



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ  
ΜΑΓΝΗΤΕΣ NdFeB ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαργαρίτα Ε. Δόση

**Επιβλέπων:** Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ  
ΜΑΓΝΗΤΕΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαργαρίτα Ε. Δόση

**Επιβλέπων:** Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9/9/2014.

.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Στέφανος Μανιάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....

Μαργαρίτα Ε. Δόση

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός  
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαργαρίτα Ε. Δόση, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα που μου εμπιστεύτηκε, καθώς και για την καθοδήγησή του και τη συνεργασία κατά τη διάρκεια περάτωσης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μίνωα Μπενιακάρ για τη βοήθεια του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Καμπίτση και στον Τεχνικό κ. Παναγιώτη Ζάννη για την καταλυτική τους βοήθεια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Τέλος, για την αμέριστη συμπαράσταση τους στην προσπάθεια μου και την αξιοθαύμαστη υπομονή τους, ευχαριστώ πάρα πολύ τους φίλους μου Σοφία, Αγνή, Αναστασία, Υρώ, Σωτήρη, Τάσο, Μαριλένα, Σέβο, Μαρία, Λυδία, Ηλία, την οικογένειά μου και τον Κλάιντ.



## Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα των απωλειών δινορρευμάτων σε μόνιμους μαγνήτες. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα πρώτο βήμα σχεδιάζεται ένα κύκλωμα που αποτελείται από ένα σιδηρομαγνητικό πυρήνα και μόνιμους μαγνήτες και υπολογίζονται μέσω προσομοιώσεων οι απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες. Σε ένα δεύτερο βήμα υλοποιείται το μαγνητικό κύκλωμα στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του ΕΜΠ με σκοπό τη πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο.

Αρχικά, πραγματοποιείται αναφορά στις αρχές του Ηλεκτρομαγνητισμού που διέπουν τη λειτουργία των μαγνητικών κυκλωμάτων. Έπειτα πραγματοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση των ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών με έμφαση στην ανάλυση των μαγνητικών ιδιοτήτων των μονίμων μαγνητών. Στη συνέχεια, αναλύονται οι απώλειες πυρήνα και ειδικότερα οι απώλειες δινορρευμάτων, όπου δίνεται και η κλασική αναλυτική λύση.

Με τη βοήθεια των προγραμματιστικών πακέτων Femm και Ansoft Maxwell επιλύεται το πρόβλημα σε δύο και τρεις διαστάσεις, μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και προκύπτουν τα αποτελέσματα σχετικά με τη κατανομή του μαγνητικού πεδίου και τις απώλειες ισχύος στους μαγνήτες. Στο στάδιο αυτό εξετάζεται η επίδραση διεγέρσεων διαφορετικής συχνότητας καθώς και η επίδραση που έχει η κατάτμηση των μαγνητών σε βάθος στις απώλειες δινορρευμάτων.

Ακολουθεί ο πειραματικός προσδιορισμός των απωλειών στους μαγνήτες, με την υλοποίηση του κυκλώματος που έχει σχεδιαστεί. Για την υλοποίηση του κυκλώματος επιλέχθηκαν μαγνήτες NdFeB. Με τη βοήθεια της πειραματικής διαδικασίας επιβεβαιώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

**Λέξεις κλειδιά:** Απώλειες δινορρευμάτων, σιδηρομαγνητικά υλικά, μόνιμοι μαγνήτες NdFeB, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

## Abstract

This study concerns the issue of eddy current losses in permanent magnets. More specifically, in the first place the design of a magnetic circuit consisting of a ferromagnetic core and permanent magnets is performed and eddy current losses in the magnets are calculated via simulations. In a second step the magnetic circuit was implemented in the laboratory of Electrical Machines and Power Electronics of NTUA in order to experimentally validate the results that obtained in the previous step.

Firstly, the principles of Electromagnetics that govern the operation of magnetic circuits are referred. Then, a bibliographic review of the properties of ferromagnetic materials, with emphasis on the analysis of the magnetic properties of permanent magnets, is performed. After that, the core losses and eddy current losses in particular, are analyzed and the classical analytical solution is given.

By using of the programming packages Femm and Ansoft Maxwell, which solve the problem in two and three dimensions, using the finite element method, the effects on the distribution of the magnetic field and power losses on the magnets are extracted. At this stage, the effect of excitations of different frequencies and the effect of the segmentation of the magnets, in depth, in eddy current losses are considered.

Furthermore, the eddy current losses on magnets are experimentally determined, by exploiting the circuit, which was previously designed. For the implementation of the circuit, magnets NdFeB are selected. Using the experimental procedure the accuracy of simulation results is confirmed.

**Keywords:** Eddy current losses, ferromagnetic materials, permanent magnets NdFeB, finite element method



# Περιεχόμενα

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Εισαγωγή.....   | 1  |
| 1.1   | Γενικά στοιχεία .....   | 1  |
| 1.2   | Σκοπός Εργασίας.....  | 2  |
| 1.3   | Δομή Εργασίας .....   | 3  |
| 1.4   | Σημεία καινοτομίας .....  | 3  |
| 2     | Αρχές του Ηλεκτρομαγνητισμού .....  | 5  |
| 2.1   | Το μαγνητικό πεδίο .....  | 5  |
| 2.2   | Δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου.....  | 5  |
| 2.3   | Μαγνητική αντίσταση - Μαγνητικό κύκλωμα.....  | 7  |
| 2.4   | Νόμος του Faraday – Τάση εξ επαγωγής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου..... | 8  |
| 2.5   | Δύναμη εξ επαγωγής σε ρευματοφόρο αγωγό.....  | 10 |
| 2.6   | Τάση εξ επαγωγής στα άκρα αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο .....             | 11 |
| 3     | Μαγνητικά υλικά και Απώλειες πυρήνα .....   | 13 |
| 3.1   | Σιδηρομαγνητισμός .....   | 13 |
| 3.1.1 | Κατηγορίες σιδηρομαγνητικών υλικών .....  | 14 |
| 3.1.2 | Μαγνητική συμπεριφορά σιδηρομαγνητικών υλικών .....                                     | 15 |
| 3.1.3 | Βρόχος μαγνητικής υστέρησης .....   | 16 |
| 3.1.4 | Δομή σιδηρομαγνητικών υλικών .....  | 17 |
| 3.1.5 | Μόνιμοι μαγνήτες.....   | 18 |
| 3.2   | Απώλειες πυρήνα .....   | 22 |
| 3.2.1 | Απώλειες υστέρησης.....   | 23 |
| 3.2.2 | Απώλειες δινορρευμάτων .....  | 23 |
| 4     | Διερεύνηση απωλειών μονίμων μαγνητών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) .....    | 31 |
| 4.1   | Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία .....   | 31 |
| 4.1.1 | Μαγνητοστατικά προβλήματα .....   | 31 |
| 4.1.2 | Οριακές συνθήκες.....   | 32 |
| 4.1.3 | Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).....   | 33 |
| 4.2   | Επιλογή ηλεκτρομαγνητικής διάταξης μέτρησης των απωλειών .....                          | 34 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3   | Επίλυση αρμονικού προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος Femm.....          | 35 |
| 4.3.1 | Ανάλυση χρονομεταβλητών μαγνητικών προβλημάτων.....                           | 36 |
| 4.3.2 | Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....   | 37 |
| 4.4   | Δυναμική επίλυση προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος Ansoft Maxwell..... | 39 |
| 4.4.1 | Ανάλυση χρονομεταβλητών μαγνητικών προβλημάτων.....                           | 40 |
| 4.4.2 | Αποτελέσματα προσομοιώσεων δισδιάστατου μοντέλου.....                         | 40 |
| 4.4.3 | Αποτελέσματα προσομοιώσεων τρισδιάστατου μοντέλου.....                        | 45 |
| 5     | Πειραματική επιβεβαίωση αποτελεσμάτων.....                                    | 51 |
| 5.1   | Κατασκευή πειραματικής διάταξης.....  | 51 |
| 5.2   | Περιγραφή μετρητικής διάταξης και διαδικασίας.....                            | 54 |
| 5.3   | Αποτελέσματα μετρήσεων.....   | 54 |
| 6     | Συμπεράσματα.....   | 65 |
| 6.1   | Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας.....                                      | 65 |
| 6.2   | Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....   | 66 |
| 6.3   | Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.....  | 67 |

## Κατάλογος Σχημάτων

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα 2.1 : Απλός σιδηρομαγνητικός πυρήνας. ....  | 6  |
| Σχήμα 2.2: (α) Απλό ηλεκτρικό κύκλωμα. (β) Το μαγνητικό κύκλωμα που αντιστοιχεί στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή. ....   | 8  |
| Σχήμα 2.3: Ο νόμος του Lenz: (α) Αύξηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του τυλίγματος. (β) Προσδιορισμός της πολικότητας της τάσης στα άκρα του τυλίγματος. ....                               | 9  |
| Σχήμα 2.4: Ρευματοφόρος αγωγός στο εσωτερικό ενός μαγνητικού πεδίου. ....   | 10 |
| Σχήμα 2.5: Αγωγός κινούμενος στο εσωτερικό ενός μαγνητικού πεδίου. ....   | 11 |
| Σχήμα 3.1: Ποιοτικοί βρόχοι υστέρησης μαλακών και σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών. ....   | 14 |
| Σχήμα 3.2: Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού πυρήνα. ....   | 15 |
| Σχήμα 3.3: Βρόχος υστέρησης μαγνητικής ροής στο εσωτερικό πυρήνα στον οποίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα. ....   | 16 |
| Σχήμα 3.4: Μεταβατικό τοίχωμα Bloch που διαχωρίζει δύο περιοχές Weiss με αντίθετη μαγνήτιση. ....   | 17 |
| Σχήμα 3.5: (α) Μαγνητικοί τομείς ενός σιδηρομαγνητικού υλικού τυχαία προσανατολισμένοι. (β) Ευθυγραμμισμένοι μαγνητικοί τομείς μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. ....               | 18 |
| Σχήμα 3.6: Καμπύλες απομαγνήτισης 5 μονίμων μαγνητών. ....  | 19 |
| Σχήμα 3.7: Γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης. ....   | 21 |
| Σχήμα 3.8: Μη γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης. ....  | 21 |
| Σχήμα 3.9: Μετακίνηση σημείου λειτουργίας με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. ....  | 22 |
| Σχήμα 3.10: Μορφή δινορρευμάτων (κλασικό μοντέλο). ....   | 24 |
| Σχήμα 3.11: Βρόχος υστέρησης με (διακεκομμένη γραμμή) και χωρίς την επίδραση των δινορρευμάτων. ....  | 24 |
| Σχήμα 3.12: Δινορρεύματα σε πυρήνα με ελάσματα. ....  | 25 |
| Σχήμα 3.13: Δινορρεύματα σε φύλλο υλικού. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B μεταβάλλεται στη διεύθυνση του μπλε βέλους και τα αντίστοιχα δινορρεύματα περιστρέφονται γύρω από την μαγνητική ροή. .... | 26 |
| Σχήμα 3.14: Επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγό. ....   | 28 |
| Σχήμα 3.15: Καμπύλη βάθους διείσδυσης - συχνότητας σε μαγνήτη NdFeB. ....   | 29 |
| Σχήμα 4.1: Ηλεκτρομαγνητική διάταξη. ....   | 35 |
| Σχήμα 4.2: (α) Σχεδίαση μαγνητικού κυκλώματος στο Femm. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος. ....  | 38 |
| Σχήμα 4.3: Καμπύλη απωλειών - συχνότητας. ....  | 38 |
| Σχήμα 4.4: Κατανομή μαγνητικού πεδίου. (α) Συχνότητα 50 Hz. (β) Συχνότητα 750 Hz. ....  | 39 |
| Σχήμα 4.5: Εξωτερική εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος που χρησιμοποιείται για τη διέγερση των τυλιγμάτων του μαγνητικού κυκλώματος. ....   | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 4.6: Περίπτωση διάταξης με μαγνήτη 5mm, χωρίς διάκενο. (α) Δισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.....                 | 41 |
| Σχήμα 4.7: Περίπτωση διάταξης με μαγνήτη 5mm και διάκενο 1mm. (α) Δισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.....                | 42 |
| Σχήμα 4.8: Καμπύλες απωλειών – συχνότητας στο δισδιάστατο μοντέλο. ....  | 42 |
| Σχήμα 4.9: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με μαγνήτη 5mm, χωρίς διάκενο στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή. ....                         | 43 |
| Σχήμα 4.10: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με μαγνήτη 5mm και διάκενο 1mm στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.....                        | 44 |
| Σχήμα 4.11: Περίπτωση διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, χωρίς διάκενο. (α) Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.....         | 46 |
| Σχήμα 4.12: Περίπτωση διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, με διάκενο 1mm. (α) Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.....        | 46 |
| Σχήμα 4.13: Περίπτωση διάταξης με κατατετμημένους μαγνήτες, χωρίς διάκενο. (α) Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.....  | 47 |
| Σχήμα 4.14: Περίπτωση διάταξης με κατατετμημένους μαγνήτες, με διάκενο 1mm. (α) Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος..... | 47 |
| Σχήμα 4.15: Καμπύλες απωλειών ισχύος – συχνότητας στο τρισδιάστατο μοντέλο.....  | 48 |
| Σχήμα 4.16: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, χωρίς διάκενο στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή. ....                  | 48 |
| Σχήμα 4.17: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, με διάκενο 1mm στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.....                  | 49 |
| Σχήμα 4.18: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με κατατετμημένους μαγνήτες, χωρίς διάκενο στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.....            | 49 |
| Σχήμα 4.19: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με κατατετμημένους μαγνήτες, με διάκενο 1mm στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.....           | 50 |
| Σχήμα 5.1: Λεπτομερές σχέδιο με διαστάσεις για τους μόνιμους μαγνήτες της διάταξης.....  | 51 |
| Σχήμα 5.2: Ο πυρήνας της διάταξης που αποτελείται από λαμαρίνες που έχουν κοπεί από laser CNC.....   | 52 |
| Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπο από τη συναρμολόγηση των πηνίων.....  | 52 |
| Σχήμα 5.4: Τα δύο πηνία της διάταξης που αποτελούνται από 200 σπείρες το καθένα.....   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα 5.5: Το μαγνητικό κύκλωμα χωρίς τους μόνιμους μαγνήτες.....   | 53 |
| Σχήμα 5.6: Χαρακτηριστική καμπύλη B-H σιδηρομαγνητικού πυρήνα.....  | 55 |
| Σχήμα 5.7: 1 <sup>η</sup> περίπτωση διάταξης χωρίς διάκενο και μαγνήτες. Τάση εισόδου (κίτρινη καμπύλη), ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη).....                           | 56 |
| Σχήμα 5.8: 2 <sup>η</sup> περίπτωση διάταξης με διάκενο 6mm, χωρίς μαγνήτες. Τάση εισόδου (κίτρινη καμπύλη), ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη).....                       | 56 |
| Σχήμα 5.9: 3 <sup>η</sup> περίπτωση διάταξης με διάκενο 1mm και μαγνήτες πάχους 5mm. Τάση εισόδου (κίτρινη καμπύλη), ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη).....               | 57 |
| Σχήμα 5.10: Κυματομορφές ισχύος εισόδου στις 3 παραπάνω περιπτώσεις.....  | 58 |
| Σχήμα 5.11: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 50\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).....  | 59 |
| Σχήμα 5.12: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 250\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 60 |
| Σχήμα 5.13: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 500\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 60 |
| Σχήμα 5.14: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 550\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 61 |
| Σχήμα 5.15: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 600\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 61 |
| Σχήμα 5.16: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 625\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 62 |
| Σχήμα 5.17: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 700\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 62 |
| Σχήμα 5.18: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας $f = 750\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη)..... | 63 |
| Σχήμα 5.19: Καμπύλη μεταβολής ισχύος σε σχέση με τη συχνότητα τροφοδοσίας.....  | 63 |



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά στοιχεία

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών χρησιμοποιούνται σε ολοένα και περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ισχύος, από μικρούς κινητήρες της τάξεως των mW έως μηχανές μεγάλης ισχύος της τάξεως των kW. Οι μόνιμοι μαγνήτες σπάνιας γαίας κράματος NdFeB και SmCo χρησιμοποιούνται ακόμα και σε μηχανές ισχύος άνω του 1MW και ουσιαστικά με την εμφάνιση τους ήρθαν να αντικαταστήσουν τους φερρίτες. Οι μηχανές μονίμων μαγνητών εμφανίζουν καλύτερες ιδιότητες από τις μηχανές επαγωγής, αφού συνδυάζουν την υψηλή απόδοση με την απλή κατασκευή και συντήρηση και εμφανίζουν υψηλή ροπή και ισχύ εξόδου.[1]

Η χρήση των μονίμων μαγνητών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη εξαιτίας των ιδιοτήτων τους. Έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν τη μαγνήτιση τους ακόμα και μετά την απομάκρυνση της πηγής, χάρη στην υψηλή απομαγνητίζουσα δύναμη που εμφανίζουν. Επιπλέον δημιουργήσουν μαγνητικό πεδίο χωρίς την εφαρμογή κάποιας εξωτερικής πηγής, ωστόσο εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στην μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας παρουσιάζεται μείωση της παραμένουσας πυκνότητας μαγνητικής ροής και της απομαγνητίζουσας δύναμης της καμπύλης απομαγνήτισης τους. [2]

Στα πλαίσια της εξοικονόμησης ενέργειας, βασικό μέλημα στον κλάδο της σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών είναι η εξασφάλιση υψηλής απόδοσης. Στις μηχανές μονίμων μαγνητών έχουμε το πρόβλημα εμφάνισης υψηλών απωλειών πυρήνα σε σχέση με άλλα είδη ηλεκτρικών μηχανών. Ειδικότερα οι απώλειες στους μαγνήτες λαμβάνονται υπόψη στη περίπτωση των μαγνητικών υλικών με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως στην περίπτωση των μαγνητών NdFeB και SmCo. Καθώς οι απώλειες ισχύος αυξάνονται, η θερμοκρασία αυξάνεται με αποτέλεσμα τη θερμική απομαγνήτιση των μαγνητών, που συνήθως έχει ως συνέπεια τη μείωση της απόδοσης ή ακόμα και τη καταστροφή της εκάστοτε

ηλεκτρομαγνητικής διάταξης. Η οριακή τιμή για την απομαγνήτιση των μαγνητών NdFeB είναι 120°C.

Οι υψηλής απόδοσης μόνιμοι μαγνήτες παρουσιάζουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και ως εκ τούτου τα δινορρεύματα που προκαλούνται από τις αρμονικές χρόνου στα τυλίγματα και στις αύλακες των ηλεκτρικών μηχανών, προκαλούν απώλειες ισχύος μεγάλης κλίμακας. Συχνά, οι μαγνήτες χωρίζονται σε μικρότερα κομμάτια, ώστε να περιοριστεί η ισχύς των δινορρευμάτων. Ωστόσο σε περίπτωση διέγερσης υψηλής συχνότητας, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου, που είναι αποτέλεσμα της παρουσίας δινορρευμάτων, είναι διαφορετική από την επιθυμητή και οι απώλειες αυξάνονται. Επομένως είναι χρήσιμο, οι απώλειες ισχύος στους μόνιμους μαγνήτες να υπολογίζονται εκ των προτέρων. Οι προκαταρκτική αυτή εκτίμηση δίνει τη δυνατότητα κατά τη σχεδίαση, να γίνεται η τροποποίηση των μαγνητικών υλικών, που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κατασκευή των ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων, να καθορίζεται το σχήμα των αυλάκων, το μήκος του διακένου και να υπολογίζονται διάφορες άλλες, χρήσιμες για τη γραμμική λειτουργία της διάταξης, παράμετροι.

Η ερευνητική δραστηριότητα στο τομέα των δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες είναι πολύ έντονη τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τις μεθόδους ανάλυσης οι δημοσιευμένες μελέτες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, την αναλυτική μέθοδο υπολογισμού και την αριθμητική, κυρίως με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων. Η σαφής κατανόηση των απωλειών μόνιμου μαγνήτη και μια απλή και κατανοητή μέθοδο για τον υπολογισμό τους είναι απαραίτητα στοιχεία για τη διαδικασία σχεδιασμού ηλεκτρικών μηχανών. [3]

## 1.2 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να υπολογιστούν οι απώλειες δινορρευμάτων σε NdFeB μόνιμους μαγνήτες που προκαλούνται από τις αρμονικές χρόνου του ρεύματος, σχεδιάζοντας τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα που αναλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη διάρκεια της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά προγραμματιστικά πακέτα, το Femm και το Maxwell. Στη πορεία, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλύονται και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά, με σκοπό την επιβεβαίωση της ακρίβειας που προσφέρουν τα μοντέλα και της επιβεβαίωσης της εξάρτησης των απωλειών από τη μεταβολή της συχνότητας διέγερσης. Εξετάστηκαν περιπτώσεις τροφοδοσίας που αντιστοιχούν στις συνήθεις συχνότητες λειτουργίας των μηχανών μόνιμων μαγνητών. Επιπλέον θεωρήσαμε κατάτμηση των μαγνητών της διάταξης, ώστε να επιβεβαιωθεί η επίδραση που έχει αυτή η διαδικασία στις απώλειες δινορρευμάτων.



### 1.3 Δομή Εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει δύο στάδια και αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται η σχεδίαση του μαγνητικού κυκλώματος και υπολογίζονται οι απώλειες δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες. Στο δεύτερο στάδιο υλοποιείται η επιθυμητή διάταξη και λαμβάνονται μετρήσεις που έχουν στόχο την επιβεβαίωση των θεωρητικών υπολογισμών.

- Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιλαμβάνονται κάποια γενικά στοιχεία σχετικά με τη χρήση των μόνιμων μαγνητών, ο σκοπός της εργασίας, μια σύντομη παρουσίαση του περιεχομένου κάθε κεφαλαίου καθώς και τα σημεία καινοτομίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στο τρόπο δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου και στον ορισμό του μαγνητικού κυκλώματος και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις αρχές με τις οποίες δρουν τα μαγνητικά πεδία.
- Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αρχικά τα σιδηρομαγνητικά υλικά, στα οποία ανήκουν και οι μόνιμοι μαγνήτες και αναφέρονται οι μαγνητικές ιδιότητες αυτών. Έπειτα επεξηγούνται οι απώλειες πυρήνα και ειδικότερα περιγράφεται η προσεγγιστική σχέση για τον αναλυτικό υπολογισμό των απωλειών δινορρευμάτων.
- Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης του επιθυμητού μαγνητικού κυκλώματος με τη βοήθεια δύο προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση του προβλήματος. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και γίνεται επεξεργασία αυτών.
- Στο **πέμπτο κεφάλαιο** επιχειρείται ο πειραματικός προσδιορισμός των απωλειών. Περιγράφονται τα στάδια υλοποίησης της πειραματικής διάταξης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Πραγματοποιείται ακόμα μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών.
- Τέλος στο **έκτο κεφάλαιο** επιχειρείται η ανακεφαλαίωση της εργασίας και συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται τα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της και προτείνονται θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

### 1.4 Σημεία καινοτομίας

Αρχικά επιλέχθηκε ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα για τον υπολογισμό και τη μέτρηση των απωλειών δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες της διάταξης. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν οι παρακάτω τεχνικές:

- Αναπτύχθηκε αναλυτικό μοντέλο της διάταξης του μαγνητικού κυκλώματος μέσω της παραμετροποιημένης σχεδίασης του στα

προγραμματιστικά περιβάλλοντα Femm και Ansoft Maxwell σε δύο διαστάσεις.

- Διερευνήθηκε η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο σιδηρομαγνητικό πυρήνα, που οφείλεται στην υπέρθεση του συνεχούς πεδίου των μαγνητών και του εναλλασσόμενου πεδίου του τυλίγματος διέγερσης. Με τη διερεύνηση αυτή και για την αποφυγή της λειτουργίας του κυκλώματος στη περιοχή κορεσμού του σιδηρομαγνητικού πυρήνα αυξήσαμε το διάκενο της διάταξης επιπλέον κατά 1mm.
- Πραγματοποιήθηκε επιπλέον η κατάτμηση του μαγνήτη με σκοπό τη εξακρίβωση της μείωσης των απωλειών, αν η κατάτμηση αυτή γίνει κάθετα στη μαγνητική ροή. Για την υπόθεση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ansoft Maxwell, που υποστηρίζει τη σχεδίαση σε τρεις διαστάσεις.
- Παράλληλα η διάταξη υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος και προέκυψαν αποτελέσματα για την καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και τις απώλειες ισχύος μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.
- Στη κατασκευή της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκαν δύο συμμετρικά τυλίγματα για την επίτευξη συμμετρικής κατανομής μαγνητικού πεδίου. Η τροφοδοσία της διάταξης πραγματοποιήθηκε αρχικά μέσω αυτομετασχηματιστή και έπειτα με τη σύνδεση του ενός τυλίγματος με γεννήτρια μεταβλητής συχνότητας. Στο δεύτερο τύλιγμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της επαγόμενης τάσης, σύμφωνα με το νόμο του Faraday.
- Επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ως προς τη κλίμακα των απωλειών δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες.

## 2 Αρχές του Ηλεκτρομαγνητισμού

### 2.1 Το μαγνητικό πεδίο

Η δράση των μαγνητικών πεδίων είναι ο βασικός μηχανισμός μετατροπής ενέργειας στους κινητήρες, στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές. Οι αρχές με τις οποίες δρουν τα μαγνητικά πεδία συνοψίζονται στα εξής:

- Ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει γύρω του μαγνητικό πεδίο.
- Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου οι δυναμικές γραμμές διέρχονται μέσα από κάποιο πηνίο (αγωγός σε σπείρες), επάγει τάση στα άκρα του πηνίου. (Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή).
- Σ' ένα ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο εξασκείται μια δύναμη εξ επαγωγής. (Αρχή λειτουργίας κινητήρα).
- Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται κάποια τάση. (Αρχή λειτουργίας γεννήτριας). [4]

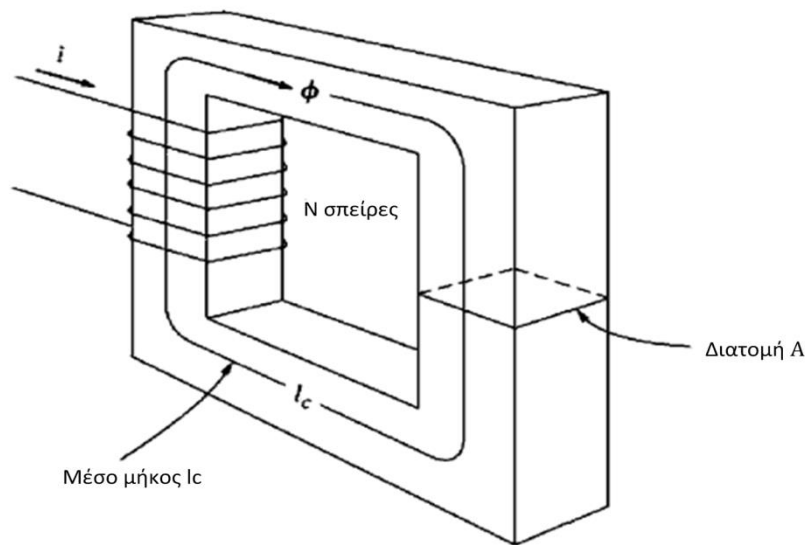
### 2.2 Δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου

Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από ένα ρευματοφόρο αγωγό διέπεται από το νόμο του Ampere:[4]

$$\oint H \cdot dl = I_{net}$$

όπου  $H$  η ένταση (intensity) του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το ρεύμα  $I_{net}$ .

