

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

ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επίβλεψη: Χατζηαργυρίου Νικόλαος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Μάρτιος 2017

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επίβλεψη: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την Μαρτίου 2017

.....

Χατζηαργυρίου

Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παπαθανασίου Αθ.

Σταύρος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεωργιλιάκης

Πάυλος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Μάρτιος 2017

.....

Γιακουμάκης Α. Παναγιώτης

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

Copyright© Γιακουμάκης Παναγιώτης, 2017

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 την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής είναι η μελέτη ενός εύρους κυκλικών διατάξεων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, με στόχο την εύρεση της διάταξης εκείνης που είναι πιο αποτελεσματική στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικού σταθμού και οχήματος, καθώς και τον προσδιορισμό και την ανάλυση των χαρακτηριστικών εκείνων που διέπουν τη λειτουργία των διατάξεων αυτών. Για τη μαγνητοστατική ανάλυση των διατάξεων που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ansoft Maxwell. Αρχικά, μελετήθηκε κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη, ώστε να εξετασθεί πώς επιδρούν τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης (μήκος-πλάτος ράβδων φερρίτη, αριθμός ράβδων κλπ.), αλλά και τα χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων στη μεταφερόμενη ισχύ. Σύμφωνα με την πραγματοποιούμενη μελέτη προσδιορίστηκαν τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της διάταξης και εξετάστηκε η επίδραση του συνολικού μεγέθους της διάταξης, αλλά και η επίδραση του διακένου και της μετατόπισης στη μεταφερόμενη ισχύ. Εξετάστηκε επίσης διάταξη σχήματος οβάλ, η οποία συγκρίθηκε με την προαναφερθείσα διάταξη ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος αλλά και τη συμπεριφορά ως προς τη μετατόπιση. Μελετήθηκαν επίσης διάφορες παραλλαγές της κυκλικής διάταξης, ώστε να γίνει επιλογή μίας βέλτιστης διάταξης ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος, με ταυτόχρονη χρήση του μικρότερου δυνατού όγκου φερρίτη. Η προκύπτουσα βέλτιστη διάταξη με ράβδους φερρίτη συγκρίθηκε στη συνέχεια με κυκλική διάταξη, όπου ο φερρίτης είναι ενιαίος και όχι τμηματικός σε ράβδους, με στόχο να μελετηθεί πώς επιδρά η αξιοποίηση του φερρίτη στην αποδιδόμενη στο όχημα ισχύ. Η μελέτη και σύγκριση των δύο αυτών διατάξεων επέτρεψε επίσης τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εκείνων που χαρακτηρίζουν τις κυκλικές διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ, παράλληλα, εξετάστηκε η διαλειτουργικότητα μεταξύ τους. Η μελέτη του εύρους των κυκλικών διατάξεων ολοκληρώνεται με την παρουσίαση μίας ορθογώνιας διάταξης, η οποία συγκρίνεται με τις προαναφερθείσες κυκλικές, εξετάζοντας παράλληλα και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ κυκλικών και ορθογώνιων διατάξεων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Επαγωγική φόρτιση, ηλεκτρικό όχημα, Ansoft Maxwell, οριζόντια μετατόπιση, διάκενο.

ABSTRACT

The scope of this thesis is the study of a range of circular pads for inductive charging of electric vehicles, with the aim to find the pad that is more effective in wireless power transfer between the electric station and the vehicle, as well as the identification and analysis of those characteristics that govern the operation of these pads. For the magnetostatic analysis of the pads that are presented in this study Ansoft Maxwell software was used. At first a circular pad with ferrite bars was studied, in order to test the influence of both the various geometric characteristics of the pads (length-width of ferrite bars, number of ferrite bars etc.) and the characteristics of the windings in the transferred power. According to the study carried out, the optimal characteristics of the pad were determined and the effect of the overall size of the pad as well as the effect of the air-gap and the horizontal displacement in the transferred power were examined. An oval shaped pad was also studied, which was compared with the abovementioned pad with respect to the ability of power transfer and the behavior in displacement. Moreover, different variants of the circular pad were studied in order to select an optimal pad according to its power transfer capabilities while using the smallest possible volume of ferrite. The resulting optimal pad with ferrite bars was then compared with a circular pad where ferrite is united and not partial in bars, in order to observe how the use of ferrite affects the power transferred to the vehicle. The study and comparison of those two pads also allowed the identification of those features that characterize the circular pads for inductive charging of electric vehicles, while interoperability between them was also examined. Finally, a rectangular pad is presented and is compared with the aforementioned circular, while considering the interoperability between circular and rectangular pads.

KEY-WORDS

Inductive charging, electric vehicle, Ansoft Maxwell, horizontal displacement, air-gap.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Χατζηαργυρίου και τον Γιάννη Καρακίτσιο για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα ευχαριστώ την οικογένειά μου που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1 ^ο Κεφάλαιο: Επαγωγική μεταφορά ισχύος.....	14
1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Διατάξεις επαγωγικής φόρτισης.....	16
1.3 Μέθοδοι ελέγχου.....	24
1.4 Μέθοδοι αντιστάθμισης.....	25
1.5 Βιομηχανικές διατάξεις.....	27
2 ^ο Κεφάλαιο: Περιγραφή του προγράμματος Maxwell.....	30
2.1 Εισαγωγή.....	30
2.2 Σχεδίαση νέου προβλήματος.....	30
2.3 Σχεδίαση διάταξης.....	34
2.3.1 Αλουμινένιος δίσκος πρωτεύοντος.....	36
2.3.2 Ράβδοι φερρίτη πρωτεύοντος.....	38
2.3.3 Τύλιγμα πρωτεύοντος.....	40
2.3.4 Αλουμινένιος κυκλικός δακτύλιος.....	42
2.3.5 Σχεδίαση δευτερεύοντος.....	42
2.4 Ορισμός υλικών.....	44
2.5 Ορισμός οριακών συνθηκών.....	48
2.6 Ορισμός παραμέτρων της ανάλυσης.....	49
2.7 Επεξεργασία και απεικόνιση αποτελεσμάτων.....	56
3 ^ο Κεφάλαιο: Κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη.....	59
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ.....	59
3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φερρίτη.....	60
3.2.2 Σχετική θέση μεταξύ ράβδων φερριτών και τυλιγμάτων.....	63
3.3 Επίδραση της οριζόντιας μετατόπισης και του διακένου στην μεταφορά ισχύος.....	69
3.3.1 Επίδραση της οριζόντιας μετατόπισης στη μεταφερόμενη ισχύ.....	69
3.3.2 Επίδραση του διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ.....	74
3.4 Επίδραση του συνολικού μεγέθους της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ.....	76
3.4.1 Κυκλική διάταξη 600mm.....	76
3.4.2 Κυκλική διάταξη 800mm.....	79
3.4.3 Συγκρίσεις μεταξύ των κυκλικών διατάξεων διαφόρων μεγεθών.....	83
4 ^ο Κεφάλαιο: Μελέτη κυκλικών διατάξεων με παρόμοια χαρακτηριστικά.....	87
4.1 Εισαγωγή.....	87
4.2 Οβάλ διάταξη.....	87
4.3 Διατάξεις με φερρίτη διαφόρων σχημάτων.....	95
4.4 Βέλτιστη διάταξη.....	100
5 ^ο Κεφάλαιο: Σύγκριση με κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη.....	102
5.1 Εισαγωγή.....	102
5.2 Χαρακτηριστικά διάταξης και μεταφερόμενη ισχύς.....	102
5.2.1 Πάχος φερρίτη.....	103
5.2.2 Θέση τυλίγματος.....	104
5.3 Επίδραση οριζόντιας μετατόπισης και διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ.....	107

5.4 Επίδραση του όγκου φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ.....	108
5.5 Οριζόντια μετατόπιση.....	114
5.6 Διαλειτουργικότητα μεταξύ κυκλικής διάταξης με ράβδους φερρίτη και κυκλικής διάταξης με ενιαίο φερρίτη.....	114
5.6.1 Διαλειτουργικότητα και μετατόπιση.....	116
6° Κεφάλαιο: Σύγκριση με ορθογώνια διάταξη.....	118
6.1 Εισαγωγή.....	118
6.2 Περιγραφή διάταξης.....	118
6.3 Χαρακτηριστικά ορθογώνιας διάταξης και μεταφερόμενη ισχύς.....	122
6.3.1 Χαρακτηριστικά φερρίτη.....	122
6.3.1.1 Μεταβολή διαστάσεων.....	122
6.3.1.2 Διάσταση φερρίτη.....	123
6.3.1.3 Πάχος φερρίτη.....	125
6.3.1.4 Τρύπα φερρίτη.....	126
6.3.2 Χαρακτηριστικά τυλιγμάτων.....	128
6.3.2.1 Θέση τυλίγματος.....	128
6.3.2.2 Αριθμός ελιγμάτων.....	130
6.4 Επίδραση του όγκου φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ.....	131
6.5 Συμπεριφορά της ορθογώνιας διάταξης σε σχέση με την μετατόπιση.....	134
6.6 Διαλειτουργικότητα.....	136
7° Κεφάλαιο: Συμπεράσματα και επεκτάσεις.....	139
7.1 Συμπεράσματα.....	139
7.2 Επεκτάσεις.....	141
Αναφορές.....	142

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΙΣΧΥΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό εισάγεται η έννοια της επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γενικότερα αλλά και όσον αφορά την φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Θα ασχοληθούμε με τα είδη των διατάξεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, μεθόδους ελέγχου και αντιστάθμισης, βιομηχανικές διατάξεις που ήδη υπάρχουν στο εμπόριο.

1.1 Εισαγωγή

Επαγωγική μεταφορά ισχύος (EMI) – inductive power transfer (IPT), είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο για να επιτύχει μεταφορά ισχύος διαμέσου ενός διακένου αέρα σε κάποιο φορτίο, χωρίς φυσική επαφή.

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος προτάθηκε σύντομα αφότου ο Ampere και ο Faraday διατύπωσαν τους νόμους τους, που έγιναν τα θεμέλια της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού[1]. Ακόμη μεγαλύτερη πρόοδο έκανε ο Tesla ο οποίος υπέδειξε ότι μπορεί να μεταφερθούν σημαντικά ποσά ισχύος με τη χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιώντας πηνία που βρίσκονται σε συνθήκη συντονισμού και λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες. Οι τρόποι παρ' όλα αυτά με τους οποίους η ισχύς αυτή θα μπορούσε να μεταφερθεί με χαμηλό κόστος παρέμειναν μια πρόκληση που ήταν δύσκολο να ξεπεραστεί με την τότε τεχνολογία. Συνεπώς η επαγωγική μεταφορά ισχύος θεωρήθηκε μη βιώσιμη για κάποιο χρονικό διάστημα και τα πραγματικά εμπορικά συστήματα εμφανίστηκαν στα τέλη του εικοστού αιώνα.

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος περιλαμβάνει τη σύζευξη δύο ή περισσότερων πηνίων: όταν επιτευχθεί αυτή ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στο ένα πηνίο επάγει μία εναλλασσόμενη τάση στο άλλο, ως εκ τούτου κάτω από κατάλληλες συνθήκες αυτή η τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ισχύ σε κάποιες εφαρμογές.

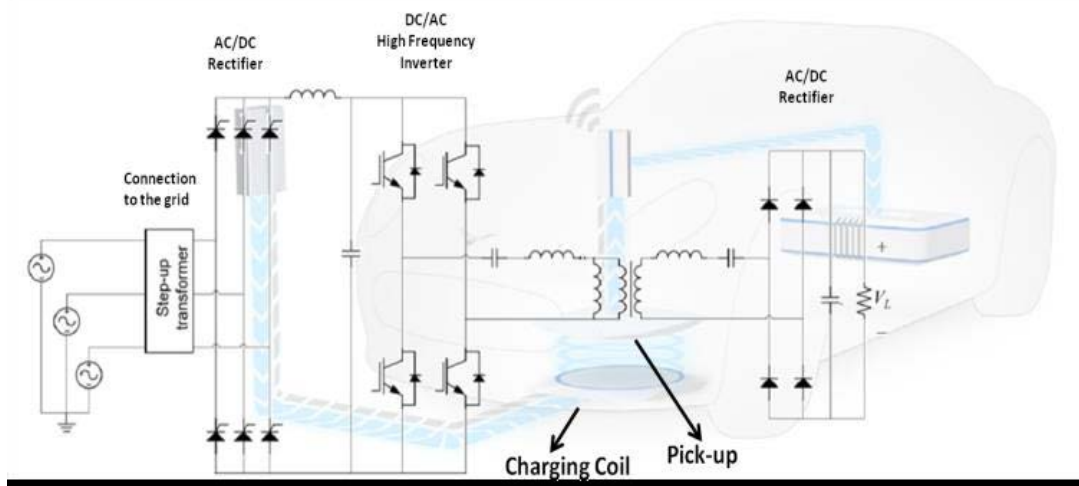
Υπάρχουν εγγενή πλεονεκτήματα απ' την στιγμή που τα εξαρτήματα είναι ηλεκτρικά απομονωμένα. Η λειτουργία σε υγρό περιβάλλον δεν παρουσιάζει κίνδυνο για την ασφάλεια και τα συστήματα μένουν ανεπηρέαστα από τέτοιες συνθήκες. Χρησιμοποιείται σε πολυάριθμες βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην κατασκευή αυτοκινήτων, στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ολοένα βρίσκει νέες εφαρμογές όπου η ασφάλεια και η άνεση απαιτούνται.

Ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση για τα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος σήμερα είναι η χρήση τέτοιων συστημάτων σε οχήματα, αλλά και σε σιδηροδρομικά και οδικά δίκτυα. Η επαγωγική μεταφορά ισχύος προσφέρει την δυνατότητα της απόδοσης ισχύος σε τέτοια οχήματα, χρησιμοποιώντας ειδικές διατάξεις κάτω από το έδαφος και επιτυγχάνοντας ασύρματη μεταφορά της ισχύος σε μία διάταξη τοποθετημένη κάτω από το όχημα.

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος σε ηλεκτρικά οχήματα διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

Στατική επαγωγική φόρτιση: Στην περίπτωση αυτή η μεταφορά ισχύος επιτυγχάνεται όταν το όχημα είναι σταθμευμένο.

Δυναμική επαγωγική φόρτιση: Σε αυτή την περίπτωση η φόρτιση επιτυγχάνεται ενώ το όχημα κινείται. Αν και η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 70 μόνο πρόσφατα έχει ξεκινήσει να λαμβάνει ξανά προσοχή λόγω των εξελίξεων στην στατική φόρτιση από την μία και από την άλλη της προθυμίας των κατασκευαστών αυτοκινήτων να υποστηρίξουν αυτήν την τεχνολογία [1]. Αυτού του είδους η φόρτιση έρχεται να λύσει το βασικό πρόβλημα πάνω στο οποίο προσκρούει η μαζική εξάπλωση των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι η συχνή φόρτιση που απαιτούν, λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας της μπαταρίας τους. Οι διατάξεις που χρησιμοποιεί είναι ακριβώς ίδιες με την στατική με την διαφορά ότι το πρωτεύον τώρα είναι τοποθετημένο στο δρόμο και όχι σε κάποιο σταθμό φόρτισης, γκαράζ, πάρκινγκ κ.ο.κ. Με εξαίρεση το αρχικό οικονομικό κόστος αγοράς, τα ηλεκτρικά οχήματα υπερέχουν των οχημάτων εσωτερικής καύσης ως προς το γεγονός ότι είναι καθαρότερα, πιο ήσυχα, αποδοτικότερα.



Σχήμα 1.1: Γενική περιγραφή συστήματος επαγωγικής φόρτισης [2].

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η γενική μορφή ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος. Η τάση του δικτύου, η οποία είναι εναλλασσόμενη και χαμηλής συχνότητας, θα πρέπει πρώτα να περάσει από έναν AC/DC ανορθωτή για να γίνει συνεχής και στη συνέχεια πάλι εναλλασσόμενη αλλά υψηλής συχνότητας χρησιμοποιώντας DC/ AC μετατροπέα. Τέλος περνάμε από ένα δίκτυο αντιστάθμισης για να καταλήξουμε στο πηνίο εκπομπής. Κάποιες φορές απαιτείται διόρθωση του συντελεστή ισχύος στον ανορθωτή καθώς επίσης και ένας μετασχηματιστής απομόνωσης υψηλής συχνότητας ανάμεσα στον

αντιστροφέα και στο πρωτεύον πηνίο για ασφάλεια και προστασία. Το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εκπομπής δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο με την σειρά του επάγει μια εναλλασσόμενη τάση στο πηνίο δέκτη. Αυτά τα δύο πηνία ουσιαστικά αποτελούν έναν ασθενώς συζευγμένο μετασχηματιστή που λειτουργεί με ένα σχετικά μεγάλο διάκενο. Αντιστάθμιση χρησιμοποιείται και στο δευτερεύον και η τάση ανορθώνεται πάλι πριν φτάσει στην μπαταρία την οποία και θα φορτίσει.

Στην απλούστερή του μορφή ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος περιλαμβάνει δύο πηνία L_1 και L_2 με αμοιβαία επαγωγή M . Για ένα ρεύμα I_1 στο L_1 σε συχνότητα ω , η τάση η οποία επάγεται στο L_2 είναι $V_{oc} = j\omega MI_1$ και αναφέρεται κοινώς ως η τάση ανοιχτοκύκλωσης του συζευγμένου συστήματος. Εάν το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_{sc} = \frac{V_{oc}}{j\omega L_2} = \frac{j\omega MI_1}{j\omega L_2} = \frac{M I_1}{L_2}$$

Το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} πολλαπλασιασμένο με την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} μας δίνει την μέγιστη ισχύ σε VA για το δευτερεύον που ονομάζεται P_{su} η οποία είναι η μη αντισταθμισμένη ισχύς και δίνει μια μέτρηση του πόσο καλή είναι η σύζευξη ισχύος για οποιοδήποτε μαγνητικό σύστημα.

Η ισχύς εξόδου τώρα (P_{out}), υπολογίζεται ως το γινόμενο της μη αντισταθμισμένης ισχύος P_{su} με έναν συντελεστή, τον λεγόμενο συντελεστή ποιότητας Q , και ένα πιο αναλυτικό σχήμα δίνεται παρακάτω:

$$P_{out} = P_{su} Q = V_{oc} I_{sc} Q = \frac{\omega M^2 I_1^2}{L_2} Q$$

Ο εν λόγω συντελεστής Q καθορίζεται είτε από το φορτίο, είτε από τον ελεγκτή που ελέγχει τάση και ρεύμα στην έξοδο. Σε πρακτικές εφαρμογές ο συντελεστής αυτός περιορίζεται ανάμεσα στις τιμές 4 έως 6 και είναι φυσικά αδιάστατο μέγεθος [3]. Ο τρόπος υπολογισμού δίνεται παρακάτω ανάλογα με την συνδεσμολογία:

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} \text{ για εν σειρά σύνδεση και}$$

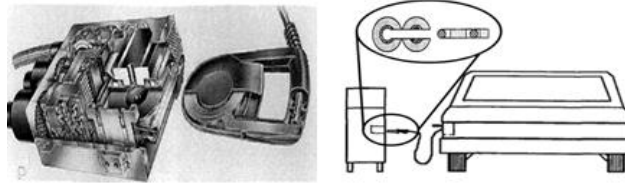
$$Q = \frac{R}{L\omega_0} = \omega_0 CR \text{ για παράλληλη σύνδεση των στοιχείων με } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ τη συχνότητα συντονισμού, } R \text{ την τιμή της ωμικής αντίστασης του φορτίου και } C \text{ την τιμή του πυκνωτή συντονισμού στην πλευρά του δευτερεύοντος [4].}$$

1.2 Διατάξεις επαγωγικής φόρτισης

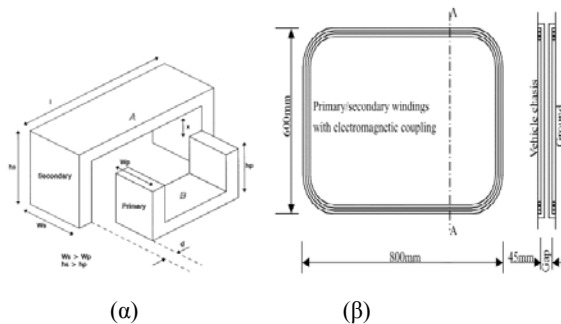
- Στατική φόρτιση

Οι επαγωγικοί συζευκτές στα μέσα της δεκαετίας του 90 [5],[6] απαιτούσαν την χρήση ενός συστήματος το οποίο συνδεόταν με τον φορτιστή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 1.3. Όμως αυτού του είδους οι φορτιστές επειδή κάνουν χρήση καλωδίων δύσκολα μπορούν να θεωρηθούν ως ασύρματο σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος. Στο σχήμα 1.4 (α) έχουμε και νεότερα συστήματα τα οποία έχουν συζευκτές που μοιάζουν με αυτούς ενός πυρήνα μετασχηματιστή όμως το μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτούν πολύ μικρό διάκενο [7]. Ένα

άλλο σύστημα είναι αυτό στο σχήμα 1.4 (β) το οποίο δεν περιλαμβάνει καθόλου φερρίτη [8]. Αυτό το σύστημα είναι πολύ ευαίσθητο και πολύ πιθανόν είναι να επιτρέψει στην ροή να εισέλθει στο σασί του αυτοκινήτου και να έχουμε απώλειες δινορρευμάτων. Γι' αυτό το λόγο προτιμάται η χρήση του φερρίτη ο οποίος ενισχύει και καθοδηγεί την μαγνητική ροή.

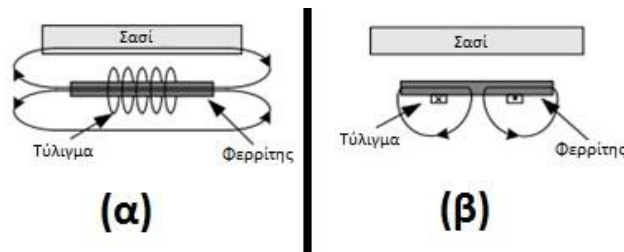


Σχήμα 1.3: Μαγνητικός συζευκτής δεκαετίας 90 [5],[6].



Σχήμα 1.4: Νεότερα συστήματα μαγνητικών συζευκτών α[7] και β[8].

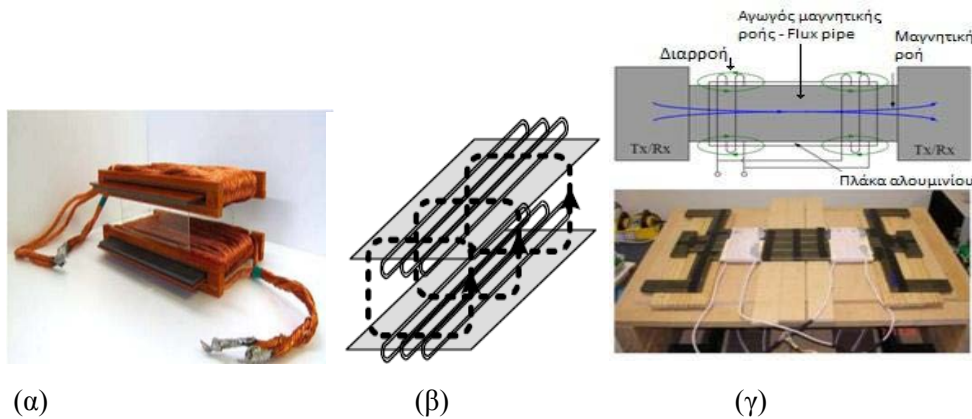
Για την μεταφορά ισχύος σε μεγαλύτερα διάκενα μεταξύ του ηλεκτρικού οχήματος όπου βρίσκεται το πηνίο αποδέκτης και του πηνίου εκπομπής εντάχθηκε φερρίτης στις νεότερες διατάξεις που δημιουργήθηκαν. Οι συζευκτές αυτοί μπορεί να είναι είτε μονής είτε διπλής όψης ανάλογα με το πως διαχέουν την μαγνητική ροή (σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Μαγνητική ροή συζευκτών (α) διπλής και (β) μονής όψης [9]

❖ Συζευκτές διπλής όψης (Double sided couplers)

Οι συζευκτές διπλής όψης αποτελούνται συνήθως από ένα πηνίο σχήματος σωληνοειδούς το οποίο τυλίγεται σε μια πλάκα φερρίτη με την ροή να διαχέεται και στις δύο πλευρές. Όμως εμείς χρειαζόμαστε μόνο την μία ροή αυτήν προς την κάτω πλευρά αφού η άλλη προκαλεί απώλειες δινορρευμάτων. Ένας τρόπος περιορισμού της ροής αυτής είναι η τοποθέτηση αλουμινίου μεταξύ φερρίτη και οχήματος. Ωστόσο, αυτού του είδους οι συζευκτές δεν είναι επιθυμητοί λόγω των μεγάλων μαγνητικών απωλειών της τάξης του 10%, πολύ μεγαλύτερες από τις συνήθως ανεκτές απώλειες των 2-4% [10]. Ακόμα σε τέτοιου είδους φορτιστές παρατηρούμε μια οριζόντια ροή η οποία προκαλεί περαιτέρω διαρροή και μας δυσκολεύει αρκετά στο να την περιορίσουμε. Άρα οι διπλής όψης φορτιστές γενικά δεν προτιμούνται σε επαγωγικά συστήματα μεταφοράς.

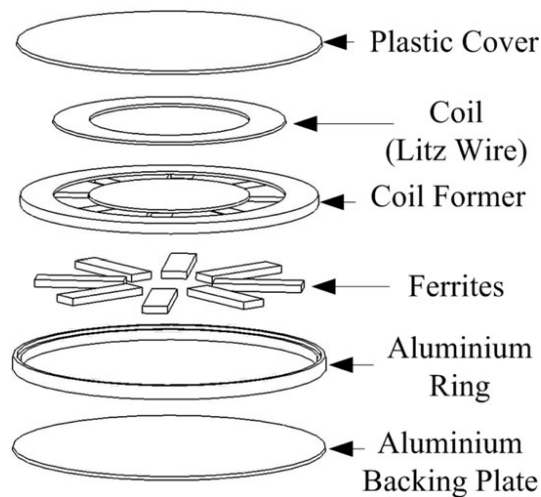


Σχήμα 1.6: Παραδείγματα συζευκτών διπλής όψης α[10], β[11] και γ[12].

❖ Συζευκτές μονής όψης (single sided couplers)

Σε αυτού του είδους τους συζευκτές το μεγαλύτερο ποσοστό της ροής διαχέεται στην μία μεριά οπότε και η απαίτηση για θωράκιση είναι σαφώς μικρότερη.

Μια διάταξη μονής όψης αποτελείται από τρία μέρη: τα πηνία τα οποία τοποθετούνται στο επάνω μέρος, ακριβώς από κάτω ο φερρίτης ο οποίος κατευθύνει και ενισχύει την μαγνητική ροή και αμέσως κάτω και γύρω από τα παραπάνω βρίσκεται η θωράκιση (αλουμίνιο) [2]. Επίσης υπάρχει και κάποιο μηχανικό υλικό που στηρίζει την όλη διάταξη. Η διάταξη που περιγράφηκε αντιστοιχεί στο πρωτεύον του συστήματος, και είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 1.7 που ακολουθεί. Απαιτείται και μια ίδια αντικριστή διάταξη απέναντί της σε μικρή απόσταση, η οποία αντιστοιχεί στο δευτερεύον του συστήματος και τοποθετείται στο κάτω μέρος του ηλεκτρικού οχήματος, για να επιτευχθεί η σύζευξη ισχύος.



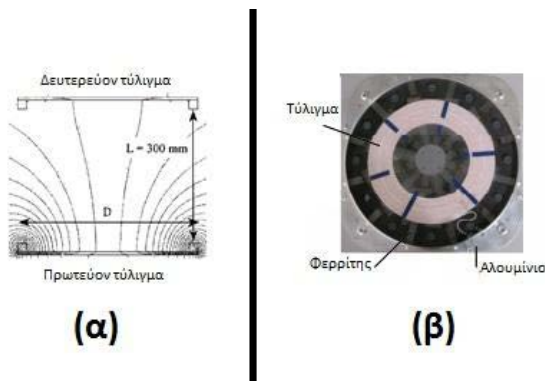
Σχήμα 1.7: Κυκλική διάταξη με τα επιμέρους στοιχεία που την απαρτίζουν [2].

Οι συζευκτές μονής όψης χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τους κυκλικούς, τους ορθογώνιους και τους οβάλ.

Κυκλικοί συζευκτές

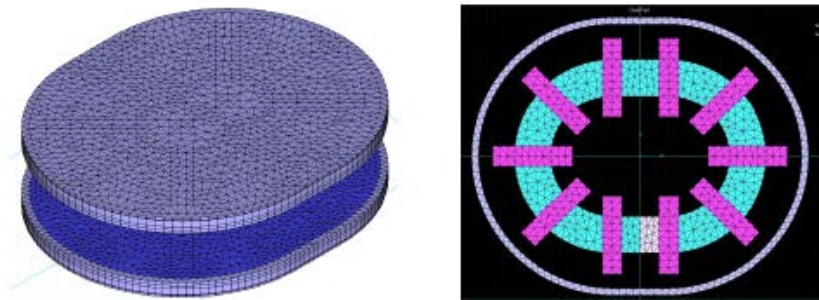
Η κυκλική διάταξη είναι ουσιαστικά το πρώτο είδος συζευκτής μονής όψης που κατασκευάστηκε. Στο σχήμα 1.8 (α) βλέπουμε έναν τέτοιο συζευκτή όπου έχει διάμετρο

400mm, συχνότητα λειτουργίας 100kHz και η ισχύς που αποδίδει για διάκενο 300mm είναι 1kW. Όμως είναι αρκετά ευαίσθητος σε οριζόντιες αποκλίσεις και παρουσιάζει απώλειες ροής [13]. Μια καλύτερη διάταξη από αυτήν φαίνεται στο Σχήμα 1.8 (β) όπου γίνεται κατάλληλη χρήση των φερριτών που χρησιμοποιούνται, ενώ παράλληλα προστέθηκε αλουμινένιος δίσκος για να μειώσει σημαντικά την απώλεια της μαγνητικής ροής. Η λειτουργία της είναι στα 20kHz, η μεταφερόμενη ισχύς 2kW σε διάκενο 200mm. Επίσης παρουσιάζει καλύτερη ανοχή σε οριζόντιες αποκλίσεις. Η απόδοσή της ξεπερνάει το 85% [1],[2]. Οι κυκλικές διατάξεις έχουν το πλεονέκτημα έναντι των άλλων ότι το όχημα μπορεί να τις πλησιάσει από οποιαδήποτε κατεύθυνση, δεδομένου της συμμετρικότητας που παρουσιάζουν, και έχουν μικρές απώλειες για δεδομένη ισχύ. Παρουσιάζουν ωστόσο και κάποια μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι η απόδοση των διατάξεων αυτών είναι ιδιαίτερα χαμηλή όπως και η ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις.



Σχήμα 1.8: (α) Κυκλικό rad σε τομή [13] (β) Βελτιστοποιημένη κυκλική διάταξη [1],[2].

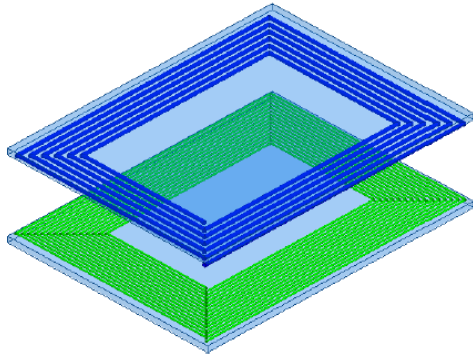
Παρόμοια με τις κυκλικές διατάξεις υπάρχουν και διατάξεις σε σχήμα οβάλ όπως δίνονται στο Σχήμα 1.13.



Σχήμα 1.13: Απεικόνιση οβάλ διάταξης [14].

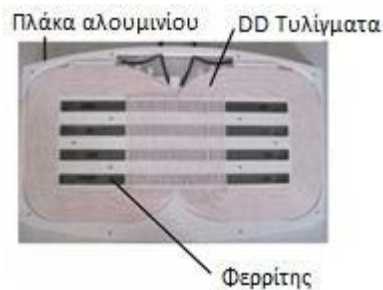
Ορθογώνιοι συζευκτές

Μία απλή ορθογώνια διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 1.9 .



Σχήμα 1.9: Ορθογώνια διάταξη[15].

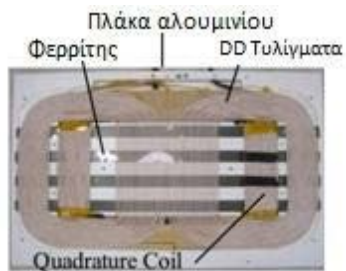
Η διάταξη αυτή αποτελείται από ενιαίο τμήμα φερρίτη. Μία βελτιωμένη ορθογώνια διάταξη είναι η DD η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 1.10 [1].



Σχήμα 1.10: DD διάταξη [1].

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά ισχύος σε ιδιαίτερα μεγάλα διάκενα. Το ύψος της ροής που παράγει είναι ιδιαίτερα μεγάλο και ίσο με το μισό του μήκους της. Επίσης έχει ιδιαίτερα μεγάλη ανοχή σε μετατοπίσεις στον οριζόντιο άξονα και επιπλέον μπορεί να μεταφέρει ιδιαίτερα ικανοποιητικά ποσά ισχύος.

Η DDQ διάταξη (Σχήμα 1.11) είναι παρόμοια με την DD μόνο που έχει ένα επιπρόσθετο πηνίο ονόματι Q, τετραγωνικού σχήματος, στο δευτερεύον της. Αυτό βοηθάει στο να αποφεύγεται η υπερθέρμανση της διάταξης και να είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητη σε οριζόντιες αποκλίσεις σε σχέση με τις προηγούμενες [16],[17],[18].

