



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

Σύγκριση Απωλειών Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου και Μαγνητικής Λαμαρίνας για Εφαρμογές Μηχανών Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δούκας Π. Αναστάσιος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



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

Σύγκριση Απωλειών Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου και Μαγνητικής Λαμαρίνας για Εφαρμογές Μηχανών Μονίμων Μαγνητών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δούκας Π. Αναστάσιος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20 Ιουλίου 2012.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



Δούκας Π. Αναστάσιος

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

Copyright © Δούκας Π. Αναστάσιος, 2012.

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.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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 την άψογη συνεργασία κατά τη διάρκεια κάθε βήματος προς την περάτωση της εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στους Διδάκτορες κ. Παναγιώτη Ροβολή και κ. Χάρη Πάτσιο και στον Τεχνικό κ. Παναγιώτη Ζάννη για την καταλυτική τους βοήθεια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την παραχώρηση του δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου προκειμένου να διεξαχθούν οι πειραματικές μετρήσεις.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στους φίλους και την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα των απωλειών πυρήνα σε σιδηρομαγνητικά υλικά χαμηλών απωλειών. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνονται σε ένα πρώτο βήμα οι απώλειες πυρήνα υμενίων άμορφου σιδήρου πάχους 25 μm με τα χαρακτηριστικά μαγνητικής λαμαρίνας χαμηλών απωλειών πάχους 0.35 mm. Ακολούθως σε ένα δεύτερο βήμα σχεδιάζονται και προσομοιώνονται αντίστοιχα μαγνητικά κυκλώματα μηχανών μονίμων μαγνητών κατασκευασμένων από τα δύο προαναφερόμενα υλικά σε εφαρμογή κινητηρίου συστήματος ισχύος 2.5 kW.

Αρχικά, πραγματοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση των ιδιοτήτων των σιδηρομαγνητικών υλικών με έμφαση στην ανάλυση των μαγνητικών ιδιοτήτων του άμορφου σιδήρου και των μαγνητικών λαμαρίνων μή κατευθυνόμενων κόκκων υπό το πρίσμα μικροσκοπικής κλίμακας. Στη συνέχεια, επιχειρείται ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των απωλειών πυρήνα στα προαναφερόμενα σιδηρομαγνητικά υλικά, μέσω κατάστρωσης των εξισώσεων που περιγράφουν την εξάρτηση των απωλειών από τα χαρακτηριστικά του υλικού και της επιβαλλόμενης διέγερσης.

Ακολουθεί πειραματική καταγραφή των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. Για τις μετρήσεις υιοθετείται πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των απωλειών πυρήνα σε τοροειδές δοκίμιο, αντίστοιχη με τη μέθοδο Epstein για τις μαγνητικές λαμαρίνες. Τα πειραματικά αποτελέσματα των απωλειών του υλικού αυτού συγκρίνονται με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A.

Σε ένα δεύτερο βήμα η σύγκριση των δύο υλικών επεκτείνεται σε μαγνητικά κυκλώματα μηχανών μονίμων μαγνητών κατασκευασμένων από τα δύο προαναφερόμενα υλικά. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάζονται και συγκρίνονται δύο ισοδύναμες μηχανές μονίμων μαγνητών που περιλαμβάνουν στο μαγνητικό κύκλωμα του στάτη άμορφο σίδηρο και μαγνητική λαμαρίνα M235-35A. Μελετάται διεξοδικά η επίδοση και η απόδοση κάθε μηχανής μέσω πεδιακής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για ένα ευρύ φάσμα φορτίσεων. Ακόμα, δίνεται έμφαση στη βελτίωση της ακρίβειας της μεθοδολογίας υπολογισμού των απωλειών πυρήνα, αξιοποιώντας την προηγούμενη ανάλυση.

Λέξεις Κλειδιά: Απώλειες πυρήνα, υμένια άμορφου σιδήρου, μαγνητική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών, μέθοδος Epstein, μηχανή μονίμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

ABSTRACT

The present thesis analyses core losses in ferromagnetic materials. More specifically, in a first step the measured core losses of an amorphous iron ribbon test specimen (thickness 25 μm) are compared to those of a low loss ferromagnetic sheet (thickness 0.35 mm). Subsequently, these two materials are used and compared in the design of respective magnetic circuits of permanent magnet motors, intended for a 2.5 kW drive system application.

Firstly, a literature survey has been undertaken concerning the properties of ferromagnetic materials with emphasis on the analysis of amorphous and laminated iron magnetic properties at a microscopic scale. Moreover, a quantitative analysis of core losses in the above mentioned ferromagnetic materials is performed, by elaborating equations describing the dependence of these losses on the material characteristics and the applied excitation.

In addition magnetic properties of an amorphous iron test specimen produced in the Laboratory of Metallurgy of the Faculty of Mining Engineering - Metallurgical Engineering of NTUA, have been measured. The adopted procedures for the measurements in the toroidal amorphous iron specimen, are similar to the Epstein device ones for laminated materials. The amorphous material iron loss experimental results are compared to the low loss steel laminations M235-35A ones.

In a second step, the comparison of the above mentioned two magnetic materials is extended to the design of respective magnetic circuits for permanent magnet motors (PMM). More specifically, two PMM's implementing in their magnetic circuits amorphous iron and laminations M235-35A are designed and compared. Their performance and efficiency are simulated and compared through field analysis by using the finite element method, under a wide range of loading conditions. Furthermore, special attention is paid to the accuracy improvement of the core losses computation method, by exploiting the previous analysis.

Keywords: Core losses, amorphous iron ribbons, low loss steel laminations, Epstein frame method, permanent magnet motor, finite element method.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	11
1.1 Σκοπός εργασίας	11
1.2 Δομή εργασίας	12
1.3 Συμβολή στην προαγωγή της επιστήμης	13
Κεφάλαιο 2: Απώλειες Πυρήνα και Προσδιορισμός τους	14
2.1 Μικροσκοπική περιγραφή των σιδηρομαγνητικών υλικών.....	14
2.2 Απώλειες οφειλόμενες σε υστέρηση.....	16
2.3 Απώλειες οφειλόμενες σε δινορρεύματα	19
2.4 Συνολικές απώλειες πυρήνα	21
2.4.1 Τρόποι περιορισμού των απωλειών πυρήνα	22
2.5 Μέθοδος μέτρησης απωλειών πυρήνα με τη διάταξη Epstein	24
2.5.1 Διαδικασία μετρήσεων με τη διάταξη Epstein.....	27
2.6 Βιβλιογραφία.....	30
Κεφάλαιο 3: Πειραματικός Προσδιορισμός Απωλειών Πυρήνα σε Άμορφο Σίδηρο	31
3.1 Ιδιότητες και μικροσκοπική περιγραφή άμορφων μετάλλων	31
3.1.1 Η άμορφη δομή της ύλης.....	31
3.1.2 Ιδιότητες άμορφων μετάλλων	33
3.1.3 Εφαρμογές Άμορφων Μετάλλων	36
3.2 Μετρητική διάταξη απωλειών πυρήνα σε δοκίμιο άμορφου σιδήρου	37
3.2.1 Περιγραφή δοκιμίου άμορφου σιδήρου	37
3.2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης	38
3.2.3 Μετρητική διαδικασία	39
3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων	43
3.3.1α Μετρήσεις στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου για συχνότητα $f = 50\text{Hz}$	43
3.3.1β Μετρήσεις στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου για συχνότητα $f = 100\text{Hz}$	47
3.3.1γ Μετρήσεις στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου για συχνότητα $f = 125\text{Hz}$ και τελικά συμπεράσματα.....	47
3.3.2 Διαγράμματα για τη λαμαρίνα M235-35A & σύγκριση με άμορφο σίδηρο .51	
3.4 Βιβλιογραφία.....	57

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή Υπολογισμού Απωλειών Πυρήνα σε Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών.....	58
4.1 Ανάλυση της γεωμετρίας των μοντέλων.....	58
4.2 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	60
4.2.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα	61
4.2.2 Οριακές συνθήκες	62
4.2.3 Χρήση του femm για την επίλυση των δύο γεωμετριών	63
4.2.4 Διερεύνηση πλέγματος	65
4.3 Επίδοση των δύο μηχανών στη μόνιμη κατάσταση.....	67
4.3.1 Μέγιστη ροπή	68
4.3.2 Κυμάτωση ροπής στη μόνιμη κατάσταση	72
4.4 Απόδοση των δύο μηχανών στη μόνιμη κατάσταση	77
4.4.1 Κλασική μεθοδολογία υπολογισμού απωλειών πυρήνα.....	77
4.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού απωλειών πυρήνα που ακολουθήθηκε	81
4.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις απώλειες πυρήνα	86
4.4.4 Απώλειες χαλκού για τις δύο μηχανές.....	88
4.4.5 Καμπύλη απόδοσης για τις δύο μηχανές	90
4.5 Βιβλιογραφία.....	94
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	95
5.1 Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας	95
5.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης	97
5.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση	98

Στην Γκρέτα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος εργασίας

Στη σημερινή εποχή της ενεργειακής κρίσης γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη η απαίτηση για οικονομική και αποδοτική λειτουργία των ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας μείωσης των απωλειών πυρήνα σε αυτές τις διατάξεις, και πιο συγκεκριμένα στις ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών με χρήση προηγμένων σιδηρομαγνητικών υλικών στον πυρήνα.

Προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο αυτό, στα πλαίσια της εργασίας μετρήθηκαν πειραματικά τα μαγνητικά χαρακτηριστικά ενός δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου πάχους 0.025 mm, το οποίο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σε επόμενη φάση, μελετήθηκε η συμπεριφορά μηχανής μονίμων μαγνητών θεωρώντας ότι χρησιμοποιείται αυτό το σιδηρομαγνητικό υλικό στο μαγνητικό της κύκλωμα. Τα χαρακτηριστικά της μηχανής αυτής με άμορφο σίδηρο συγκρίνονται με εκείνα αντίστοιχης μηχανής, στο μαγνητικό κύκλωμα της οποίας χρησιμοποιείται λαμαρίνα χαμηλών απωλειών πάχους 0.35 mm (M235-35A). Η προδιαγραφή στην οποία συγκρίνονται οι δύο μηχανές, αντιστοιχεί σε ονομαστική ροπή 30Nm στις 750 rpm, από τυπικό κινητήριο σύστημα για αεροπορικές εφαρμογές.

Με βάση τις μετρήσεις απωλειών πυρήνα για τον άμορφο σίδηρο που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο, αλλά και τις τιμές απωλειών πυρήνα του κατασκευαστή της συμβατικής λαμαρίνας M235-35A, αναλύθηκαν οι απώλειες πυρήνα στις δύο προς σύγκριση μηχανές, και σχολιάσθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους για την προαναφερόμενη εφαρμογή.

1.2 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε δύο ενότητες. Το πρώτο μέρος αφορά στη διαδικασία υπολογισμού απωλειών πυρήνα σε ένα μαγνητικό υλικό, καθώς και στην πειραματική διαδικασία που υιοθετήθηκε για τον προσδιορισμό των απωλειών σιδήρου λεπτού άμορφου υμενίου. Το δεύτερο μέρος έχει σαν αντικείμενο μελέτης την αξιολόγηση των απωλειών απωλειών πυρήνα με διαφορετικα μαγνητικά υλικά σε μία μηχανή μονίμων μαγνητών κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 2** επιχειρείται μία ανάλυση των μαγνητικών ιδιοτήτων των μαγνητικών υλικών, αρχικά σε μικροσκοπικό επίπεδο. Κατόπιν, ακολουθεί ανάλυση σε μακροσκοπικό επίπεδο, όπου εξάγονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις που διέπουν τις απώλειες πυρήνα. Τέλος, παρατίθεται η πιο διαδεδομένη μεθοδολογία μέτρησης απωλειών πυρήνα σε σιδηρομαγνητικά υλικά μέσω της διάταξης Epstein.

Ακολούθως, στο **Κεφάλαιο 3**, πραγματοποιείται αρχικά μια επισκόπηση των ιδιοτήτων και κάποιων χαρακτηριστικών εφαρμογών των άμορφων μετάλλων. Αμέσως μετά, αναλύεται η μεθοδολογία μέτρησης των μαγνητικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου άμορφου σιδήρου που υιοθετήθηκε στο εργαστήριο, και τα αποτελέσματα αυτής συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μαγνητικά χαρακτηριστικά της συμβατικής λαμαρίνας M235-35A.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται τα μοντέλα των δύο προς σύγκριση μηχανών και οι τεχνικές επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματός τους μέσω της χρήσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθως, γίνεται η μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδοση και την απόδοση των δύο μηχανών. Τελικά, σχολιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε μίας μηχανής για τη δεδομένη εφαρμογή.

Στο **Κεφάλαιο 5**, τέλος, ανακεφαλαιώνονται τα κυριότερα αποτελέσματα και διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την πορεία της παρούσας εργασίας, ενώ αναφέρονται και τα σημεία καινοτομίας της. Το κεφάλαιο 5 ολοκληρώνεται με μία σειρά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής.

1.3 Συμβολή στην προαγωγή της επιστήμης

Η εργασία αυτή επιχειρεί να μελετήσει το φαινόμενο των απωλειών πυρήνα και μάλιστα στις περιπτώσεις μαγνητικής λαμαρίνας μη κατευθυνόμενων κόκκων πάχους 0.35 mm χαμηλών απωλειών και εργαστηριακού άμορφου υμενίου σιδήρου, και να επιβεβαιώσει την καταλληλότητά τους σε εφαρμογές κινητήρων μόνιμων μαγνητών. Η καινοτόμος συνεισφορά της συνίσταται:

- αρχικά στη μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός εργαστηριακού υλικού άμορφου σιδήρου, το οποίο εμφανίζει καταρχήν χαμηλές απώλειες πυρήνα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το υλικό αυτό είναι κατασκευασμένο στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, με ιδιαίτερη μέριμνα για τη διατήρηση των μαγνητικών του χαρακτηριστικών σε συνθήκες μηχανικής φόρτισης, όπως συμβαίνει στα μαγνητικά κυκλώματα των ηλεκτρικών μηχανών. Για τον προσδιορισμό των απωλειών πυρήνα, αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο καθορισμού τους αντίστοιχο της διάταξης Epstein για τις συμβατικές λαμαρίνες.
- Στη συνέχεια με βάση τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του άμορφου υλικού που μετρήθηκαν (μεταβολή μαγνητικής διαπερατότητας απωλειών πυρήνα με την επαγωγή) επιχειρείται η σύγκρισή του με τυπική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών στη διαμόρφωση των μαγνητικών κυκλωμάτων ηλεκτρικής μηχανής μόνιμου μαγνήτη για εφαρμογές κινητήριων συστημάτων.

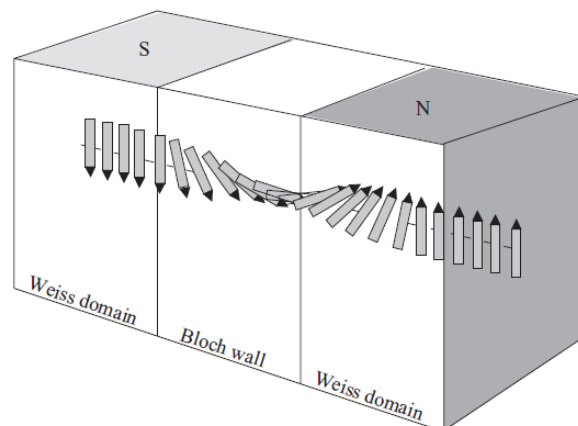
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥΣ

2.1 Μικροσκοπική περιγραφή των σιδηρομαγνητικών υλικών

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν εξέχοντα ρόλο τόσο στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών, όσο και στην κατασκευή μετασχηματιστών. Η παρουσία τους σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο προκαλεί την κατά πολλές φορές ενίσχυσή του. 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.

Τις ιδιότητες αυτές τις οφείλουν κατά κύριο λόγο στις στοιχειώδεις μαγνητικές περιοχές τους, γνωστές και ως περιοχές Weiss. Αυτές οι περιοχές έχουν ομοιόμορφη μαγνήτιση, δηλαδή τα spin των ατόμων τους 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 (Σχήμα 2.1).



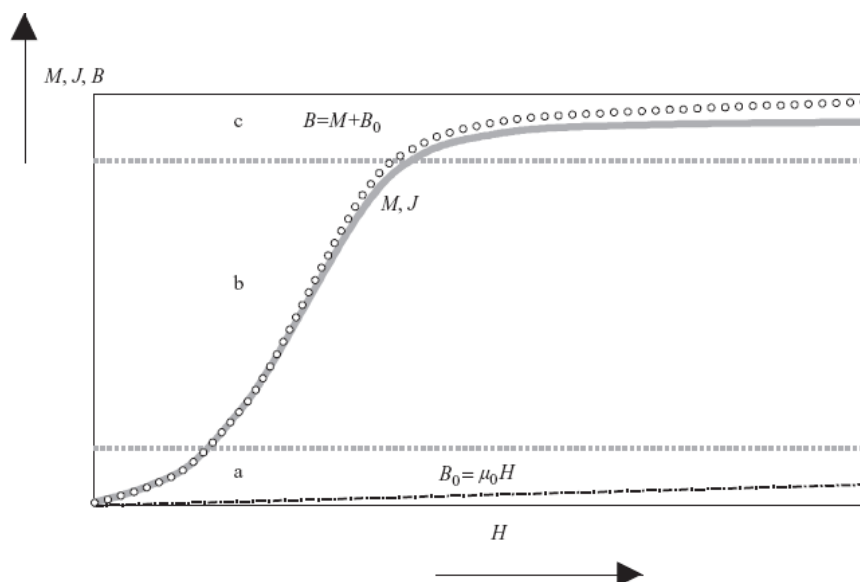
Σχήμα 2.1 : Μεταβατικό τοίχωμα Bloch που διαχωρίζει δύο περιοχές Weiss με αντίθετη μαγνήτιση. [2.1]

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. Η μαγνήτιση λαμβάνει χώρα σε τρεις φάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.

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 με θέρμανση πέραν της οποίας ένα σιδηρομαγνητικό υλικό χάνει το μαγνητισμό του. Έτσι, επανέρχεται η τυχαία κατανομή των στοιχειωδών προσανατολισμών στις περιοχές Weiss.

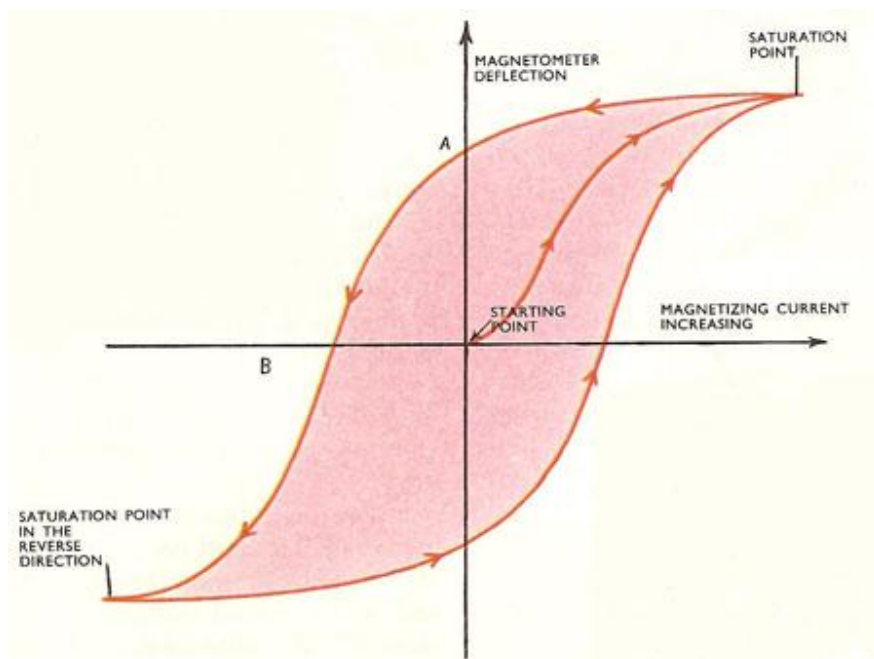


Σχήμα 2.2: Επιβολή εξωτερικού αυξανόμενου μαγνητικού πεδίου σε αρχικά αμαγνήτιστο υλικό. [2.1]

Στην περίπτωση που επιβληθεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, τότε μετά την αρχική μαγνήτιση όπως περιγράψαμε προηγουμένως, 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, όπως θα δείξουμε παρακάτω στο παρόν κεφάλαιο.

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.



Σχήμα 2.3: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

2.2 Απώλειες οφειλόμενες σε υστέρηση

Η ύπαρξη των απωλειών υστέρησης οφείλεται στην απορρόφηση ενέργειας από το μέσο το οποίο διαπερνάται από 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.

Για τον υπολογισμό των απωλειών υστέρησης, αρχικά καθορίζεται η αποθηκευμένη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σημείο του μαγνητικού πεδίου όταν η μαγνητική επαγωγή στο σημείο αυτό μεταβληθεί από την τιμή B_1 στην τιμή B_2 . Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται από το μέσο είναι [2.2] :

$$w = \int_{B_1}^{B_2} \mathbf{H} dB \quad (2.1)$$

όπου \mathbf{B} είναι η μαγνητική επαγωγή (ή πυκνότητα μαγνητικής ροής), και \mathbf{H} είναι η μαγνητική ένταση.

Για την ολοκλήρωση στην εξίσωση 2.1, είναι απαραίτητη η γνώση της σχέσης $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ (Σχήμα 2.3). Αν η πυκνότητα ροής \mathbf{B} εκτελεί κυκλική μεταβολή και το διαρρέομενο από τη ροή μέσο είναι σιδηρομαγνητικό υλικό, είναι αναγκαία η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου. Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης αυτής, όπως γίνεται ποιοτικά αντιληπτό από το Σχήμα 2.3, είναι ανάλογο του εμβαδού (γραμμοσκιασμένο κομμάτι) που ορίζεται από την καμπύλη $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ του μέσου, τον άξονα του \mathbf{B} και τις παράλληλες ευθείες προς τον άξονα \mathbf{H} και οι οποίες παριστούν τις σταθερές τιμές B_1 και B_2 αντίστοιχα.

Η καμπύλη μαγνήτισης μεταξύ οποιωνδήποτε τιμών B_1 και B_2 , οι οποίες αντιστοιχούν σε μειούμενες τιμές του \mathbf{H} , είναι διάφορη από την καμπύλη η οποία αντιστοιχεί σε αυξανόμενες τιμές του \mathbf{H} . Αυτό γίνεται επίσης ποιοτικά αντιληπτό από το Σχήμα 2.3. Ο βρόχος υστέρησης αποτελείται από δύο κλάδους, έναν για αυξανόμενες τιμές του \mathbf{H} , κι έναν για φθίνουσες. Ο βρόχος αυτός λαμβάνεται με κυκλική μαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού. Λόγω της διαφοράς των καμπυλών των δύο κλάδων, προκύπτει ότι η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό ανά κύκλο, όταν η πυκνότητα ροής αυξηθεί από B_1 σε B_2 , είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που επιστρέφεται όταν η πυκνότητα ροής μειώνεται από B_2 σε B_1 . Η διαφορά των δύο αυτών ενεργειών αποτελεί και το μέτρο της **απώλειας υστέρησης** ανά κύκλο μαγνήτισης.

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.

Ποσοτικά, αν $V(m^3)$ ο όγκος του μαγνητικού υλικού σε όλα τα σημεία του οποίου η διανομή της ροής είναι ομοιόμορφη, και $f(Hz)$ η συχνότητα με την οποία μεταβάλλεται κυκλικά η ροή, τότε ο ρυθμός απώλειας ενέργειας από το φαινόμενο της υστέρησης είναι:

$$P_h = V f E_{\beta\rho\chi\omicron\upsilon\upsilon\sigma\tau\acute{\epsilon}\rho\eta\sigma\eta\varsigma} \text{ (Watt)} \quad (2.2) \quad , \text{ όπου:}$$

$$E_{\beta\rho\chi\omicron\upsilon\upsilon\sigma\tau\acute{\epsilon}\rho\eta\sigma\eta\varsigma} = \oint \mathbf{H} d\mathbf{B} \text{ (Joules)} \quad (2.3)$$

Άρα, η ισχύς των απωλειών υστέρησης μπορεί να υπολογισθεί από τις εξισώσεις (2.2-2.3), με την προϋπόθεση να γνωρίζουμε το βρόχο υστέρησης για τη δοθείσα μέγιστη πυκνότητα ροής B_{max} . Όμως, ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι απώλειες υστέρησης ως συνάρτηση του B_{max} , μπορεί να υπολογιστεί μόνο με επανάληψη του υπολογισμού για βρόχους υστέρησης που έχουν διάφορες τιμές B_{max} .

Εμπειρικά, από τα αποτελέσματα μεγάλου αριθμού μετρήσεων πάνω σε δείγματα διαφόρων σιδήρων και ειδών χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών ηλεκτρικών συσκευών, διαπιστώθηκε ότι η έκφραση για την απώλεια υστέρησης ανά μονάδα όγκου ανά κύκλο δίνεται από τη σχέση:

$$w = \eta (B_{max})^n \text{ (Joules/m}^3\text{)} \quad (2.4)$$

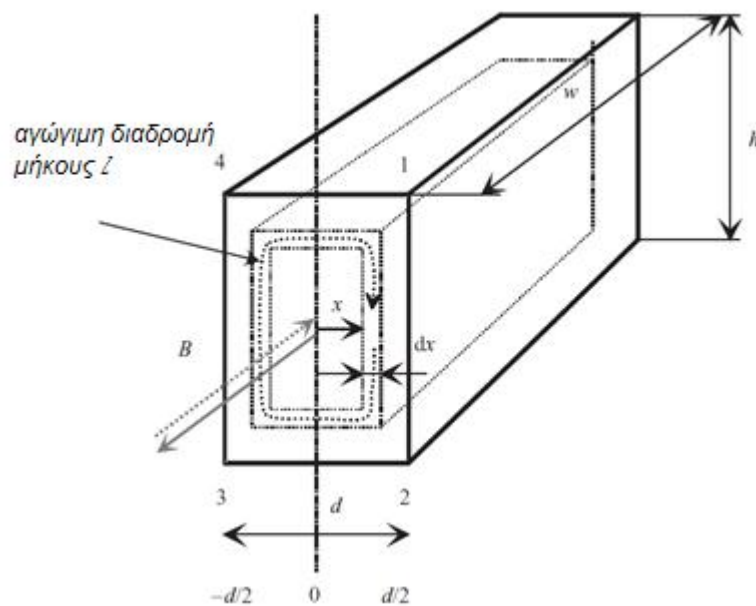
Η παραπάνω εξίσωση διατυπώθηκε από τον Steinmetz, και για αυτό η σταθερά η είναι γνωστή σαν σταθερά Steinmetz. Η σταθερά η εξαρτάται μόνο από το υλικό [2.3], και ο εκθέτης n λαμβάνει τιμές μεταξύ 1.5-2.5. Όμως, ο εκθέτης n είναι δυνατόν να μην είναι σταθερός για ένα δοσμένο υλικό. Για αυτό, οι δύο σταθερές αυτές πρέπει να υπολογιστούν για ορισμένη περιοχή του B_{max} , και κατόπιν να χρησιμοποιούνται για τιμές του B_{max} μόνο μέσα στην περιοχή αυτή. Με βάση αυτές τις παραδοχές, η συνολική απώλεια από υστέρηση σε όγκο $V(m^3)$ υλικού σε όλα τα σημεία του οποίου η πυκνότητα ροής είναι ομοιόμορφη και μεταβάλλεται κυκλικά με συχνότητα f κύκλους ανά δευτερόλεπτο μπορεί να εκφραστεί εμπειρικά ως:

$$P_h = \eta V f (B_{max})^n \text{ (W)} \quad (2.5)$$

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 \mathbf{B} να μεταβάλλεται μεταξύ ίσων θετικών και αρνητικών τιμών, και στους οποίους δεν υφίστανται τοπικά επανεισερχόμενοι τοπικοί βρόχοι. Σε αυτή την τελευταία περίπτωση πάντως, ο υπολογισμός των απωλειών υστέρησης ανάγεται στον αναλυτικό υπολογισμό της εξίσωσης 2.1.

2.3 Απώλειες οφειλόμενες σε δινორρεύματα

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 δινორρεύματα είναι ικανά μεγάλα ώστε να περιορίζουν σημαντικά τη ροή που διαπερνά το υλικό. Η επιρροή των δινორρευμάτων περιορίζεται χρησιμοποιώντας λαμαρίνες (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού) ή υψηλής αντίστασης νοθεύσεις αντί για συμπαγή σιδηρομαγνητικά υλικά.



Σχήμα 2.4: Δινორρεύματα σε φύλλο υλικού. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B μεταβάλλεται στη διεύθυνση των γκρίζων βελών και τα αντίστοιχα δινორρεύματα περιστρέφονται γύρω από την μαγνητική ροή. Με βάση τον κανόνα του Lenz, τα δινორρεύματα έχουν τέτοια φορά ώστε να αντιστέκονται στην μεταβολή της ροής [2.1].

Παρά το γεγονός ότι οι πυρήνες των ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων κατασκευάζονται από ελάσματα, ακόμα και σε ένα λεπτό φύλλο σιδηρομαγνητικού υλικού μπορούν να επαχθούν δινορρέυματα, σε περίπτωση εναλλασσόμενης ροής. Προκειμένου να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα δινορρέυματα, θεωρούμε το παράδειγμα ενός λεπτού φύλλου σιδηρομαγνητικού υλικού, όπως του Σχήματος 2.4.

Παρακάτω ακολουθούνται οι συμβολισμοί του Σχήματος 2.4. Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα ροής μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο, όπως συνήθως συμβαίνει στις ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις, δηλαδή $|\mathbf{B}| = B_{max} \cdot \cos \omega t$. Τότε η ροή που διαπερνά την περιοχή 12341 θα έχει σαν μέγιστο:

$$\Phi_m = 2hx \cdot B_{max} \quad (2.6)$$

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 της επαγωγής του Faraday ($e = -\frac{d\phi}{dt}$) για την rms-τιμή της επαγόμενης τάσης στην διαδρομή 12341 :

$$E_{rms} = \frac{\omega B_{max}}{\sqrt{2}} 2hx \quad (2.7)$$

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

$$R = \frac{\rho l}{S} \approx \frac{2 h \rho}{w dx} \quad (2.8)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις (2.6-8), 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:

$$dP_{\delta\text{ινορρευματων}} = E_{rms} dI = \frac{(\omega B_{max})^2 w h x^2 dx}{\rho}$$

Και ολοκληρώνοντας για να λάβουμε τις ολικές απώλειες απο δινορρεύματα στο υλικό:

$$\begin{aligned} P_{\delta\text{ινορρευματων}} &= \int_0^{d/2} dP_{\delta\text{ινορρευματων}} = \\ &= \frac{(\omega B_{max})^2 w h}{\rho} \int_0^{d/2} x^2 dx = \frac{(whd) \pi^2 f^2 d^2 (B_{max})^2}{6\rho} = \\ &= \frac{V \pi^2 f^2 d^2 (B_{max})^2}{6\rho} \quad (2.9) \end{aligned}$$

όπου V ο όγκος του φύλλου.

Η εξίσωση 2.9 μας δίνει ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την φύση των απωλειών από δινορρεύματα. 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 δινορρεύματα.

2.4 Συνολικές απώλειες πυρήνα

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι δύο βασικές συνιστώσες απωλειών ισχύος σε σιδηρούς πυρήνες όταν υπόκεινται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο είναι οι απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Έτσι, μία προσέγγιση για τις συνολικές απώλειες σε ένα δεδομένο σιδηρομαγνητικό πυρήνα δίνεται αν λάβουμε το άθροισμα των εξισώσεων (2.5) και (2.9):

$$P_{losses}(f, B_{max}) = P_{hysteresis} + P_{eddy} = K_h f (B_{max})^n + K_e f^2 (B_{max})^2 \quad (2.10)$$

Όπου K_h και K_e είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες και τις διαστάσεις του υλικού.

Ωστόσο, αυτές οι σχέσεις παραμένουν μία προσέγγιση και πρακτικά συνήθως δίνουν αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ χαμηλά, ενίοτε κατά το μισό ή και περισσότερο [2.2]. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι σχέσεις (2.5) και (2.9) εξήχθησαν με βάση ορισμένες παραδοχές, οι οποίες στην πράξη δεν τηρούνται.

Επίσης, διαφορές στη θερμοκρασία, όπως συμβαίνει στην πράξη, εξασκούν κάποια επίδραση στο βρόχο υστέρησης του υλικού και συνεπώς στις απώλειες υστέρησης. Ακόμα, η απώλεια δινορρευμάτων ελαττώνεται κάπως με την αύξηση της θερμοκρασίας, διότι είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ειδική αντίσταση υλικού, η οποία αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας.

Επιπρόσθετα, πέρα από τους δύο αυτούς συνήθεις τύπους απωλειών σε σιδηρούς πυρήνες, εμφανίζονται και κάποιοι ακόμα, μερικούς από τους οποίους απλά αναφέρουμε για λόγους πληρότητας:

- Απώλειες άκρων, που υπεισέρχονται όταν μαγνητική ροή σκεδάσεως από τα μαγνητικά κυκλώματα των ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων διαπερνά τις μεταλλικές δομές τους που δεν συμμετέχουν σε κάποιο μαγνητικό κύκλωμά τους, όπως για παράδειγμα τα μεταλλικά κέλυφη των μηχανών. Δημιουργούνται έτσι απώλειες δινορρευμάτων.
- Επιπρόσθετες απώλειες στα δόντια των μηχανών προκαλούνται από τις αρμονικές της μαγνητικής επαγωγής που δημιουργούνται όταν τα δόντια του στάτη και του δρομέα κινούνται σχετικά μεταξύ τους. (Ανομοιομορφία διακένου).
- Η τροφοδοσία των μηχανών είναι πολλές φορές αποτέλεσμα διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) [2.4]. Παρατηρείται κατά την διέγερση PWM η εμφάνιση ελασσόνων βρόχων οι οποίοι είναι εγγεγραμμένοι στον κύριο βρόχο υστέρησης. Έτσι, όπως προαναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.2, οι απώλειες υστέρησης υπολογίζονται πια από τον τύπο 2.1.

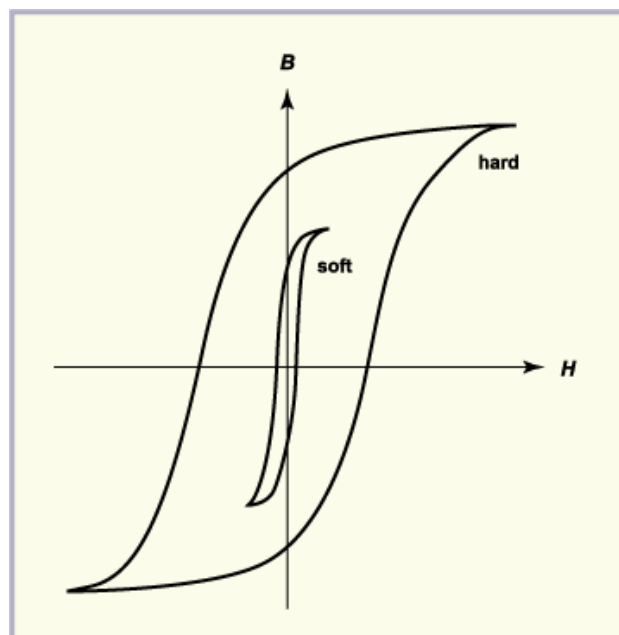
2.4.1 Τρόποι περιορισμού των απωλειών πυρήνα

Έτσι, η κύρια χρησιμότητα των εξισώσεων (2.5) και (2.9) συνίσταται στο να καταδεικνύει τη φύση των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων, καθώς και την

εξάρτησή τους από διάφορους παράγοντες. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατός ο περιορισμός τους.