Θεωρούμε μια απλή διάταξη που αποτελείται από ένα αγωγό  $N$  σπειρών, που τροφοδοτείται με ρεύμα, τυλιγμένο σε ένα ορθογώνιο πυρήνα μέσου μήκους  $l_c$ .



**Σχήμα 2.1 : Απλός σιδηρομαγνητικός πυρήνας.**

Η διαδρομή ολοκλήρωσης στο νόμο του Ampere είναι το μέσο μήκος του πυρήνα, αφού το μαγνητικό πεδίο που παράγεται περιορίζεται ουσιαστικά μέσα στον πυρήνα στην περίπτωση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Αντίστοιχα, το ρεύμα  $I_{net}$ , που εμπλέκεται με τη διαδρομή ολοκλήρωσης, είναι ίσο με  $Ni$  (το τύλιγμα συναντάει  $N$  φορές τη διαδρομή ολοκλήρωσης). Επομένως ο νόμος του Ampere γίνεται:

$$Hl_c = Ni$$

Έτσι στο εσωτερικό του πυρήνα το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, που οφείλεται στη διέλευση του ρεύματος, έχει τιμή:

$$H = \frac{Ni}{l_c}$$

Η σχέση που υπάρχει μεταξύ της έντασης του πεδίου  $H$  και της μαγνητικής επαγωγής (flux density) στο εσωτερικό του υλικού δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu H \text{ (Wb/m}^2\text{)}$$

όπου  $B$  η μαγνητική επαγωγή και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του υλικού και εκφράζει τη σχετική ευκολία που παρουσιάζει η ανάπτυξη ενός μαγνητικού πεδίου στο εκάστοτε υλικό.

Ορίζουμε, επιπλέον τη συνολική μαγνητική ροή (flux) σε μια συγκεκριμένη περιοχή, από τη σχέση:

$$\varphi = \int_A B \cdot dA$$

όπου  $dA$  το διαφορικό μιας στοιχειώδους περιοχής της διατομής του πυρήνα. Αν το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής είναι κάθετο στο επίπεδο της διατομής  $A$  του πυρήνα και το μέτρο της είναι σταθερό προκύπτει:

$$\varphi = BA$$

Τελικά η συνολική μαγνητική ροή που προκαλεί το ρεύμα  $i$  στον πυρήνα είναι:

$$\varphi = \frac{\mu NiA}{l_c}$$

### 2.3 Μαγνητική αντίσταση - Μαγνητικό κύκλωμα

Παρατηρώντας τη τελευταία σχέση φαίνεται ότι το ρεύμα του πηνίου στη μια πλευρά του πυρήνα παράγει στο εσωτερικό του μετάλλου κάποια μαγνητική ροή. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε μια αναλογία με τη πηγή τάσης που προκαλεί ροή ρεύματος σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. [5]

Αν θεωρήσουμε λοιπόν ότι η μαγνητική ροή  $\varphi$  είναι ανάλογη του ρεύματος στα ηλεκτρικά κυκλώματα, τότε μπορούμε να πούμε ότι το αντίστοιχο με την τάση μέγεθος που την προκαλεί ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) (magnetomotive force - mmf). Η μαγνητεγερτική δύναμη στο μαγνητικό κύκλωμα ισούται με:

$$F = Ni \text{ (A}\cdot\text{t)}$$

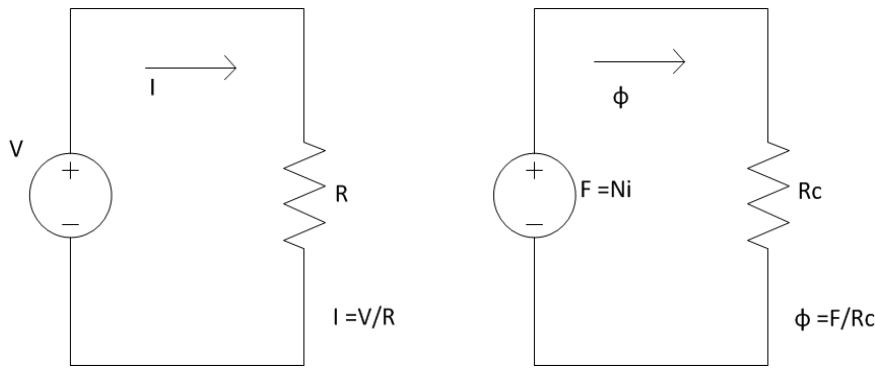
Κατά αντιστοιχία με το ηλεκτρικό κύκλωμα, αποδίδουμε στη μαγνητεγερτική δύναμη του μαγνητικού κυκλώματος μια φορά αναφοράς. Το θετικό άκρο της ΜΕΔ είναι το άκρο από το οποίο εξέρχεται η μαγνητική ροή. Η πολικότητα της ΜΕΔ ενός πηνίου μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού.

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα, ο νόμος του Ohm συνδέει την τάση με το ρεύμα. Όσον αφορά στα μαγνητικά κυκλώματα η σχέση μεταξύ μαγνητεγερτικής δύναμης και μαγνητικής ροής είναι:

$$F = \varphi R_c$$

όπου  $R_c$  η μαγνητική αντίσταση (reluctance) του κυκλώματος, η οποία, από τη σχέση της συνολικής μαγνητικής ροής, προκύπτει:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu A}$$



**Σχήμα 2.2: (α) Απλό ηλεκτρικό κύκλωμα. (β) Το μαγνητικό κύκλωμα που αντιστοιχεί στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή.**

Βέβαια ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής με τη χρήση των μαγνητικών κυκλωμάτων είναι προσεγγιστικός. Αυτό οφείλεται στα εξής:

- Θεωρούμε ότι η μαγνητική ροή είναι συγκεντρωμένη στο εσωτερικό του πυρήνα. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν είναι απόλυτα ορθό καθώς ένα μικρό κλάσμα της ροής ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει, παρά τη μεγαλύτερη μαγνητική του διαπερατότητα. Αυτή η ροή γύρω από τον πυρήνα ονομάζεται ροή διαρροής και επηρεάζει τη σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών.
- Αν υπάρχει διάκενο αέρα στη διαδρομή της μαγνητικής ροής μέσα από τον πυρήνα, η διατομή του διακένου θα πρέπει να θεωρείται μεγαλύτερη από αυτή του πυρήνα, εξαιτίας της θυσάνωσης (fringing effect) του μαγνητικού πεδίου που συμβαίνει στο διάκενο.
- Πρόσθετα σφάλματα προκύπτουν κατά την εμφάνιση ενός μη γραμμικού φαινομένου, στα σιδηρομαγνητικά υλικά όπου η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται από την τιμή της μαγνητικής ροής που αναπτύσσεται στο υλικό.

## 2.4 Νόμος του Faraday – Τάση εξ επαγωγής ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου

Έπειτα από την ανάλυση της δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου, θα εξετάσουμε τους τρόπους με τους οποίους αυτό επιδρά στο περιβάλλον του. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μεγαλύτερη αξία έχει ο νόμος του Faraday, αλλά για λόγους πληρότητας θα αναφέρουμε παρακάτω και τις υπόλοιπες επιδράσεις του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον.[4]

Ο βασικότερος από αυτούς τους τρόπους είναι ο νόμος του Faraday στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία των μετασχηματιστών. Αν μέσα από μια σπείρα ενός

πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται μια τάση  $e_{ind}$  που είναι ανάλογη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο.

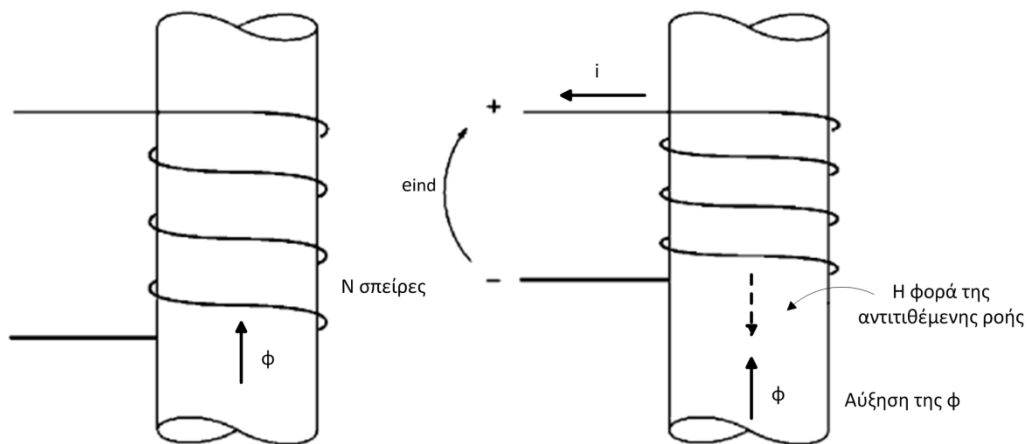
$$e_{ind} = -\frac{d\phi}{dt}$$

όπου  $\phi$  η μαγνητική ροή που περνάει μέσα από μια σπείρα.

Αν θεωρήσουμε πηνίο  $N$  σπειρών και αν μέσα από κάθε σπείρα περνάει η ίδια μαγνητική ροή, η τάση που επάγεται στα άκρα του θα είναι:

$$e_{ind} = -N\frac{d\phi}{dt}$$

Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο νόμο του Lenz. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, η πολικότητα της επαγόμενης τάσης είναι τέτοια ώστε, αν τα άκρα του πηνίου βραχυκυκλωθούν, το παραγόμενο ρεύμα να δημιουργεί μαγνητική ροή που αντιστέκεται στη μεταβολή της αρχικής ροής. Αν η τιμή της μαγνητικής ροής του σχήματος αυξάνεται, τότε η διαφορά δυναμικού που επάγεται στο τύλιγμα τείνει να δημιουργήσει ένα πεδίο με ροή που αντιστέκεται στην αύξηση της αρχικής ροής.



**Σχήμα 2.3: Ο νόμος του Lenz: (α) Αύξηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του τυλίγματος. (β) Προσδιορισμός της πολικότητας της τάσης στα άκρα του τυλίγματος.**

Στην περίπτωση που η ροή διαρροής είναι μεγάλη ή αν επιθυμούμε μεγάλη ακρίβεια, δε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μέσα από κάθε σπείρα περνάει η ίδια μαγνητική ροή. Έτσι, η τάση στα άκρα της  $i$ -οστής σπείρας του πηνίου είναι:

$$e_{ind} = -\frac{d(\phi_i)}{dt}$$

Αν το τύλιγμα αποτελείται από  $N$  σπείρες, η τάση στα άκρα του θα έχει τη τιμή:

$$e_{ind} = -\frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^N \varphi_i \right)$$

όπου  $\lambda = \sum_{i=1}^N \varphi_i$  η πεπλεγμένη ροή (flux linkage) του τυλίγματος.

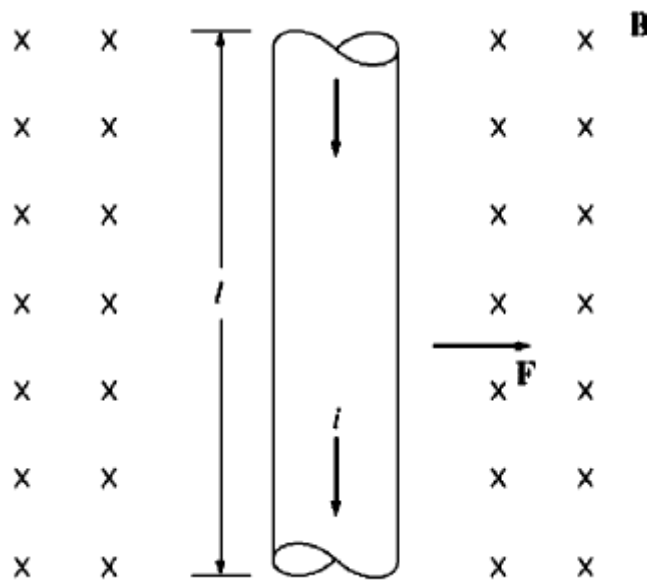
Τελικά, ο νόμος του Faraday γράφεται ως εξής:

$$e_{ind} = -\frac{d\lambda}{dt}$$

Με τη βοήθεια του νόμου του Faraday εξηγούνται οι απώλειες εξαιτίας των δινορρευμάτων, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

## 2.5 Δύναμη εξ επαγωγής σε ρευματοφόρο αγωγό

Η δύναμη εξ επαγωγής ή δύναμη Laplace (induced force) ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου. [4]



**Σχήμα 2.4: Ρευματοφόρος αγωγός στο εσωτερικό ενός μαγνητικού πεδίου.**

Μέσα στο μαγνητικό πεδίο με επαγωγή  $\mathbf{B}$ , με φορά προς το εσωτερικό της σελίδας, βρίσκεται τοποθετημένος ένας αγωγός. Η δύναμη εξ επαγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{F} = i (\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

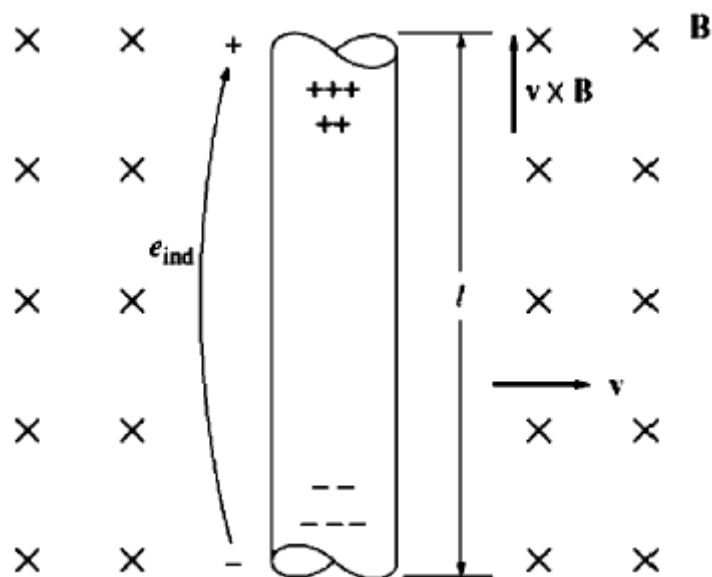
όπου  $i$  η ένταση του ρεύματος,  $\mathbf{l}$  το διάνυσμα με μέτρο το μήκος του αγωγού και φορά αυτή του ρεύματος και  $\mathbf{B}$  το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής.



Η επαγωγή μιας δύναμης σε ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο είναι η βασική αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα.

## 2.6 Τάση εξ επαγωγής στα άκρα αγωγού που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο

Αν ένας αγωγός κινείται με τον κατάλληλο προσανατολισμό μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στα άκρα του επάγεται μια τάση.[4]



**Σχήμα 2.5: Αγωγός κινούμενος στο εσωτερικό ενός μαγνητικού πεδίου.**

Η επαγόμενη τάση στα άκρα του αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

όπου  $\mathbf{v}$  η ταχύτητα του αγωγού,  $\mathbf{B}$  το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής και  $\mathbf{l}$  το διάνυσμα με μέτρο το μήκος του αγωγού, με διεύθυνση την ευθεία που ορίζει ο αγωγός και φορά προς το άκρο που θεωρείται θετικό. Η πολικότητα της τάσης θα είναι τέτοια, ώστε η φορά του διανύσματος  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  να δείχνει επίσης προς το θετικό άκρο του αγωγού.



### 3 Μαγνητικά υλικά και Απώλειες πυρήνα

#### 3.1 Σιδηρομαγνητισμός

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται κατά βάση στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, τόσο του πυρήνα του στάτη όσο και του δρομέα, καθώς και των μετασχηματιστών. Σε τέτοια υλικά όπως σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο και κράματά τους, η μαγνητική τους διαπερατότητα μπορεί να είναι εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μεγαλύτερη του κενού ( $\mu_r \gg 1$ ). Επίσης, εξακολουθούν να παραμένουν μαγνητισμένα και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Τα υλικά κατασκευής του πυρήνα θα πρέπει να εμφανίζουν τις ακόλουθες μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες:

- Υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα, για να έχει χαμηλή μαγνητική αντίδραση το μαγνητικό κύκλωμα.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, ώστε να διέρχεται περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο όγκος και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα για μειωμένες ειδικές απώλειες καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση και μικρή θερμοκρασιακή αύξηση κατά τη λειτουργία. Επίσης, μειώνονται οι απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας και η μέθοδος ψύξης γίνεται απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή. Συνεπώς η επιλογή υλικών χαμηλών απωλειών μειώνει το λειτουργικό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής.

Όσον αφορά στο συμπαγή σίδηρο, η προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητές του:

- Η ηλεκτρική του αντίσταση αυξάνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών δινορρευμάτων
- Η μαγνητική αντίσταση μειώνεται αισθητά

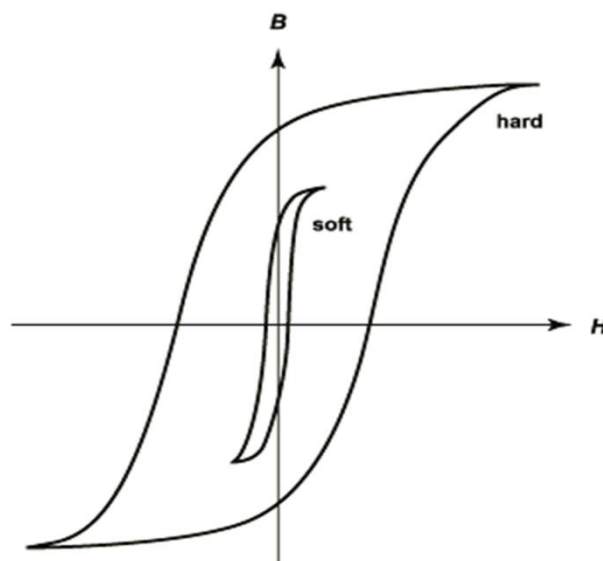
- Βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών χαρακτηριστικών στο χρόνο.

Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου περιορίζεται από το γεγονός ότι ο σίδηρος γίνεται εύθραυστος και υποβαθμίζεται η αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, σημειώνεται μικρή μείωση στην επαγωγή κόρου. Η παρασκευή κράματος σιδήρου-πυριτίου απαιτεί θερμικές και μηχανικές διεργασίες, με συνέπεια το βελτιωμένο υλικό να έχει αυξημένο κόστος.

### 3.1.1 Κατηγορίες σιδηρομαγνητικών υλικών

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή του βρόχου υστέρησης τους:

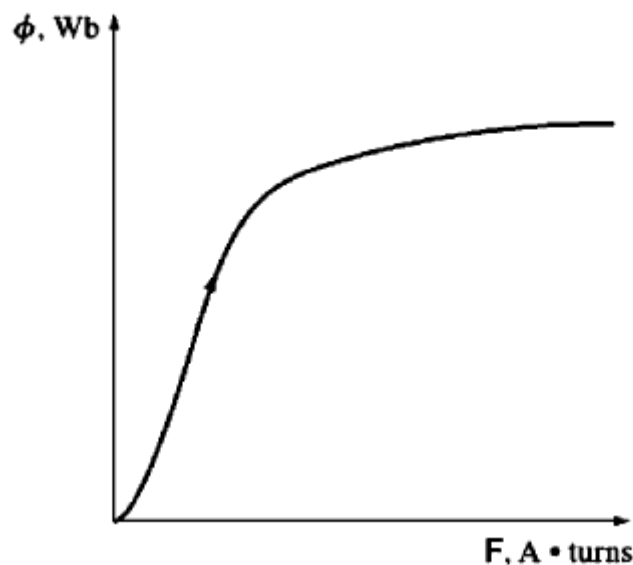
- **Μαλακά** σιδηρομαγνητικά υλικά είναι εκείνα που η κανονική καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, ενώ ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδόν. Εξαιτίας αυτού, οι απώλειες υστέρησης είναι μειωμένες. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας, τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου Perm alloy και άλλα.
- **Σκληρά** σιδηρομαγνητικά υλικά είναι εκείνα που η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν εμφανίζει τόσο μεγάλη κλίση όσο των μαλακών, ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες υστέρησης. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μονίμων μαγνητών, διότι εμφανίζουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση και μεγάλο πεδίο επαναφοράς, ώστε να μην είναι εύκολη η απομαγνήτισή τους.[6]



Σχήμα 3.1: Ποιοτικοί βρόχοι υστέρησης μαλακών και σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών.

### 3.1.2 Μαγνητική συμπεριφορά σιδηρομαγνητικών υλικών

Εφαρμόζουμε αρχικά σε έναν απλό σιδηρομαγνητικό πυρήνα, όπως αυτόν που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, συνεχές ρεύμα, με μηδενική αρχική τιμή. Στη συνέχεια μεταβάλλουμε τη τιμή αυτή, αργά, μέχρι κάποιο επιθυμητό επίπεδο. Η μαγνητική ροή που παράγεται ως προς την εφαρμοζόμενη μαγνητεγερτική, προκύπτει η παρακάτω καμπύλη, που ονομάζεται καμπύλη κορεσμού ή καμπύλη κορεσμού ή καμπύλη μαγνήτισης (saturation - magnetization curve).[4]



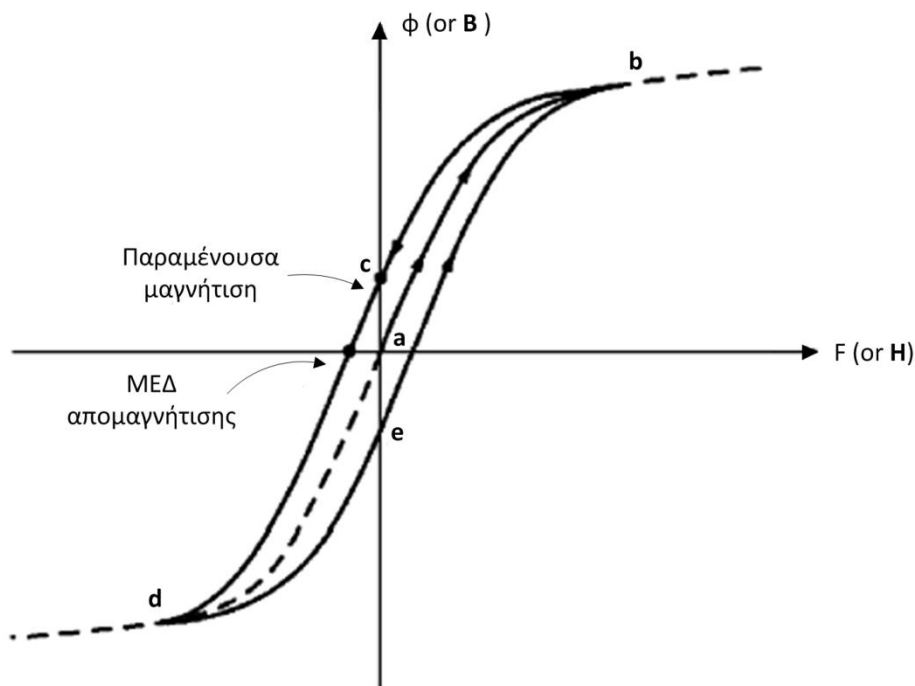
**Σχήμα 3.2: Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού πυρήνα.**

Στην αρχή παρατηρούμε πως μια μικρή αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί τεράστια αύξηση στη μαγνητική ροή. Μετά όμως από ένα συγκεκριμένο σημείο η επιπλέον αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης προκαλεί σχετικά μικρότερη αύξηση στη μαγνητική ροή. Τελικά ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης δε μεταβάλλει σχεδόν καθόλου τη μαγνητική ροή. Η περιοχή στην οποία η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια ονομάζεται περιοχή κορεσμού (saturation region) και ο πυρήνας λέγεται κορεσμένος. Αντίθετα η περιοχή όπου η μαγνητική ροή μεταβάλλεται πολύ γρήγορα ονομάζεται ακόρεστη περιοχή (unsaturated region). Η περιοχή μετάβασης μεταξύ των δύο παραπάνω περιοχών ονομάζεται “γόνατο” της καμπύλης. Αντίστοιχη είναι και η καμπύλη μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του πεδίου.

Από την καμπύλη μαγνήτισης προκύπτει πως η διαπερατότητα είναι μεγάλη και σχετικά σταθερή στην ακόρεστη περιοχή, ενώ μειώνεται βαθμιαία προς μια πολύ μικρή τιμή καθώς ο πυρήνας οδηγείται στον κορεσμό.

### 3.1.3 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης

Στην περίπτωση που εφαρμοστεί στο τύλιγμα ενός πυρήνα εναλλασσόμενο ρεύμα προκύπτει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Θεωρούμε αρχική μαγνητική ροή στον πυρήνα μηδενική. Καθώς το ρεύμα αυξάνεται για πρώτη φορά, η μαγνητική ροή ακολουθεί τη διαδρομή  $ab$ , που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, που ουσιαστικά περιλαμβάνει τη καμπύλη μαγνήτισης. Όμως, κατά τη μείωση του ρεύματος η διαδρομή της μεταβολής της μαγνητικής ροής είναι διαφορετική απ' αυτή που ακολουθήθηκε κατά την αύξηση του ρεύματος. Καθώς μειώνεται το ρεύμα, η διαδρομή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα είναι η  $bcd$ , ενώ σε μια επόμενη αύξηση του ρεύματος, η διαδρομή είναι η  $deb$ .



**Σχήμα 3.3: Βρόχος υστέρησης μαγνητικής ροής στο εσωτερικό πυρήνα στον οποίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα.**

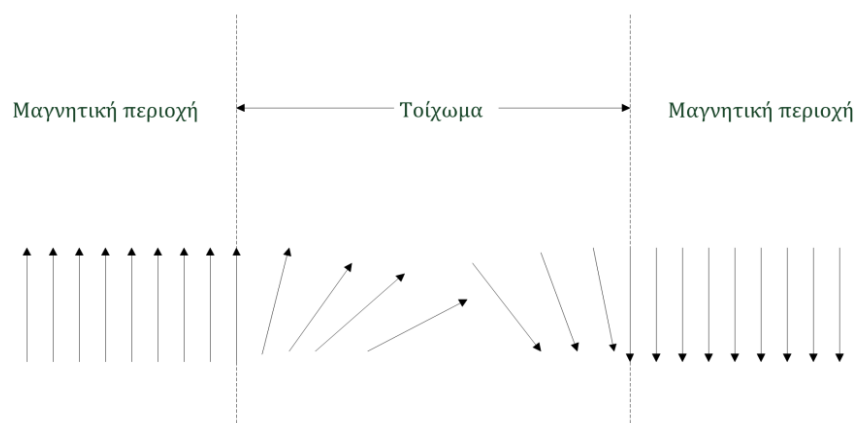
Επομένως προκύπτει ότι η μαγνητική ροή στον πυρήνα δεν εξαρτάται μόνο από τη τιμή του ρεύματος αλλά και από την προϊστορία της. Το γεγονός αυτό καθώς και η απόκλιση της ροής από την αρχική διαδρομή, αποτελούν το φαινόμενο που ονομάζεται υστέρηση (hysteresis) και η διαδρομή  $bcdeb$  ονομάζεται βρόχος υστέρησης.