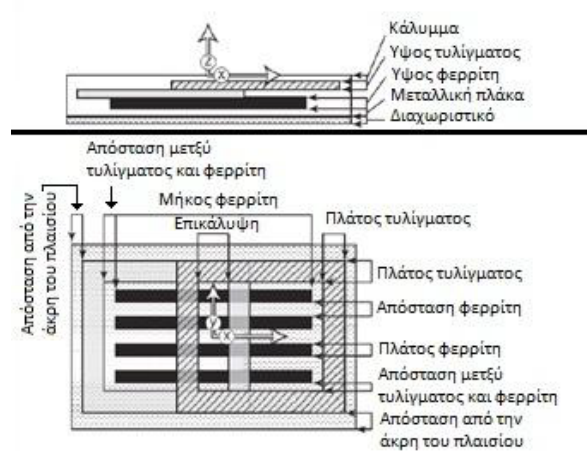


Σχήμα 1.11: Διάταξη DDQ μονής όψης [1].

a) BP διάταξη

Η διπολική ή BP διάταξη (Σχήμα 1.12) . Αντί για τη χρήση ενός επιπλέον πηνίου όπως στην DDQ διάταξη η BP διάταξη χρησιμοποιεί μόνο δύο πηνία, τα οποία όμως επικαλύπτονται,

επιτυχάνοντας έτσι σημαντική οικονομία σε χαλκό αφού έχει 20-30% λιγότερο από την προηγούμενη [16],[17].



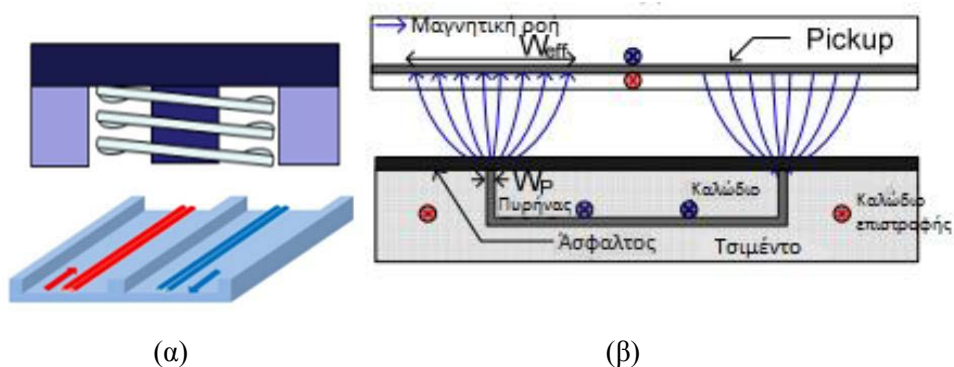
Σχήμα 1.12: BP διάταξη [18].

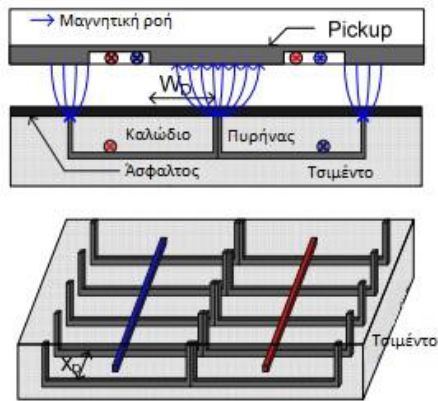
- Δυναμική φόρτιση

Στη δυναμική φόρτιση το δευτερεύον πηνίο είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται και στην περίπτωση της στατικής φόρτισης. Σχετικά με το πρωτεύον πηνίο, δύο είναι οι κύριες κατηγορίες μαγνητικών ζευκτών : η ενιαία και η τμηματική διάταξη.

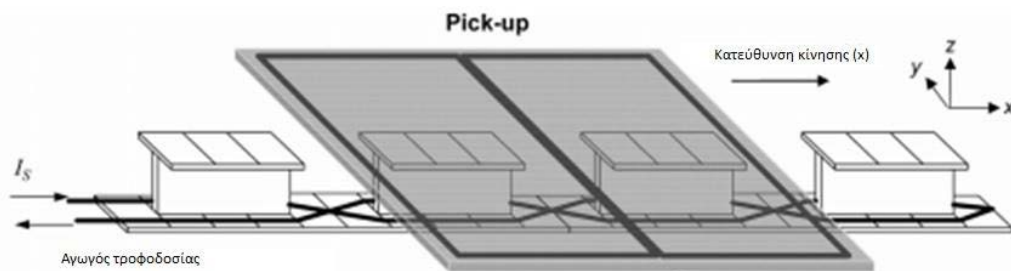
- ο Ενιαία διάταξη

Στην ενιαία διάταξη χρησιμοποιείται ένα μεγάλο καλώδιο ως πρωτεύον πηνίο το οποίο διέρχεται από μία μεγάλη διάταξη φερρίτη. Ανάλογα με το σχήμα φερρίτη που χρησιμοποιείται η διάταξη παίρνει και αντίστοιχη ονομασία. Έτσι έχουμε διατάξεις τύπου E, U, W και I, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14.





(γ)



(δ)

Σχήμα 1.14: Διατάξεις τύπου (α) E, (β) U, (γ) W και (δ) I αντίστοιχα.

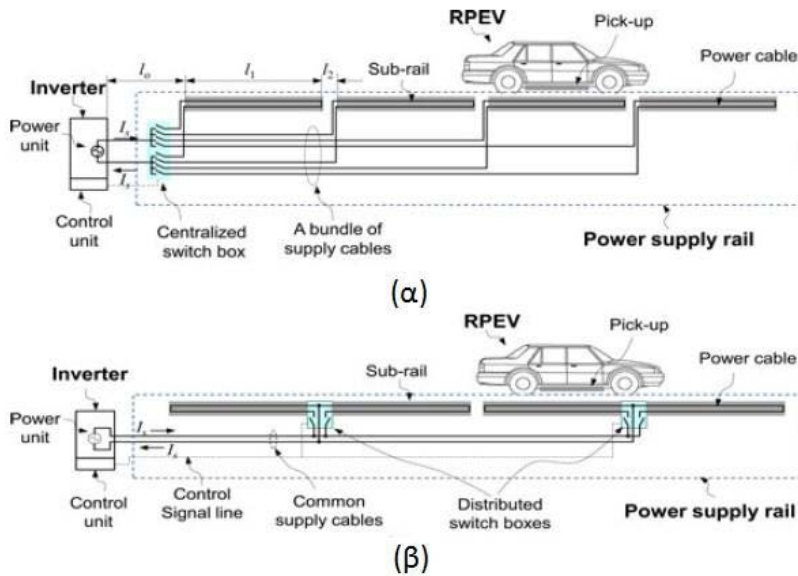
Στις διατάξεις τύπου E, οι οποίες αποτελούν την πρώτη γενιά διατάξεων, οι πυρήνες είναι ανάλογοι σχήματος όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα. Για ονομαστική συχνότητα 20kHz, σε ονομαστικό φορτίο 2 Ohm, διάκενο 1cm και ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος 100A δίνει στο φορτίο 3kW με απόδοση 80%. Τέτοιες διατάξεις παρουσιάζουν ευαισθησία σε πλάγιες μετατοπίσεις [19]. Στις διατάξεις τύπου U, το διάκενο αυξάνεται στα 17cm, με ίδια ονομαστική συχνότητα όπως και στη διάταξη τύπου E ίση με 20kHz, ονομαστικό ρεύμα στο πρωτεύον 200A και έτσι δίνουμε μέσω δέκα pickups 52kW συνολικά στο φορτίο μας δηλαδή περίπου 5,2 kW ανά pickup. Η μέγιστη απόδοση αυτού του συστήματος είναι 72% [19]. Στη διάταξη τύπου W, η ισχύς που δίνει το κάθε pickup είναι ακόμα καλύτερη από πριν – 15kW – και το διάκενο στο οποίο λειτουργεί 20cm. Το σύστημα έχει μία μέγιστη απόδοση ίση με 74% [19]. Το μειονέκτημά της είναι η μικρή ανοχή σε πλάγια μετατόπιση.

Στη διάταξη τύπου I επιτυγχάνεται ένα πολύ μικρό πλάτος ράγας φερριτή (10cm). Επιτυγχάνεται επίσης η λειτουργία σε διάκενο 20cm και η δυνατότητα για πλάγιες αποκλίσεις φτάνει ακόμη και τα 24cm. Η ισχύς που μπορούμε να πάρουμε είναι της τάξης των 35kW και η μέγιστη απόδοση είναι 74%. Αυτή η απόδοση δίνεται στα 27kW [20]. Η ιδιαίτερη κατασκευή της επιτρέπει επίσης τη σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων μαγνητικών πεδίων.

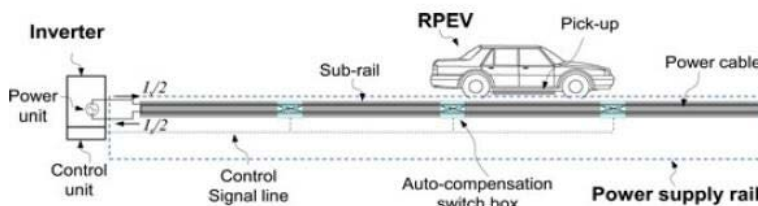
Εκτός από τις διατάξεις με ενιαίο πηνίο έχουμε και διατάξεις με πηνίο το οποίο είναι σε τμήματα. Αυτό γίνεται γιατί στις προηγούμενες περιπτώσεις το δευτερεύον κάλυπτε ένα μόνο τμήμα του πρωτεύοντος πράγμα που έκανε τον συντελεστή ζεύξης πολύ μικρό[18]. Αυτό με την σειρά του μείωνε αρκετά την απόδοση αλλά δημιουργούσε και προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Αυτά τα προβλήματα λύνονται άμα χωρίσουμε το

πρωτεύον σε τμήματα [21],[22], τα οποία θα ενεργοποιούνται μόνο όταν το όχημα βρίσκεται πάνω τους.

Οι κατακερματισμένοι αγωγοί έχουν τρία είδη: τον συγκεντρωμένο διακοπτικό (Σχήμα 1.15α), τον διεσπαρμένο διακοπτικό (Σχήμα 1.15β) και την ράγα μορφής X (Σχήμα 1.16).



Σχήμα 1.15: (α) συγκεντρωμένος διακοπτικός τύπος (β) διεσπαρμένος διακοπτικός τύπος



Σχήμα 1.16: Ράγα τύπου X [21].

- ο Τμηματική διάταξη

Η δεύτερη μεγάλη υποκατηγορία στα συστήματα δυναμικής φόρτισης είναι η τμηματική διάταξη. Εδώ το πρωτεύον αποτελείται από πολλά ξεχωριστά τμήματα (παρόμοια με τα αντίστοιχα στους στατικούς φορτιστές) τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο [1],[23],[24], όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.17.



Σχήμα 1.17: Σταθμός δυναμικής φόρτισης με πολλά πρωτεύοντα.

Αν και στις τμηματικές διατάξεις η απόδοση και η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή φτάνουν τα επίπεδα που παρατηρούνται στη στατική φόρτιση, υπάρχει η απαίτηση το κάθε τμήμα του πρωτεύοντος να ενεργοποιείται μόνο όταν περνά από πάνω του κάποιο όχημα. Η απαίτηση αυτή υλοποιείται εύκολα χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ελέγχου με έναν αποκλειστικό μετατροπέα ισχύος για κάθε τμήμα, ωστόσο, το οικονομικό κόστος για μία τέτοια υλοποίηση είναι τεράστιο. Για τον σκοπό αυτό έχουν ήδη αναπτυχθεί τεχνικές για την οδήγηση περισσότερων του ενός πρωτευόντων rad από τον ίδιο μετατροπέα [23], [24].

1.3 Μέθοδοι ελέγχου

Πολλές επιλογές ελέγχου έχουν προταθεί και περιλαμβάνουν έλεγχο στην πλευρά του πρωτεύοντος, στην πλευρά του δευτερεύοντος και έλεγχο που εφαρμόζεται και στις δύο πλευρές του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.

ο Έλεγχος του δευτερεύοντος

Ο έλεγχος του δευτερεύοντος προτιμάται όταν έχουμε ενιαία διάταξη για την μεταφορά ισχύος για πολλά pick-ups. Η συχνότητα και το ρεύμα στο φορτιστή μένουν συνήθως σταθερά και το καθένα δευτερεύον καθορίζει ανάλογα με το φορτίο του την ισχύ του [1]. Στο [25] παρουσιάζεται ένα σύστημα το οποίο βασιζόμενο στον έλεγχο της συχνότητας ρυθμίζει την ροή ισχύος με σταθερό ρεύμα στην έξοδο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιεί διάταξη πηνίου-πυκνωτή-πηνίου. Μια άλλη μέθοδος που συνδυάζει μια παράλληλη αντισταθμισμένη δεξαμενή συντονισμού με έναν ειδικού τύπου μετατροπέα (tristate boost converter) παρουσιάζεται στο [26].

ο Έλεγχος του πρωτεύοντος

Αυτός ο έλεγχος δεν προτιμάται σε συστήματα όπου έχουμε πολλά pick-ups αλλά σε αυτά όπου το κάθε ένα φορτίο αντιστοιχίζεται σε μόνο μια πηγή [1]. Αυτό γίνεται γιατί στην περίπτωση με τη λειτουργία πολλών pick-up μια αλλαγή στο πρωτεύον θα επηρέαζε όλα τα συνδεδεμένα δευτερεύοντα μαζί κάτι που δεν θέλουμε. Μία συνηθισμένη μέθοδος ελέγχου του πρωτεύοντος είναι η προσπάθεια επίτευξης ενός σταθερού ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο [20]. Άλλες τεχνικές ελέγχου περιλαμβάνουν τον έλεγχο της τάσης στον πυκνωτή αντιστάθμισης του πρωτεύοντος [27] για να ελέγξουμε την ισχύ που θα δώσουμε στο pick-up.

Σε κάποιες περιπτώσεις όπου μας εξυπηρετεί η αλλαγή της συχνότητας ανάλογα με μεταβολές στην ευθυγράμμιση ή στο διάκενο είναι επιθυμητός ο έλεγχος συχνότητας από την πλευρά του πρωτεύοντος. Για μέγιστη απόδοση πρέπει η συχνότητα να είναι τέτοια ώστε η διαφορά φάσης ανάμεσα σε τάση και ρεύμα πρωτεύοντος να είναι μηδενική. Με αυτό τον τρόπο ελέγχου έχουμε βέλτιστη απόδοση ακόμα και με μεγάλες οριζόντιες και κατακόρυφες αποκλίσεις [28].

ο Έλεγχος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

Έλεγχος τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και στην πλευρά του δευτερεύοντος προτιμάται στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή επιθυμείται ένα ρεύμα στην πλευρά του πρωτεύοντος ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος του οχήματος. Ο ελεγκτής στην πλευρά του δευτερεύοντος δύναται να μετέχει περαιτέρω στη ρύθμιση της μεταφερόμενης ισχύος.

1.4 Μέθοδοι αντιστάθμισης

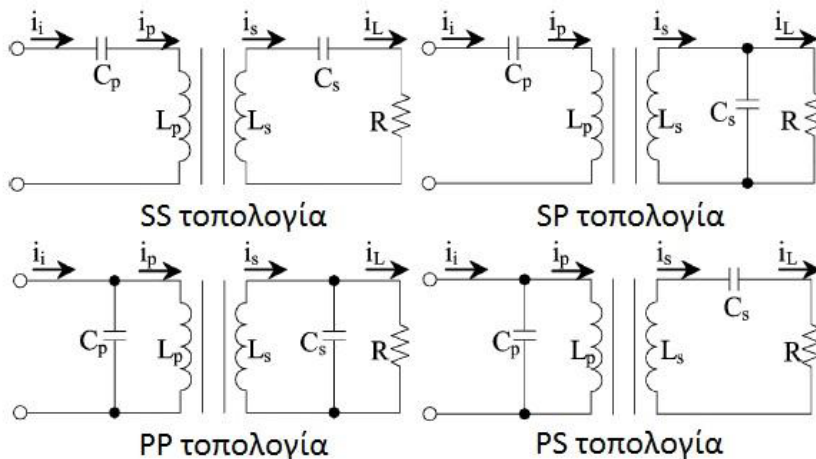
Για να μειώσουμε τις απώλειες άεργου ισχύος στην πλευρά σύνδεσης στο δίκτυο αλλά και στο δευτερεύον πηνίο και να εξασφαλίσουμε υψηλή ισχύ στην έξοδο, ένα δίκτυο αντιστάθμισης ενσωματώνεται στη διάταξη. Ένας σημαντικός παράγοντας στην αντιστάθμιση είναι ο συντελεστής ζεύξης k , που υπολογίζεται ως:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_P * L_S}}$$

με M την αλληλεπαγωγή, L_P την αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος και L_S την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος [8].

Σε πρωτοεμφανιζόμενα συστήματα η αντιστάθμιση γινόταν είτε στην πλευρά πρωτεύοντος είτε στο δευτερεύοντος. Βέβαια με την μείωση του k κάτω από 0,3 τότε προτείνεται να γίνει αντιστάθμιση και στις δύο πλευρές του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος [8].

Ο πιο απλός τρόπος αντιστάθμισης γίνεται με την προσθήκη πυκνωτή στην καθεμιά πλευρά και ανάλογα με τον τρόπο που συνδέονται οι πυκνωτές έχουμε τέσσερις τοπολογίες: series-series (SS), series-parallel (SP), parallel-parallel (PP) και parallel-series (PS). Οι τέσσερις αυτές τοπολογίες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.18: Τοπολογίες σύνδεσης πυκνωτών αντιστάθμισης [8].

Η τιμή του πυκνωτή στην πλευρά του δευτερεύοντος C_S επιλέγεται έτσι ώστε να βρίσκεται σε συντονισμό με την αυτεπαγωγή στο δευτερεύον L_S και να έχουμε τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ.

Οπότε η τιμή του υπολογίζεται από την σχέση:

$$C_S = \frac{1}{L_S \omega_0^2}$$

με ω_0 την συχνότητα συντονισμού, όπου ισχύει $\omega_0 = 2 * \pi * f$ και f η συχνότητα του ρεύματος του πρωτεύοντος πηνίου.

Για να μειώσουμε την άεργο ισχύ του μετατροπέα ισχύος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλο πυκνωτή στο πρωτεύον ο οποίος να κάνει ρεύμα και τάση εισόδου συμφασικά, σε

μία συγκεκριμένη σύζευξη και κατάσταση φορτίου. Αυτή η μέθοδος λέγεται μέθοδος μηδενικής φάσης γωνίας (**Zero Phase Angle - ZPA**) [9].

Η χωρητικότητα του πυκνωτή πρωτεύοντος που κάνει ρεύμα και τάση συμφασικά δίνεται από το παρακάτω πίνακα ανάλογα με την επιλογή συνδεσμολογίας αντιστάθμισης.

Primary compensation capacitance	
Topology	Primary Capacitance C_1
SS	$\frac{C_2 L_2}{L_1}$
SP	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1}{1-k^2}$
PS	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1}{Q_s^2 k^4 + 1}$
PP	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1-k^2}{Q_s^2 k^4 + (1-k^2)^2}$

Σχήμα 1.19: Πίνακας για την τιμή του πυκνωτή πρωτεύοντος σε κάθε τοπολογία [9].

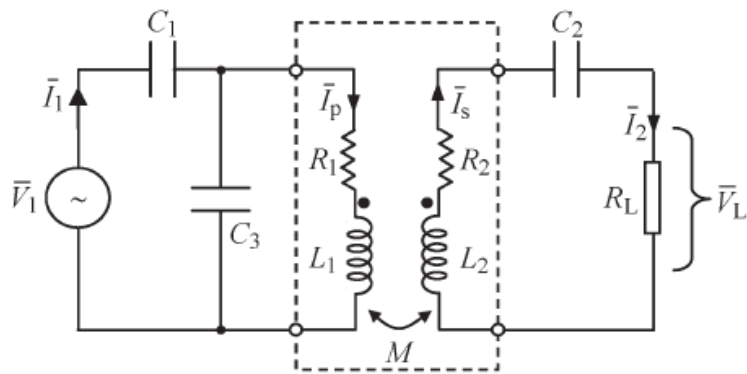
Βλέπουμε ότι για την SS τοπολογία η χωρητικότητα είναι μια τιμή που δεν εξαρτάται από συντελεστή ζεύξης ή τις συνθήκες φορτίου. Για την SP τοπολογία, η χωρητικότητα εξαρτάται από τον συντελεστή ζεύξης k , ενώ για τις τοπολογίες PP και PS έχουμε εξάρτηση και από την σύζευξη και από τις συνθήκες στο φορτίο [9]. Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις εμπλέκεται ένας συντελεστής, ο συντελεστής ποιότητας φορτίου ο οποίος είναι:

$$Q_s = \frac{\omega_0 L_2}{R_L} \text{ για την PS σύνδεση και}$$

$$Q_s = \frac{R_L}{\omega_0 L_2} \text{ για την PP σύνδεση}$$

όπου ω_0 είναι η συχνότητα συντονισμού.

Μια τοπολογία νέα η οποία είναι ένας συνδυασμός των SS και PS και παρουσιάζει ανοχές σε αποκλίσεις στον οριζόντιο άξονα ονομάζεται SPS και παρουσιάζεται παρακάτω [29]. (Σχήμα 1.25). Με την κατάλληλη επιλογή για τις τιμές των πυκνωτών [29] έχουμε σταθερή ισχύ στην έξοδο χωρίς να μεταβάλλουμε την τροφοδοσία καθώς επίσης και υψηλή ανεκτικότητα στις οριζόντιες μετατοπίσεις.



Σχήμα 1.20: SPS τοπολογία

1.5 Βιομηχανικές διατάξεις

Η επαγωγική φόρτιση μπορεί να αλλάξει δραματικά την χρηστικότητα και ελκυστικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων στους καταναλωτές βελτιώνοντας την άνεση που αυτά προσφέρουν. Αν και η τεχνολογία ασύρματης φόρτισης είναι αρκετά πρόωρη υπάρχουν ήδη κάποιες εμπορικά διαθέσιμες λύσεις οι οποίες επιτρέπουν την αργή φόρτιση και είναι συμβατές με συγκεκριμένα μοντέλα αυτοκινήτων.

Plugless Power

Το ασύρματο σύστημα Plugless επιτρέπει τη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος στο σπίτι. Κατασκευάζεται από την Evatran και είναι συμβατό με αρκετά μοντέλα αυτοκινήτων όπως το Tesla Model S, το BMWi3, το Nissan Leaf, το Gen 1 Chevy Volt και το Gen 2 Chevy Volt.

Το σύστημα αυτό περιέχει τρία μέρη: τον προσαρμογέα του αυτοκινήτου, την διάταξη στη θέση που παρκάρουμε και τον πίνακα ελέγχου [30].



Σχήμα 1.21: Τα τρία μέρη του συστήματος ασύρματης φόρτισης για το Nissan Leaf: στο έδαφος η διάταξη παρκαρίσματος, κάτω από το αμάξι ο προσαρμογέας αυτοκινήτου και πάνω δεξιά ο πίνακας ελέγχου [30].

Ο προσαρμογέας του αυτοκινήτου εγκαθίσταται κάτω από το όχημα και έχει διαστάσεις 127mm ύψος, 762mm πλάτος, 464mm μήκος για τα Nissan Leaf και Gen1 Chevy Volt ενώ για τα Tesla Model S και BMW i3 οι διαστάσεις είναι 25mm, 838mm και 406mm αντίστοιχα. Βλέπουμε ότι σημαντική διαφορά παρουσιάζεται στο ύψος του προσαρμογέα που στην δεύτερη περίπτωση είναι εξαιρετικά λεπτός. Τέλος σε όλα τα οχήματα ζυγίζει 12 κιλά. Η διάταξη που μεταδίδει την ισχύ επαγωγικά στο όχημα τοποθετείται στο πάτωμα του γκαράζ ή του χώρου που παρκάρουμε γενικότερα και έχει διαστάσεις 63,5mm ύψος, 559mm πλάτος και 470mm μήκος για τα Nissan Leaf και Gen 1 Chevy Volt ενώ για τα Tesla Model S και BMW i3 αλλάζει το ύψος σε 68,5mm. Τέλος ο πίνακας ελέγχου παρέχει ισχύ στην διάταξη που βρίσκεται στην θέση παρκαρίσματος, βοηθάει στην σωστή ευθυγράμμιση και δίνει την κατάσταση φόρτισης [30].

Τα πλεονεκτήματα της ασύρματης φόρτισης που προσφέρει είναι πολλά: δεν απαιτεί σύνδεση στην πρίζα οπότε η φόρτιση θεωρείται δεδομένη, αυτόματη και αποδοτική κάθε φορά που το όχημα παρκάρει στο σταθμό φόρτισης παρέχοντας και καθοδήγηση στον οδηγό για λάθος ευθυγράμμιση. Η τάση στην είσοδο κυμαίνεται από 208V έως 240V και είναι εναλλασσόμενη. Το ονομαστικό διάκενο, δηλαδή η απόσταση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, είναι 10cm. Η προεξοχή του προσαρμογέα από το όχημα είναι 1 εκατοστό, ενώ το ύψος της διάταξης του πρωτεύοντος είναι 6,85 εκατοστά. Επομένως η απόσταση του οχήματος από το έδαφος είναι ίση με 17,8cm.



Σχήμα 1.22: Ασύρματος φορτιστής της Evatran [33].



Σχήμα 1.23: Ασύρματη συσκευή που τοποθετείται στο έδαφος της Evatran [33].

Το σύστημα φόρτισης για το BMW i3 και το Tesla Model S αποδίδει ισχύ 7.2 kW με το συγκεκριμένο σύστημα δίνοντας 20-25 (32-40km) μίλια εμβέλειας με μια πλήρη φόρτιση. Το σύστημα φόρτισης για το Nissan Leaf και το Gen 1 Chevrolet Volt αποδίδει ισχύ 3.3kW και τα οχήματα φορτίζουν μέσα σε 6 και 3-4 ώρες αντίστοιχα από την κατάσταση πλήρους αποφόρτισης. Το Gen 2 Chevy Volt τέλος αποδίδει 3.6kW και η κατασκευή του βρίσκεται σε εξέλιξη.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

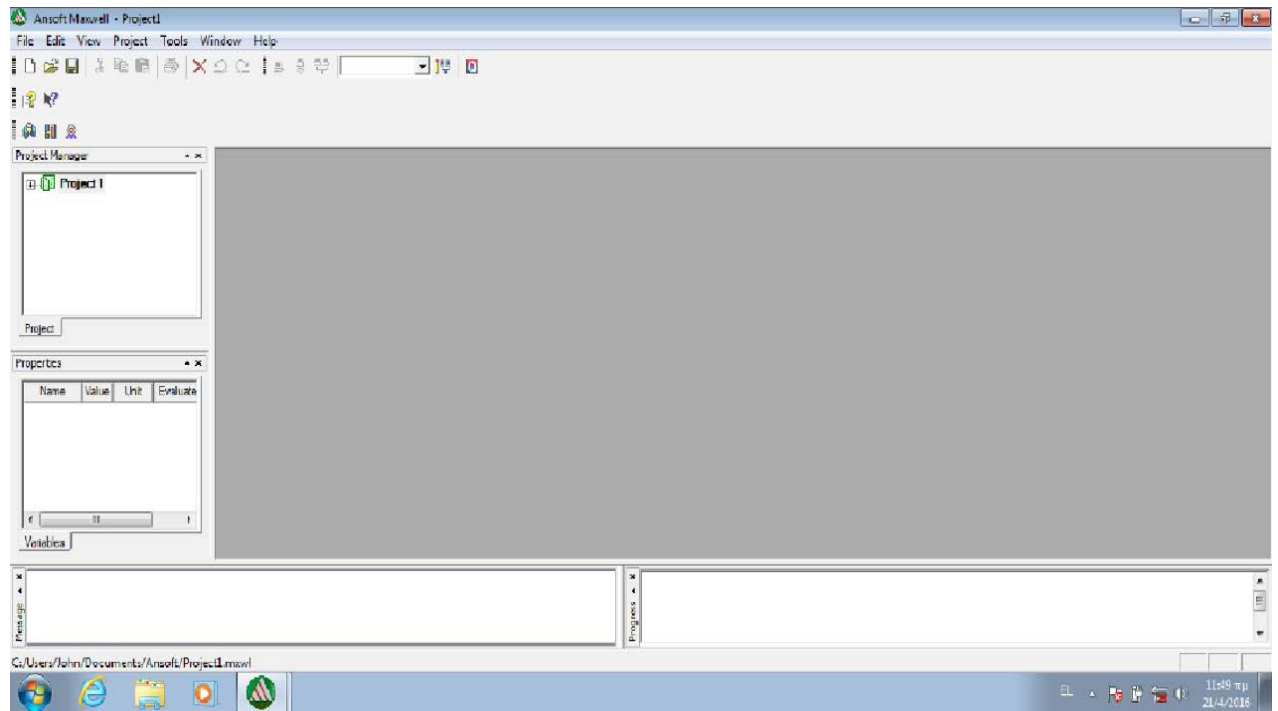
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MAXWELL

2.1 Εισαγωγή

Για να πραγματοποιήσουμε την μαγνητοστατική ανάλυσή μας χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Ansoft Maxwell, το οποίο δίνει την δυνατότητα σχεδίασης δισδιάστατων και τρισδιάστατων διατάξεων και της ανάλυσής τους. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές είναι οι εξισώσεις του Maxwell (νόμος του Gauss, νόμος της επαγωγής του Faraday, νόμος του Ampere, νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό). Ο τρόπος που γίνεται η επίλυση είναι με τον διαχωρισμό του αρχικού προβλήματος σε μικρότερα τμήματα. Όσο μικρότερα είναι τα τμήματα που χωρίζεται το αρχικό πρόβλημα, τόσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια της λύσης που δίνεται.

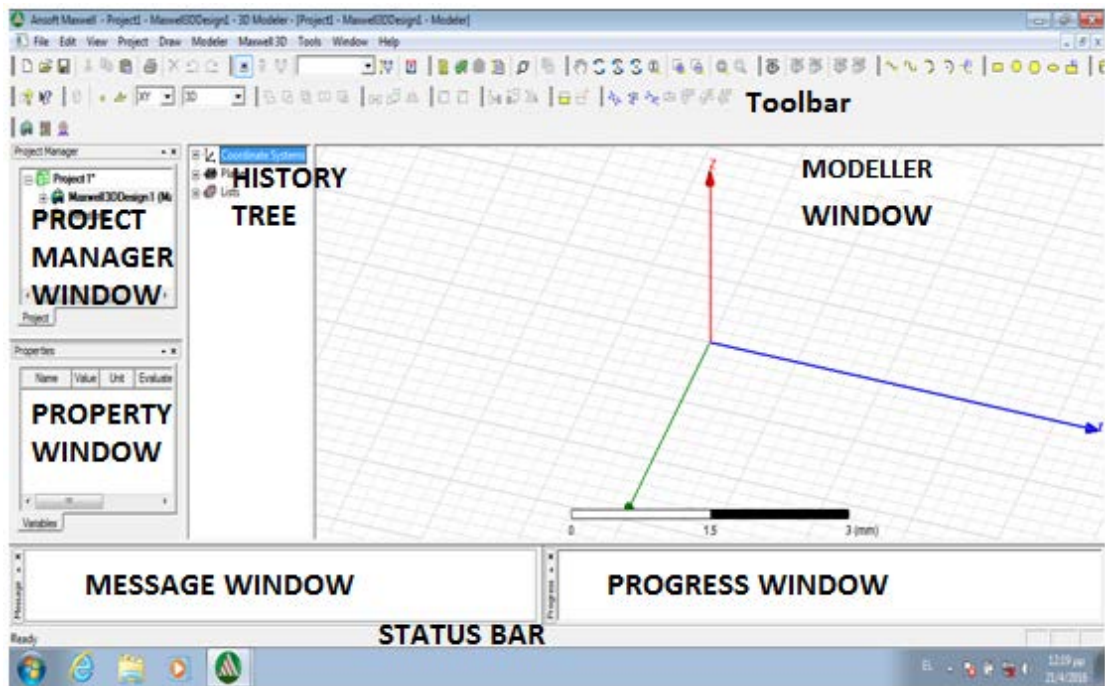
2.2 Σχεδίαση νέου προβλήματος

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το περιβάλλον που εμφανίζεται όταν ανοίξουμε το Maxwell. (Σχήμα 2.1)



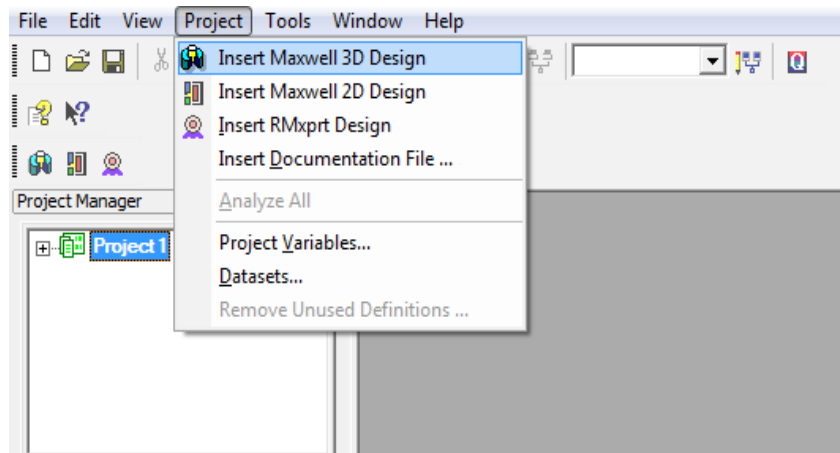
Σχήμα 2.1: Περιβάλλον του Ansoft Maxwell.

Στο Σχήμα 2.2 βλέπουμε την επιφάνεια εργασίας του σχεδιαστικού προγράμματος. Στη γραμμή του μενού βρίσκονται όλες οι εντολές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Η γραμμή εργαλείων, **TOOLBAR**, περιλαμβάνει τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σύμβολα στη σχεδίαση και βρίσκεται κάτω από την γραμμή του μενού. Το κυρίως περιβάλλον αποτελείται από πέντε παράθυρα. Το κεντρικό παράθυρο είναι το **MODELLER WINDOW** όπου φαίνεται καθετί που σχεδιάζουμε γραφικά. Το παράθυρο ακριβώς δίπλα του είναι το **HISTORY TREE** όπου φαίνονται πάλι τα σχεδιαστικά κομμάτια της διάταξης επιγραμματικά. Πάνω αριστερά είναι το **PROJECT MANAGER WINDOW** το οποίο και εμπεριέχει όλα τα στάδια της διαδικασίας μοντελοποίησης. Ακριβώς κάτω του είναι το **PROPERTY WINDOW** που έχει ιδιότητες των μερών των διατάξεων που δημιουργούμε και τις εμφανίζει όταν αυτά τα μέρη επιλέγονται. Τέλος στο κάτω μέρος του παραθύρου είναι τα **MESSAGE WINDOW**, **PROGRESS WINDOW** και **STATUS BAR**. Το **PROGRESS WINDOW** εμφανίζει την φάση στην οποία βρίσκεται η διαδικασία της προσομοίωσης και το **MESSAGE WINDOW** μηνύματα προς τον χρήστη που αφορούν τυχόν παρατηρήσεις για λάθη στη σχεδίαση ή σφάλματα που εντοπίζονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η **STATUS BAR**, η οποία είναι η μπάρα στο κάτω μέρος, έχει ρόλο καθοδηγητικό προς τον χρήστη.