Για πυρήνα δοθέντος σχηματισμού και δεδομένων συνθηκών χρησιμοποίησής του, η απώλεια υστέρησης μπορεί να μειωθεί με χρησιμοποίηση υλικού πυρήνα το οποίο έχει βρόχο υστέρησης μικρού εμβαδού. Πιο συγκεκριμένα, 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.



Σχήμα 2.5: Ποιοτικοί βρόχοι υστέρησης μαλακών και σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών.

Στην περίπτωση των απωλειών δινορρευμάτων, οι απώλειες περιορίζονται με τη χρήση λεπτών ελασμάτων υλικού το οποίο έχει υψηλή ειδική αντίσταση και μόνωση μεταξύ των ελασμάτων. Σκόνη του κράματος Permaloy (Ni, Cr) το οποίο έχει μικρό βρόχο υστερήσεως, αναμιγνύεται συνήθως με μονωτική συνδετική ουσία και συμπιέζεται σε συμπαγή πυρήνα του επιθυμητού σχήματος. Το κράμα αυτό εμφανίζει υψηλή ειδική αντίσταση. Γενικά, με κατάλληλα κράματα και θερμικές κατεργασίες είναι δυνατή η επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων σε αρκετό βαθμό.

Σε ό,τι αφορά στα ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού, κατηγοριοποιούνται σε δύο κλάσεις: στα υλικά με κατευθυνόμενους κόκκους και σε εκείνα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους. Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών σε μαγνητική επαγωγή 1.5 T και συχνότητα πεδίου 50 Hz, είναι 3 W/Kg και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα[2.5].

Αντιθέτως, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και σε εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτήν την περίπτωση είναι 1 W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι καταλυτικό ρόλο στις τελικές απώλειες σιδήρου ενός μετασχηματιστή ή μιας μηχανής διαδραματίζει και η ποιότητα κατασκευής της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος της λαμαρίνας καθώς και η διαδικασία συναρμολόγησης και συγκόλλησης των λαμαρινών προς διαμόρφωση του τελικού πυρήνα αποτελούν αντικείμενο έρευνας ώστε να ευρεθεί ο αποδοτικότερος τρόπος κατασκευής ως προς την ελαχιστοποίηση των απωλειών πυρήνα εν λειτουργία[2.6].

2.5 Μέθοδος μέτρησης μαγνητικών χαρακτηριστικών με τη διάταξη Epstein

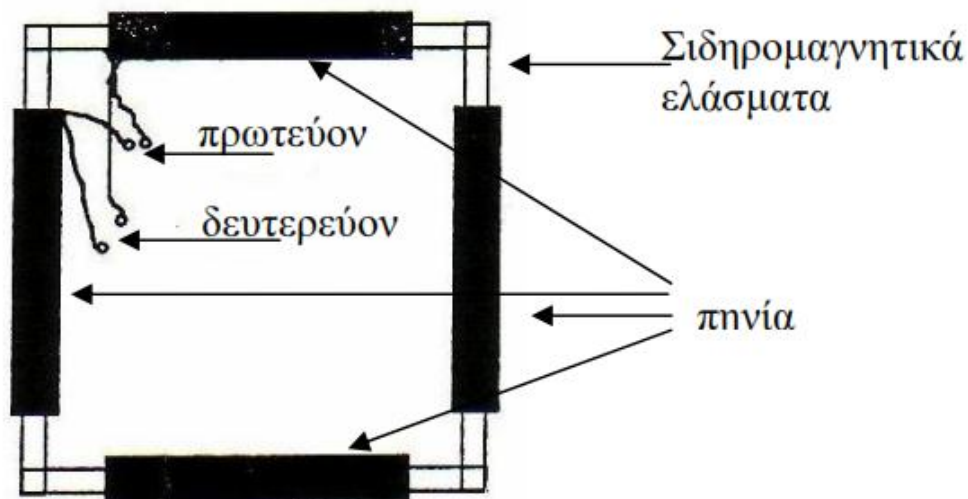
Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της χαρακτηριστικής σχέσης $\mathbf{B(H)}$ και των απωλειών πυρήνα σε σιδηρομαγνητικά υλικά είναι η μέθοδος μέτρησης με τη διάταξη Epstein. Η θεωρητική τεκμηρίωση της ορθότητας της μεθόδου αυτής ανάγεται στη δοκιμή ανοικτοκύκλωσης ενός μονοφασικού μετασχηματιστή.

Πιο συγκεκριμένα, διεγείρεται ένα μαγνητικό κύκλωμα από ημιτονοειδή πηγή τροφοδοσίας, η παρεχόμενη ισχύς της οποίας δαπανάται για τη μαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού και στις διάφορες απώλειες (κυρίως ωμικές απώλειες στα

τυλίγματα που επιβάλλουν τη μαγνητεγερτική δράση στο μαγνητικό κύκλωμα). Έτσι, μέσω απλών μετρήσεων της τάσης τροφοδοσίας και του ρεύματος στα τυλίγματα, αλλά και με την εξαγωγή απλών εξισώσεων για την πυκνότητα μαγνητικής ροής και για την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της τυποποιημένης γεωμετρίας του πλαισίου Epstein, είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός των απωλειών πυρήνα ενός υλικού.

(α) Γεωμετρία πλαισίου Epstein

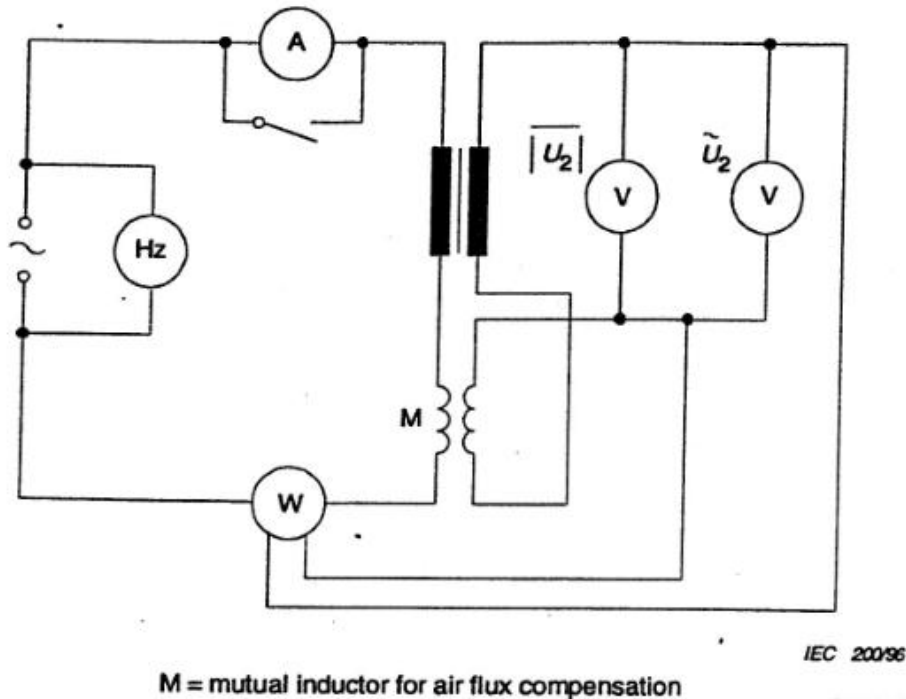
Αναλυτικότερα, η διάταξη Epstein (Σχήμα 2.6) αποτελείται από τέσσερα ζεύγη κοίλων (σωληνωτών) πηνίων στο εσωτερικό των οποίων τοποθετούνται τα σιδηρομαγνητικά ελάσματα του προς μέτρηση υλικού. Τα τυλίγματα συνδέονται ανά τέσσερα σε σειρά αποτελώντας ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον τύλιγμα. Επειδή τα τυλίγματα είναι συγκεντρικά, η σκέδαση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι πολύ μικρή. Παρόλα αυτά στη διάταξη υπάρχει πηνίο αντιστάθμισης της ροής σκέδασης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, το οποίο συνδέεται σε σειρά με το πηνίο δευτερεύοντος και η μέτρηση λαμβάνεται μεταξύ του άκρου του πηνίου αντιστάθμισης και του δευτερεύοντος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.6: Διάταξη Epstein.

Τα προς μέτρηση δοκίμια (φύλλα σιδηρομαγνητικού υλικού) τοποθετούνται στο εσωτερικό των τυλιγμάτων ομοιόμορφα και ισάριθμα σε κάθε πλευρά του πλαισίου με επικάλυψη στα άκρα. Η όλη διάταξη αποτελεί ένα στοιχειώδη μονοφασικό μετασχηματιστή που το μαγνητικό του κύκλωμα αποτελείται από τα δοκίμια ενώ το ηλεκτρικό του κύκλωμα αποτελούν τα συγκεντρικά τυλίγματα. Ο αριθμός των

ελιγμάτων των τυλιγμάτων είναι ίσος με $4 \times 175 = 700$ για το πρωτεύον τύλιγμα και ο ίδιος για το δευτερεύον. Άρα, ο λόγος μετασχηματισμού είναι 1.



Σχήμα 2.7: Πηνίο (M) αντιστάθμισης ροής σκέδασης και μετρητική μέθοδος της διάταξης Epstein [2.7].

(β) Προδιαγραφές κατά IEC 404-2

Στη συσκευή επιβάλλεται ημιτονοειδής τάση στο πρωτεύον τύλιγμα με το δευτερεύον ανοικτοκυκλωμένο. Μετράται το ρεύμα διέγερσης που απορροφά ο στοιχειώδης μετασχηματιστής για την μαγνήτιση του υλικού καθώς και για την κάλυψη των απωλειών του. Επίσης, με τη βοήθεια των μετρήσεων υπολογίζονται οι απώλειες.

Μέσω κατάλληλων σταθερών πολλαπλασιασμού που προκύπτουν από την τυποποιημένη γεωμετρία της διάταξης υπολογίζονται τα μεγέθη της μαγνητικής επαγωγής B και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , ενώ προκύπτει και η σχέση των απωλειών του μαγνητικού υλικού, συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής.

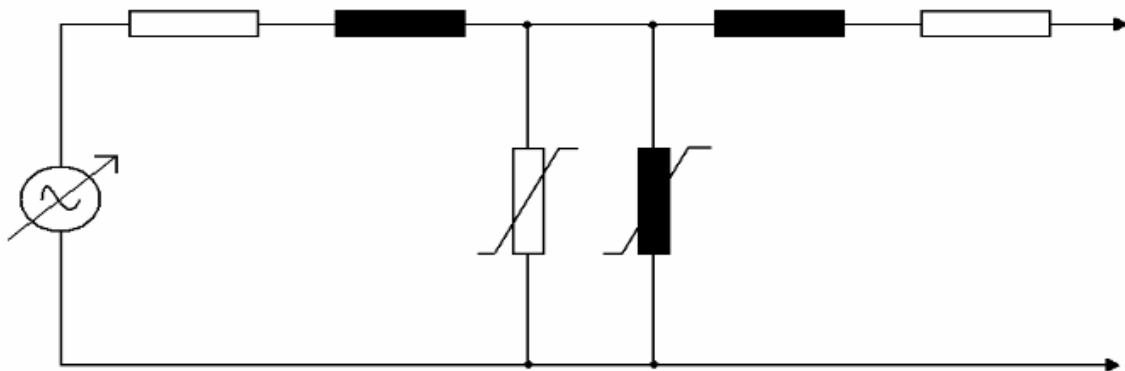
Σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC 404-2 [2.7], οι προδιαγραφές της μέτρησης απωλειών σιδήρου με διάταξη Epstein είναι οι εξής:

- Τα τυλίγματα να έχουν μήκος τουλάχιστον 19cm.
- Κάθε πηνίο έχει το ένα τέταρτο του συνολικού αριθμού των σπειρών.

- Το πρωτεύον τύλιγμα έχει (4x175) 700 σπείρες, αποτελείται δε από δύο πηνία διατομής $1,8mm^2$ τυλιγμένα σε τρία στρώματα και είναι συνδεδεμένα παράλληλα.
- Το δευτερεύον έχει 700 σπείρες και αποτελείται από ένα χάλκινο πηνίο διατομής $0,8mm^2$ τυλιγμένων σε ένα στρώμα.
- Τα δοκίμια έχουν μήκος $280 \leq l \leq 320mm$ με ακρίβεια $\pm 0,5mm$ και πλάτος $30mm \pm 0,2mm$
- Ο αριθμός των δειγμάτων πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του τέσσερα.
- Οι κλάσεις των μετρητικών οργάνων πρέπει να είναι το πολύ 0,5.
- Το τροφοδοτικό ενδείκνυται να έχει σφάλμα τάσεως και σφάλμα συχνότητας μικρότερο από 0,02%.
- Η ενεργός μάζα των δοκιμίων θα πρέπει να είναι το λιγότερο 240g για δοκίμια μήκους 280mm.

2.5.1 Διαδικασία μετρήσεων με τη διάταξη Epstein

Το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης Epstein που αντιστοιχεί σε αυτό ενός μονοφασικού μετασχηματιστή παρουσιάζεται στην Σχήμα 2.8. Το δευτερεύον είναι ανοικτοκυκλωμένο και δεν διαρρέεται από ρεύμα, ενώ στο πρωτεύον εφαρμόζεται ημιτονοειδής τάση. Συνεπώς, η πεπλεγμένη μαγνητική ροή λ , άρα και η μαγνητική επαγωγή είναι επίσης ημιτονοειδή μεγέθη. Αντίθετα, λόγω του μαγνητικού κορεσμού, το ρεύμα διεγέρσεως που ρέει στο πρωτεύον είναι μη ημιτονοειδές, αφού εκτός από τη θεμελιώδη περιλαμβάνει και ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Το ίδιο ισχύει και για την ένταση του μαγνητικού πεδίου H .



Σχήμα 2.8: Ισοδύναμο κύκλωμα διάταξης Epstein.

Στις μετρήσεις που λαμβάνονται, πρέπει να διορθώνονται τα σφάλματα που εισάγουν τα μετρητικά όργανα όσον αφορά την τάση στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος και στις μετρούμενες απώλειες. Οι μετρήσεις ρεύματος και τάσης γίνονται συνήθως με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή στον οποίο καταγράφονται οι στιγμιαίες τιμές των μεγεθών, ενώ επιπλέον η επίδρασή τους στο προς μέτρηση κύκλωμα είναι μικρή. Αναλυτικότερα τα βήματα της διαδικασίας μέτρησης έχουν ως εξής:

- Καταγραφή επιβαλλόμενης τάσης στο πρωτεύον $v_1(t)$.
- Καταγραφή επαγόμενης τάσης στο δευτερεύον $v_2(t)$.
- Καταγραφή ρεύματος διέγερσης $i_1(t)$.
- Υπολογισμός της πεπλεγμένης ροής $\lambda(t)$ ολοκληρώνοντας τη $v_2(t)$ (σχέση 2.11).

$$\lambda(t) = \int v_2(t) dt \quad (2.11)$$

- Υπολογισμός του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής $B(t)$ διαιρώντας την $\lambda(t)$ με τον αριθμό των ελιγμάτων N και τη συνολική διατομή S των ελασμάτων ανά τύλιγμα (πάχος ελάσματος \times πλάτος ελάσματος \times πλήθος ελασμάτων ανά έλιγμα):

$$B(t) = \frac{\lambda(t)}{N \cdot S} \quad (2.12)$$

- Υπολογισμός της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου από την παρακάτω σχέση 2.13, πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα πρωτεύοντος επί το συνολικό αριθμό ελιγμάτων, και διαιρώντας με το μέσο συνολικό ενεργό μήκος του μαγνητικού κυκλώματος l_{Fe} το οποίο για τη διάταξη Epstein είναι 0,94m.

$$H(t) = \frac{N \cdot i(t)}{l_{Fe}} \quad (2.13)$$

- Υπολογισμός της απορροφούμενης μέσης ισχύος P . Σε περίπτωση μοναδιαίου συντελεστή ισχύος η μέση ενεργός ισχύς μπορεί να υπολογισθεί από το ολοκλήρωμα τάσης-ρεύματος σε μία περίοδο T , ως εξής:

$$P_{mean} = \frac{1}{T} \int_T v_1(t) i_1(t) dt \quad (2.14)$$

Στην περίπτωση που τα όργανα μετρήσεως έχουν σημαντική αντίσταση απωλειών, αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη και να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις.

- Υπολογισμός των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος με χρήση διακριτού μετασχηματισμού Fourier.

Αφού επαναληφθεί αυτή η διαδικασία για διάφορα πλάτη και συχνότητες της επιβαλλόμενης τάσης $v_1(t)$, είναι δυνατή η εξαγωγή της σχέσης των ειδικών απωλειών πυρήνα του υλικού, σε συνάρτηση με τη συχνότητα της επιβαλλόμενης διέγερσης και τη μέγιστη μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού κυκλώματος. Η τελευταία προκύπτει από την μετεπεξεργασία των μετρήσεων μέσω της εξίσωσης (2.12), ενώ οι ειδικές απώλειες (ή αλλιώς: απώλειες πυρήνα ανά μονάδα μάζας υλικού) υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_s = \frac{P_{mean}}{m_a} = \frac{P_{mean} \cdot 4l}{m \cdot l_{Fe}} \quad (2.15)$$

Όπου:

- P_s , είναι οι ειδικές απώλειες του μετρούμενου υλικού σε W/kg.
- P_{mean} , είναι η ολική υπολογισθείσα απώλεια στο μετρούμενο υλικό σε W.
- l , είναι το μήκος ενός μετρούμενου δοκιμίου σε m.
- l_{Fe} , είναι το ενεργό μήκος του μαγνητικού κυκλώματος σε m (για την Epstein ισχύει όπως προαναφέρθηκε: $l_{Fe} = 0,94m$).
- m , είναι η συνολική μάζα των δοκιμίων σε kg.
- m_a , η ενεργός μάζα των δοκιμίων σε kg.

Τέλος, μέσω των εξισώσεων (2.12-2.13) και μετά την απαλειφή του χρόνου t από τις εξισώσεις αυτές, λαμβάνεται η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής του υλικού, σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Για διαφορετικές μέγιστες τιμές της μαγνητικής επαγωγής, προκύπτει η χαρακτηριστική οικογένεια των βρόχων υστέρησης του συγκεκριμένου υλικού.

2.6 Βιβλιογραφία

- [2.1] Pyrhonen, J.; Jokinen, T.; Hrabovcova, V., *"Design of Rotating Electrical Machines"*, John Wiley & Sons, 2008.
- [2.2] Ι.Α. Τεγόπουλος, *"Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση"*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1991.
- [2.3] Π. Ροβολής, *"Μοντελοποίηση Μαγνητικών Υλικών για Βελτιστοποίηση Κατασκευής και Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών"*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010.
- [2.4] Σ.Ν. Μανιάς, *"Ηλεκτρονικά Ισχύος"*, Εκδόσεις Συμμετών, 4^η έκδοση, Αθήνα, 2000.
- [2.5] ThyssenKrupp Steel Europe, *"Electrical Sheet - Product Overview"*, http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/en/produkte/gesamt_lieferprogramm/elektroband.jsp
- [2.6] Deepak Singh, *"Calorimetric Measurement of the Stator Core Losses Caused by Manufacturing"*, Master Thesis, Aalto University, Espoo, 2011.
- [2.7] International Electrotechnical Commission, *"IEC 404-2, Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame"*, 3rd edition, 1996.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

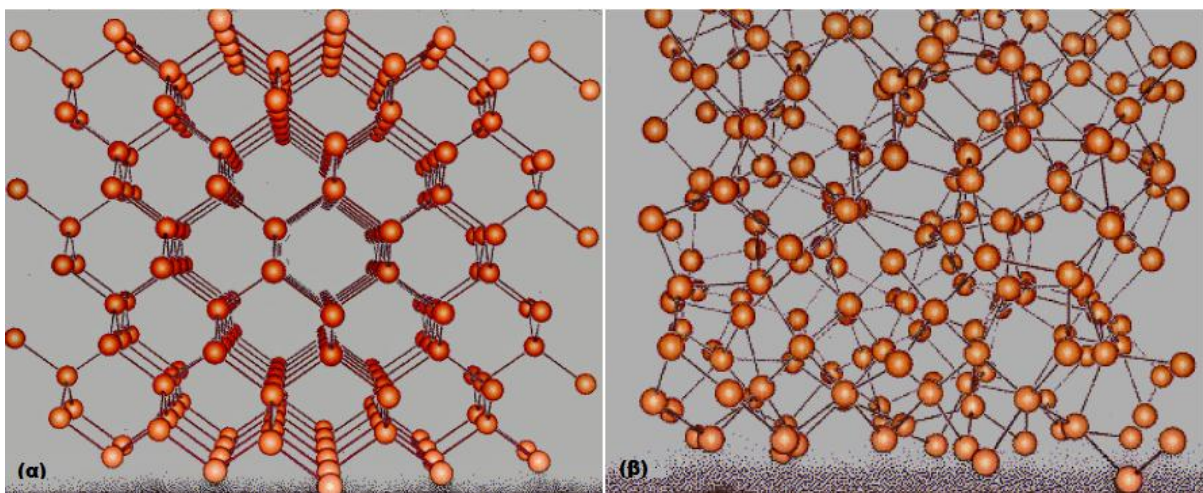
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ ΣΕ ΑΜΟΡΦΟ ΣΙΔΗΡΟ

3.1 Ιδιότητες και μικροσκοπική περιγραφή άμορφων μετάλλων

3.1.1 Η άμορφη δομή της ύλης

Η στερεά μορφή της ύλης μπορεί να ταξινομηθεί με βάση την κανονικότητα με την οποία τα άτομα ή τα ιόντα διευθετούνται μεταξύ τους στον χώρο. Με βάση αυτό το κριτήριο τα στερεά υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κλάσεις:

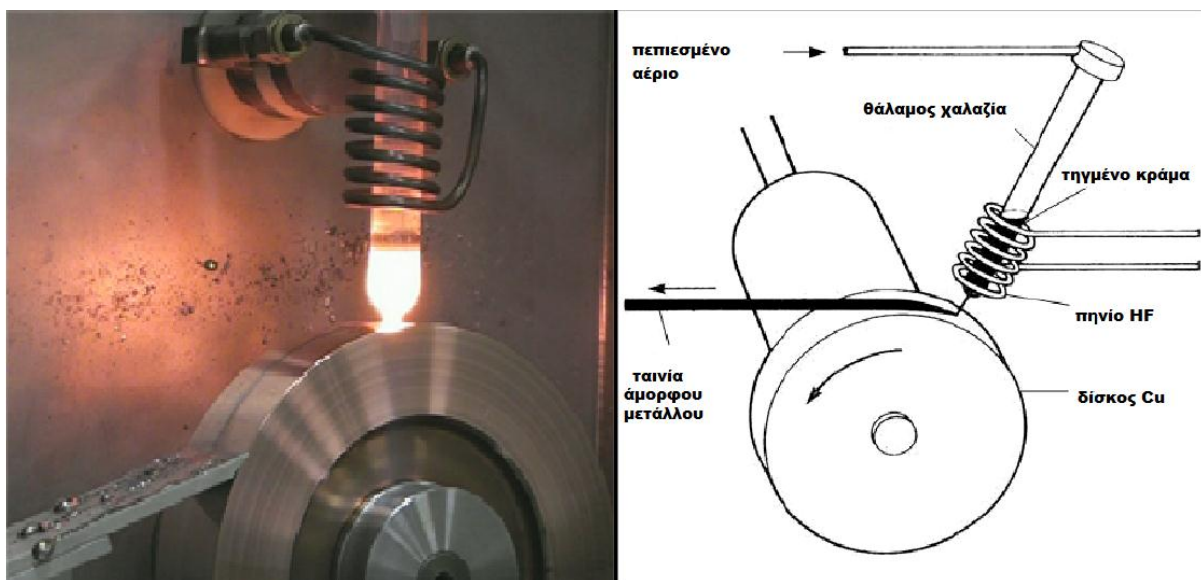
- **Κρυσταλλικά Υλικά.** Σε αυτή την κατηγορία, τα άτομα διευθετούνται με υψηλή περιοδικότητα για μεγάλες αποστάσεις. Αποτέλεσμα αυτής της τακτοποίησης των ατόμων είναι ο σχηματισμός ενός τρισδιάστατου δικτύου, το οποίο αποτελείται από μία επαναλαμβανόμενη δομική μονάδα, τη μοναδιαία κυψελίδα.
- **Άμορφα Υλικά.** Τα άμορφα υλικά στερούνται της συστηματικής τοποθέτησης των ατόμων τους ώστε αυτά να σχηματίσουν περιοδικά επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες σε μεγάλες αποστάσεις όπως τα κρυσταλλικά. Ωστόσο παρατηρείται μικρής εμβέλειας τάξη.
- **Ημικρυσταλλικά Υλικά.** Σε αυτή την κατηγορία, τα στερεά εμφανίζουν μια ημι-περιοδική επανάληψη των δομικών μονάδων. Οι δομικές μονάδες εμφανίζουν πενταγωνική συμμετρία.



Σχήμα 3.1 : (α) Στην κρυσταλλική δομή, τα άτομα έχουν σαφείς θέσεις στο χώρο, και σχηματίζουν πλέγμα. (β) Άμορφη δομή.

Τα περισσότερα μέταλλα είναι κρυσταλλικά στη στερεή τους κατάσταση, που σημαίνει ότι έχουν αυστηρά ταξινομημένα τα άτομά τους σε κρυσταλλικά πλέγματα στο χώρο. Ωστόσο, υπάρχουν και άμορφα μέταλλα (συνήθως κράματα πολλών μετάλλων) που δεν εμφανίζουν κρυσταλλική δομή, αναφέρονται δε πολλές φορές στη διεθνή βιβλιογραφία ως υαλώδη. Τα πρώτα άμορφα μέταλλα παράχθηκαν τη δεκαετία του 1960 [3.1] και ήταν κράματα χρυσού, πυριτίου, χαλκού, παλλαδίου. Άλλα συνήθη μέταλλα που χρησιμοποιούνται προς σχηματισμό άμορφων μετάλλων είναι : σίδηρος, νικέλιο, φώσφορος, βόριο, τιτάνιο και άλλα.

Στο παρελθόν, μικρές ποσότητες άμορφων μετάλλων παράγονταν μέσω διάφορων μεθόδων εξαιρετικά ταχείας ψύξης τηγμένου μετάλλου. Για παράδειγμα, άμορφα μεταλλικά καλώδια παράχθηκαν με ψεκασμό λιωμένου μετάλλου σε ένα περιστρεφόμενο μεταλλικό δίσκο (τεχνική “*melt spinning*”). Η ταχεία ψύξη, με ρυθμό της τάξης των εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου ανά δευτερόλεπτο, προλαμβάνει το σχηματισμό κρυστάλλων στο υλικό, και έτσι τα μόρια “παγιδεύονται” σε μία υαλώδη κατάσταση. Μία σημαντική επίπτωση της ταχείας ψύξης είναι το γεγονός ότι τα άμορφα μέταλλα μπορούν μόνο να παραχθούν σε περιορισμένο αριθμό σχημάτων (συνήθως ταινίες ή καλώδια), στα οποία η μία διάσταση έπρεπε αναγκαστικά να είναι πολύ μικρή, μικρότερη από 100μm [3.2]. Μόνο κατ’ αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να απαχθεί αρκετά γρήγορα η θερμότητα, ώστε να μη σχηματιστούν κρύσταλλοι στο μέταλλο.



Σχήμα 3.2 : Η διαδικασία της χύτευσης ταινίας (“*melt spinning*”) [3.3].

Ωστόσο, την δεκαετία του 1990, νέα κράματα αναπτύχθηκαν προς σχηματισμό άμορφων, τα οποία απαιτούσαν πολύ χαμηλές τιμές ρυθμού ψύξης, έως και λίγους βαθμούς Κελσίου ανά δευτερόλεπτο. Αυτοί οι χαμηλοί ρυθμοί ψύξης μπορούσαν να επιτευχθούν με απλή χύτευση σε μεταλλικά καλούπια. Έτσι, κατέστη δυνατό το να δημιουργηθούν άμορφα κράματα με πάχος έως και αρκετά cm. Τα συμπαγή υαλώδη

μέταλλα (Bulk Metallic Glasses), όπως ονομάζονται, λόγω της μεγαλύτερης ποικιλίας των σχημάτων τους σε σχέση με την πρώτη γενιά άμορφων, διεύρυναν το πεδίο εφαρμογών των άμορφων μετάλλων [3.4].

3.1.2 Ιδιότητες Άμορφων Μετάλλων

(α) Μηχανικές Ιδιότητες

Τα άμορφα μέταλλα είναι συνήθως κράματα παρά καθαρά μέταλλα. Το κράμα περιέχει άτομα με διαφορετικά μεγέθη, που έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει λίγος “ελεύθερος” χώρος μεταξύ των ατόμων στην κατάσταση τήξης (και έτσι έχουν πολύ μεγαλύτερο ιξώδες από άλλα τηγμένα μέταλλα και κράματα). Το ιξώδες εμποδίζει τα άτομα να μετακινούνται ώστε να σχηματίζουν διατεταγμένα πλέγματα. Η δομή του υλικού επίσης επιφέρει μικρή συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της ψύξης, καθώς και μεγάλη αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση. Η απουσία επίσης εξαρθρώσεων (“grain boundaries” – συνοριακές περιοχές με ατέλειες μεταξύ κρυσταλλικών δομών), τα οποία είναι τα αδύναμα σημεία των κρυσταλλικών υλικών, οδηγεί σε καλύτερη αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση (Σχήμα 3.3).

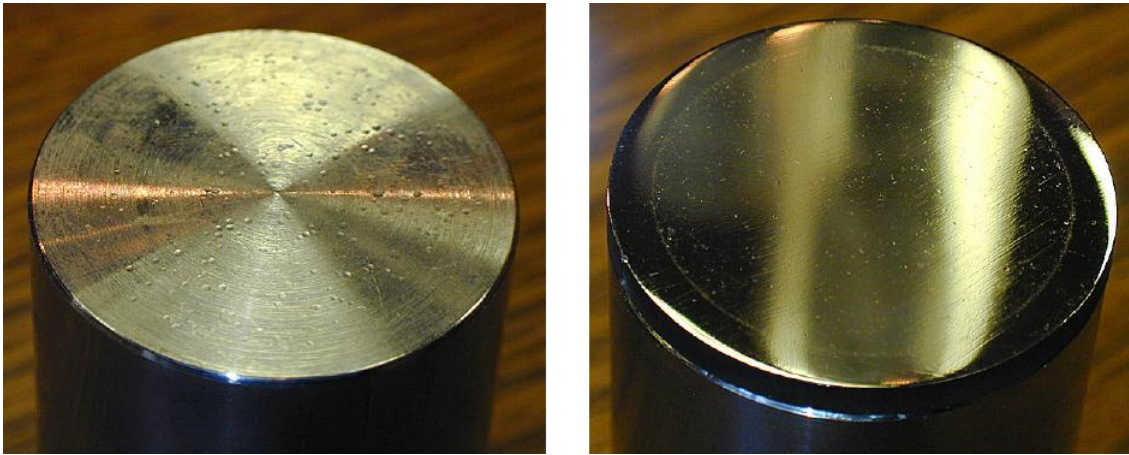
Τα άμορφα κράματα έχουν ποικίλες χρήσιμες μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, τείνουν να είναι ισχυρότερα από τα κρυσταλλικά κράματα παρόμοιας χημικής σύνθεσης, και μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες αντιστρέψιμες («ελαστικές») παραμορφώσεις από τα κρυσταλλικά κράματα. Τα άμορφα κράματα αντλούν τη δύναμή τους άμεσα από την μη-κρυσταλλική δομή τους, η οποία δεν έχει οποιαδήποτε από τις ατέλειες (όπως οι εξαρθρώσεις) που περιορίζουν τη δύναμη των κρυσταλλικών κραμάτων.

Ωστόσο, ένα μειονέκτημά τους είναι ότι δεν είναι όλκιμα σε θερμοκρασία δωματίου, και έτσι τείνουν να αστοχήσουν ξαφνικά όταν υπερφορτώνονται με μηχανική τάση. Αυτό το γεγονός περιορίζει σημαντικά το εύρος των εφαρμογών τους, και επομένως, υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή των σύνθετων υλικών που αποτελούνται από μια μεταλλική μήτρα γυαλιού που περιέχει τα μόρια ή τις ίνες ενός όλκιμου κρυσταλλικού μετάλλου. Πάντως, αν και μη όλκιμα σε θερμοκρασία δωματίου μπορούν να επεξεργαστούν παρόμοια με τα πολυμερή σώματα, από τις θερμοπλαστικές τεχνικές επεξεργασίας [3.5].

(β) Μαγνητικές Ιδιότητες

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μαγνητικές ιδιότητες των άμορφων μετάλλων. Όλες οι πρώιμες μελέτες τέτοιων μετάλλων στηρίχθηκαν σε πειράματα με πολύτιμα μέταλλα όπως χρυσό και πλατίνα. Ωστόσο το 1967, ο Duwez παρήγαγε ένα άμορφο μέταλλο με βάση το σίδηρο : $Fe_{80}P_{13}C_7$ και αυτή η εξέλιξη ήταν σημαντική για δύο λόγους. Πρώτον, έδειξε ότι μπορούσαν να κατασκευαστούν άμορφα κράματα από

φθηνά μέταλλα, και δεύτερον ότι τα άμορφα μέταλλα θα μπορούσαν να δείξουν σιδηρομαγνητικές ιδιότητες.



Σχήμα 3.3 : Αριστερά, επιφάνεια ατσαλιού με εμφανείς τις ατέλειες (εξαρθρώσεις). Δεξιά, δείγμα άμορφου μετάλλου.

Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο άμορφο κράμα σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές ισχύος σήμερα είναι το $Fe_{80}B_{11}Si_9$. Παρουσιάζει μαγνητική επαγωγή κορεσμού στα 1.59 T, ικανοποιητική θερμική ευστάθεια και λογικό κόστος πρώτων υλών. Παρά το ότι η μαγνητική επαγωγή κορεσμού του είναι χαμηλότερη κατά 20% σε σχέση με τον χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων, ο άμορφος σίδηρος $Fe_{80}B_{11}Si_9$ έχει συγκριτικό πλεονέκτημα ως προς τις απώλειες πυρήνα για εφαρμογές που παρουσιάζονται επαγωγές μέχρι 1.4 T. Αυτό γίνεται ευκρινές και από το Σχήμα 3.4.