Αν εφαρμοστεί στον πυρήνα μια μαγνητεγερτική δύναμη με μεγάλη τιμή και κατόπιν αυτή απομακρυνθεί, η διαδρομή της μαγνητικής ροής θα είναι η  $abc$ , άρα η ροή δε θα μηδενιστεί. Έτσι θα παραμένει στον πυρήνα ένα κάποιο μαγνητικό πεδίο και η αντίστοιχη ροή του πεδίου αυτού ονομάζεται παραμένουσα μαγνητική ροή (residual flux). Με αυτό τον τρόπο

κατασκευάζονται οι μόνιμοι μαγνήτες. Τελικά στη περίπτωση που πρέπει να μηδενιστεί η μαγνητική ροή, είναι αναγκαίο να εφαρμοστεί μια μαγνητεγερτική δύναμη αντίθετης πολικότητας, που ονομάζεται απομαγνητίζουσα δύναμη (coercive force).

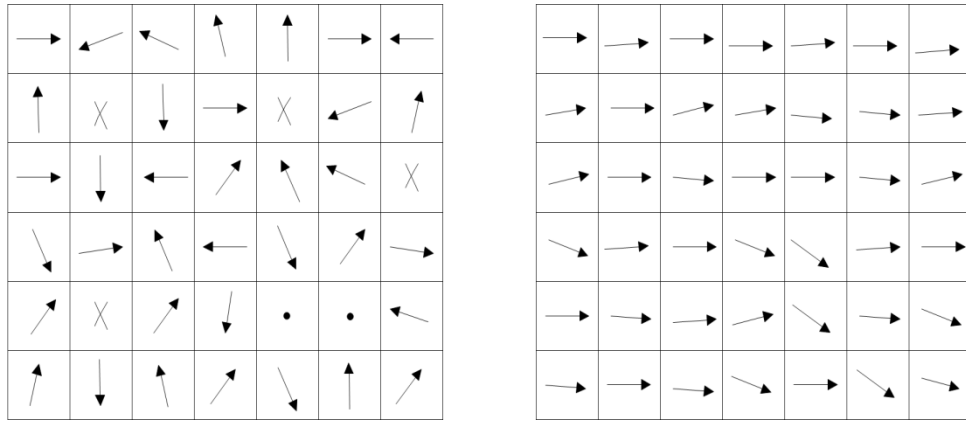
### 3.1.4 Δομή σιδηρομαγνητικών υλικών

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά οφείλουν τις ιδιότητες τους στις στοιχειώδεις μαγνητικές περιοχές τους, γνωστές και ως περιοχές Weiss. Αυτές οι περιοχές έχουν ομοιόμορφη μαγνήτιση, δηλαδή τα spin των ατόμων τους έχουν την τάση να ευθυγραμμίζονται προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτές οι περιοχές διαχωρίζονται από τις γειτονικές τους μέσω των λεγόμενων τοιχωμάτων Bloch, τα οποία είναι μεταβατικές περιοχές στα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών. [6]



**Σχήμα 3.4: Μεταβατικό τοίχωμα Bloch που διαχωρίζει δύο περιοχές Weiss με αντίθετη μαγνήτιση.**

Σε απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οι περιοχές Weiss, είναι τυχαία διατεταγμένες στο χώρο, δηλαδή η κατεύθυνση της μαγνήτισης κάθε περιοχής Weiss είναι τυχαία. Όταν όμως επιβληθεί εξωτερικό, συνεχώς αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο σε σιδηρομαγνητικό υλικό, τότε παρουσιάζεται τάση για ομοιόμορφο προσανατολισμό των περιοχών Weiss.



**Σχήμα 3.5: (α) Μαγνητικοί τομείς ενός σιδηρομαγνητικού υλικού τυχαία προσανατολισμένοι. (β) Ευθυγραμμισμένοι μαγνητικοί τομείς μετά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.**

Η μαγνήτιση λαμβάνει χώρα σε τρεις φάσεις, οι οποίες διακρίνονται στη καμπύλη κορεσμού ή καμπύλη μαγνήτισης (saturation - magnetization curve). Στην πρώτη φάση (για σχετικά χαμηλές τιμές εξωτερικού πεδίου), οι αλλαγές είναι αντιστρεπτές, δηλαδή αρχικά μεν αρκετές περιοχές Weiss ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό πεδίο, αλλά μετά την απομάκρυνσή του, οι περιοχές αυτές επανέρχονται στον πρότερο προσανατολισμό τους. Στη δεύτερη φάση (για μέτριες τιμές μαγνητικού πεδίου), πολλές περιοχές Weiss ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό πεδίο και δεν επιστρέφουν στη θέση ηρεμίας τους μετά την απομάκρυνση του πεδίου. Τέλος, στην τρίτη φάση (για μεγάλες τιμές μαγνητικού πεδίου), όλες οι περιοχές Weiss ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο, και συνεπώς φθάνουμε στον κορεσμό του σιδηρομαγνητικού υλικού.

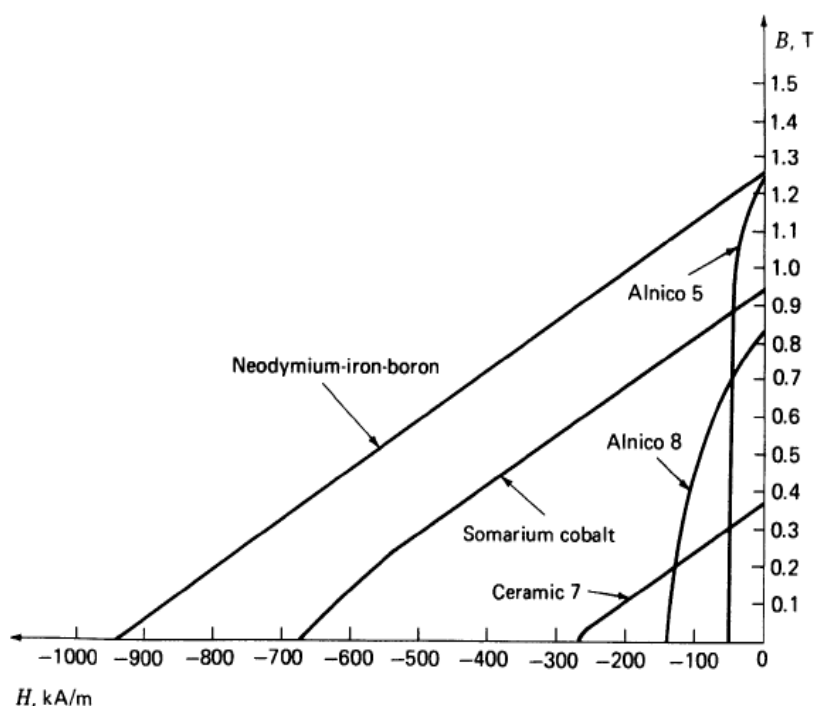
Οι δύο τελευταίες φάσεις είναι μη αντιστρεπτές εκτός από την περίπτωση που το υλικό θερμανθεί πέρα από τη θερμοκρασία Curie ή υποστεί ισχυρό μηχανικό σοκ. Η θερμοκρασία Curie ορίζεται σαν η κρίσιμη θερμοκρασία πέραν της οποίας ένα σιδηρομαγνητικό υλικό χάνει το μαγνητισμό του. Έτσι, επανέρχεται η τυχαία κατανομή των στοιχειωδών προσανατολισμών στις περιοχές Weiss. Σε αντίθετη περίπτωση το κομμάτι του μετάλλου γίνεται ένας μόνιμος μαγνήτης.

### 3.1.5 Μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά και τείνουν να διατηρούν τη μαγνήτισή τους ακόμα και με την απουσία μαγνητικού πεδίου. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου σε πλήθος ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών, όπως στις σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών. Τα χαρακτηριστικά των μόνιμων μαγνητών προκύπτουν από τη μελέτη της καμπύλης απομαγνήτισης, που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο



του βρόχου υστέρησης. Ο βρόχος υστέρησης ενός μόνιμου μαγνήτη έχει μεγάλο εύρος και αρκετά υψηλό πεδίο επαναφοράς. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνονται οι καμπύλες απομαγνήτισης πέντε πιο διαδεδομένων μονίμων μαγνητών.[7]



Σχήμα 3.6: Καμπύλες απομαγνήτισης 5 μονίμων μαγνητών.

Ένα μειονέκτημα που συνδέεται με τη χρήση μονίμων μαγνητών είναι η σταθερή τιμή μαγνήτισής τους, με συνέπεια αδυναμία μεταβολής της διέγερσης. Επιπροσθέτως, υπάρχει κίνδυνος απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών λόγω επιβολής ισχυρού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου αντίθετης πολικότητας, πολύ υψηλής θερμοκρασίας ή έπειτα από έντονη μηχανική καταπόνηση. Παρόλα αυτά η χρήση τους διαδίδεται όλο και περισσότερο, ιδιαίτέρως λόγω της ανακάλυψης του κράματος NdFeB, που ήρθε να αντικαταστήσει το ακριβότερο SmCo. Στην παρούσα εργασία και για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε κράμα NdFeB.

- **SmCo**

Το Σαμάριο-Κοβάλτιο είναι ένας τύπος υλικού μαγνητών σπάνιας γης, ιδιαίτερα ανθεκτικό στην οξείδωση και στην απομαγνήτιση σε σύγκριση με τους μαγνήτες Alnico και φερρίτη. Εισήχθη στην αγορά στη δεκαετία του '70, και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα. Οι μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες: Sm<sub>1</sub>Co<sub>5</sub> και Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> (συνήθως αναφέρονται ως 1-5 και 2-17). Η ενέργεια για την ομάδα 1-5 κυμαίνεται από 15 έως 22 MGOe, ενώ για την 2-17 κυμαίνεται από 22 έως και 32 MGOe. Αυτοί οι μαγνήτες είναι οι ανθεκτικότεροι στη θερμοκρασία ανάμεσα σε όλους τους τύπους μαγνητών σπάνιας γης και μπορούν να αντέξουν σε θερμοκρασίες μέχρι 300°C. Οι μαγνήτες

σαμαρίου-κοβαλτίου είναι εύθραυστοι και επιρρεπείς σε ραγίσματα και μπορούν να σπάσουν όταν εκτίθενται σε μεγάλη θερμική μεταβολή. Λόγω του υψηλού κόστους του σαμαρίου, μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου χρησιμοποιούνται για τις εφαρμογές όπου η εφαρμογή απαιτεί υψηλή θερμοκρασία ή/και αντοχή στη διάβρωση.

- **NdFeB**

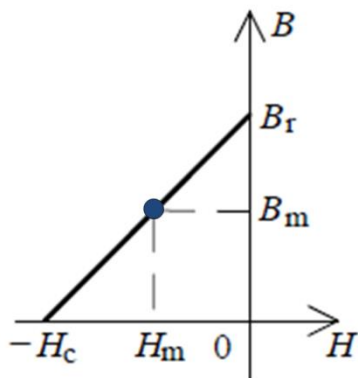
Οι μαγνήτες νεοδυμίου είναι ένας ακόμα τύπος μαγνητών σπάνιας Γής. Αυτό το υλικό έχει τις παρόμοιες ιδιότητες με το Σαμάριο-Κοβάλτιο, όμως οξειδώνεται ευκολότερα και γενικά δεν έχει την ίδια αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι μαγνήτες NdFeB έχουν επίσης το υψηλότερο ενεργειακό προϊόν που πλησιάζει τα 50MGOe. Το υψηλό κόστος των μαγνητών νεοδυμίου τους καθιστούσε μέχρι πριν από λίγα χρόνια, επιλογή για ειδικές εφαρμογές μόνο. Σήμερα το κόστος των μαγνητών νεοδυμίου έχει ελαττωθεί σημαντικά σε σύγκριση με την προηγούμενη δεκαετία, καθιστώντας τον ως βασική επιλογή στην κατασκευή μηχανών μόνιμου μαγνήτη. Ωστόσο το κόστος αυτό αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά την εδραίωση ή μη, αυτών των μηχανών, ως την επικρατούσα τεχνολογία στα κινητήρια συστήματα. Οι μαγνήτες NdFeB είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στη διάβρωση. Οι επεξεργασίες επιφάνειας έχουν αναπτυχθεί επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες εφαρμογές. Συνήθη υλικά επικάλυψης των μαγνητών είναι ο χρυσός, το νικέλιο, ο ψευδάργυρος και κασσίτερος και η επίστρωση εποξικής ρητίνης.

### 3.1.5.1 Μαγνητικές ιδιότητες

Θεωρούμε μόνιμο μαγνήτη διατομής  $A_m$  και μήκους  $l_m$ . Η καμπύλη απομαγνήτισης είναι γραμμική, όπου διακρίνουμε την απομαγνητίζουσα δύναμη  $H_c$  και τη παραμένουσας μαγνήτισης  $B_r$ . Είναι επιθυμητό οι μόνιμοι μαγνήτες να έχουν μεγάλες τιμές παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής  $B_r$  καθώς και απομαγνητίζουσας δύναμης  $H_c$ , για να μην απομαγνητίζονται εύκολα. Επιπλέον η καμπύλη απομαγνήτισης μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$B_m = \frac{B_r}{H_c} (H_m + H_c) = \mu_m (H_m + H_c)$$

όπου  $\mu_m = \frac{B_r}{H_c}$  η μαγνητική διαπερατότητα του μόνιμου μαγνήτη, που προσεγγίζει τη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού. Οι μαγνήτες κράματος NdFeB έχουν μαγνητική διαπερατότητα ίση με 1.05 της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού.

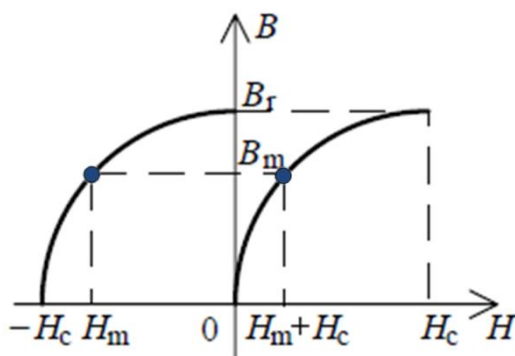


**Σχήμα 3.7: Γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης.**

Ένα ακόμα σημείο της καμπύλης, χρήσιμο να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση είναι η μέγιστη τιμή της ενέργειας του μαγνήτη,  $BH_{max}$ . Το σημείο της καμπύλης απομαγνήτισης στην οποία λειτουργεί ο μαγνήτης καθορίζεται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και τη γεωμετρία του χώρου. Η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ενέργειας δίνει τη βέλτιστη αξιοποίηση του μόνιμου μαγνήτη, ειδικά στη περίπτωση που επιδιώκουμε ελαχιστοποίηση του όγκου του.

Στη περίπτωση, που η καμπύλη απομαγνήτισης είναι μη γραμμική η μαγνητική διαπερατότητα προκύπτει από τη σχέση:

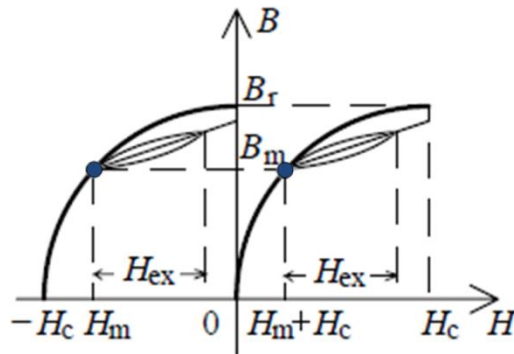
$$\mu_m = \frac{B_m}{H_c}$$



**Σχήμα 3.8: Μη γραμμική καμπύλη απομαγνήτισης.**

Στην περίπτωση μη γραμμικής καμπύλης απομαγνήτισης, αν εφαρμοστεί ένα ασθενές περιοδικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο το σημείο λειτουργίας δε θα μετακινηθεί κατά μήκος της καμπύλης απομαγνήτισης. Αντίθετα, θα κινηθεί κατά μήκος ενός πολύ μικρού βρόχου στο εσωτερικό της καμπύλης

απομαγνήτισης ή μιας γραμμής που διέρχεται από το κέντρο ενός τέτοιου βρόχου όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



**Σχήμα 3.9: Μετακίνηση σημείου λειτουργίας με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.**

### 3.2 Απώλειες πυρήνα

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στην περίπτωση που επιβληθεί χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, τότε μετά την αρχική μαγνήτιση, η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται κυκλικά στο υλικό, αφού η Μαγνητεγερτική Δύναμη (ΜΕΔ) που το διεγείρει μεταβάλλεται με την ίδια συχνότητα. Το αποτέλεσμα είναι, για την ίδια επιβαλλόμενη ΜΕΔ στο υλικό να εμφανίζονται δύο πιθανές μαγνητικές επαγωγές, ανάλογα με την πρότερη ιστορία μαγνήτισης.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση απωλειών ενέργειας υπό μορφή θερμότητας στο υλικό, οι οποίες είναι ανάλογες προς το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης.

Επίσης, παράλληλα με την υστέρηση, παρουσιάζεται και ένα ακόμα φαινόμενο στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν διεγείρονται με εναλλασσόμενη ΜΕΔ. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, εναλλασσόμενη ροή προκαλεί τάσεις εξ επαγωγής στη μάζα του υλικού, και αφού τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι καλοί αγωγοί του ρεύματος, επάγονται αντίστοιχα δινορρεύματα, διανεμημένα σε όλη τη μάζα του υλικού. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες Joule (της μορφής  $ri^2$ ), και το άθροισμά τους με τις απώλειες από υστέρηση αποτελούν τις δύο βασικές συνιστώσες των απωλειών πυρήνα και όπως θα αποδειχθεί παρακάτω προκύπτουν από τη σχέση:

$$W_t = k_h f (B_{max})^n + k_e (f B_{max})^2$$

Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε ιδιαιτέρως με τις απώλειες δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας, θα αναφερθούμε και στις απώλειες υστέρησης.

### 3.2.1 Απώλειες υστέρησης

Η ύπαρξη των απωλειών υστέρησης οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το μέσο στο οποίο αναπτύσσεται μαγνητικό πεδίο. Εάν το μέσο είναι οτιδήποτε άλλο εκτός του κενού, μέρος μόνο της ενέργειας που λαμβάνεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα διέγερσης αποθηκεύεται σε αυτό. Το μέρος αυτό είναι ανακτήσιμο από το μέσο όταν η ΜΕΔ διέγερσης αφαιρεθεί. Το υπόλοιπο της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα ως αποτέλεσμα έργου που εκτελείται στο υλικό του μέσου κατά τη διάρκεια της απόκρισής του στην μαγνήτιση.

Καθώς έχουμε ήδη περιγράψει το μηχανισμό δημιουργίας του βρόχου υστέρησης, το εμβαδόν του βρόχου είναι οι απώλειες ισχύος, γνωστές ως απώλειες υστέρησης και υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{hyst} = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} \quad (\text{J/m}^3)$$

Η ενέργεια αυτή χάνεται ως θερμότητα στο υλικό σε κάθε κύκλο. Η παρουσία της υστέρησης εξασκεί σημαντική επιρροή στην απόδοση, στην ανύψωση θερμοκρασίας και συνεπώς στις απαιτήσεις ψύξης και απαγωγής της θερμότητας των ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων που αποτελούνται από σιδηρομαγνητικά υλικά.

Για μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή μετασχηματιστών και ηλεκτρικών μηχανών ορίζουμε προσεγγιστικά τις απώλειες υστέρησης:

$$P_{hyst} = k_h f (B_{max})^n \quad (\text{W})$$

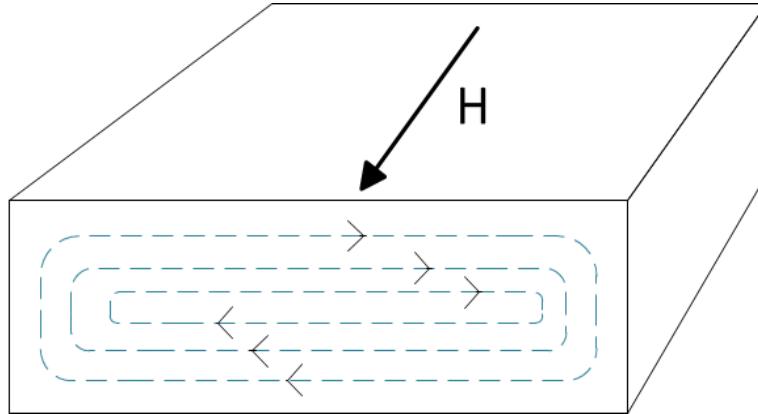
όπου  $k_h$  μια σταθερά που εξαρτάται από το σιδηρομαγνητικό υλικό,  $f$  η συχνότητα του πεδίου διέγερσης,  $B_{max}$  η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής και  $n$  μια σταθερά που λαμβάνει τιμές μεταξύ 1.5 και 2.5.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ανάλυση έγινε με βάση την υπόθεση ότι στο σιδηρομαγνητικό υλικό οι βρόχοι υστέρησης είναι συμμετρικοί, με την πυκνότητα ροής  $B$  να μεταβάλλεται μεταξύ ίσων θετικών και αρνητικών τιμών, και στους οποίους δεν υφίστανται τοπικά επανεισερχόμενοι τοπικοί βρόχοι.

### 3.2.2 Απώλειες δινορρευμάτων

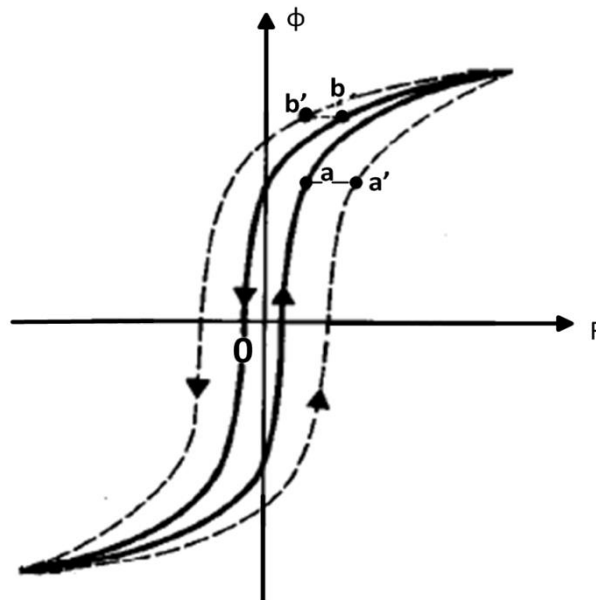
Στην περίπτωση της επιβολής εναλλασσόμενης ροής σε μαγνητικό υλικό, εμφανίζονται τάσεις εξ επαγωγής με βάση το νόμο επαγωγής του Faraday. Έτσι, επάγονται αντίστοιχα και ρεύματα, εφόσον το μαγνητικό υλικό είναι αγωγίμο. Αυτά τα ρεύματα έχουν την τάση να αντιστέκονται στις μεταβολές της ροής. Σε συμπαγή αντικείμενα, τα δινορρευμάτα είναι ικανά μεγάλα ώστε να περιορίζουν σημαντικά τη ροή που διαπερνά το υλικό, με αποτέλεσμα τις απώλειες ισχύος, γνωστές ως απώλειες δινορρευμάτων. Η ονομασία τους προέρχεται από τους

σχηματισμούς της διαδρομής τους στο υλικό που θυμίζει τις δίνες που προκαλούνται στην επιφάνεια ενός υγρού ύστερα από μια διαταραχή. Η μορφή των δινορρευμάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:[7]



**Σχήμα 3.10: Μορφή δινορρευμάτων (κλασσικό μοντέλο).**

Επιπλέον τα δινορρεύματα επιδρούν και στο βρόχο υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού. Ανάλογα με το πλάτος των ρευμάτων αυτών το εμβαδό της καμπύλης και κατά συνέπεια απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για την απομαγνήτιση του υλικού.



**Σχήμα 3.11: Βρόχος υστέρησης με (διακεκομμένη γραμμή) και χωρίς την επίδραση των δινορρευμάτων.**

Στην παρούσα διπλωματική ενδιαφερόμαστε κυρίως για τις απώλειες δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες. Καθώς αυξάνονται τα δινορρεύματα μέσα στο μαγνήτη, η θερμοκρασία του μαγνήτη αυξάνεται τόσο, ώστε ο κίνδυνος θερμικής απομαγνήτισης αυτού να είναι μεγάλος. Αυτό είναι και ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν οι σχεδιαστές σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών.

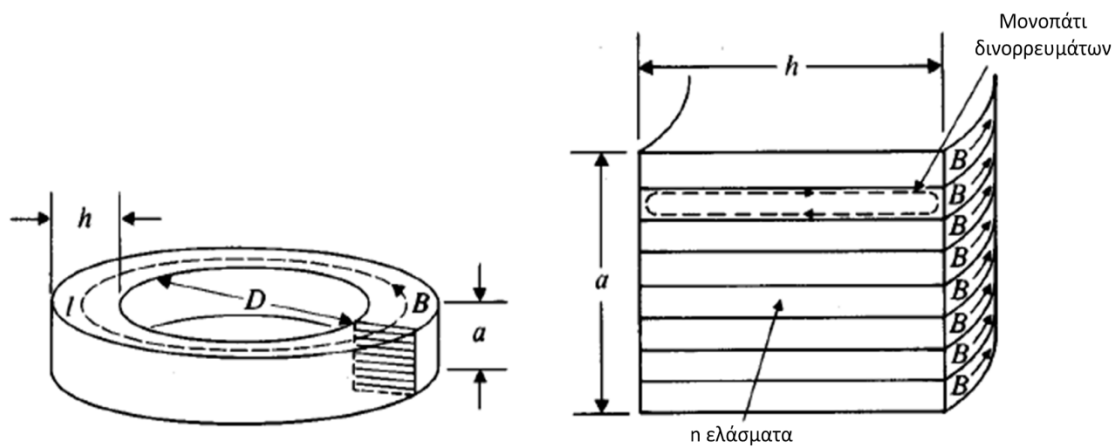
Στην περίπτωση ημιτονοειδούς διέγερσης, ο μέσος όρος απωλειών δινορρευμάτων μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$P_{eddy} = k_e (f B_{max})^2 \text{ (W/kg)}$$

όπου  $k_e$  μια σταθερά που εξαρτάται από τη φύση και τις διαστάσεις του σιδηρομαγνητικού υλικού.