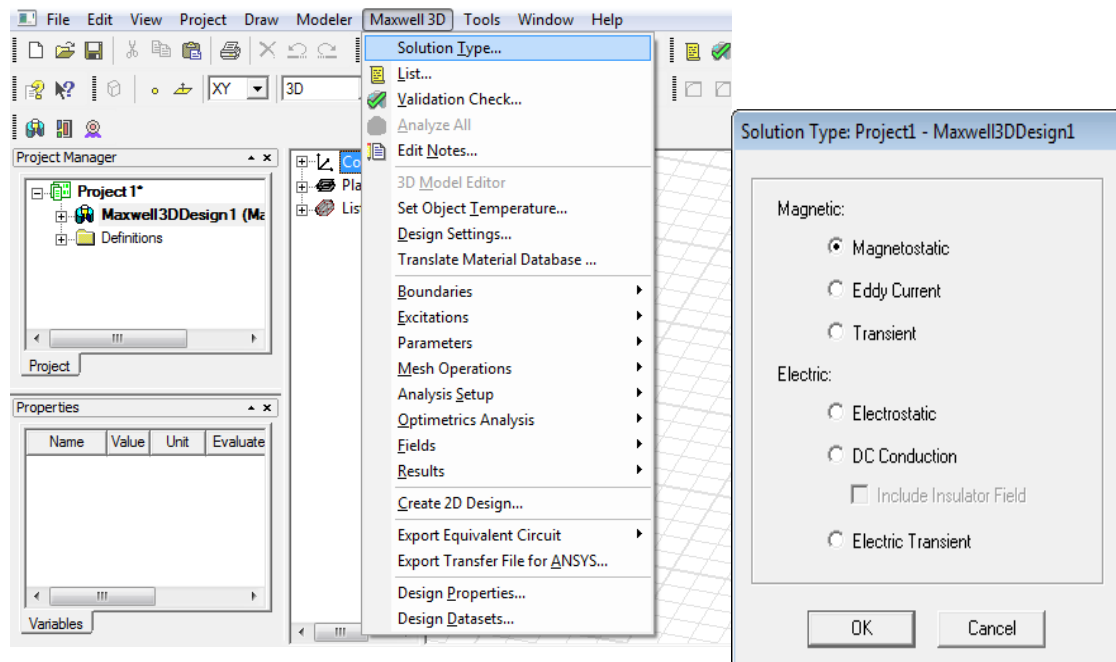
Σχήμα: 2.2: Επιφάνεια εργασίας του Maxwell.

Για να ξεκινήσουμε τη διαδικασία σχεδίασης μιας νέας διάταξης κάνουμε τα εξής: εκκινούμε το πρόγραμμα Ansoft Maxwell από την επιφάνεια εργασίας με διπλό κλικ που μας βγάζει στο πρώτο παράθυρο και στη συνέχεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, επιλέγουμε **Project**→**Insert Maxwell 3D Design** που οδηγεί στο παράθυρο του Σχήματος 2.2.



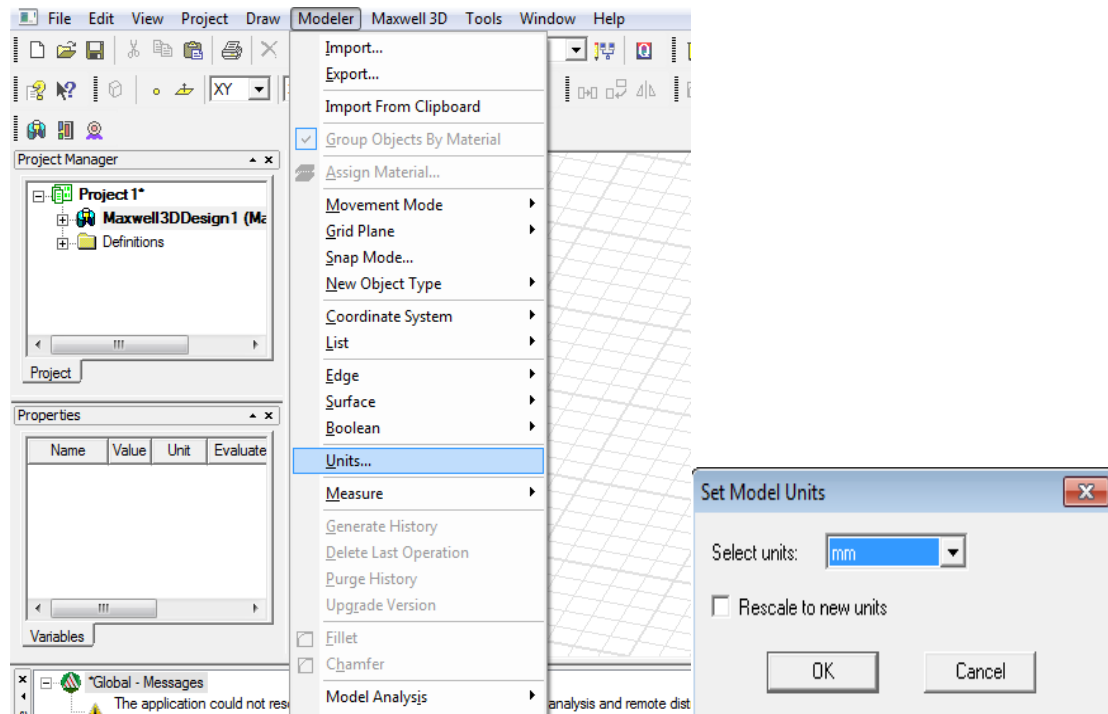
Σχήμα 2.3: Εισαγωγή νέου προβλήματος τρισδιάστατης γεωμετρίας.

Οι τύποι των λύσεων που χρησιμοποιούμε μπορεί να είναι διάφορες αλλά στην εν λόγω διπλωματική ασχολούμαστε με μαγνητοστατική λύση. Τα βήματα για την επιλογή της συγκεκριμένης λύσης είναι: **Maxwell 3D**→**Solution Type** και στο νέο παράθυρο διαλέγουμε **Magnetostatic**, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.4: Επιλογή του είδους της λύσης.

Δεν θα πρέπει ακόμα να παραλείψουμε την μονάδα μέτρησης που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό γίνεται ως εξής: **Modeler** → **Units** και στο επόμενο βήμα διαλέγουμε την σωστή μονάδα (Σχήμα 2.5).



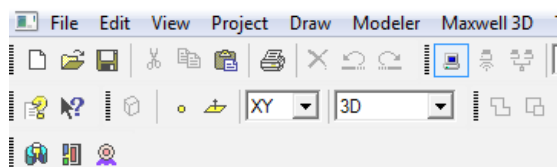
Σχήμα 2.5: Επιλογή της κατάλληλης μονάδας μέτρησης.

Μια μαγνητοστατική ανάλυση αποτελείται από τα εξής στάδια:

- Σχεδίαση της διάταξης
- Ορισμός υλικών
- Ορισμός οριακών συνθηκών
- Ορισμός παραμέτρων της ανάλυσης
- Επεξεργασία και απεικόνιση αποτελεσμάτων

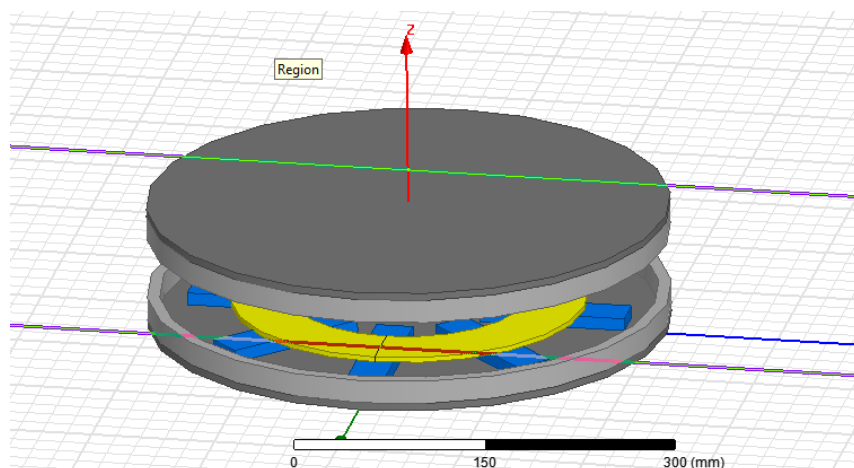
2.3 Σχεδίαση διάταξης

Αρχικά θα πρέπει να γίνει η σχεδίαση της διάταξης. Η επιλογή που πρέπει να γίνει αρχικά είναι στο κουτάκι του Drawing Plane το επίπεδο XY και ακριβώς δίπλα στο Movement Mode να υπάρχει επιλεγμένο το 3D όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6.

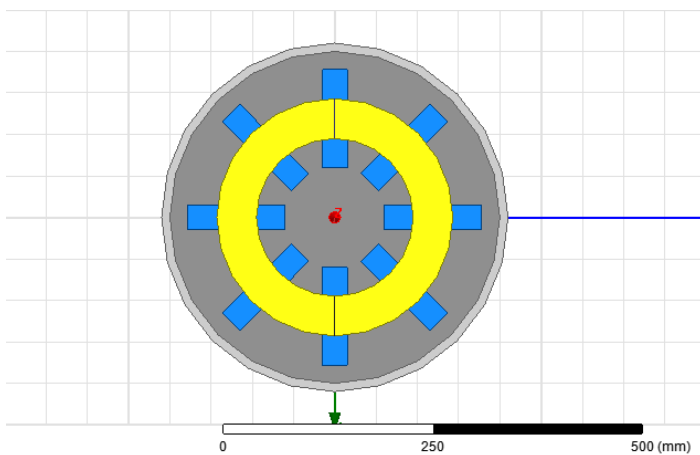


Σχήμα 2.6: Επιλογές για επίπεδο σχεδίασης και διαστάσεις διάταξης.

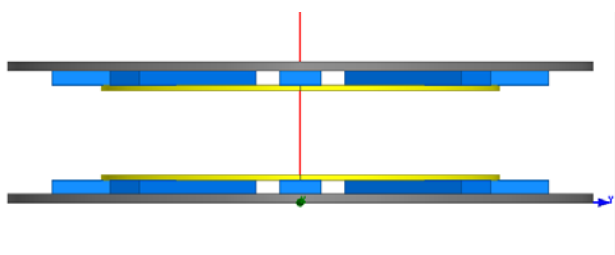
Η διάταξη που θα κατασκευάσουμε και θα μελετήσουμε είναι κυκλική διαμέτρου 420mm, με ράβδους φερρίτη όπως παρουσιάζεται στην αναφορά [3] και απεικονίζεται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 2.7: Η προς μελέτη διάταξη ολοκληρωμένη σχεδιαστικά.



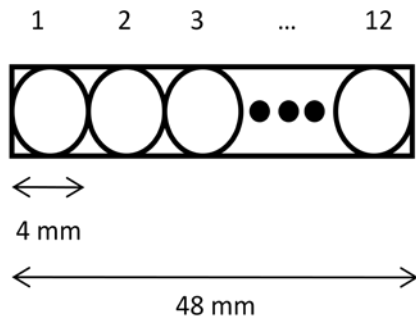
Σχήμα 2.8: Κάτοψη του πρωτεύοντος της διάταξής μας. (επίπεδο XY)



Σχήμα 2.9: Η διάταξη όπως φαίνεται ως προς το επίπεδο YZ.

Πρωτεύον και δευτερεύον είναι πανομοιότυπα και το καθένα έχει τέσσερα μέρη: την αλουμινένια βάση (aluminium backing plate) και το αλουμινένιο δαχτυλίδι (aluminium ring) τα οποία σχεδιάστηκαν με γκρι χρώμα, τους φερρίτες που είναι οι μπλε ράβδοι (ferrites) και το πηνίο το οποίο είναι ο κίτρινος κυκλικός δακτύλιος (πηνίο).

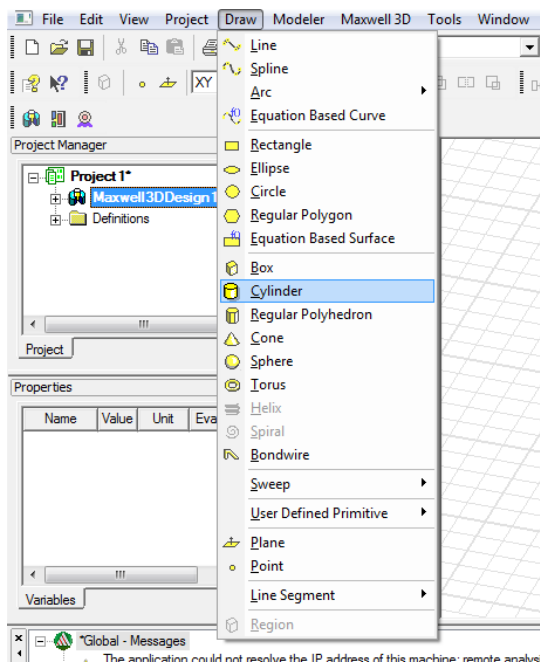
Το ρεύμα λειτουργίας στο πρωτεύον επιλέγεται ίσο με 23A rms και η συχνότητα λειτουργίας 50kHz [3]. Τα ελιγμάτα είναι 12 και το καθένα έχει διάμετρο 4mm [3], οπότε το συνολικό μήκος του πηνίου θα είναι $12 \cdot 4 = 48\text{mm}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 Κατασκευή των ελιγμάτων του τυλίγματος

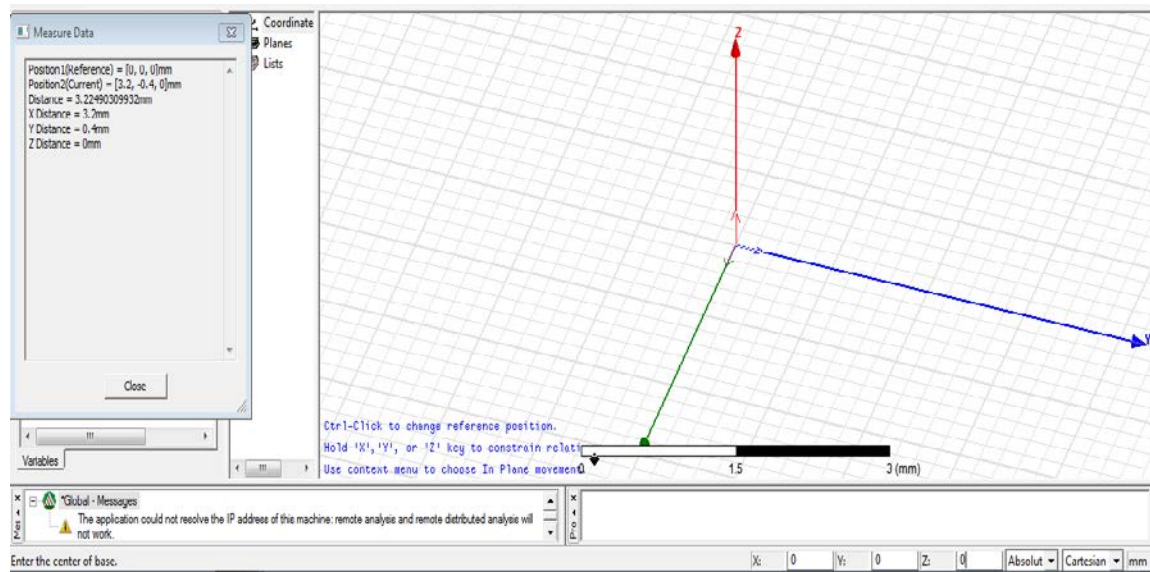
2.3.1 Αλουμινένιος Δίσκος Πρωτεύοντος

Θα ξεκινήσουμε την σχεδιάσή μας από το πρωτεύον και μετά θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του κατοπτρισμού για να φτιάξουμε το δευτερεύον που είναι πανομοιότυπο. Αυτό θα το δείξουμε με βήματα και παρουσιάζοντας εικόνα για το κάθε ένα. Αρχικά κατασκευάζουμε τον αλουμινένιο δίσκο στην βάση του πρωτεύοντος. Η διαδικασία είναι: **Draw** → **Cylinder** όπως δείχνει και η εικόνα που ακολουθεί.



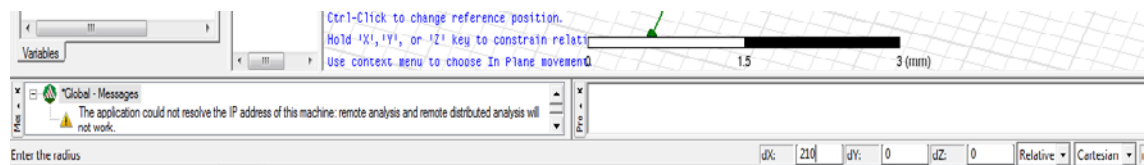
Σχήμα 2.11: Εισαγωγή κυκλικού δίσκου.

Στην συνέχεια ζητείται το κέντρο της βάσης το οποίο είναι η αρχή των αξόνων (0,0,0) οπότε βάζουμε X=0, Y=0 και Z=0 και πατάμε enter (Σχήμα 2.12).



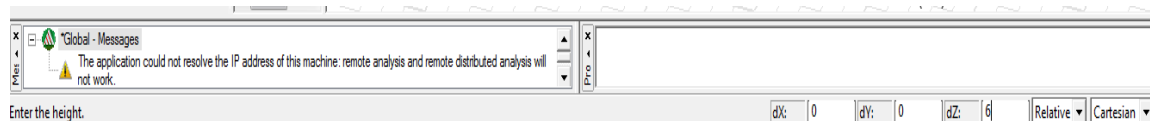
Σχήμα 2.12: Εισαγωγή κυκλικού δίσκου.

Έπειτα ζητείται η ακτίνα του δίσκου οπότε και βάζουμε X=210mm, Y=0, Z=0 (Σχήμα 2.13).

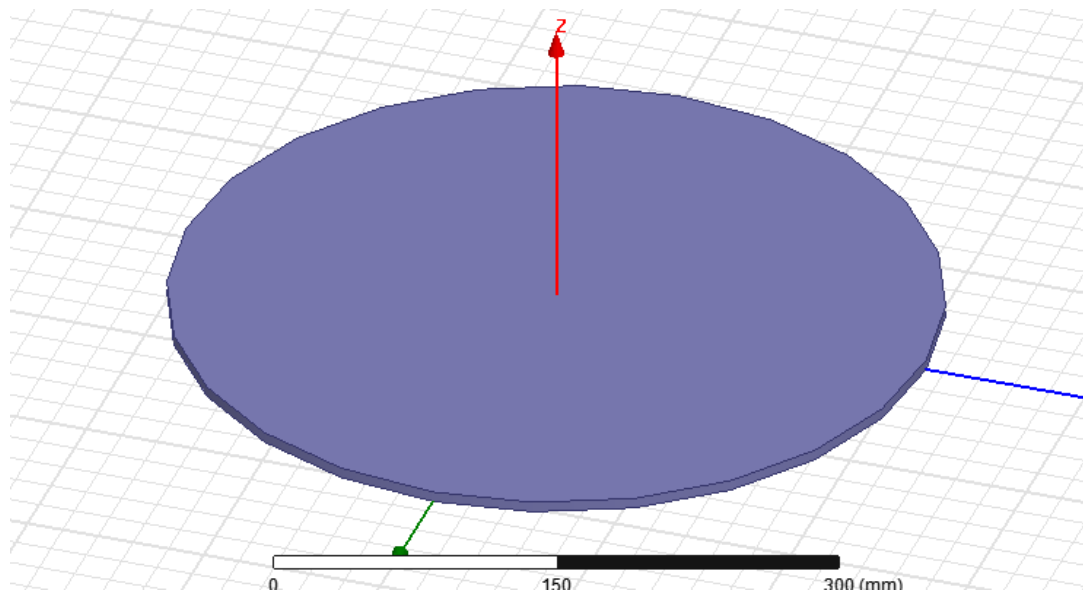


Σχήμα 2.13: Εισαγωγή κυκλικού δίσκου.

Τέλος εισάγουμε το ύψος του δίσκου, δηλαδή ουσιαστικά το πάχος άρα X=0, Y=0 και Z=6mm (Σχήμα 2.14).



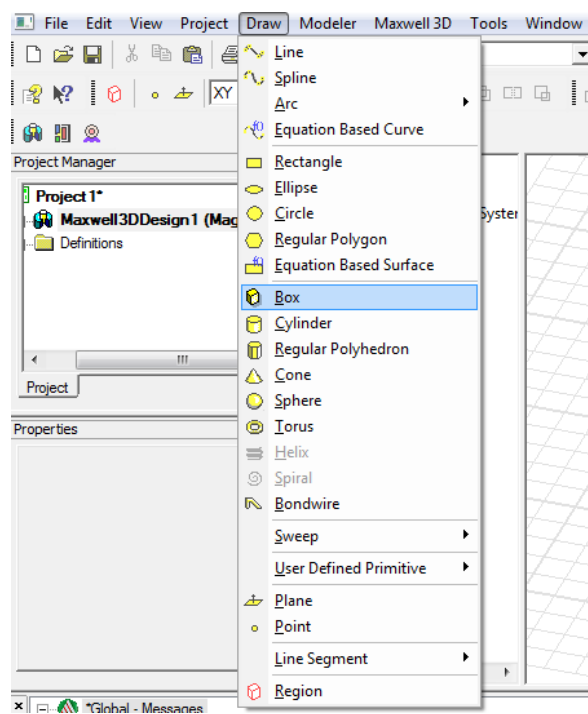
Σχήμα 2.14: Εισαγωγή κυκλικού δίσκου .



Σχήμα 2.15: Αλουμινένιος κυκλικός δίσκος.

2.3.2 Ράβδοι Φερριτή Πρωτεύοντος

Μετά τον κυκλικό δίσκο θέλουμε να σχεδιάσουμε τις ράβδους φερριτή. Πάλι θα το δείξουμε σε βήματα. Ξεκινούμε με τη σχεδίαση της πρώτης ράβδου επιλέγοντας: **Draw** → **Box**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16.

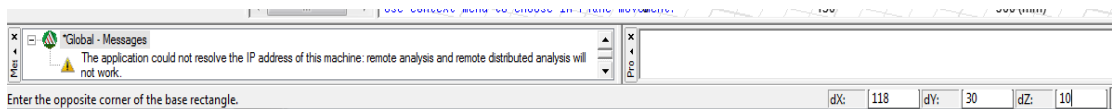


Σχήμα 2.16: Εισαγωγή ράβδου φερριτή .

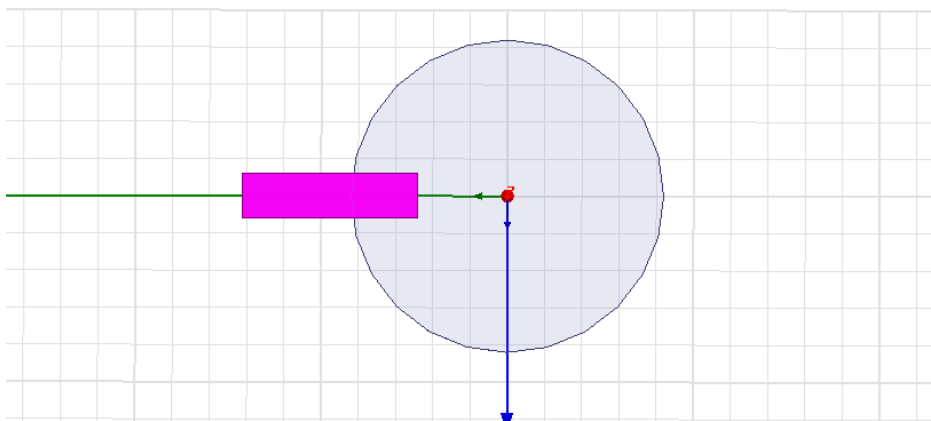
Στο κάτω μέρος της οθόνης ζητούνται οι συντεταγμένες μιας κορυφής της ράβδου και στην συνέχεια οι συντεταγμένες της κορυφής που βρίσκεται διαγώνια ως προς αυτήν. Οπότε αρχικά έχουμε: $X=60$, $Y=-15$ και $Z=6$ (Σχήμα 2.17) και στην συνέχεια $dX=118\text{mm}$ (μήκος ράβδου), $dY=30\text{mm}$ (πλάτος ράβδου) και $dZ=10\text{mm}$ (πάχος ράβδου), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Η ράβδος που τελικά δημιουργήσαμε απεικονίζεται στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.17: Εισαγωγή ράβδου φερρίτη .

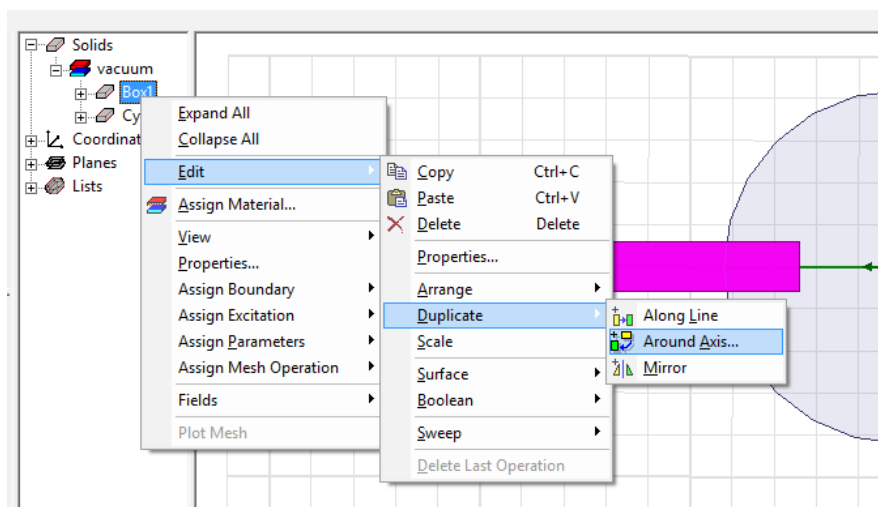


Σχήμα 2.18: Εισαγωγή ράβδου φερρίτη.



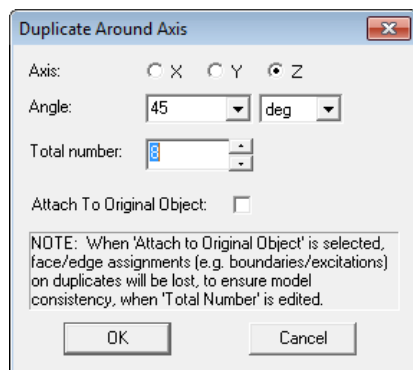
Σχήμα 2.19: Ράβδος φερρίτη.

Τώρα θα δημιουργήσουμε άλλες 7 ράβδους αντιγράφοντας τη ράβδο που δημιουργήσαμε γύρω από τον άξονα z (πάλι δείχνεται η διαδικασία σε βήματα): **Edit**→ **Duplicate**→ **Around Axis** κάτι που φαίνεται και στο Σχήμα 2.20.

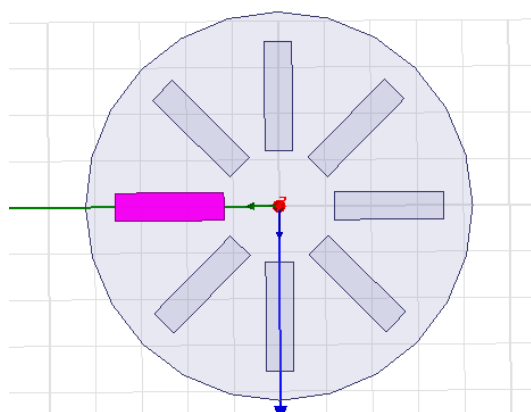


Σχήμα 2.20: Αντιγραφή ράβδου .

Έπειτα στο παράθυρο που αναδύεται επιλέγουμε εκτός από τον άξονα γύρω απ' τον οποίο θα γίνει η αντιγραφή (άξονας Z), την γωνία που θα απέχει η μία ράβδος από την άλλη (που είναι ίση με 45°), καθώς και τον συνολικό αριθμό των ράβδων που είναι οκτώ (Σχήμα 2.21). Οι ράβδοι που προκύπτουν απεικονίζονται στο Σχήμα 2.22.



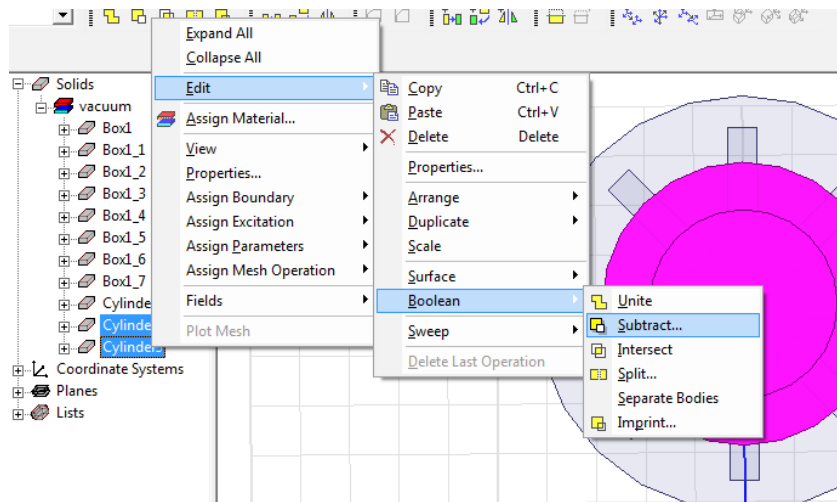
Σχήμα 2.21: Αντιγραφή ράβδου .



Σχήμα 2.22: Κάτοψη των ράβδων φερρίτη.

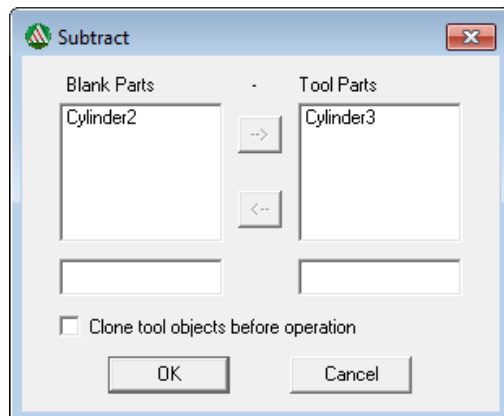
2.3.3 Τύλιγμα Πρωτεύοντος

Τώρα πάνω από τις ράβδους θέλουμε να σχεδιάσουμε το τύλιγμα του πρωτεύοντος. Αυτό είναι ένας κυκλικός δακτύλιος. Για να τον σχεδιάσουμε ακολουθούμε την διαδικασία για την δημιουργία κυκλικού δίσκου που περιγράφηκε και προηγουμένως. Θα σχεδιάσουμε δύο δίσκους, έναν με ακτίνα 143mm (Cylinder 2) και έναν με ακτίνα 95mm (Cylinder 3) με κοινό πάχος και για τους δύο 4mm και κοινό κέντρο το (0,0,16). Ύστερα θα αφαιρέσουμε από τον μεγαλύτερο τον μικρότερο με την εξής διαδικασία που φαίνεται στα σχήματα παρακάτω σε δύο βήματα: **Edit** → **Boolean** → **Subtract**, όπως στο Σχήμα 2.23.

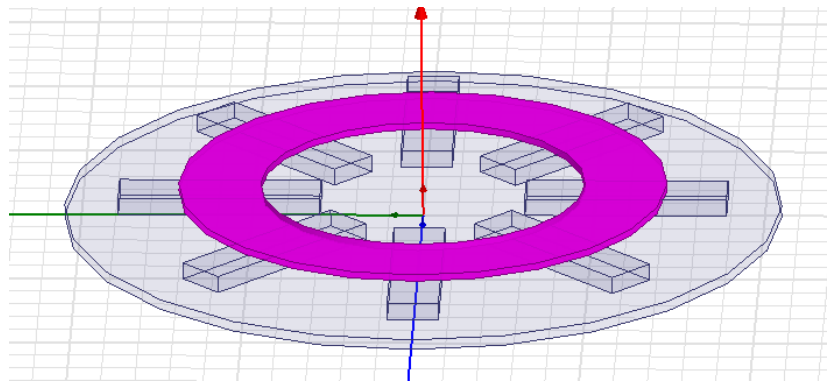


Σχήμα 2.23: Δημιουργία κυκλικού δακτυλίου .

Στο παράθυρο που εμφανίζεται στην συνέχεια (Σχήμα 2.24), στο κουτάκι Blank parts βάζουμε τον κυλινδρικό δίσκο που είναι μεγαλύτερος (Cylinder 2) και από τον οποίο θα αφαιρέσουμε τον άλλο (Cylinder 3) που το βάζουμε στο κουτάκι Tool parts. Το τύλιγμα που κατασκευάσαμε απεικονίζεται στο Σχήμα 2.25.



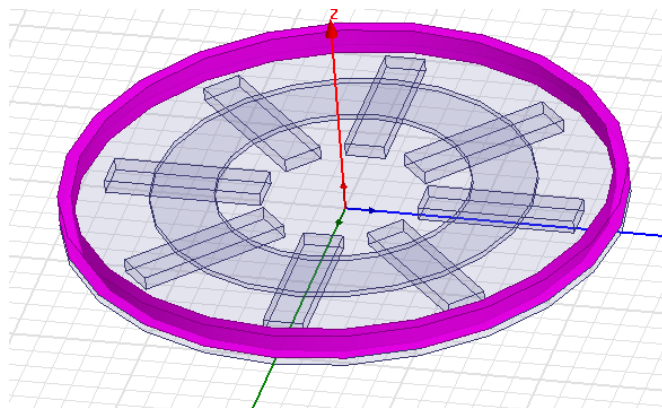
Σχήμα 2.24: Δημιουργία κυκλικού δακτυλίου .



