3	3.09E-05
4	4	7.43E-05		9	4	4.12E-05
4	5	9.29E-05		9	5	5.15E-05



Gap (mm)	Current (A)	B (T)		Gap (mm)	Current (A)	B (T)
4	6	1.11E-04		9	6	6.18E-05
4	7	1.30E-04		9	7	7.21E-05
4	8	1.49E-04		9	8	8.24E-05
4	9	1.67E-04		9	9	9.27E-05
4	10	1.86E-04		9	10	1.03E-04
5	0.1	1.59E-06		10	0.1	9.53E-07
5	0.2	3.17E-06		10	0.2	1.91E-06
5	0.3	4.76E-06		10	0.3	2.86E-06
5	0.4	6.34E-06		10	0.4	3.81E-06
5	0.5	7.93E-06		10	0.5	4.77E-06
5	0.6	9.51E-06		10	0.6	5.72E-06
5	0.7	1.11E-05		10	0.7	6.67E-06
5	0.8	1.27E-05		10	0.8	7.63E-06
5	0.9	1.43E-05		10	0.9	8.58E-06
5	1	1.59E-05		10	1	9.53E-06
5	2	3.17E-05		10	2	1.91E-05
5	3	4.76E-05		10	3	2.86E-05
5	4	6.34E-05		10	4	3.81E-05
5	5	7.93E-05		10	5	4.77E-05
5	6	9.51E-05		10	6	5.72E-05
5	7	1.11E-04		10	7	6.67E-05
5	8	1.27E-04		10	8	7.63E-05
5	9	1.43E-04		10	9	8.58E-05
5	10	1.59E-04		10	10	9.53E-05



## 6 Βιβλιογραφία

- [1] Μ. Ε. Θεολόγου και Ε. Ν. Πρωτονοτάριος, Μαθήματα Ειδικής Ηλεκτροτεχνίας Γραμμικά Κυκλώματα, Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.
- [2] Ι. Τσαλαμέγκας και Ι. Ρουμελιώτης, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Τόμος Α': Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [3] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [4] Ι. Ρουμελιώτης και Ι. Τσαλαμέγκας, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, Τόμος Β': Στατικά και Μόνιμα Πεδία, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [5] Υ. Zhen, «Current Sensing Circuit Concepts and Fundamentals AN1332,» 30 August 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01332B.pdf>. [Πρόσβαση 11 9 2017].
- [6] Ν. Ι. Θεοδώρου, Ηλεκτρικές Μετρήσεις Τεύχος Ι: Κλασσικές Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2004.
- [7] S. J. Charman , Ηλεκτρικές Μηχανές 4η Έκδοση, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [8] D. P. McNutt και J. Webster, «Current Measurement,» σε *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press, 1999, p. Chapter 38.

- [9] Infineon, «Current Sensing Using Linear Hall Sensors Rev 1.1,» February 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.infineon.com/dgdl/Current\\_Sensing\\_Rev.1.1.pdf?fileId=db3a304332d040720132d939503e5f17](https://www.infineon.com/dgdl/Current_Sensing_Rev.1.1.pdf?fileId=db3a304332d040720132d939503e5f17). [Πρόσβαση 11 9 2017].
- [10] R. S. Popovic, Hall Effect Devices Magnetic Sensors and Characterization of Semiconductors, Adam Hilger, 1991.
- [11] Honeywell, «Hall Effect Sensing and Application,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>. [Πρόσβαση 11 09 2017].
- [12] S. O. Kasap, Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, Δεύτερη Έκδοση, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2004.
- [13] M. J. Caruso, «Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems,» 5 July 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ssec.honeywell.com/position-sensors/datasheets/sae.pdf>. [Πρόσβαση 21 Oct 2012].
- [14] B. Bahreyni και C. Shafai, «A resonant micromachined magnetic field sensor.,» *IEEE Sensor J.*, τόμ. 7, pp. 1326-1334, 2007.
- [15] D. Meeker, «Finite Element Method Magnetics Reference Manual,» 25 October 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>. [Πρόσβαση 11 September 2017].
- [16] Γ. Ε. Πάνος, Στοιχεία Ηλεκτρικών Μετρήσεων, Αθήνα: Κλειδάριθμος, 2001.