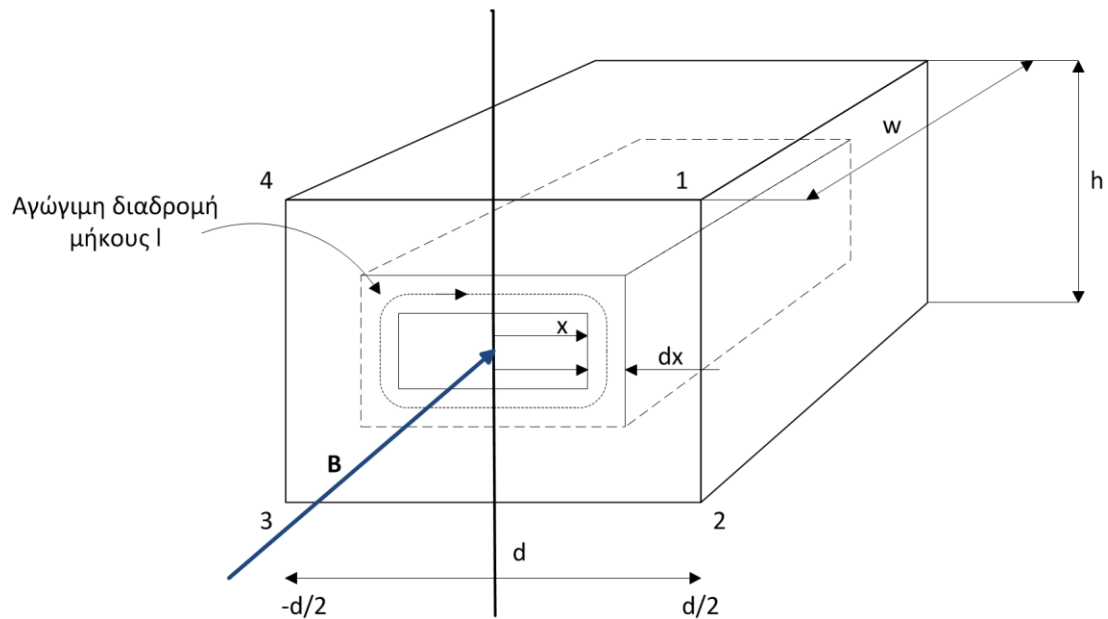
Η επιρροή των δινορρευμάτων περιορίζεται χρησιμοποιώντας υψηλής αντίστασης νοθεύσεις, όπως προσθήκη Si, αντί για συμπαγή σιδηρομαγνητικά υλικά. Ωστόσο μεγάλες ποσότητες νόθευσης μπορεί να μετατρέψουν το υλικό σε εύθραυστο.

Ένας εναλλακτικός και πιο διαδεδομένος τρόπος περιορισμού της επίδρασης των δινορρευμάτων είναι η χρήση λαμαρινών (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού), ενίοτε απομονωμένα μεταξύ τους με μονωτικό υλικό. Με τον τρόπο αυτό τα δινορρεύματα ακολουθούν μικρότερη διαδρομή μέσα στο υλικό.



**Σχήμα 3.12: Δινορρεύματα σε πυρήνα με ελάσματα.**

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα δινορρεύματα και να τα μελετήσουμε πιο αναλυτικά, θεωρούμε το παράδειγμα ενός λεπτού φύλλου σιδηρομαγνητικού υλικού, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 3.13: Δινορρεύματα σε φύλλο υλικού. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  μεταβάλλεται στη διεύθυνση του μπλε βέλους και τα αντίστοιχα δινορρεύματα περιστρέφονται γύρω από την μαγνητική ροή.**

Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα ροής μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο, όπως συμβαίνει συνήθως στις ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις, δηλαδή:  $|B| = B_{max} \cos \omega t$ . Τότε η ροή που διαπερνά την περιοχή 12341 θα έχει σαν μέγιστο:

$$\varphi_{max} = 2 h x B_{max}$$

όπου  $h$  η διάσταση του φύλλου κάθετα στη διεύθυνση της ροής και  $x$  η απόσταση από τον άξονα της διατομής του φύλλου.

Επίσης, αφού πρόκειται περί λεπτού φύλλου  $d \ll h$ , έχουμε από το νόμο εξ επαγωγής του Faraday ( $e_{ind} = -\frac{d\varphi}{dt}$ ) για την rms τιμή της επαγόμενης τάσης στην διαδρομή 12341:

$$E_{rms} = \frac{\omega B_{max}}{\sqrt{2}} 2 h x$$

Η αντίσταση της προαναφερθείσας διαδρομής εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του υλικού  $\rho$ , το μήκος της διαδρομής  $l$ , και το εμβαδόν  $S$ . Το φύλλο όμως είναι λεπτό ( $x \ll h$ ) και έτσι έχουμε για την αντίσταση της διαδρομής:

$$R = \frac{\rho l}{S} \approx \frac{2h\rho}{w dx}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, λαμβάνουμε για το ρεύμα στη διαδρομή αυτή:

$$dI = \frac{E_{rms}}{R} = \frac{\omega B_{max} w x dx}{\sqrt{2} \rho}$$



Αντίστοιχα το διαφορικό των απωλειών είναι:

$$dP_{eddy} = E_{rms} dI = \frac{(\omega B_{max})^2 whx^2 dx}{\rho}$$

Και ολοκληρώνοντας για να λάβουμε τις ολικές απώλειες από δινορρέυματα στο υλικό:

$$\begin{aligned} P_{eddy} &= \int_{-d/2}^{d/2} dP_{eddy} = \frac{(\omega B_{max})^2 wh}{\rho} \int_{-d/2}^{d/2} x^2 dx = \\ &= \frac{(whd) \omega^2 d^2 (B_{max})^2}{12\rho} = \frac{V \omega^2 d^2 (B_{max})^2}{12\rho} \end{aligned}$$

όπου  $V$  ο όγκος του φύλλου.

Η παραπάνω εξίσωση μας δίνει ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την φύση των απωλειών από δινορρέυματα. Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες με το τετράγωνο της συχνότητας της μεταβολής της ροής, το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος και το τετράγωνο του πλάτους της πυκνότητας ροής. Τέλος, είναι αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης του υλικού στο οποίο αναπτύσσονται τα δινορρέυματα. Στη περίπτωση αυτή θεωρούμε επίσης αμελητέο το επιδερμικό φαινόμενο και ομογενή τη πυκνότητα της μαγνητικής ροής κατά μήκος της διάστασης  $d$  του μαγνήτη. [8]

### 3.2.2.1 Επιδερμικό φαινόμενο

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, εμφανίζεται η τάση το ρεύμα αυτό να κατανέμεται με μεγαλύτερη πυκνότητα κοντά στην επιφάνεια του αγωγού, σε συγκεκριμένο βάθος, όπως περιγράφεται παρακάτω. Σε υψηλές συχνότητες, το ρεύμα περιορίζεται σε ένα λεπτότερο στρώμα κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Αυτή η μη ομογενής κατανομή του ρεύματος ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο.

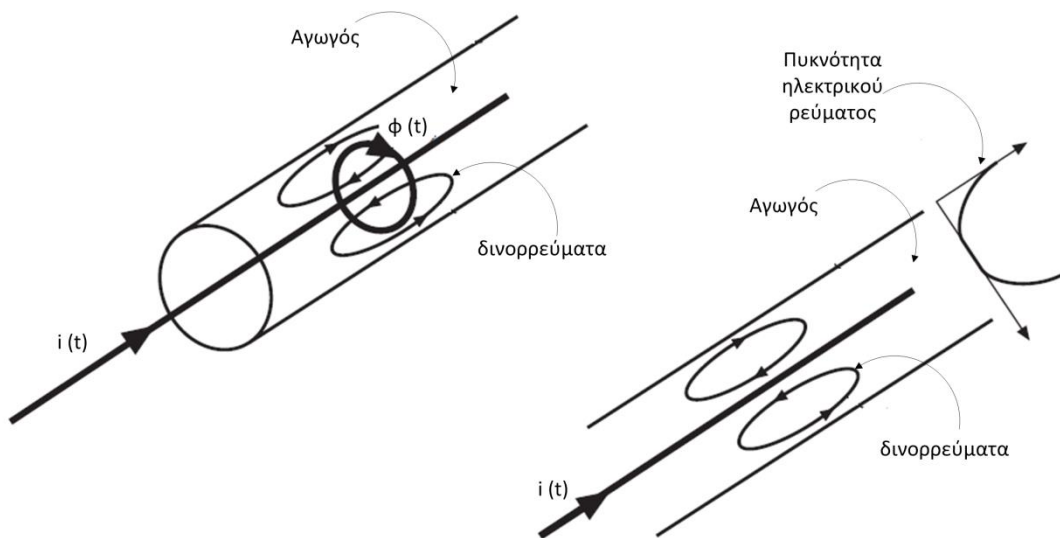
Στο εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό κατά μήκος του δημιουργεί το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο έντασης  $H$ . Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί τα δινορρέυματα. Σύμφωνα με το νόμο του Lenz, η φορά των δινορρευμάτων είναι τέτοια ώστε να αντιστέκονται στην πηγή που τα δημιούργησε, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο  $H$ . Βλέπουμε ότι το διανυσματικό άθροισμα των δινορρευμάτων με το ρεύμα του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης στον εσωτερικό όγκο του αγωγού και την αύξηση στις περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνειά του. Τελικά η συγκέντρωση της πυκνότητας ρεύματος σε διατομή μικρότερης επιφάνειας οδηγεί στην αύξηση της αντίστασης του αγωγού.

Από την περιγραφή του μηχανισμού δημιουργίας γίνεται κατανοητό ότι για μεγαλύτερες συχνότητες το μαγνητικό πεδίο και κατ' επέκταση τα

δινορρεύματα θα έχουν μεγαλύτερη ένταση και το επιδερμικό φαινόμενο κα είναι εντονότερο. Γενικά το ρεύμα σε έναν αγωγό μειώνεται εκθετικά από την επιφάνεια προς το εσωτερικό του. Μια μέτρηση της μείωσης δίνεται από το βάθος διείσδυσης, το οποίο είναι το μήκος από την επιφάνεια του αγωγού στο οποίο η ένταση της πυκνότητας ρεύματος έχει μειωθεί σε ποσοστό  $1/e$  ή περίπου 37% της αρχικής τιμής του. Σε συνήθεις περιπτώσεις αγωγών το μέγεθος αυτό προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τον παρακάτω τύπο για χαμηλές συχνότητες:

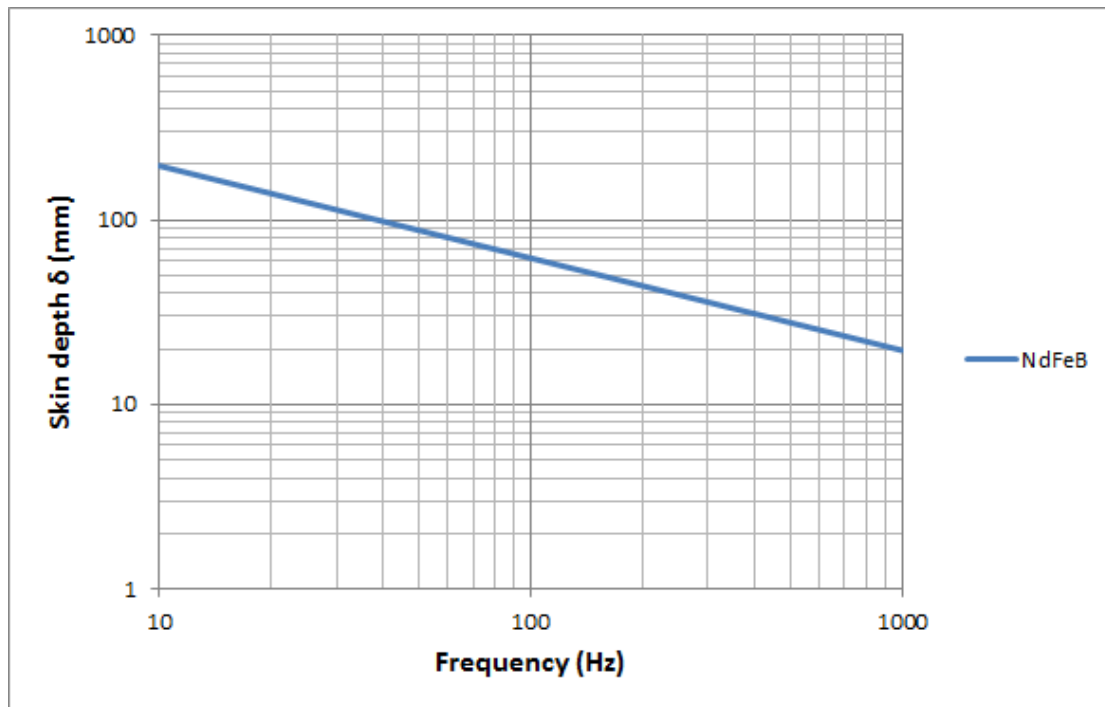
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu\omega}}$$

όπου  $\omega = 2\pi f$  η κυκλική συχνότητα του ρεύματος του αγωγού,  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του αγωγού και  $\rho_c$  η ειδική αντίσταση του αγωγού, η οποία έχει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές θερμοκρασίες.



**Σχήμα 3.14: Επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγό**

Στους μόνιμους μαγνήτες, με γραμμική καμπύλη μαγνήτισης και σταθερή ανά μονάδα μαγνητική διαπερατότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση υπολογισμού του βάθους διείσδυσης, για την αξιολόγηση αυτού σε σχέση με τη μεταβολή της συχνότητας. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα για τους μόνιμους μαγνήτες NdFeB είναι τυπικά  $\mu_{PM} = 1.03 \div 1.05$ . Η ειδική αντίσταση αντίστοιχα είναι  $\rho_{PM} = 100 \div 200 \mu\Omega \cdot cm$ . Το βάθος διείσδυσης δίνεται από τη σχέση που περιγράφηκε παραπάνω.



**Σχήμα 3.15: Καμπύλη βάθους διείσδυσης - συχνότητας σε μαγνήτη NdFeB.**

Στις περιπτώσεις που η ειδική αντίσταση του αγωγού είναι μικρή, το βάθος διείσδυσης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το πάχος του μαγνήτη, με αποτέλεσμα να έχουμε διείσδυση του ρεύματος στο σύνολο του μαγνήτη, γεγονός που είναι επιθυμητό. Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε αύξηση της συνολικής αντίστασης τους αγωγού με αποτέλεσμα να επάγονται μεγαλύτερα δινορρεύματα.

Ένα άλλο φαινόμενο το οποίο επίσης αυξάνει τη φαινόμενη αντίσταση και σχετίζεται άμεσα με τα δινορρεύματα είναι το φαινόμενο γειτνίασης και αναλύεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

### 3.2.2.2 Φαινόμενο γειτνίασης

Σε έναν αγωγό ο οποίος διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, αν υπάρχουν ρευματοφόροι αγωγοί εναλλασσόμενου ρεύματος κοντά του, τότε στον πρώτο αγωγό η κατανομή ρεύματος θα περιοριστεί σε μικρότερη περιοχή. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι το ρεύμα των γειτονικών αγωγών θα επάγει δινορρεύματα μέσω του μαγνητικού πεδίου που θα δημιουργεί στον πρώτο αγωγό. Είναι μηχανισμός ανάλογος με το επιδερμικό φαινόμενο με τη διαφορά ότι το μαγνητικό πεδίο δεν δημιουργείται από το ρεύμα του ίδιου του αγωγού. Αυτό συνεπάγεται ότι το ρεύμα δεν θα κατανεμηθεί ομοιόμορφα προς την επιφάνεια του αγωγού αλλά θα έχει μεγαλύτερη πυκνότητα προς την περιοχή

εκείνου που βρίσκεται πιο μακριά από τους γειτονικούς αγωγούς, αν το ρεύμα των αγωγών έχει την ίδια κατεύθυνση.

Επειδή το φαινόμενο εξαρτάται από τα επαγόμενα δινορρεύματα, η ένταση του αυξάνεται καθώς η συχνότητα των ρευμάτων μεγαλώνει. Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική αύξηση της φαινόμενης αντίστασης του αγωγού, η οποία μπορεί να φτάσει δεκαπλάσια τιμή σε σχέση με την αντίσταση σε συνεχές ρεύμα. Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως η γεωμετρία των αγωγών και η απόσταση μεταξύ τους.

### 3.2.2.3 Εφαρμογές δινορρευμάτων

Παρά το γεγονός ότι τα δινορρεύματα είναι γενικά ανεπιθύμητο φαινόμενο, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις που το φαινόμενο αυτό βρίσκει εφαρμογή. Μερικές από αυτές είναι:

- Μη καταστροφικός έλεγχος: Στο δοκίμιο ενός υλικού μπορεί να ελεγχθεί για ρωγμές ή άλλες ατέλειες της γεωμετρίας του μέσω του εντοπισμού δινορρευμάτων σε αυτό
- Ηλεκτρομαγνητική πέδηση: Μια μεταλλική πλάκα που κινείται εντός επιβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μπορεί να επιβραδυνθεί μέσω της αλληλεπίδρασης του εξωτερικού πεδίου με το μαγνητικό πεδίο των δινορρευμάτων.
- Αναγνώριση μετάλλων: Όπως στην ηλεκτρομαγνητική πέδηση, ένα μεταλλικό δοκίμιο το οποίο περνά από σταθερά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο θα επιβραδυνθεί. Διαφορετικά μέταλλα επιβραδύνονται με διαφορετικούς ρυθμούς, γεγονός που επιτρέπει την αναγνώριση τους.[9]

## 4 Διερεύνηση απωλειών μονίμων μαγνητών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

### 4.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η πεδιακή ανάλυση μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση της προκαταρκτικής σχεδίασης οποιασδήποτε ηλεκτρομαγνητικής διάταξης. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να υπολογισθούν διάφορα μεγέθη, όπως οι απώλειες ισχύος ή πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος.[10]

#### 4.1.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο παραμένει αμετάβλητο στο χρόνο. Στην περίπτωση αυτή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου ( $B$ ) ικανοποιούν τις σχέσεις :

$$\nabla \times H = J$$

και

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης σχέση μεταξύ  $B$  και  $H$  για κάθε υλικό:

$$B = \mu H$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες Alnico, τότε η επιτρεπτότητα,  $\mu$ , είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του  $B$ :

$$\mu = \frac{B}{H(B)}$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό. Η μαγνητική επαγωγή γράφεται ως συνάρτηση του διανυσματικού δυναμικού,  $A$ , ως εξής:

$$B = \nabla \times A$$

Με βάση τις δύο προηγούμενες σχέσεις προκύπτει:

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

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο (και υποθέτοντας ότι  $\nabla \cdot A = 0$ ), η εξίσωση αυτή καταλήγει:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Σε δύο διαστάσεις όμως, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν, και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα (με κατεύθυνση προς το εξωτερικό της σελίδας).

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το  $A$ , τα  $B$  και  $H$  προκύπτουν από διαφορίση του  $A$ .

Στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου χρονικά μεταβαλλόμενου, μπορούν να επαχθούν δινορρεύματα σε υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εξισώσεις του Maxwell αναφορικά με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.[11]

#### 4.1.2 Οριακές συνθήκες

Για την επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος θα πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, οι οποίες μπορεί να είναι ανάμεσα στις εξής:

- Dirichlet. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του δυναμικού δηλώνεται πάνω στο όριο, π.χ.  $A = 0$ . Δηλώνοντας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα  $A=0$  κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας, αποτρέπεται η μαγνητική ροή από το να διαπεράσει το όριο αυτό.
- Neumann. Αυτή η οριακή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του δυναμικού κατά μήκος του ορίου και συνήθως χρησιμοποιείται στα

μαγνητικά προβλήματα στην περίπτωση διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας.

- Robin. Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού μεταξύ των Dirichlet και Neumann, καθορίζοντας μια σχέση μεταξύ της τιμής του  $A$  και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα τέτοιας οριακής συνθήκης είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτρέψουν σε ένα περιορισμένο χωρικά πρόβλημα να μιμηθεί τη συμπεριφορά μιας άπειρης χωρικά περιοχής.

- Περιοδική. Μια περιοδική οριακή συνθήκη συνδυάζει μαζί δύο όρια. Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές σε αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων είναι ίσες.
- Αντιπεριοδική. Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σημεία έχουν μεγέθη ίσου μέτρου αλλά αντίθετου πρόσημου.

#### 4.1.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, που δε μπορούν να επιλυθούν με ακρίβεια με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε προβλήματα πολύπλοκων γεωμετριών που περιλαμβάνουν μη γραμμικά υλικά. Η ιδέα είναι βασισμένη στο διαχωρισμό μιας περιοχής σε μικρότερες υποπεριοχές, απλούστερης γεωμετρίας, που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Μέσα σε κάθε στοιχείο χρησιμοποιείται μια πολυωνυμική εξίσωση για την προσέγγιση της λύσης. Με άλλα λόγια, η διαδικασία της διακριτοποίησης μετατρέπει τη διαφορική εξίσωση μερικών παραγώγων σε ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Επομένως, αν η αρχική γεωμετρία χωρισθεί σε αρκετά μεγάλο αριθμό υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος μπορεί να προσεγγισθεί με την επιθυμητή ακρίβεια.

Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται συνήθως με τρίγωνα στην περίπτωση δισδιάστατης γεωμετρίας, ή με τετράεδρα στην περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας, αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό, στο οποίο οι άγνωστοι απαρτίζονται από τις τιμές του πεδίου στις κορυφές των διαδοχικών τριγώνων ή τετραέδρων. Το πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση FEM είναι ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων όπου οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων (τρίγωνα ή τετράεδρα) μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των αντίστοιχων κορυφών τους.

Τα προγραμματιστικά πακέτα, που χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, είναι ικανά να επιλύσουν μαγνητικά προβλήματα με μεγάλη ακρίβεια. Η σχεδίαση και ανάλυση ενός τέτοιου προβλήματος πραγματοποιείται σε τρία στάδια: pre-processing, solving και post-processing. Κατά τη διαδικασία του pre-processing δημιουργείται το επιθυμητό προς ανάλυση μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Σχεδιάζεται παραμετροποιημένα η επιθυμητή γεωμετρία και αποδίδονται οι ιδιότητες κάθε υλικού στις διάφορες περιοχές του μοντέλου. Στη συνέχεια, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και η διέγερση του μοντέλου. Τέλος, ορίζεται το επιθυμητό πλήθος πεπερασμένων στοιχείων και προκύπτει το πλέγμα. Κατά τη διαδικασία της επίλυσης, εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος, όπου μία εκτίμηση σφάλματος παράγεται από τη λύση, το πλέγμα καθορίζεται ξανά και η λύση επαναλαμβάνεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο ακρίβειας. Κατά το post-processing, γίνεται η πεδιακή ανάλυση που παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια μεγέθη όπως οι απώλειες ισχύος και η πυκνότητα του ρεύματος. [10]

## 4.2 Επιλογή ηλεκτρομαγνητικής διάταξης μέτρησης των απωλειών

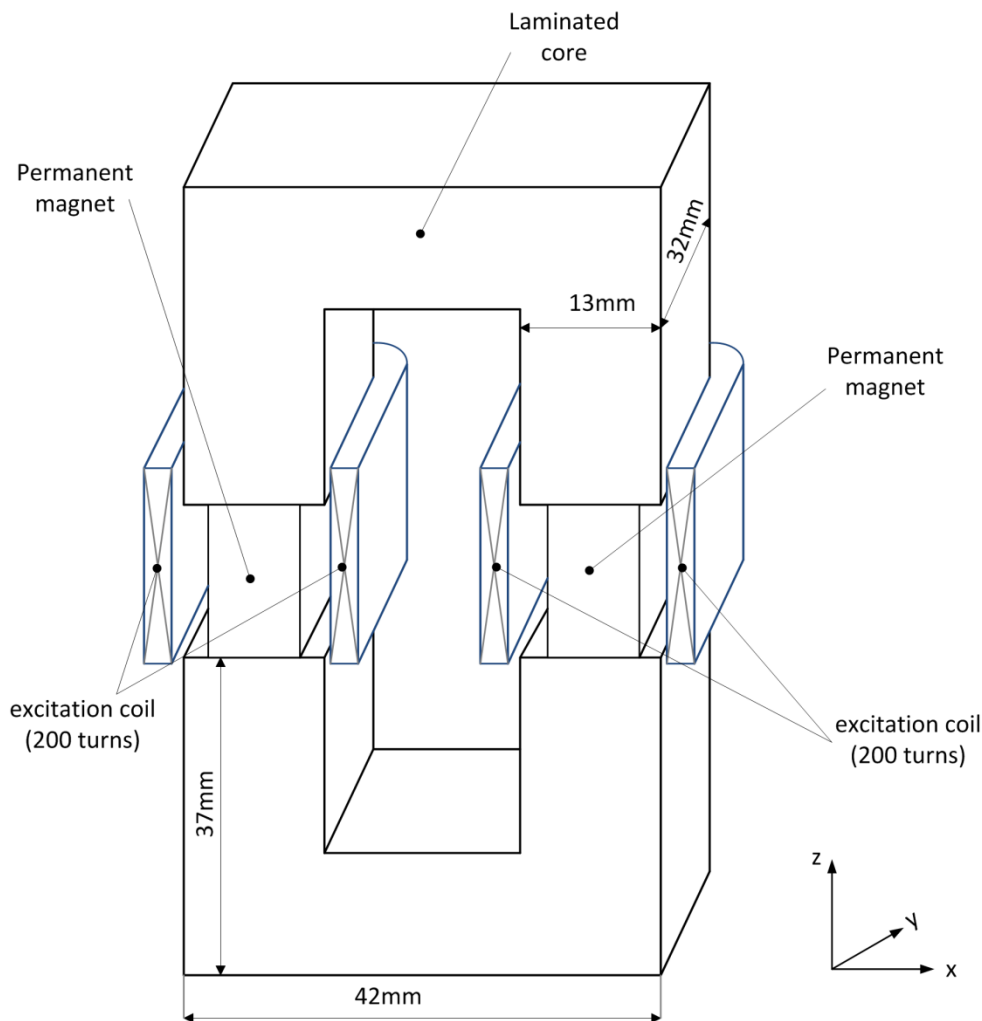
Στην εργασία αυτή, που σκοπός της είναι ο προσδιορισμός των απωλειών δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες, επιλέχθηκε να σχεδιαστεί και έπειτα να κατασκευαστεί ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα, βασισμένο στο αντίστοιχο κύκλωμα που παρουσιάζεται στην αναφορά [2].

Το κύκλωμα αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα, τους μόνιμους μαγνήτες και δύο τυλίγματα. Κατά τη μοντελοποίηση και κατά τη πειραματική διαδικασία η τροφοδότηση του κυκλώματος εφαρμόζεται στο ένα από τα δύο τυλίγματα και παρέχεται από εξωτερική πηγή διέγερσης. Στο δεύτερο τύλιγμα πραγματοποιείται ενδεικτικά η μέτρηση της επαγόμενης τάσης, γεγονός που αναμένεται όπως έχει αναλυθεί και παραπάνω από το νόμο του Faraday. Στο εν λόγω μαγνητικό κύκλωμα παρατηρείται επίσης η αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ του πεδίου του μαγνήτη με το πεδίο που δημιουργείται εξαιτίας της εξωτερικής διέγερσης.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε θεωρητική διερεύνηση για τις απώλειες των μαγνητών σύμφωνα με τις οποίες έγινε και η τελική επιλογή αυτών. Οι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Η ηλεκτρομαγνητική διάταξη που επιλέχθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:





**Σχήμα 4.1: Ηλεκτρομαγνητική διάταξη**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δύο προγραμματιστικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος, η σχεδίαση της ηλεκτρομαγνητικής διάταξης και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

### 4.3 Επίλυση αρμονικού προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος Femm

Το Finite Element Method Magnetics, Femm, είναι ένα προγραμματιστικό πακέτο για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων χαμηλών συχνοτήτων, διδιάστατων, επίπεδων ή αξονικής συμμετρίας.[12]

Με τη βοήθεια εντολών που γράφονται σε script στο Matlab, γίνεται επικοινωνία μέσω Luascript με το Femm και δημιουργείται με αυτοματοποιημένο τρόπο η γεωμετρία στον προεπεξεργαστή του προγράμματος. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε εύκολα να μεταβάλλουμε της

παραμέτρους της σχεδίασης μας, να καθορίσουμε την ακρίβεια του πλέγματος και να ορίσουμε την επιθυμητή πηγή διέγερσης.