Σχήμα 2.25: Κυκλικός Δακτύλιος Πρωτεύοντος

2.3.4 Αλουμινένιος κυκλικός δακτύλιος

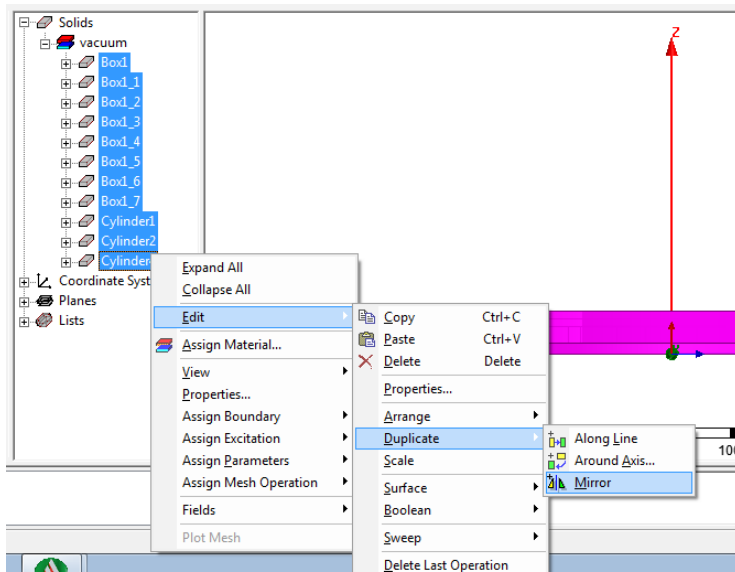
Το τελευταίο τμήμα που έμεινε να σχεδιαστεί είναι ο αλουμινένιος κυκλικός δακτύλιος. Αυτός περιβάλλει την διάταξη με ύψος 25mm και πάχος 10mm. Σχεδιάζεται και πάλι με την γνωστή διαδικασία σχεδιάζοντας δύο κυκλικούς δίσκους και αφαιρώντας τον έναν απ' τον άλλο. Ο εξωτερικός θα έχει ακτίνα 210mm και ο εσωτερικός 200mm. Η τελική μορφή απεικονίζεται στο σχήμα 2.26.



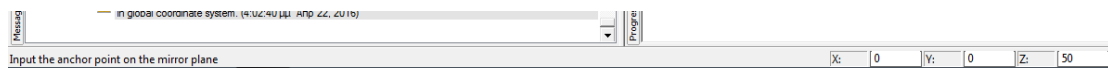
Σχήμα 2.26: Τελική μορφή πρωτεύοντος.

2.3.5 Σχεδίαση Δευτερεύοντος

Τώρα έμεινε η δημιουργία του δευτερεύοντος με την μέθοδο του κατοπτρισμού του πρωτεύοντος. Το δευτερεύον σχεδιάζεται σε κατακόρυφη απόσταση (ή αλλιώς διάκενο) ίση με 5cm από το πρωτεύον. Αυτό γίνεται ως εξής: επιλέγουμε όλα τα τμήματα που σχεδιάσαμε κάνουμε δεξί κλικ και μετά: **Edit** → **Duplicate** → **Mirror** (Σχήμα 2.27). Στην **Status bar** (Σχήμα 2.28) ζητείται αρχικά το σημείο από το οποίο ξεκινάει ο κατοπτρισμός δηλαδή για $X=0, Y=0, Z=50$ και στην συνέχεια το σημείο που τερματίζει αυτός δηλαδή όσο και το ύψος του πρωτεύοντος άρα $dX=0, dY=0, dZ=25$. Αυτά φαίνονται στις εικόνες παρακάτω σε τρία βήματα.



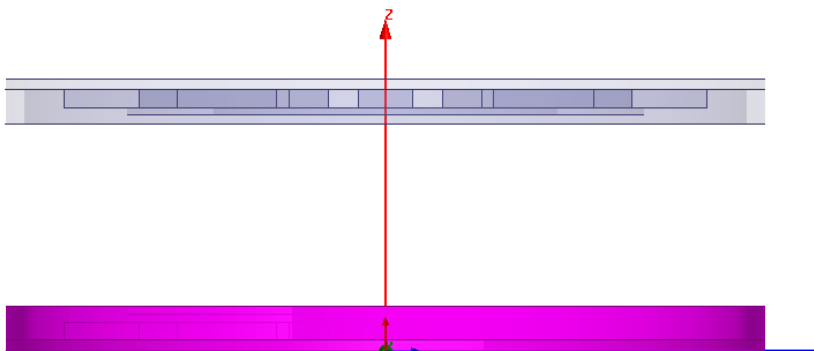
Σχήμα 2.27: Δημιουργία δευτερεύοντος με κατοπτρισμό του πρωτεύοντος.



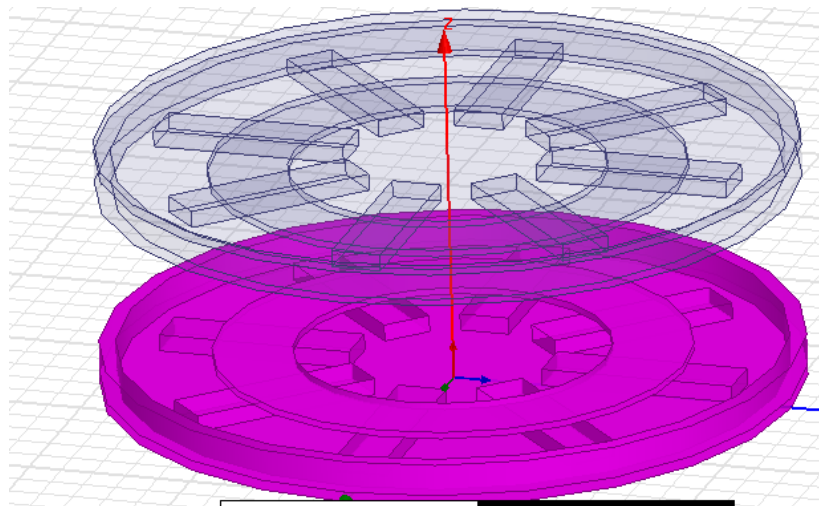
Σχήμα 2.28: Δημιουργία δευτερεύοντος με κατοπτρισμό του πρωτεύοντος.



Σχήμα 2.29: Δημιουργία δευτερεύοντος με κατοπτρισμό του πρωτεύοντος.

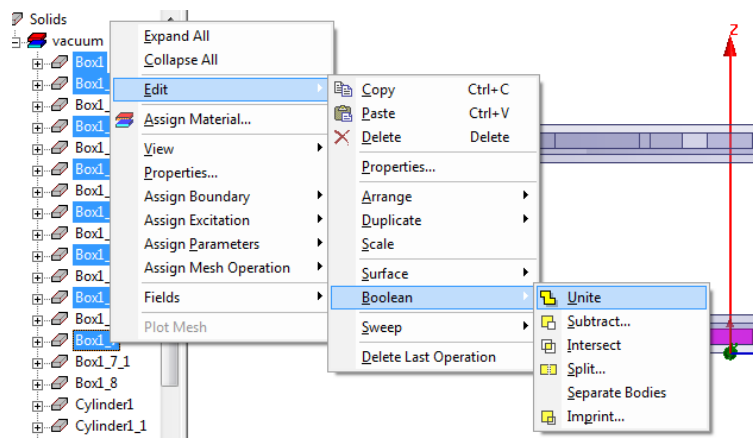


Σχήμα 2.30: Πλάγια όψη διάταξης επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος.



Σχήμα 2.31: Τυχαία όψη διάταξης επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος.

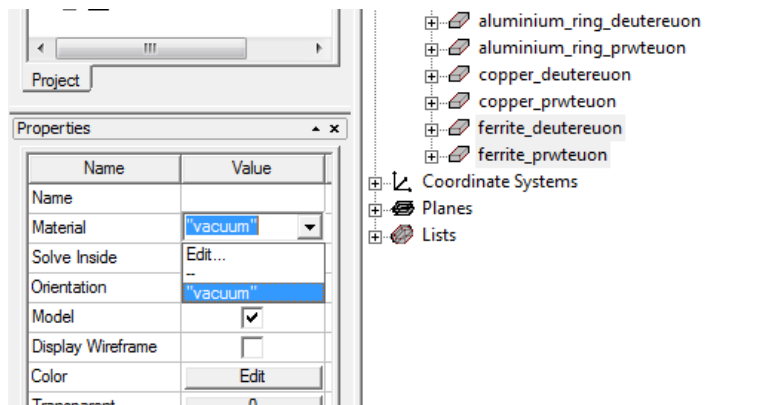
Τέλος μπορούμε να ομαδοποιήσουμε όλες τις ράβδους φερρίτη σε δύο γκρουπ με ονόματα ferrite_prwteuon και ferrite_deutereuon ως εξής: **Edit** → **Boolean** → **Unite** και έπειτα τις μετονομάζουμε όπως επιθυμούμε. Το ίδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τα προηγούμενα σχεδιαστικά κομμάτια που δημιουργήσαμε (αλουμινένιος δίσκος, αλουμινένιο δαχτυλίδι, τύλιγμα).



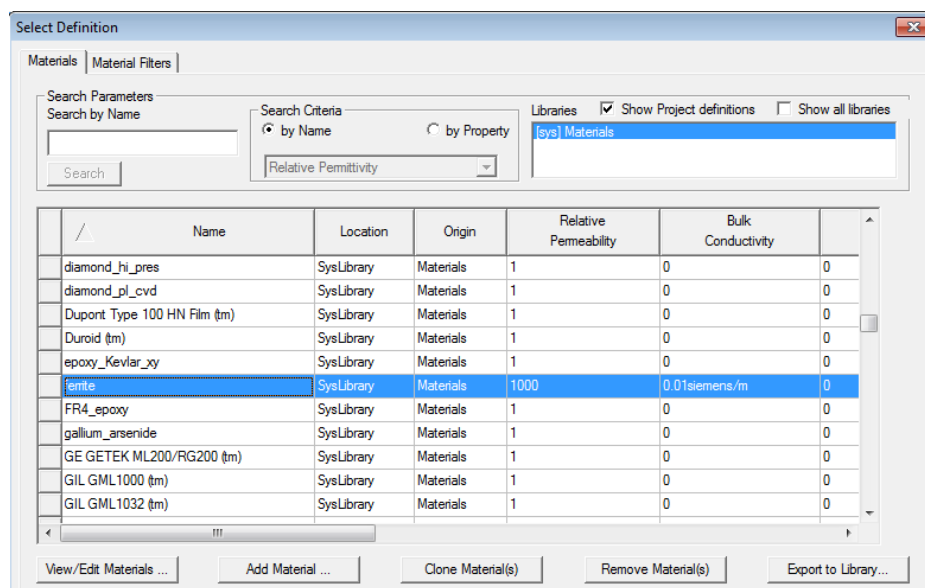
Σχήμα 2.32: Ομαδοποίηση ράβδων φερρίτη σε μια ενιαία διάταξη.

2.4 Ορισμός υλικών

Θα ορίσουμε το είδος του υλικού σε καθεμιά γεωμετρία που σχεδιάσαμε. Ξεκινάμε με τους φερρίτες επιλέγοντάς τους και πηγαίνοντας στο Properties Window στην επιλογή material και με κλικ επιλέγουμε **Edit**. Αυτό είναι το πρώτο από τα δύο βήματα της διαδικασίας που φαίνεται στα σχήματα 2.33 και 2.34.

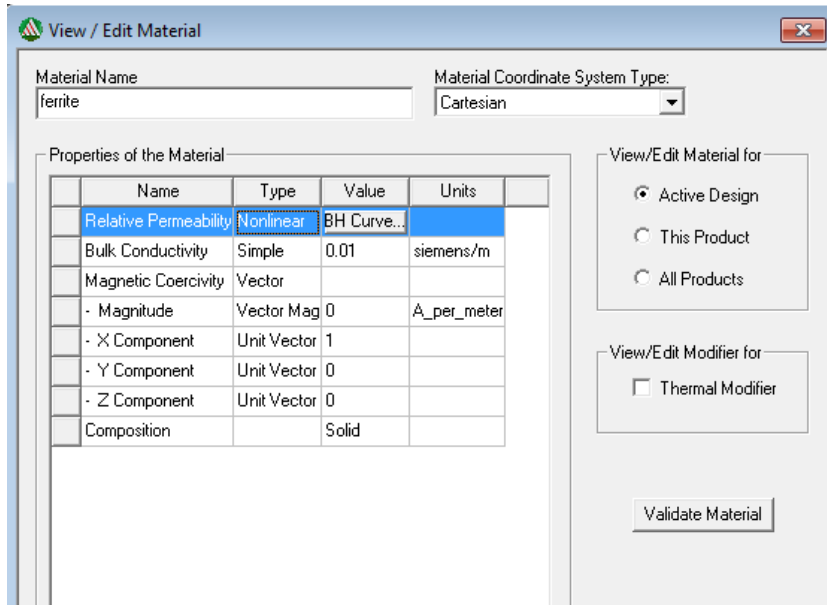


Σχήμα 2.33: Επιλογή υλικού για φερρίτη .

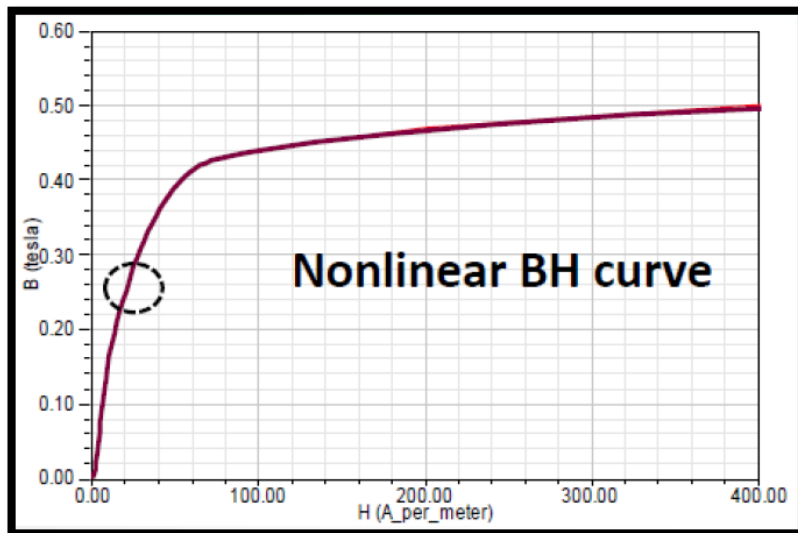


Σχήμα 2.34: Επιλογή υλικού για φερρίτη .

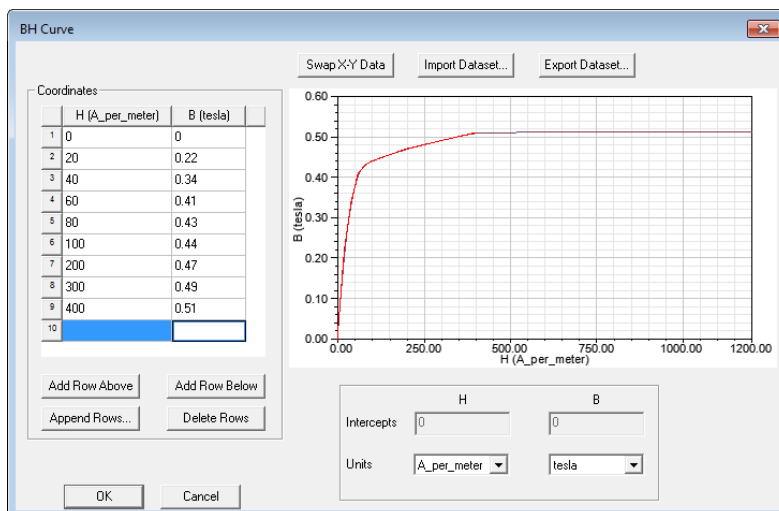
Στο παράθυρο με τα υλικά επιλέγουμε τον φερρίτη με το όνομα ferrite και έπειτα View/Edit Materials για να τον ορίσουμε μιας και δεν παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Ύστερα στο όνομα επιλέγουμε Relative Permeability και στον τύπο Nonlinear. Μετά κάνουμε κλικ στο BH Curve και εισάγουμε τις τιμές που δίνουμε σε επόμενο σχήμα. Η καμπύλη έχει την μορφή που δίνεται στο σχήμα 2.36 [35].



Σχήμα 2.35: Χαρακτηριστικά φερρίτη.



Σχήμα 2.36: Καμπύλη BH φερρίτη [35].

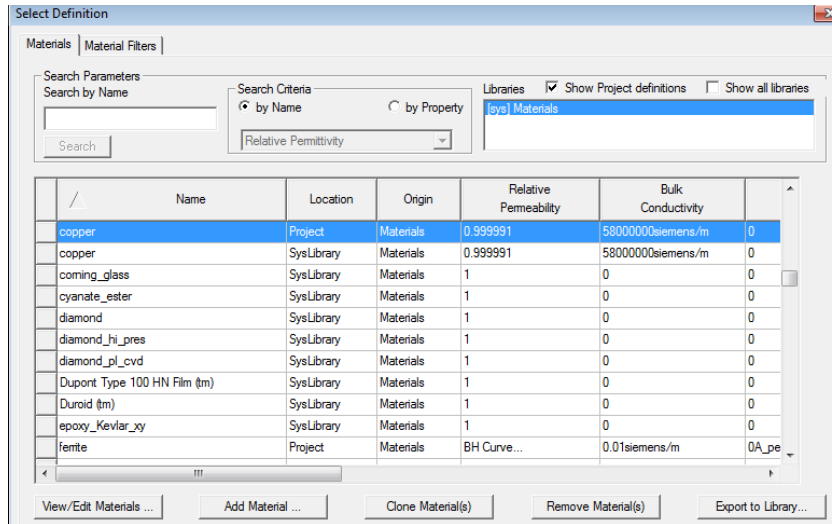


Σχήμα 2.37: Εισαγωγή τιμών καμπύλης φερρίτη.

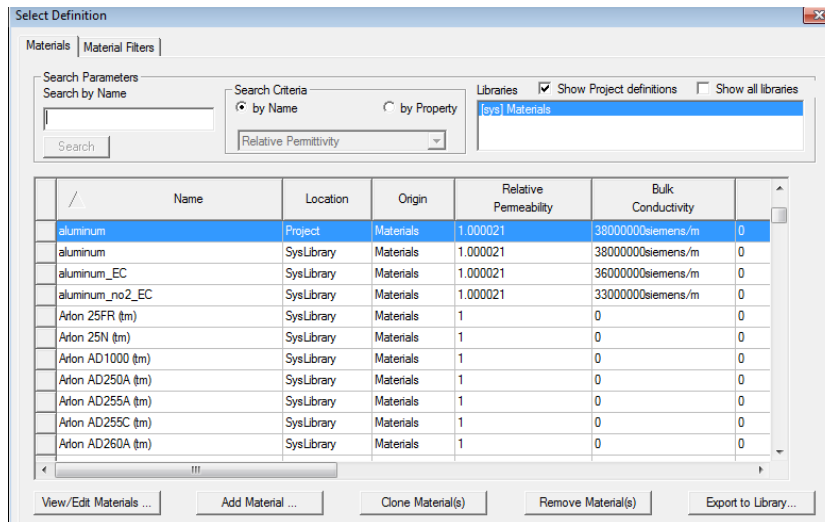
Επιλέγουμε ok σε όλα τα παράθυρα.

Συνεχίζουμε με τα τυλίγματα όπου στην λίστα με τα υλικά επιλέγουμε copper (Σχήμα 2.38) με ειδική αγωγιμότητα 58000000 s/m [35].

Τέλος επιλέγουμε τους αλουμινένιους δίσκους και δακτυλίους και πάλι δεξί κλικ **edit** (Σχήμα 2.38) και ύστερα aluminum.



Σχήμα 2.38: Επιλογή υλικού για χαλκό.

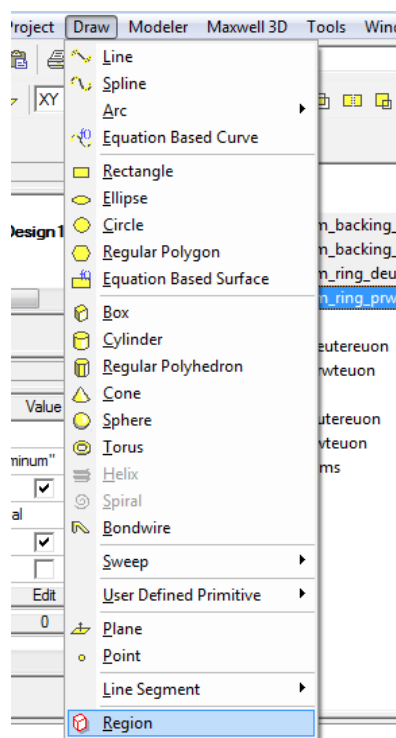


Σχήμα 2.39: Επιλογή υλικού για αλουμινένιους δίσκους και δακτύλιους.

2.5 Ορισμός οριακών συνθηκών

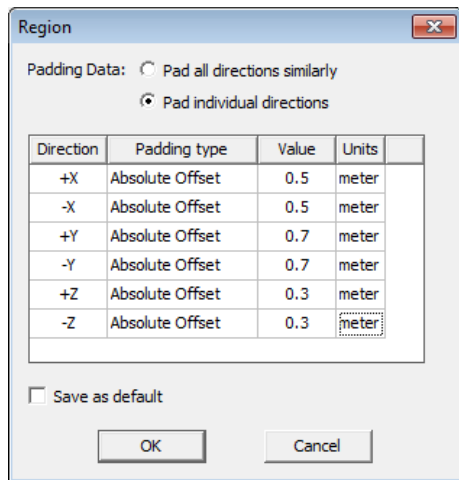
Το Ansoft Maxwell μας επιτρέπει να σχεδιάσουμε μια περιοχή, Region, μέσα στην οποία θα γίνει η μαγνητοστατική ανάλυσή μας και για την οποία θα βγουν αντίστοιχα αποτελέσματα. Η μαγνητική ροή εξ ορισμού ορίζεται παράλληλα στις επιφάνειες της Region οπότε δεν χρειάζεται να ορισθούν επιπλέον οριακές συνθήκες. Η περιοχή αυτή σχεδιάζεται με τρόπο ώστε να προσομοιώνεται η κάτω επιφάνεια του οχήματος: Θεωρούμε ότι η μαγνητική ροή περιορίζεται 30cm πάνω από το δευτερεύον και εντός μίας επιφάνειας 100X140cm. Προσομοιώνεται επίσης μία περιοχή εντός του εδάφους όπου αναμένεται να εισέλθει ο φορτιστής: ορίζεται δηλαδή μία επιφάνεια 30cm κάτω από το πρωτεύον.

Για να οριστεί αυτή η περιοχή ακολουθούμε τα εξής βήματα: **Draw**→**Region**. (Σχήμα 2.40)



Σχήμα 2.40: Σχεδιασμός περιοχής (Region)

Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα παράθυρο όπου επιλέγουμε **Pad individual directions** και εισάγουμε το εύρος της περιοχής όσον αφορά τους άξονες αναφοράς. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



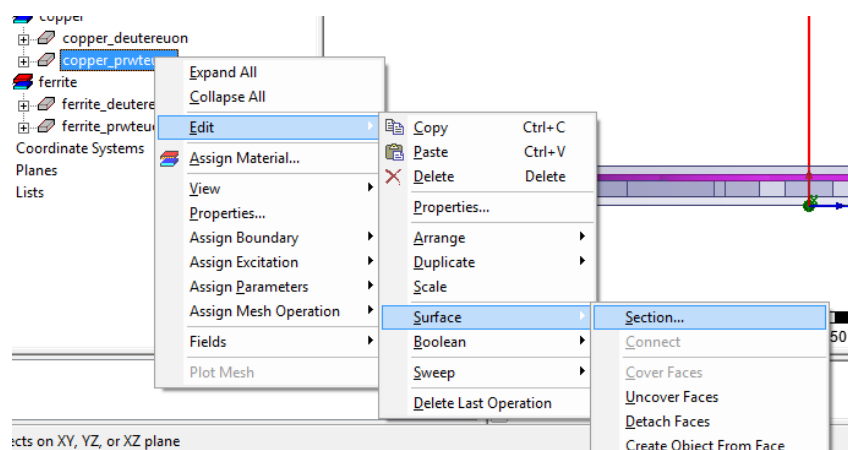
Σχήμα 2.41: Ορισμός περιοχής.

Τέλος το μόνο που παραλείψαμε είναι να ορίσουμε το υλικό της περιοχής που είναι ο αέρας. Αυτό πραγματοποιείται πηγαίνοντας στο Properties Window και: **Material**→**Edit**→**Air**.

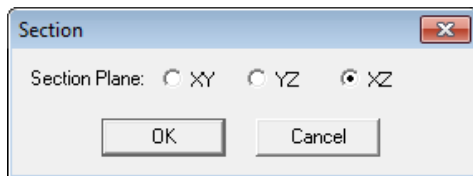
2.6 Ορισμός παραμέτρων της ανάλυσης

Για τη μελέτη που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής, απαραίτητα είναι τα ακόλουθα μεγέθη: η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος L_1 , η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος L_2 και η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων M . Για να υπολογίζονται αυτά σε κάθε προσομοίωση που θα τρέχουμε πρέπει να ορισθούν σε έναν πίνακα.

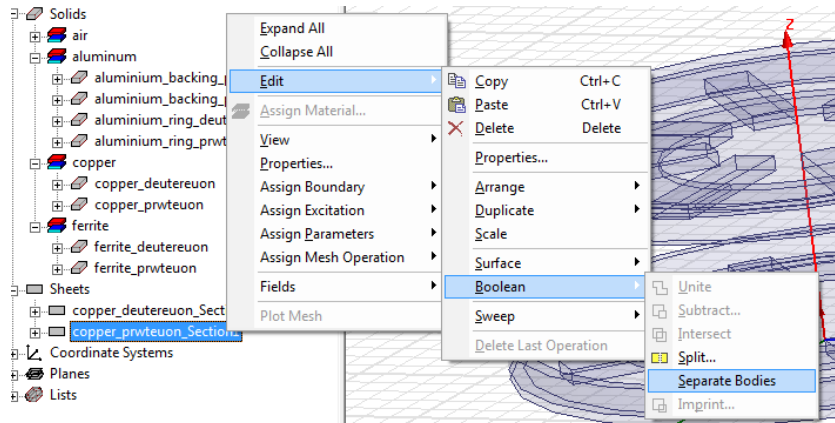
Πριν όμως γίνει αυτό πρέπει να ορίσουμε το ρεύμα σε πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα. Το ρεύμα διαπερνά κάθετα τον κυλινδρικό δακτύλιο οπότε και μια οποιαδήποτε διατομή του. Ο ορισμός της διατομής πραγματοποιείται σε τρία βήματα ως εξής: δεξί κλικ στο τύλιγμα του πρωτεύοντος και **Edit**→**Surface**→**Section** (Σχήμα 2.42). Ύστερα επιλέγουμε η επιφάνεια αυτή να βρίσκεται στο επίπεδο XZ (Σχήμα 2.43).



Σχήμα 2.42: Ορισμός διατομής τυλιγματος πρωτεύοντος .



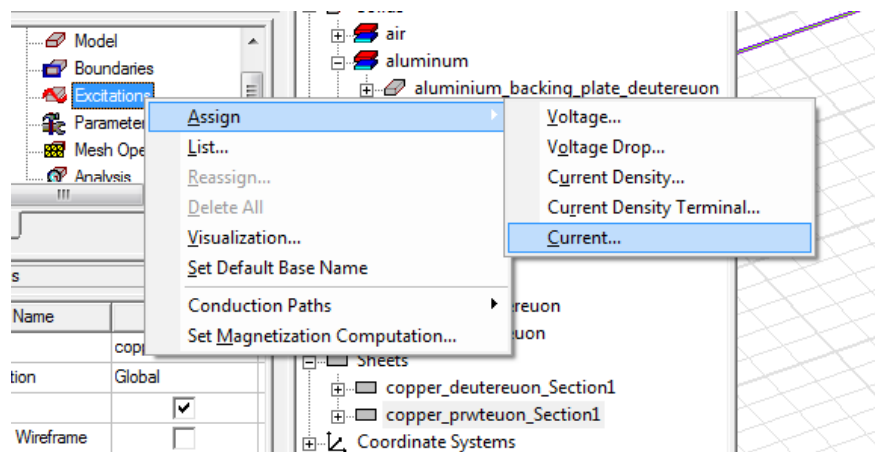
Σχήμα 2.43: Ορισμός διατομής τυλίγματος πρωτεύοντος .



Σχήμα 2.44: Ορισμός διατομής τυλίγματος πρωτεύοντος .

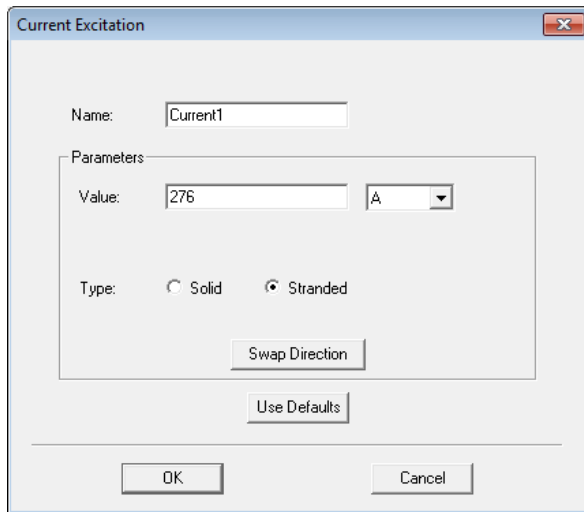
Με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται δύο επιφάνειες. Για να διαχωρίσουμε τις δύο αυτές επιφάνειες ακολουθείται η διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 2.44 : δεξί κλικ στην επιφάνεια → **Edit** → **Boolean** → **Separate Bodies**.

Για να ορίσουμε το ρεύμα κάνουμε κλικ στο επίπεδο που μόλις ορίσαμε και από το **Project Manager Window** δεξί κλικ στην επιλογή **Excitations** → **Assign** → **Current** (Σχήμα 2.45).



Σχήμα 2.45: Ορισμός του ρεύματος πρωτεύοντος

Στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνουμε στο ρεύμα το όνομα που επιθυμούμε, την τιμή που θέλουμε η οποία είναι $12 \cdot 23 = 276A$ (ελίγματα * ρεύμα καθενός) και επιλέγουμε Stranded ως Type, για να δηλώσουμε ότι ο αγωγός αποτελείται από περισσότερα του ενός τυλίγματα (Σχήμα 2.46).

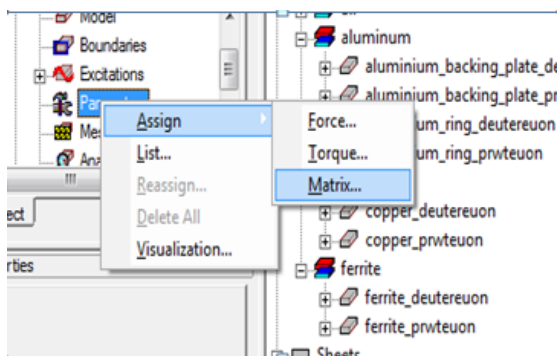


Σχήμα 2.46: Ορισμός παραμέτρων ρεύματος πρωτεύοντος.

Με τον ίδιο τρόπο ορίζουμε και το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα.

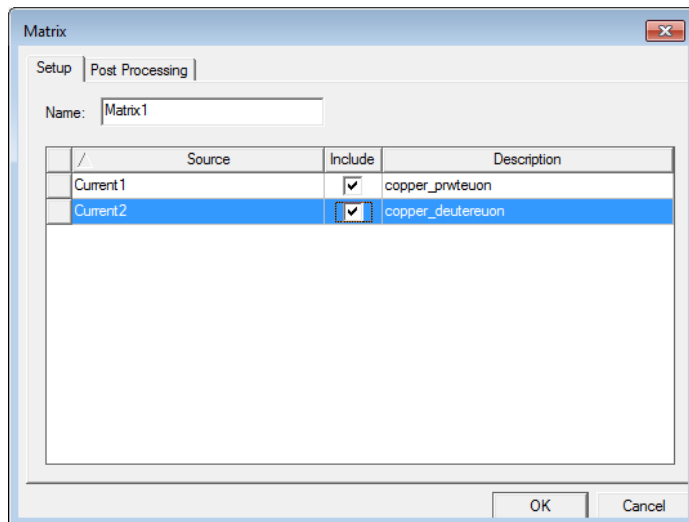
Έχοντας κάνει την παραπάνω διαδικασία θα ορίσουμε τον πίνακα με τις αυτεπαγωγές:

Parameters → Assign → Matrix (Σχήμα 2.46)

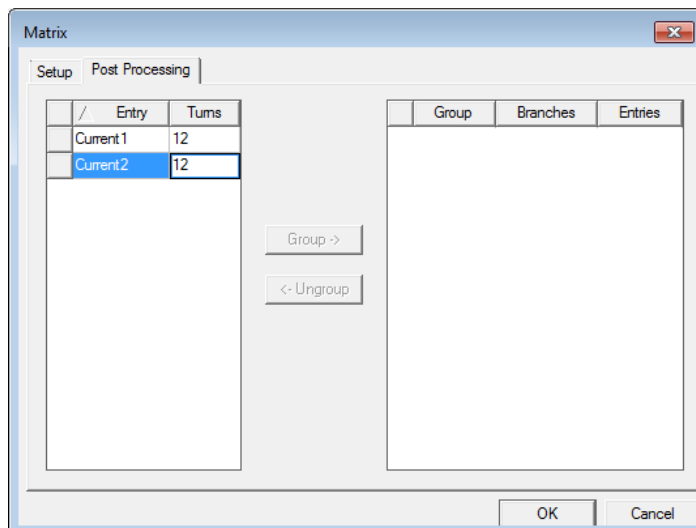


Σχήμα 2.47: Ορισμός πίνακα υπολογισμού αυτεπαγωγών και αμοιβαίας επαγωγής.