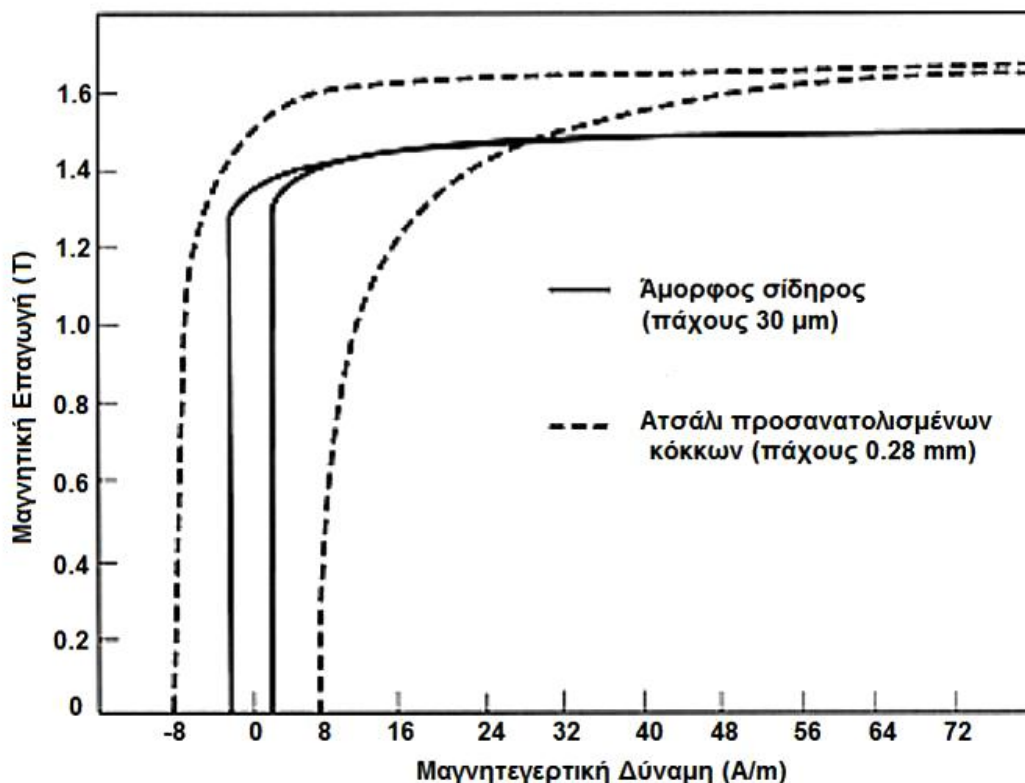
Οι μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών αποδίδονται, όπως αναλύσαμε στο 2^ο κεφάλαιο, στην ευκολία με την οποία μαγνητίζονται τα υλικά αυτά μέσω της κίνησης των τοιχωμάτων Bloch και των περιοχών Weiss. Στα κρυσταλλικά μέταλλα, όπως το ατσάλι κατευθυνόμενων κόκκων, δομικές μονάδες συγκρίσιμου μεγέθους με τα τοιχώματα Bloch, όπως εξαρθρώσεις και όρια κόκκων, εμποδίζουν την κίνηση των τοιχωμάτων. Τα άμορφα μέταλλα μαγνητίζονται πιο εύκολα από τα κρυσταλλικά, εξαιτίας της έλλειψης τέτοιων τοιχωμάτων.

Η ευκολία μαγνήτισης ενός υλικού απεικονίζεται στη σχέση μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής (**B**) και του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (**H**). Η καμπύλη B-H του άμορφου σιδήρου $Fe_{80}B_{11}Si_9$ και του ατσαλιού προσανατολισμένων κόκκων φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Ο στενός βρόχος υστέρησης του άμορφου σιδήρου και η υψηλή επιτρεπτικότητα (B/H) καταδεικνύουν την ευκολία μαγνήτισής του.

Παράλληλα, αφού το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μικρό, η συνιστώσα απωλειών που αποδίδεται στην υστέρηση θα είναι μικρή. Το ίδιο θα ισχύει και για τη

συνιστώσα απωλειών πυρήνα που οφείλεται στα δινορρεύματα. Αυτό συμβαίνει διότι στα άμορφα μέταλλα η άτακτη χωροθέτηση των ατόμων και η υψηλή περιεκτικότητα σε νοθεύσεις (μεταλλοειδή και αμέταλλα στοιχεία, πχ Si) περιορίζουν την απρόσκοπτη κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό, που έχει ως αποτέλεσμα τα άμορφα μέταλλα να έχουν 2-3 φορές μεγαλύτερη ειδική αντίσταση σε σχέση με τα αντίστοιχα κρυσταλλικά [3.2].

Αν θυμηθούμε την εξίσωση (2.9) από το δεύτερο κεφάλαιο που δίνει την εξάρτηση των απωλειών δινορρευμάτων από διάφορους παράγοντες, θα παρατηρήσουμε ότι οι απώλειες πυρήνα είναι αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης. Επίσης, το εξαιρετικά λεπτό πάχος των άμορφων μετάλλων (τυπικά 25 μm) συγκριτικά με τα 200 μm που τυπικά εμφανίζονται σαν πάχος στα ατσάλια προσανατολισμένων κόκκων, μειώνει ακόμα περισσότερο τις απώλειες από δινορρεύματα στα άμορφα μέταλλα.



Σχήμα 3.4 : Λεπτομέρεια από τις χαρακτηριστικές B-H άμορφου σιδήρου $Fe_{80}B_{11}Si_9$ και ατσαλιού προσανατολισμένων κόκκων [3.2].

(γ) Θερμικές Ιδιότητες

Οι θερμικές ιδιότητες επηρεάζουν καταλυτικά το εύρος των μαγνητικών εφαρμογών για ένα υλικό λόγω της εξάρτησης από τη θερμοκρασία Curie, όπως αναφέρθηκε στο

κεφάλαιο 2. Γενικά, οι άμορφοι σιδηρομαγνήτες εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας Curie θ_c από τα αντίστοιχα κρυσταλλικά κράματα. Οι υψηλότερες θ_c εμφανίζονται για υλικά με βάση το Fe-Co γύρω στους 800 K, και μάλιστα σε αρκετά άμορφα κράματα η κρυστάλλωση παρεμβαίνει πριν την εμφάνιση της θ_c και ο μόνος τρόπος υπολογισμού της είναι με συμπερασματική εξαγωγή (extrapolation). Η έρευνα για την κρίσιμη συμπεριφορά των άμορφων μεταλλικών κραμάτων γίνεται δυσκολότερη λόγω του ότι κατά την ανόπτηση των άμορφων μετάλλων η κρυστάλλωση μπορεί να επηρεάσει δραματικά την θ_c η οποία κυμαίνεται από 20 ως 30 K σε αυτή την περίπτωση.

3.1.3 Εφαρμογές Άμορφων Μετάλλων

Οι κύριες τεχνολογικές εφαρμογές των άμορφων κραμάτων περιλαμβάνουν λεπτές μεμβράνες για μαγνητο-οπτική καταγραφή, υλικά μετασχηματιστών, κεφαλές καταγραφής, αντιδιαβρωτικά επιστρώματα και υλικά λυχνιών φλας. Κατά συνέπεια, τα άμορφα κράματα έχουν εμπορευματοποιηθεί για χρήση τους ως αθλητικό εξοπλισμό, ιατρικές συσκευές, και σε περιπτώσεις για ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εφαρμογές των άμορφων μετάλλων στους μετασχηματιστές. Υπολογίζεται ότι το 10% της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος παγκοσμίως χάνεται σε απώλειες στη μεταφορά και τη διανομή [3.6]. Έτσι, εφόσον οι μαγνητικές ιδιότητες των άμορφων μετάλλων είναι πολλά υποσχόμενες ως προς τις απώλειες πυρήνα, η διείσδυση των άμορφων μετάλλων σε μετασχηματιστές επιταχύνεται ολοένα και περισσότερο. Ήδη οι ΗΠΑ, Κίνα, Ινδία, Ιαπωνία, Ν. Κορέα είναι από τους πιο σταθερούς χρήστες τέτοιων μετασχηματιστών, για παράδειγμα στην Κίνα έχουν εγκατασταθεί 25-30,000 KVA [3.7] [3.10]. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα αμφιβολίες για τη χρήση τους, κυρίως λόγω του πρώιμου σταδίου στο οποίο βρίσκονται διάφορες μελέτες ευστάθειας των μαγνητικών ιδιοτήτων τους στο χρόνο [3.2].

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικές ιδιότητες & εφαρμογές των άμορφων μετάλλων [3.4].

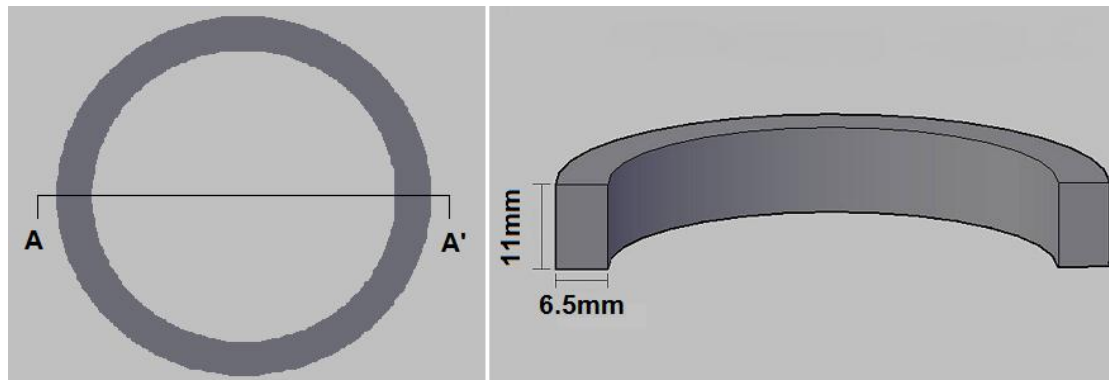
Ιδιότητα	Εφαρμογή
Υψηλή Αντοχή	Κατασκευαστικά Υλικά
Υψηλή Σκληρότητα	Κοπτικά Εργαλεία
Υψηλή Αντοχή σε Θραύση	Υλικά Χύτευσης
Υψηλή Αντοχή σε Κόπωση	Συνδετικά Υλικά
Υψηλή Μεταφορά Ελαστικής Ενέργειας	Αθλητικός Εξοπλισμός
Αντίσταση σε διάβρωση	Προστατευτικά σε διάβρωση
Μαλακός Μαγνητισμός	Μετασχηματιστές, Ηλ. Μηχανές
Υψηλή Ανακλαστικότητα	Υλικά Οπτικής Ακρίβειας

3.2 Μετρητική διάταξη απωλειών πυρήνα σε δοκίμιο άμορφου σιδήρου

3.2.1 Περιγραφή δοκιμίου άμορφου σιδήρου

Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται οι μαγνητικές ιδιότητες ενός δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου πάχους 25 μm , το οποίο κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το δοκίμιο έχει τοροειδές σχήμα (Σχήμα 3.5) και γύρω του περιελίσσεται ομοιόμορφα πηνίο 180 σπειρών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα στο δοκίμιο βασίζεται στην μέθοδο μέτρησης απωλειών πυρήνα με τη διάταξη Epstein, ανάγεται δηλαδή, κατά τα γνωστά, στη δοκιμή ανοικτού κυκλώματος ενός μονοφασικού μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.5 : Αριστερά, άνοψη του δοκιμίου άμορφου σιδήρου. Δεξιά τρισδιάστατη τομή AA'.

Πίνακας 3.2 : Χαρακτηριστικά στοιχεία του δοκιμίου άμορφου σιδήρου.

Μέση διάμετρος δοκιμίου	63 mm
Εμβαδόν διατομής	(11x6.5) mm²
Μάζα	100g
Σπείρες πηνίου	180

Πιο συγκεκριμένα, επιβάλλεται μία εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση, στα άκρα του προαναφερθέντος πηνίου. Η τάση αυτή πρακτικά ισούται με την αντι-HEΔ που

επάγεται στο τύλιγμα. Επίσης, η απώλεια χαλκού στο τύλιγμα λόγω του ρεύματος διέγερσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Έτσι, μετρώντας την ισχύ, την τάση και το ρεύμα στην είσοδο του κυκλώματος μπορούμε με πολύ καλή προσέγγιση να υπολογίσουμε τις απώλειες πυρήνα στο δοθέν δοκίμιο.



Σχήμα 3.6 : Φωτογραφία του δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου. Διακρίνεται το πηνίο των 180 σπειρών που περιελίσσεται γύρω του.

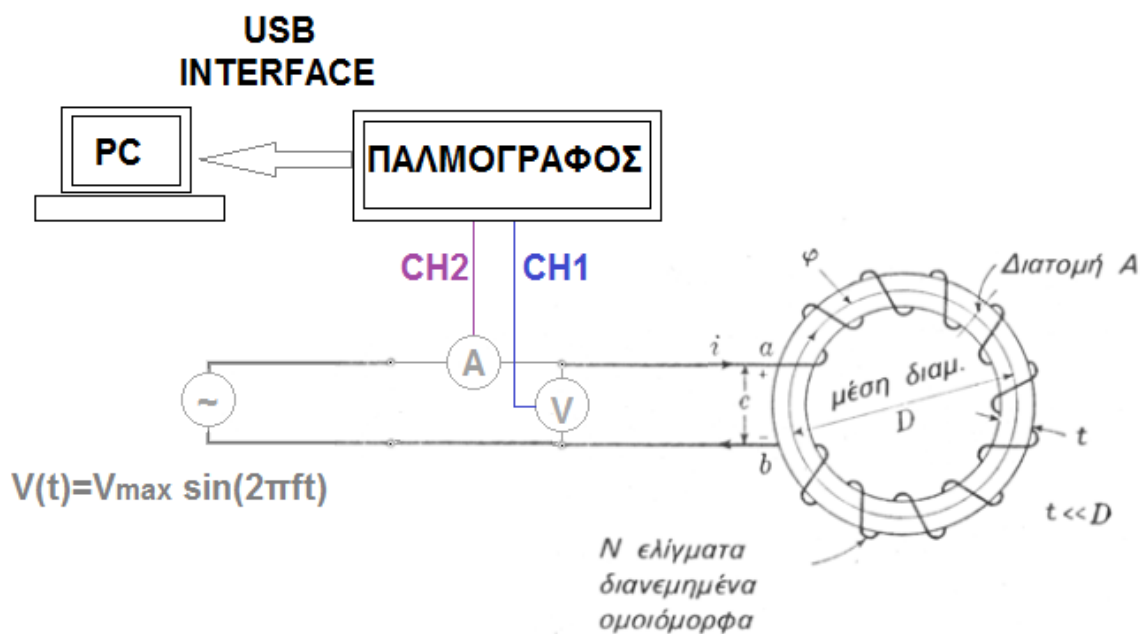
3.2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο, έναν ψηφιακό παλμογράφο, αμπεροτσιμπίδα για μέτρηση ρεύματος, probe παλμογράφου για τη μέτρηση της τάσης, και τις πηγές διέγερσης. Σαν πηγές διέγερσης χρησιμοποιούνται για λόγους διασταύρωσης και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων ένας αυτομετασχηματιστής τύπου Variac και μία παλμογεννήτρια ημιτονικών σημάτων χαμηλής ισχύος.

Στην περίπτωση που η τροφοδοσία προέρχεται από τον αυτομετασχηματιστή, οι μετρήσεις που λαμβάνουμε είναι λίγες, καθώς το σύστημα αλλαγής τάσης του μετασχηματιστή δεν παρέχει δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της επιβαλλόμενης τάσης (1V σε κάθε αλλαγή λήψης). Επίσης, επειδή η τροφοδοσία του μετασχηματιστή γίνεται από τον πάγκο εργασίας του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών & Ηλεκτρονικών Ισχύος, οι μετρήσεις αυτές αφορούν μόνο σε διέγερση συχνότητας 50Hz.

Στην περίπτωση που η τροφοδοσία προέρχεται από την παλμογεννήτρια σημάτων τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής: (α) μπορούμε να λάβουμε μετρήσεις για μία σειρά διαφορετικών συχνοτήτων (β) μπορούμε να επιτύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια διακριτότητας μεταξύ διαδοχικά επιβαλλόμενων τάσεων. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ισχύος της παλμογεννήτριας, κατέστη αναγκαία η χρήση ενός ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων 40W προς ενίσχυση του σήματος της παλμογεννήτριας.

Οι μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος μέσω του μετρητικού probe και της αμπεροτσιμπίδας αντίστοιχα, οδηγούνται στα δύο κανάλια του ψηφιακού παλμογράφου. Έπειτα, μέσω σειριακής (USB) διεπαφής του παλμογράφου και του υπολογιστή είναι δυνατή η καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων και ακολούθως η επεξεργασία τους. Ο παλμογράφος μπορεί να αποθηκεύσει μέχρι και 4000 διακριτά σημεία, που αναλόγως της ρύθμισης της ανάλυσης μπορεί να αντιστοιχεί σε 1, 2, 4 κοκ περιόδους κάθε σήματος. Στην περίπτωση μας προτιμήθηκε για κάθε μέτρηση σήματος η καταγραφή μίας και μόνο περιόδου.



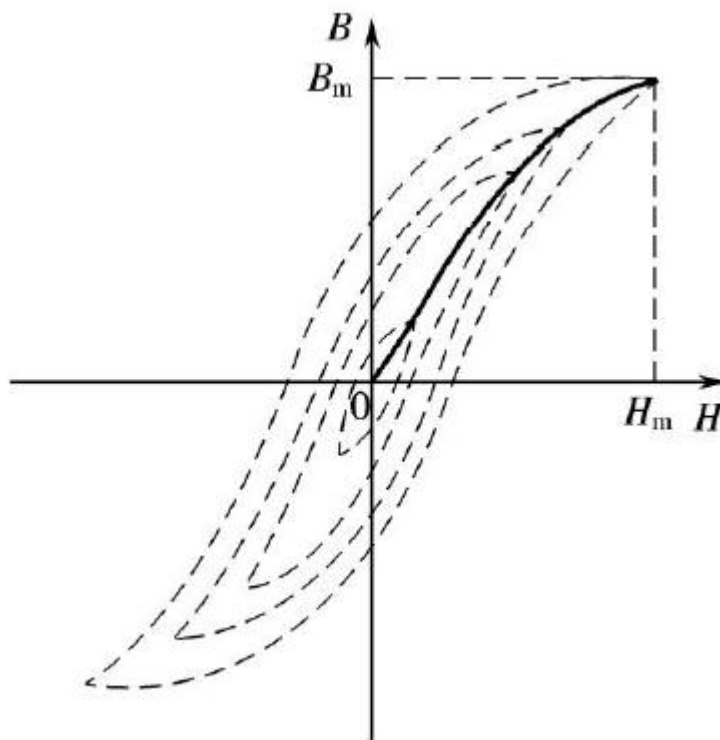
Σχήμα 3.7: Πειραματική διάταξη μέτρησης μαγνητικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου.

3.2.3 Μετρητική διαδικασία

Κάθε σειρά μετρήσεων χαρακτηρίζεται από δύο παράγοντες : (α) την **συχνότητα** της επιβαλλόμενης τάσης και (β) το **πλάτος** της τάσης. Αρχικά, επιλέγουμε μία συγκεκριμένη συχνότητα την οποία κρατούμε σταθερή, μεταβάλλοντας κατά μικρά βήματα μόνο το πλάτος της τάσης. Για κάθε πλάτος τάσης που επιβάλλουμε

μετρούμε την τάση και το ρεύμα του πηνίου. Τέλος, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία αυτή για επόμενες συχνότητες.

Η επεξεργασία κάθε σειράς μετρήσεων γίνεται σε υπολογιστικά φύλλα του *Microsoft Excel*[®]. Με την καταγραφή της τάσης και του ρεύματος του πηνίου σε κάθε χρονική στιγμή για μία περίοδο, είναι εφικτός ο προσδιορισμός των απωλειών ισχύος σε διάφορες μαγνητικές επαγωγές, καθώς και για τον υπολογισμό διάφορων (για διαφορετικά B_{max}) βρόχων υστέρησης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.8.



Σχήμα 3.8 : Οικογένεια βρόχων υστέρησης για διαφορετικά B_{max} .

Σύμφωνα με το νόμο του Ampere, η μαγνητεγερτική δύναμη που επάγεται από το πηνίο στο μαγνητικό κύκλωμα της πειραματικής διάταξης είναι:

$$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{enclosed} = N i \quad (3.1)$$

Όπου:

- H η στιγμιαία τιμή της ΜΕΔ στο μαγνητικό κύκλωμα σε A/m.
- N , οι σπείρες του πηνίου ($N=180$).
- i , η στιγμιαία τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο σε A.

Στην περίπτωση του πειράματος, το μέτρο της ΜΕΔ δίνεται από την εξίσωση 3.2:

$$H(t) = \frac{N i(t)}{2 \pi r} \quad (3.2)$$

Όπου: r είναι η μέση ακτίνα του δοκιμίου σε m.

Στην εξίσωση (3.2) είναι όλα γνωστά, και με βάση τις μετρήσεις του ρεύματος $i(t)$ υπολογίζουμε το $H(t)$ για μία περίοδο.

Επίσης, από το νόμο επαγωγής του Faraday έχουμε:

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d(\mathbf{B} \cdot \mathbf{S})}{dt} = -N S \frac{dB(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Όπου :

- E , είναι η αντι-ΗΕΔ που επάγεται στο πηνίο σε Volt.
- N , οι σπείρες του πηνίου.
- Φ , η μαγνητική ροή που διαπερνά το δοκίμιο σε Weber.
- S , η επιφάνεια που διαπερνά η ροή σε m^2 .
- $B(t)$, το μέτρο της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε Tesla.

Στην περίπτωση του δοκιμίου έχουμε από την 3.3:

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{E}{N S} \rightarrow$$

$$dB = -\frac{E}{N S} dt \rightarrow$$

$$B(t) = \int_0^t -\frac{E(t)}{NS} dt \quad (3.4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση όλα είναι γνωστά και μέσω των μετρήσεων της $E(t)$ μπορεί να υπολογιστεί το $B(t)$ για μία περίοδο. Ο υπολογισμός της 3.4 γίνεται με αριθμητική ολοκλήρωση, δηλαδή με προσέγγιση του τύπου 3.4 από τον τύπο του τραπεζίου:

$$B(t_n) - B(t_{n-1}) = -\frac{1}{NS} \left(\frac{E(t_n) + E(t_{n-1})}{2} \right) dt \quad (3.5)$$

Όπου t_n η χρονική στιγμή του n-οστού διακριτού σημείου της μέτρησης και dt η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μέτρησης.

Με βάση τους υπολογισμούς για τα $B(t)$ και $H(t)$ σχηματίζουμε την καμπύλη $B(H)$ που δίνει την χαρακτηριστικό βρόχο υστέρησης του υλικού για τη δεδομένη **συχνότητα** και V_{max} (και άρα B_{max}). Κατόπιν, υπολογίζουμε την ισχύ των απωλειών σιδήρου ως εξής:

$$P(t) = E(t) i(t) \quad (3.6)$$

Από την εξίσωση 3.6 εξάγουμε την μέση τιμή της ισχύος σε μία περίοδο \bar{P} που είναι και η συνολική ισχύς που δαπανάται προκειμένου να μαγνητίζεται το υλικό.

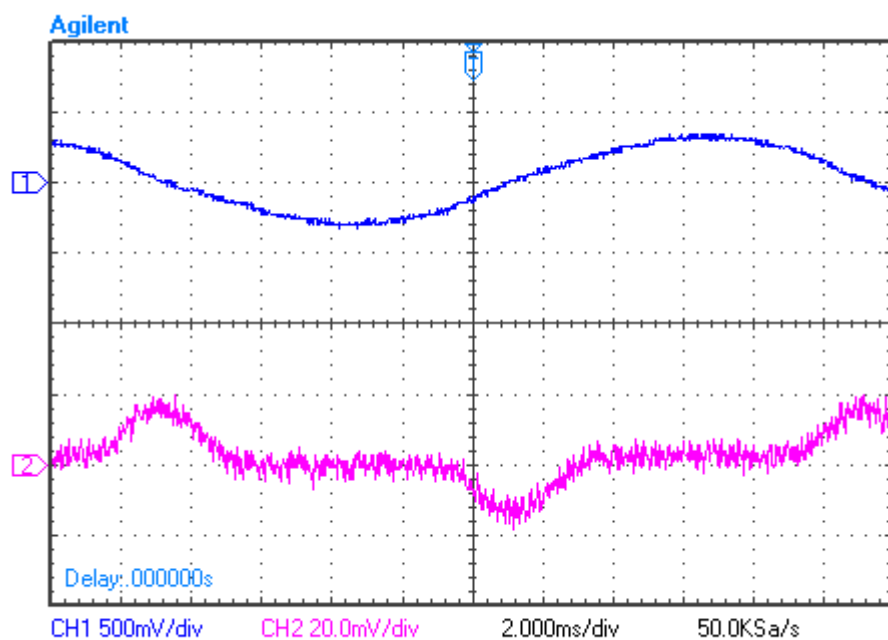
Τέλος, εφόσον υποθέτουμε ότι το υλικό είναι ομοιογενές και το τύλιγμα κατανέμεται γύρω του ομοιόμορφα, μπορούμε να υποθέσουμε με ασφάλεια ότι η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι όμοια σε κάθε σημείο του υλικού. Άρα, για να μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το πώς μεταβάλλονται οι απώλειες στο υλικό συναρτήσει της B_{max} , ανάγουμε την \bar{P} σε απώλεια ισχύος ανά μονάδα μάζας, διαιρώντας τη με το βάρος του δοκιμίου (0.1kg).

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για κάθε B_{max} και έτσι σχηματίζεται και η καμπύλη απωλειών ισχύος $P(W/kg) - B_{max}$ (T) για κάθε μετρηθείσα συχνότητα f .

3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

3.3.1α Μετρήσεις στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου για συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$

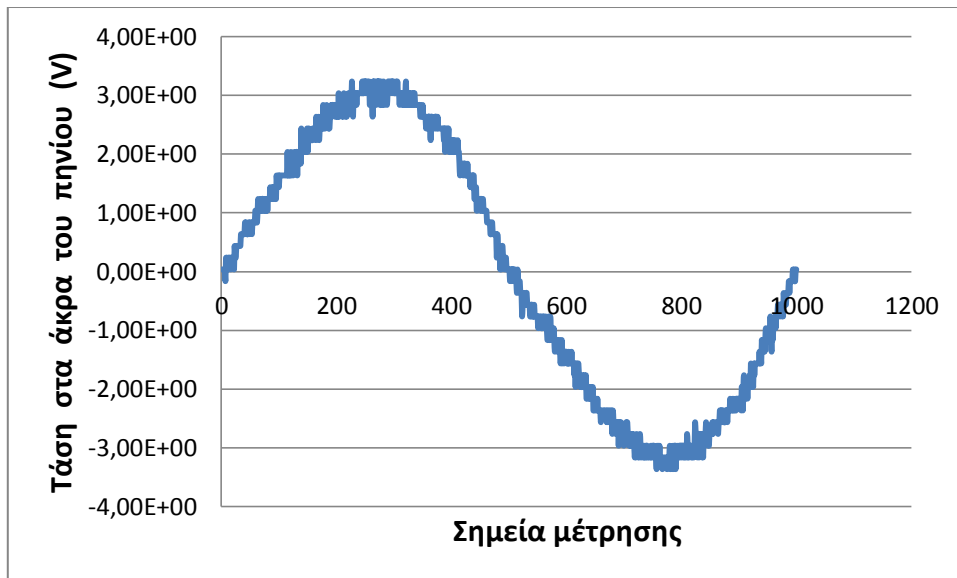
Το δοκίμιο του άμορφου σιδήρου μετρήθηκε για μία σειρά μαγνητικών επαγωγών σε τρεις διαφορετικές συχνότητες. Για τη συχνότητα των 50Hz λάβαμε μετρήσεις για διάφορες τάσεις (και συνεπώς B_{max}). Παρουσιάζουμε το παλμογράφημα της τάσης (μπλε) και του ρεύματος (μωβ), καθώς και τα διαγράμματα που προέκυψαν από αυτό για την περίπτωση όπου για την τάση εισόδου ίσχυε: $f = 50\text{Hz}$ και $V_{max} = 3.3 \text{ V}$.



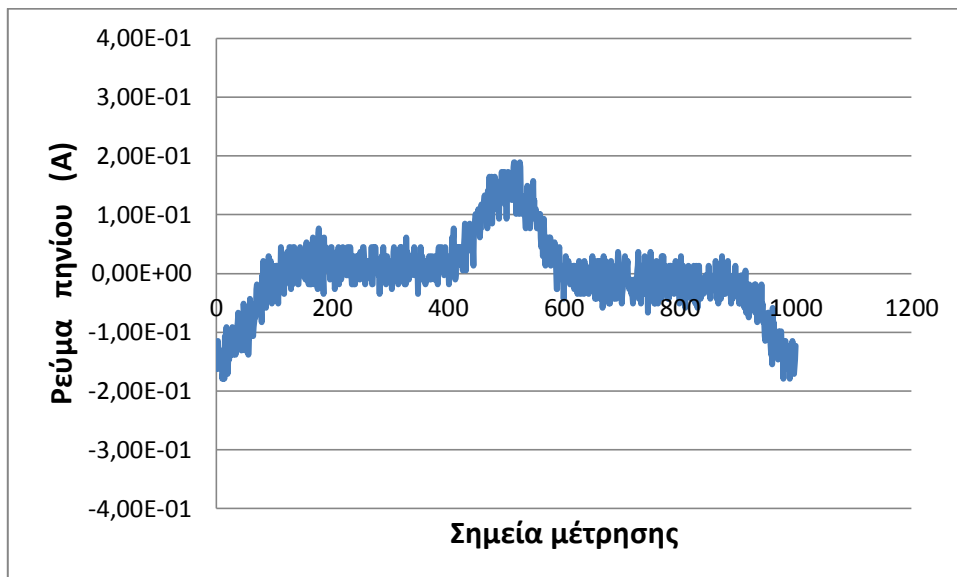
Σχήμα 3.9: Οθόνη παλμογράφου Agilent Technologies για 50Hz-3.3V.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε probe τάσης x10 και αμπεροτσιμπίδα ρεύματος με ρύθμιση 100mV/A.

Η παραπάνω μέτρηση καταγράφηκε ως εξής στο φύλλο εργασίας του *Microsoft Excel*[®]:



Σχήμα 3.10: Μέτρηση μιας περιόδου τάσης (1000 σημείων) για τάση εισόδου 50Hz-3.3V.

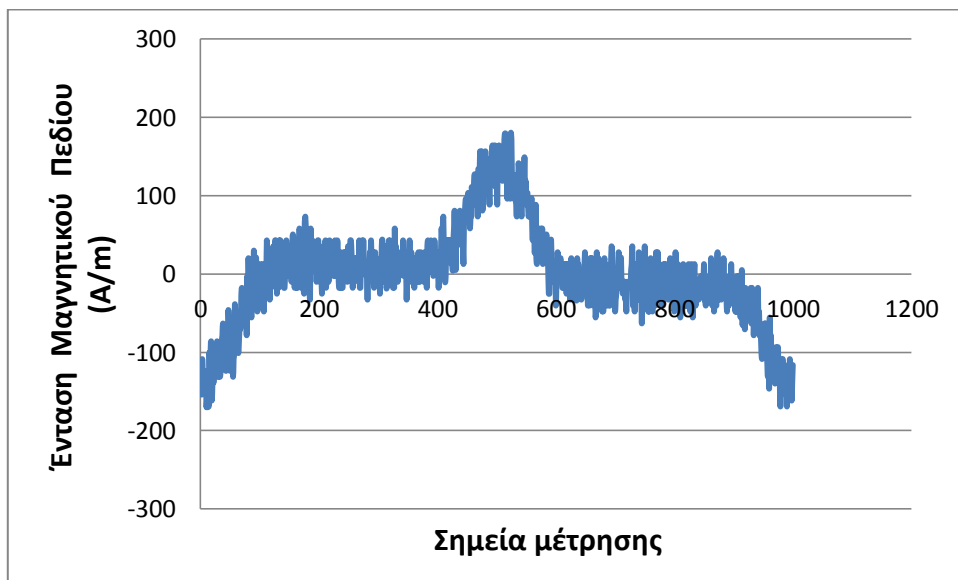


Σχήμα 3.11: Μέτρηση μιας περιόδου ρεύματος (1000 σημείων) για τάση εισόδου 50Hz-3.3V

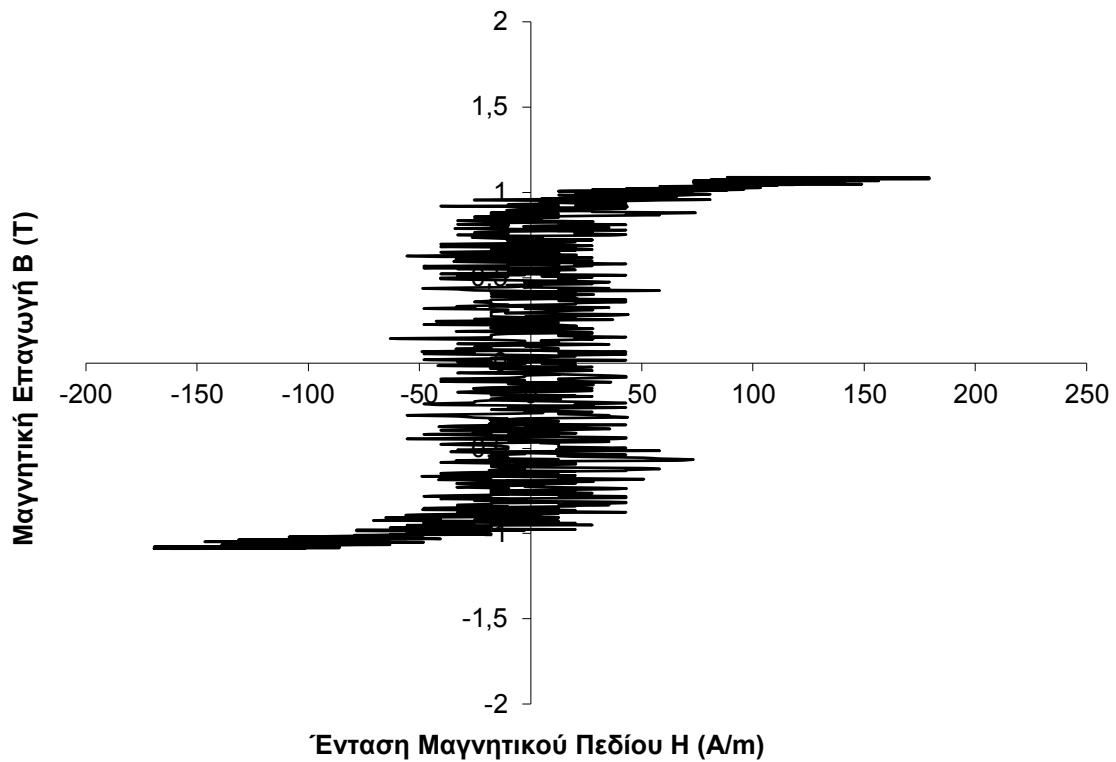
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι το ρεύμα μαγνήτισης έπεται 90° της τάσης, γεγονός που συνάδει με το θεωρητικό μοντέλο του μονοφασικού μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.12: Υπολογισμός μαγνητικής επαγωγής, για μία περίοδο, από τις τιμές τάσης (τάση εισόδου: 50Hz-3.3V).