#### 4.3.1 Ανάλυση χρονομεταβλητών μαγνητικών προβλημάτων

Σε προηγούμενη παράγραφο έχει αναφερθεί ότι αν το μαγνητικό πεδίο είναι χρονομεταβλητό, δινορρεύματα μπορούν να επαχθούν στα υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόσαμε εναλλασσόμενη πηγή διέγερσης, επομένως μας ενδιαφέρει να αναφερθούμε, γενικά, στο τρόπο επίλυσης χρονομεταβλητών μαγνητικών προβλημάτων. Αν και το πρόγραμμα Femm δε διαθέτει solver για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, όπως στη περίπτωση του Ansoft Maxwell, που θα αναλυθεί παρακάτω, παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την κατανομή του πεδίου.

Γι' αυτό το λόγο παραθέτουμε, επιπλέον, τις εξισώσεις Maxwell που σχετίζονται με τη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στη περίπτωση των χρονομεταβλητών προβλημάτων καθώς και τον τρόπο επίλυσης τέτοιων προβλημάτων από το Femm.

Η σχέση μεταξύ της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της πυκνότητας ρεύματος είναι:

$$J = \sigma E$$

όπου  $J$  η πυκνότητα ρεύματος,  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $\sigma$  η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού.

Για το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο ισχύει:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Αντικαθιστώντας την πυκνότητα μαγνητικής ροής  $B$  με το διανυσματικό δυναμικό  $\dot{A}$  προκύπτει:

$$\nabla \times E = -\nabla \times \dot{A}$$

όπου στη περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, με ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$E = -\dot{A} - \nabla V$$

Αντίστοιχα η σχέση που καθορίζει τη πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται:

$$J = -\sigma \dot{A} - \sigma \nabla V$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω στις αρχικές εξισώσεις Maxwell που διατυπώθηκαν κατά τη περιγραφή των μαγνητοστατικών προβλημάτων, προκύπτει η παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = -\sigma \dot{A} + J_{src} - \sigma \nabla V$$

όπου ο όρος  $J_{src}$  αναφέρεται στη πηγή ρεύματος και ο όρος  $\nabla V$  αναφέρεται ως επιπλέον στοιχείο τάσης, ο οποίος στα δισδιάστατα προβλήματα είναι σταθερός στον όγκο του αγωγίμου υλικού και το Femm τον χρησιμοποιεί ως οριακή συνθήκη.

Η τελευταία σχέση, είναι αυτή που ορίζει στο Femm ένα πεδίο που ταλαντώνεται σε μία σταθερή συχνότητα. Στη περίπτωση αυτή με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier του διανυσματικού δυναμικού  $\dot{A}$ , προκύπτει η σχέση που ουσιαστική χρησιμοποιεί το λογισμικό για την επίλυση αρμονικών χρονομεταβλητών προβλημάτων:

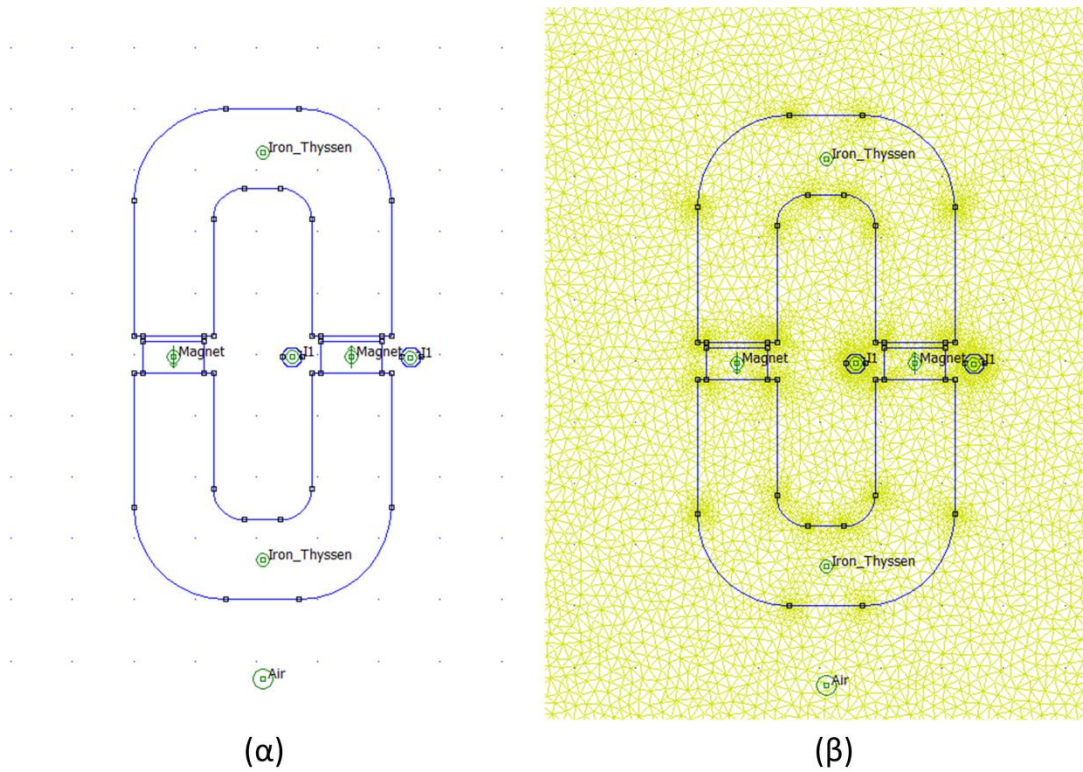
$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_{eff}(B)} \nabla \times a \right) = -j\omega \sigma a + \widehat{J}_{src} - \sigma \nabla V$$

όπου η μη σταθερή διαπερατότητα  $\mu_{eff}$  χρησιμοποιείται για να αποδοθεί καλύτερα η θεμελιώδης συνιστώσα του ημιτονοειδούς ρεύματος διέγερσης.

#### 4.3.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

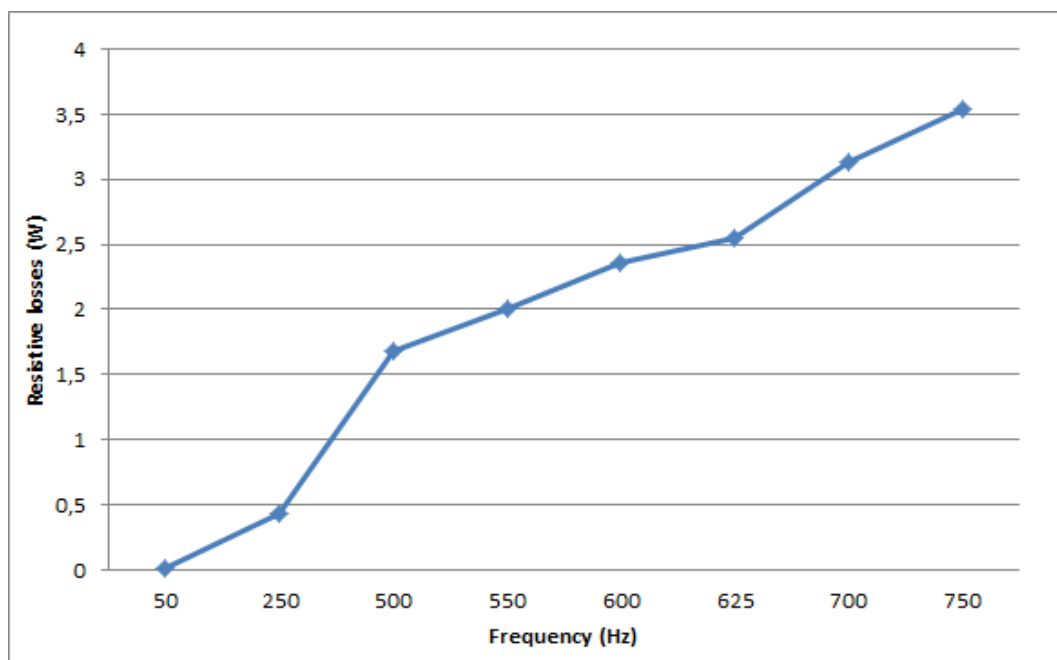
Αρχικά σχεδιάσαμε το μαγνητικό κύκλωμα όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα αντίστοιχα παρεχόμενα από το Εργαστήριο Μηχανών για την υλοποίηση της διάταξης. Έπειτα από κατάλληλη πειραματική διερεύνηση και επιβεβαίωση αυτής μέσω προσομοιώσεων αποφασίσαμε την εφαρμογή διέγερσης με μέγιστη τιμή  $I_{max} = 2.2 A$  για την εξασφάλιση της λειτουργίας του κυκλώματος στη γραμμική περιοχή του πυρήνα. Υπολογίσαμε απώλειες στους μαγνήτες για συχνότητες  $f = 50 \div 750 Hz$ . Η επιλογή των συχνοτήτων πραγματοποιήθηκε με βάση τις πειραματικές. Κατά τη μοντελοποίηση της διάταξης στο περιβάλλον Femm δεν έχουμε τη δυνατότητα εφαρμογής κατάτμησης του μαγνήτη, εξαιτίας της δισδιάστατης ανάλυσης.

Έχουμε τη δυνατότητα και στα δύο προγράμματα να καθορίσουμε το πλέγμα, ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμούμε για την επίλυση του προβλήματος.



**Σχήμα 4.2: (α) Σχεδίαση μαγνητικού κυκλώματος στο Femm. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.**

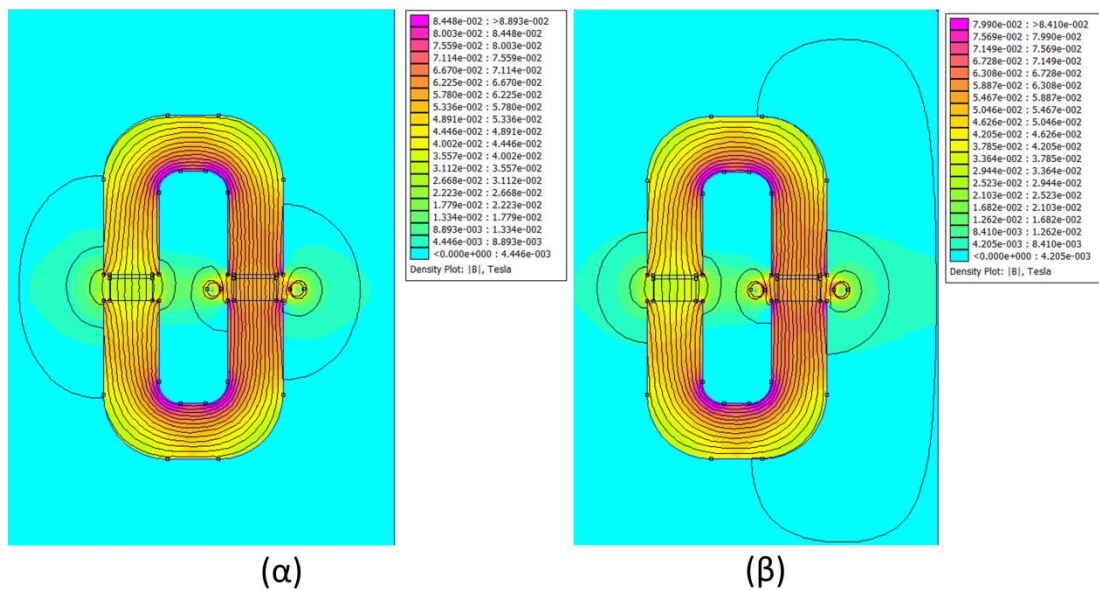
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σχετικά με τις απώλειες ισχύος, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



**Σχήμα 4.3: Καμπύλη απωλειών - συχνότητας.**

Σύμφωνα με τη παραπάνω καμπύλη παρατηρούμε ότι με την αύξηση της συχνότητας, για σταθερή τιμή διέγερσης, οι απώλειες ισχύος στους μαγνήτες αυξάνονται. Ωστόσο καθώς προσεγγίζουμε υψηλότερες συχνότητες η μεταβολή στις απώλειες πραγματοποιείται με μικρότερο ρυθμό.

Από τις παραπάνω προσομοιώσεις μπορούμε ακόμα να συλλέξουμε στοιχεία σχετικά με την κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου για συχνότητες 50 Hz και 750 Hz. Όπως προκύπτει, η μεταβολή της μέγιστης τιμής της μαγνητικής επαγωγής δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διακυμάνσεις.



**Σχήμα 4.4: Κατανομή μαγνητικού πεδίου. (α) Συχνότητα 50 Hz. (β) Συχνότητα 750 Hz.**

#### 4.4 Δυναμική επίλυση προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος Ansoft Maxwell

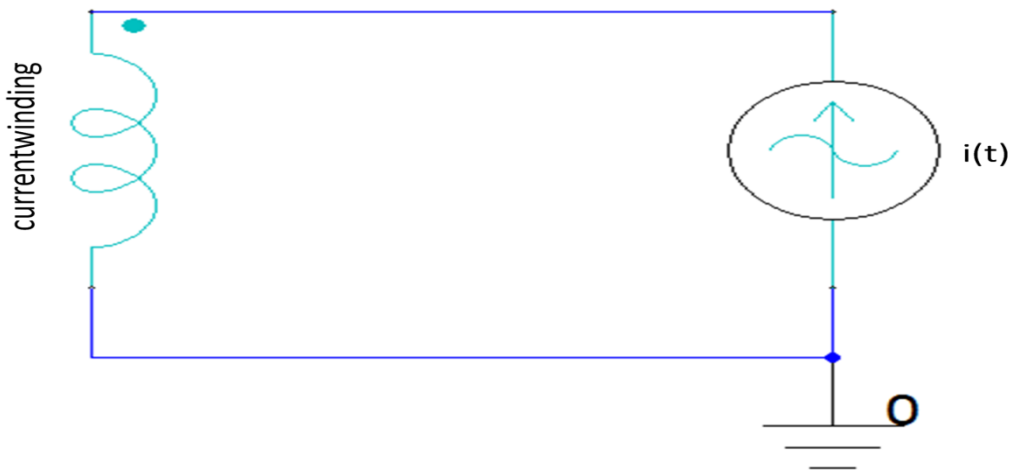
Το Maxwell επιλύει, με διακριτοποίηση στο χώρο και το χρόνο, δισδιάστατα και τρισδιάστατα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα μέσω των εξισώσεων Maxwell σε μια πεπερασμένη περιοχή του χώρου με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες και με καθορισμένες από τον χρήστη αρχικές συνθήκες.[12]

Σχεδιάζουμε παραμετροποιημένα την γεωμετρία στο Desktop του προγράμματος. Κατά τη παραμετροποίηση ορίζουμε μια αρχική τιμή, ωστόσο αυτή μπορεί εύκολα να μεταβληθεί αν είναι επιθυμητό. Στο συγκεκριμένο λογισμικό είναι εφικτό να παρουσιαστεί το δισδιάστατο αλλά και το τρισδιάστατο μοντέλο.

#### 4.4.1 Ανάλυση χρονομεταβλητών μαγνητικών προβλημάτων

Το πρόγραμμα Ansoft Maxwell παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης χρονομεταβλητών μαγνητικών προβλημάτων μέσω του Magnetic Transient Solver. Στο περιβάλλον αυτό γίνεται ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και για κάθε χρονική στιγμή προκύπτει μια τιμή για το μαγνητικό πεδίο. Οι τιμές αυτές καταγράφονται και στο τέλος προκύπτει το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

Για την τροφοδότηση των τυλιγμάτων με εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιήθηκε το Maxwell Circuit Editor, που είναι ένα βοηθητικό περιβάλλον για το σκοπό αυτό. Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε παρουσιάζεται παρακάτω και η επικοινωνία του Maxwell με το Circuit Editor επιτυγχάνεται μέσω του στοιχείου αλληλεπαγωγής που εμφανίζεται στο κύκλωμα.



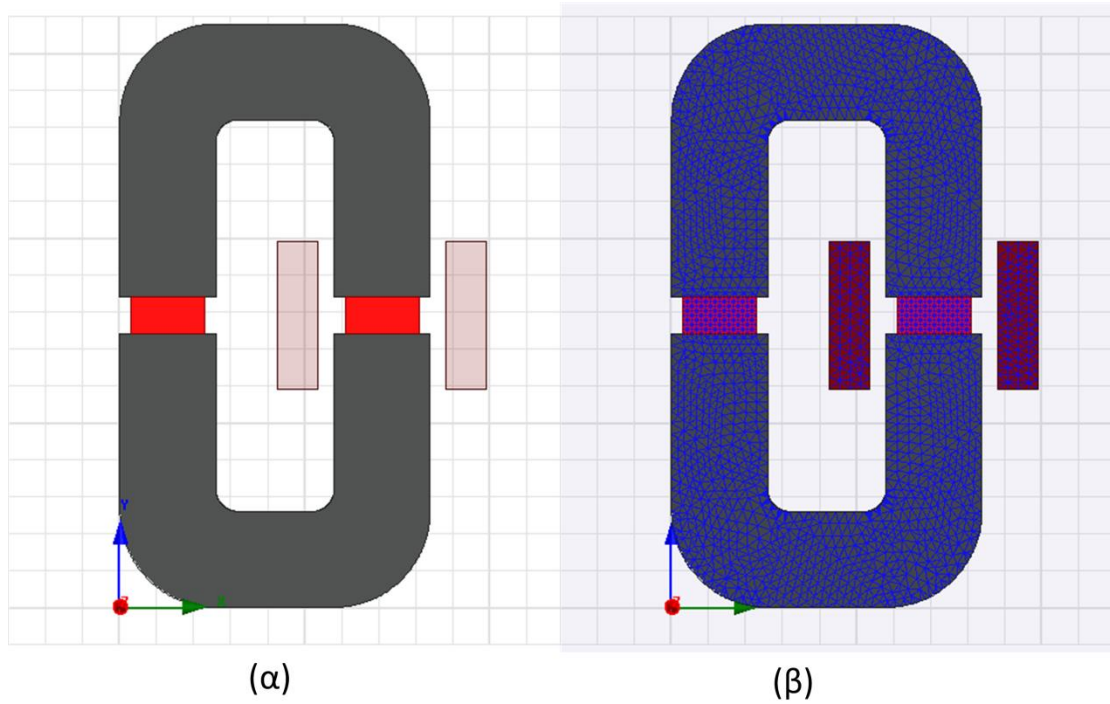
**Σχήμα 4.5: Εξωτερική εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος που χρησιμοποιείται για τη διέγερση των τυλιγμάτων του μαγνητικού κυκλώματος.**

#### 4.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων δισδιάστατου μοντέλου

Σχεδιάζουμε, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τη διάταξη που μας ενδιαφέρει και καθορίζουμε την ακρίβεια του πλέγματος. Επιλύουμε αρχικά το δισδιάστατο πρόβλημα. Ωστόσο εξαιτίας της φύσης του προβλήματος επιβάλλεται και η επίλυση του αντίστοιχου τρισδιάστατου προβλήματος.

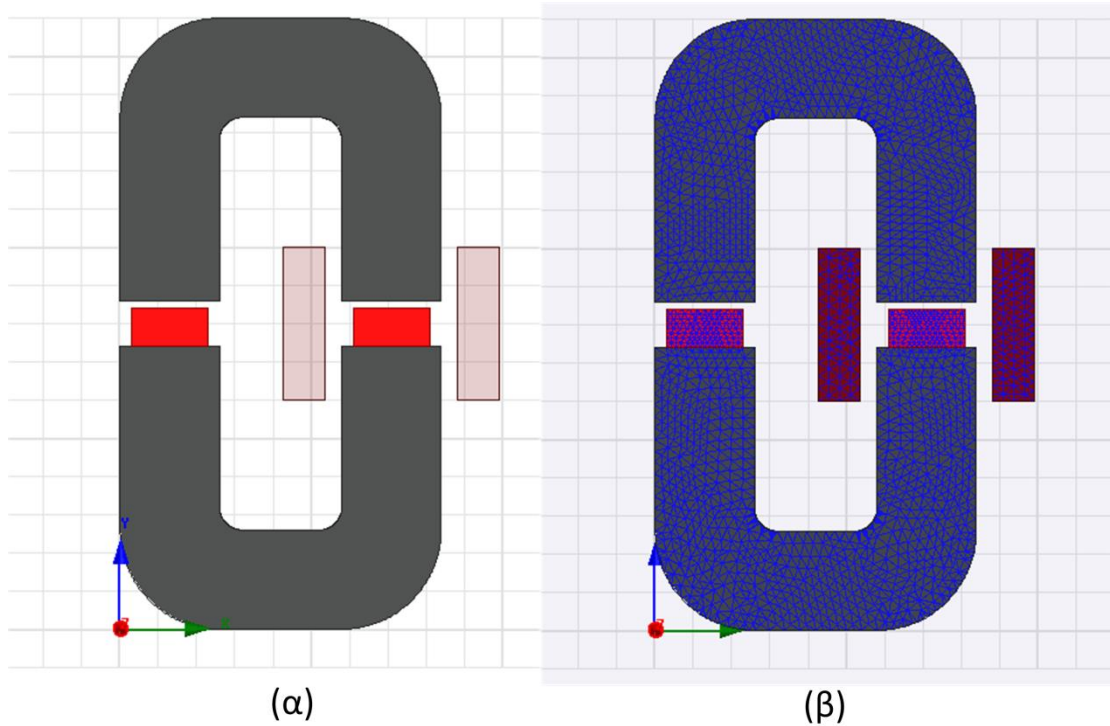
Αρχικά επιλέγουμε να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα του δισδιάστατου μοντέλου, ωστόσο τα αποτελέσματα δεν είναι αρκετά ακριβή. Αυτό συμβαίνει καθώς στη δισδιάστατη αναπαράσταση δεν είναι εφικτή η μοντελοποίηση της

κατάτμησης του μαγνήτη σε βάθος. Έχουμε επιπλέον, όπως και προηγουμένως τη δυνατότητα να επιλέξουμε τις ιδιότητες των υλικών αλλά και να καθορίσουμε τα στοιχεία στα οποία θέλουμε να μετρήσουμε τις απώλειες των δινορρευμάτων.



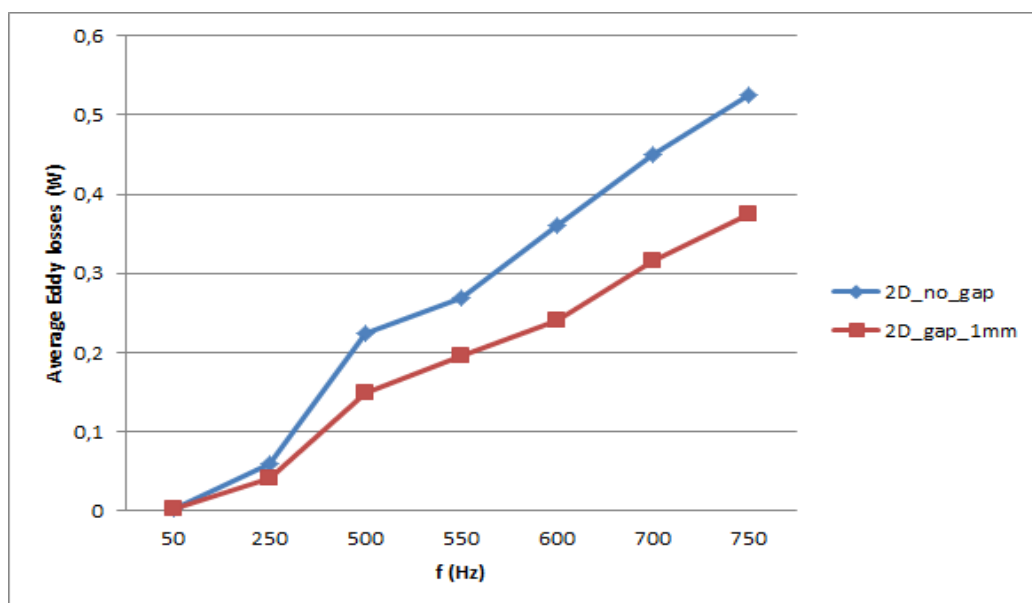
**Σχήμα 4.6:** Περίπτωση διάταξης με μαγνήτη 5mm, χωρίς διάκενο. (α) Δισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.





**Σχήμα 4.7:** Περίπτωση διάταξης με μαγνήτη 5mm και διάκενο 1mm. (α) Δισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.

Οι απώλειες ισχύος σε συνάρτηση με τη μεταβολή της συχνότητας, των δύο παραπάνω περιπτώσεων, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Προκύπτει λοιπόν ότι καθώς αφήνουμε διάκενο ανάμεσα στους μαγνήτες και τον πυρήνα, οι απώλειες, ειδικά στις υψηλές συχνότητες μειώνονται.



**Σχήμα 4.8:** Καμπύλες απωλειών - συχνότητας στο δισδιάστατο μοντέλο.

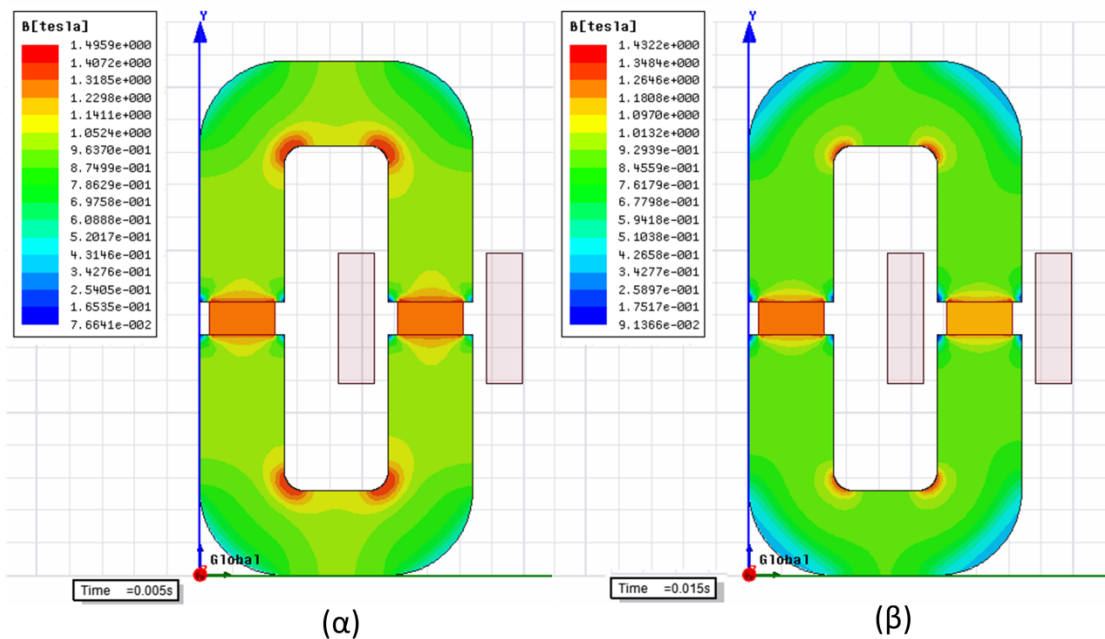


Εκτός από την μείωση των απωλειών στους μαγνήτες επιδιώκουμε και τη λειτουργία της διάταξης στη γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης.