Στο παράθυρο που εμφανίζεται στην καρτέλα Setup (Σχήμα 2.48) προσέχουμε να είναι δίπλα από το κάθε ρεύμα η σωστή επιφάνεια διατομής και να είναι επιλεγμένη με τικ ενώ στην καρτέλα Post Processing (Σχήμα 2.49) εισάγουμε τον αριθμό των τυλιγμάτων [3].

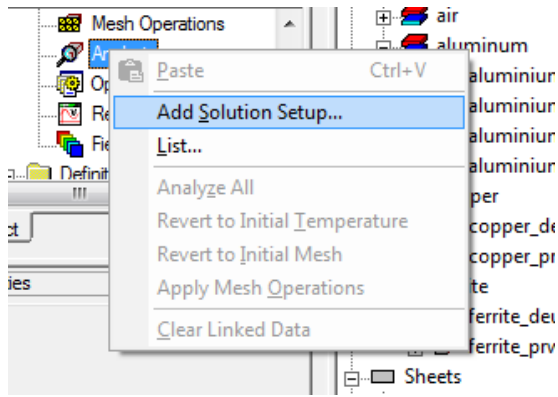


Σχήμα 2.48: Ορισμός αγωγών.

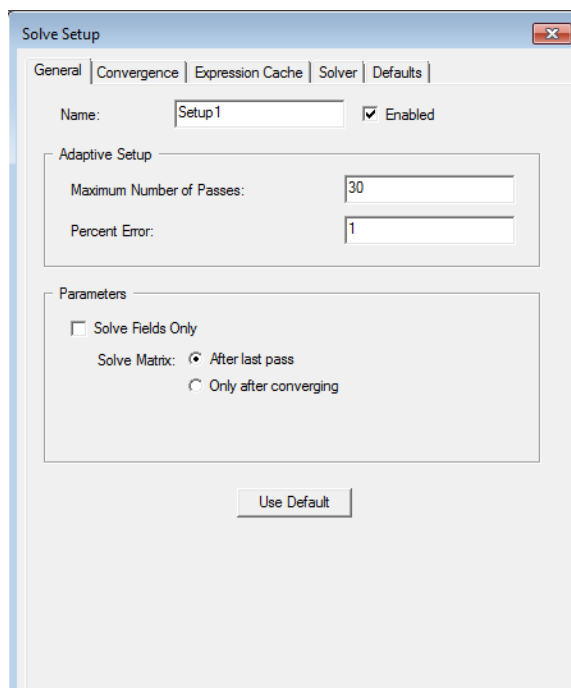


Σχήμα 2.49: Εισαγωγή αριθμού τυλιγμάτων.

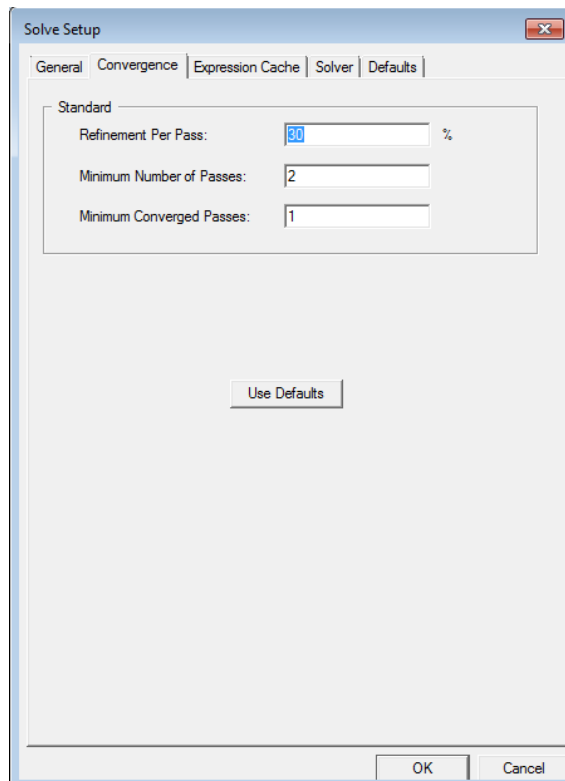
Τώρα πρέπει να εισάγουμε τις επιλογές που αφορούν την εκτέλεση του προβλήματος και τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί. Από το **Project Manager Window** κάνουμε δεξί κλικ στο **Analysis** → **Add Solution Setup** (Σχήμα 2.50). Στο παράθυρο που αναδύεται, στην καρτέλα **General** (Σχήμα 2.51) επιλέγουμε Maximum Number of Passes 30 και Percent Error ίσο με 1.



Σχήμα 2.50: Επιλογές επίλυσης προβλήματος .

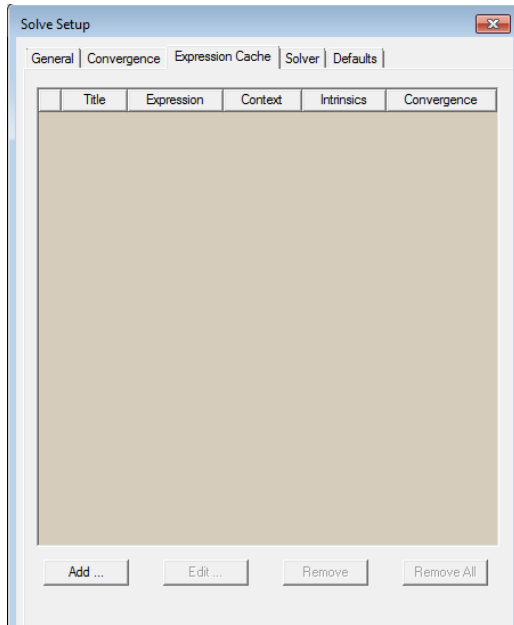


Σχήμα 2.51 : Επιλογές επίλυσης προβλήματος .

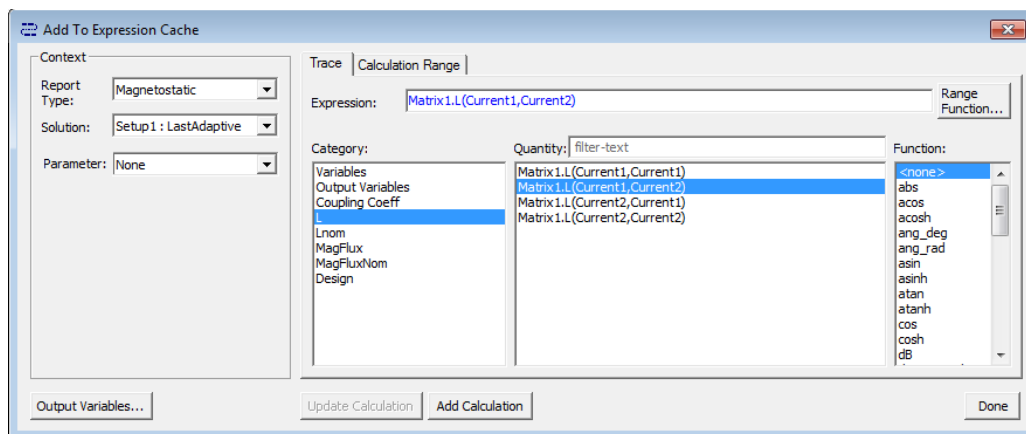


Σχήμα 2.52: Επιλογές επίλυσης προβλήματος .

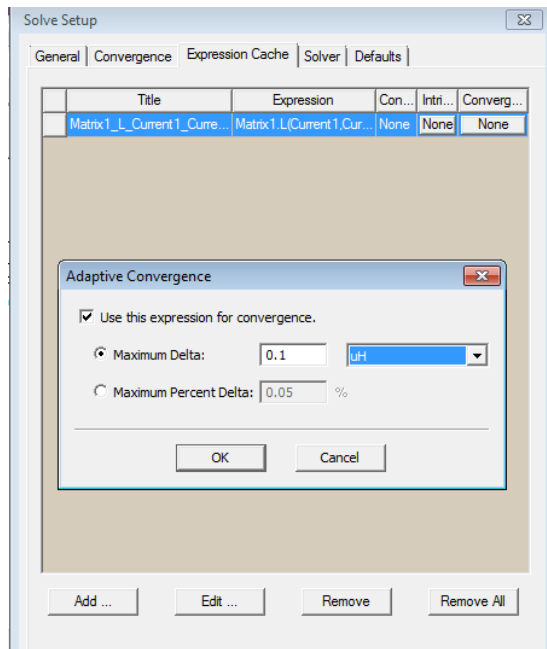
Στην καρτέλα **Convergence** (Σχήμα 2.52) αφήνουμε τις επιλογές που έχει ήδη χωρίς να προβούμε σε κάποια αλλαγή. Στην τρίτη καρτέλα “Expression Cache” (Σχήμα 2.53) ορίζουμε την ακρίβεια για τον υπολογισμό της αμοιβαίας επαγωγής. Η ακρίβεια αυτή στην αμοιβαία επαγωγή θα οδηγήσει το πρόβλημα σε λύση με τιμές αυτεπαγωγών που έχουν ιδιαίτερα ικανοποιητική ακρίβεια. Πατώντας την επιλογή **Add** στο κάτω μέρος του παραθύρου οδηγούμαστε σε ένα νέο παράθυρο (Σχήμα 2.54), όπου στην καρτέλα Category διαλέγουμε το L και ακριβώς δίπλα επιλέγουμε τον συνδυασμό των δύο ρευμάτων ‘Matrix1.L (Current1, Current2)’ και στη συνέχεια επιλέγουμε **Done**.



Σχήμα 2.53: Ορισμός επιθυμητής ακρίβειας αμοιβαίας επαγωγής .



Σχήμα 2.54: Ορισμός επιθυμητής ακρίβειας αμοιβαίας επαγωγής .



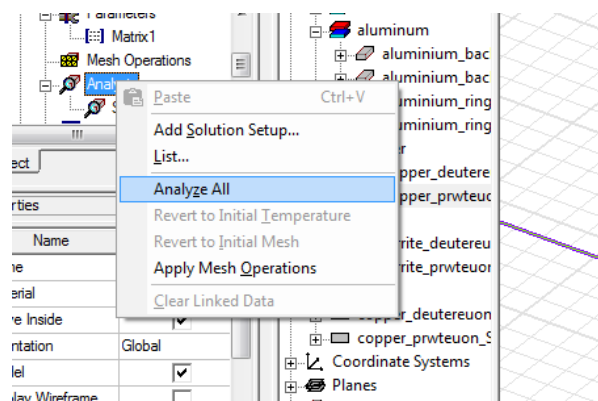
Σχήμα 2.55: Ορισμός επιθυμητής ακρίβειας αμοιβαίας επαγωγής.

Στο σχήμα 2.55 κάνοντας κλικ κάτω από το **Convergence** και επιλέγοντας **Maximum Delta** στο παράθυρο που αναδύεται ορίζουμε 0,1μH ως την ακρίβεια που ζητάμε.

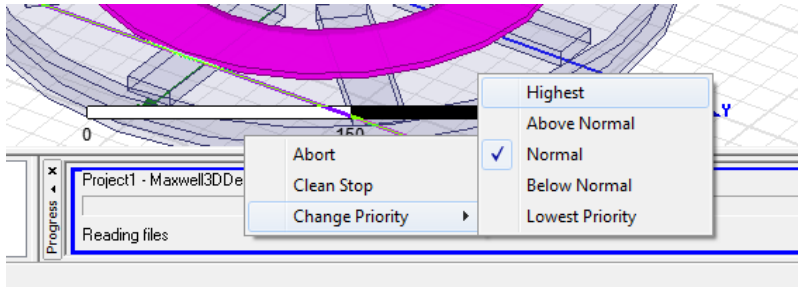
2.7 Επεξεργασία και απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Το τελευταίο βήμα σε μια προσομοίωση είναι η εκτέλεσή της και η οπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των μεγεθών που υπολογίσθηκαν.

Αφού έχουμε κάνει όλα τα απαιτούμενα βήματα που χρειάζονται είμαστε πλέον έτοιμοι να τρέξουμε την προσομοίωση. Πάλι από το **Project Manager Window** δεξί κλικ στο **Analysis** → **Analyze All** (Σχήμα 2.56). Μετά από αυτό αρχίζει να τρέχει η διαδικασία της προσομοίωσης που ενδέχεται να διαρκέσει από λίγα λεπτά έως και κάποιες ώρες ανάλογα με τις παραμέτρους για την ακρίβεια που επιλέχθηκαν.



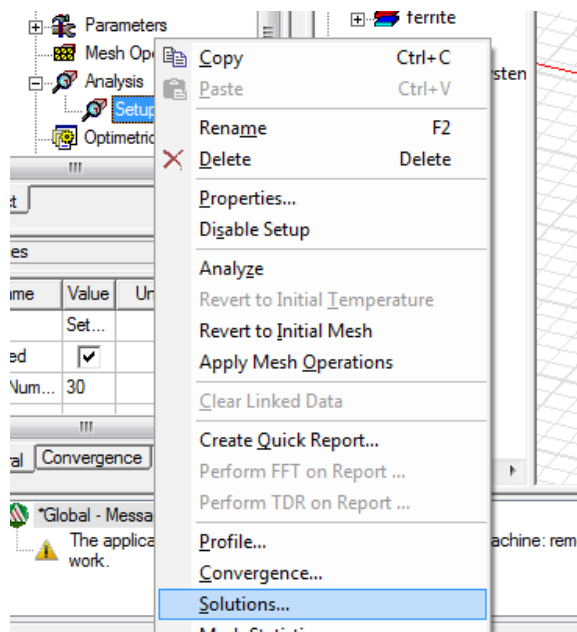
Σχήμα 2.56: Εκκίνηση προσομοίωσης.



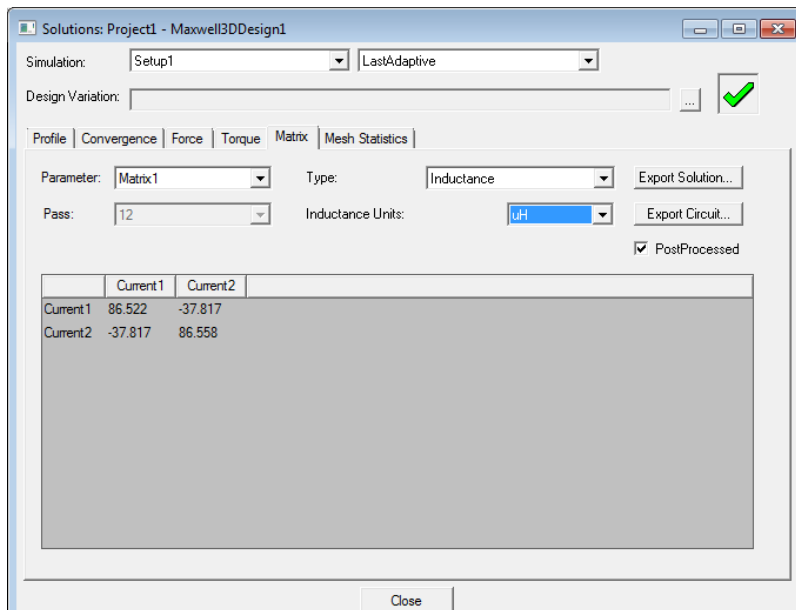
Σχήμα 2.57: Επιτάχυνση διαδικασίας προσομοίωσης.

Αν θέλουμε να τρέξει λίγο πιο γρήγορα η προσομοίωση αυτό είναι εφικτό από το Progress Window με δεξί κλικ **Change Priority**→**Highest** (Σχήμα 2.57) η οποία είναι και η γρηγορότερη δυνατή προτεραιότητα που μπορούμε να δώσουμε.

Αφού τρέξει η προσομοίωση, για να δούμε τις τιμές για τις αυτεπαγωγές και την αμοιβαία επαγωγή ακολουθούμε τα εξής βήματα: από το **Project Manager Window** δεξί κλικ στο **Setup**→**Solutions** (Σχήμα 2.58). Το παράθυρο που αναδύεται στην καρτέλα Matrix (Σχήμα 2.59) μετά την επιλογή Post Processed, δίνει τις τιμές των αυτεπαγωγών.

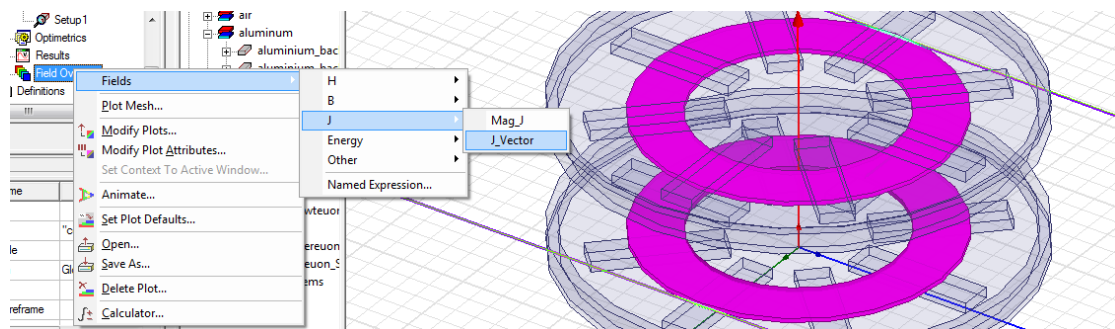


Σχήμα 2.58: Διαδικασία εμφάνισης τιμών αυτεπαγωγών.

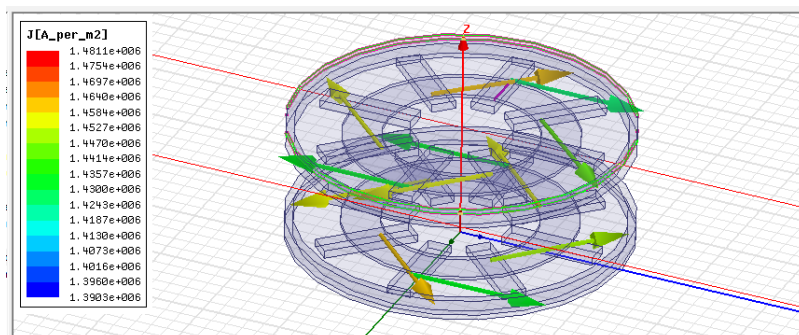


Σχήμα 2.59: Τιμές αυτεπαγωγών L_1 , L_2 – αμοιβαίας επαγωγής M .

Το Maxwell δίνει τέλος και την δυνατότητα απεικόνισης των τιμών και αναπαράστασης των ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων που αναπτύσσονται. Για παράδειγμα η παρουσίαση του διανύσματος του ρεύματος (χωρική πυκνότητα ρεύματος) γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία: από το **Project Manager Window** δεξί κλικ στο **Field Overlays** → **Fields** → **J** → **J_Vector** (σχήμα 2.60). Το διάνυσμα του ρεύματος όπως αυτό παρουσιάζεται στο Maxwell, απεικονίζεται στο σχήμα 2.61.



Σχήμα 2.60: Διαδικασία απεικόνισης ρεύματος τυλιγμάτων.



Σχήμα 2.61: Απεικόνιση κατεύθυνσης και μεγέθους ρεύματος τυλιγμάτων.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΦΕΡΡΙΤΗ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί μία κυκλική διάταξη επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία αποτελείται από ράβδους φερρίτη. Θα δούμε ποια μεγέθη επηρεάζουν την μη αντισταθμισμένη ισχύ P_{su} και τις ιδανικές τιμές που πρέπει να πάρουν τα μεγέθη αυτά για να έχουμε την μέγιστη δυνατή τιμή μεταφερόμενης ισχύος. Επίσης θα ασχοληθούμε με την επίδραση της οριζόντιας μετατόπισης και του διακένου στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος.

3.2 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ

Η διάταξη που θα μελετηθεί στο κεφάλαιο αυτό είναι η κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη (Σχήμα 2. 31) που σχεδιάστηκε στο Maxwell με τον τρόπο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι διαστάσεις της διάταξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2

Όλες οι διαστάσεις σε mm:

A=30 πλάτος φερρίτη

B=118 μήκος φερρίτη

C=10 πάχος αλουμινένιου δακτύλιου

D=238 κέντρο τυλίγματος

E=420 διάμετρος διάταξης

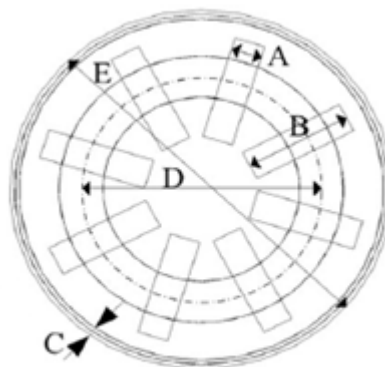
πάχος φερρίτη 10

πάχος διάταξης 25

12 ελίγματα των 4mm (810x.1mm)

πλάτος τυγμάτων litz: 48mm

I1: 23 A (RMS) στα 50kHz



Σχήμα 3.2: Διαστάσεις της κυκλικής μας διάταξης με ράβδους φερρίτη.

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η ισχύς που μεταφέρεται από το δευτερεύον του συστήματος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{out} = P_{su}Q = V_{oc}I_{sc} Q = \frac{\omega M^2 I_1^2}{L_2} Q \quad (3.1)$$

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο η ισχύς που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος εξαρτάται από το συντελεστή ποιότητας Q και τη μη αντισταθμισμένη ισχύ P_{su} . Ο συντελεστής Q καθορίζεται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος, επομένως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφέρει μία διάταξη επαγωγικής φόρτισης είναι ανάλογη της μη αντισταθμισμένης ισχύος που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{su} = \frac{\omega M^2 I_1^2}{L_2} \quad (3.2)$$

και αφού $\omega = 2\pi f$ έχουμε:

$$P_{su} = \frac{2\pi f M^2 I_1^2}{L_2} \quad (3.3)$$

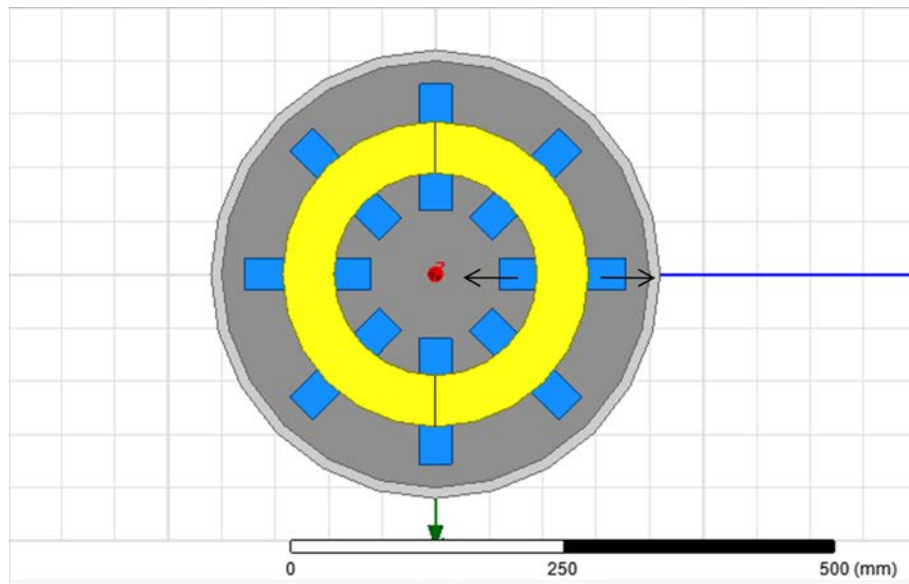
Παρατηρούμε ότι έχοντας σταθερή την συχνότητα λειτουργίας και το ρεύμα στο πρωτεύον τότε η ισχύς που μελετάμε εξαρτάται αποκλειστικά από την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος L_2 και την αμοιβαία επαγωγή M .

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διάταξης στη μεταφερόμενη στο όχημα ισχύ. Πιο συγκεκριμένα θα μελετηθεί πώς επηρεάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φερρίτη (μήκος, πλάτος κλπ.) τη μεταφερόμενη ισχύ, καθώς και τη σχέση της μεταφερομένης ισχύος με τη σχετική θέση τυλιγμάτων και ράβδων φερρίτη. Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται η διάταξη όπως περιγράφεται στην προηγούμενη υποενότητα, θεωρώντας ένα διάκενο ίσο με 5cm.

3.2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φερρίτη

Σ αυτήν την υποενότητα θα μελετήσουμε το πώς επηρεάζουν τα διάφορα χαρακτηριστικά του φερρίτη, όσων αφορά τις διαστάσεις (μήκος, πλάτος, πάχος) των ράβδων, αλλά και τον αριθμό των ράβδων, την αποδιδόμενη ισχύ.

Αρχικά το μήκος των ράβδων μεταβάλλεται από 88mm έως 148mm. Στο σχήμα 3.3 βλέπουμε τον τρόπο μεταβολής των ράβδων. Το κεντρικό σημείο των ράβδων διατηρείται σταθερό στα 119cm.



Σχήμα 3.3: Μεταβολή μήκους ράβδων φερρίτη.

Το βήμα μεταβολής είναι 10mm και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

μήκος (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)	Όγκος φερρίτη (m ³)
88	78,986	78,993	31,288	2058,51	2,11E-04
98	81,51	81,602	33,424	2274,06	2,35E-04
108	83,832	84,029	35,505	2491,93	2,59E-04
118	86,382	86,373	37,646	2725,49	2,83E-04
128	88,21	88,31	39,434	2924,94	3,07E-04
138	90,189	90,189	41,219	3129,15	3,31E-04
148	91,913	91,907	42,846	3317,85	3,55E-04

Πίνακας 3.1: Μήκος ράβδων φερρίτη και ισχύς.

Έπειτα μεταβάλλουμε μόνο το πλάτος της ράβδου από 20mm σε 40mm (ανά 5mm) κρατώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές στις αρχικές τιμές τους. Ακολουθεί ο πίνακας 3.2 με τα αποτελέσματα.

πλάτος (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)	Όγκος φερρίτη (m ³)
20	81,155	81,153	34,276	2404,70	1,89E-04
25	83,538	83,789	35,915	2557,11	2,36E-04
30	86,382	86,373	37,646	2725,49	2,83E-04
35	88,518	88,517	39,012	2855,98	3,30E-04
40	90,603	90,587	40,346	2984,84	3,78E-04

Πίνακας 3.2: Πλάτος ράβδων φερρίτη και ισχύς.

Τώρα θα ασχοληθούμε με την σχέση της ισχύος με το πάχος των ράβδων οπότε αυτό που κάνουμε είναι να το αυξάνουμε από 6mm έως 16mm κατά 2mm κάθε φορά (πίνακας 3.3).

Πάχος (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)	Όγκος φερρίτη (m ³)
6	85,201	85,216	36,698	2625,11884	1,70E-04
8	85,964	85,965	37,296	2687,74563	2,27E-04
10	86,382	86,373	37,646	2725,4925	2,83E-04
12	86,717	86,843	38,023	2765,30642	3,40E-04
14	87,105	87,126	38,336	2801,89036	3,96E-04
16	87,449	87,471	38,63	2833,80945	4,53E-04

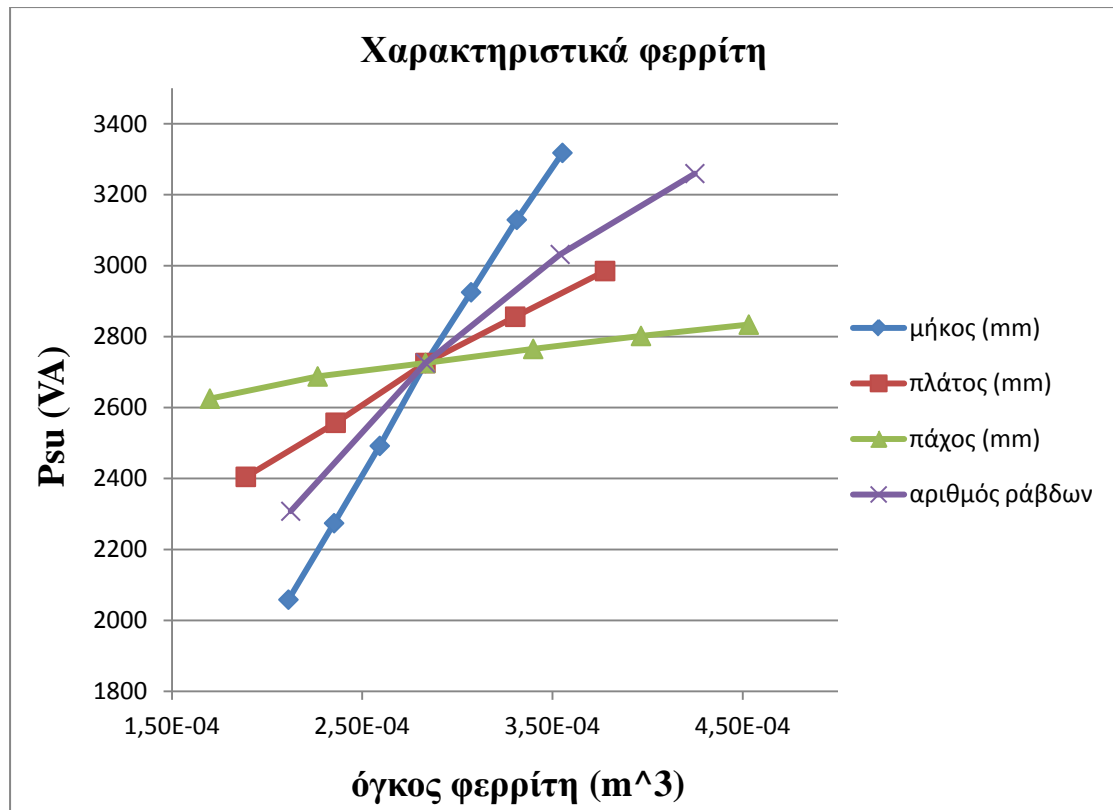
Πίνακας 3.3: Πάχος ράβδων φερρίτη και ισχύς.

Τέλος το τελευταίο χαρακτηριστικό που θα μελετήσουμε όσον αφορά τις ράβδους φερρίτη είναι το πλήθος τους που το αυξάνουμε από 6 κατά 2 κάθε φορά έως 12. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.4.

Αριθμός ράβδων	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)	Όγκος φερρίτη (m ³)
6	79,495	79,409	33,215	2307,73	2,12E-04
8	86,382	86,373	37,646	2725,49	2,83E-04
10	91,291	91,409	40,845	3031,62	3,54E-04
12	95,037	94,729	43,115	3259,56	4,25E-04

Πίνακας 3.4: Αριθμός ράβδων φερρίτη και ισχύς.

Η επίδραση των εξεταζόμενων χαρακτηριστικών στη μεταφερόμενη ισχύ απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.1.



Διάγραμμα 3.1: Χαρακτηριστικά φερρίτη σε συνάρτηση με αποδιδόμενη ισχύ.

Από το διάγραμμα 3.1 βλέπουμε ότι αυτή η παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την μεταφερόμενη ισχύ είναι το μήκος των ράβδων και σε μικρότερο βαθμό ο αριθμός τους. Το πλάτος τους δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό σχετικά με την ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Επίσης το πάχος των ράβδων είναι η παράμετρος με τη μικρότερη συμβολή στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος.

3.2.2 Σχετική θέση μεταξύ ράβδων φερριτών και τυλιγμάτων

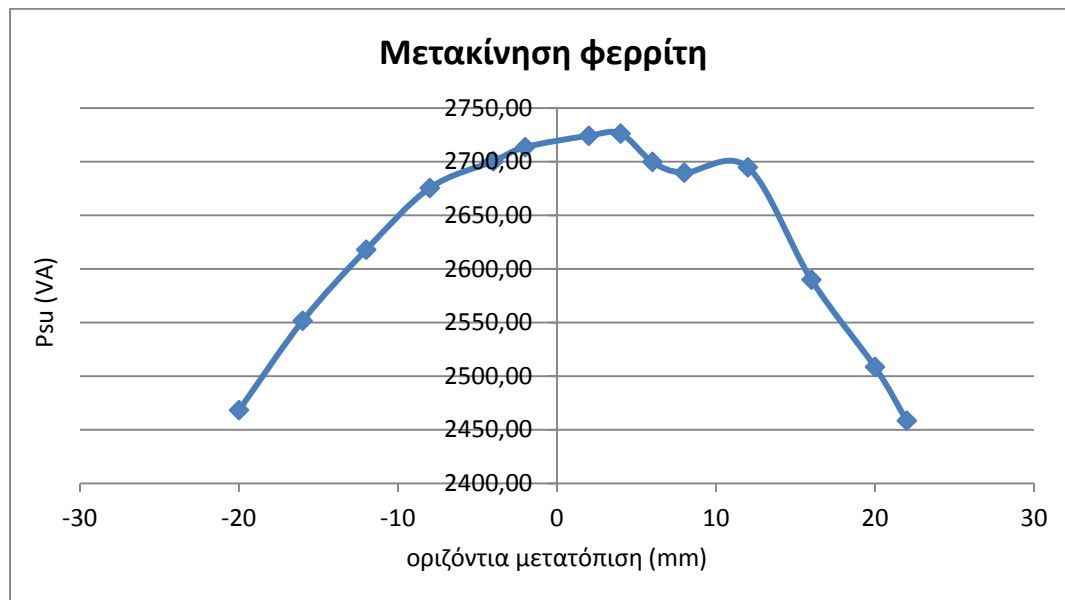
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση της θέσης των τυλιγμάτων, αλλά και των ράβδων φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ.

Θέση των ράβδων φερρίτη

Αρχικά μετακινούμε τους φερρίτες είτε προς το εξωτερικό (με πρόσημο “+” στον Πίνακα 3.5) είτε προς το εσωτερικό (με πρόσημο “-”) της διάταξης. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις από -20mm μέχρι και 22mm. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 3.5 και απεικονίζονται στο διάγραμμα 3.2 .

Μετακίνηση φερρίτη	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
-20mm	82,969	83,046	35,129	2468,30
-16mm	84,082	84,158	35,955	2551,58
-12mm	84,97	84,973	36,595	2617,87
-8mm	85,705	85,71	37,155	2675,40
-4mm	86,023	86,004	37,392	2700,37
-2mm	86,197	86,212	37,528	2713,49
2mm	86,309	86,311	37,623	2724,12
4mm	86,308	86,523	37,683	2726,12
6mm	86,105	86,101	37,409	2699,79
8mm	86,028	86,03	37,324	2689,75
12mm	86,121	86,111	37,376	2694,71
16mm	84,773	84,888	36,381	2589,93
20mm	83,768	83,579	35,528	2508,59
22mm	83,062	83,07	35,064	2458,46

Πίνακας 3.5: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη.