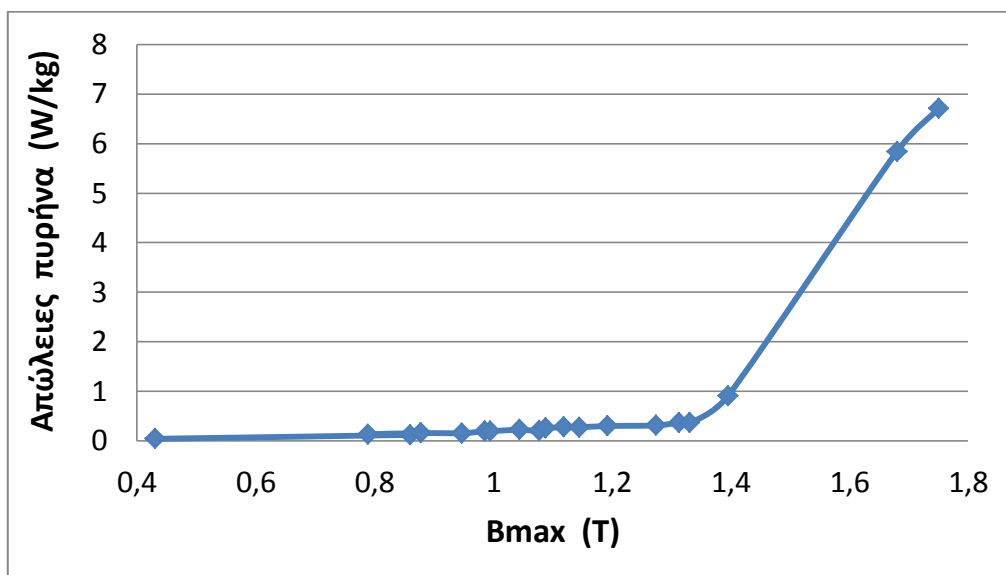


Σχήμα 3.13: Υπολογισμός έντασης μαγνητικού πεδίου, για μία περίοδο, από τις τιμές του ρεύματος (τάση εισόδου: 50Hz-3.3V).



Σχήμα 3.14: Βρόχος υστέρησης δοκιμίου άμορφου σιδήρου για τάση εισόδου 50Hz-3.3V.

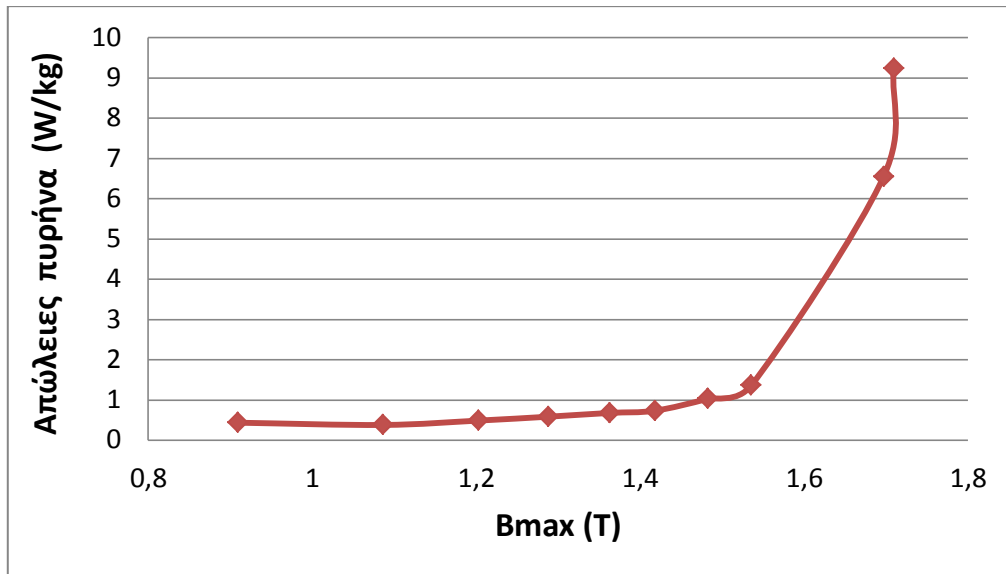
Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για διάφορα πλάτη τάσης, μέχρις ότου το ημίτονο της τάσης να μην παρουσιάζει αρμονικό περιεχόμενο, όπως προβλέπει το πρότυπο μεθόδου μέτρησης μαγνητικών ιδιοτήτων σε σιδηρομαγνητικά υλικά IEC 404-2 [3.9]. Το διάγραμμα που προέκυψε ως απώλειες πυρήνα είναι το εξής:



Σχήμα 3.15: Απώλειες πυρήνα του άμορφου σιδήρου για συχνότητα 50Hz.

3.3.1β Μετρήσεις στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου για συχνότητα $f = 100 \text{ Hz}$

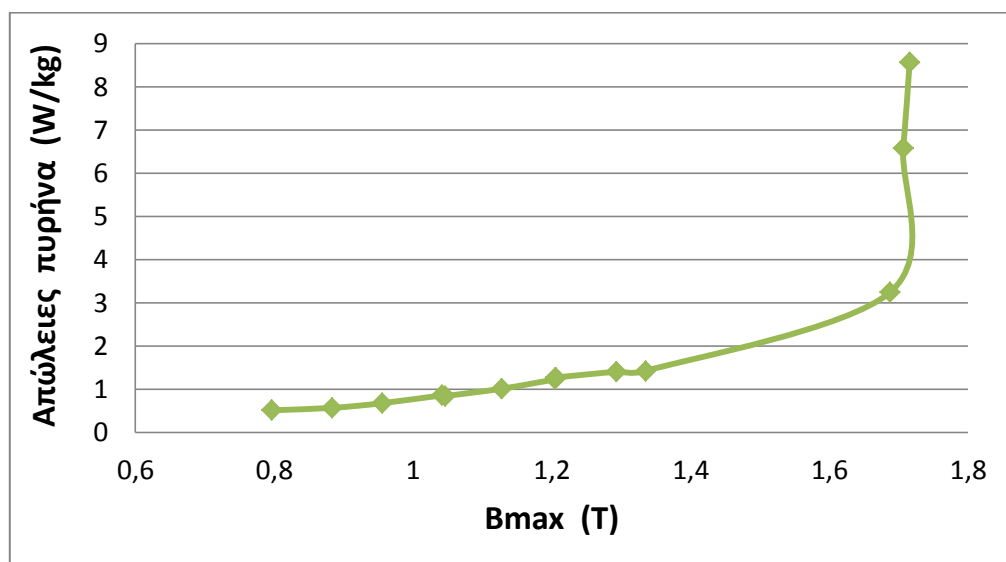
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο (3.3.1α) επαναλαμβάνεται όμοια, με συχνότητα αυτή τη φορά $f=100\text{Hz}$. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες πυρήνα έχουν ως εξής:



Σχήμα 3.16: Απώλειες πυρήνα του άμορφου σιδήρου για συχνότητα 100Hz.

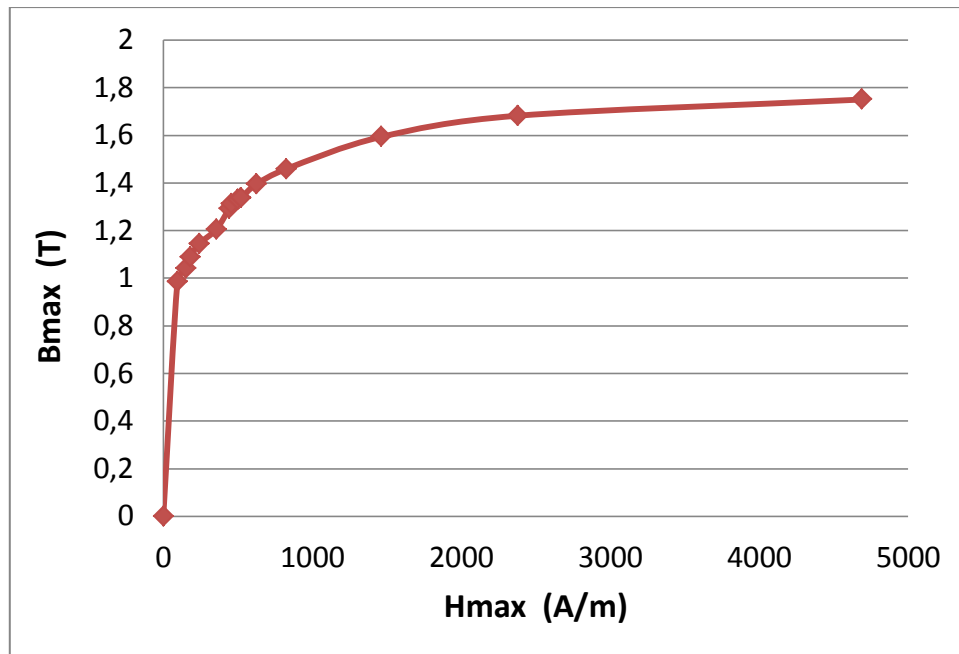
3.3.1γ Μετρήσεις στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου για συχνότητα $f = 125 \text{ Hz}$ και τελικά συμπεράσματα

Ακολουθούμε κατ' επανάληψη την ίδια διαδικασία με τις προηγούμενες παραγράφους και για τη συχνότητα $f=125\text{Hz}$. Οι απώλειες πυρήνα παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα.



Σχήμα 3.17: Απώλειες πυρήνα του άμορφου σιδήρου για συχνότητα 125Hz.

Επίσης, καταγράφοντας τα B_{max} και τα αντίστοιχα H_{max} για κάθε βρόχο υστέρησης που σχηματίζουμε (όπως στο Σχήμα 3.14) σχηματίζουμε την παρακάτω καμπύλη, που είναι η καμπύλη που αποτελείται από τις κορυφές των βρόχων $B(H)$ της οικογένειας καμπυλών $B(H)$ (όπως για παράδειγμα στην Σχήμα 3.8). Η καμπύλη αυτή ταυτίζεται με την καμπύλη μαγνήτισης του υλικού.



Σχήμα 3.18: Χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης για τον άμορφο σίδηρο.

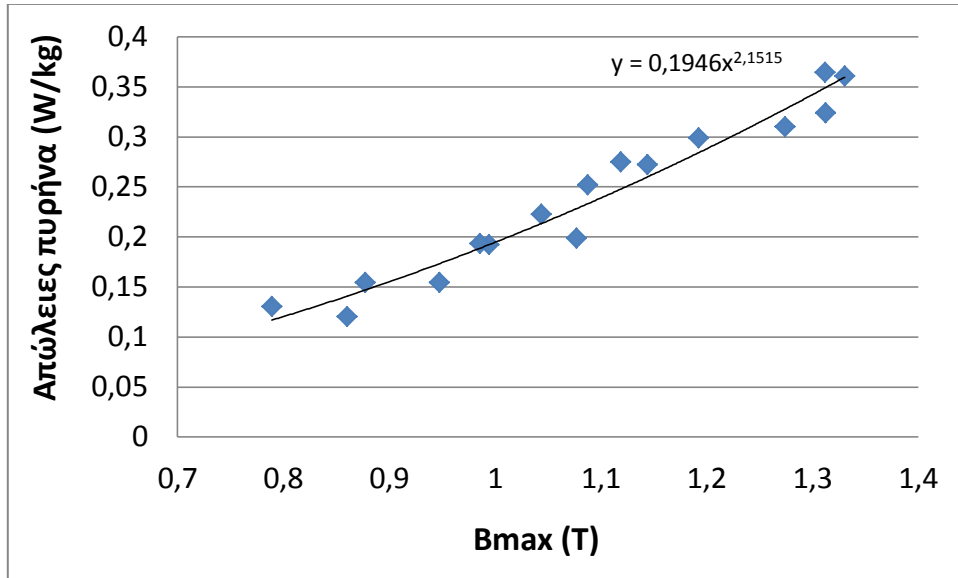
Παρατηρούμε ότι ο άμορφος σίδηρος παρουσιάζει γόνατο κορεσμού περίπου στα 1.5T, τιμή την οποία επιτυγχάνει για μαγνητικό πεδίο περίπου 1000 A/m. Επίσης, αυτό το γεγονός εξηγεί και την απότομη αύξηση των απωλειών πυρήνα μετά τα 1.5T και στις τρεις μετρηθείσες συχνότητες.

Γενικά, παρατηρούμε την άμεση εξάρτηση των απωλειών πυρήνα από το B_{max} . Πιο συγκεκριμένα, και για τις τρεις μετρηθείσες συχνότητες διαπιστώνεται ότι για $B_{max} < 1.5T$, οι απώλειες πυρήνα μπορούν να μοντελοποιηθούν από την παρακάτω εξίσωση:

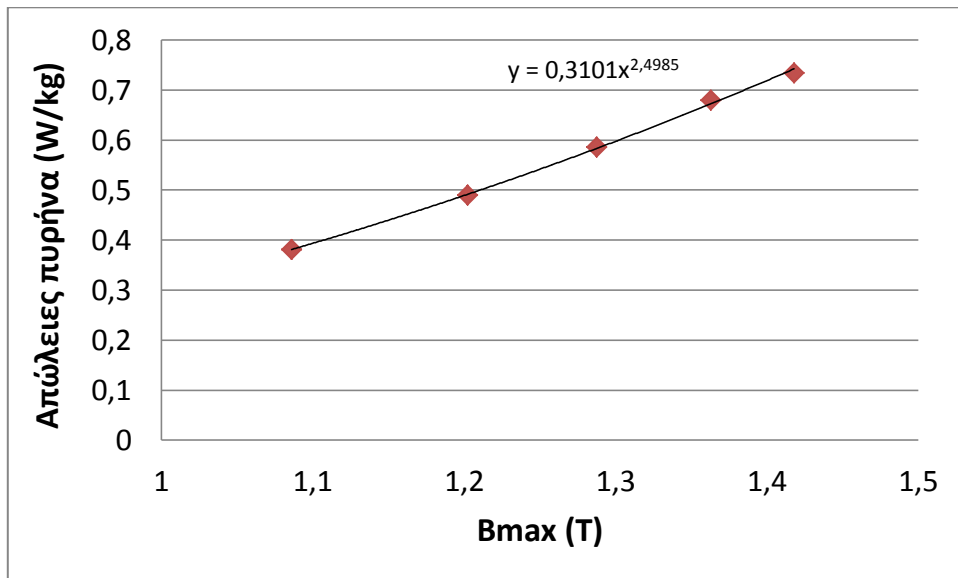
$$P_{losses}(f, B_{max}) = c(f) B_{max}^n \quad (3.7)$$

Όπου :

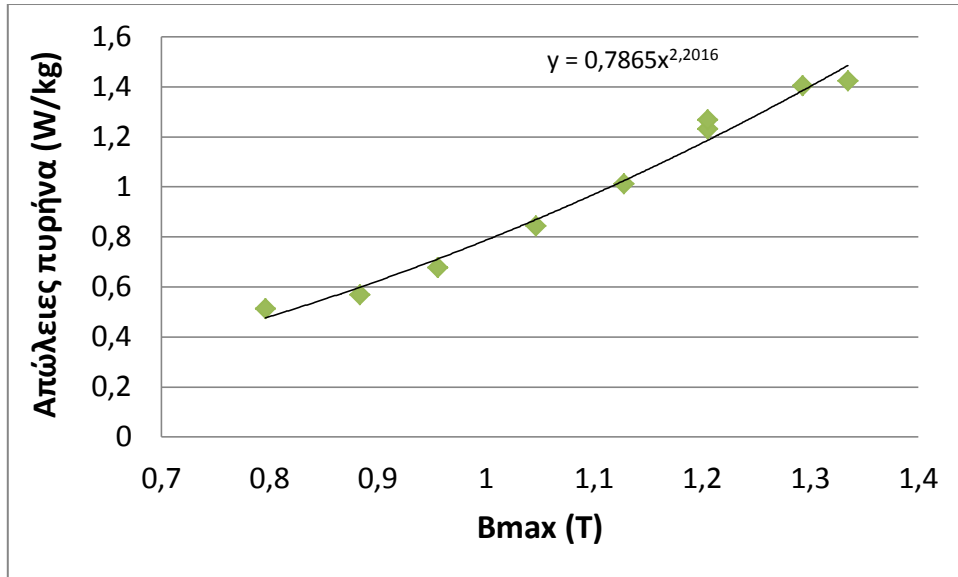
- $c(f)$, μία εκθετική συνάρτηση της συχνότητας.
- n , μία σταθερά, η οποία για τις συχνότητες που μελετήθηκαν (50,100,125 Hz) λαμβάνει τιμές μεταξύ [2, 2.5].



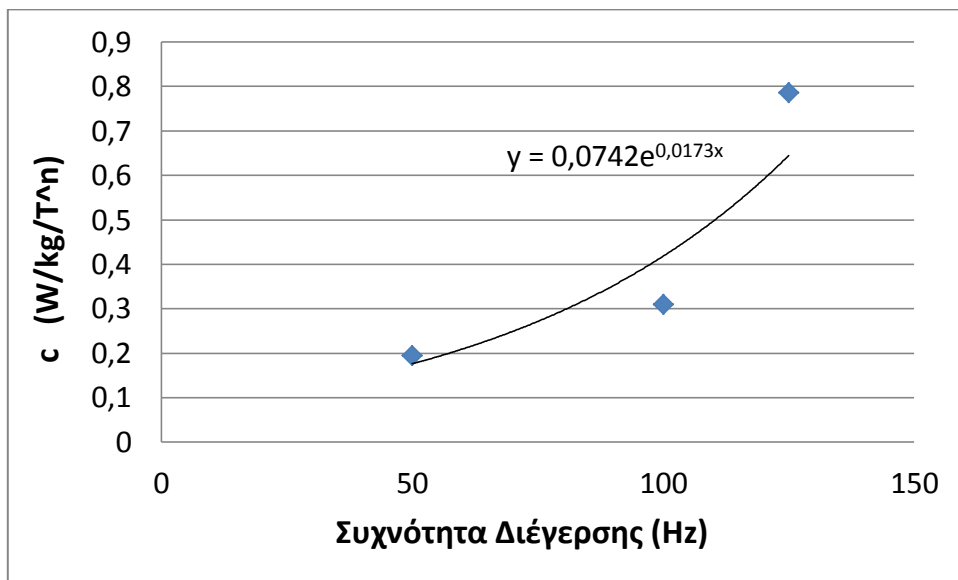
Σχήμα 3.19α: Γραμμή τάσης μετρήσεων για συχνότητα 50Hz, για $B_{max} < 1,5T$.



Σχήμα 3.19β: Γραμμή τάσης μετρήσεων για συχνότητα 100Hz, για $B_{max} < 1,5T$.



Σχήμα 3.19γ: Γραμμή τάσης μετρήσεων για συχνότητα 125Hz, για $B_{max} < 1,5T$.

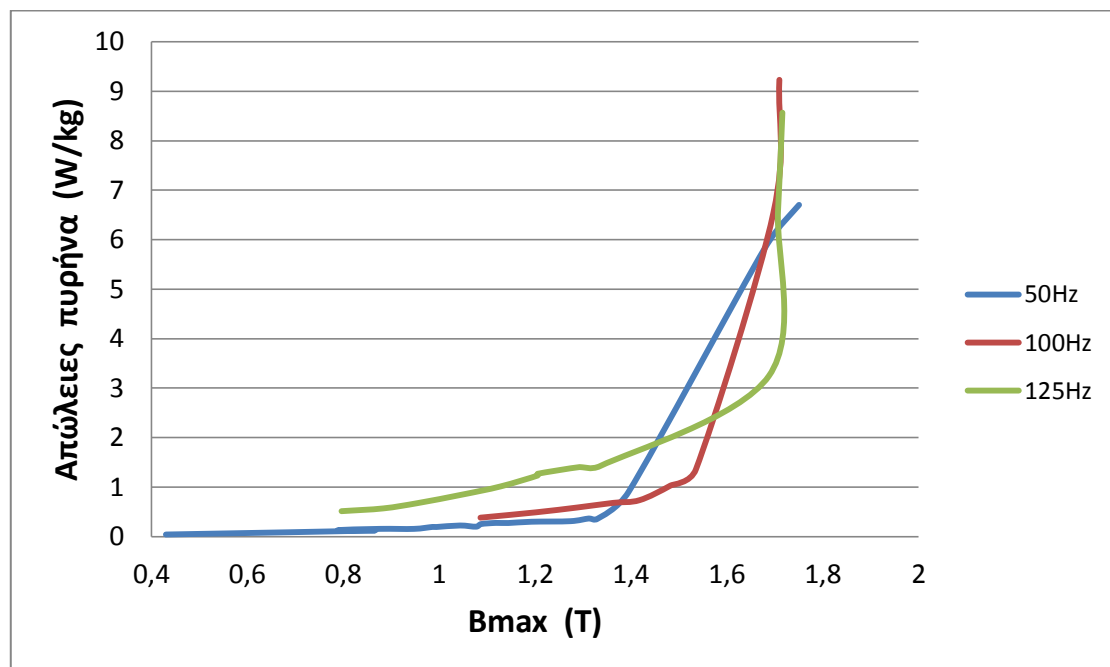


Σχήμα 3.19δ: Γραμμή τάσης μετρήσεων για τη συνάρτηση $c(f)$.

Παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές η εξίσωση (3.7), υπακούει στα συμπεράσματα των εξισώσεων 2.5 και 2.9, επιβεβαιώνοντας την προηγηθείσα θεωρητική ανάλυση. Απώλειες για $B_{max} > 1,5T$ δε δύναται να μοντελοποιηθούν γιατί εισερχόμαστε σε περιοχή κορεσμού και οι απώλειες αυξάνονται με ακανόνιστο τρόπο.

Επίσης, χρήσιμα είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της εξάρτησης των απωλειών από τη συχνότητα. Από τη φύση της διαδικασίας διεξαγωγής των μετρήσεων δεν είναι δυνατό να προκύψει κάποια εξίσωση που να μοντελοποιεί τις απώλειες πυρήνα ως προς τη συχνότητα, ωστόσο μπορούν να προκύψουν ορισμένα ποιοτικά συμπεράσματα.

Γενικά, με αύξηση της συχνότητας προκύπτει αύξηση των απωλειών, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, γεγονός το οποίο συμβαδίζει με τη θεωρία. Επίσης, παρατηρούμε ότι το γόνατο της καμπύλης απωλειών μετατοπίζεται σε ολοένα και μεγαλύτερα B_{max} για αύξηση της συχνότητας. Τέλος, η κλίση της κάθε καμπύλης για $B_{max} = 1.7T$ (η τελευταία μέτρηση που πάρθηκε για κάθε συχνότητα), είναι αυξανεται με αύξηση της συχνότητας.



Σχήμα 3.20: Σύγκριση απωλειών πυρήνα άμορφου σιδήρου για διάφορες συχνότητες διέγερσης.

3.3.2 Διαγράμματα για τη λαμαρίνα M235-35A & σύγκριση με άμορφο σίδηρο.

Ακολουθούν τα διαγράμματα για τη συμβατική λαμαρίνα M235-35A της ThyssenKrupp® και μία σύγκριση των μαγνητικών ιδιοτήτων τους. Οι τιμές των μαγνητικών ιδιοτήτων ελήφθησαν από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή [3.8].

Πίνακας 3.3: Απώλειες πυρήνα (W/kg) της λαμαρίνας M235-35A.

B_{max} (T)	$f=50\text{Hz}$	$f=100\text{Hz}$	$f=125\text{Hz}$
0,5	0.33	0.77	1.02
0,6	0.45	1.04	1.30
0,7	0.57	1.34	1.77
0,8	0.71	1.66	2.20
0,9	0.85	2.01	2.67
1,0	1.02	2.39	3.18
1,1	1.19	2.81	3.75
1,2	1.4	3.3	4.40
1,3	1.64	3.88	5.18
1,4	1.95	4.61	6.19
1,5	2.27	5.36	7.23
1,6	2.59	6.22	-
1,7	2.92	-	-
1,8	3.2	-	-

Τα αποτελέσματα για τη συχνότητα των 125Hz ελήφθησαν με παρεμβολή, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που παρέχει το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή για τις συχνότητες 100Hz. και 200Hz. Πιο συγκεκριμένα, με βάση την εξίσωση (2.10) προκύπτει ότι οι απώλειες πυρήνα δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{losses}(f, B_{max}) = P_{hysteresis} + P_{eddy} = K_h f B_{max}^n + K_e f^2 B_{max}^2 \quad (2.10)$$

Όπου κατά τα γνωστά, οι σταθερές K_h και K_e δεν μεταβάλλονται σημαντικά για τιμές επαγωγής και συχνότητας κοντινές μεταξύ τους. Έτσι, έχοντας τις τιμές $P(100\text{Hz}, B_{max})$ και $P(200\text{Hz}, B_{max})$ από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή, προκύπτει το εξής σύστημα:

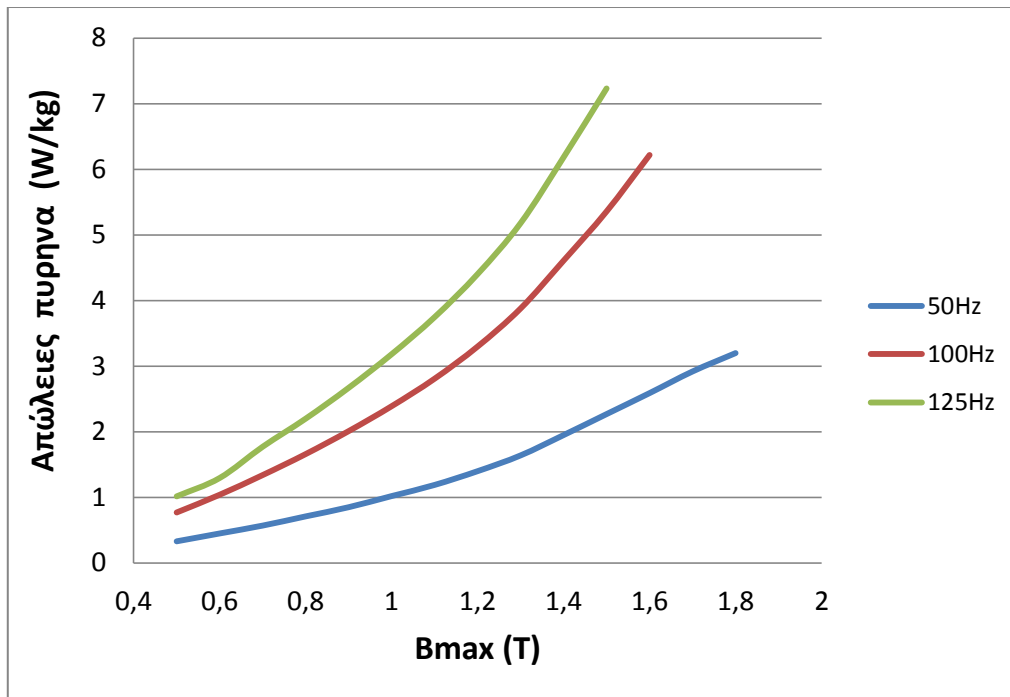
$$\frac{P(100\text{Hz}, B_{max})}{100} = K_h B_{max}^n + K_e B_{max}^2 (100) = a + 100b \quad (\Sigma 1)$$

$$\frac{P(200\text{Hz}, B_{max})}{200} = K_h B_{max}^n + K_e B_{max}^2 (200) = a + 200b \quad (\Sigma 2)$$

Υποθέτοντας σταθερά τα (a, b) για την περιοχή συχνοτήτων [100,200] Hz, λύνουμε το σύστημα ($\Sigma 1$ - $\Sigma 2$) και υπολογίζουμε τα (a, b) . Ακολούθως, υπολογίζουμε για όλα τα B_{max} τις τιμές $P(125\text{Hz}, B_{max})$ από την εξίσωση:

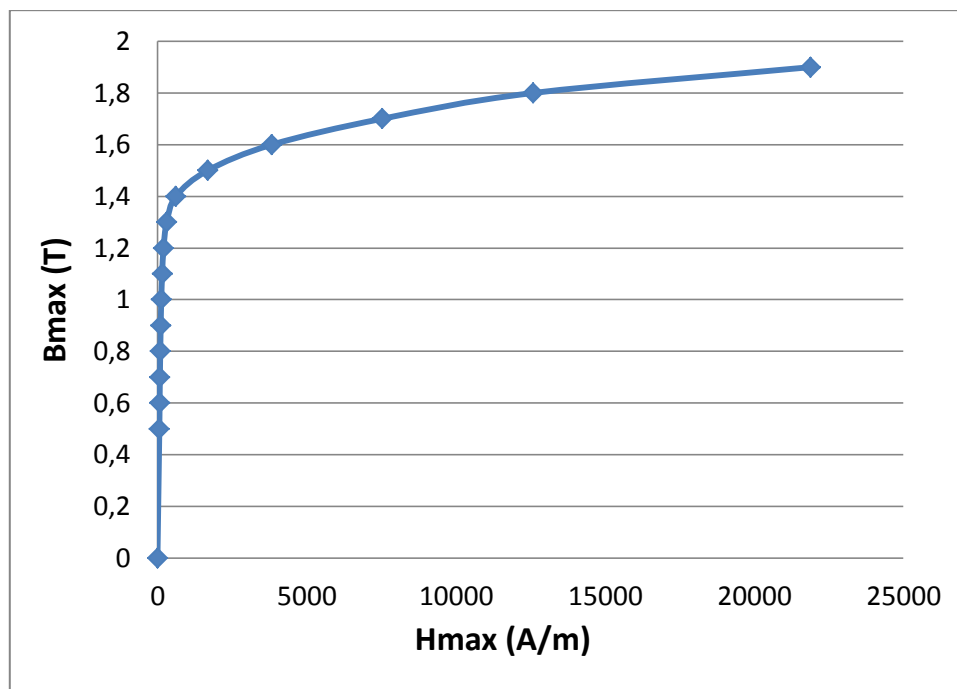
$$P(125\text{Hz}, B_{max}) = (a + 125b) \cdot 125 \quad (3.8)$$

Ακολουθεί η καμπύλη απωλειών για διάφορες συχνότητες.



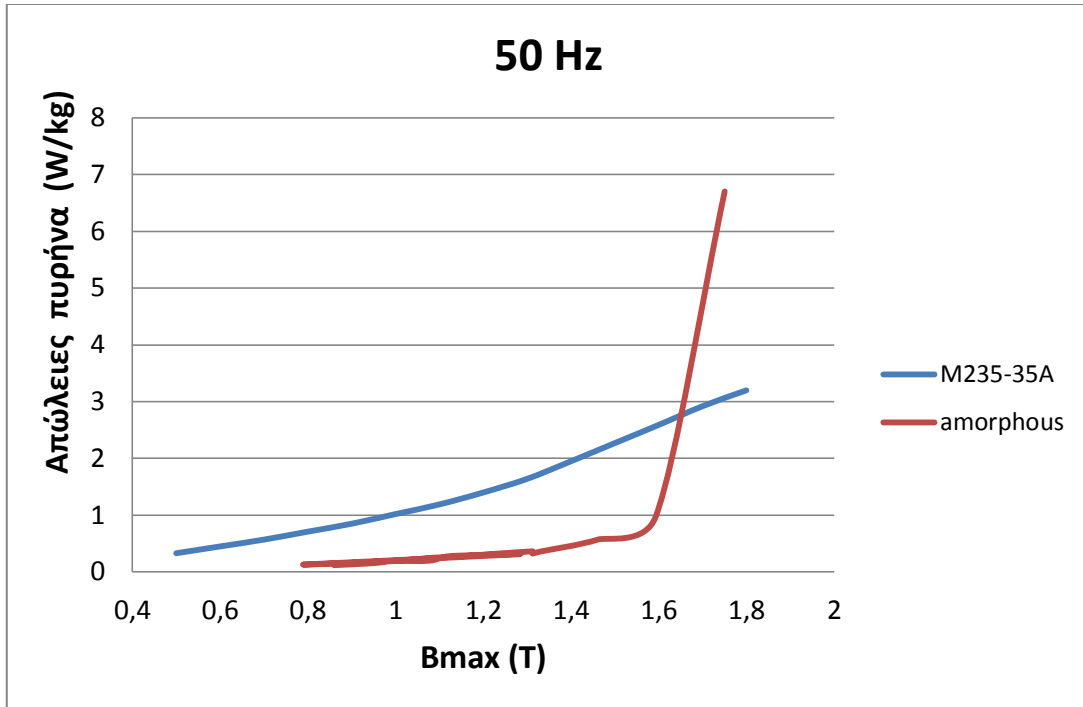
Σχήμα 3.21: Απώλειες πυρήνα M235-35A για διάφορες συχνότητες διέγερσης.

Ακολούθως, παρουσιάζουμε την καμπύλη μαγνήτισης του υλικού.

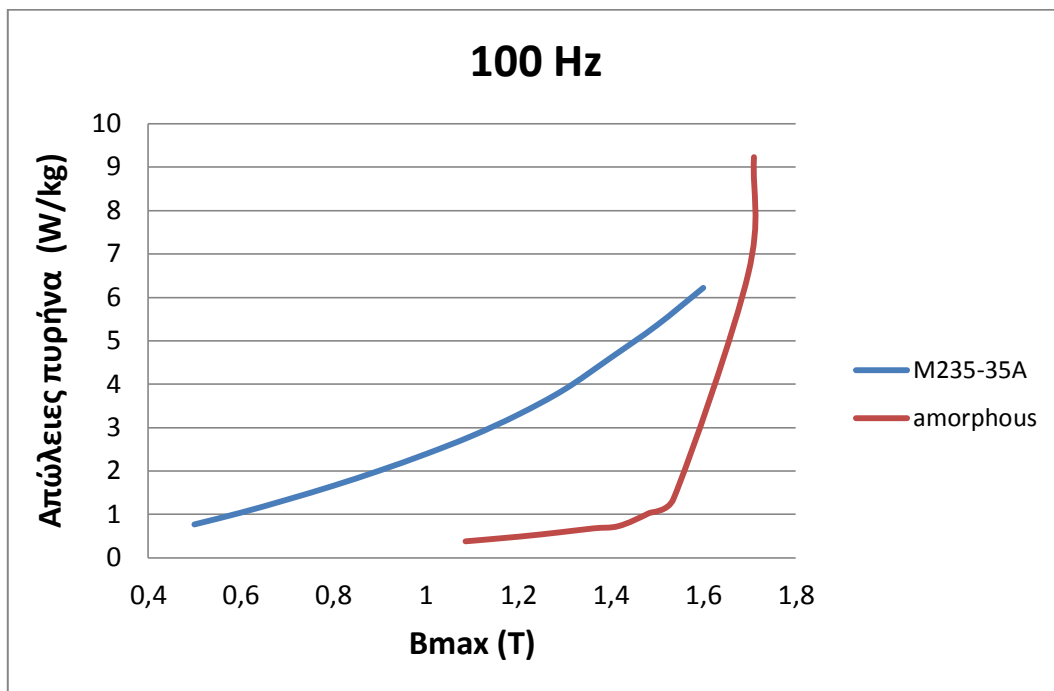


Σχήμα 3.22: Καμπύλη μαγνήτισης M235-35A.