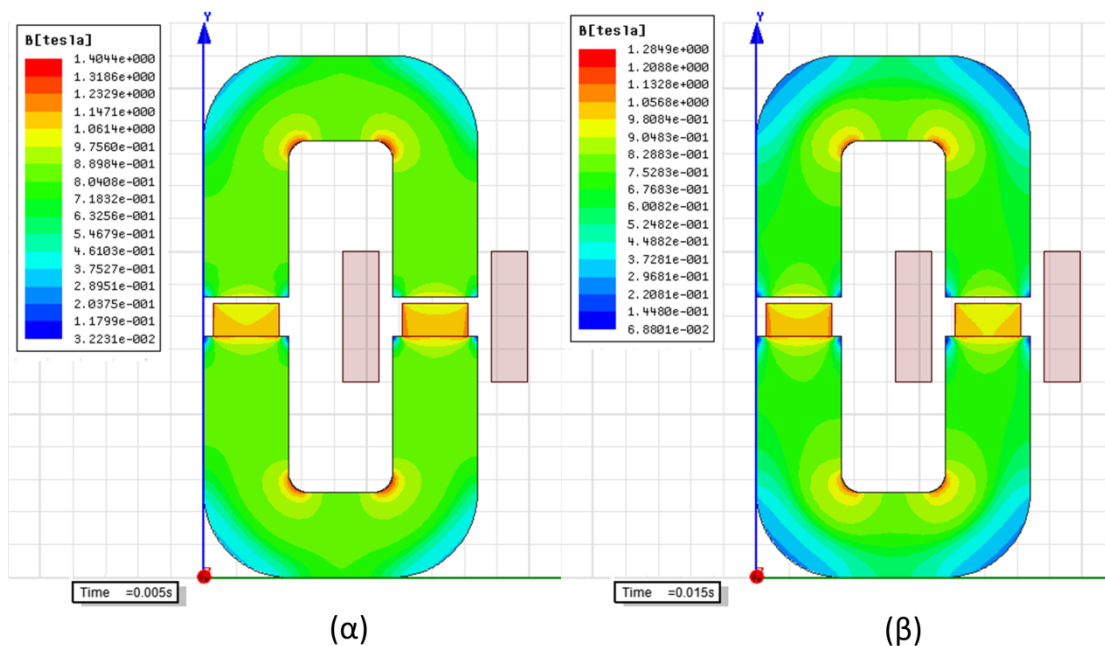
Καθώς η ανάλυση για χρονομεταβλητά προβλήματα είναι εφικτή και ακριβής με τη χρήση του Maxwell, θα παρατηρήσουμε και σε αυτή τη περίπτωση τη κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο εδώ θα διακρίνουμε καλύτερα τη μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής σε συνάρτηση με το χρόνο, καθώς το πρόγραμμα υποστηρίζει την αναπαράσταση του πεδίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι το συνεχές πεδίο που δημιουργούν οι μαγνήτες υπολογίστηκε, μέσω μαγνητοστατικής ανάλυσης, με αποτέλεσμα η μαγνητική επαγωγή τον πυρήνα να έχει τιμή  $B = 1.21T$ . Λόγω της υψηλής τιμής του συνεχές μαγνητικού πεδίου, δε θα καταφέρουμε να παρατηρήσουμε τις μεταβολές της κατανομής του εναλλασσόμενου πεδίου με τις μεταβολές της συχνότητας τροφοδοσίας.

Παρακάτω θα παραθέσουμε για τις δυο περιπτώσεις, διάταξη με και χωρίς διάκενο, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του συνολικού μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στο εσωτερικό του σιδηρομαγνητικού πυρήνα.



**Σχήμα 4.9: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με μαγνήτη 5mm, χωρίς διάκενο στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.**



**Σχήμα 4.10: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με μαγνήτη 5mm και διάκενο 1mm στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.**

Από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε να αντιληφθούμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η κατανομή του πεδίου σε μια περίοδο. Τη πρώτη χρονική στιγμή, όπου έχουμε και τη μέγιστη τιμή  $B$ , το μεταβαλλόμενο πεδίο έχει την ίδια διεύθυνση με τη φορά μαγνήτισης των μονίμων μαγνητών και επομένως το μόνιμο πεδίο ενισχύεται. Τη δεύτερη χρονική στιγμή, όπου έχουμε ελάχιστη τιμή  $B$ , το μεταβαλλόμενο πεδίο έχει αντίθετη φορά από το μόνιμο (συνεχές) πεδίο των μαγνητών και επομένως η συνολική πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι μικρότερη. Ωστόσο αν και πρόκειται για ημιτονοειδές μαγνητικό πεδίο παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή δεν είναι αντίθετη της μέγιστης. Αυτό συμβαίνει διότι το μόνιμο πεδίο είναι ισχυρότερο και έχει τιμή μεγαλύτερη της μέγιστης του ημιτονοειδούς.

Μεταξύ των δύο διαστάσεων μοντέλων παρατηρούμε διαφορά στις απόλυτες τιμές των απωλειών ισχύος, αλλά όχι στη μορφή της καμπύλης που εξάγεται. Η αιτία αυτής της απόκλισης των τιμών είναι αποτέλεσμα του διαφορετικού τρόπου επίλυσης του προβλήματος από το εκάστοτε πρόβλημα και του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού των απωλειών.

#### 4.4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων τρισδιάστατου μοντέλου

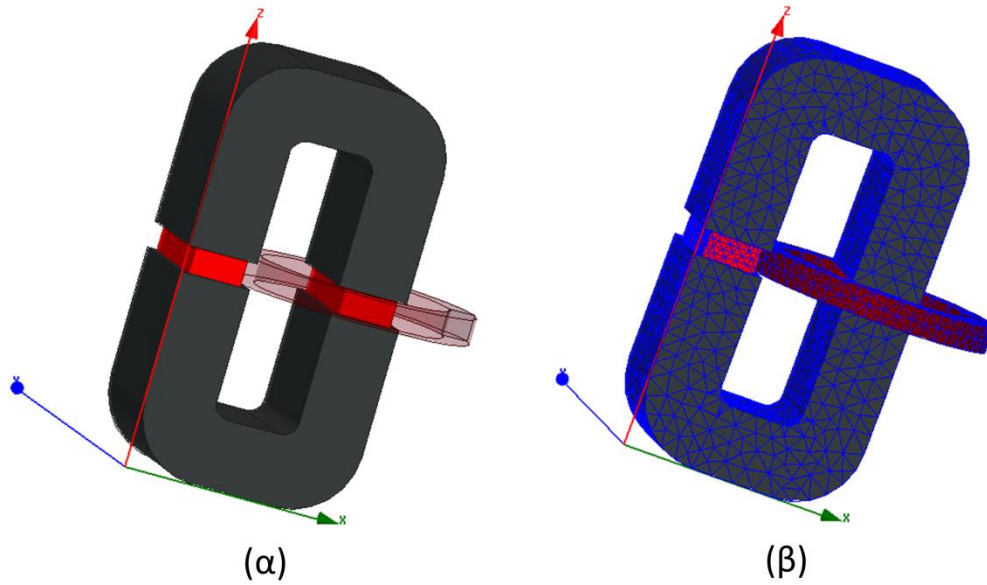
Στη τελευταία φάση της μοντελοποίησης κρίνεται πλέον σκόπιμο, λόγω της φύσης του προβλήματος, να πραγματοποιηθεί σχεδίαση σε τρεις διαστάσεις. Η σχεδίαση σε τρεις διαστάσεις υποστηρίζεται από το πρόγραμμα Ansoft Maxwell. Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε πηνίο μιας σπείρας, αφού από τους περιορισμούς του λογισμικού σε άλλη περίπτωση δε μπορούμε να μετρήσουμε τις απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες. Το τρισδιάστατο μοντέλο και το πλέγμα που ορίσαμε παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από το μήκος της διαδρομής τους μέσα στο σιδηρομαγνητικό υλικό. Όπως αποδείχθηκε και από την αναλυτική σχέση τα ρεύματα αυτά συναντούν μια αντίσταση που είναι ανάλογη της διαδρομής τους. Επομένως όσο μικρότερη η διαδρομή αυτή τόσο μικρότερη και η αντίσταση που συναντούν τα δινορρεύματα και κατά συνέπεια οι απώλειες ισχύος περιορίζονται.[13]

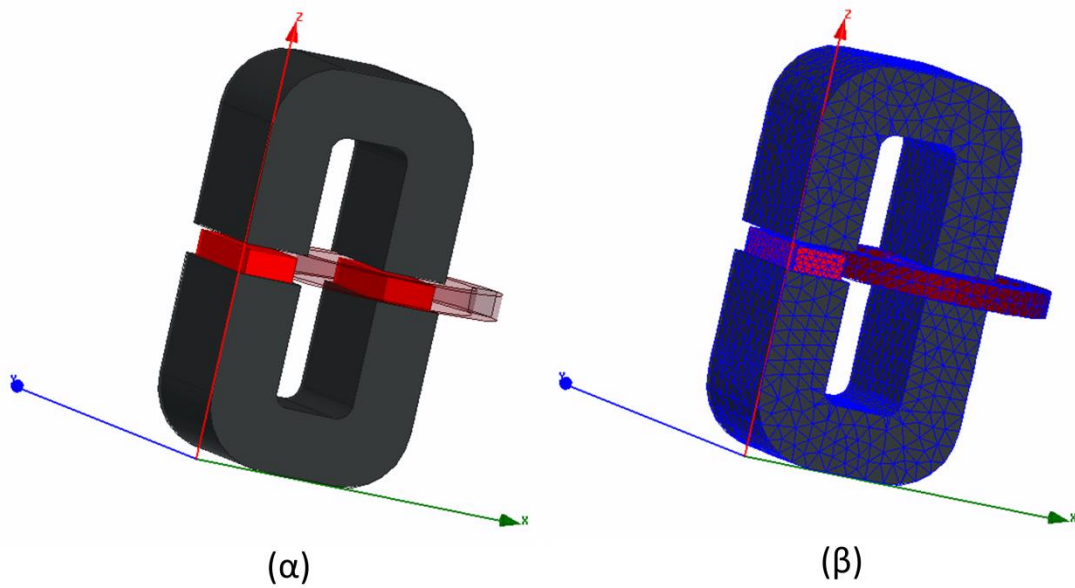
Η συνηθισμένη τακτική περιορισμού των απωλειών αυτών είναι, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η κατάτμηση των μαγνητών. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει ο περιορισμός που θέτει το επιδερμικό φαινόμενο. Ο περιορισμός αυτός ισχύει σε υψηλές συχνότητες τροφοδοσίας της τάξεως των kHz που δε μελετώνται στην παρούσα διπλωματική. Στις περιπτώσεις αυτές πριν τη κατάτμηση των μαγνητών πρέπει να ελέγχουμε το βάθος διείσδυσης καθώς η τιμή του δε θα πρέπει να ξεπερνά μια οριακή συνθήκη. Η οριακή αυτή συνθήκη επιτρέπει τη κατάτμηση του μαγνήτη σε μικρότερα κομμάτια όσο το βάθος διείσδυσης είναι τουλάχιστον διπλάσιο από το πλάτος  $d$  του μαγνήτη, όπως αυτό έχει οριστεί στην αναλυτική λύση, και το μήκος  $h$  πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος του μαγνήτη. Στην περίπτωση που αυτή η συνθήκη δεν ισχύει τότε υπάρχει ο κίνδυνος, η κατάτμηση των μαγνητών να επιφέρει αύξηση των απωλειών ισχύος και να μην είναι επιθυμητή.

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να διερευνηθεί με ακρίβεια κατά τη μοντελοποίηση σε τρεις διαστάσεις, καθώς επιλέγουμε τη κατάτμηση σε βάθος των μαγνητών. Κατά τη μοντελοποίηση στις τρεις διαστάσεις ελέγχουμε τις εξής τέσσερις περιπτώσεις ως προς τις απώλειες ισχύος:

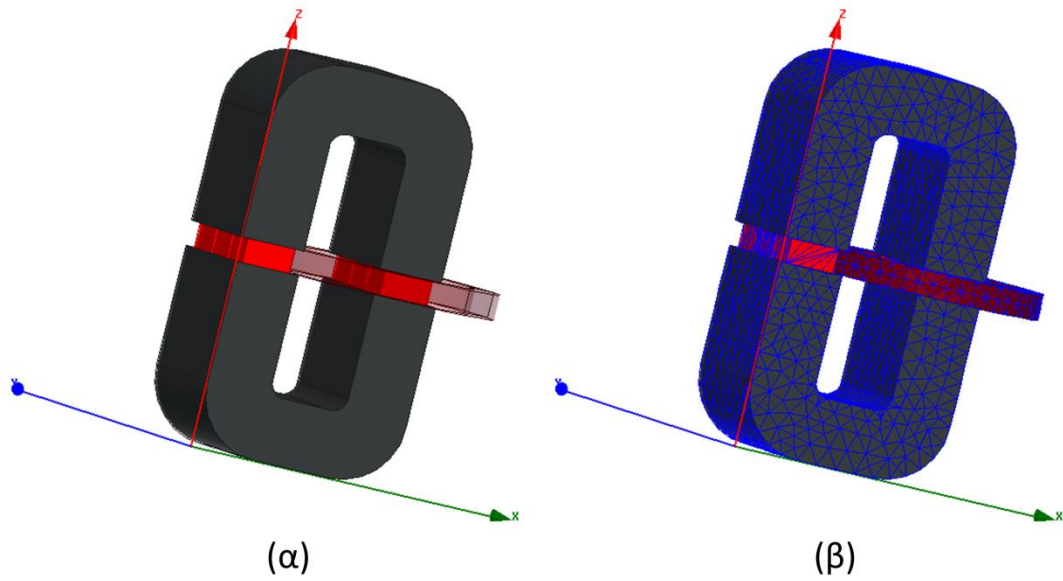
1. Μαγνητικό κύκλωμα με ενιαίους μαγνήτες, χωρίς διάκενο.
2. Μαγνητικό κύκλωμα με ενιαίους μαγνήτες, με διάκενο 1mm.
3. Μαγνητικό κύκλωμα με κατατετμημένους μαγνήτες, χωρίς διάκενο.
4. Μαγνητικό κύκλωμα με κατατετμημένους μαγνήτες, με διάκενο 1mm.



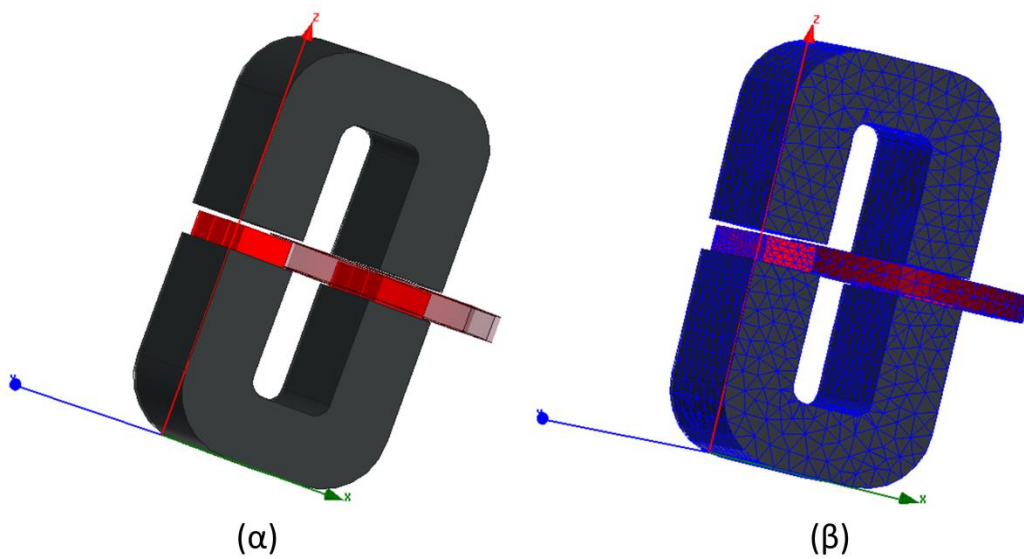
**Σχήμα 4.11:** Περίπτωση διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, χωρίς διάκενο.  
**(α)** Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. **(β)** Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.



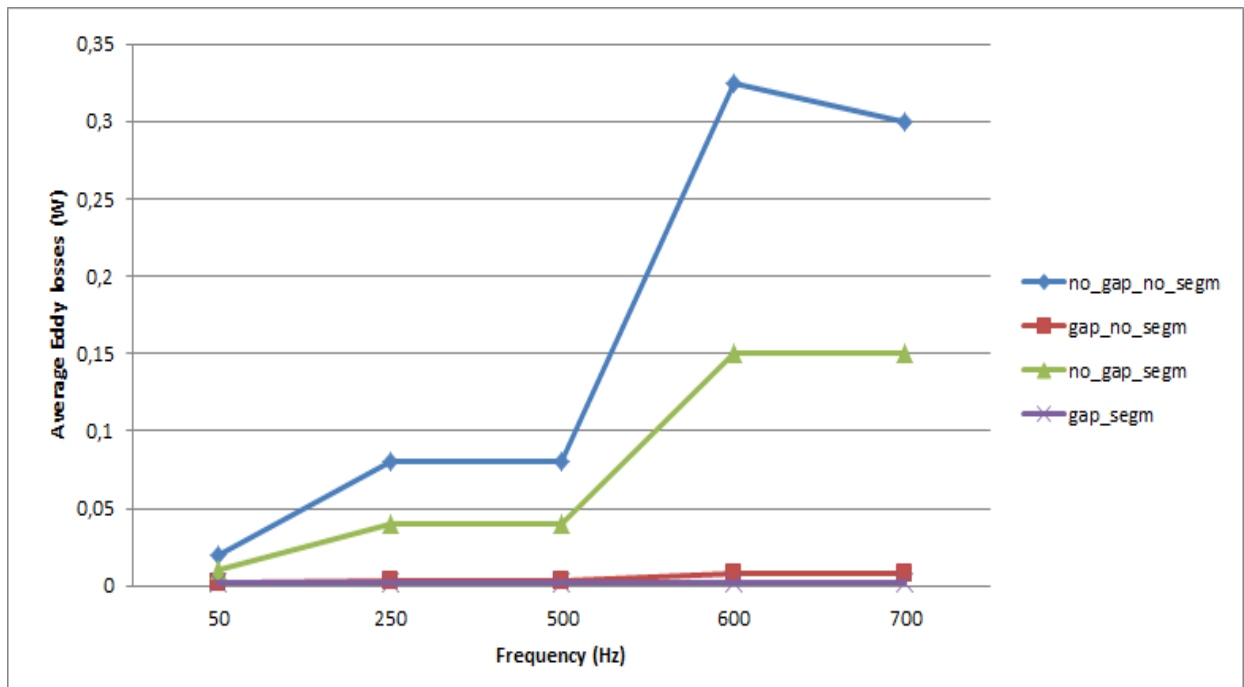
**Σχήμα 4.12:** Περίπτωση διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, με διάκενο 1mm.  
**(α)** Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. **(β)** Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.



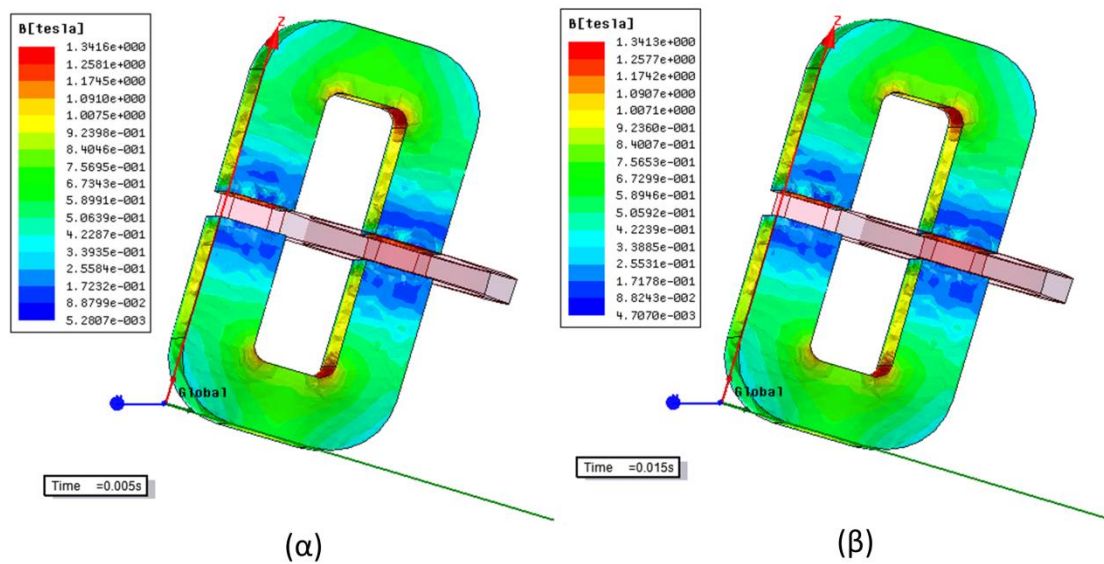
**Σχήμα 4.13:** Περίπτωση διάταξης με κατατετμημένους μαγνήτες, χωρίς διάκενο. (α) Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.



**Σχήμα 4.14:** Περίπτωση διάταξης με κατατετμημένους μαγνήτες, με διάκενο 1mm. (α) Τρισδιάστατη σχεδίαση στο Maxwell. (β) Δημιουργία πλέγματος για την επίλυση του προβλήματος.

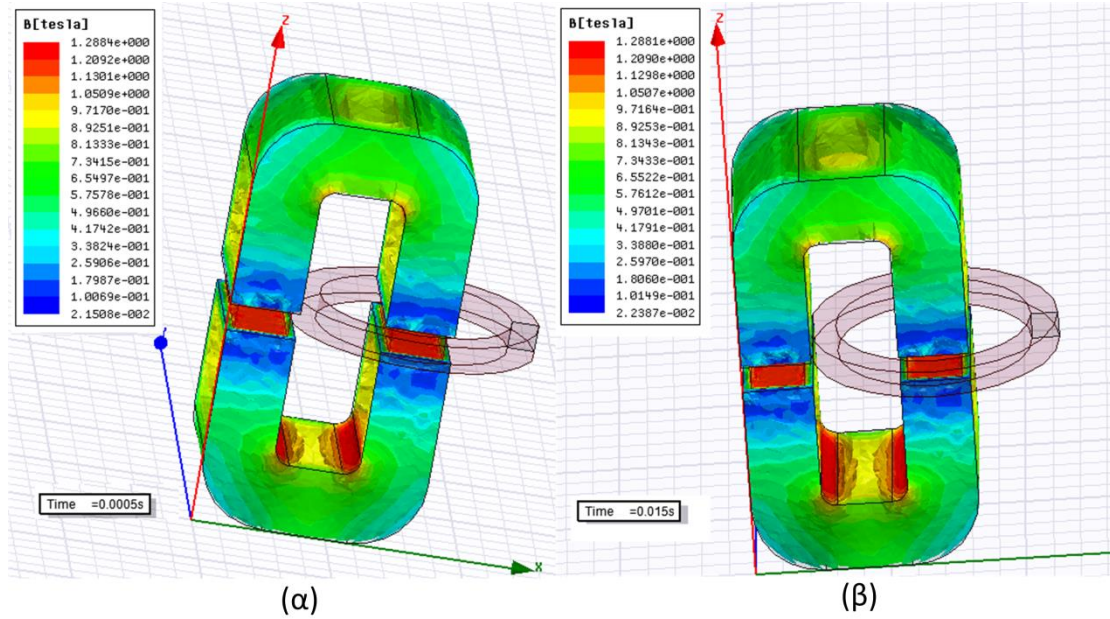


Σχήμα 4.15: Καμπύλες απωλειών ισχύος – συχνότητας στο τρισδιάστατο μοντέλο.

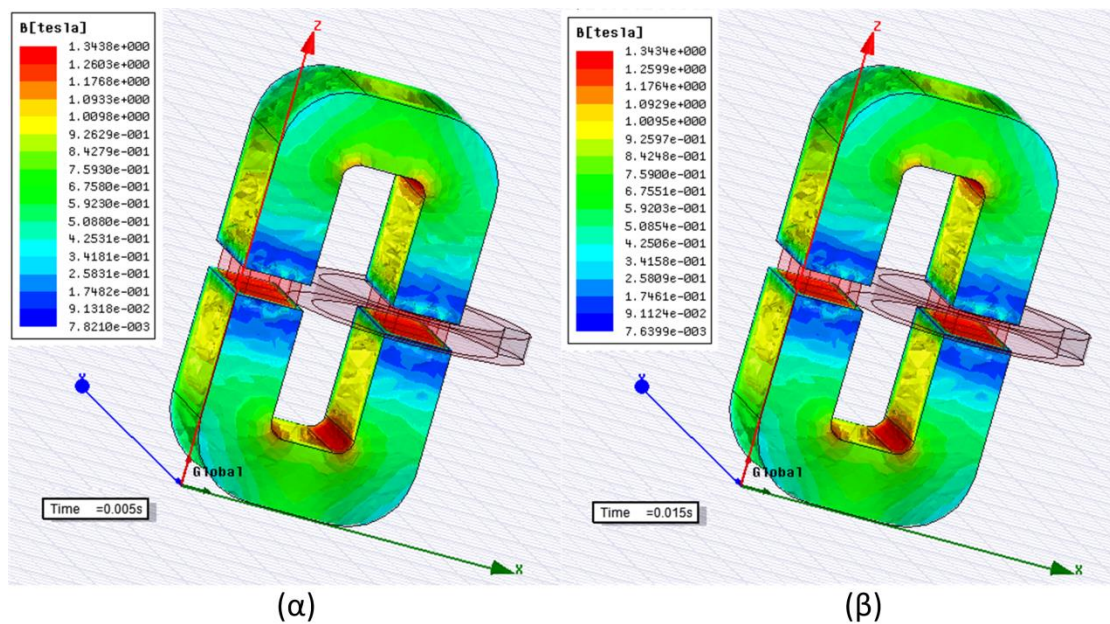


Σχήμα 4.16: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, χωρίς διάκενο στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.

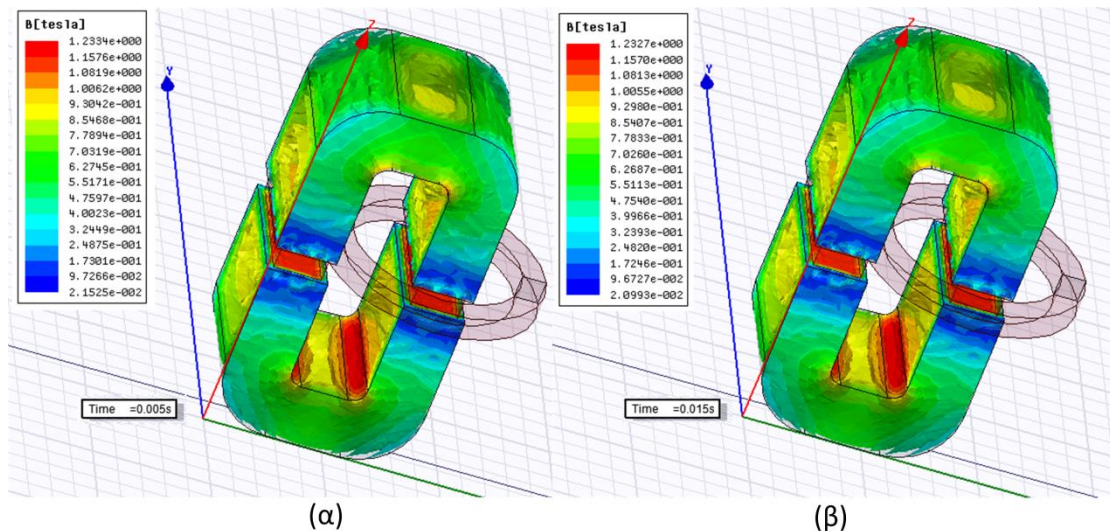




Σχήμα 4.17: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με ενιαίους μαγνήτες, με διάκενο 1mm στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.