Διάγραμμα 3.2: Γραφική απεικόνιση των μεταβολών της μη-αντισταθμισμένης ισχύος για μετακίνηση του φερρίτη.

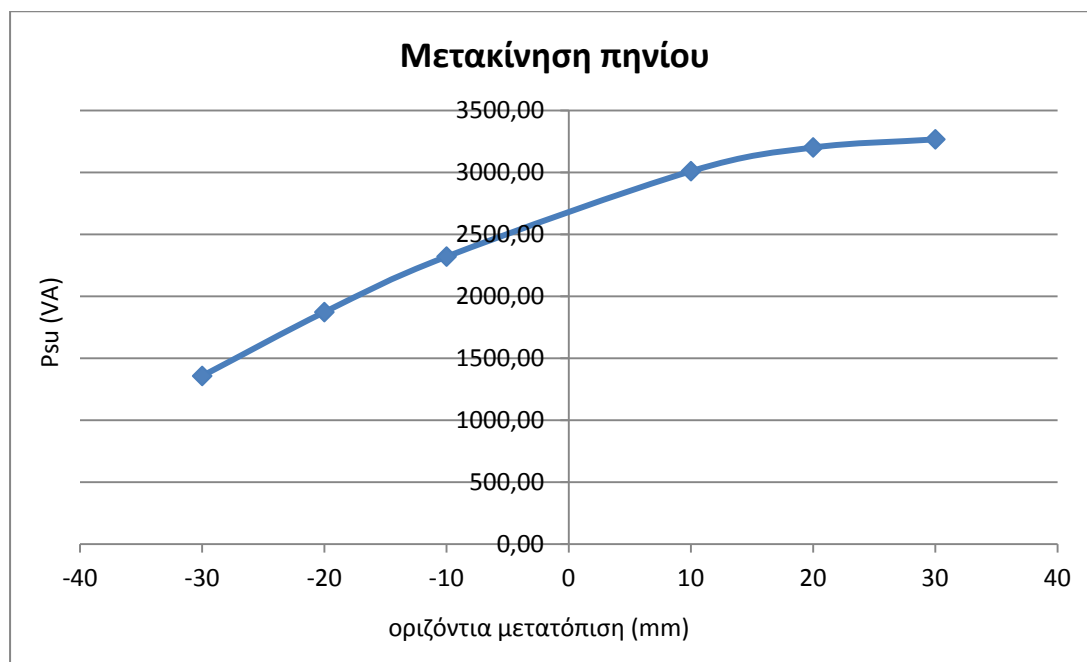
Στις παραπάνω μετρήσεις του πίνακα 3.5 αλλά και στο διάγραμμα 3.2 παρατηρούμε ότι η ισχύς παίρνει την μέγιστη τιμή της για μετακίνηση του φερρίτη 4mm προς τα έξω και αυτή είναι 2726,12 VA.

Μετακίνηση πηνίου

Προχωράμε με την μετακίνηση αποκλειστικά και μόνο των πηνίων. Αυτά μετατοπίζονται από -30mm έως και 30mm από την αρχική τους θέση. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 3.6 καθώς και στο διάγραμμα 3.3.

Μετακίνηση πηνίου	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
-30mm	58,007	58,146	21,796	1357,12
-20mm	68,955	68,96	27,882	1872,56
-10mm	78,114	78,118	33,036	2320,65
10mm	92,989	92,995	41,052	3010,19
20mm	98,246	98,287	43,525	3201,60
30mm	101,4	101,41	44,661	3267,09

Πίνακας 3.6: Μετρήσεις για μετακίνηση πηνίου.



Διάγραμμα 3.3: Αναπαράσταση μεταβολών μη-αντισταθμισμένης ισχύος για μετακίνηση τυλίγματος.

Στον διάγραμμα 3.3 βλέπουμε ότι η καμπύλη της ισχύος ακολουθεί αύξουσα πορεία καθώς το τυλίγμα μεταφέρεται προς το εξωτερικό της διάταξης. Η μέγιστη ισχύς δίνεται με την μέγιστη δυνατή μετατόπιση προς τα έξω (+30mm) και είναι ίση με 3267,09VA.

Μετακίνηση φερριτή και πηνίου

Προηγουμένως μελετήθηκε η επίδραση της θέσης των τυλιγμάτων, αλλά και της θέσης των ράβδων φερριτή στη μεταφερόμενη ισχύ. Ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει και η σχετική θέση μεταξύ τυλιγμάτων και ράβδων φερριτή. Για το λόγο αυτό μετακινούμε ταυτόχρονα και φερριτές και τυλίγματα. Για συγκεκριμένες μετακινήσεις φερριτή μετακινούμε το πηνίο κάθε φορά από -10mm έως 55mm. Ακολουθούν τα σετ των μετρήσεων.

Μετακίνηση φερρίτη -10mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
-10	78,513	78,512	33,360	2354,51447
0	85,391	85,47	36,954	2653,96093
10	90,929	90,939	39,535	2854,95082
20	94,403	94,41	40,887	2941,28979
30	95,03	95,025	40,899	2923,96938
40	94,638	94,596	40,426	2869,6841

Πίνακας 3.7: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 10mm προς τα μέσα και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

Μετακίνηση φερρίτη -4mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	86,023	86,004	37,392	2700,37
10	92,204	92,275	40,519	2955,42
20	96,796	96,802	42,516	3101,74
30	99,18	99,14	43,236	3132,04
40	98,591	98,561	42,688	3071,08

Πίνακας 3.8: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 4mm προς τα μέσα και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

Μετακίνηση φερρίτη -2mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	86,197	86,212	37,528	2713,49
10	92,611	92,694	40,821	2986,08
20	97,608	97,567	43,037	3153,31
30	100,42	100,38	43,997	3203,20
40	100,14	100,22	43,598	3150,39

Πίνακας 3.9: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 2mm προς τα μέσα και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

Μετακίνηση φερρίτη 2mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	86,309	86,311	37,623	2724,12
10	93,346	93,349	41,315	3037,32
20	98,761	98,845	43,925	3242,31
30	102,39	102,5	45,353	3333,29
40	103,31	103,33	45,395	3312,65

Πίνακας 3.10: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 2mm προς τα έξω και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

Μετακίνηση φερρίτη 10mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
-10	76,487	76,487	31,782	2193,613648
0	86,051	86,071	37,35	2692,214653
10	93,886	93,984	41,734	3078,303376
20	100,75	100,69	45,317	3387,827451
30	105,77	105,78	47,633	3562,850728
40	108,82	108,85	48,73	3623,678919

Πίνακας 3.11: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 10mm προς τα έξω και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

Μετακίνηση φερρίτη 15mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
-10	75,241	75,257	30,891	2106,213
0	85,138	85,299	36,692	2621,707
10	93,964	94,049	41,727	3075,144
20	101,36	101,25	45,727	3430,328
30	106,99	107,06	48,532	3654,386
40	111,18	111,21	50,305	3779,756
50	112,78	112,82	50,613	3771,581

Πίνακας 3.12: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 15mm προς τα έξω και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

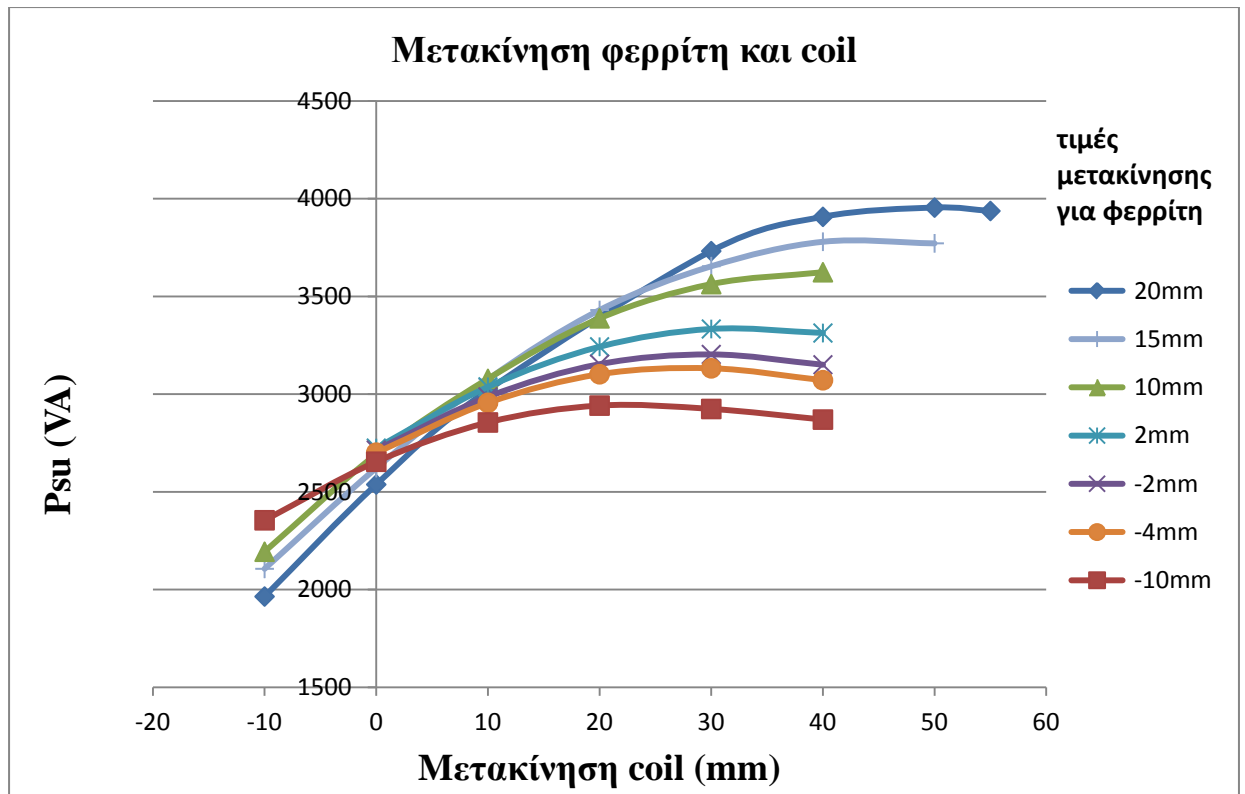
Μετακίνηση φερρίτη 20mm				
Μετακίνηση πηνίου (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
-10	72,963	72,938	29,369	1964,309
0	84,188	84,18	35,861	2537,588
10	93,352	93,455	41,222	3020,236
30	108,1	107,99	49,255	3731,663
40	112,97	113,03	51,562	3907,069
50	115,89	115,79	52,502	3954,267
55	116,36	116,41	52,527	3936,953

Πίνακας 3.13: Μετρήσεις για μετακίνηση φερρίτη 20mm προς τα έξω και διαδοχικές μετακινήσεις πηνίου.

Από το Διάγραμμα 3.4 παρατηρούμε ότι η βέλτιστη θέση για μετακίνηση φερρίτη και τυλιγμάτων είναι: μετακίνηση φερρίτη 20mm προς τα έξω και τυλιγμάτων κατά 50mm προς τα έξω. Στη βέλτιστη αυτή θέση, αν διαιρέσουμε την θέση της εξωτερικής ακτίνας του πηνίου με την ακτίνα της διάταξης θα βρούμε:

$$\frac{\text{ε ξ ω τ ε ρ ι κ ή α κ τ ί ν α c o i l}}{\text{α κ τ ί ν α δ ι ά τ α ξ η ς}} = \frac{193 \text{ mm}}{210 \text{ mm}} = 0,919 \approx 0,92 \quad (3.4)$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι όταν η εξωτερική ακτίνα του πηνίου βρίσκεται στο 92% της ακτίνας της διάταξης παρατηρείται η μέγιστη μεταφορά ισχύος.



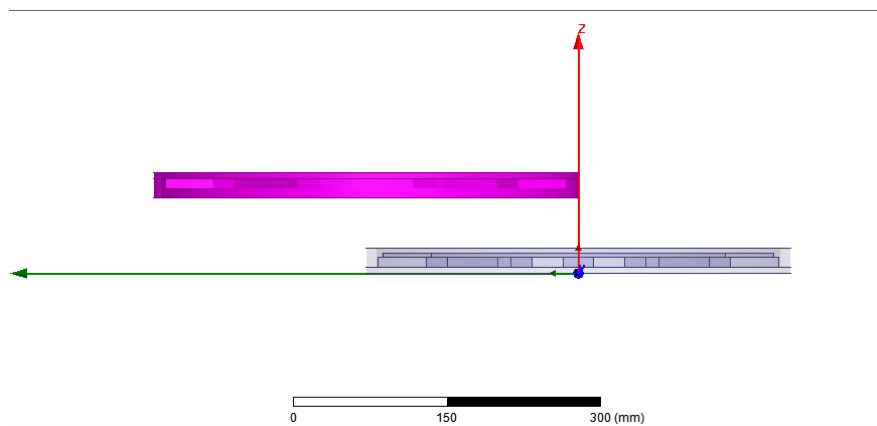
Διάγραμμα 3.4: Μετακινήσεις φερρίτη και τυλιγμάτων με αντίστοιχες ισχύς.

3.3 Επίδραση της οριζόντιας μετατόπισης και του διακένου στην μεταφορά ισχύος

Προηγουμένως εξετάστηκε πώς επηρεάζουν τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης τη μεταφερόμενη ισχύ. Σε κάθε προσομοίωση το διάκενο μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ήταν σταθερό και ίσο με 5 εκατοστά, ενώ η οριζόντια μετατόπιση μεταξύ των δύο συζευκτών ήταν μηδενική (το δευτερεύον δηλαδή ήταν τοποθετημένο ακριβώς πάνω από το πρωτεύον). Στην υποενότητα αυτή θα μελετήσουμε την επίδραση της μετατόπισης και του διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ.

3.3.1 Επίδραση της οριζόντιας μετατόπισης στη μεταφερόμενη ισχύ

Σ' αυτό το σημείο θα μελετήσουμε την μετατόπιση στην οριζόντια κατεύθυνση δηλαδή την απόκλιση στην κατακόρυφη ευθυγράμμιση των δύο διατάξεων (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Οριζόντια μετατόπιση κυκλικής διάταξης.

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με τον τύπο 3.4 η βέλτιστη μεταδιδόμενη ισχύς παρατηρείται όταν η εξωτερική ακτίνα του πηνίου βρίσκεται στο 92% της ακτίνας της διάταξης. Με στόχο τη μεταφορά της μέγιστης δυνατής ισχύος, θα διατηρήσουμε αυτά τα χαρακτηριστικά για τις ακόλουθες προσομοιώσεις.

- Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι μετρήσεις για την κυκλική διάταξη των 420mm με τον φερρίτη και τα τυλίγματα σε θέση που δίνει βέλτιστη δυνατή ισχύ, σύμφωνα με τον τύπο 3.4 και για ένα διάκενο ίσο με 50mm..

Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	115,89	115,79	52,502	3954,267
50	114,78	114,72	45,61	3012,079
100	112,89	112,99	32,169	1521,32
150	111,68	111,63	19,422	561,2964
200	111,11	111,23	8,7882	115,3356
270	111,49	111,44	2,2055	7,250339
300	111,4	111,37	4,786	34,16351
360	110,77	110,73	5,2662	41,60205
400	110,54	110,46	3,8272	22,02635
420	110,42	110,53	3,1875	15,26882

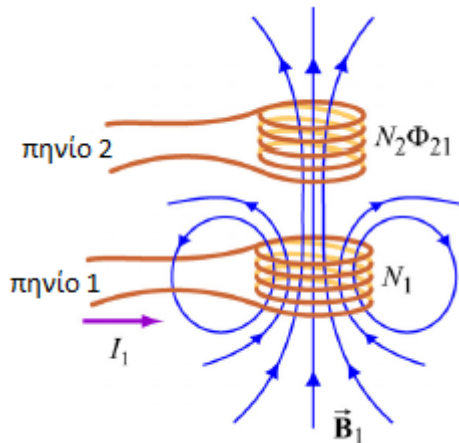
Πίνακας 3.14: Μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση με διάκενο 50mm

Παρατηρούμε στο Διάγραμμα 3.5 ότι η ισχύς σχεδόν μηδενίζεται για οριζόντια μετατόπιση ίση με 270mm. Στη συνέχεια βλέπουμε μια μικρή αύξηση της ισχύος με ένα τοπικό μέγιστο για μετατόπιση 360mm για να αρχίσει πάλι να μειώνεται έως τα 420mm όπου η μια διάταξη δεν καλύπτει καθόλου την άλλη.



Διάγραμμα 3.5: Τιμές ισχύος για οριζόντιες αποκλίσεις της κυκλικής διάταξης με τυλίγματα-φerrίτη σε βέλτιστες θέσεις και διάκενο 5cm.

Σχετικά με τη συμπεριφορά της διάταξης για μετατόπιση ίση με 360mm (το τοπικό δηλαδή μέγιστο που παρουσιάζεται στη μεταφερόμενη ισχύ), αρκεί να θεωρήσουμε δύο πηνία, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Δύο συζευγμένα πηνία.

Το κάτω πηνίο που ονομάζεται πηνίο 1, έχει N_1 ελίγματα και διαρρέεται από ρεύμα I_1 . Έτσι δημιουργείται μαγνητικό πεδίο B_1 το οποίο εκτός του ότι περιβάλλει το πρώτο πηνίο, περιβάλλει και το πηνίο 2 που βρίσκεται από πάνω του. Το πηνίο 2 έχει N_2 ελίγματα. Θεωρώντας ως Φ_{21} την μαγνητική ροή που διέρχεται από ένα έλιγμα του πηνίου 2 και οφείλεται στο ρεύμα I_1 :

$$\Phi_{21} = \iint_{\pi\eta\nu\iota\omicron 2} \vec{B}_1 * d\vec{A}_2 \quad (3.5)$$

Η μαγνητική ροή, επομένως που διέρχεται από το δευτερεύον τύλιγμα εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο που διέρχεται από την επιφάνεια του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Η αμοιβαία επαγωγή δίνεται από τον τύπο:

$$M_{21} = \left(\frac{N_2 * \Phi_{21}}{I_1} \right) \quad (3.6)$$

Και η μη αντισταθμισμένη ισχύς από τον προαναφερμένο τύπο:

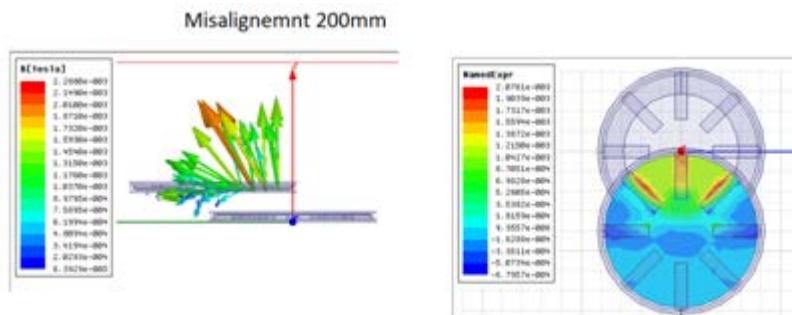
$$P_{su} = \frac{2\pi f M^2 I_1^2}{L_2} \quad (3.7)$$

Από τους τρεις παραπάνω τύπους προκύπτει εν τέλει:

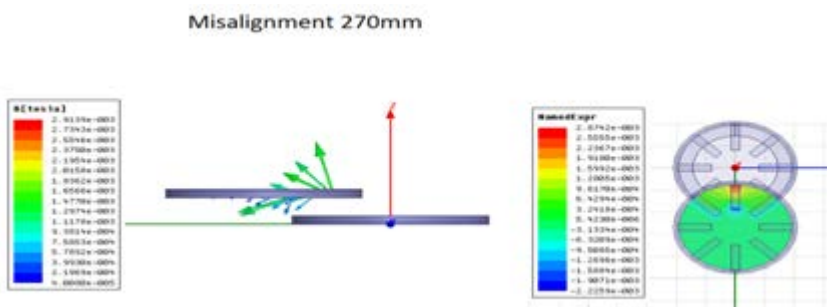
$$P_{su} = \frac{2\pi f \left(\frac{N_2^*}{I_1} \iint \pi \eta \nu_{i0} \vec{B}_1 * d\vec{A}_2 \right)^2 I_1^2}{L_2} \quad (3.87)$$

Από τον παραπάνω τύπο εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το διανυσματικό άθροισμα του μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από την επιφάνεια που καλύπτει το δευτερεύον πηνίο τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η αμοιβαία επαγωγή άρα και η μη αντισταθμισμένη ισχύς που είναι ανάλογη του τετραγώνου της αμοιβαίας επαγωγής.

Σχετικά με το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου, είναι φανερό από το Σχήμα 3.6α ότι για μία μικρή μετατόπιση, ίση με 200mm, κυριαρχεί το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου προς την πάνω πλευρά του δευτερεύοντος όπως φαίνεται στην αντίστοιχη εικόνα.

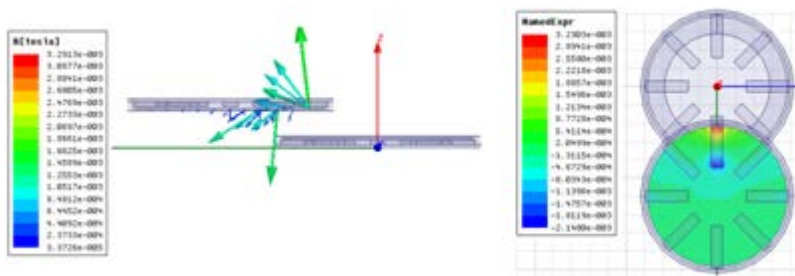


(a)



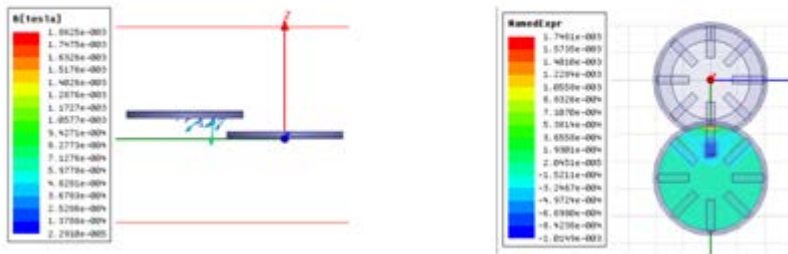
(b)

Misalignment: 300mm



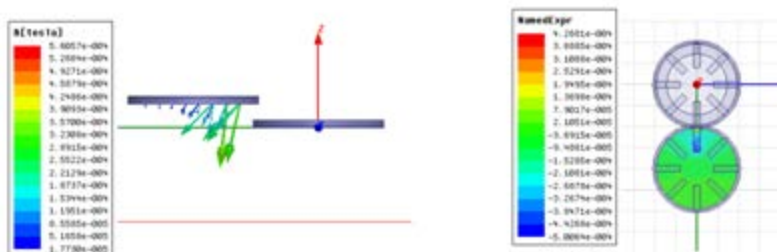
(c)

Misalignment 360mm



(d)

Misalignment: 400mm



(e)

Σχήμα 3.6: Διαγνωστικό άθροισμα και απεικόνιση μαγνητικού πεδίου για (a) 200mm, (b) 270mm, (c) 300mm, (d) 360mm και (e) 400mm

Οι τιμές της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια του pick-up για διάφορες μετατοπίσεις δίνονται στον πίνακα 3.15 που ακολουθεί.

Οριζόντια μετατόπιση (mm)	Πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)
200	22,3
270	-0,11
300	-6,4
360	-10,7
400	-9,1

Πίνακας 3.15: Μαγνητική ροή για διάφορες μετατοπίσεις στον οριζόντιο άξονα.

Θετικές ή αρνητικές τιμές για τη μαγνητική ροή υποδεικνύουν ότι κυριαρχεί το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου προς τα πάνω ή προς τα κάτω αντίστοιχα (όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6).

Για μία μετατόπιση ίση με 270mm, το μαγνητικό πεδίο διέρχεται από την επιφάνεια του pick-up και προς τις δύο πλευρές, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.6b. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μηδενισμό σχεδόν της μαγνητικής ροής, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.15.

Σε μία μετατόπιση ίση με 300mm, σε ένα σημαντικό μέρος της επιφάνειας του δευτερεύοντος το μαγνητικό πεδίο συνεχίζει να διέρχεται προς τα πάνω, με αποτέλεσμα μία μικρή αρνητική τιμή για το συνολικό άθροισμα της μαγνητικής ροής (Σχήμα 3.6c).

Για ακόμα μεγαλύτερες μετατοπίσεις (Σχήμα 3.6d και μετατόπιση ίση με 360mm) κυριαρχεί το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου προς τα κάτω, με αποτέλεσμα το απόλυτο άθροισμα της μαγνητικής ροής να λαμβάνει μία σχετικά μεγαλύτερη τιμή. Δεδομένου ότι η μεταφερόμενη ισχύς εξαρτάται από το τετράγωνο της αμοιβαίας επαγωγής (Τύπος 3.7), και γνωρίζοντας ότι η αμοιβαία επαγωγή είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής (Τύπος 3.6), παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο στην τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για τη συγκεκριμένη μετατόπιση.

Καθώς το δευτερεύον απομακρύνεται περαιτέρω από το πρωτεύον, (για παράδειγμα για μετατόπιση ίση με 400mm–Σχήμα 3.6-e) το μαγνητικό πεδίο συνεχίζει να διέρχεται προς τα κάτω σχετικά με την επιφάνεια του δευτερεύοντος, ωστόσο οι μεγάλες μετατοπίσεις περιορίζουν σημαντικά την τιμή του μαγνητικού πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μαγνητική ροή να λαμβάνει πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές τιμές, με αποτέλεσμα και τις σχεδόν μηδενικές τιμές της μεταφερόμενης ισχύος.

Επισημαίνεται ότι αν και εμφανίζεται ένα τοπικό μέγιστο στη μεταφερόμενη ισχύ για μετατόπιση ίση με 360mm, η τιμή της μεταφερόμενης ισχύος είναι ιδιαίτερα μικρή: για τη συγκεκριμένη μετατόπιση η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 1,05% σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για μηδενική μετατόπιση. Συμπερασματικά λοιπόν, αν και παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο για μία μεγάλη τιμή μετατόπισης, πρακτικά η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από 270mm.

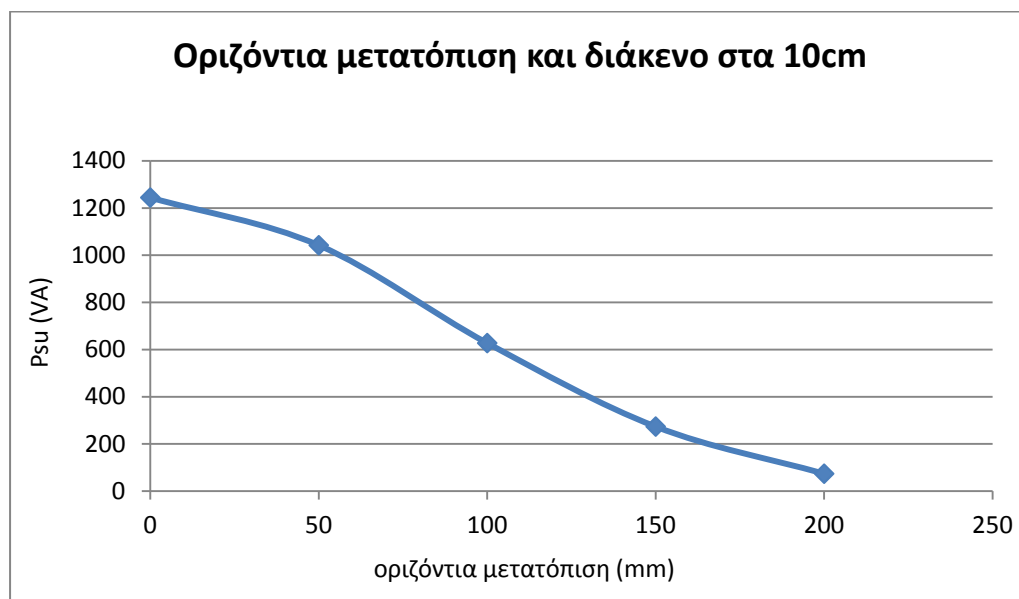
3.3.2 Επίδραση του διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ.

Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση του διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ. Οι προηγούμενες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ένα διάκενο ίσο με 5cm. Πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες προσομοιώσεις για ένα διάκενο ίσο με 10cm και τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 3.16. Σε αυτές τις σειρές προσομοιώσεων κάνουμε πάλι μετακινήσεις στην κατεύθυνση του οριζόντιου άξονα από 0mm έως και 200mm κατά 50mm κάθε φορά.

Μετακίνηση φερρίτη +20mm και τυλιγμάτων +50mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	112,03	112,11	28,979	1244,25031
50	111,82	111,8	26,483	1042,02
100	111,41	111,41	20,512	627,302707
150	110,99	110,97	13,512	273,287021
200	110,78	110,76	6,9984	73,4513692

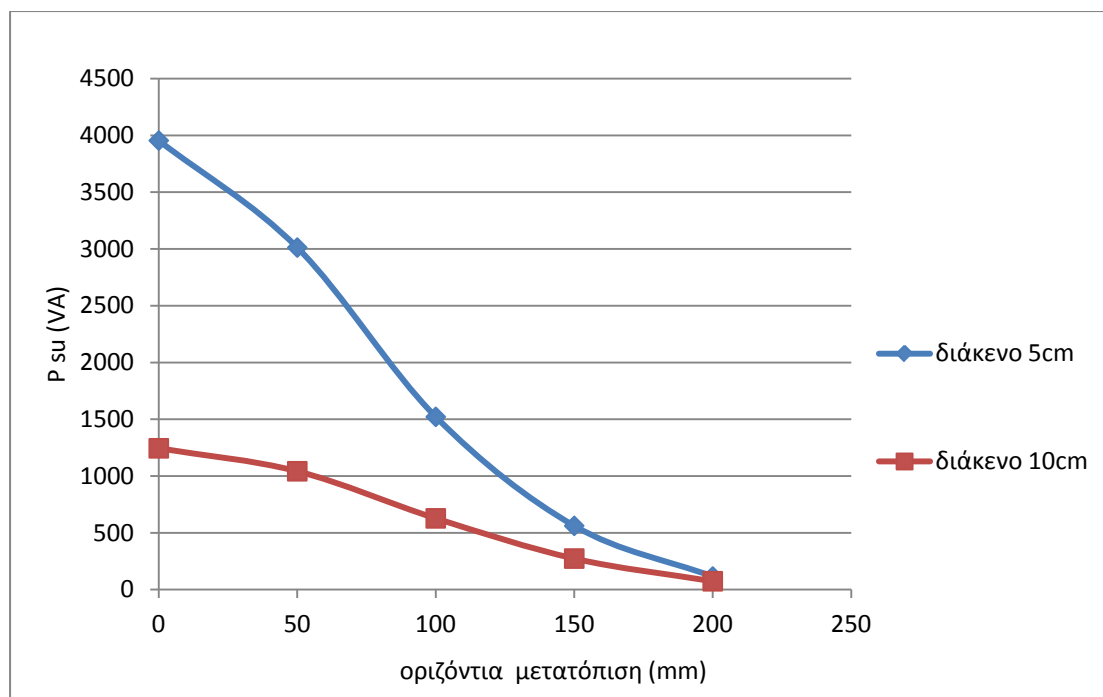
Πίνακας 3.16: Μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση με διάκενο 100mm.

Το διάγραμμα για τις παραπάνω μετρήσεις δίνεται παρακάτω (διάγραμμα 3.7)



Διάγραμμα 3.7: Ισχύς και οριζόντια μετατόπιση σε διάκενο 10cm.

Παρατηρούμε ότι για μία μετατόπιση ίση με 200mm η ισχύς σχεδόν μηδενίζεται και φτάνει στο 5.9% της αρχικής τιμής (για μηδενική μετατόπιση):



Διάγραμμα 3.8: Σύγκριση για οριζόντιες μετατοπίσεις της κυκλικής διάταξης των 420mm στα δύο ξεχωριστά διάκενα 5 και 10 cm.

Στο Διάγραμμα 3.8 φαίνεται ότι και για τα δύο εξεταζόμενα διάκενα για μία μετατόπιση ίση με 200mm η μεταφερόμενη ισχύς μειώνεται στο 2,9% και 5,9% , σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή μηδενικής μετατόπισης για διάκενο 5 και 10 εκατοστών αντίστοιχα. Η μεταφερόμενη ισχύς επομένως φαίνεται να μηδενίζεται σε περίπτωση που η μετατόπιση είναι ίση με 200mm, ανεξάρτητα της τιμής του διακένου. Επίσης παρατηρείται ότι για ένα μεγαλύτερο διάκενο η μεταφερόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη για κάθε εξεταζόμενη μετατόπιση. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.8, η μεταβολή της ισχύος σε σχέση με την οριζόντια μετατόπιση είναι λιγότερο έντονη σε περίπτωση ενός μικρότερου διακένου.

3.4 Επίδραση του συνολικού μεγέθους της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ

Σ αυτό το σημείο θα δούμε πως επιδρά το μέγεθος της διάταξης στην ισχύ που λαμβάνουμε. Αυτό θα το δούμε μελετώντας δύο κυκλικές διατάξεις μεγαλύτερες από την αρχική, μια διαμέτρου 600mm και μια διαμέτρου 800mm.

3.4.1 Κυκλική διάταξη 600mm

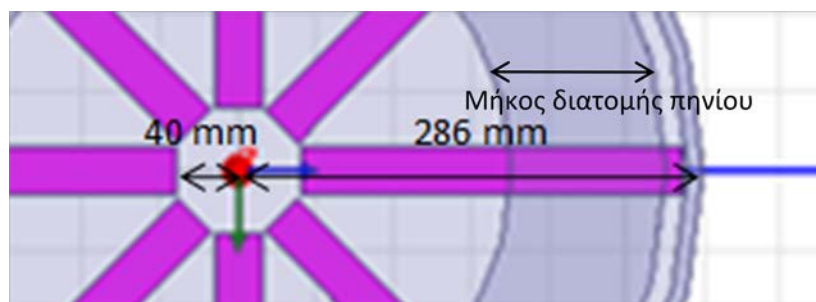
Αρχικά θα μελετήσουμε μία κυκλική διάταξη διαμέτρου 600mm.