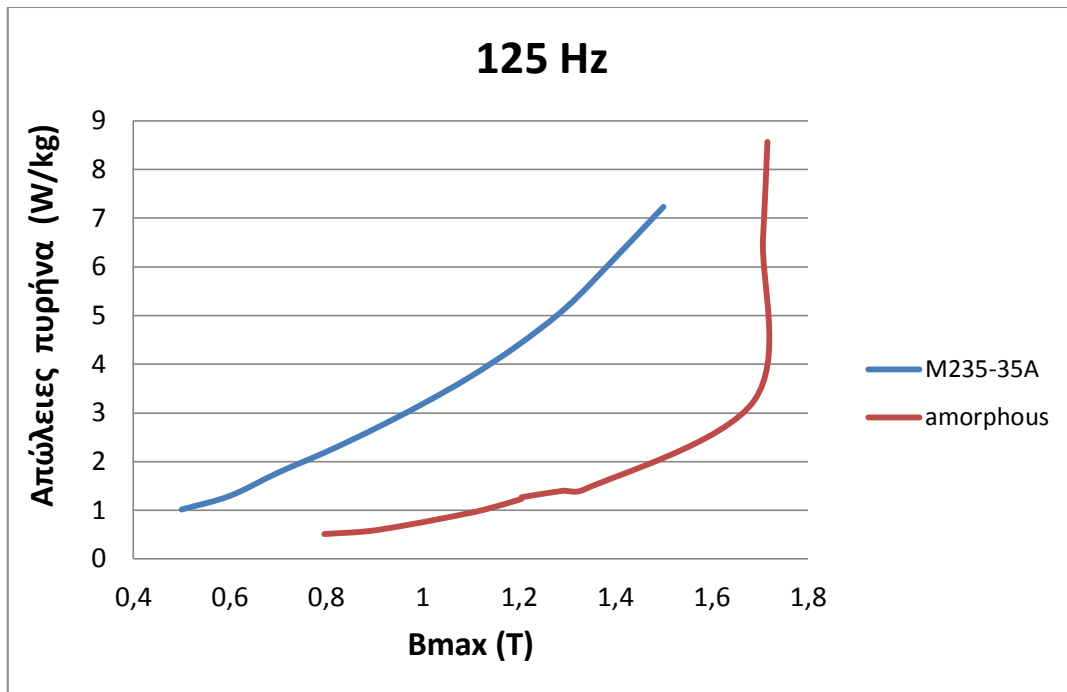
Ακολουθεί η σύγκριση των δύο υλικών.



Σχήμα 3.23: Σύγκριση απωλειών άμορφου σιδήρου και M235-35A στα 50Hz.



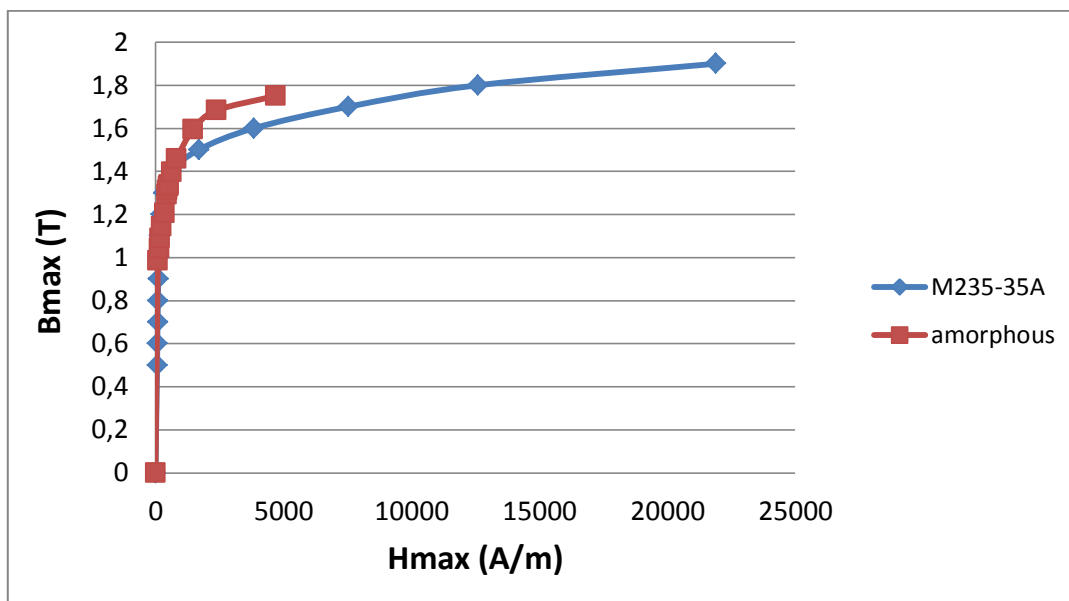
Σχήμα 3.24: Σύγκριση απωλειών άμορφου σιδήρου και M235-35A στα 100Hz.



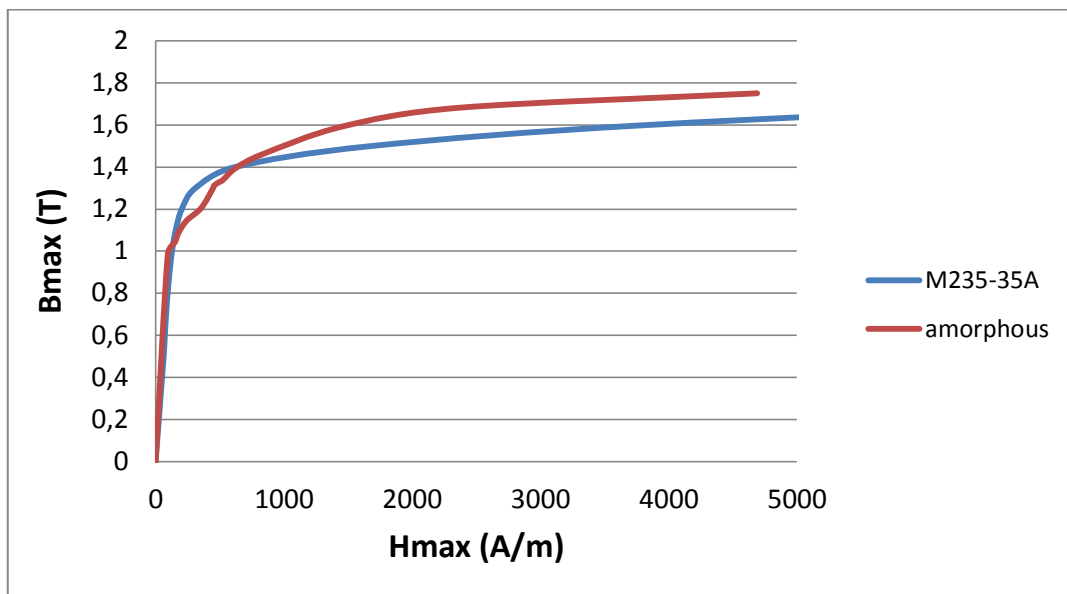
Σχήμα 3.25: Σύγκριση απωλειών άμορφου σιδήρου και M235-35A στα 125Hz.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι για $B_{max} < 1.7T$, και στις τρεις συχνότητες που μετρήθηκαν, οι απώλειες πυρήνα είναι δεόντως χαμηλότερες για τον άμορφο σίδηρο. Για $B_{max} > 1.7T$, οι απώλειες πυρήνα είναι χαμηλότερες για τη λαμαρίνα M235-35A , τουλάχιστον μέχρι τα 2T (που είναι η επαγωγή κορεσμού για τη λαμαρίνα M235-35A). Για υψηλότερες τιμές μέγιστης επαγωγής δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλές συμπέρασμα καθώς ο κατασκευαστής δεν παρέχει πληροφορίες.

Τέλος παρουσιάζουμε τη σύγκριση των δύο υλικών ως προς τη μαγνήτιση.



Σχήμα 3.26α: Σύγκριση μαγνήτισης άμορφου σιδήρου και M235-35A.



Σχήμα 3.26β: Λεπτομέρεια σχήματος 3.26α.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο άμορφος σίδηρος φτάνει στον κορεσμό για πολύ χαμηλότερες τιμές μαγνητικού πεδίου (H) από ότι η λαμαρίνα M235-35A. Αυτό δείχνει ότι έχει και πολύ μικρότερο βρόχο υστέρησης (για ίδιο B_{max} και συχνότητα), και συνεπώς επιβεβαιώνει το γεγονός ότι έχει χαμηλότερες απώλειες σε χαμηλές επαγωγές ($B_{max} < 1,4T$).

Επίσης, από το Σχήμα 3.26β συνάγεται το συμπέρασμα ότι στην περιοχή μέγιστων διεγέρσεων μεταξύ 1000 και 5000 A/m ο άμορφος σίδηρος εμφανίζει μεγαλύτερες μαγνητικές επαγωγές. Αυτό το γεγονός συνδυαζόμενο με τις απώλειες καθενός υλικού στις συγκεκριμένες επαγωγές ($B_{max} > 1,4T$) καθιστά τον άμορφο σίδηρο λιγότερο συμφέρον σε σχέση με τη συμβατική λαμαρίνα M235-35A για τη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργιών.

Για περιοχές διεγέρσεων μεγαλύτερες των 5000 A/m δεν υπάρχουν μετρήσεις για τον άμορφο σίδηρο, εν τούτοις από το Σχήμα 3.26α φαίνεται ότι η τάση του άμορφου σιδήρου είναι να εμφανίσει μικρότερες επαγωγές από τη λαμαρίνα M235-35A για διεγέρσεις μεγαλύτερες των 10 kA/m .

3.4 Βιβλιογραφία

- [3.1] Klement, W.; Willens, R. H.; Duwez, POL (1960), "*Non-crystalline Structure in Solidified Gold-Silicon Alloys*", *Nature* 187 (4740): p. 869–870.
- [3.2] N. DeCristofaro (1998), "*Amorphous Metals in Electric-Power Distribution Applications*", *Materials Research Society MRS Bulletin*, Vol. 23, Number 5, p. 50-56.
- [3.3] Zallen, R. "*The Physics of Amorphous Solids*", (Wiley Classics Library, 1983).
- [3.4] Wang, W.H.; Dong, C.; Shek, C.H. (2004), "*Bulk metallic glasses*", *Journal of Materials Science and Engineering*, 44, p. 45-89.
- [3.5] Hufnagel Research Group, "*Metallic glasses: Mechanical Properties*", https://jshare.johnshopkins.edu/thufnag1/Public_html/metallicglass_properties.html
- [3.6] Metglas Inc., *Power System Product*, http://www.metglas.com/products/page5_1_5.htm
- [3.7] Asia Energy Platform (2011), "*Review and the Future of Amorphous Metal Transformers in Asia*", p. 2.
- [3.8] ThyssenKrupp Steel, *Power Core[®] M235-35A Elektroband NO/ NGO electrical Steel*, February 2009.
- [3.9] International Electrotechnical Commission, "*IEC 404-2, Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame*", 3rd edition, 1996.
- [3.10] Hasegawa, R.; Azuma, D. (2008), "*Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment*", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, p. 2451-2456.

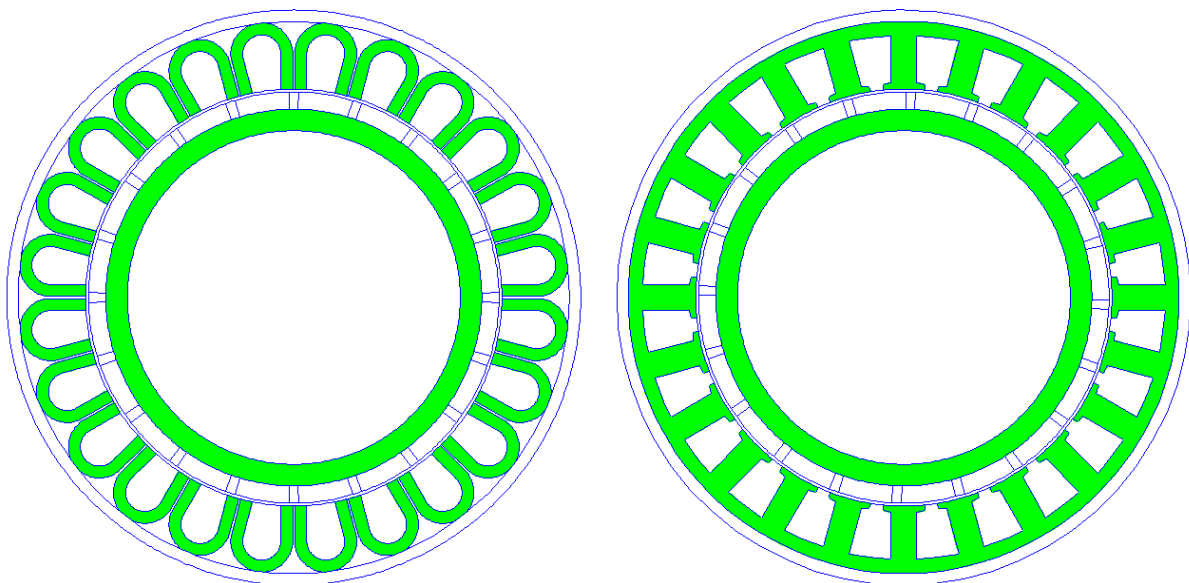
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

4.1 Ανάλυση γεωμετρίας των μοντέλων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο παρόμοιες σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών και συγκρίνονται ως προς την καταλληλότητά τους για μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο προς σύγκριση μηχανές θα πρέπει να είναι ικανές να εξυπηρετήσουν φορτίο $30 Nm$ στις $750 rpm$ με τις λιγότερες δυνατές απώλειες πυρήνα, δηλαδή τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

Οι δύο μηχανές είναι γενικά παρόμοιες γεωμετρίας και διαστάσεων, ενώ το βασικό σημείο στο οποίο διαφέρουν είναι η επιλογή του σιδηρομαγνητικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για το μαγνητικό κύκλωμα της εκάστοτε μηχανής. Στην πρώτη μηχανή χρησιμοποιείται άμορφος σίδηρος, σαν αυτόν που μελετήθηκε στο κεφάλαιο 3, ενώ στη δεύτερη μηχανή χρησιμοποιείται η λαμαρίνα M235-35A.



Σχήμα 4.1 : Η γεωμετρία των δύο προς μελέτη μηχανών. Αριστερά, η μηχανή με τον άμορφο σίδηρο, και δεξιά, η μηχανή με τη λαμαρίνα M235-35A. Οι σημειωμένες με πράσινο χρώμα περιοχές υποδηλώνουν την περιοχή όπου υπάρχει σιδηρομαγνητικό υλικό.

Στο εξής, η μηχανή που έχει στο μαγνητικό της κύκλωμα άμορφο σίδηρο θα καλείται «μηχανή με άμορφο σίδηρο», ενώ η μηχανή της οποίας το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από συμβατική λαμαρίνα M235-35A, θα αναφέρεται ως «μηχανή με συμβατική λαμαρίνα M235-35A».

Η βασική διαφορά στη γεωμετρία των δύο μηχανών είναι ότι η διαμόρφωση του μαγνητικού κυκλώματος στο στάτη της μηχανής με άμορφο σίδηρο είναι πεταλοειδούς σχήματος, σε αντίθεση με τη μηχανή κλασικής λαμαρίνας που ακολουθείται η τυπική γεωμετρία δοντιού – αύλακας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο άμορφος σίδηρος κατασκευάζεται συνήθως σε ταινίες (όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3), ενώ η συμβατική λαμαρίνα μπορεί να κοπεί σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα. Παρακάτω παρατίθενται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τις δύο μηχανές.

Πίνακας 4.1 : Σχεδιαστικές παράμετροι των δύο μηχανών.

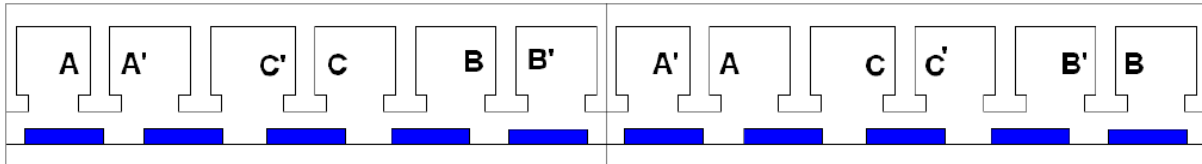
	Μηχανή Άμορφου	Μηχανή M235-35A
Εμβαδόν αύλακας (mm ²)	54.7	54.3
Ενεργό μήκος μηχανής (mm)	120	120
Πλάτος Διάκενου (mm)	0.5	0.5
Εμβαδόν σιδήρου στο στάτη (cm ²)	13.5	18
Εμβαδόν σιδήρου στο δρομέα (cm ²)	7.3	7.3
Ακτίνα άξονα (mm)	29	29
Εσωτερική ακτίνα μαγνήτη (mm)	32.75	32.75
Εξωτερική ακτίνα δρομέα (mm)	35.75	35.75
Γωνία τόξου μαγνήτη	15.3°	15.3°
Εσωτερική ακτίνα στάτη (mm)	36.25	36.25
Εξωτερική ακτίνα στάτη (mm)	48	48
Εξωτερική ακτίνα περιβλήματος (mm)	50	50
Μήκος δοντιού (mm)	-	9.25
Πλάτος δοντιού (mm)	4.19*	4.55
Άνοιγμα αύλακας (mm)	4.25	2.22
Φάσεις	3	3
Πόλοι	20	20
Αριθμός αυλάκων στάτη	24	24

(* ως πλάτος δοντιού ορίζουμε για τη μηχανή του άμορφου σιδήρου, το άθροισμα του πλάτους δύο παρακείμενων άκρων δύο διαδοχικών πετάλων, καθώς έχει εντελώς όμοια λειτουργικότητα με το πλάτος του δοντιού στην κλασική μηχανή.)

Όπως παρατηρούμε και από τον παραπάνω πίνακα, οι 2 μηχανές είναι σχεδιαστικά παρόμοιες. Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του τυλίγματός τους, έχουμε από τα δεδομένα ότι κάθε μηχανή έχει 24 αύλακες ($Q = 24$), 3 φάσεις ($m = 3$) και 20 πόλους ($p = 20$). Άρα:

$$q = \frac{Q}{m p} = \frac{2}{5} \text{ αύλακες ανά πόλο και φάση}$$

που σημαίνει ότι έχουμε μηχανή κλασματικού βήματος. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στην κατανομή του τυλίγματος στις αύλακες κάθε μηχανής, η κατανομή που ακολουθείται περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.2: Κατανομή τυλίγματος στις αύλακες. Με μπλε χρώμα οι μόνιμοι μαγνήτες.

Έτσι, προκύπτει ότι το κλασματικό βήμα της μηχανής είναι ίσο με 5/6.

4.2 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος που περιγράφει τη γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, συνηθίζεται η χρήση λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό femm.

Το λογισμικό αυτό μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου στη γεωμετρία μιας μηχανής, χωρίζοντάς τη σε μικρότερες υποπεριοχές (τριγωνικού σχήματος), και ακολούθως επιλύοντας τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν από τους νόμους του Maxwell έτσι όπως εφαρμόζονται σε κάθε υποπεριοχή. Η τελική λύση της γεωμετρίας της μηχανής προκύπτει ως σύνθεση των υποπροβλημάτων των επί μέρους υποπεριοχών. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει αρχικά την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στον μετεπεξεργαστή του femm, και μέσω αυτού μπορούν να υπολογιστούν με ικανοποιητική ακρίβεια μεγέθη που αφορούν στην επίδοση και την απόδοση μιας μηχανής, όπως: ροπή, δύναμη, απώλειες, πυκνότητα ρεύματος[4.1].

4.2.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο θεωρείται χρονοανεξάρτητο. Σε αυτή την περίπτωση η ένταση του πεδίου (\mathbf{H}) και η πυκνότητα ροής (\mathbf{B}) πρέπει να ικανοποιούν από τους νόμους του Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.2)$$

Επίσης, για όλα τα υλικά ισχύει :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.3)$$

Αν το υλικό όμως δεν είναι γραμμικό (για παράδειγμα: κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες Alnico), τότε η επιτρεπτικότητα μ είναι συνάρτηση της πυκνότητας ροής \mathbf{B} :

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}(\mathbf{B})} \quad (4.4)$$

Το femm προκειμένου να υπολογίσει το πεδίο που ικανοποιεί τις εξισώσεις (4.1-4.3) μέσω χρησιμοποιεί την έννοια του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, που αποδεικνύεται από την εξίσωση 4.2 ότι υπάρχει πάντα:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.5)$$

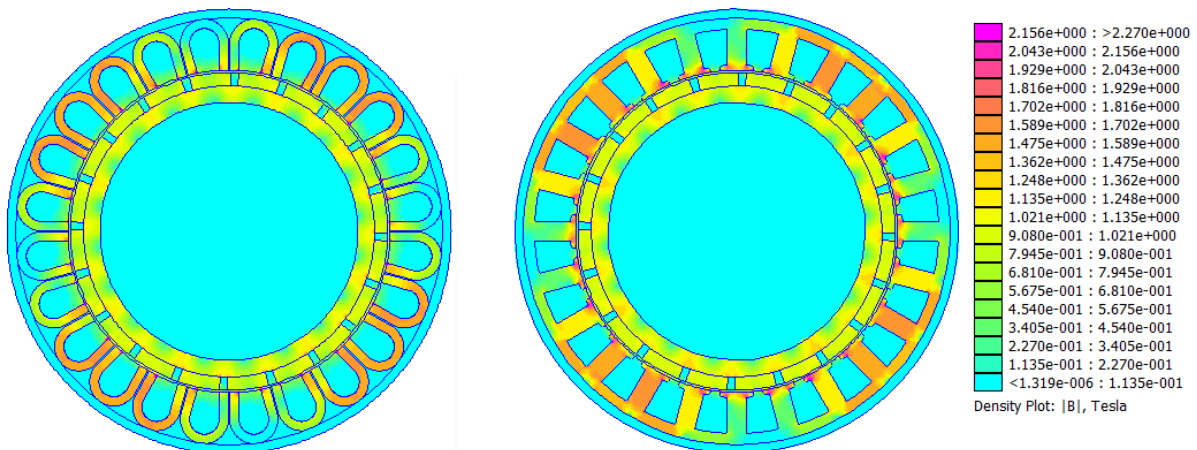
Με βάση τις εξισώσεις (4.4) και (4.5) προκύπτει από την (4.1):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4.6\alpha)$$

Υποθέτοντας γραμμικό και ισότροπο μέσο (και $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$) η εξίσωση (4.6α) καταλήγει:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (4.6\beta)$$

Άρα, το femm επιλύοντας την παραπάνω δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση σε κάθε υποπεριοχή (τρίγωνο) του προβλήματος, υπολογίζει σε όλα τα σημεία το δυναμικό A , και επομένως τις τιμές των \mathbf{B} και \mathbf{H} απλά παραγωγίζοντας το \mathbf{A} . Αυτό είναι και το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης του διανυσματικού δυναμικού, δηλαδή ο συνδυασμός όλων των συνθηκών σε μία σχέση, από την οποία αν προκύψει το \mathbf{A} , προκύπτουν σαν άμεσο επακόλουθο και τα \mathbf{B} και \mathbf{H} .



Σχήμα 4.3: Παράδειγμα επιλυμένου προβλήματος στο femm. Ο μετεπεξεργαστής παρουσιάζει εποπτικά την κατανομή του πεδίου στις 2 μηχανές, μέσω της χρωματικής διαβάθμισης.

4.2.2 Οριακές Συνθήκες

Σε κάθε μαγνητοστατικό πρόβλημα είναι απαραίτητος ο καθορισμός ενός κατάλληλου αριθμού από οριακές συνθήκες, οι οποίες θα καταστήσουν τη λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων του προβλήματος μοναδική. Υπάρχουν 5 ειδών οριακές συνθήκες:

- **Dirichlet:** Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης η τιμή του δυναμικού \mathbf{A} είναι σαφώς ορισμένη πάνω σε ένα όριο, (για παράδειγμα $\mathbf{A}=0$). Ο πιο κοινός

τύπος οριακής συνθήκης Dirichlet είναι ο ορισμός μηδενικού μαγνητικού δυναμικού κατά μήκος ενός συνόρου προκειμένου να παρεμποδιστεί η μαγνητική ροή να διαπεράσει το σύνορο αυτό.

- **Neumann:** Αυτή η οριακή συνθήκη προσδιορίζει την παράγωγο του μαγνητικού δυναμικού κατά μήκος μίας καμπύλης – συνόρου. Στα μαγνητικά προβλήματα, η ομογενής συνθήκη Neumann ($\frac{\partial A}{\partial n} = 0$), ορίζεται κατά μήκος ενός συνόρου προκειμένου να υποχρεώσει τη μαγνητική ροή να περάσει κάθετα το σύνορο. Αυτού του είδους η οριακή συνθήκη συνήθως χρησιμοποιείται σε επιφάνεια με υλικό πολύ μεγάλης διαπερατότητας.
- **Robin:** Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένας συνδυασμός Dirichlet και Neumann, περιγράφοντας μία σχέση μεταξύ του δυναμικού A και της παραγώγου του σε ένα σύνορο. (για παράδειγμα: $\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0$). Αυτή η συνθήκη χρησιμοποιείται προκειμένου ένα φραγμένο χωρικά πρόβλημα να συμπεριφερθεί σαν ένα μη-φραγμένο.
- **Περιοδική:** Η περιοδική συνθήκη συνενώνει μεταξύ τους τις τιμές διανυσματικού δυναμικού δύο ορίων, οι οποίες γίνονται ίσες σε αντίστοιχα σημεία.
- **Αντιπεριοδική:** Η αντιπεριοδική συνθήκη συνενώνει μεταξύ τους τις τιμές διανυσματικού δυναμικού δύο ορίων, οι οποίες γίνονται ίσες σε μέτρο, αλλά με αντίθετο πρόσημο σε αντίστοιχα σημεία.

4.2.3 Χρήση του femm για την επίλυση των δύο γεωμετριών

(α) Υλικά προβλήματος

Μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος του femm μοντελοποιήθηκαν οι δύο μηχανές με βάση τις σχεδιαστικές παραμέτρους του πίνακα 4.1. Επίσης, στο femm μπορούν να εισαχθούν οι μαγνητικές ιδιότητες (καμπύλες μαγνήτισης $B_{max} - H_{max}$) των σιδηρομαγνητικών υλικών σαν παράμετροι του προς επίλυση μαγνητοστατικού προβλήματος. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Άμορφος σίδηρος ή M235-35A για τα μέρη του μαγνητικού κυκλώματος. Η καμπύλη μαγνήτισης για τον άμορφο σίδηρο προέκυψε από τις μετρήσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3 (Σχήμα 3.18), ενώ για τη λαμαρίνα M235-35A προέκυψε από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή της (Σχήμα 3.22).

- Αλουμίνιο 1100 για τον άξονα και το κέλυφος της μηχανής. Ο άξονας και το κέλυφος της μηχανής δεν αποτελούν μέρη του μαγνητικού κυκλώματος, επομένως η επιλογή του αλουμινίου είναι ενδεδειγμένη.
- Μαγνήτες NdFeB 32 MGOe. Οι μαγνήτες Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου παρουσιάζουν κρίσιμα πλεονεκτήματα, όπως: υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση $B_r = 1,16 T$, πολύ μεγάλη μεγάλη δύναμη απομαγνήτισης $H_c = 883,31 kA/m$ και μεγάλη πυκνότητα ενέργειας [4.2].

(β) Οριακές συνθήκες προβλήματος

Όσον αφορά στις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στα δύο μοντέλα, αυτά περιορίζονται στη χρήση μόνο μίας συνθήκης Dirichlet κατά μήκος του εξωτερικού συνόρου της γεωμετρίας με το περιβάλλον (εξωτερική περιφέρεια περιβλήματος). Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται η συνθήκη:

$$A = 0$$

Προκειμένου να παρεμποδιστεί η ροή να περάσει το σύνορο αυτό.

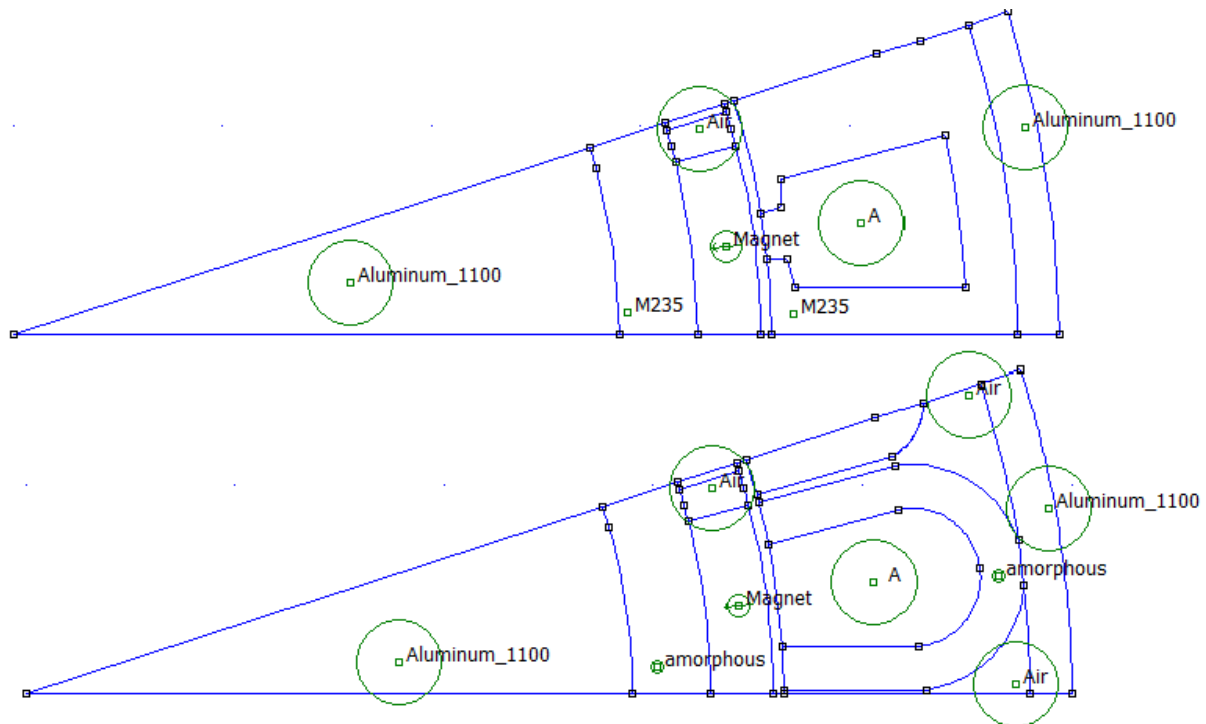
(γ) Μαγνητική διέγερση προβλήματος

Το femm έχει τη δυνατότητα να επιλύει μαγνητοστατικά τα προβλήματα, δεχόμενο ως είσοδο την μαγνητεγερτική διέγερση (φάσεις A, B, C). Έτσι, τροφοδοτώντας τις δύο μηχανές με συμμετρική τριφασική ημιτονοειδή διέγερση, μπορούμε να προσομοιώσουμε την κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε κάθε γεωμετρία, και ακολούθως μέσω του μετεπεξεργαστή του femm να καταγράψουμε τη ροπή για κάθε δεδομένη στιγμή λειτουργίας.

Ακριβώς επειδή το femm επιλύει μαγνητοστατικά τα προβλήματα, προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία μόνιμης κατάστασης, πρέπει να επιλυθεί πολλές φορές η ίδια γεωμετρία για διαδοχικά στιγμιότυπα. Αυτό γίνεται με την εκτέλεση κώδικα σε Matlab, που μέσω της διεπαφής lua scripting ελέγχει κάθε εκτέλεση του femm. Μετά το τέλος κάθε εκτέλεσης αποθηκεύει τα δεδομένα που ζητούνται (ροπή, μαγνητική επαγωγή σε διάφορα σημεία) σε πίνακες προκειμένου να γίνει η επεξεργασία τους αργότερα από το ίδιο το Matlab.

Προκειμένου οι δύο μηχανές να συγκριθούν, πρέπει να αναχθούν σε κοινή βάση μαγνητεγερτικής διέγερσης. Η διέγερση στο femm, ορίζεται σε πυκνότητα ρεύματος (A/mm^2) και χαρακτηρίζει μια συγκεκριμένη περιοχή, δηλαδή την κάθε αύλακα. Από το εμβαδόν κάθε αύλακας, μπορούμε να συμπεράνουμε πόσο ρεύμα διέρχεται από αυτή, πολλαπλασιάζοντάς το με την πυκνότητα ρεύματος που της έχει αντιστοιχηθεί.

Από τη στιγμή όμως που (όπως φαίνεται και από τον πίνακα 4.1) οι δύο μηχανές έχουν ίδιο περίπου εμβαδόν αύλακας, η σύγκρισή τους μπορεί να γίνει κατευθείαν με βάση την πυκνότητα ρεύματος που διεγείρει κάθε αύλακα.



Σχήμα 4.4: Τομή ενός πόλου (18 μοιρών) των δύο μηχανών, όπου φαίνονται οι περιοχές με τα διάφορα υλικά.

4.2.4 Διερεύνηση πλέγματος

Το femm έχει τη δυνατότητα να επιλύει τα μαγνητοστατικά προβλήματα ανάλογα με τον ορισμό μιας σειράς παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια και τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το femm αναλύει τη γεωμετρία του εκάστοτε προβλήματος σε μικρότερες απλές γεωμετρίες (τρίγωνα), προκειμένου το αρχικό πρόβλημα να διαιρεθεί σε πολλά μικρότερα και ευκολότερα στην επίλυση προβλήματα. Η ανάλυση του πλέγματος των τριγώνων ρυθμίζεται με την επιλογή *mesh size* σε κάθε περιοχή υλικού.

Γενικά, όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στην επίλυση του πεδίου. Ωστόσο, αυτό έχει άμεση επίπτωση κόστους σε

υπολογιστικό χρόνο, καθώς οι άγνωστοι του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας που έχει να επιλύσει το femm είναι οι τιμές πεδίου των κορυφών των σχηματιζόμενων τριγώνων.

Προκειμένου να συγκεραστεί η ανάγκη για ακρίβεια και οικονομία υπολογιστικής ισχύος, ακολουθήθηκε η εξής τεχνική: σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, το πλέγμα επελέγη πυκνότερο από άλλες. Έτσι, όπου υπήρχε σιδηρομαγνητικό υλικό, μαγνήτης αλλά και στο διάκενο, το πλέγμα ήταν πολύ πυκνότερο από τις περιοχές αλουμινίου και των αυλάκων (Σχήμα 4.4).