Σχήμα 4.18: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με κατατετημημένους μαγνήτες, χωρίς διάκενο στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.



**Σχήμα 4.19: Κατανομή μαγνητικού πεδίου διάταξης με κατατετημένους μαγνήτες, με διάκενο 1mm στη συχνότητα 50 Hz (ενδεικτικά). (α) Μέγιστη τιμή. (β) Ελάχιστη τιμή.**

Η επιλογή σχεδίασης και διερεύνησης των τεσσάρων περιπτώσεων που φαίνονται παραπάνω πραγματοποιήθηκε για την επίτευξη ταυτοχρόνως χαμηλών απωλειών στους μαγνήτες, αλλά και λειτουργίας της διάταξης στη γραμμική περιοχή του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Ο καλύτερος συνδυασμός για το σκοπό αυτό είναι η κατάτμηση του ενιαίου μαγνήτη σε τρεις και η ύπαρξη διακένου 1mm μεταξύ μαγνητών και πυρήνα.

Παρατηρούμε διαφορές μεταξύ του τρισδιάστατου και του δισδιάστατου μοντέλου καθώς κατά την ανάλυση της διάταξης στη δεύτερη περίπτωση γίνεται προσέγγιση της μιας διάστασης. Στη πρώτη περίπτωση το μοντέλο είναι υπερανλυτικό και προσφέρει μεγάλη ακρίβεια.

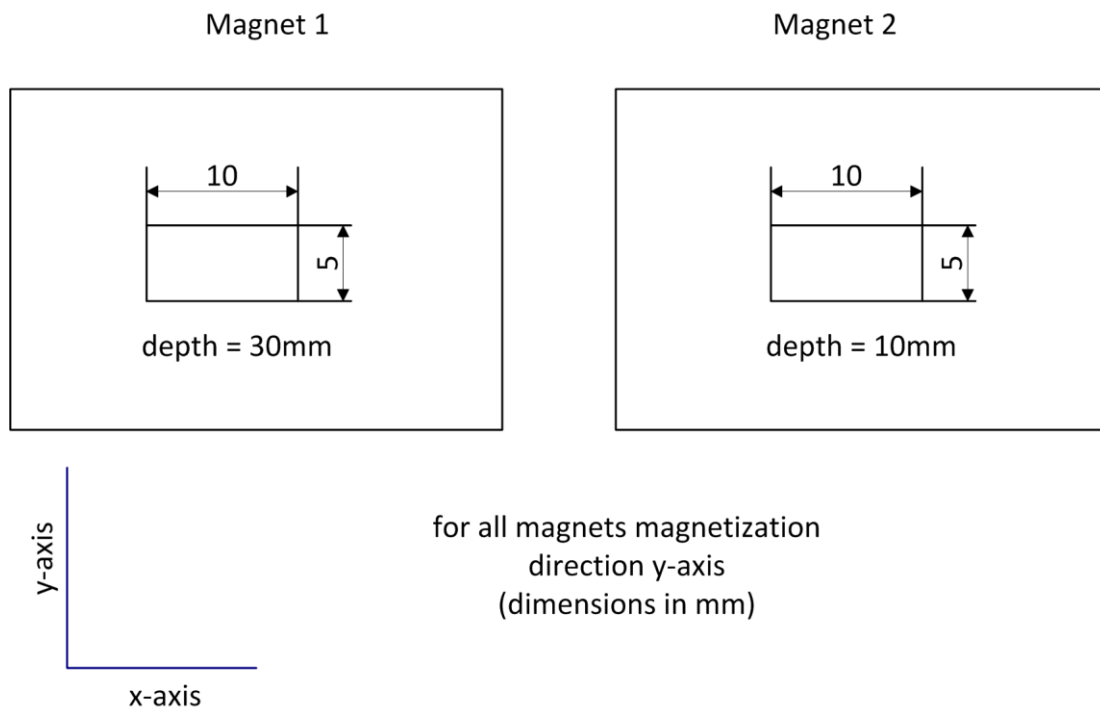
Παρακάτω υλοποιούμε στο εργαστήριο τη τέταρτη περίπτωση διάταξης με κατατετημένους μαγνήτες και διάκενο 1mm που όπως αποδείχθηκε από τις προσομοιώσεις προσφέρει τη καλύτερη κατάσταση λειτουργίας του κυκλώματος. Θα παρατηρηθεί, όπως και στη παραπάνω καμπύλη απωλειών ισχύος - συχνότητας, στη περίπτωση αυτή οι απώλειες είναι περίπου σταθερές και έχουν χαμηλή τιμή.



## 5 Πειραματική επιβεβαίωση αποτελεσμάτων

### 5.1 Κατασκευή πειραματικής διάταξης

Για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε το σχέδιο που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.1: Ηλεκτρομαγνητική διάταξη. Επιπλέον σχεδιάστηκαν οι δύο διαφορετικοί σε διαστάσεις μαγνήτες, που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση και εν συνεχεία κατά την πειραματική διαδικασία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

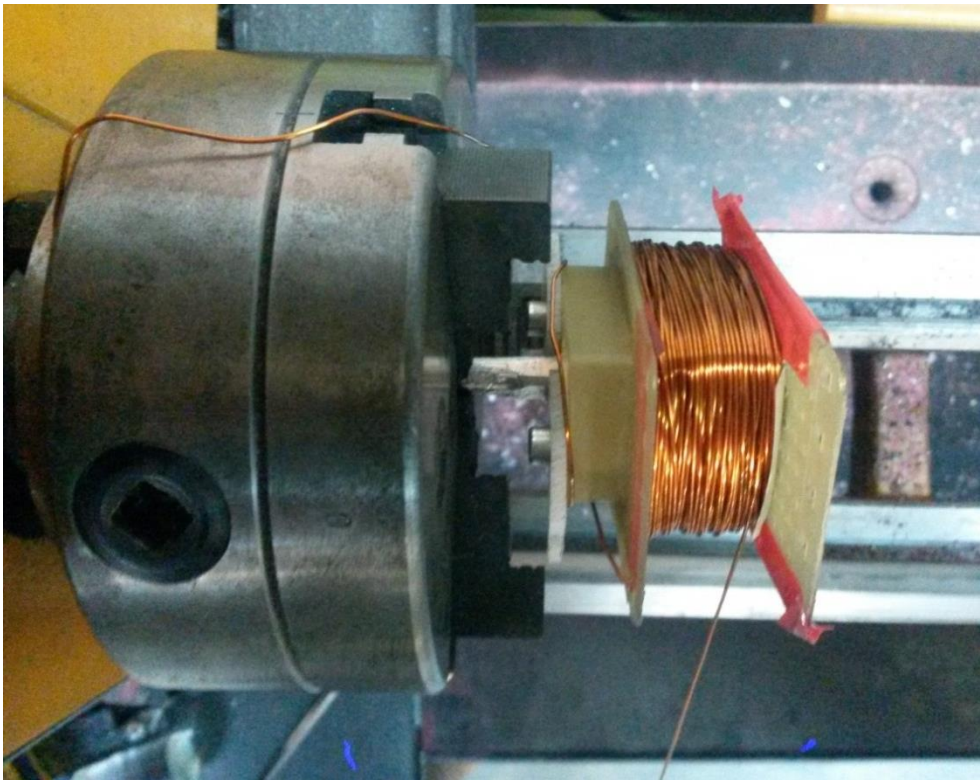


**Σχήμα 5.1: Λεπτομερές σχέδιο με διαστάσεις για τους μόνιμους μαγνήτες της διάταξης.**

Στη συνέχεια γίνεται η συναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών μηχανών και Ηλεκτρονικών ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα επιμέρους μέρη του μαγνητικού κυκλώματος:



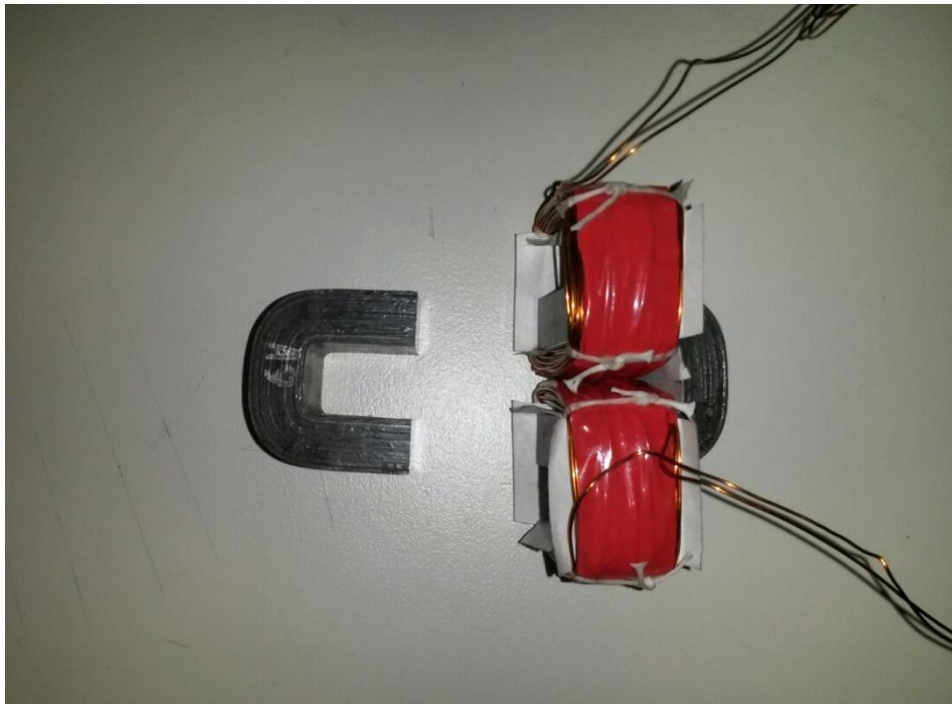
**Σχήμα 5.2: Ο πυρήνας της διάταξης που αποτελείται από λαμαρίνες που έχουν κοπεί από laser CNC.**



**Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπο από τη συναρμολόγηση των πηνίων.**



**Σχήμα 5.4:** Τα δύο πηνία της διάταξης που αποτελούνται από 200 σπείρες το καθένα.



**Σχήμα 5.5:** Το μαγνητικό κύκλωμα χωρίς τους μόνιμους μαγνήτες.

## 5.2 Περιγραφή μετρητικής διάταξης και διαδικασίας

Σε πρώτη φάση επιθυμούμε τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα, που είναι χρήσιμη για την ακριβή μοντελοποίηση της διάταξης, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Για το σκοπό αυτό τροφοδοτούμε τη διάταξη χωρίς τους μαγνήτες, με μηδενικό διάκενο, μέσω ενός αυτομετασχηματιστή, παρέχει ημιτονική τροφοδοσία, με σταθερή συχνότητα 50 Hz και τιμή ρεύματος  $I_{rms} = 0.1 \div 0.965 A$ . Σε κάθε περίπτωση λαμβάνουμε μετρήσεις για την τιμή της επαγόμενης τάσης στο δεύτερο τύλιγμα και παρατηρούμε τις κυματομορφές του ρεύματος εισόδου και της τάσης εισόδου, οι οποίες μας δίνουν στοιχεία για το γόνατο κορεσμού της χαρακτηριστικής καμπύλης της λαμαρίνας.

Σε δεύτερη φάση εξετάζουμε για τη συχνότητα των 50 Hz και τιμή ρεύματος τροφοδοσίας  $I_{rms} = 0.15A$  τις εξής τρεις περιπτώσεις:

1. Μαγνητικό κύκλωμα χωρίς διάκενο και χωρίς μαγνήτες.
2. Μαγνητικό κύκλωμα με διάκενο 6mm, χωρίς μαγνήτες.
3. Μαγνητικό κύκλωμα με διάκενο αέρα 1mm και μαγνήτες 5mm που έχουν καταταμηθεί όπως παρουσιάζεται στη πρώτη παράγραφο του κεφαλαίου.

Στα πειραματικές μετρήσεις που ακολουθούν δεν ασχοληθήκαμε με την περίπτωση του ενιαίου μαγνήτη με μήκος 30mm, καθώς όπως συμπεράναμε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων οι απώλειες είναι μεγαλύτερες, γεγονός μη επιθυμητό για τη λειτουργία της διάταξης.

Τελικά στη τρίτη φάση της πειραματικής διαδικασίας λαμβάνουμε μετρήσεις με τη τροφοδότηση από γεννήτρια μεταβλητών συχνοτήτων, με εύρος  $f = 50 \div 750 Hz$  και ρεύμα τροφοδοσίας  $I_{rms} = 0.15A$ . Το όριο της συχνότητας είναι αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών της γεννήτριας. Παρατηρούμε την κυματομορφή της τάσης εισόδου και πραγματοποιούμε δειγματοληψία σε μία περίοδο για κάθε συχνότητα ώστε να υπολογίσουμε τελικά τη στιγμιαία τιμή της ισχύος εισόδου.

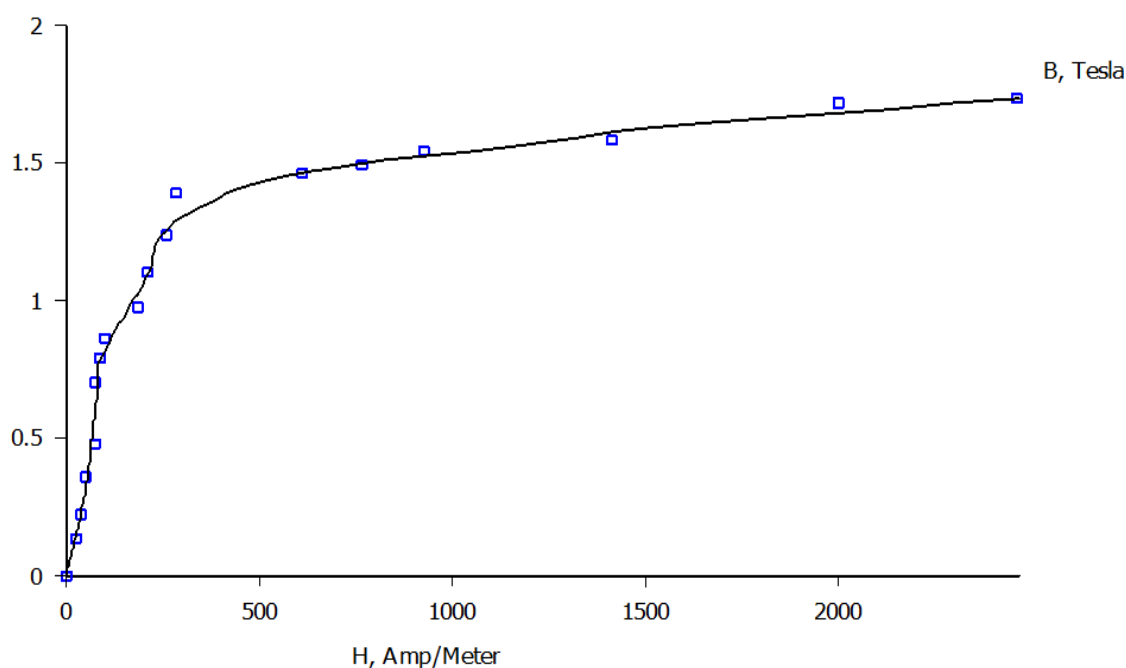
## 5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

Τα αποτελέσματα τις πρώτης φάσης των μετρήσεων επεξεργάζονται κατάλληλα χρησιμοποιώντας το νόμο του Ampere και το νόμο του Faraday. Για την τιμή ρεύματος  $I_{rms} = 0.15A$ , η επαγόμενη στο τύλιγμα τάση είναι  $V_{rms} = 23V$ . Στη τιμή αυτή παρατηρούμε για πρώτη φορά παραμόρφωση στη κυματομορφή της ρεύματος και θεωρούμε ότι είμαστε οριακά στο σημείο κορεσμού του πυρήνα.

Υπολογίζουμε επίσης προσεγγιστικά το μέσο μήκος της διαδρομής της μαγνητικής ροής και προκύπτει  $l_{mean} = 0.1625m$  ενώ η διατομή του πυρήνα έχει επιφάνεια  $s = 4.16 \times 10^{-4}m^2$ .

Επομένως από το νόμο του Ampere προκύπτει η ένταση του μαγνητικού πεδίου ίση με  $H = 261A/m$  και από το νόμο του Faraday προκύπτει η μαγνητική επαγωγή  $B = 1.24T$ .

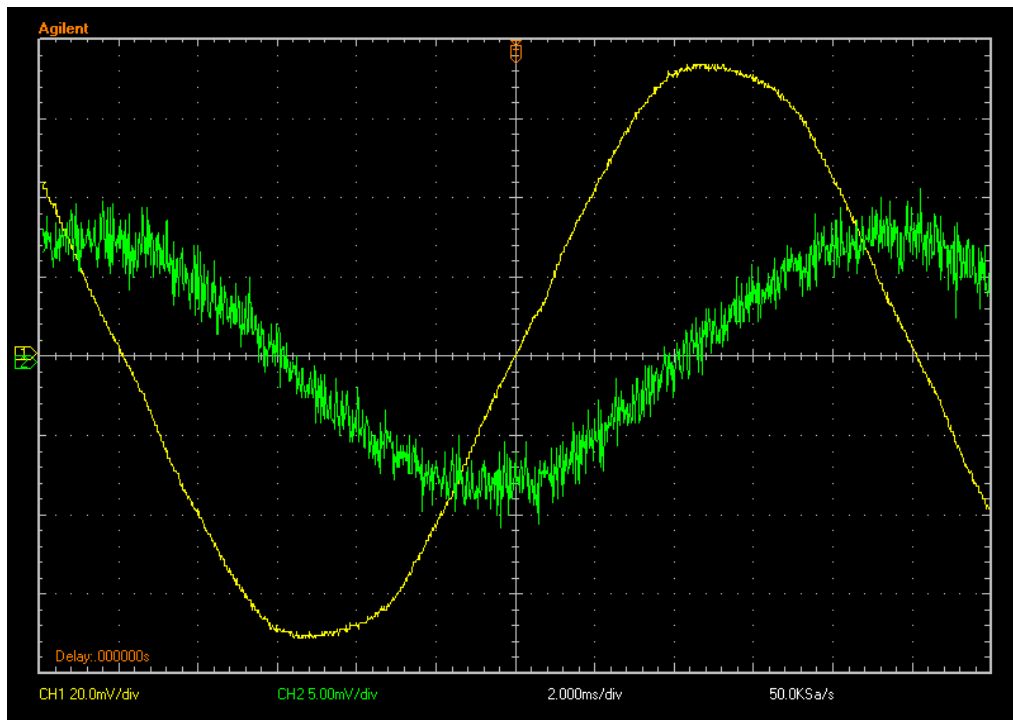
Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται και οι υπόλοιπες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και οι αντίστοιχες τιμές της μαγνητικής επαγωγής. Επομένως μια προσέγγιση της ακριβούς καμπύλης μαγνήτισης του πυρήνα είναι η εξής:



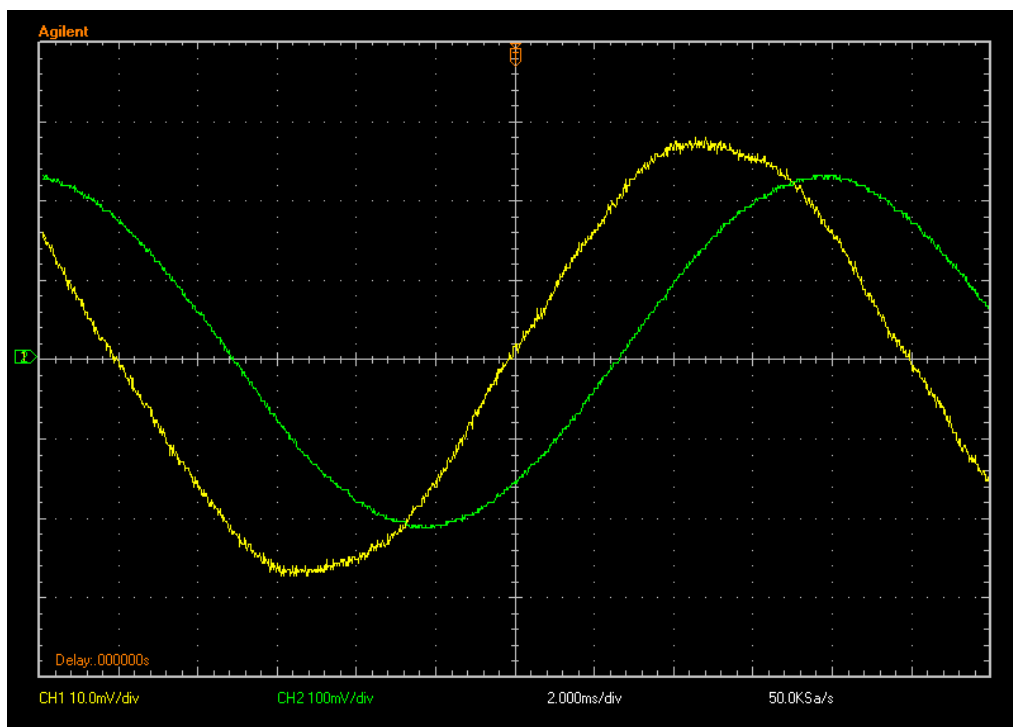
**Σχήμα 5.6: Χαρακτηριστική καμπύλη B-H σιδηρομαγνητικού πυρήνα.**

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το γόνατο κορεσμού της καμπύλης βρίσκεται κοντά στη τιμή κορεσμού, που υπολογίστηκε αριθμητικά  $B = 1.24T$  κατά τη μέτρηση όπου υπήρχε παραμόρφωση στη κυματομορφή του ρεύματος εισόδου.

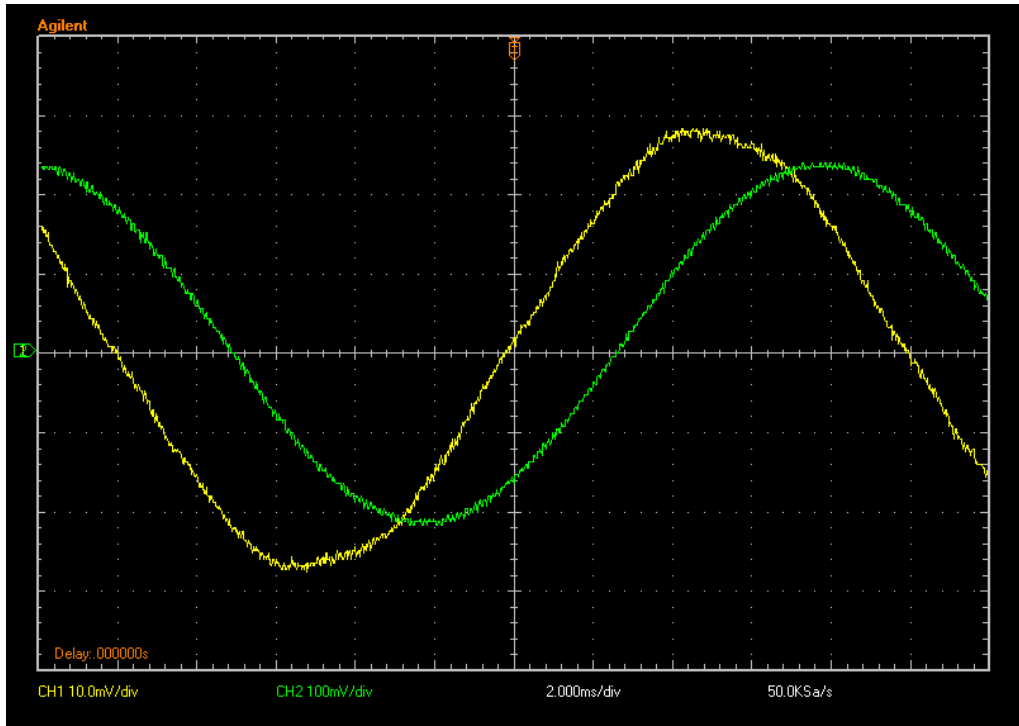
Στη δεύτερη φάση της διαδικασίας λαμβάνουμε τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης εισόδου για τιμές  $I_{rms} = 1.55A$  και  $f = 50Hz$  για κάθε μια από τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως:



**Σχήμα 5.7: 1<sup>η</sup> περίπτωση διάταξης χωρίς διάκενο και μαγνήτες. Τάση εισόδου (κίτρινη καμπύλη), ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη).**



**Σχήμα 5.8: 2<sup>η</sup> περίπτωση διάταξης με διάκενο 6mm, χωρίς μαγνήτες. Τάση εισόδου (κίτρινη καμπύλη), ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη).**



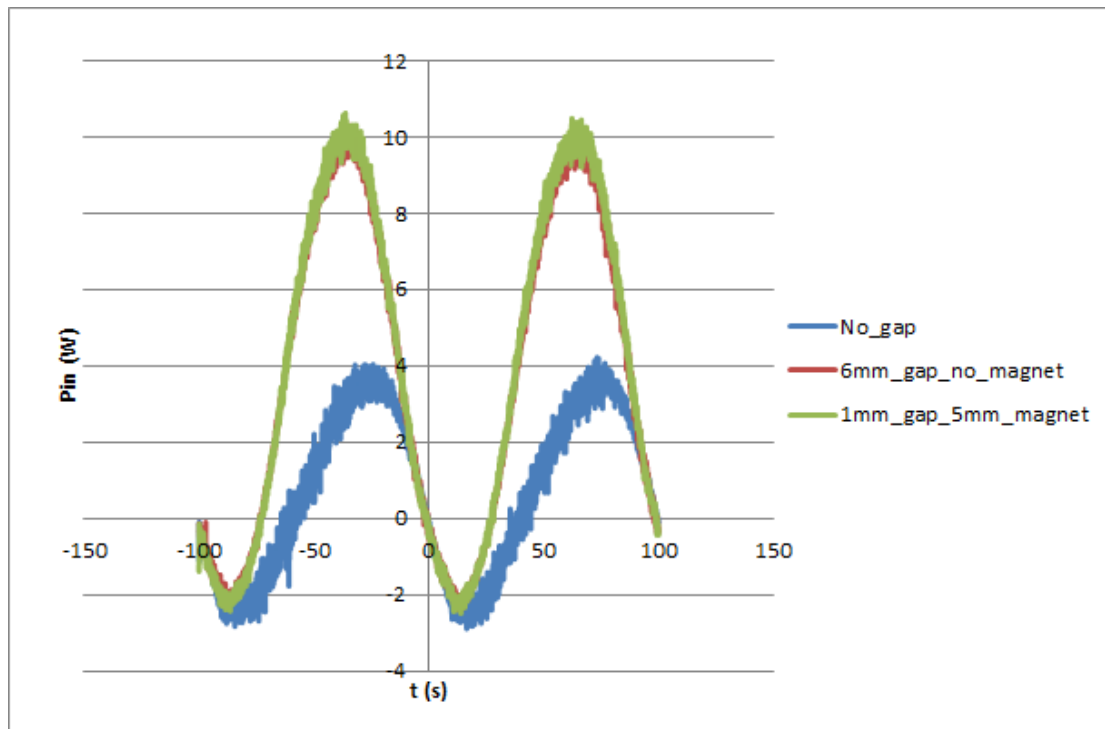
**Σχήμα 5.9: 3<sup>η</sup> περίπτωση διάταξης με διάκενο 1mm και μαγνήτες πάχους 5mm. Τάση εισόδου (κίτρινη καμπύλη), ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη).**

Από τις κυματομορφές αυτές λαμβάνουμε για μία περίοδο 4000 δείγματα, υπολογίζουμε τη μέση τιμή της ισχύος εισόδου και σχεδιάζουμε και τη κυματομορφή της ισχύος εισόδου. Σκοπός μας είναι να παρατηρήσουμε τυχούσες μεταβολές στην απαιτήσις ισχύος του μαγνητικού κυκλώματος αναλόγως τη περίπτωση.