Η διάταξη διαμέτρου 600mm θα κατασκευασθεί με φερρίτες και πηνία σε τέτοια θέση που να δίνει την μεγαλύτερη δυνατή ισχύ. Σύμφωνα με τον τύπο (3.4) η εξωτερική ακτίνα του πηνίου θα πρέπει να βρίσκεται στο 92% της ακτίνας της διάταξης. Οπότε για να βρούμε την εξωτερική ακτίνα του τυλίγματος της διάταξης των 600mm θα πολλαπλασιάσουμε αυτόν τον λόγο με την ακτίνα της νέας μας διάταξης:

$$\text{Εξωτερική ακτίνα πηνίου} = \text{Λόγος} * \text{ακτίνα διάταξης} = 0,92 * 300 = 276 \text{ mm}$$

Όπως είδαμε και από το διάγραμμα 3.1, οι φερρίτες πρέπει να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο μήκος για τη μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος. Καθορίζουμε, επομένως, το μήκος των φερριτών, ώστε να μην ακουμπάει ο ένας φερρίτης στον διπλανό αλλά και κάθε φερρίτης

να μην ακουμπάει στον αλουμινένιο δακτύλιο. Σύμφωνα με το παραπάνω, το μήκος των φερριτών καθορίζεται ίσο με 246mm, η εσωτερική άκρη θα απέχει 40mm από το κέντρο της διάταξης ενώ η εξωτερική 286mm, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Θέση φερρίτη.

Η αναφορά [3] καθορίζει το μήκος της διατομής του πηνίου ως το 40% του μήκους των φερριτών. Αυτή η προσέγγιση θα ακολουθηθεί για την κατασκευή της διάταξης των 600mm. Το μήκος των φερριτών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 είναι 240mm, οπότε η συνολική διατομή του καλωδίου litz υπολογίζεται ως:

$$\text{Μήκος διατομής πηνίου} = 0,4 * 246 \approx 100\text{mm}$$

Αρα αφού η διατομή του πηνίου θα είναι 100mm η εσωτερική ακτίνα υπολογίζεται:

$$\text{Εσωτερική ακτίνα πηνίου} = \text{εξωτερική ακτίνα πηνίου} - \text{διατομή πηνίου} = 276 - 100 = 176\text{mm}$$

Τα ελίγματα υπολογίζονται ως εξής:

$$\text{Ελίγματα} = \frac{\text{μήκος διατομής πηνίου}}{\text{διάμετρος ελίγματος}} = \frac{100 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 25$$

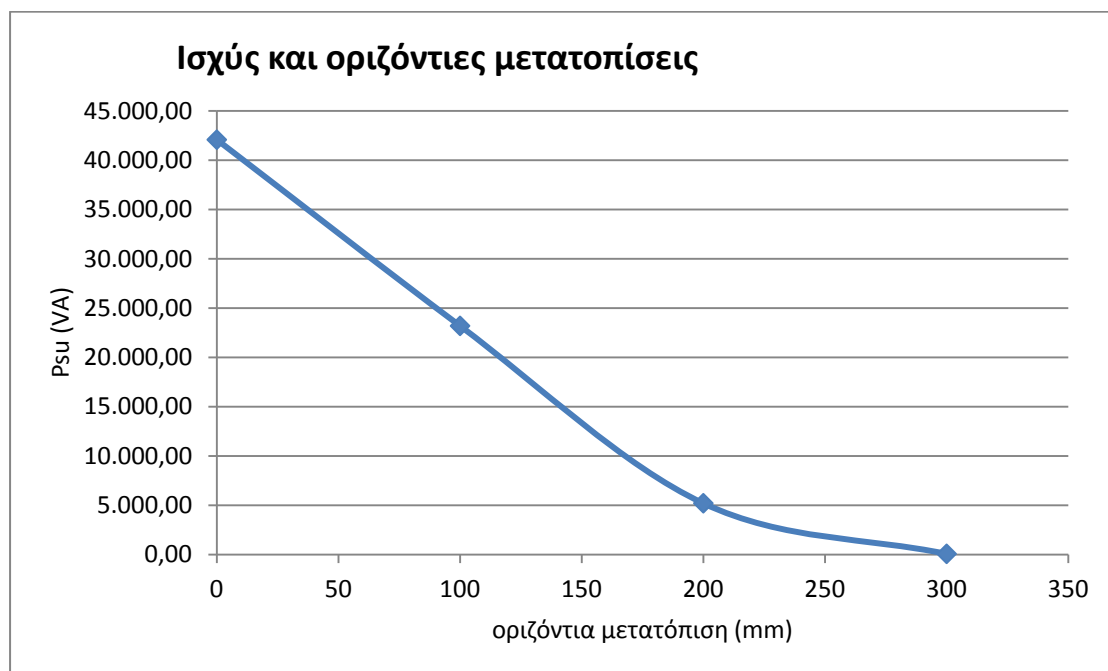
Σχετικά με το ρεύμα, θεωρούμε και πάλι ότι κάθε έλιγμα διαρρέεται από 23A [3].

Στις προηγούμενες προσομοιώσεις η αμοιβαία επαγωγή υπολογιζόταν με μία ακρίβεια ίση με 0.1μH. Πιο συγκεκριμένα, στο Maxwell η τιμή convergence στην ανάλυση για την αμοιβαία επαγωγή ήταν ίση με 0.1μH. Για μεγαλύτερο αριθμό ελιγμάτων αναμένεται οστόσο μία αύξηση στην τιμή της αμοιβαίας επαγωγής. Αν διατηρηθεί η παραπάνω ακρίβεια (0.1μH) για μεγαλύτερες τιμές στην αμοιβαία επαγωγή οι προσομοιώσεις θα απαιτούν πολύ μεγαλύτερο χρόνο για να ολοκληρωθούν. Για τη μείωση του χρόνου των προσομοιώσεων, αλλά και για μία ικανοποιητικά ακριβή λύση, αυξάνουμε το convergence από 0.1 σε 0.5μH. Για να γίνει αυτό επιλέγουμε στο Maxwell Analysis, Add solution setup και στην καρτέλα Convergence τοποθετούμε την αντίστοιχη επιθυμητή τιμή.

Εδώ όπως και προηγουμένως θα κάνουμε μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση που θα ξεκινάνε από 0mm και θα καταλήγουνε μέχρι 300mm απομάκρυνση μεταξύ των δύο rad.

Διάταξη 600mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	638,1	638,72	402,25	42.079,15
100	609,04	609,19	291,66	23.194,57
200	577,37	577,51	134,51	5.203,97
300	572,51	572,47	15,925	73,59

Πίνακας 3.17:Μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση στην βέλτιστη δυνατή θέση φερριτών και τυλιγμάτων με διάκενο 50mm.



Διάγραμμα 3.18: Αντισταθμισμένη ισχύς για διάφορες τιμές μετατοπίσεων στην διάταξη 600mm με διάκενο 5cm.

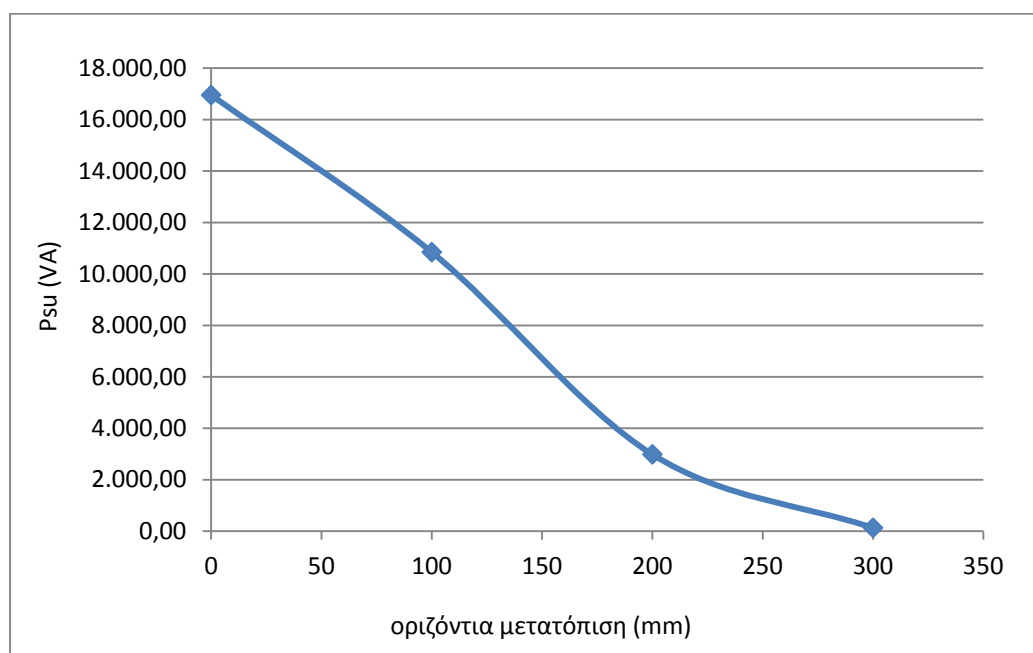
Παρατηρείται ότι σε περίπτωση μετατόπισης ίσης με 300mm η αποδιδόμενη ισχύς μειώνεται στο 0,17% της αρχικής τιμής. Όπως βλέπουμε και πάλι παρατηρείται μία υπερβολική μείωση της μεταφερόμενης ισχύος όταν η μετατόπιση γίνει ίση με το 50% της διαμέτρου της διάταξης που εξετάζεται.

- Διάκενο 100mm

Για αυξημένο διάκενο στα 100mmθα κάνουμε πάλι προσομοιώσεις από 0 έως 300mm. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 3.18.

Διάταξη 600mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	586,56	587,37	244,85	16.954,06
100	578,16	578,13	194,31	10.848,01
200	567,22	565,7	100,88	2.988,20
300	564,36	563,6	21,23	132,84

Πίνακας 3.18: Μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση στην βέλτιστη δυνατή θέση φερριτών και τυλιγμάτων με διάκενο 100mm.



Διάγραμμα 3.19: Σχέση ισχύος – οριζόντιας μετατόπισης για διάταξη 600mm και διάκενο 10cm.

Για μία οριζόντια μετατόπιση ίση με 300mm η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με το 0,78% της μεταφερόμενης ισχύος σε περίπτωση μηδενικής μετατόπισης. Παρόμοια δηλαδή με το διάκενο των 50mm, αλλά και με τη μικρότερη διάταξη διαμέτρου 420mm, παρατηρείται ότι για μία μετατόπιση ίση με το μισό της διαμέτρου της διάταξης, η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται.

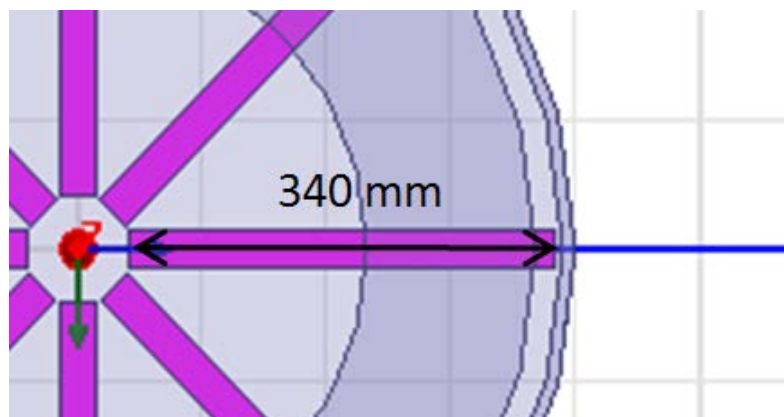
3.4.2 Κυκλική διάταξη 800mm

Για να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ, εξετάζεται, επίσης, και μία διάταξη διαμέτρου 800mm. Εξετάζουμε αρχικά ένα διάκενο ίσο με 100mm.

Για την κατασκευή της διάταξης των 800mm ακολουθούμε παρόμοια διαδικασία με τη διάταξη διαμέτρου 600mm. Πάλι ο λόγος της εξωτερικής ακτίνας του πηνίου προς την συνολική ακτίνα της διάταξης θα πρέπει να είναι 92%. Οπότε προκύπτει:

$$\text{Εξωτερική ακτίνα πηνίου} = 92\% * \text{ακτίνα διάταξης} = 0,92 * 400 = 368\text{mm}$$

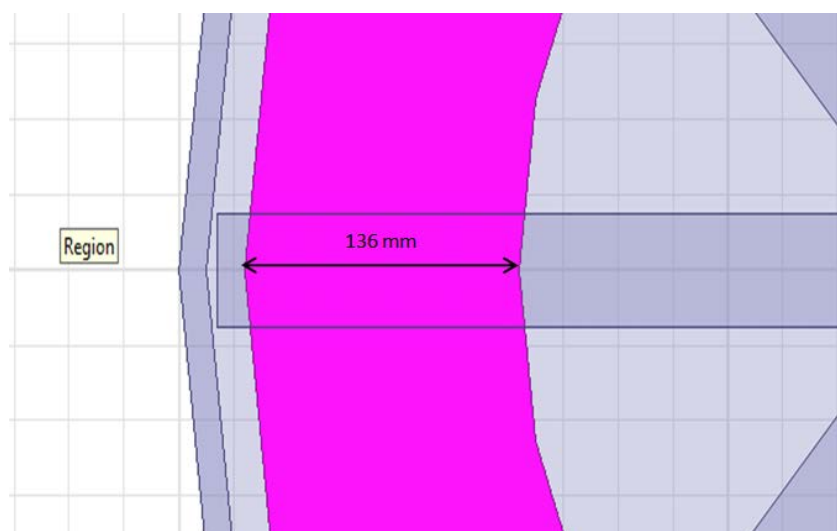
Το μήκος των φερριτών όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Επομένως το μήκος αυτό καθορίζεται ίσο με 340mm και η ράβδος ξεκινάει από απόσταση 40mm από το κέντρο της διάταξης.



Σχήμα 3.8: Μήκος ράβδων φερρίτη.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η διατομή του πηνίου θα είναι ίση με το 40% του μήκους των φερριτών [3] οπότε:

$$\text{Μήκος διατομής πηνίου} = 0,4 * 340 \approx 136\text{mm}$$



Σχήμα 3.9: Μήκος διατομής πηνίου διάταξης 800mm .

Άρα ξέροντας την εξωτερική ακτίνα μπορούμε πλέον να βρούμε την εσωτερική:

$$\text{Εσωτερική ακτίνα πηνίου} = 368 - 136 = 232\text{mm}$$

Για τον αριθμό των ελιγμάτων έχουμε:

$$\text{Ελίγματα} = \frac{\text{μήκος διατομής coil}}{\text{διάμετρος ελίγματος}} = \frac{136 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 34$$

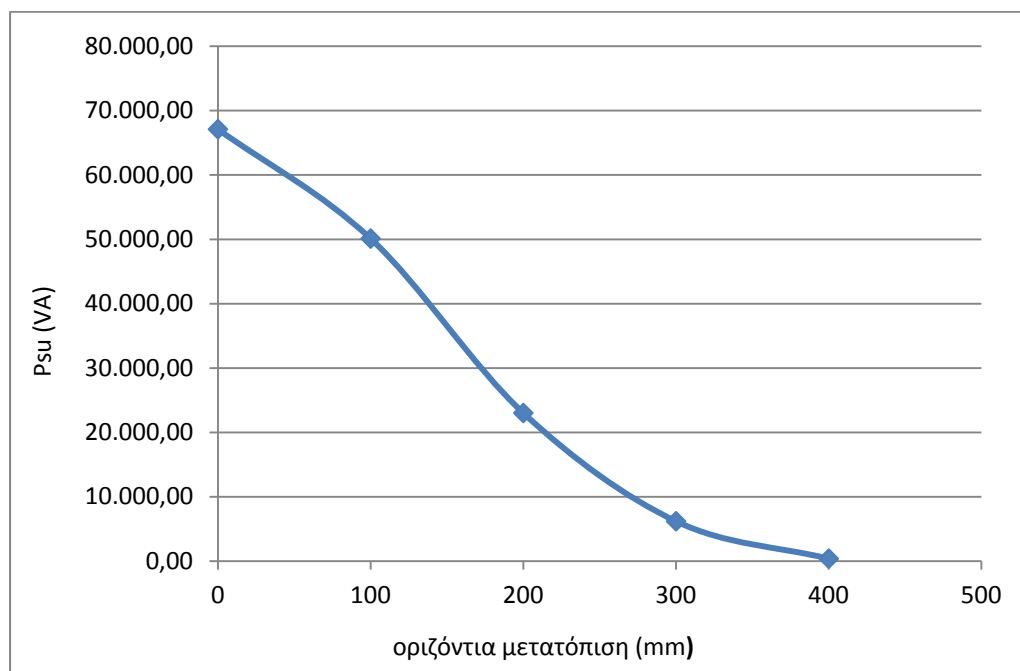
Όπως περιγράφηκε και προηγουμένως η αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων αναμένεται να οδηγήσει σε μία αυξημένη τιμή της αμοιβαίας επαγωγής. Αν και πάλι είναι επιθυμητή μία ακρίβεια ίση με 0.5μH θα πρέπει να αναμένουμε και σημαντική αύξηση στο χρόνο πραγματοποίησης των προσομοιώσεων. Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων σε μικρότερο χρονικό διάστημα, αλλά και για την επίτευξη μιας ικανοποιητικής ακρίβειας, η τιμή convergence για την ακρίβεια της τιμής της αμοιβαίας επαγωγής επιλέγεται ίση με 1μH.

Στις προηγούμενες προσομοιώσεις τα όρια του Region, της περιοχής δηλαδή εντός της οποίας ορίζουμε το πρόβλημα μαγνητοστατικής ανάλυσης, είχαν καθοριστεί ως μία μικρή περιοχή όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Η σημαντική αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων θα δημιουργήσει ιδιαίτερα ενισχυμένα μαγνητικά πεδία που επιτάσσουν την επίλυση του προβλήματος σε μία μεγαλύτερη περιοχή. Για το λόγο αυτό τα όρια της Region θεωρούνται ίσα με 70cm ως προς όλους τους άξονες.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν αφορούν μετατοπίσεις από 0mm μέχρι 400mm και φαίνονται στον Πίνακα 3.19.

Διάταξη 800mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	1461,6	1462,1	768,55	67.104,63
100	1439,6	1438,8	658,84	50.112,35
200	1397,9	1396,4	439,83	23.011,51
300	1370,3	1370,8	225,99	6.188,56
400	1371,2	1371,6	56,179	382,21

Πίνακας 3.19: Μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση στην βέλτιστη δυνατή θέση φερριτών και τυλιγμάτων με διάκενο 100mm.



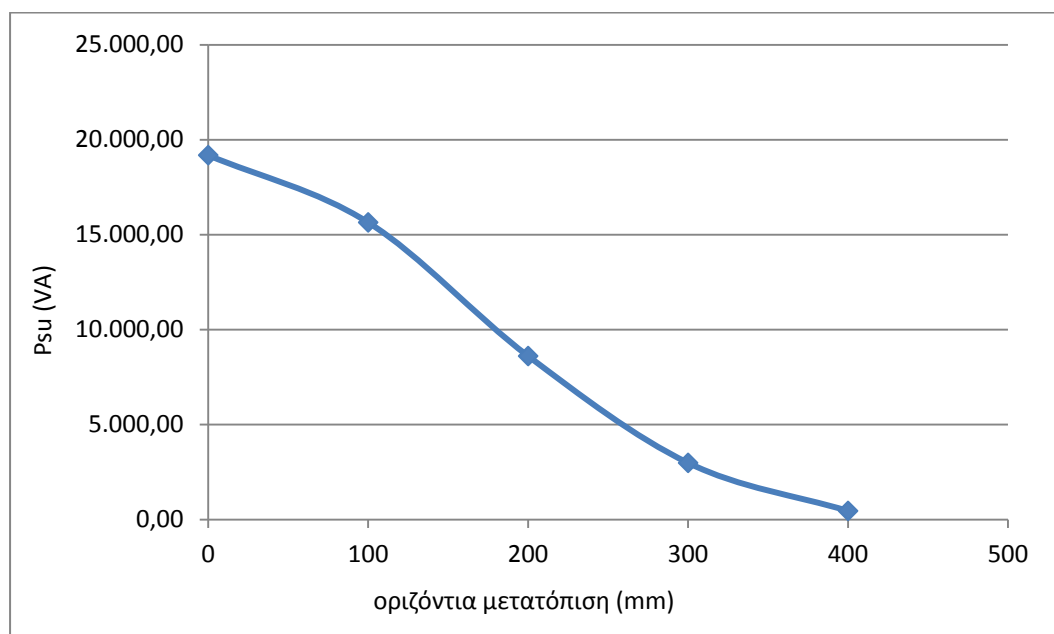
Διάγραμμα 3.20: Απεικόνιση σχέσης οριζόντιας μετατόπισης με ισχύ για διάταξη 800mm και διάκενο 100mm.

Παρατηρείται και πάλι ότι για μία μετατόπιση ίση με το μισό της διαμέτρου της διάταξης (μετατόπιση 400mm) η ισχύς μειώνεται στο 0,57% της ισχύος για μηδενική μετατόπιση.

Πραγματοποιούνται επίσης προσομοιώσεις για διάκενο ίσο με 200mm, οι οποίες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 3.20 και αφορούν μετατοπίσεις από 0mm μέχρι 400mm.

Διάταξη 800mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	1369,5	1368,8	397,64	19.187,81
100	1363,6	1365,4	358,64	15.647,42
200	1357,9	1357,7	265,28	8.609,75
300	1351,6	1350	155,72	2.983,60
400	1350,5	1350,1	60,665	452,7889

Πίνακας 3.20: Μετρήσεις για οριζόντια μετατόπιση στην βέλτιστη δυνατή θέση φερριτών και τυλιγμάτων με διάκενο 200mm.

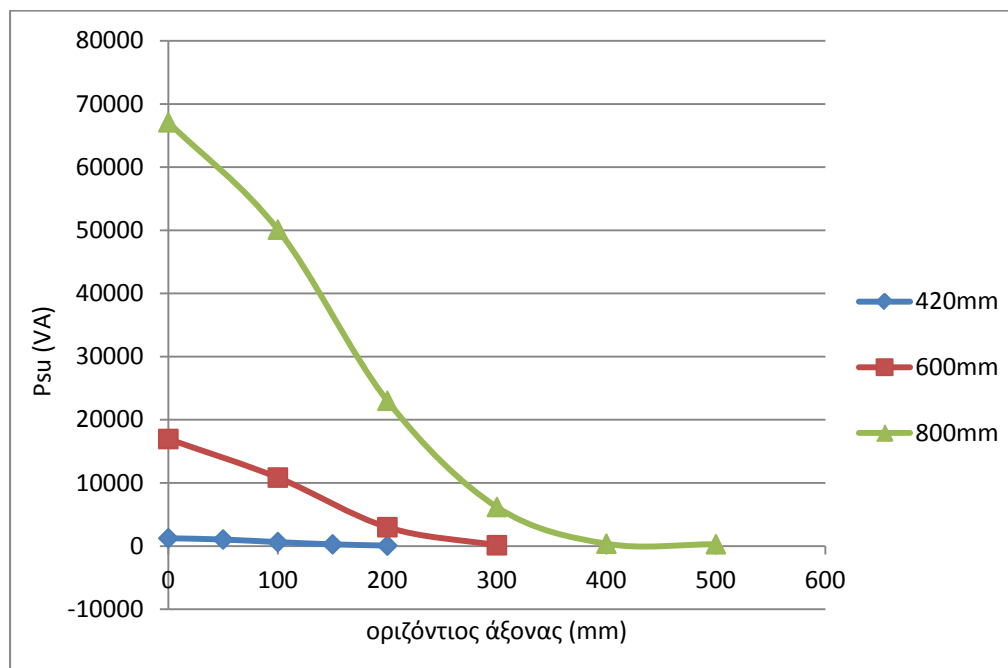


Διάγραμμα 3.21: Αποτελέσματα μετρήσεων για οριζόντια μετατόπιση διάταξης 800mm με διάκενο ανάμεσα στα pads 200mm.

Και για τη συγκεκριμένη περίπτωση διακένου που εξετάζεται παρατηρείται ότι για μία μετατόπιση ίση με το μισό της διαμέτρου της διάταξης, η μεταφερόμενη ισχύς μειώνεται στο 2,4% της ισχύος για μηδενική μετατόπιση.

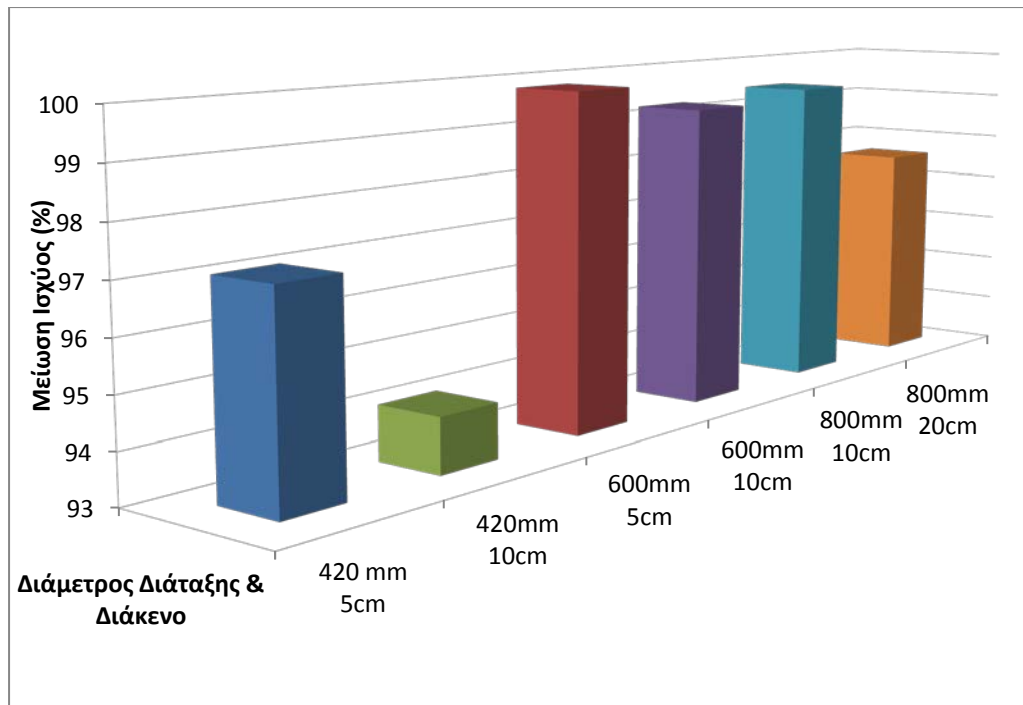
3.4.3 Συγκρίσεις μεταξύ των κυκλικών διατάξεων διαφόρων μεγεθών

Οι καμπύλες που αφορούν τις μετατοπίσεις για τις τρεις διατάξεις με κοινό διάκενο στα 10cm απεικονίζονται στο Διάγραμμα 3.22



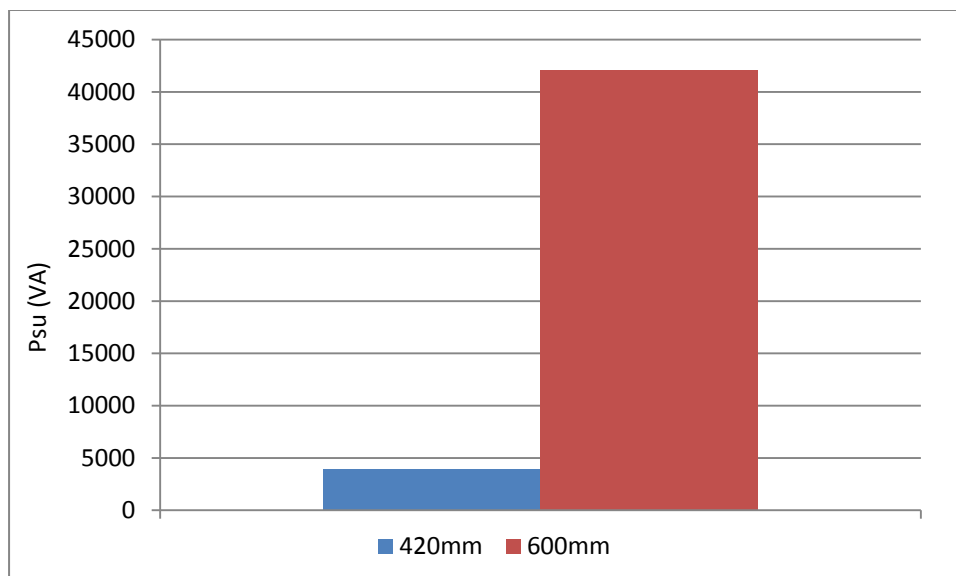
Διάγραμμα 3.22: Ισχύς για οριζόντιες μετακινήσεις των διατάξεων 420mm, 600mm και 800mm για διάκενο 10cm.

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι για όλες τις εξεταζόμενες διατάξεις η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται σε περίπτωση που η οριζόντια μετατόπιση γίνει ίση με το 50% της διαμέτρου της διάταξης. Το παραπάνω συμπέρασμα εξάγεται για όλες τις κυκλικές διατάξεις που μελετήθηκαν, ανεξαρτήτου διακένου και ανεξαρτήτου μεγέθους της διάταξης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.23.



Διάγραμμα 3.23: Ποσοστό μείωσης της αποδιδόμενης ισχύος για οριζόντια μετατόπιση ίση με το 50% της διαμέτρου διατάξεων 420, 600 και 800mm για διάκενα 5, 10 και 20cm.

Επίσης όσο πιο μεγάλη είναι η διάταξη τόσο μεγαλύτερη ισχύ δύναται να μεταφέρει, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.24. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι για ένα διάκενο ίσο με 5cm, μια μικρή σχετικά αύξηση της διαμέτρου, οδηγεί σε μία σημαντική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος: για μία αύξηση της διαμέτρου κατά 42,8% η ισχύς γίνεται σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερη.

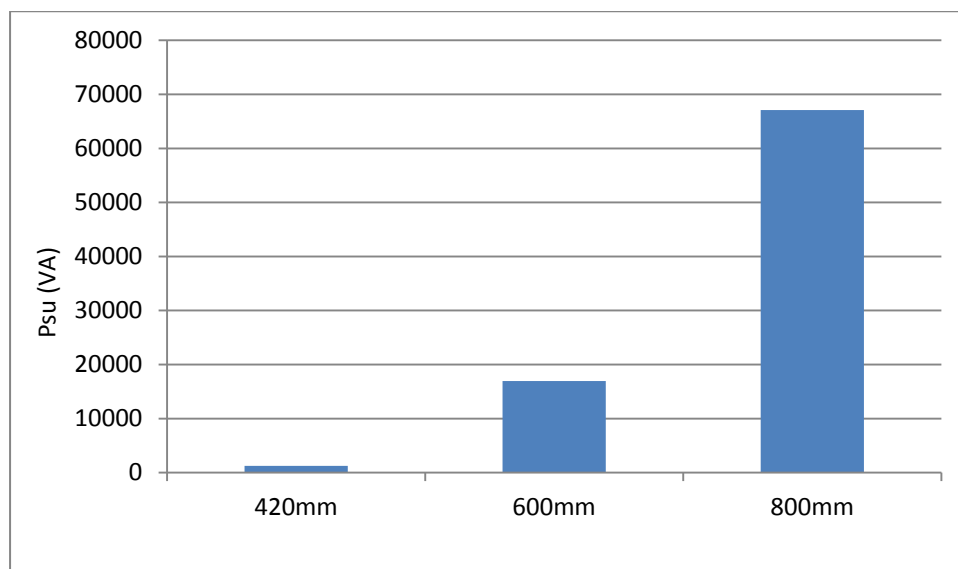


Διάγραμμα 3.24: Μηδενική μετατόπιση και ισχύς για διατάξεις διαμέτρου 420mm και 600mm στα 5cm διάκενο.

Παρόμοια αποτελέσματα αναμένονται και για ένα διάκενο ίσο με 10cm (Διάγραμμα 3.25). Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της διαμέτρου από 420mm σε 600mm οδηγεί σε μία αύξηση της ισχύος 1262%. Μία ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της διαμέτρου της διάταξης οδηγεί σε

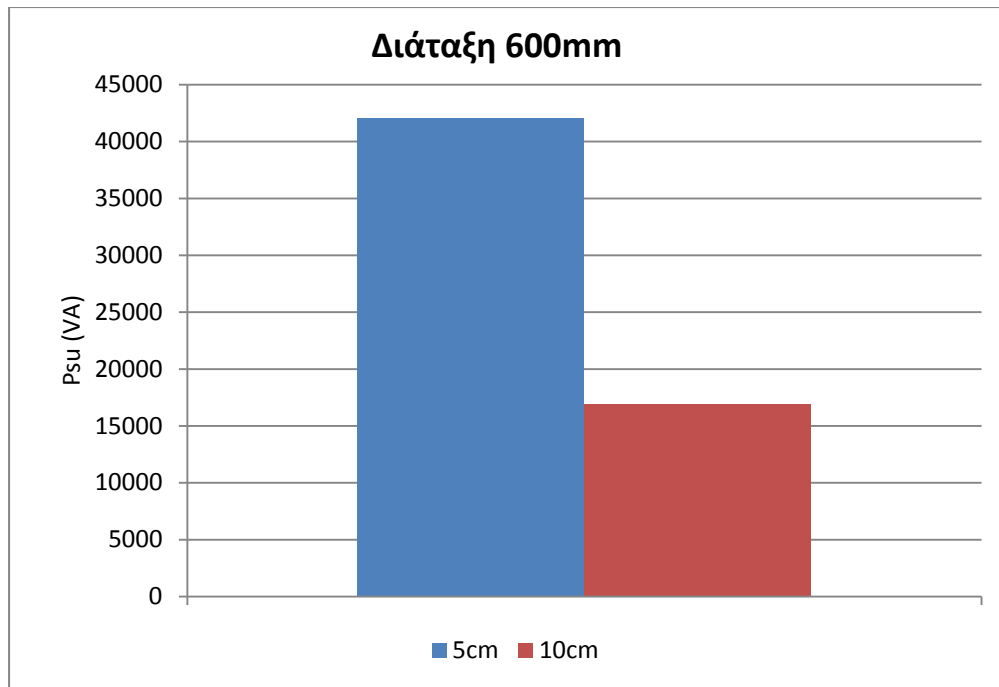
ιδιαίτερα μεγάλα ποσά μεταφερόμενης ισχύος. Για παράδειγμα αυξάνοντας τη διάμετρο στα 800mm παρουσιάζεται μία αύξηση της ισχύος κατά 5293% σε σχέση με τη διάταξη διαμέτρου 420mm.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και με την αύξηση του μεγέθους της διάταξης επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, ωστόσο, παρουσιάζεται μία σημαντικά έντονη μεταβολή της ισχύος ως προς τη μετατόπιση, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.22.