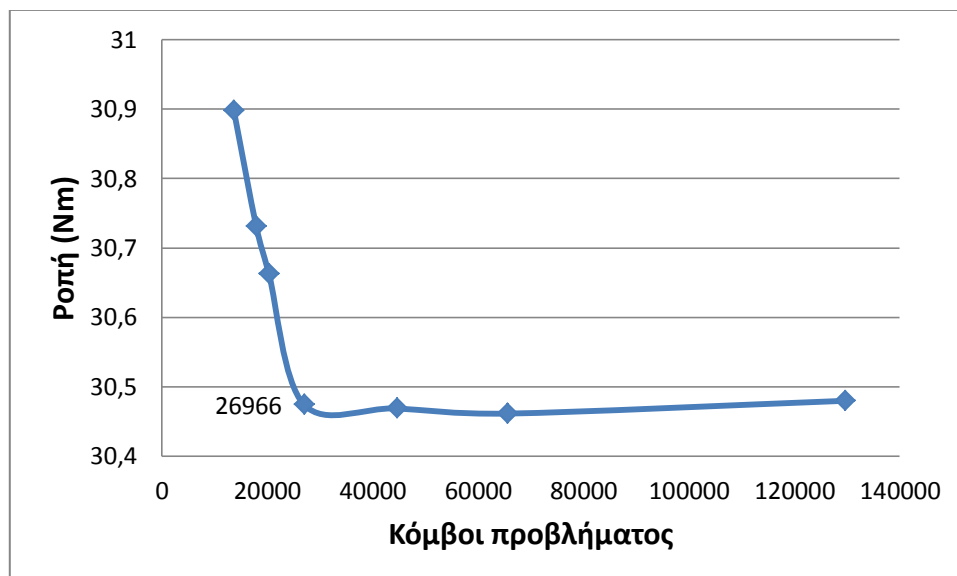
Ακολουθώντας, έγινε μία διερεύνηση ως προς τον ολικό αριθμό κόμβων του προβλήματος. Για κάθε γεωμετρία μηχανής επιλύθηκε το μαγνητοστατικό πρόβλημα στις ίδιες συνθήκες (γωνία 90° μεταξύ των πεδίων στάτη και δρομέα), αλλάζοντας κάθε φορά την πυκνότητα του πλέγματος και μετρώντας τη ροπή.

Η ροπή στο femm υπολογίζεται μέσω του χωρικού ολοκληρώματος του τανυστή Maxwell:

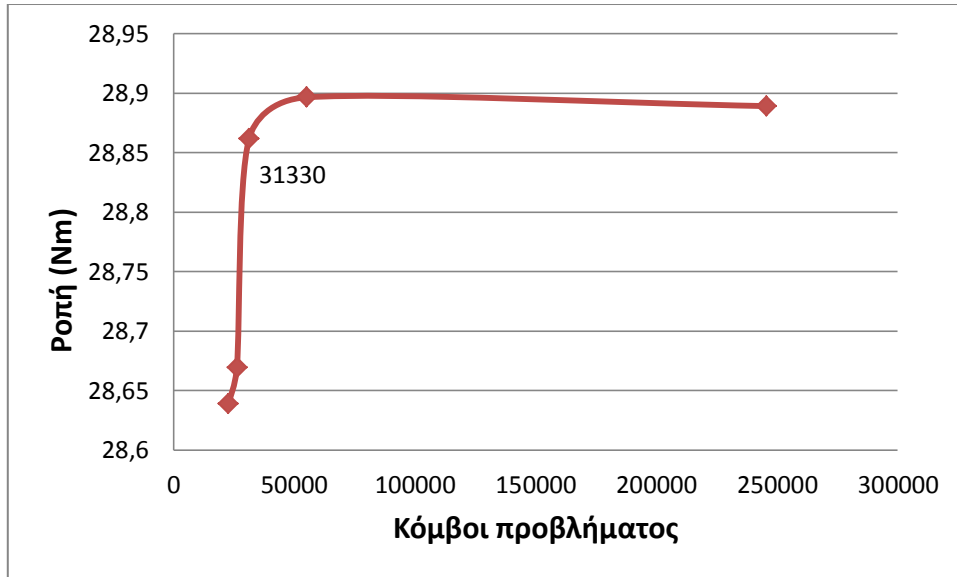
$$T = \frac{D \cdot L}{2} \oint_c B_n H_t \, dc \quad (4.7)$$

Όπου D και L η διάμετρος και το μήκος της μηχανής αντίστοιχα, B_n η ακτινική συνιστώσα του B στο διάκενο και H_t η εφαπτομενική συνιστώσα του H . Η ροπή υπολογίζεται κατά μήκος του διακένου.

Το χωρικό ολοκλήρωμα χρησιμοποιεί μία συνάρτηση βάρους προκειμένου να υπολογίσει το ολοκλήρωμα σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος του διακένου[4.3]. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Σχήμα 4.5: Ροπή συναρτήσει αριθμού κόμβων πλέγματος για τη μηχανή με M235-35A.



Σχήμα 4.6: Ροπή συναρτήσει αριθμού κόμβων πλέγματος για τη μηχανή με άμορφο σίδηρο.

Για τη μεν μηχανή με συμβατική λαμαρίνα, παρατηρείται ότι η ροπή συγκλίνει για αριθμό κόμβων μεγαλύτερο από 26966, ενώ για τη μηχανή με τον άμορφο σίδηρο η σύγκλιση επιτυγχάνεται για αριθμό κόμβων μεγαλύτερο από 31330. Και στις δύο περιπτώσεις το σχετικό σφάλμα σε σχέση με την ακριβή τιμή ροπής είναι μικρότερο από 0,1%.

4.3 Επίδοση των δύο μηχανών στη μόνιμη κατάσταση

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η μηχανική ροπή κάθε μηχανής ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος σε κάθε αύλακα. Εφόσον η τροφοδοσία κάθε μηχανής είναι τριφασική συμμετρική, οι πυκνότητες ρεύματος που λαμβάνει ως είσοδο το femm ορίζονται ως εξής (με βάση το Σχήμα 4.2 που δείχνει την κατανομή τυλιγμάτων στις 3 φάσεις):

$$\text{Φάση A:} \quad J_A = J_{max}(\cos\theta_e + i \sin\theta_e) \quad (4.8)$$

$$\text{Φάση B:} \quad J_B = J_{max} \left(\cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + i \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (4.9)$$

$$\text{Φάση Γ:} \quad J_\Gamma = J_{max} \left(\cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) + i \sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (4.10)$$

Όπου θ_e η ηλεκτρική γωνία των ηλεκτρικών μεγεθών, η οποία συνδέεται με τη μηχανική γωνία θ_m ως εξής:

$$\theta_e = \left(\frac{p}{2}\right) \theta_m \quad (4.11)$$

Όπου p είναι οι πόλοι της μηχανής, εφόσον και οι δύο μηχανές είναι σύγχρονες.

4.3.1 Μέγιστη ροπή

Η ροπή για τις δύο μηχανές διερευνήθηκε για διάφορες τιμές (συνολικά 7 διακριτές τιμές) της μέγιστης πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες $J_{max} \left(\frac{A}{mm^2}\right)$. Για να γίνει αυτό, γράφηκε κώδικας στο Matlab που υλοποιεί τον αλγόριθμο του Σχήματος 4.7.

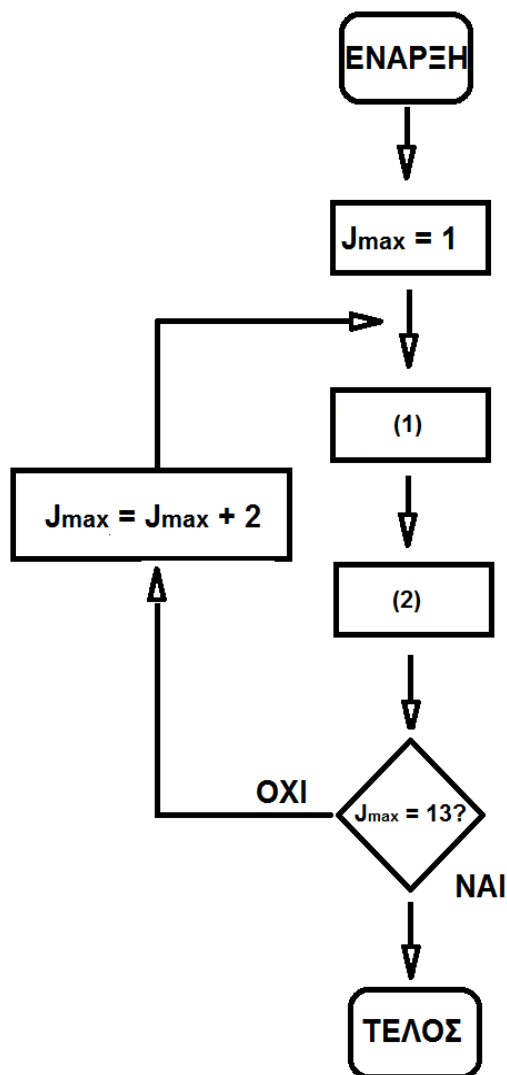
Τα αποτελέσματα της ροπής που εξήχθησαν για τις δύο μηχανές φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μαγνητοστατικό πρόβλημα λύθηκε για ίδιες συνθήκες και στις δύο μηχανές, δηλαδή η ηλεκτρική γωνία θ_e στις εξισώσεις 4.8-4.10 αντιστοιχούσε στη γωνία μέγιστης ροπής.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα ροπής για το μοντέλο της μηχανής με άμορφο σίδηρο.

$J_{max} \left(\frac{A}{mm^2}\right)$	<i>Torque (Nm)</i>
1	2,42
3	7,78
5	13,07
7	18,32
9	23,55
11	28,77
13	33,96

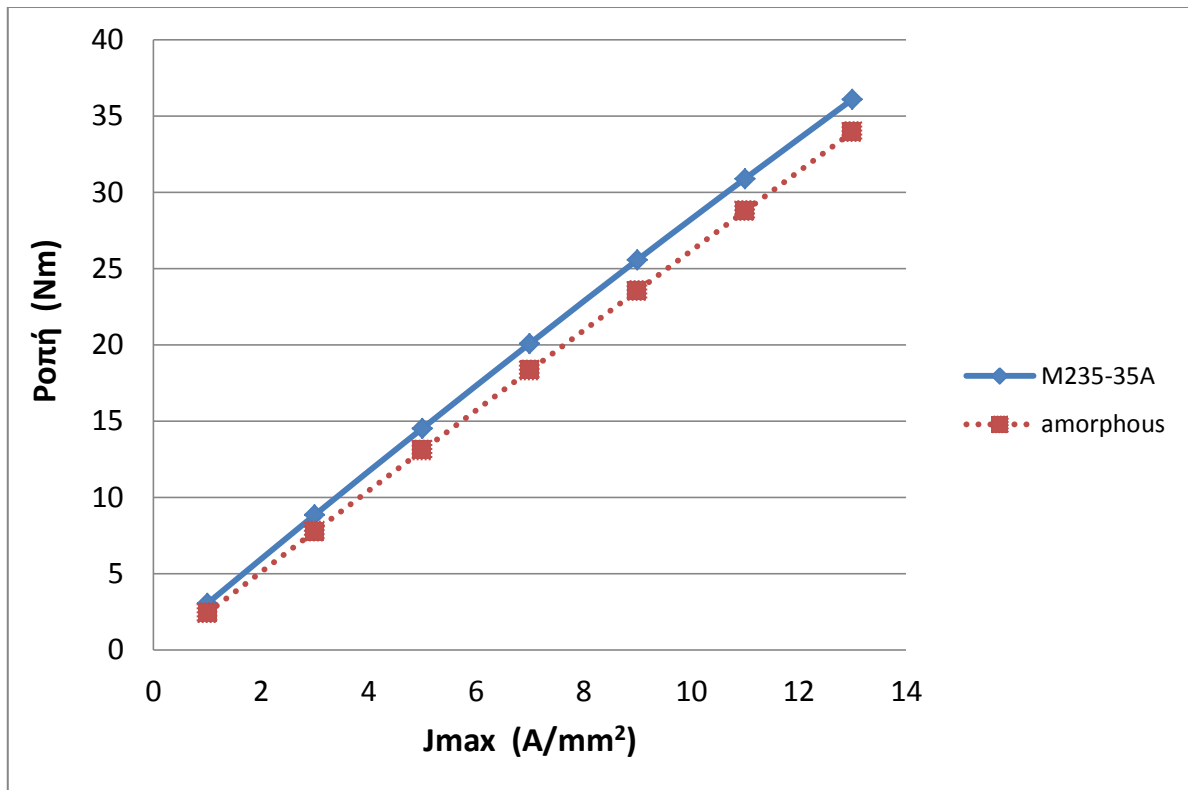
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα ροπής για το μοντέλο της μηχανής με M235-35A.

$J_{max}(\frac{A}{mm^2})$	Torque (Nm)
1	3,04
3	8,85
5	14,52
7	20,09
9	25,57
11	30,89
13	36,1



* (1) Αρχικοποίηση ρευμάτων από τις εξισώσεις 4.8-4.10
 (2) Επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος στο femm. Υπολογισμός & καταγραφή ροπής.

Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εξαγωγής μέγιστης ροπής για διαφορετικά J_{max} .

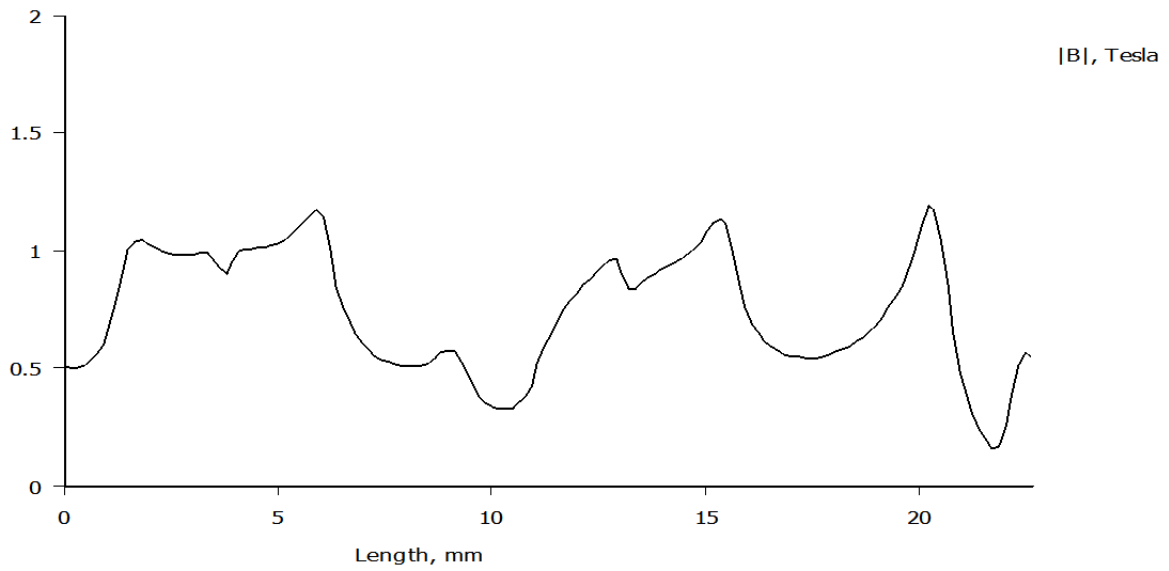


Σχήμα 4.8: Σύγκριση ροπής των δύο μηχανών ως προς τη διέγερση.

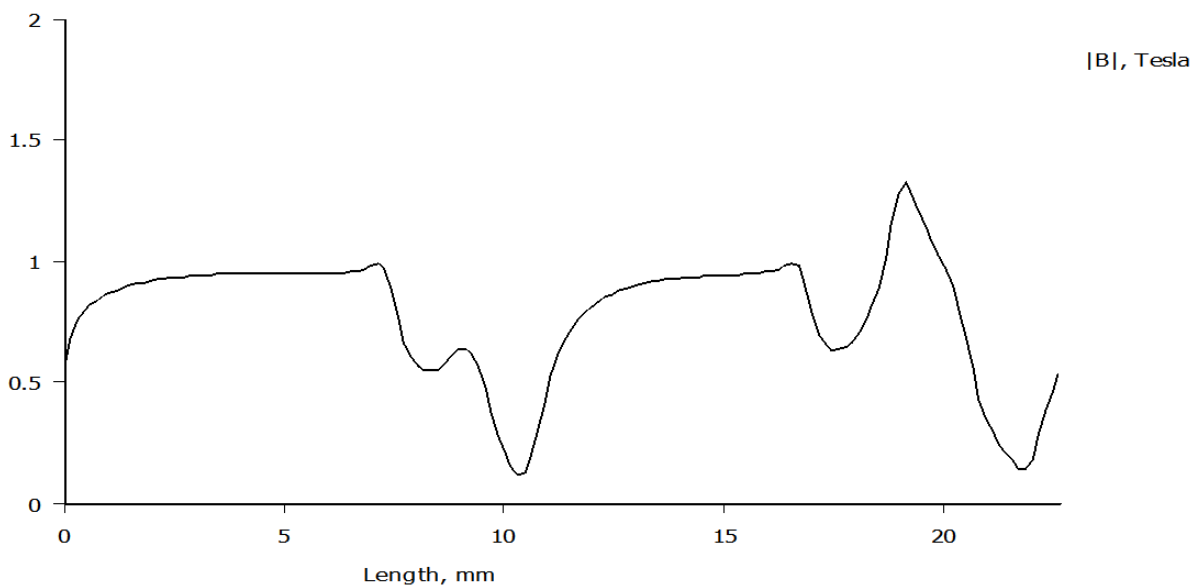
Παρατηρούμε ότι υπάρχει και στις δύο μηχανές γραμμική σχέση μεταξύ ροπής και μέγιστης πυκνότητας ρεύματος που επιβάλλεται στις αύλακες κάθε μηχανής. Επίσης, παρατηρείται ότι για ίδια πυκνότητα ρεύματος η μηχανή με άμορφο σίδηρο αποδίδει ελαφρώς μικρότερη ροπή σε σχέση με την ανταγωνίστριά της.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (4.7), η ροπή εξαρτάται ευθέως από την πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο. Λαμβάνοντας τη γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο για ένα πολικό βήμα και για τις δύο μηχανές, βρίσκουμε ότι (για την περίπτωση $J_{max} = 11 A/mm^2$) το μέσο Β διάκενου στη μηχανή με άμορφο σίδηρο είναι 0,73T , ενώ στη μηχανή με M235-35A είναι 0,78T . (Σχήματα 4.9- 4.10).

Η ζητούμενη ροπή (30 Nm) αποδίδεται στη μεν μηχανή με τον άμορφο σίδηρο για $J_{max} = 11,47 A/mm^2$, ενώ στη μηχανή με M235-35A για $J_{max} = 10,67 A/mm^2$. Αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω και στη σύγκριση απόδοσης μεταξύ των δύο μηχανών, επιφέρει μεγαλύτερες απώλειες χαλκού για τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας.



Σχήμα 4.9: Μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο για ένα πολικό βήμα της μηχανής άμορφου σιδήρου ($J_{max} = 11A/mm^2$).



Σχήμα 4.10: Μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο για ένα πολικό βήμα της μηχανής με M235-35A ($J_{max} = 11A/mm^2$).

4.3.2 Κυμάτωση ροπής στη μόνιμη κατάσταση

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό για τη σύγκριση καταλληλότητας μεταξύ των δύο μηχανών, είναι και ο κυματισμός της ροπής στη μόνιμη κατάσταση. Γενικά, σε μία στρεφόμενη μηχανή η παραγόμενη ροπή ποτέ δεν είναι απολύτως σταθερή, αλλά παρουσιάζει μία κυμάτωση, η οποία οφείλεται στις ατέλειες της γεωμετρίας που εισάγει αρμονικές στην μαγνητική ροή (αρμονικές χώρου), καθώς ακόμα και στις αρμονικές που μπορεί να εισάγονται από την τροφοδοσία (αρμονικές χρόνου).

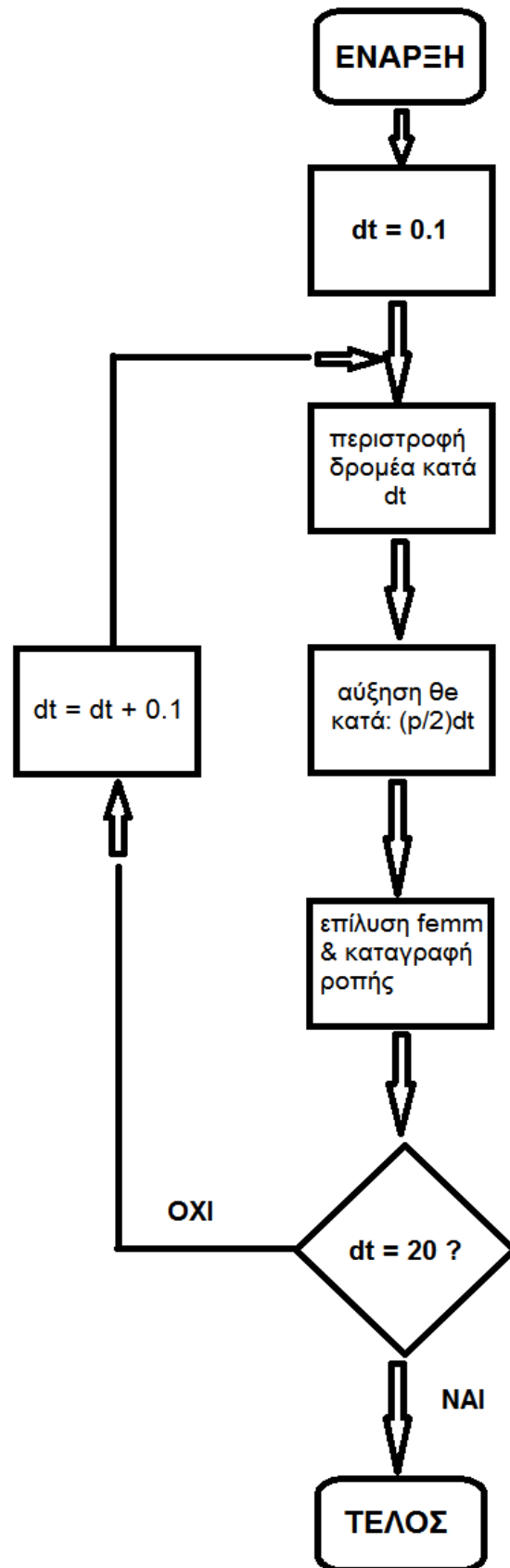
Για την εξαγωγή της κυμάτωσης των δύο μηχανών, ακολουθήθηκε ένας άλλος αλγόριθμος σε Matlab που προσομοιώνει την περιστροφή της μηχανής στη μόνιμη κατάσταση. Αρχικά, και στα δύο μοντέλα μηχανής εφαρμόστηκε η ίδια πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες $J_{max} = 11A/mm^2$, προκειμένου να υπάρχει ένα κοινό μέτρο σύγκρισης της κυμάτωσης ροπής. Πιο συγκεκριμένα, για τις εξισώσεις των φάσεων A, B, C (εξ. 4.8-4.10) θα ισχύει:

$$J_{max} = 11$$

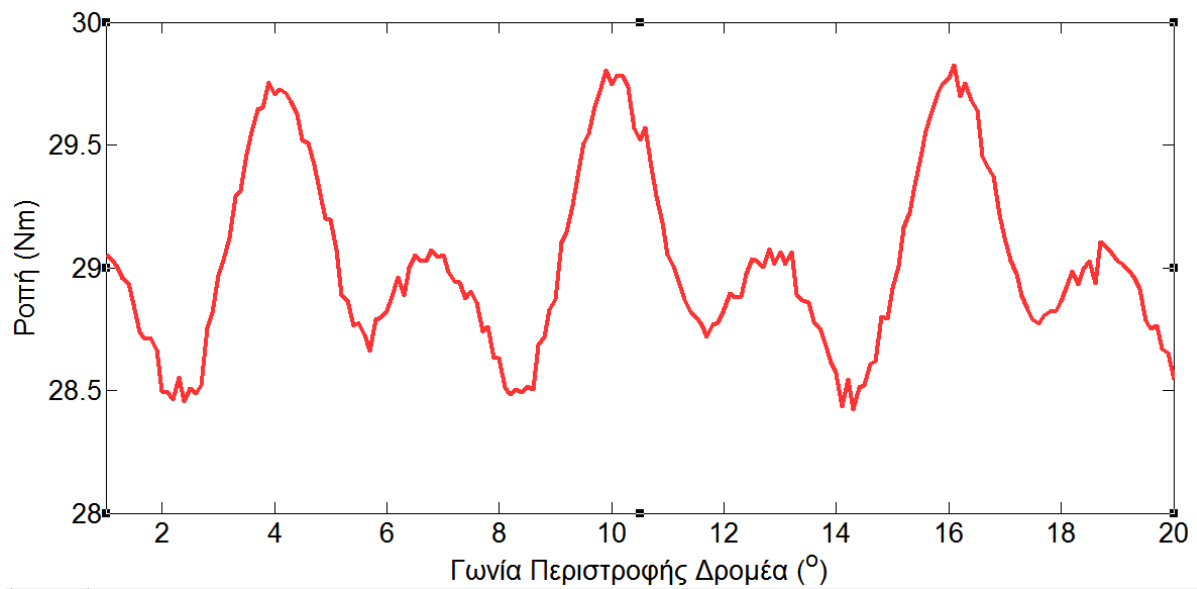
$$\theta_e = \theta_{e,max} + \frac{p}{2} dt$$

Όπου $\theta_{e,max}$ η ηλεκτρική γωνία στην οποία παρατηρείται η μέγιστη ροπή για την κάθε μηχανή (εναλλακτικά: η γωνία στην οποία τα πεδία στάτη και δρομέα είναι κάθετα), p οι πόλοι της μηχανής, και dt η μηχανική γωνία κατά την οποία περιστρέφεται ο δρομέας της.

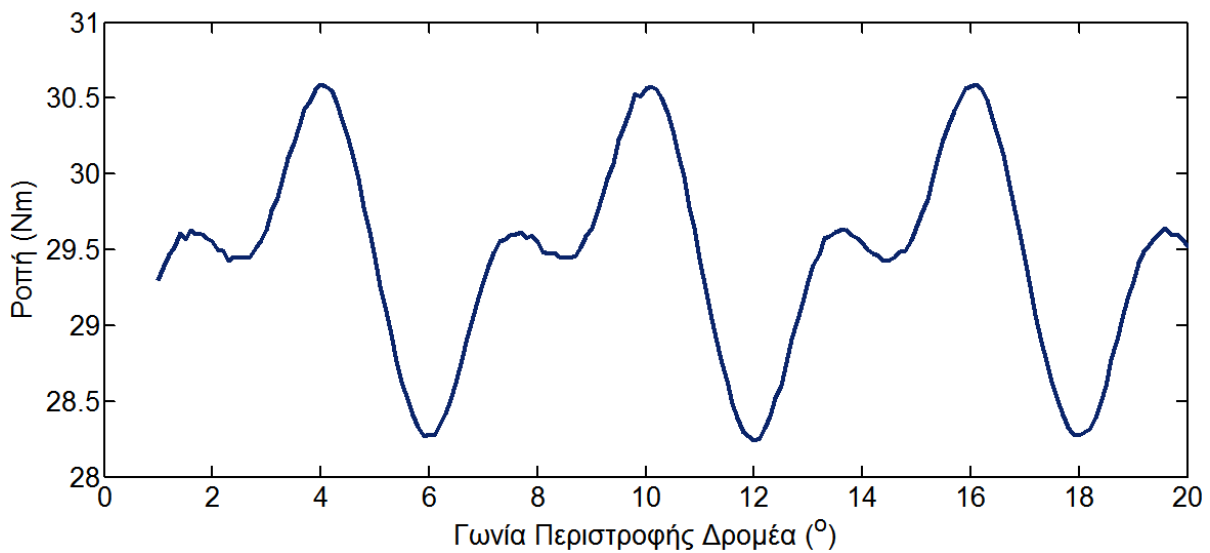
Επιλύοντας το αρχικό μοντέλο κάθε μηχανής μαγνητοστατικά στο femm, για μία σειρά από dt , και παράλληλα αποθηκεύοντας τη ροπή για κάθε dt σε ένα διάνυσμα, λαμβάνουμε τη συναρτησιακή σχέση της ροπής και της γωνίας dt . Η περιστροφή εκτελείται μέχρι τις 20 μοίρες με διακριτό βήμα 0,1 μοίρα τη φορά. Ακολουθούν το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου, και τα αποτελέσματα αυτού.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εξαγωγής κυμάτωσης ροπής .



Σχήμα 4.12: Κυμάτωση ροπής της μηχανής με άμορφο σίδηρο.



Σχήμα 4.13: Κυμάτωση ροπής της μηχανής με M235-35A.

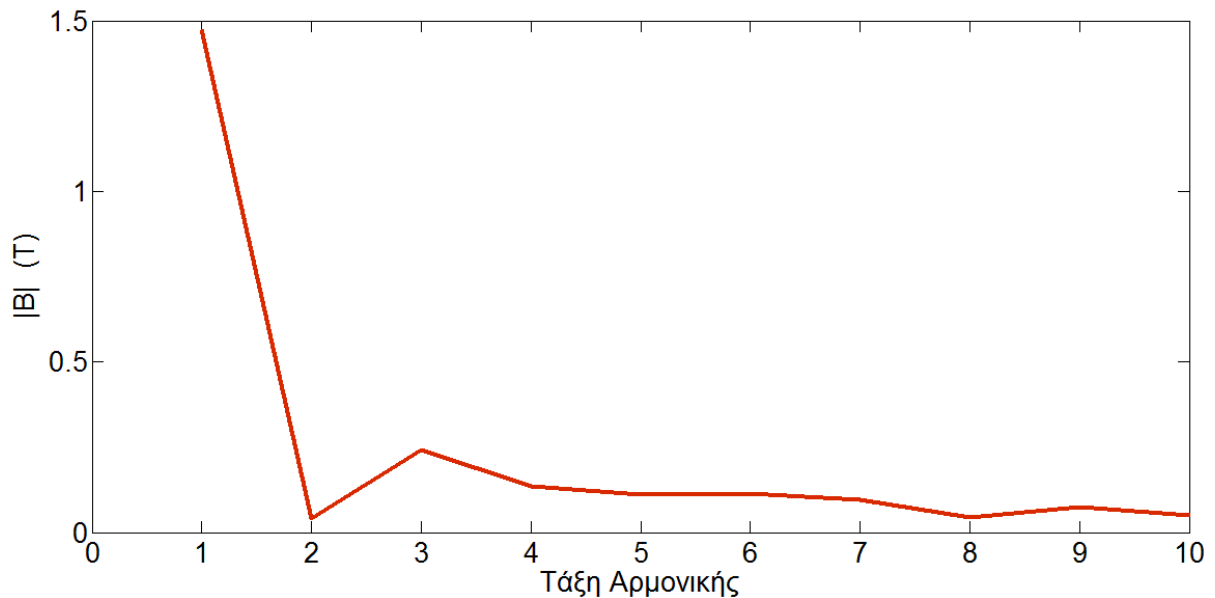
Η κυμάτωση ροπής για τη μηχανή με άμορφο σίδηρο είναι:

$$T_{ripple} = 1.2 Nm$$

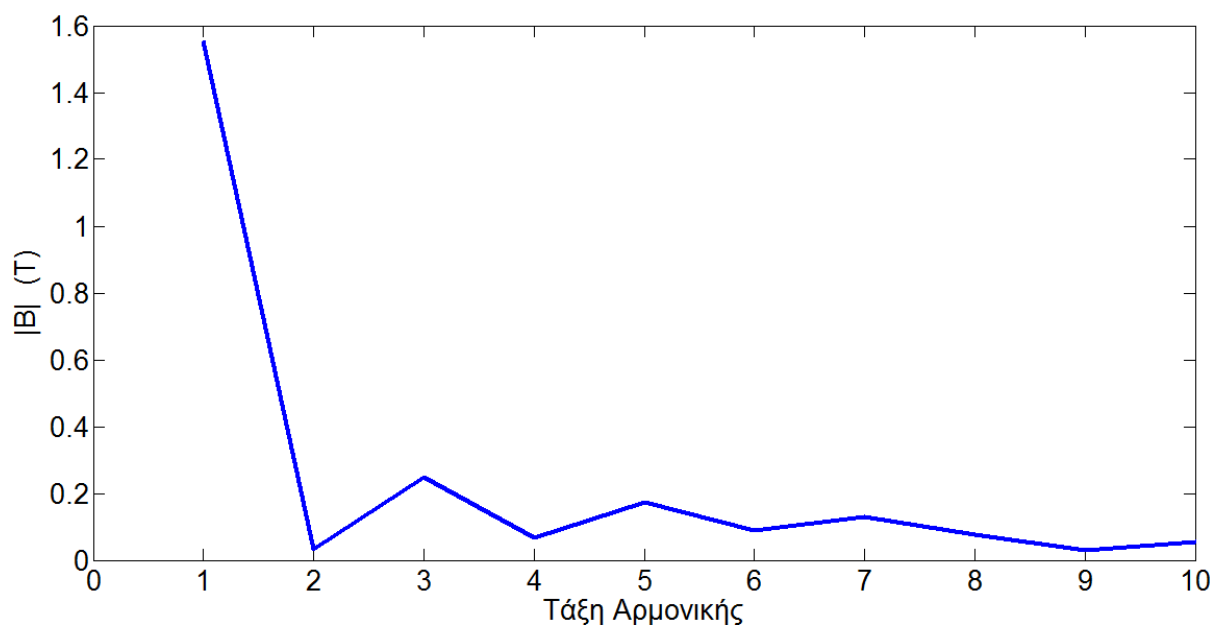
Ενώ για τη μηχανή με τη συμβατική λαμαρίνα είναι:

$$T_{ripple} = 2.2 \text{ Nm}$$

Εμφανώς, μεγαλύτερη κυμάτωση ροπής παρουσιάζει η μηχανή με τη συμβατική λαμαρίνα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι αρμονικές του πλάτους της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο για κάθε μηχανή.



Σχήμα 4.14: Αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής με άμορφο σίδηρο.



Σχήμα 4.15: Αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής με M235-35A.

Πίνακας 4.4: Σύγκριση αρμονικού περιεχομένου της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο των δύο μηχανών.

Τάξη Αρμονικής	Μηχανή με M235-35A	Μηχανή με άμορφο
	$ B_{\text{διακένου}} $ (T)	$ B_{\text{διακένου}} $ (T)
1	1,56	1,47
3	0,25	0,24
5	0,17	0,11
7	0,13	0,1

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η 1^η αρμονική της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο είναι μεγαλύτερη στη μηχανή με την συμβατική λαμαρίνα, γεγονός αναμενόμενο αφού η μέση τιμή ροπής σε αυτή την μηχανή είναι μεγαλύτερη όπως φαίνεται και από τα Σχήματα (4.12 - 4.13).

Ακολούθως, παρατηρούμε ότι η επαγωγή στο διάκενο της μηχανής με συμβατική λαμαρίνα έχει και μεγαλύτερο αρμονικό περιεχόμενο από ότι η μηχανή με άμορφο σίδηρο. Πράγματι, για τη μηχανή με συμβατική λαμαρίνα ισχύει:

$$THD_{B_{\text{διακ}},M235} = 21,1\%$$

Ενώ για τη μηχανή με τον άμορφο σίδηρο είναι:

$$THD_{B_{\text{διακ}},\alpha\mu.} = 19,2\%$$

Αυτό το γεγονός εξηγεί τη μεγαλύτερη κυμάτωση ροπής στην μηχανή με τη συμβατική λαμαρίνα. Εποπτικά σκεπτόμενοι, αυτό είναι κάτι αναμενόμενο, αφού από τις διαφορές στη γεωμετρία των δύο μηχανών (Σχήμα 4.1), παρατηρούμε ότι η γεωμετρία της μηχανής με συμβατική λαμαρίνα M235-35A παρουσιάζει πιο έντονες γεωμετρικές ασυνέχειες (δόντια στάτη). Αντιθέτως, η μηχανή με άμορφο σίδηρο είναι σχετικά ομοιόμορφη στο στάτη.