Στη πρώτη περίπτωση, όπου το διάκενο είναι μηδενικό και δεν υπάρχουν μαγνήτες, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στις απαιτήσις ισχύος περιλαμβάνονται και οι απώλειες του πυρήνα. Δεδομένων των τιμών της τροφοδοσίας δε θα θεωρήσουμε μεγάλο ποσοστό απωλειών χαλκού στη πρώτη αυτή περίπτωση.

Ωστόσο στη δεύτερη περίπτωση σημαντικό μέρος των απωλειών καταλαμβάνουν και οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων, που έχουν ως αποτέλεσμα και την αύξηση της θερμοκρασίας του κυκλώματος.

Τέλος στη τρίτη περίπτωση παρατηρούμε ότι η μεταβολή στη μέση παρεχόμενη ισχύ είναι αρκετά περιορισμένη, σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση. Επιπλέον παρατηρούμε παρακάτω ότι η μεταβολή της ισχύος σε μία περίοδο και στις δύο αυτές περιπτώσεις δεν εμφανίζει ουσιαστική διαφορά. Αυτό το γεγονός μας οδηγεί αναγκαστικά στη τρίτη φάση της πειραματικής διαδικασίας και στη τροφοδότηση του κυκλώματος με γεννήτρια μεταβλητών συχνοτήτων.



**Σχήμα 5.10: Κυματομορφές ισχύος εισόδου στις 3 παραπάνω περιπτώσεις.**

Η μέση τιμή της ισχύος είναι για κάθε περίπτωση:

1. Διάταξη χωρίς διάκενο ή μαγνήτες:  $P_{in} = 0.692W$ .
2. Διάταξη με διάκενο 6mm, χωρίς μαγνήτες:  $P_{in} = 3.77W$ .
3. Διάταξη με διάκενο 1mm και μαγνήτες 5mm:  $P_{in} = 3.91W$

Επιπλέον με ένα απλό πολύμετρο μετρήσαμε την αντίσταση του πυρήνα και προέκυψε ίση με  $1.3\Omega$ . Υπολογίζονται, λοιπόν οι απώλειες χαλκού ίσες με  $I^2 \times R = 2.925W$ . Επομένως συμπεραίνουμε από τα παραπάνω ότι στο μαγνητικό κύκλωμα η μεγαλύτερη κατανάλωσης ισχύος παρατηρείται στα τυλίγματα.

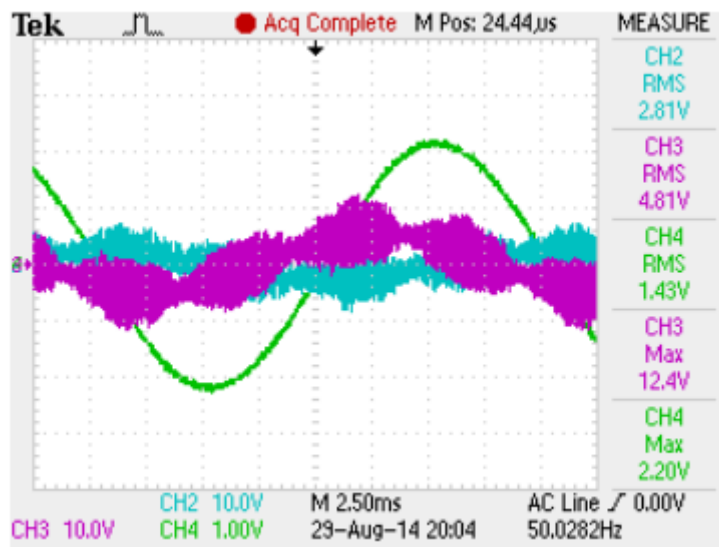


Στη τρίτη και τελευταία φάση της διαδικασίας χρησιμοποιούμε τη διάταξη ολοκληρωμένη με 3 μαγνήτες σε κάθε πλευρά και διάκενο 1mm. Θεωρούμε σταθερό το ρεύμα διέγερσης  $I_{rms} = 1.55A$  και μεταβάλλουμε σταδιακά τη συχνότητα τροφοδοσίας.

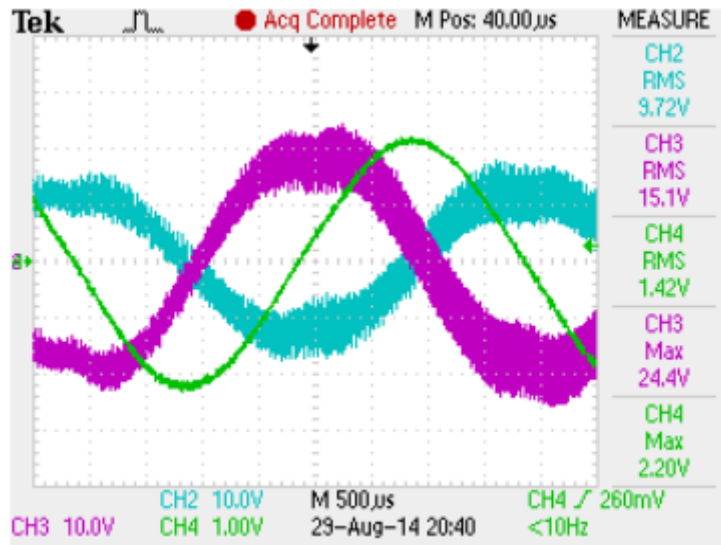
Αντίστοιχα όπως και στη προηγούμενη φάση της πειραματικής διαδικασίας λαμβάνουμε τις κυματομορφές ρεύματος και τάσης εισόδου. Από τις κυματομορφές αυτές λαμβάνουμε συνολικά 2500 δείγματα. Ωστόσο σε κάθε συχνότητα τροφοδοσίας αντιστοιχεί μέρος των δειγμάτων αυτών, ανάλογα με τη περίοδο. Από τα δείγματα αυτά, υπολογίζουμε τη μέση τιμή της ισχύος εισόδου και σχεδιάζουμε και τη κυματομορφή της ισχύος εισόδου. Σκοπός μας είναι να παρατηρήσουμε τυχούσες μεταβολές στην απαιτήσις ισχύος του μαγνητικού κυκλώματος σχετικά με τη μεταβολή στη συχνότητα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και έπειτα παρατίθενται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσεως εισόδου καθώς και η επαγόμενη τάση για κάθε συχνότητα τροφοδοσίας:

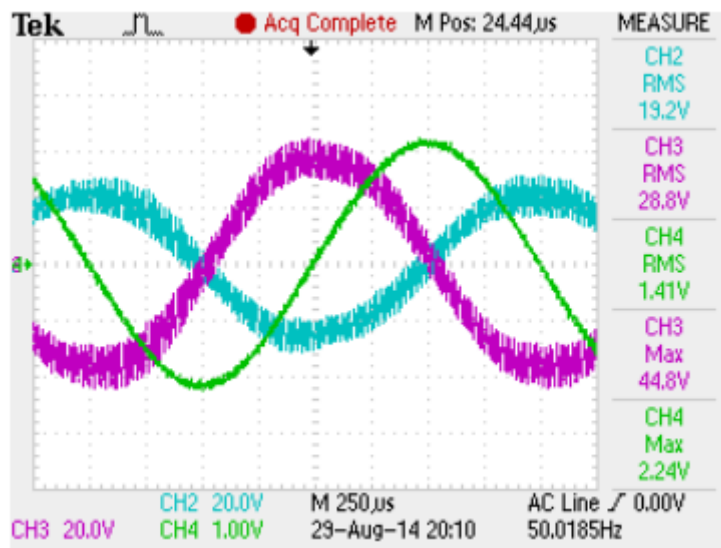
| f (Hz) | $I_{rms}$ (A) | $V_{in,rms}$ (V) | $E_{rms}$ (V) | $P_{in,mean}$ (W) |
|--------|---------------|------------------|---------------|-------------------|
| 50     | 1.5           | 4.8              | 2.8           | 3.72              |
| 250    | 1.5           | 15.1             | 9.7           | 4.13              |
| 500    | 1.5           | 28.8             | 19.2          | 4.10              |
| 550    | 1.5           | 30.1             | 20.0          | 3.89              |
| 600    | 1.5           | 32.7             | 21.9          | 4.17              |
| 625    | 1.5           | 32.8             | 22.0          | 3.83              |
| 700    | 1.5           | 34.9             | 23.5          | 3.34              |
| 750    | 0.55          | 15.6             | 10.5          | 0.56              |



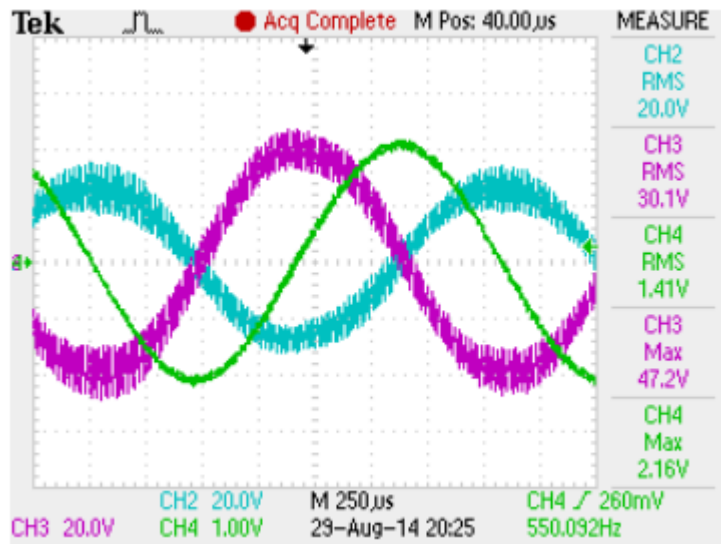
**Σχήμα 5.11:** Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 50\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).



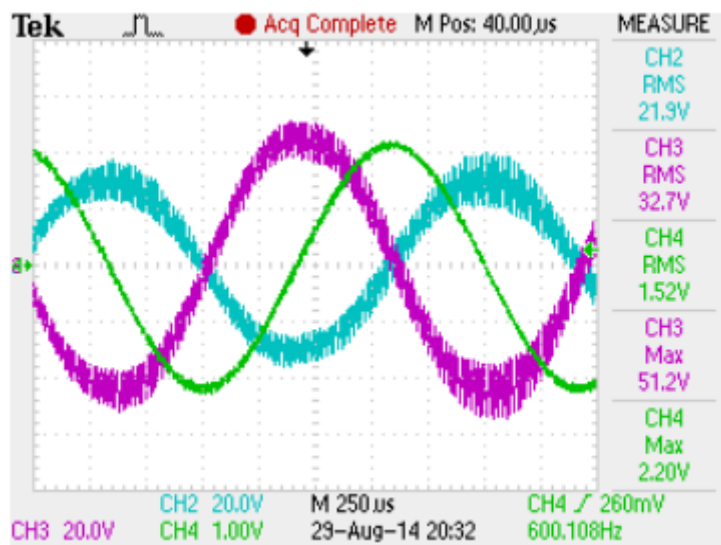
Σχήμα 5.12: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 250\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).



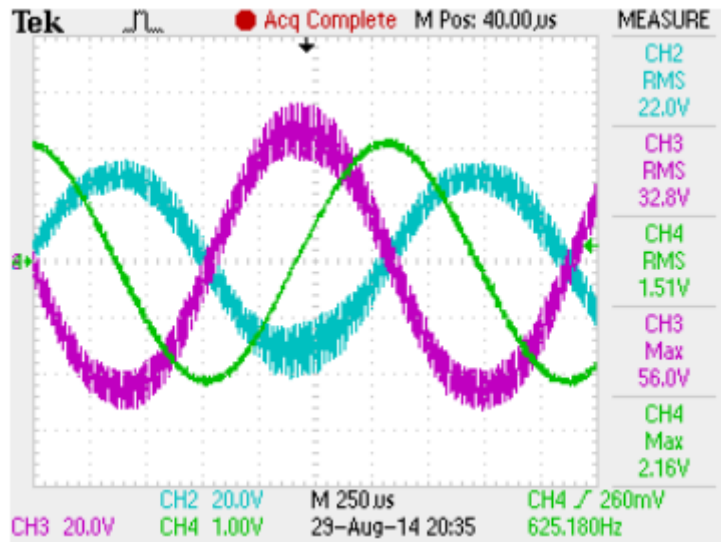
Σχήμα 5.13: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 500\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).



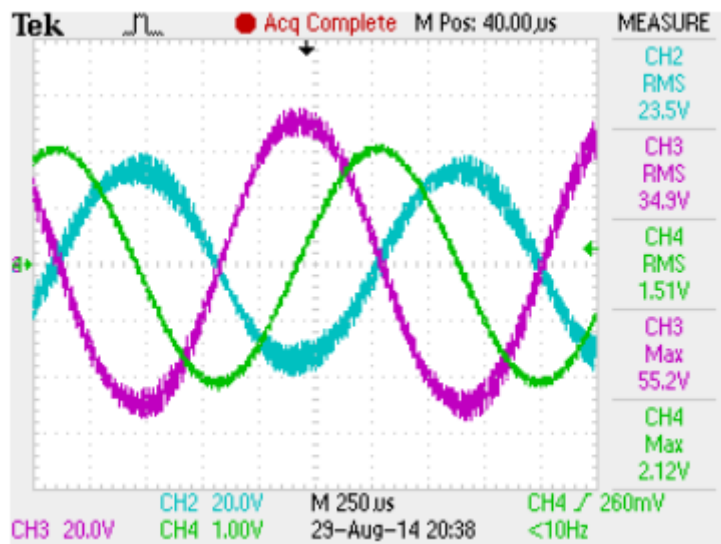
Σχήμα 5.14: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 550\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).



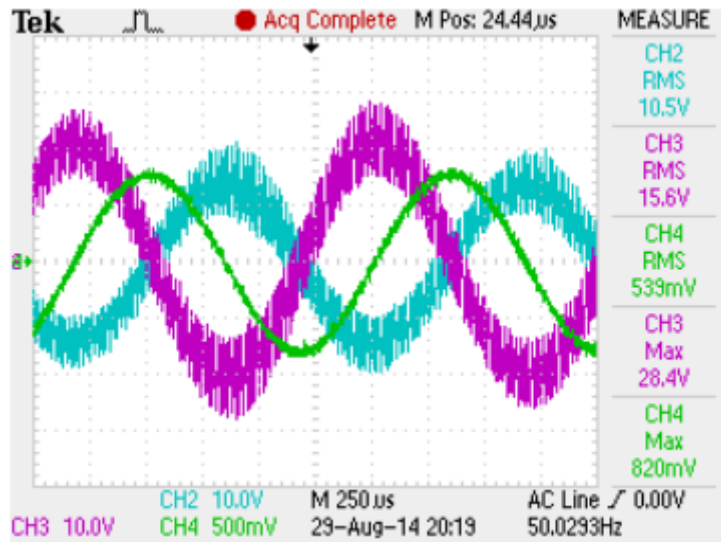
Σχήμα 5.15: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 600\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).



Σχήμα 5.16: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 625\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).

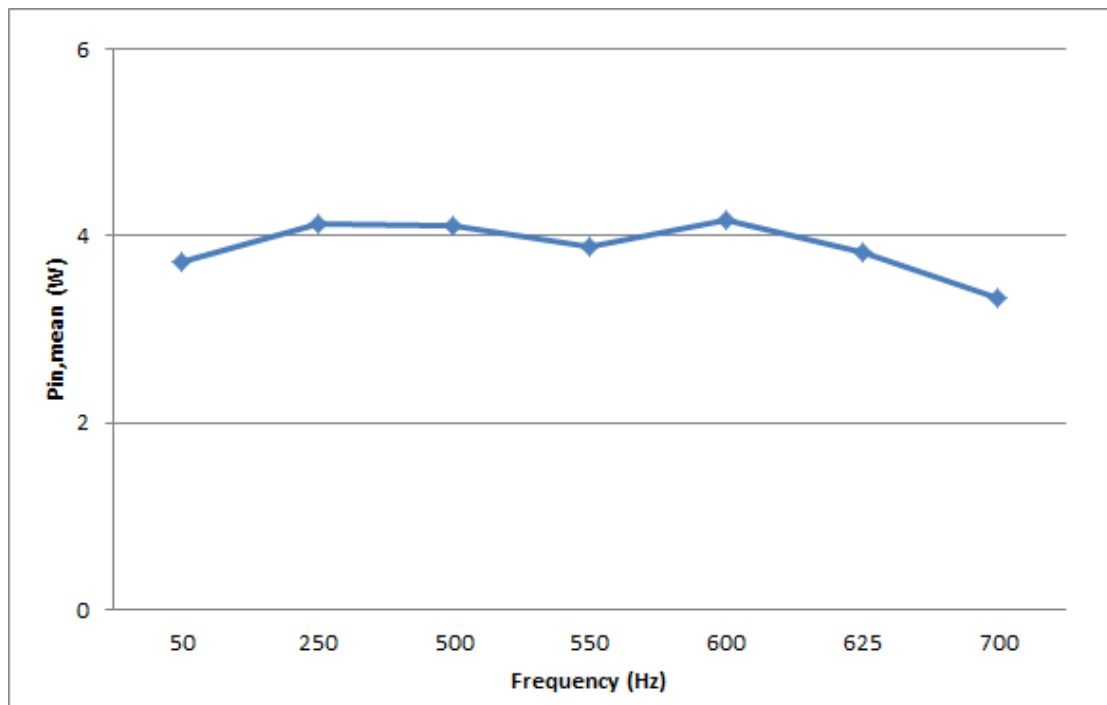


Σχήμα 5.17: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 700\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).



Σχήμα 5.18: Κυματομορφές για συχνότητα τροφοδοσίας  $f = 750\text{Hz}$ . Ρεύμα εισόδου (πράσινη καμπύλη), Τάση εισόδου (μωβ καμπύλη), Επαγόμενη τάση (μπλε καμπύλη).

Στη τελευταία αυτή φάση του πειράματος επιδιώκουμε μεγαλύτερη ακρίβεια. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία προκύπτει η καμπύλη της μεταβολής ισχύος ως εξής:



Σχήμα 5.19: Καμπύλη μεταβολής ισχύος σε σχέση με τη συχνότητα τροφοδοσίας.



## 6 Συμπεράσματα

### 6.1 Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας

Η εργασία αυτή είχε ως στόχο τη διερεύνηση των απωλειών μονίμων μαγνητών σε ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα, που τροφοδοτείται με συχνότητες αντίστοιχες των ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών. Για τη διερεύνηση αυτή, μοντελοποιήθηκε και αναλύθηκε η ηλεκτρομαγνητική διάταξη, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Εκτός από τη σχεδίαση του κυκλώματος με στόχο τη μείωση των απωλειών δινορρευμάτων, επιδιώχθηκε η λειτουργία της διάταξης στη γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού πυρήνα.

Τελικά το εν λόγω μαγνητικό κύκλωμα υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών ισχύος και διεξήχθησαν οι κατάλληλες πειραματικές διαδικασίες για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σχεδίαση και υλοποίηση της συγκεκριμένης ηλεκτρομαγνητικής διάταξης είναι τα εξής:

- Για τη μοντελοποίηση μιας παρόμοιας ηλεκτρομαγνητικής διάταξης, απαιτείται εκτός από τη δισδιάστατη ανάλυση και η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ακριβής προσομοίωση της κατάτμησης των μαγνητών.
- Για την επιλογή του πλήθους των μαγνητών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η χρησιμότητα της διάταξης και οι συνθήκες λειτουργίας αυτής. Επιπλέον σημαντικό είναι να γνωρίζουμε τα διάφορα φαινόμενα που διέπουν τα δινορρεύματα, ώστε κατά τη διαστασιολόγηση των μαγνητών να αποφύγουμε αντίθετα από τα αναμενόμενα αποτελέσματα.
- Για τις πειραματικές μετρήσεις σημαντική είναι η συμμετρία του κυκλώματος και η απόλυτη ευθυγράμμιση αυτού, καθώς και η λειτουργία σε μικρό ρεύμα τροφοδοσίας. Με τον τρόπο αυτό διατηρούμε τις

απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων γενικά σε χαμηλό επίπεδο και οι απαιτήσεις ισχύος του κυκλώματος θα αναφέρονται αποκλειστικά στις απώλειες ισχύος στους μόνιμους μαγνήτες.

- Σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του κατάλληλου διακένου μεταξύ των δύο μερών του πυρήνα καθώς έτσι διασφαλίζεται η λειτουργία του στη γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης. Ωστόσο για το λόγο αυτό πρέπει να δοθεί έμφαση και στη επιλογή των μαγνητών και το μόνιμο πεδίο που δημιουργούν.
- Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Femm στερείται της δυνατότητας υπολογισμού της κατανομής της υπέρθεσης του εναλλασσόμενου πεδίου και του πεδίου που δημιουργούν οι μαγνήτες.
- Όσον αφορά στα δισδιάστατα μοντέλα, στα προγράμματα Femm και Maxwell, παρατηρούμε ότι συμφωνούν ως προς τη μορφή της καμπύλης απωλειών ισχύος, αλλά υπάρχουν διαφορές ως προς τα απόλυτα νούμερα. Αυτό συμβαίνει λόγω της χρήσης διαφορετικής μεθόδου επίλυσης και υπολογισμού τω απωλειών ισχύος από τα δύο προγράμματα
- Η προσομοίωση των χαρακτηριστικών του κυκλώματος σε τρεις διαστάσεις και της λειτουργίας του αποδεικνύεται αρκετά απαιτητική διαδικασία σε υπολογιστική ισχύ και πολυπλοκότητα.
- Τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης στο προγραμματιστικό περιβάλλον Maxwell επιβεβαιώνουν την αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σύμφωνα με τα οποία στις συχνότητες που εξετάζουμε δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των απωλειών δινορρευμάτων για τους μαγνήτες που επιλέξαμε κατά τη μοντελοποίηση. Η ισχύς εισόδου έχει μικρή διακύμανση γύρω από μια τιμή με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιείται επιτυχώς η διερεύνηση των απωλειών.

## 6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Για την επίτευξη της μοντελοποίησης του μαγνητικού κυκλώματος και της πειραματικής υλοποίησης αυτού κρίθηκε αναγκαίο να αναπτυχθούν νέες τεχνικές στα παρακάτω σημεία :

- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση του μαγνητικού κυκλώματος για τη διευκόλυνση δοκιμών σχετικά με τη τελική επιλογή της προς κατασκευή πειραματικής διάταξης.
- Η αναλυτική μοντελοποίηση του μαγνητικού κυκλώματος σε τρεις διαστάσεις στο προγραμματιστικό περιβάλλον Maxwell, εξαιτίας της φύσης του προβλήματος και της απαίτησης της κατάτμησης των μαγνητών που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.



- Η πειραματική επιβεβαίωση με κατάλληλο μαγνητικό κύκλωμα και μαγνήτες υψηλής ισχύος, νέας τεχνολογίας NdFeB.
- Η τροφοδότηση του κυκλώματος από γεννήτρια μεταβλητής συχνότητας, για τη καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας μηχανών μονίμων μαγνητών.

### 6.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία που χρήζουν συμπληρωματικής διερεύνησης. Προτείνεται μελλοντική εργασία στα παρακάτω θέματα:

- Η προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης και η πειραματική επιβεβαίωση αυτής σε συχνότητες της τάξεως των kHz.
- Η εφαρμογή, εκτός της ημιτονικής τροφοδοσίας, παλμών ή SPWM κυματομορφών που εισάγουν και ανώτερες αρμονικές εκτός της θεμελιώδους.
- Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων με αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού των απωλειών δινορρευμάτων.
- Αντίστοιχη μοντελοποίηση διάταξης κινητήρα, με πολυπλοκότερη γεωμετρία και απαιτήσεις ισχύος.
- Τρισδιάστατη μοντελοποίηση διάταξης κινητήρα και πειραματική επιβεβαίωση των προσομοιώσεων.
- Εύρεση βέλτιστης κατάτμησης μαγνητών κινητήρα με βάση τη γεωμετρία του κυκλώματος.

## Βιβλιογραφία

- [1] Mehran Mirzaei, Andreas Binder, Bogdan Funieru, and Marko Susic, *Analytical Calculations of Induced Eddy Currents Losses in the Magnets of Surface Mounted PM Machines With Consideration of Circumferential and Axial Segmentation Effects*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 12, DECEMBER 2012
- [2] Shinichi Kanazawa, Norio Takahashi and Takeharu Kubo, *Measurement and Analysis of AC Loss of NdFeB Sintered Magnet*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 154, No. 4, 2006
- [3] Juha Pyrhönen , Hanne Jussila , Yuliya Alexandrova , Pavol Rafajdus , and Janne Nerg, *Harmonic Loss Calculation in Rotor Surface Permanent Magnets—New Analytic Approach*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 8, AUGUST 2012
- [4] Stephen Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 4th edition, New York, 2005, McGraw-Hill.
- [5] William Hayt, *Engineering Electromagnetics*, 4th edition, New York, 1981, McGraw-Hill.
- [6] Αναστάσιος Δούκας, *Σύγκριση Απωλειών Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου και Μαγνητικής Λαμαρίνας για Εφαρμογές Μηχανών Μονίμων Μαγνητών*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2012, ΕΜΠ.
- [7] Κωνσταντίνος Λάσκαρης, *Σχεδιασμός και κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικά οχήματα*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.
- [8] J. Tegopoulos and E. Kriezis, *Eddy Currents in Linear Conducting Media*, 1985, ELSEVIER.
- [9] Δημήτριος Αγριοστάθης, *Προσομοίωση δινορρευμάτων και αντίστοιχων απωλειών σε επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες κινητήρων συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικής αύλακας*, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2014, ΕΜΠ.
- [10] K. Hameyer and R. Belmans, *Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*, 1999, WIT Press

- [11] David Meeker, *Finite Element Method Magnetics User's Manual*, Version 4.2, October 2010.
  
- [12] David Håkansson and Jenny Larsson, *Evaluation of software using the finite element method by simulating transformers and inductors*, Linköping 2011, Linköping University, Institute of Technology
  
- [13] Wan-Ying Huang, Adel Bettayeb, Robert Kaczmarek and Jean-Claude Vannier, *Optimization of Magnet Segmentation for Reduction of Eddy-Current Losses in Permanent Magnet Synchronous Machine*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 25, NO. 2, JUNE 2010