Τέλος, πρέπει να παρατηρηθεί ότι η 5^η αρμονική της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο είναι εξασθενημένη, και η 6^η σχεδόν εξαλειμμένη. Αυτό το γεγονός είναι άμεση απόρροια του κλασματικού βήματος 5/6 με το οποίο έχει διανεμηθεί το τύλιγμα στις αύλακες, και επιβεβαιώνει την αρχική σχεδίαση.

4.4 Απόδοση των δύο μηχανών στη μόνιμη κατάσταση

Η απόδοση των δύο μηχανών είναι ίσως η κρισιμότερη παράμετρος της μεταξύ τους σύγκρισης για την εφαρμογή των 750rpm – 30 Nm. Μεγάλη απόδοση συνεπάγεται οικονομική λειτουργία, και μικρότερες ανάγκες ψύξης, αφού όλες οι απώλειες σε μία ηλεκτρική μηχανή (τριβές στον άξονα, απώλειες πυρήνα, απώλειες χαλκού) μετατρέπονται σε θερμότητα.

4.4.1 Κλασική μεθοδολογία υπολογισμού απωλειών πυρήνα

Διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία[4.4] [4.5] για την εκτίμηση των απωλειών πυρήνα σε ένα μοντέλο μηχανής. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι υπολογισμού των απωλειών πυρήνα βασίζονται συνήθως στη χρήση της εξίσωσης 2.10:

$$P_{losses}(f, B_{max}) = P_{hysteresis} + P_{eddy} = K_h f B_{max}^n + K_e f^2 B_{max}^2 \quad (2.10)$$

Η εξίσωση αυτή προσδιορίζει τις απώλειες πυρήνα ανά μονάδα μάζας, σε κάθε στοιχειώδη μάζα του σιδηρομαγνητικού υλικού που διεγείρεται με ΜΕΔ συχνότητας f και μέγιστης μαγνητικής επαγωγής B_{max} . Επομένως, επιλύοντας το μαγνητοστατικό πρόβλημα μιας μηχανής έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις συνολικές απώλειες πυρήνα μέσω του τύπου:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_{losses,i} \cdot m_i \quad (4.12)$$

Όπου :

- m_i , η i -οστή στοιχειώδης μάζα σιδηρομαγνητικού υλικού, που προέκυψε από το διαχωρισμό της γεωμετρίας της μηχανής που πραγματοποίησε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.
- $P_{losses,i}$, οι απώλειες ανά μονάδα μάζας που αντιστοιχούν στη στοιχειώδη μάζα m_i . Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει σταθερή μαγνητική

επαγωγή (άρα και B_{max}) σε αυτή τη μάζα, οπότε θεωρείται αναγκαίο αυτή η μάζα να είναι επαρκώς μικρή ώστε να υπολογίζονται με ακρίβεια οι ολικές απώλειες.

- n , ο συνολικός αριθμός των στοιχειωδών μαζών στις οποίες χώρισε το αρχικό πρόβλημα το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Η εξίσωση 2.10 (και επομένως και η 4.12) ισχύει κατά τα γνωστά για ημιτονικές μαγνητικές επαγωγές. Ωστόσο, επειδή στην πράξη στις ηλεκτρικές μηχανές δεν υπάρχει αμιγώς καθαρή ημιτονική μαγνητική επαγωγή σε κανένα σημείο στο μαγνητικό κύκλωμα (λόγω των αρμονικών χώρου και χρόνου), συνήθως η εξίσωση 4.12 τροποποιείται ως επαλληλία των απωλειών σε κάθε αρμονική:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_{losses,i} \cdot m_i \quad (4.13a)$$

$$P_{losses,i} = \sum_{k=1}^z \{K_h (kf) B_{max,k}^n + K_e (kf)^2 B_{max,k}^2\} \quad (4.13b)$$

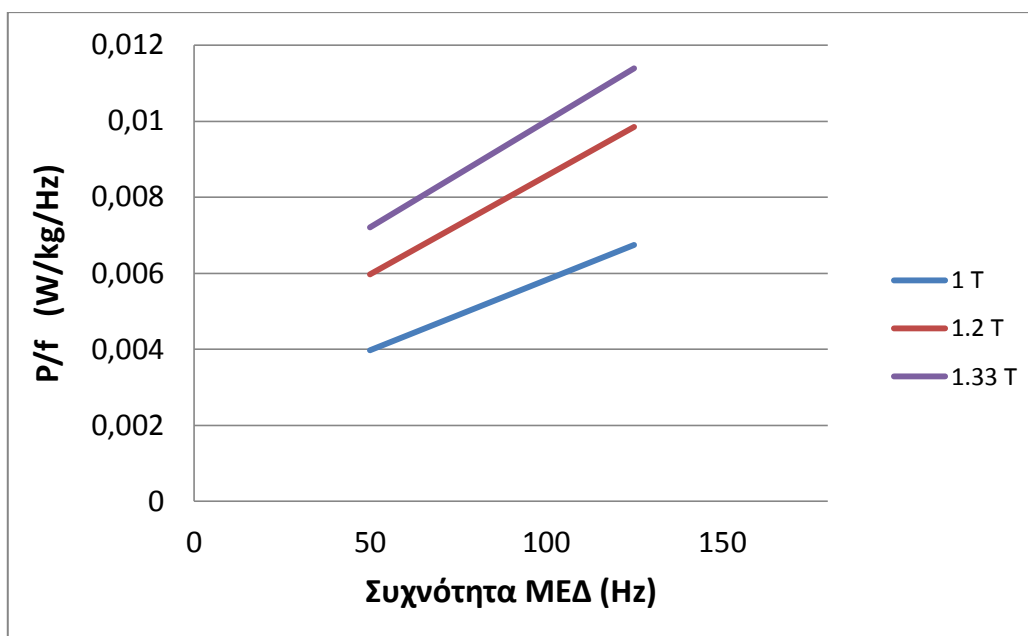
Όπου :

- k , η k -οστή τάξη αρμονικής της μαγνητικής επαγωγής στη στοιχειώδη μάζα m_i
- z , η μεγαλύτερη τάξη αρμονικής που εμφανίζεται στη μαγνητική επαγωγή της στοιχειώδους μάζας m_i .
- f , η θεμελιώδης συχνότητα της μαγνητικής επαγωγής της στοιχειώδους μάζας m_i .
- $B_{max,k}$, το πλάτος της k -οστής τάξης αρμονικής της μαγνητικής επαγωγής.

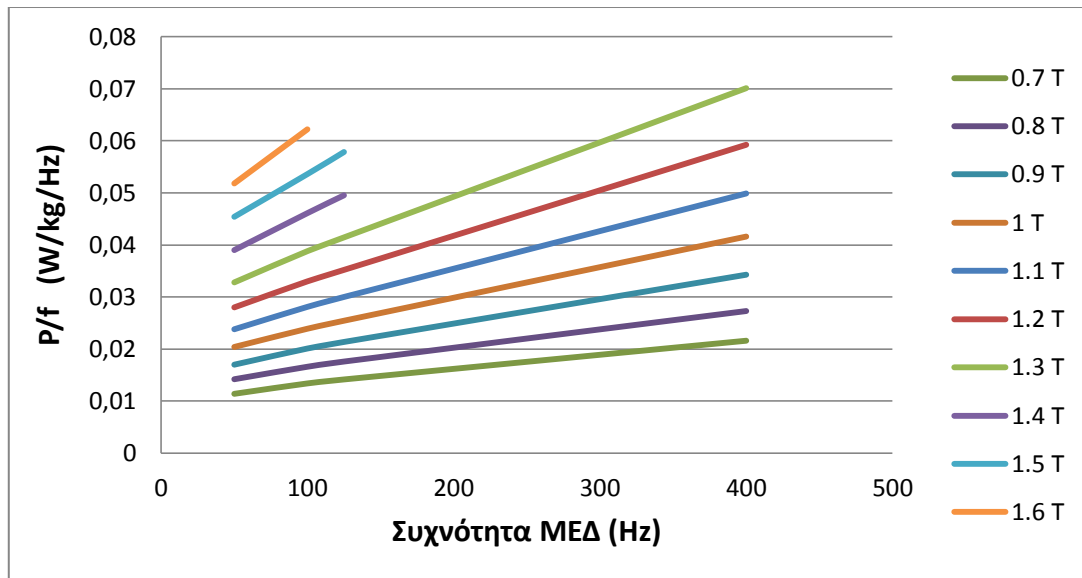
Αυτός ο τρόπος υπολογισμού, παρότι ακριβής στα αποτελέσματά του, είναι αρκετά χρονοβόρος, διότι τα K_h και K_e στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερά και μεταβάλλονται για διαφορετικά B_{max} . Πράγματι, αν θεωρήσουμε ότι οι απώλειες σιδήρου περιγράφονται με ακρίβεια από το μοντέλο της εξίσωσης (2.10) :

$$\frac{P_{losses}(f, B_{max})}{f} = (K_h B_{max}^n) + (K_e B_{max}^2) \cdot f \quad (4.14)$$

Τότε για κάθε B_{max} , αν θεωρήσουμε και το n σταθερό για διάφορες συχνότητες (γενικά, υπάρχουν θεωρίες που υποστηρίζουν ότι δεν είναι σταθερό[4.6]) οι απώλειες πυρήνα ανά μάζα και ανά συχνότητα μπορούν να θεωρηθούν γραμμικές συναρτήσεις της συχνότητας. Έτσι, μέσω μιας σειράς μετρήσεων καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των K_h και K_e ενός υλικού. Παρακάτω παρατίθενται οι καμπύλες P_{losses}/f που εξήχθησαν από τις μετρήσεις που έγιναν στο δοκίμιο άμορφου σιδήρου και από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή της λαμαρίνας M235-35A.



Σχήμα 4.16: Απώλειες σιδήρου ανά μάζα και συχνότητα συναρτήσει της συχνότητας ΜΕΔ για τον άμορφο σίδηρο.



Σχήμα 4.17: Απώλειες σιδήρου ανά μάζα και συχνότητα συναρτήσεως της συχνότητας ΜΕΔ για τη συμβατική λαμαρίνα M235-35A.

Από τα παραπάνω διαγράμματα συνάγεται αρχικά το συμπέρασμα ότι το μοντέλο (2.10) για τις απώλειες σιδήρου σε σιδηρομαγνητικά υλικά είναι αρκετά ακριβές, καθώς όλες οι καμπύλες είναι ευθείες, όπως υποδεικνύει και η εξίσωση 4.14.

Ένα δεύτερο συμπέρασμα από τη μελέτη των δύο αυτών διαγραμμάτων είναι ότι τα K_h και K_e όντως δεν είναι σταθερά για τα δύο εξεταζόμενα υλικά της παρούσας εργασίας. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές τους που συνάγονται από τα παραπάνω διαγράμματα :

Πίνακας 4.5: Τιμές K_h και K_e για τη συμβατική λαμαρίνα M235-35A για διάφορα B_{max} στην περιοχή συχνοτήτων 50-400 Hz.

B_{max} (T)	K_h ($W \cdot kg^{-1} \cdot Hz^{-1} \cdot T^{-n}$)	K_e ($W \cdot kg^{-1} \cdot Hz^{-2} \cdot T^{-1}$)
0.7	$5,12 \cdot 10^{-5}$	0.0212
0.8	$5,59 \cdot 10^{-5}$	0.02
0.9	$5,86 \cdot 10^{-5}$	0.0185
1	$6 \cdot 10^{-5}$	0.0177
1.1	$6,07 \cdot 10^{-5}$	0.0169
1.2	$6,85 \cdot 10^{-5}$	0.0166
1.3	$6,75 \cdot 10^{-5}$	0.0166
1.4	$6,04 \cdot 10^{-5}$	0.0163
1.5	$1,09 \cdot 10^{-4}$	0.0165
1.6	$9,88 \cdot 10^{-5}$	0.0162

Πίνακας 4.6: Τιμές K_h και K_e για τον άμορφο σίδηρο για διάφορα B_{max} στην περιοχή συχνοτήτων 50-125 Hz.

$B_{max} (T)$	$K_h (W \cdot kg^{-1} \cdot Hz^{-1} \cdot T^{-n})$	$K_e (W \cdot kg^{-1} \cdot Hz^{-2} \cdot T^{-1})$
1	$4 \cdot 10^{-5}$	0.0021
1.2	$3,17 \cdot 10^{-5}$	0.0016
1.33	$2,94 \cdot 10^{-5}$	0.0014

4.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού απωλειών πυρήνα που ακολουθήθηκε

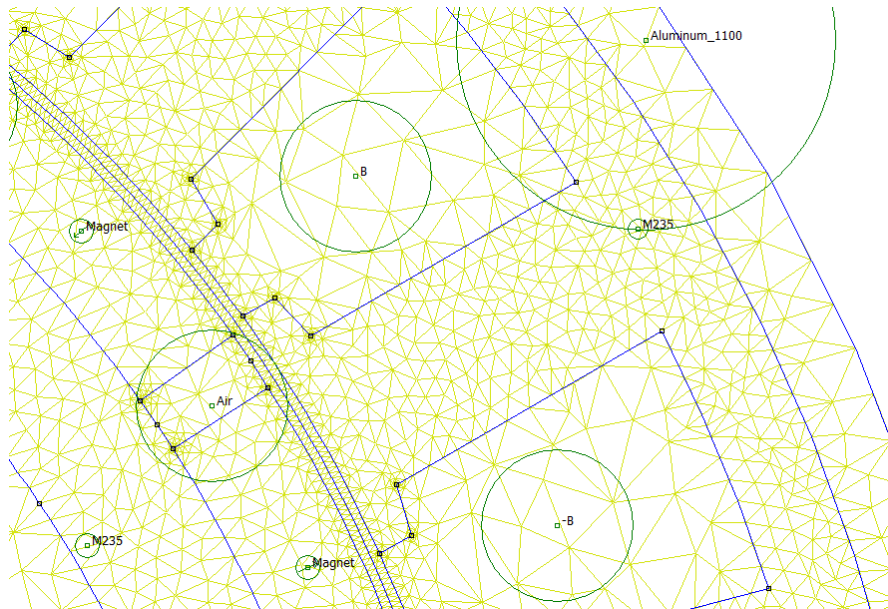
Για τους προαναφερθέντες λόγους προτιμήθηκε μία παραλλαγή της επικρατούσας μεθοδολογίας υπολογισμού των απωλειών πυρήνα στις δύο προς σύγκριση μηχανές. Έτσι, χρησιμοποιείται στη βάση της η εξίσωση 4.12, ωστόσο για τις απώλειες σε κάθε στοιχειώδη μάζα $P_{losses,i}(B_{max})$ χρησιμοποιούνται οι τιμές που μετρήθηκαν για τον άμορφο σίδηρο και οι τιμές από το τεχνικό φυλλάδιο του σιδήρου M235-35A.

Επίσης, εφόσον η μηχανή στρέφεται με συχνότητα 750rpm τότε η ηλεκτρική συχνότητα του πεδίου του στάτη θα είναι:

$$f_e = f_m \cdot \left(\frac{p}{2}\right) = 12.5 \cdot \left(\frac{20}{2}\right) = 125 \text{ Hz}$$

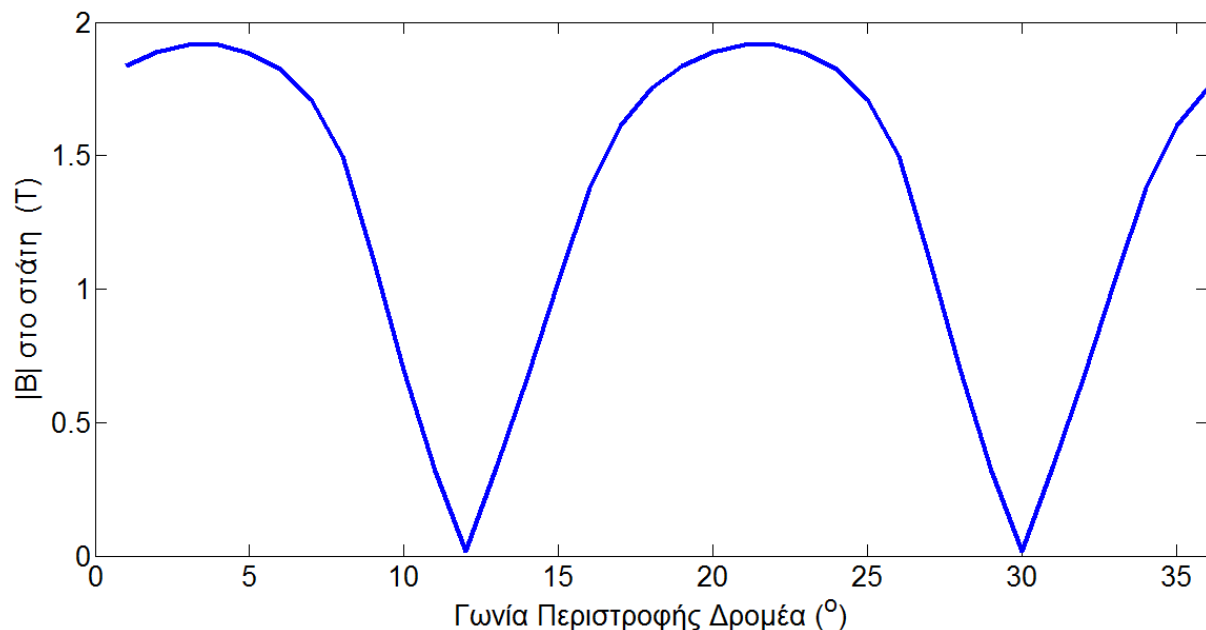
Άρα, στους υπολογισμούς των απωλειών πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις της συχνότητας 125Hz, καθώς και των αρμονικών της που εμφανίζονται στη μαγνητική επαγωγή των διάφορων σημείων του στάτη και του δρομέα.

Για αυτό το λόγο αρχικά δημιουργήθηκε ένα script στο Matlab που κατέγραφε σε πίνακες τη μαγνητική επαγωγή σε όλες τις στοιχειώδεις μάζες σιδηρομαγνητικού υλικού στο οποίο χωρίζει τη γεωμετρία κάθε μηχανής το femm, για μια περιστροφή της μηχανής κατά 36° (δηλαδή 360° ηλεκτρικές μοίρες) στη μόνιμη κατάσταση. Ακολουθώντας, μέσω της ανάλυσης Fourier, διαπιστώνουμε ότι το αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής κάθε στοιχειώδους μάζας είναι γενικά χαμηλό, οπότε χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι μετρήσεις απωλειών για 125Hz.



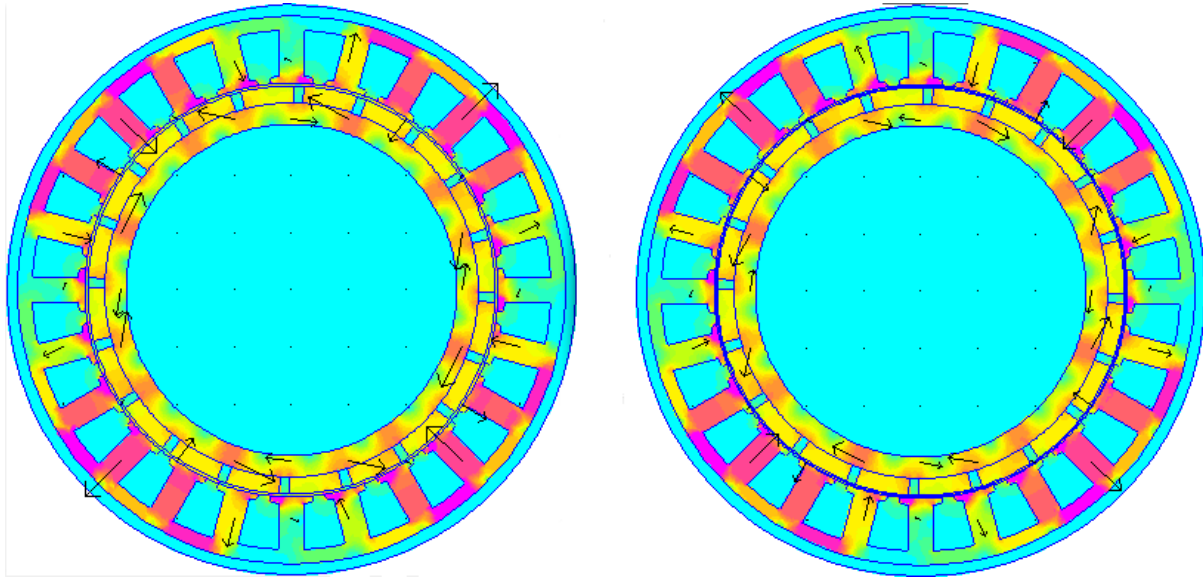
Σχήμα 4.18: Λεπτομέρεια από το μοντέλο fem της μηχανής με M235-35A. Διακρίνονται οι στοιχειώδεις μάζες στις οποίες χωρίζει το fem τη γεωμετρία του μοντέλου.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ενδεικτικά για μία στοιχειώδη μάζα σιδηρομαγνητικού υλικού στο στάτη και στο δρομέα της μηχανής με M235-35A.

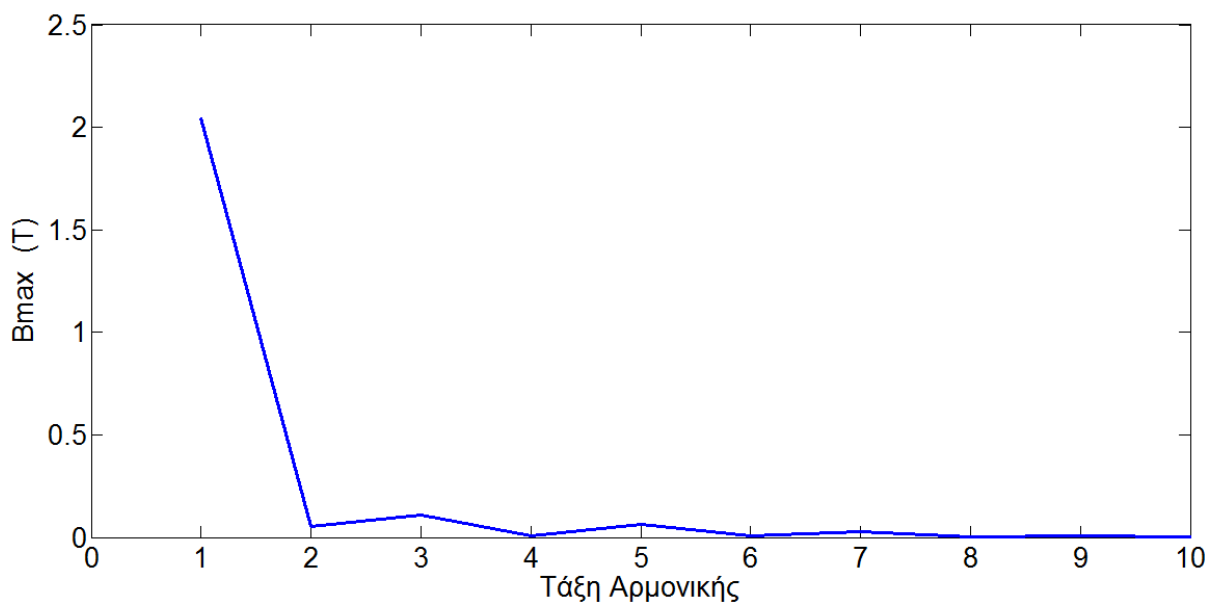


Σχήμα 4.19α: Μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής για ένα σημείο του στάτη της μηχανής με λαμαρίνα τύπου M235-35A. ($J_{max} = \frac{11A}{mm^2}$)

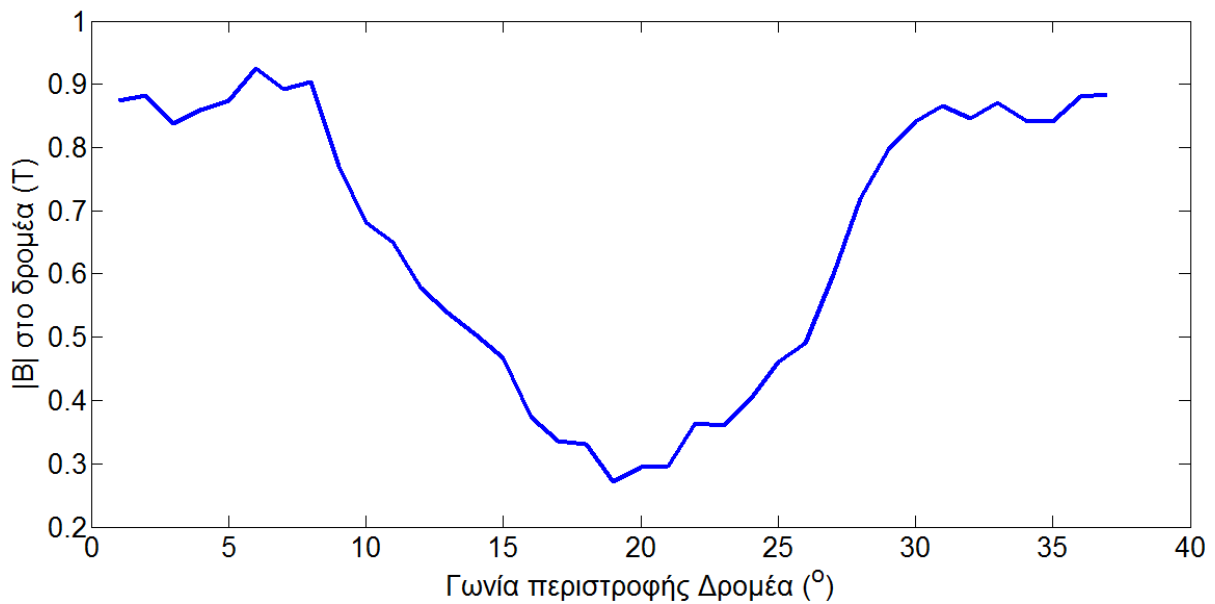
Μέσω του script που γράφτηκε στο Matlab, ακριβώς επειδή για κάθε στοιχειώδη μάζα καταγράφεται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής, το Σχήμα 4.19α έχει μορφή απόλυτης τιμής μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης. Στο παρακάτω Σχήμα (4.19β) γίνεται εποπτικά σαφές ότι το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής κάθε σημείου της μηχανής είναι αντίθετο με το αντίστοιχο διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής μετά από περιστροφή 18 μοιρών.



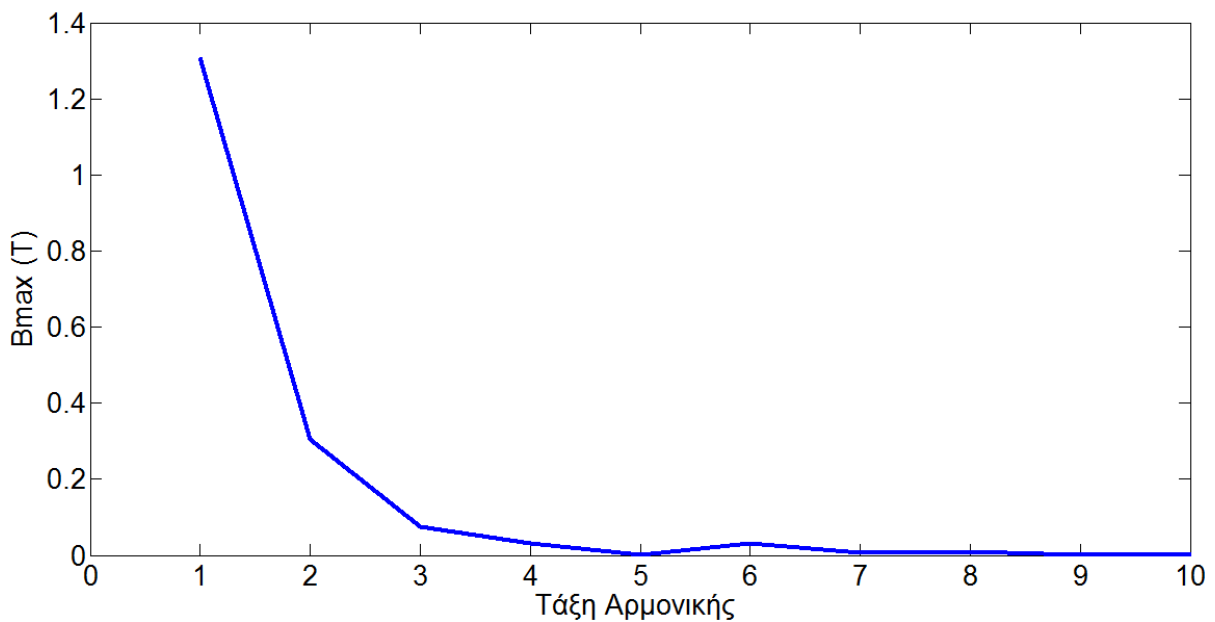
Σχήμα 4.19β: Αριστερά, στιγμιότυπο όπου απεικονίζεται το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση για τη μηχανή με λαμαρίνα τύπου M235-35A. Δεξιά, στιγμιότυπο της ίδιας μηχανής μετά από περιστροφή 18 μοιρών ($J_{max} = \frac{11A}{mm^2}$).



Σχήμα 4.20: Αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής της στοιχειώδους μάζας του στάτη.



Σχήμα 4.21: Μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής για ένα σημείο του δρομέα της μηχανής με λαμαρίνα τύπου M235-35A. ($J_{max} = \frac{11A}{mm^2}$)

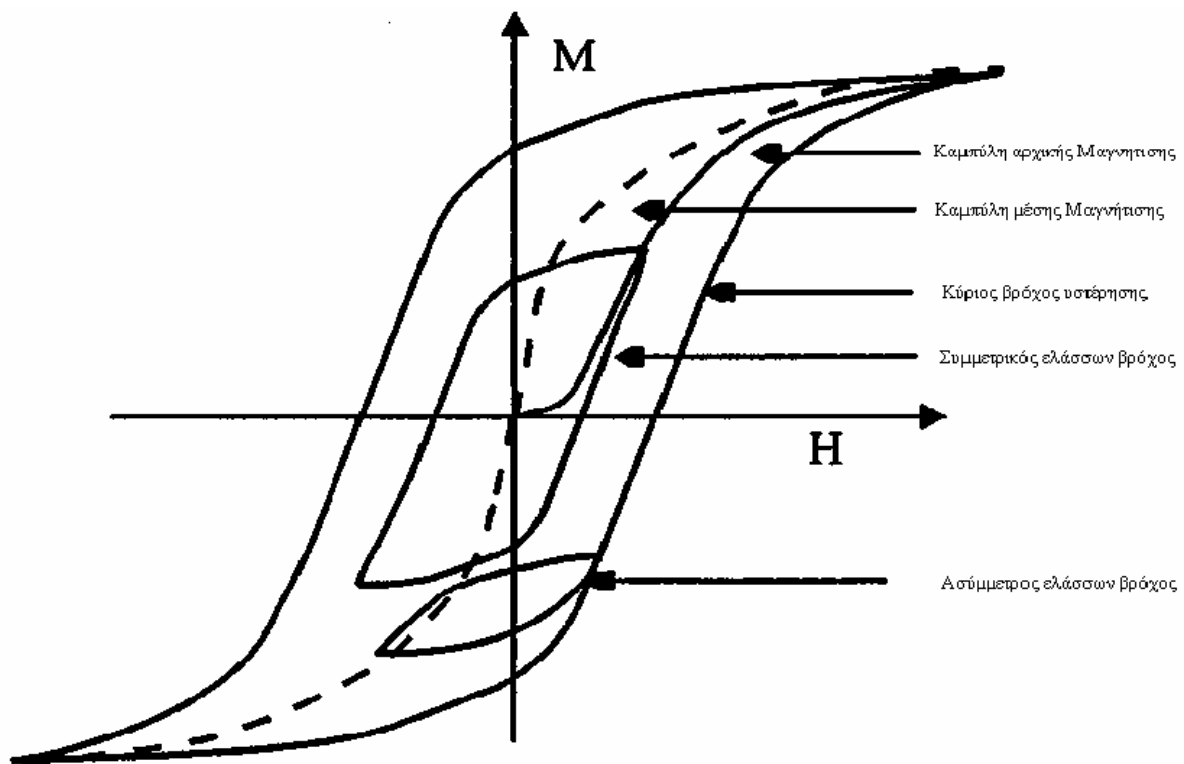


Σχήμα 4.22: Αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής της στοιχειώδους μάζας του δρομέα.

Ακριβώς ανάλογα διαγράμματα λαμβάνουμε και για τη μηχανή του άμορφου σιδήρου. Από τα διαγράμματα αυτά συμπεραίνουμε ότι το αρμονικό περιεχόμενο της πυκνότητας μαγνητικής ροής που διαρρέει το μαγνητικό κύκλωμα είναι αρκετά χαμηλό ούτως ώστε να μπορεί να θεωρηθεί μηδενικό. Έτσι, αφού για κάθε στοιχειώδη σιδηρομαγνητική μάζα η μαγνητική επαγωγή είναι ημιτονική, μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση 4.12 για τον υπολογισμό των απωλειών σε όλη τη μάζα της μηχανής.

Ένα δεύτερο συμπέρασμα που εξάγεται από τα διαγράμματα και αφορά στο δρομέα είναι ότι ναι μεν η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι (σχεδόν) ημιτονική, ωστόσο περιέχει και μία διόλου αμελητέα dc συνιστώσα. Για την περίπτωση του σημείου του δρομέα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21, η dc συνιστώσα ισούται απολύτως με $0,6 T$. Αυτή η dc συνιστώσα οφείλεται στο μόνιμο μαγνητικό πεδίο που εγκαθιστούν στο δρομέα οι μόνιμοι μαγνήτες.

Άρα, προφανώς, στην περίπτωση του υπολογισμού των απωλειών στο στάτη, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στη σχέση 4.12 η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής B_{max} που υπολογίζεται στο femm. Κι αυτό γιατί η διαγραφόμενη καμπύλη $B - H$ δεν αντιστοιχεί σε συμμετρικό ελάσσονα βρόχο με το αντίστοιχο B_{max} , παρά σε ασύμμετρο ελάσσονα βρόχο, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο Σχήμα 4.23.



Σχήμα 4.23: Παρουσίαση ασύμμετρου ελάσσονα βρόχου υστέρησης, με προφανή τη dc συνιστώσα τόσο στη ΜΕΔ όσο και στη μαγνήτισή του [4.7].

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.23, ο διαγραφόμενος ασύμμετρος ελάσσων βρόχος υστέρησης έχει σημαντικά μικρότερο εμβαδόν από έναν αντίστοιχο συμμετρικό με το ίδιο B_{max} . Επομένως και οι απώλειές του είναι σημαντικά μικρότερες. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η προσέγγιση ότι οι απώλειες που αντιστοιχούν σε έναν ασύμμετρο βρόχο είναι λίγο λιγότερες από τις μισές από αυτές που εμφανίζονται σε έναν συμμετρικό[4.8].

Άρα, λαμβάνοντας το B_{max} για κάθε στοιχειώδη μάζα του δρομέα από την ανάλυση του femm, υπολογίζουμε κατόπιν μέσω της εξίσωσης 4.15 τις απώλειες στη συνολική μάζα του δρομέα ελαττωμένες κατά έναν παράγοντα της τάξεως του 2,5 σε σχέση με την κλασική εξίσωση 4.12:

$$P_{\deltaρομέα} = \frac{2}{5} \sum_{i=1}^n P_{losses,i} \cdot m_i \quad (4.15)$$

Πάντως, όπως θα δούμε και παρακάτω, οι απώλειες πυρήνα του δρομέα είναι εκ των πραγμάτων πολύ χαμηλότερες των αντίστοιχων στο στάτη, κι αυτό διότι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο δρομέα σπάνια ξεπερνάει το 1,5 T.

4.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις απώλειες πυρήνα

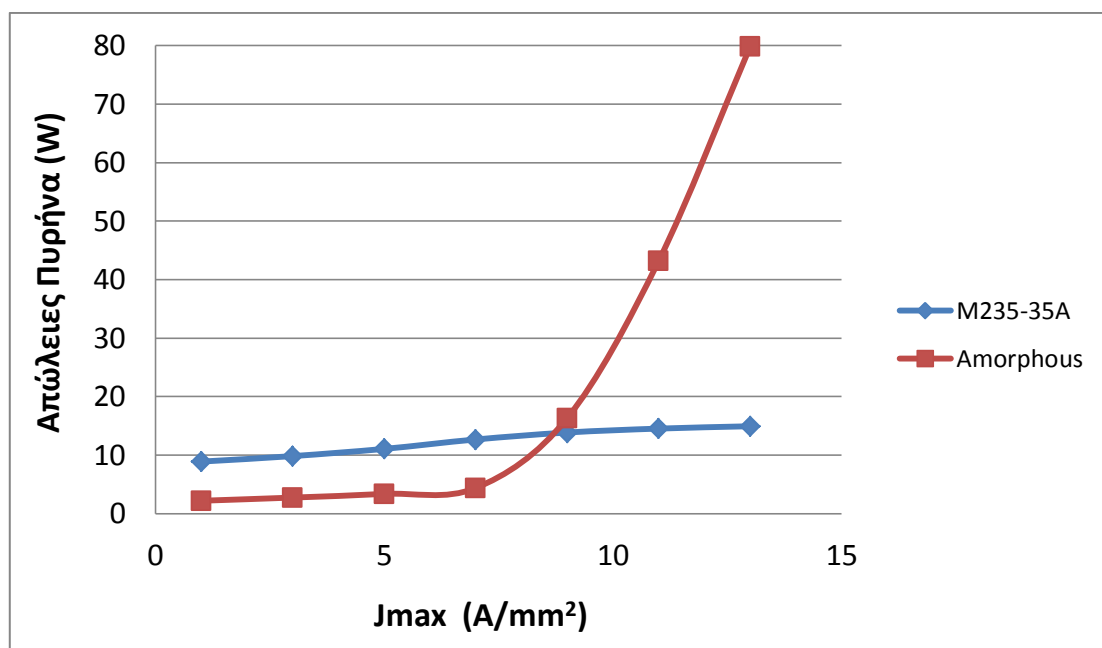
Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, προσομοιώθηκαν οι απώλειες πυρήνα των δύο μηχανών για λειτουργία μόνιμης κατάστασης σε διάφορες τιμές μέγιστης πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες κάθε μηχανής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στις δύο μηχανές παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.7: Απώλειες πυρήνα για τη μηχανή άμορφου σιδήρου.

J_{max} ($\frac{A}{mm^2}$)	\bar{B} Στάτη (T)	Απώλειες Στάτη (W)	\bar{B} Δρομέα (T)	Απώλειες Δρομέα (W)	Συνολικές Απώλειες (W)
1	1,05	2,04	0,8282	0,167	2,21
3	1,21	2,58	0,8286	0,17	2,75
5	1,37	3,19	0,8292	0,19	3,38
7	1,5	4,18	0,8302	0,2	4,38
9	1,6	16,1	0,8317	0,213	16,31
11	1,7	42,94	0,8337	0,23	43,17
13	1,8	79,56	0,8363	0,24	79,8

Πίνακας 4.8: Απώλειες πυρήνα για τη μηχανή με M235-35A.

J_{max} ($\frac{A}{mm^2}$)	\bar{B} Στάτη (T)	Απώλειες Στάτη (W)	\bar{B} Δρομέα (T)	Απώλειες Δρομέα (W)	Συνολικές Απώλειες (W)
1	1,16	8,07	0,8838	0,83	8,9
3	1,26	8,96	0,8847	0,88	9,84
5	1,36	10,13	0,8858	0,94	11,07
7	1,48	11,68	0,8874	1	12,68
9	1,54	12,81	0,8893	1,06	13,87
11	1,57	13,42	0,8914	1,12	14,54
13	1,58	13,76	0,8936	1,18	14,94



Σχήμα 4.24: Σύγκριση απωλειών πυρήνα των δύο μηχανών.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.24, ο άμορφος σίδηρος πλεονεκτεί έναντι της κλασικής λαμαρίνας M235-35A για χαμηλές ΜΕΔ (μέχρι $8 A/mm^2$) και κατ' επέκταση για εφαρμογές όπου εμφανίζονται χαμηλές μαγνητικές επαγωγές στο μαγνητικό κύκλωμα. Όπως φαίνεται και στους πίνακες 4.7-4.8, το κρίσιμο σημείο στο οποίο η μηχανή άμορφου σιδήρου παρουσιάζει μεγαλύτερες απώλειες πυρήνα σε σχέση με την ανταγωνίστριά της αντιστοιχεί σε $J_{max} = 9 A/mm^2$.

Σε εκείνο το σημείο λειτουργίας η μέση επαγωγή στο στάτη της μηχανής άμορφου σιδήρου ισούται με $1,6 T$ που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος του μαγνητικού κυκλώματος βρίσκεται στον κορεσμό.

Αντιθέτως, η M235-35A δεν εισέρχεται σε κορεσμό ούτε για $J_{max} = 13 A/mm^2$, καθώς ακόμα και για αυτή την ΜΕΔ η επαγόμενη μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στο στάτη είναι ίση με $1,58 T$. Για αυτό το λόγο η καμπύλη απωλειών της μηχανής M235-35A είναι αύξουσα μεν, αλλά με πολύ μικρή κλίση. Αντιθέτως, η αντίστοιχη καμπύλη για τη μηχανή άμορφου σιδήρου έχει μικρή αυξητική κλίση μέχρι τα $8 A/mm^2$ και ακολούθως η κλίση της αυξάνεται δραματικά λόγω του γεγονότος ότι μεγάλο μέρος του μαγνητικού κυκλώματος έχει φθάσει σε μαγνητική επαγωγή κορεσμού.

Επίσης, ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι απώλειες μαγνητικού πυρήνα κάθε μηχανής διατηρούνται σχεδόν σταθερές για μία περιοχή λειτουργιών όπου η μαγνητική επαγωγή στο μεγαλύτερο μέρος του μαγνητικού κυκλώματος δεν ξεπερνά την επαγωγή κορεσμού ($1,5T$ για τον άμορφο σίδηρο, $2T$ για τη λαμαρίνα M235-35A).

Τέλος, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι απώλειες του δρομέα είναι τόσο μικρές συγκρινόμενες με τις απώλειες του στάτη, που θα μπορούσαν να αγνοηθούν χωρίς μεγάλο σφάλμα σε μεγάλες φορτίσεις. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει και τη μεγαλύτερη ανάγκη για ψύξη που έχει ο στάτης σε σχέση με το δρομέα.

4.4.4 Απώλειες χαλκού για τις δύο μηχανές

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού (οι οποίες είναι ίδιες για τις δύο μηχανές) θα πρέπει να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε τυλίγματος. Για τον υπολογισμό της αντίστασης λαμβάνουμε υπόψη την ειδική αντίσταση χαλκού που ισούται με:

$$\rho_{cu} = 1,72 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot mm \quad (4.16)$$

Επίσης, το μήκος κάθε τυλίγματος υπολογίζεται μέσω του μήκους του δοντιού κατά τον άξονα της μηχανής, που είναι όσο το ενεργό μήκος, δηλαδή $120mm$. Ακόμα, το μήκος της απόστασης από το μέσο της μίας αύλακας μέχρι το μέσο της διπλανής της υπολογίζεται μέσω του μετεπεξεργαστή του femm ίσο με : $11,9mm$. Έτσι, το μήκος κάθε σπείρας είναι ίσο με:

$$l_0 = 2 \cdot (120 + 12)mm = 264mm \quad (4.17)$$

Από τη σχεδίαση των μηχανών επελέγη για κάθε τύλιγμα $N = 20$ σπείρες. Έτσι, για ένα συντελεστή πληρότητας τυλίγματος ίσο με $ff = 0,8$ η διατομή του χάλκινου καλωδίου προκύπτει:

$$S_{wire} = \frac{S_{αύλακας} \cdot ff}{N} = 2,92 \text{ mm}^2 \quad (4.18)$$

Άρα, η αντίσταση κάθε τυλίγματος ισούται με:

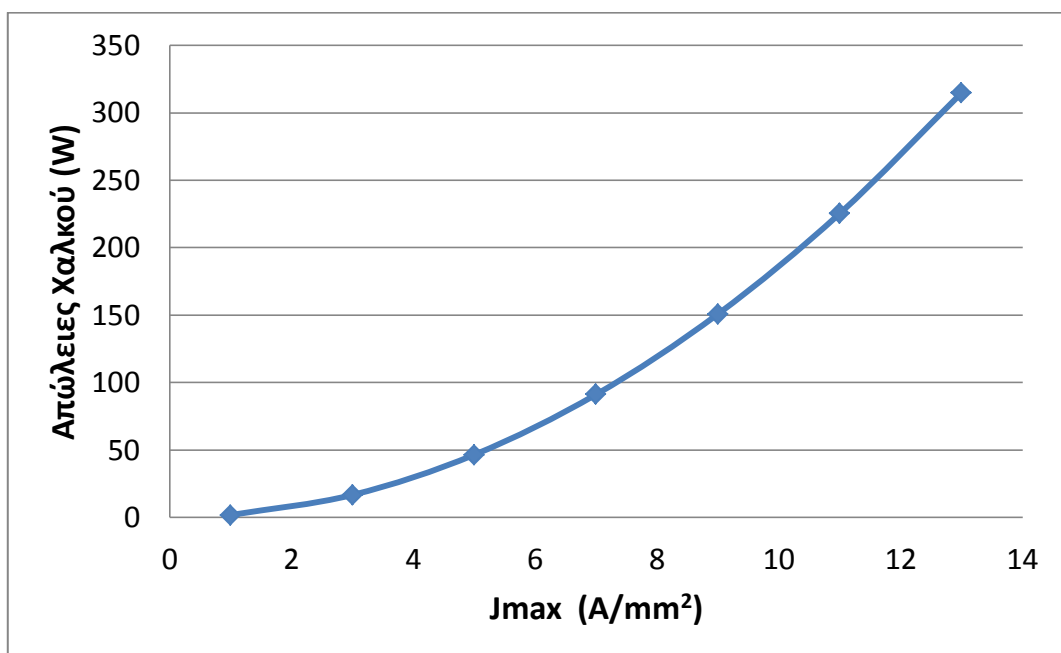
$$R = \rho_{cu} \frac{N \cdot l_0}{S_{wire}} \quad (4.19)$$

Επίσης, το πλάτος του ρεύματος κάθε τυλίγματος ισούται με:

$$I_{max} = \frac{J_{max} S_{αύλακας}}{N} \quad (4.20)$$

Τελικά, οι απώλειες χαλκού και για τις 3 φάσεις, και λαμβάνοντας υπόψιν ότι για κάθε φάση υπάρχουν 4 τυλίγματα τα οποία συνδέονται σε σειρά, δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{cu} = 3 \cdot \left(\frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot (4 \cdot R) \quad (4.21)$$



Σχήμα 4.25: Απώλειες χαλκού για τις δύο μηχανές σαν συνάρτηση της μέγιστης πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες.

4.4.5 Καμπύλη απόδοσης για τις δύο μηχανές

Η απόδοση των δύο μηχανών ισούται με το κλάσμα της μηχανικής ισχύος εξόδου προς το άθροισμα της ισχύος εξόδου, των απωλειών σιδήρου και των απωλειών χαλκού. Απλουστευτικά, αμελήσαμε τις μηχανικές απώλειες, όπως τις τριβές στον άξονα. Υποθέτουμε, όμως, χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι αυτές επηρεάζουν και τις δύο μηχανές ισόποσα.

$$\text{απόδοση (\%)} = \frac{T \cdot \omega_m}{T \cdot \omega_m + P_{cu} + P_{iron}} \cdot 100 \quad (4.22)$$

Όπου:

- ω_m , η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής που ισούται με:

$$\omega_m = 2\pi f_m = 2\pi \cdot 12,5 \cong 78,54 \text{ rad/s}$$

- T , η ροπή στον άξονα που λαμβάνεται για κάθε μηχανή από τους υπολογισμούς της παραγράφου 4.3.1 συναρτήσει της μέγιστης πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες J_{max} .
- P_{cu} και P_{iron} , οι απώλειες χαλκού και πυρήνα που έχουν υπολογιστεί κι εκείνες συναρτήσει της J_{max} .

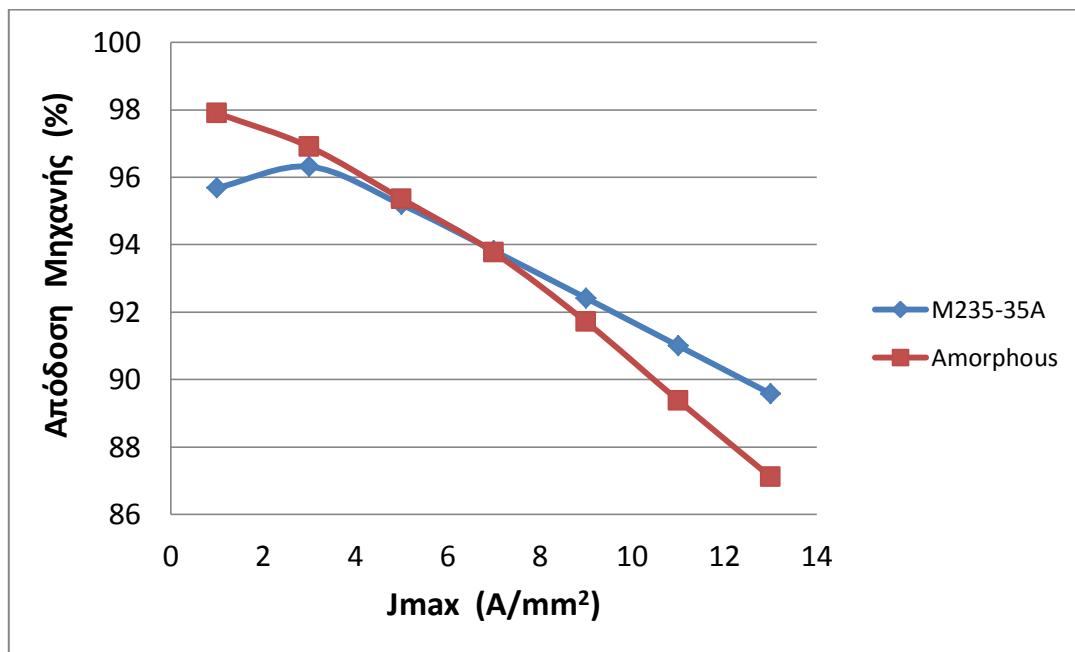
Συνεπώς, η σχέση υπολογισμού της απόδοσης (4.22) συσχετίζει την απόδοση με τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες. Ακολουθούν οι υπολογισμοί της απόδοσης για κάθε μηχανή:

Πίνακας 4.9: Πίνακας υπολογισμού απόδοσης για τη μηχανή με άμορφο σίδηρο.

J_{max}	$P_{cu}(W)$	$P_{iron}(W)$	$T \cdot \omega_m (W)$	απόδοση(%)
1	1,86	2,2092	190,07	97,90
3	16,77	2,7531	611,04	96,90
5	46,57	3,3836	1026,52	95,36
7	91,28	4,38445	1438,85	93,77
9	150,89	16,3111	1849,61	91,71
11	225,41	43,1708	2259,59	89,37
13	314,82	79,7988	2667,21	87,11

Πίνακας 4.10: Πίνακας υπολογισμού απόδοσης για τη μηχανή με M235-35A.

J_{max}	$P_{cu}(W)$	$P_{iron}(W)$	$T \cdot \omega_m (W)$	απόδοση(%)
1	1,86	8,9	238,76	95,69
3	16,77	9,84	695,08	96,31
5	46,57	11,07	1140,4	95,19
7	91,28	12,68	1577,86	93,82
9	150,89	13,87	2008,26	92,42
11	225,41	14,54	2426,1	91,00
13	314,82	14,94	2835,29	89,58



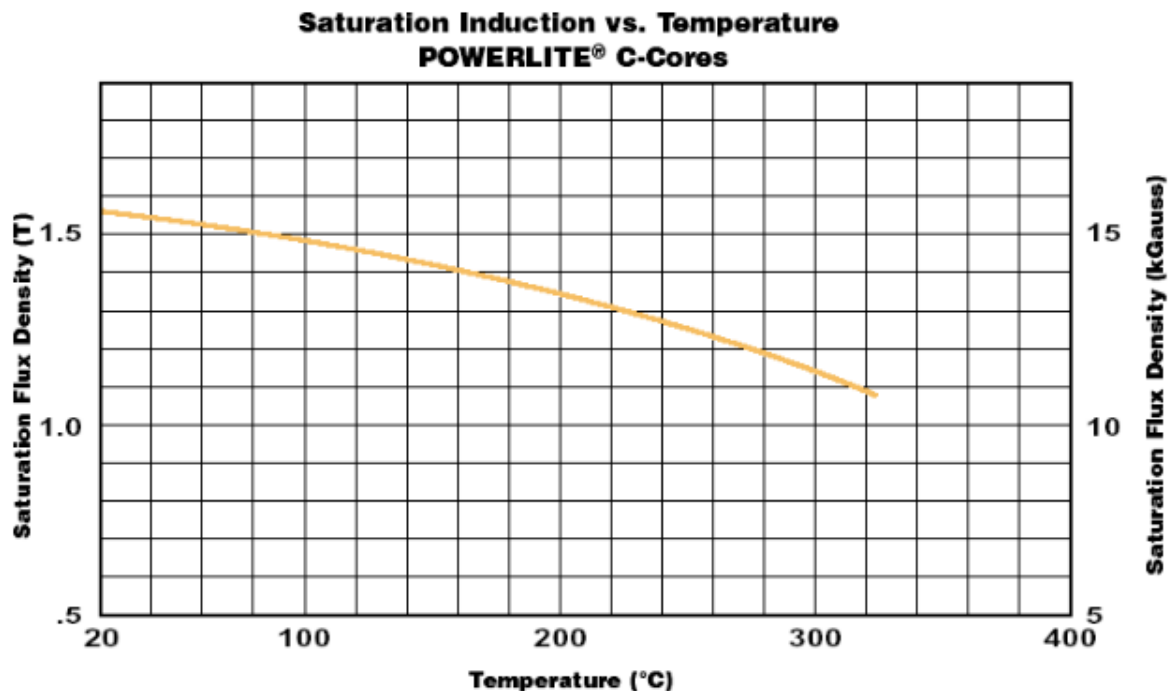
Σχήμα 4.26: Σύγκριση απόδοσης των δύο μηχανών.

Όπως είδαμε στην παράγραφο 4.3.1, για τη ζητούμενη ροπή των $30Nm$ στις $750rpm$ θα έχουμε για τις δύο μηχανές:

- Άμορφου σιδήρου: Απαιτούμενη $J_{max} = 11,47 A/mm^2$, άρα από την καμπύλη απόδοσης, θα έχουμε $\alpha = 88,85\%$. Αυτό σημαίνει οτι για αυτή την εφαρμογή οι θερμικές απώλειες σιδήρου και χαλκού αντιστοιχούν σε $262,7 W$.

- M235-35A: Απαιτούμενη $J_{max} = 10,67 A/mm^2$, άρα από την καμπύλη απόδοσης, θα έχουμε $\alpha = 91,23\%$. Αυτή η απόδοση αντιστοιχεί σε απώλειες χαλκού και σιδήρου ίσες με $206,6 W$ στη μόνιμη κατάσταση.

Είναι προφανές ότι με τέτοιου μεγέθους θερμικές απώλειες είναι αναγκαία μία αναλυτική μελέτη εξαναγκασμένης ψύξης των δύο εξεταζόμενων μηχανών. Γενικά αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας θα επηρέαζε τόσο τις απώλειες χαλκού (αφού η αντίσταση του τυλίγματος αυξάνεται με αύξηση θερμοκρασίας), όσο και τις απώλειες πυρήνα, αλλά και την σχεδιασθείσα επίδοση της μηχανής όπως φαίνεται και από το παρακάτω Σχήμα 4.27.



Σχήμα 4.27: Εξάρτηση της επαγωγής κορεσμού ενός τύπου άμορφου σιδήρου από τη θερμοκρασία. [4.10]

Επίσης, μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα για τη λειτουργία των δύο μηχανών. Για μέγιστη πυκνότητα ρεύματος αύλακας στο διάστημα:

- $[0, 5] \frac{A}{mm^2}$, η μηχανή με άμορφο σίδηρο είναι πιο αποδοτική.
- $[5, 7] \frac{A}{mm^2}$, οι δύο μηχανές έχουν ισοδύναμη απόδοση.
- $[7, 13] \frac{A}{mm^2}$, η μηχανή με τη λαμαρίνα M235-35A έχει μεγαλύτερη απόδοση.

Εκτός, όμως, από το κόστος λειτουργίας της μηχανής που εξαρτάται άμεσα από την απόδοσή της, βασική παράμετρος σύγκρισης είναι και το κόστος κατασκευής καθώς και η διαθεσιμότητα των απαραίτητων υλικών. Ο άμορφος σίδηρος είναι ένα υλικό που μπορεί να παρασκευαστεί στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του ΕΜΠ, γεγονός που του δίνει πρόκριμα σε αυτόν τον τομέα.

Ακόμα, θα πρέπει να εξεταστεί η παράμετρος του βάρους των δύο μηχανών. Η πυκνότητα του άμορφου σιδήρου προκύπτει από τον πίνακα 3.1 ίση με 7066 kg/m^3 , ενώ από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή της λαμαρίνας M235-35A προκύπτει πυκνότητα ίση με 7600 kg/m^3 [4.9].

Από το μετεπεξεργαστή του femm ο όγκος του σιδηρομαγνητικού υλικού στην περίπτωση της μηχανής με άμορφο σίδηρο προκύπτει ίσος με $0,24962 \text{ dm}^3$, ενώ για την περίπτωση της μηχανής με M235-35A προκύπτει ίσος με $0,303553 \text{ dm}^3$.

Άρα, η μηχανή με άμορφο σίδηρο θα έχει μάζα σιδηρομαγνητικού υλικού ίση με **1,76 kg**, ενώ η ανταγωνίστριά της θα έχει αντίστοιχη μάζα υλικού στο μαγνητικό της κύκλωμα ίση με **2,3 kg**. Συνολικά, δηλαδή, πρόκειται για μία διαφορά βάρους ίση με **0,54 kg**, που οπωσδήποτε πρέπει να ληφθεί υπόψη στην σύγκριση για την προκείμενη εφαρμογή.

4.5 Βιβλιογραφία

- [4.1] David Meeker, "*Finite Element Method Magnetics User's Manual*", Version 4.2, October 2010.
- [4.2] Materials library in FEMM 4.0,
http://www.iea.lth.se/emk/literature/FEMM40_matlib.pdf
- [4.3] McFee, S.; Webb, J.P.; Lowther, D.A. (1988) "*A tunable volume integration formulation for force calculation in finite-element based computational magnetostatics.*", IEEE Transactions on Magnetics, p. 439.
- [4.4] Huang, Y.; Dong, J.; Zhu, J.; Guo, Y. (2012) "*Core Loss Modeling for Permanent-Magnet Motor Based on Flux Variation Locus and Finite-Element Method*", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No.2.
- [4.5] David Meeker, "*Rotating Losses in a Outrunner Doubly Salient Permanent Magnet Generator*", <http://www.femm.info/wiki/CoreLossCalculation>
- [4.6] Chen, Y.; Pillay, P. (2002), "*An improved formula for Lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation*", Industry Applications Conference, Conference Record of the 37th IAS Annual Meeting, p.759-766, vol2.
- [4.7] Π. Ροβολής, "*Μοντελοποίηση Μαγνητικών Υλικών για Βελτιστοποίηση Κατασκευής και Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών*", Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010.
- [4.8] A. Kladas, "*Etude du Couple et des Pertes Fer d'une Machine a Reluctance Variable*", rapport de Stage de DEA, laboratoire des Universites Paris VI et IX, Orsay 1983 (France).
- [4.9] ThyssenKrupp Steel, *Power Core[®] M235-35A Elektroband NO/NGO electrical Steel*, February 2009.
- [4.10] Metglas Inc., *POWERLITE[®] Inductor Cores Technical Bulletin*, April 2011.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική ανάλυση των απωλειών τού δοκιμίου άμορφου σιδήρου, ακολουθώντας μεθοδολογία αντίστοιχη της μεθόδου Epstein, είναι:

- Οι μετρήσεις των μαγνητικών χαρακτηριστικών στο δοκίμιο υμενίων άμορφου σιδήρου, επιβεβαίωσε το πλεονέκτημα των άμορφων υλικών να εμφανίζουν πολύ χαμηλές απώλειες πυρήνα στις χαμηλές διεγέρσεις. Συγκεκριμένα, το εν λόγω υλικό παρουσίασε απώλειες μικρότερες από $1 W/kg$ για $B_{max} < 1,4T$ σε συχνότητα διέγερσης 50Hz, ενώ για συχνότητα 125Hz, οι απώλειες δεν ξεπέρασαν τα $2 W/kg$ στην ίδια περιοχή μαγνητικών επαγωγών.
- Από τις μετρήσεις απωλειών πυρήνα στο προαναφερθέν υλικό, επιβεβαιώθηκε ότι παρουσιάζει γόνατο κορεσμού για τιμή επαγωγής $B_{max} = 1,5T$, η οποία επιτυγχάνεται για αντίστοιχη τιμή εντάσεως μαγνητικού πεδίου $H_{max} = 1 kA/m$.
- Επιπλέον, όσον αφορά τον άμορφο σίδηρο, διαπιστώθηκε ότι οι απώλειές του μπορούν να μοντελοποιηθούν μακροσκοπικά στην περιοχή $B_{max} < 1,4T$ μέσω απλής εκθετικής εξίσωσης της μορφής:

$$P(f, B_{max}) = c(f) \cdot B_{max}^n$$

όπου $c(f)$ είναι μία εκθετική γνησίως αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας που αποτυπώνεται στο κεφάλαιο 3, ενώ n είναι μία σταθερά που τοποθετείται στο διάστημα [2, 2.5].

- Στη σύγκριση απωλειών του άμορφου σιδήρου με τη μαγνητική λαμαρίνα M235-35A, βρέθηκε ότι στην περιοχή συχνοτήτων 50-125Hz ο άμορφος σίδηρος παρουσιάζει χαμηλότερες απώλειες, για μέγιστες μαγνητικές

επαγωγές μικρότερες του $1,7 T$. Για μεγαλύτερες επαγωγές αντιθέτως, χαμηλότερες απώλειες σιδήρου παρουσιάζει η λαμαρίνα M235-35A.

- Επίσης, η λαμαρίνα M235-35A εμφανίζει γόνατο κορεσμού σε $1,8 T$, επαγωγή που επιτυγχάνεται για ένταση μαγνητικού πεδίου $H_{max} = 12590 A/m$. Αυτό σημαίνει ότι ο βρόχος υστέρησης της λαμαρίνας M235-35A σε αντίστοιχες διεγέρσεις είναι μεγαλύτερος από αυτόν του άμορφου σιδήρου.

Επιπρόσθετα, από την ανάλυση των μαγνητικών κυκλωμάτων των δύο αντίστοιχων μηχανών μονίμων μαγνητών μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Αρχικά, και για τις δύο συγκρινόμενες μηχανές, διαπιστώθηκε σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ φόρτισης (μέγιστης πυκνότητας ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη) και μέγιστης ηλεκτρομαγνητικής ροπής στον άξονα. Επίσης, κατά τη σύγκριση των δύο μηχανών, βρέθηκε ότι η γραμμή $T = f(J_{max})$, έχει μεγαλύτερη κλίση για τη μηχανή της οποίας το μαγνητικό κύκλωμα περιλαμβάνει μαγνητική λαμαρίνα M235-35A.
- Ακολούθως, διαπιστώνεται ότι η επιθυμητή ροπή των $30 Nm$ επιτυγχάνεται για διέγερση :
 - $J_{max} = 11,47 A/mm^2$, για τη μηχανή με μαγνητικό κύκλωμα από άμορφο σίδηρο.
 - $J_{max} = 10,67 A/mm^2$, για τη μηχανή με μαγνητικό κύκλωμα από λαμαρίνα M235-35A.
- Ως προς την κυμάτωση ροπής, διαπιστώνεται ότι και οι δύο μηχανές εμφανίζουν μικρή σχετικά διακύμανση ροπής στη μόνιμη κατάσταση, με τη μηχανή με άμορφο σίδηρο να εμφανίζει μικρότερη κυμάτωση ($T_{ripple} = 1,2 Nm$), έναντι εκείνης που εμφανίζει η μηχανή με λαμαρίνα M235-35A ($T_{ripple} = 2,2 Nm$).
- Ακόμα, διαπιστώθηκε ότι για τα δύο προαναφερόμενα υλικά, δεν είναι αποδεκτό να χρησιμοποιηθεί η συνηθισμένη εξίσωση (2.10) για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα:

$$P_{losses}(f, B_{max}) = P_{hysteresis} + P_{eddy} = K_h f (B_{max})^n + K_e f^2 (B_{max})^2 \quad (2.10)$$

Και τούτο διότι από τις μετρήσεις προέκυψε ότι οι ποσότητες K_h και K_e μεταβάλλονται σημαντικά στο εξεταζόμενο πεδίο συχνοτήτων και μαγνητικών επαγωγών. Επομένως κρίθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν απ'ευθείας οι μετρήσεις απωλειών πυρήνα για την εύρεση των απωλειών σε

όλη τη μάζα του μαγνητικού κυκλώματος κάθε μηχανής, με τη χρήση κατάλληλης χωρικής κατάτμησης σε περιοχές (αθροίζοντας δηλαδή τις απώλειες σε κάθε στοιχειώδη περιοχή).

- Ιδιαίτερα στο δρομέα, επειδή διαπιστώθηκε ότι η μαγνητική επαγωγή των στοιχειωδών περιοχών του διαγράφει ασύμμετρο βρόχο υστέρησης, ακολουθήθηκε ειδικός τρόπος υπολογισμού.
- Τέλος, οι απώλειες πυρήνα κάθε μηχανής διαπιστώθηκε ότι παραμένουν σχεδόν σταθερές για χαμηλές φορτίσεις (και ειδικότερα, εφόσον η μέση μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού κυκλώματος δεν υπερβαίνει το γόνατο κορεσμού κάθε υλικού).
- Συγκεκριμένα, από τη σύγκριση των μαγνητικών κυκλωμάτων των δύο μηχανών, διαπιστώθηκε ότι η μηχανή άμορφου σιδήρου εμφανίζει μικρότερες απώλειες πυρήνα για φορτίσεις μέχρι $8 A/mm^2$, ενώ αντίθετα για μεγαλύτερες φορτίσεις η μηχανή με μαγνητική λαμαρίνα M235-35A παρουσιάζει μικρότερες απωλειες.
- Διαπιστώθηκε, ακόμα, ότι οι απώλειες στο δρομέα είναι πολύ μικρότερες από τις απώλειες στο στάτη, ειδικά σε μεγάλες φορτίσεις.
- Τέλος, όσον αφορά την απόδοση των δύο μηχανών, συμπεραίνεται ότι για φορτίσεις:
 - $0 < J_{max} \leq 5 A/mm^2$, μεγαλύτερη απόδοση έχει η μηχανή με άμορφο σίδηρο.
 - $5 < J_{max} \leq 7 A/mm^2$, οι δύο μηχανές έχουν σχεδόν ισοδύναμη απόδοση.
 - $7 < J_{max} \leq 13 A/mm^2$, η μηχανή με λαμαρίνα M235-35A είναι αποδοτικότερη.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή κατά την μέγιστη απαιτούμενη ροπή των $30 Nm$ στις $750rpm$, προκύπτει ότι η μηχανή με άμορφο σίδηρο εμφανίζει απόδοση **88,85%**, ενώ η αντίστοιχη μηχανή με μαγνητική λαμαρίνα υπερτερεί καθώς παρουσιάζει απόδοση **91,23%**.

5.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Στην εργασία αυτή συγκρίθηκαν οι απώλειες πυρήνα άμορφου υλικού και λαμαρίνας μη κατευθυνόμενων κόκκων χαμηλών απωλειών, και ακολούθως επιβεβαιώθηκαν τα χαρακτηριστικά αντίστοιχων μαγνητικών κυκλωμάτων κινητήρων μονίμων μαγνητών. Τα σημεία καινοτομίας της εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Προσδιορισμός των μαγνητικών χαρακτηριστικών δοκιμίου υμενίων άμορφου σιδήρου. Το υλικό που μετρήθηκε κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και έχει σχεδιαστεί ούτως ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί στα μαγνητικά κυκλώματα ηλεκτρικών μηχανών. Για τον προσδιορισμό των απωλειών πυρήνα ακολουθήθηκε πειραματική διαδικασία κατά το δυνατόν αντίστοιχη με αυτή της διάταξης Epstein για μαγνητικές λαμαρίνες.
- Στη συνέχεια, με βάση τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του άμορφου υλικού που μετρήθηκαν, επιχειρήθηκε η σύγκρισή του με λαμαρίνα χαμηλών απωλειών μέσω προσομοίωσης αντίστοιχων μαγνητικών κυκλωμάτων ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών σε εφαρμογή κινητήριου συστήματος ισχύος 2.5 kW.
- Τα μοντέλα που διατυπώθηκαν κατά τη μικροσκοπική ανάλυση κάθε υλικού αξιοποιήθηκαν στη διαμόρφωση των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα των μαγνητικών κυκλωμάτων των μηχανών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

5.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική επιβεβαίωση των ευρημάτων στα μαγνητικά κυκλώματα των μηχανών μονίμων μαγνητών.
- Επέκταση του προτεινόμενου μοντέλου υπολογισμού απωλειών πυρήνα ηλεκτρικών μηχανών σε περιπτώσεις διεγέρσεων που προέρχονται από τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).