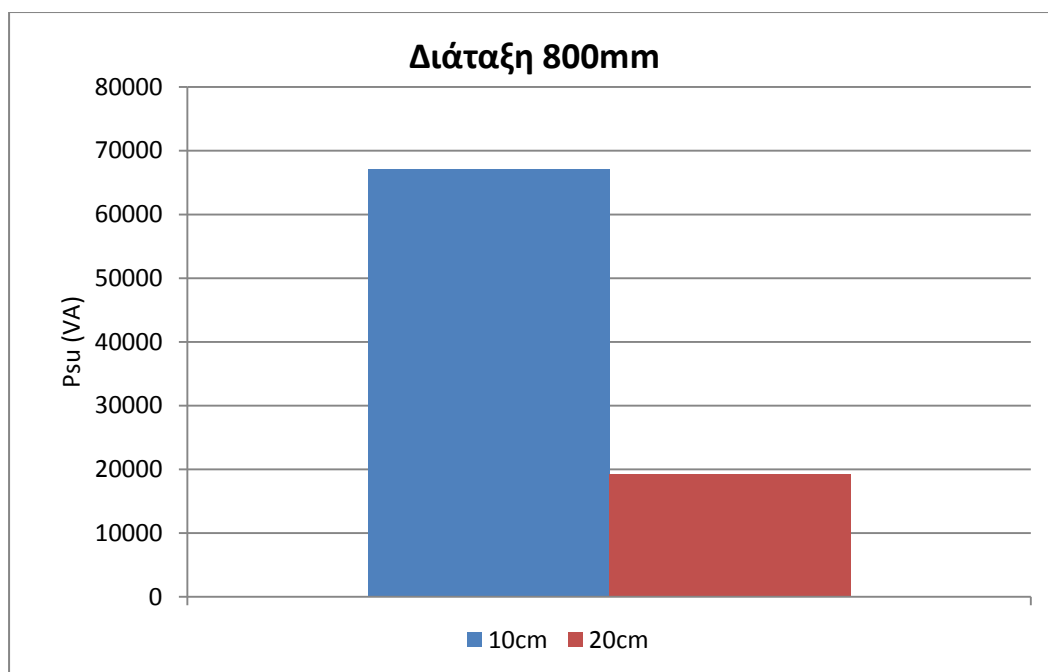
Διάγραμμα 3.25: Μηδενική μετατόπιση και ισχύς για κάθε κυκλική διάταξη στα 10cm.

Σημαντική είναι επίσης και η επίδραση του διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ. Για την κυκλική διάταξη διαμέτρου ίσης με 600mm η μεταφερόμενη ισχύς για μηδενική μετατόπιση σε διάκενο 5 και 10cm απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.26. Πιο συγκεκριμένα, με τον διπλασιασμό του διακένου από 5 σε 10 εκατοστά παρατηρούμε μείωση ισχύος πάνω από 50% για την διάταξη των 600mm.



Διάγραμμα 3.26: Τιμές μη αντισταθμισμένης ισχύος για μηδενική μετατόπιση διάταξης 600mm διαμέτρου σε διάκενα 5 και 10cm.

Παρόμοια αποτελέσματα αναμένονται και για τη διάταξη διαμέτρου 800mm. Η μεταφερόμενη ισχύς για μηδενική μετατόπιση σε διάκενο 10 και 20cm απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.27. Είναι φανερό από το Διάγραμμα ότι η αύξηση του διακένου από 10 σε 20 εκατοστά οδηγεί σε μία σημαντική μείωση της ισχύος που είναι ίση με 71,4%.



Διάγραμμα 3.27: Τιμές μη αντισταθμισμένης ισχύος για μηδενική μετατόπιση διάταξης 800mm διαμέτρου σε διάκενα 10 και 20cm αντίστοιχα

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

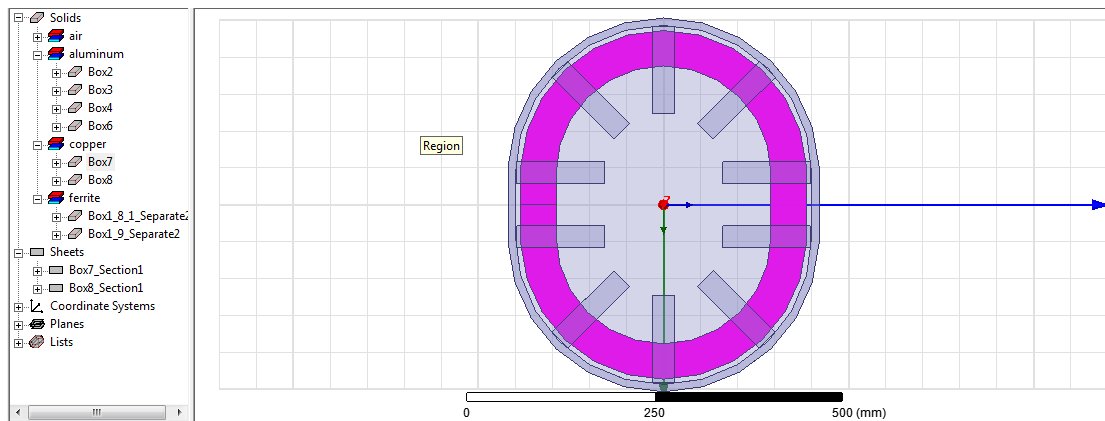
ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΠΑΡΟΜΟΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε κυκλικές διατάξεις με παρόμοια χαρακτηριστικά, ώστε να δούμε πώς η τοποθέτηση των φερριτών δύναται να αυξήσει τη μεταφερόμενη ισχύ. Η μελέτη των διατάξεων αυτών θα οδηγήσει στον προσδιορισμό των βέλτιστων χαρακτηριστικών μίας κυκλικής διάταξης για τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος. Επίσης θα εξεταστεί μια οβάλ διάταξη και θα συγκριθεί με την αντίστοιχη κυκλική, ώστε να εξετάσουμε ποια διάταξη παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά.

4.2 Οβάλ διάταξη

Θεωρούμε αρχικά τον έναν κυκλικό δίσκο διαμέτρου 420mm όπως αυτός που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η οβάλ διάταξη (Σχήμα 4.1) είναι ουσιαστικά μία κυκλική διάταξη με την προσθήκη στο εσωτερικό ενός ορθογωνίου τμήματος.



Σχήμα 4.1: Οβάλ διάταξη.

Θεωρούμε ότι όλοι οι φερριτές ισαπέχουν μεταξύ τους μία απόσταση ίση με c όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 .

$$c = 2 * r * \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (4.1)$$

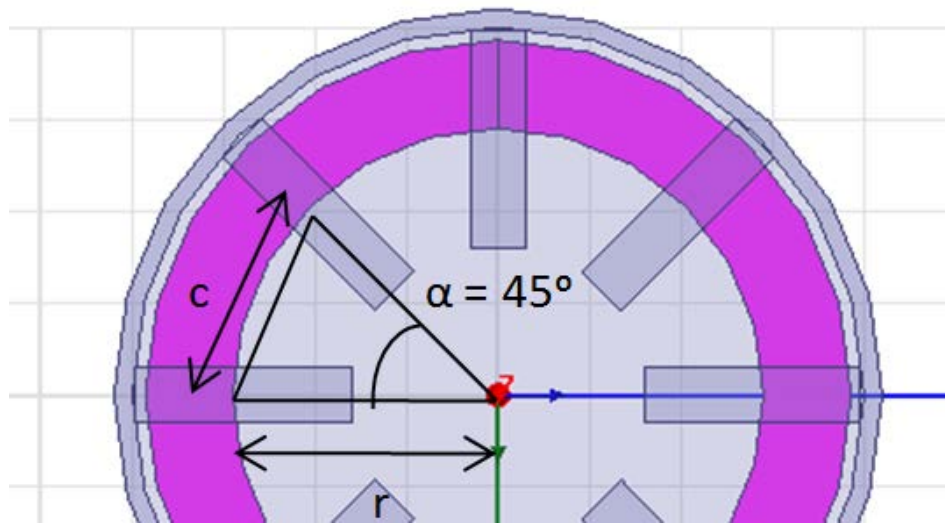
Εδώ r είναι η απόσταση του κέντρου του φερριτή από το κέντρο της διάταξης και υπολογίζεται ως εξής:

$$r = 60 + 20 + \frac{118}{2} = 139 \text{ mm}$$

με 60mm την αρχική απόσταση του φερριτίτη στην κυκλική διάταξη των 420mm, 20mm την μετακίνηση για βέλτιστη μεταφορά ισχύος και 118/2 το κέντρο της ράβδου.

Στον τύπο (4.1) α είναι η γωνία μεταξύ των φερριτιτών, στην κυκλική διάταξη (Σχήμα 4.2), η οποία είναι ίση με:

$$a = \frac{360}{8} = 45^\circ$$



Σχήμα 4.2: Υπολογισμός απόστασης φερριτιτών.

Επομένως σύμφωνα με τον τύπο (4.1) η απόσταση c μεταξύ των φερριτιτών θα είναι:

$$c = 2 * r * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 2 * 139 * \sin\left(\frac{45}{2}\right) = 106,39 \text{ mm} \quad (4.2)$$

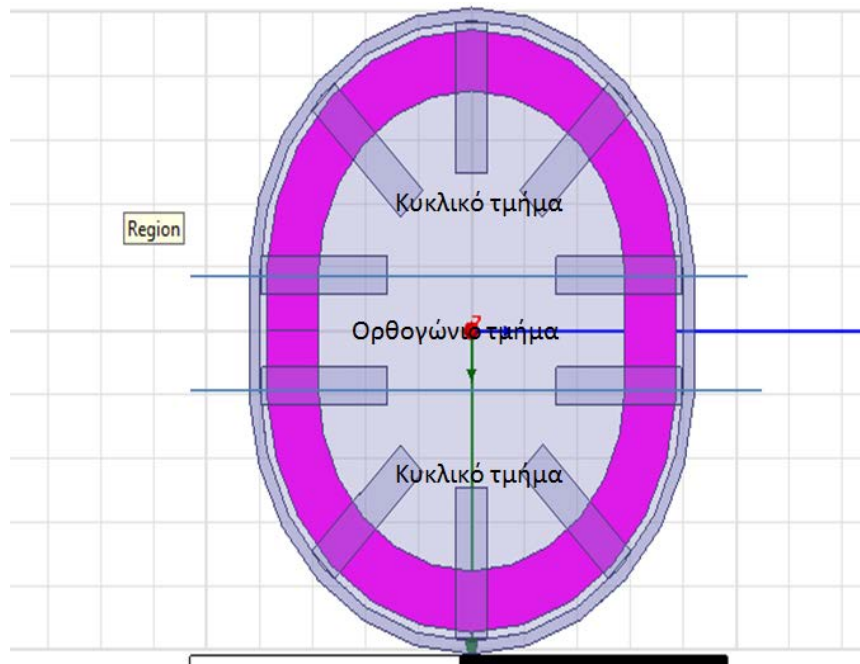
Για να είναι δυνατή μια καλύτερη σύγκριση μεταξύ της οβάλ διάταξης και της κυκλικής διάταξης θα μελετήσουμε μια διάταξη κυκλική με εμβαδό ίσο με αυτό της οβάλ. Η ακτίνα αυτής θα υπολογισθεί από τον τύπο:

$$\text{Εμβαδό} = \pi * R^2 \leftrightarrow R = \sqrt{\frac{\text{Εμβαδό}}{\pi}} \quad (4.3)$$

Το συνολικό εμβαδό της οβάλ διάταξης θα είναι το άθροισμα ενός κυκλικού τμήματος και ενός ορθογωνίου τμήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

$$\text{Εμβαδό κυκλικού τμήματος} = \pi * R^2 = 3,14 * 210^2 = 138.474 \text{ mm}^2$$

$$\text{Εμβαδό ορθογωνίου τμήματος} = 420 * 106,39 = 44.683,8 \text{ mm}^2$$



Σχήμα 4.3: Κυκλικό και ορθογώνιο τμήμα οβάλ διάταξης.

Οπότε από τα παραπάνω βγαίνει το εμβαδό της οβάλ διάταξης:

$$\text{Εμβαδό οβάλ διάταξης} = \text{Εμβαδό κυκλικού τμήματος} + \text{Εμβαδό ορθογωνίου τμήματος} = 138.474 + 44.683,8 = 183.157,8 \text{ mm}^2$$

Σύμφωνα με τον τύπο (4.3) η ακτίνα της κυκλικής διάταξης θα είναι:

$$R = \sqrt{\frac{\text{Εμβαδό}}{\pi}} = \sqrt{\frac{183.157,8}{3,14}}$$

$$R \approx 242\text{mm}$$

Οπότε αυτό που μένει είναι να σχεδιάσουμε και μια κυκλική διάταξη ακτίνας 242mm για να την συγκρίνουμε με την οβάλ. Γι αυτήν το μόνο που γνωρίζουμε είναι η ακτίνα. Πρέπει να υπολογίσουμε και τις άλλες παραμέτρους. Ο τρόπος είναι όμοιος με αυτόν που χρησιμοποιήσαμε στο 3^ο κεφάλαιο. Η εξωτερική ακτίνα του πηνίου θα είναι ίση με το 92% της ακτίνας της διάταξης σύμφωνα με τον τύπο (3.4).

$$\text{Εξωτερική ακτίνα πηνίου} = 0,92 * \text{ακτίνα διάταξης} = 0,92 * 242 \approx 222\text{mm}$$

Με στόχο τη σύγκριση μεταξύ οβάλ και κυκλικής διάταξης, το μήκος των φερριτών στην κυκλική διάταξη που κατασκευάστηκε επιλέχθηκε ίσο με το αντίστοιχο μήκος των φερριτών στην οβάλ διάταξη, δηλαδή 118mm.

Η διατομή του πηνίου θα είναι ίση με το 40% του μήκους των φερριτών [3]. Επομένως:

$$\text{Διατομή πηνίου} = 0,4 * 118 \approx 48\text{mm}$$

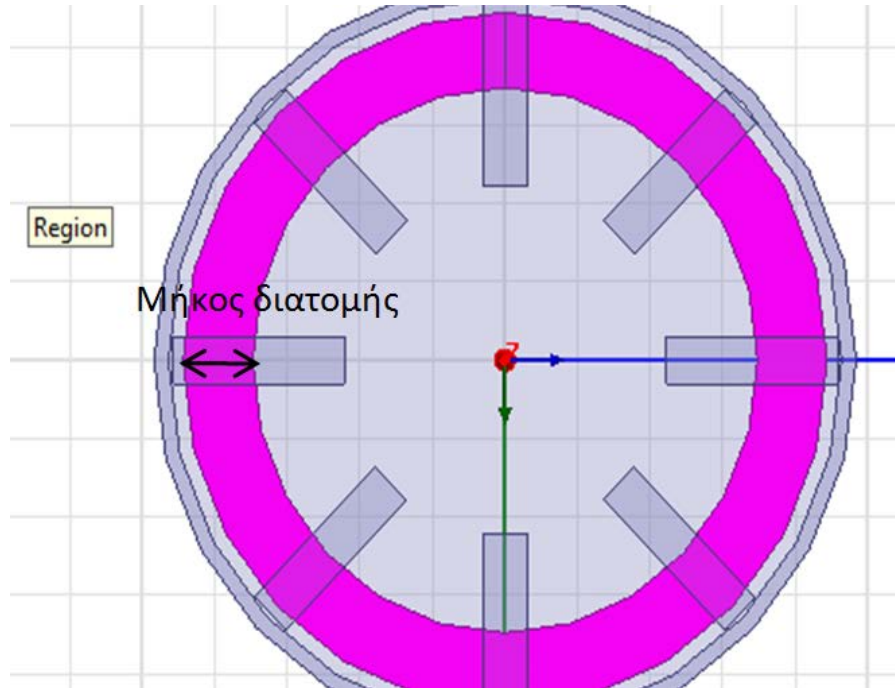
Αρα ξέροντας την εξωτερική ακτίνα των τυλιγμάτων μπορούμε πλέον να βρούμε την εσωτερική:

$$\text{Εσωτερική ακτίνα πηνίου} = \text{Εξωτερική ακτίνα πηνίου} - \text{μήκος διατομής} = 222 - 48 = 174\text{mm}$$

Για τον αριθμό των ελιγμάτων έχουμε:

$$\text{Ελίγματα} = \frac{\text{μήκος διατομής πηνίου}}{\text{διάμετρος ελίγματος}} = \frac{48 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 12$$

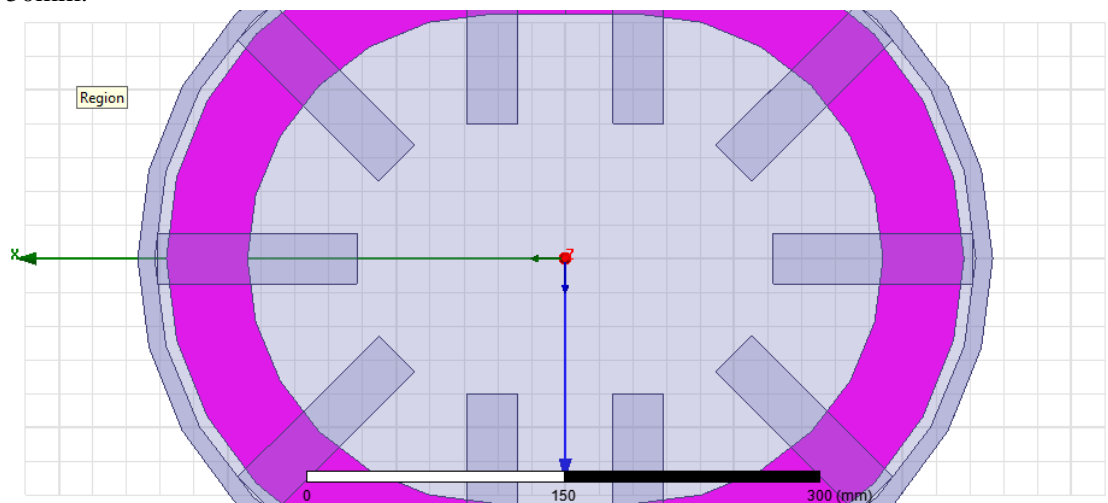
Όπου το μήκος της διατομής του τυλίγματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.4):



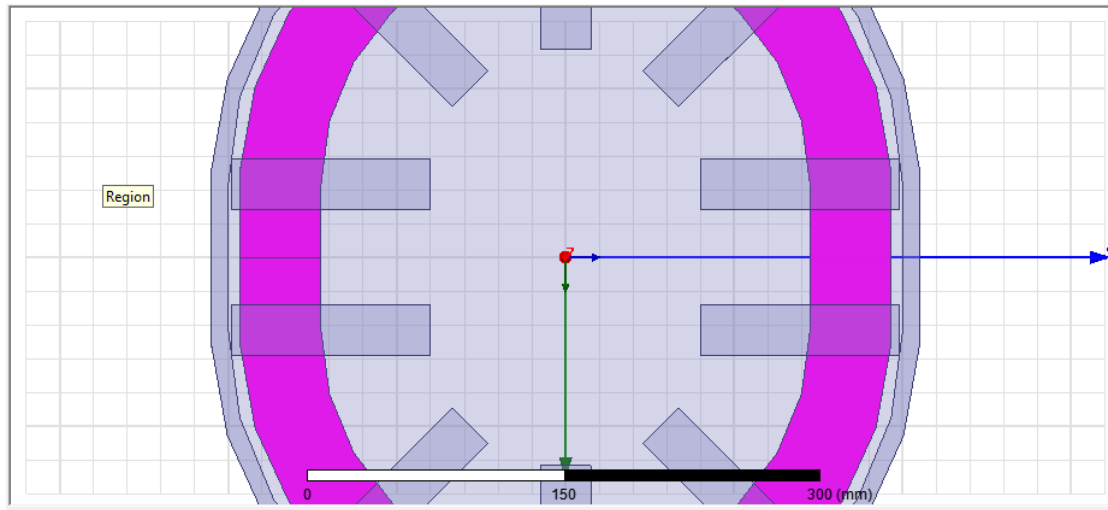
Σχήμα 4.4: Μήκος διατομής τυλιγμάτων διάταξης 484mm.

Όσον αφορά στη σύγκλιση, σχετικά με τον υπολογισμό της αμοιβαίας επαγωγής, επιλέγεται μία τιμή: Convergence = 0,1μH. Υπενθυμίζεται ότι η διαδικασία για να αλλαχθεί η τιμή της σύγκλισης περιγράφεται στην ενότητα 2.6.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις τόσο για την οβάλ διάταξη για την οποία έγιναν και στους δύο άξονες (x και y όπως φαίνεται στα σχήματα 4.5 και 4.6) όσο και για την κυκλική διάταξη των 484mm. Στους Πίνακες 4.1 - 4.3 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε για διάκενο 100mm ενώ στους 4.4 - 4.6 αυτές για διάκενο 50mm.



Σχήμα 4.5: Άξονας x στην οβάλ διάταξη.



Σχήμα 4.6: Άξονας y οβάλ διάταξης.

Οβάλ διάταξη (μετατοπίσεις ως προς τον άξονα x)				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	136,37	136,43	38,129	1770,053
50	136,33	136,34	35,754	1557,43992
100	136,04	135,93	29,941	1095,47534
150	135,61	135,46	22,964	646,650065
200	135,14	135,17	16,001	314,629367

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τον x άξονα για την οβάλ διάταξη για διάκενο 10cm.

Οβάλ διάταξη (μετατοπίσεις ως προς τον άξονα y)				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	136,37	136,43	38,129	1770,053
50	136,21	136,14	34,807	1478,19851
100	135,76	135,73	26,884	884,498793
150	135,13	135,18	17,722	385,920939
200	134,98	135	9,1674	103,405566

Πίνακας 4.2: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τον y άξονα για την οβάλ διάταξη για διάκενο 10cm.

Κυκλική διάταξη 484mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	133,51	133,51	37,355	1.736,08
50	133,49	133,47	34,713	1.499,64
100	132,93	132,9	28,105	987,25
150	132,29	132,27	20,32	518,53
200	132,06	132,01	12,855	207,932632

Πίνακας 4.3: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις για την κυκλική διάταξη των 484mm για διάκενο 10cm.

Οβάλ διάταξη (μετατοπίσεις ως προς τον άξονα x)				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	141,38	141,4	66,693	5.225,12
25	141,03	141,06	64,779	4.941,40
50	140,17	140,17	59,856	4.245,66
75	139,23	139,19	53,474	3.412,42
100	138,14	138,11	46,655	2.617,92
150	137,12	137,16	34,247	1.420,37
200	136,13	136,13	23,201	656,82

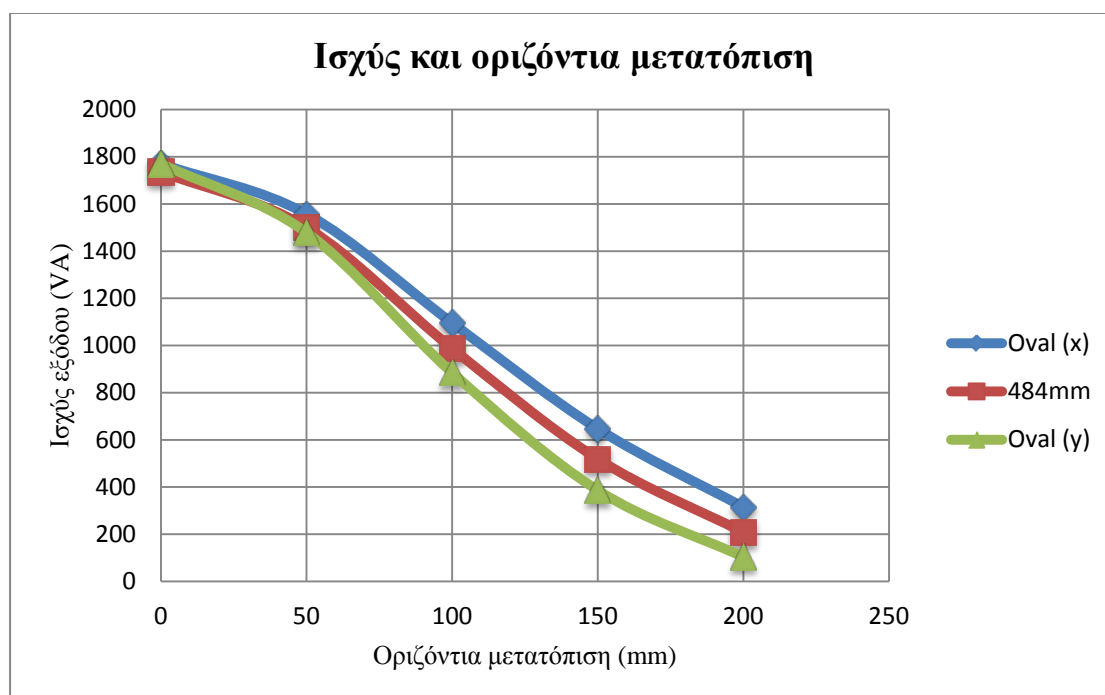
Πίνακας 4.4: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τον x άξονα για την οβάλ διάταξη για διάκενο 5cm.

Οβάλ διάταξη (μετατοπίσεις ως προς τον άξονα y)				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	141,38	141,4	66,693	5.225,12
50	139,8	139,8	57,29	3.899,74
100	137,17	137,16	39,809	1.919,20
150	135,77	135,87	24,021	705,41
200	135,36	135,35	10,878	145,22

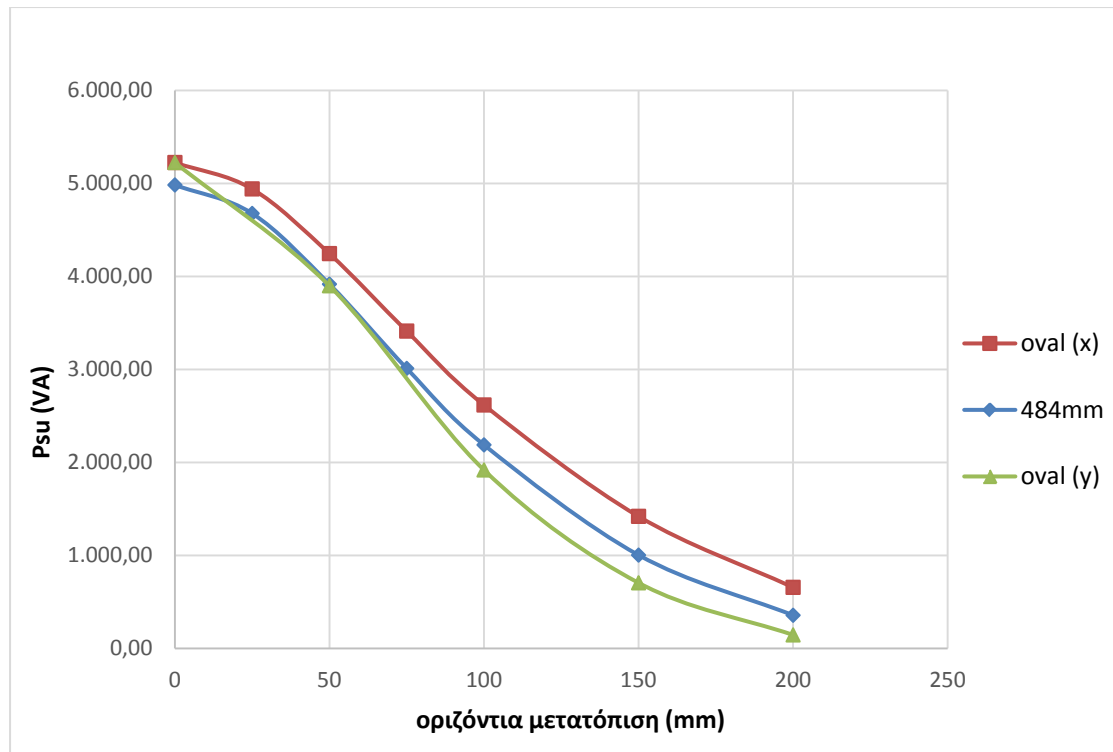
Πίνακας 4.5: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τον y άξονα για την οβάλ διάταξη για διάκενο 5cm.

Κυκλική διάταξη 484mm				
Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	137,33	137,33	64,19	4.983,73
25	137,06	137	62,113	4.677,67
50	136,15	136,17	56,668	3.917,24
75	135,02	135,03	49,476	3.011,23
100	134,13	134,12	42,037	2.188,54
150	133,1	133,09	28,356	1.003,53
200	132,21	132,18	16,841	356,41

Πίνακας 4.6: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις για την κυκλική διάταξη των 484mm για διάκενο 5cm.



Διάγραμμα 4.2: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για οριζόντια μετατόπιση σε οβάλ διάταξη ως προς x και y άξονα και κυκλική διάταξη των 484mm σε διάκενο 100mm.



Διάγραμμα 4.3: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για οριζόντια μετατόπιση σε οβάλ διάταξη ως προς x και y άξονες, και κυκλική διάταξη των 484mm σε διάκενο 50mm.

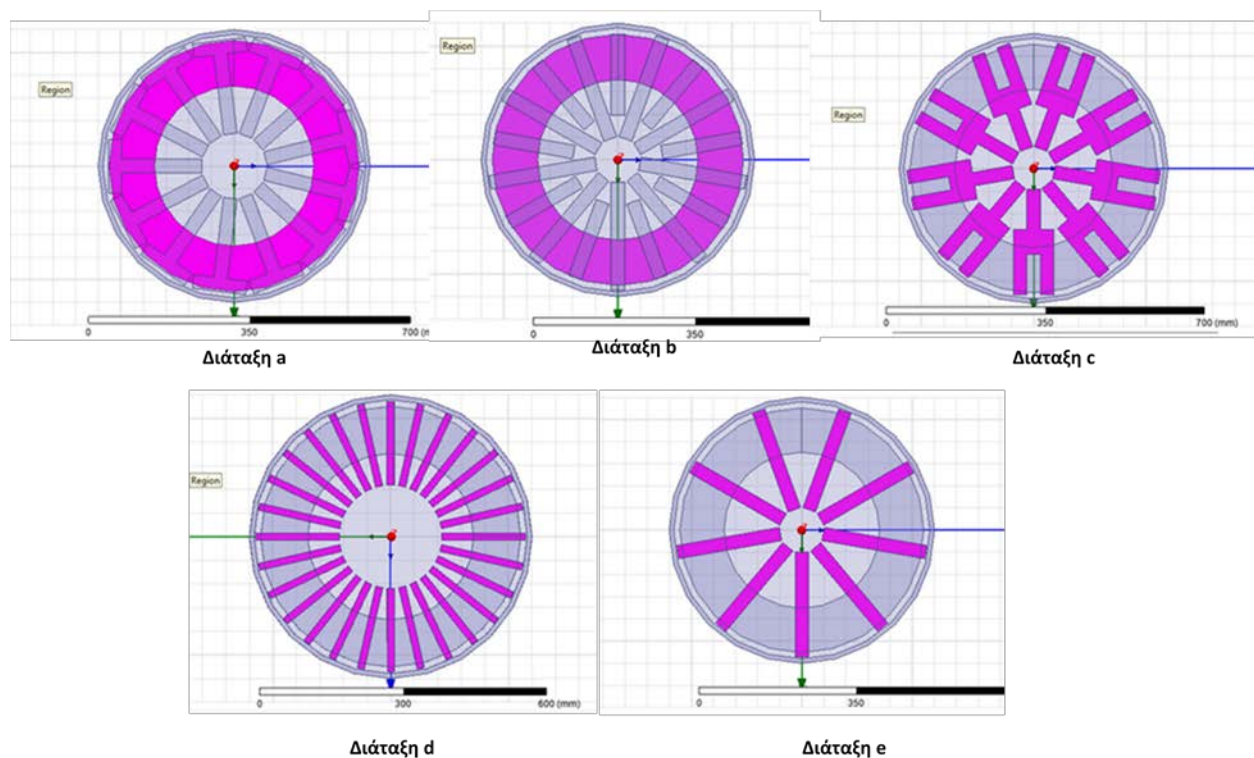
Τα διαγράμματα 4.2 και 4.3 παρουσιάζουν τη μεταφερόμενη ισχύ για την κυκλική και την οβάλ διάταξη σε περίπτωση διακένου ίσου με 100 και 50 χιλιοστά αντίστοιχα. Η οβάλ διάταξη φαίνεται να έχει καλύτερη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος ως προς την κυκλική όσον αφορά τη μετατόπιση κατά τον άξονα x. Ωστόσο κατά τη μετατόπιση κατά τον y άξονα η οβάλ διάταξη αδυνατεί να μεταφέρει την ισχύ που μεταφέρει η κυκλική διάταξη.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι η οβάλ διάταξη, αν και συμπεριφέρεται καλύτερα από την κυκλική διάταξη ως προς τη μεταφορά ισχύος (στην περίπτωση μετατόπισης στον x άξονα) δεν καταφέρνει ωστόσο να αυξήσει ιδιαίτερα τα επίπεδα της ισχύος που μεταφέρεται. Για παράδειγμα σε ένα διάκενο ίσο με 5cm και εξετάζοντας μία μετατόπιση ως προς τον άξονα x ίση με 25mm ή 50mm η οβάλ διάταξη κατορθώνει μία αύξηση της ισχύος μόλις 5,6% και 8,4% αντίστοιχα σε σχέση με την κυκλική διάταξη.

Πρέπει να τονισθεί ότι η συμμετρικότητα της κυκλικής διάταξης επιτρέπει στο όχημα να πλησιάσει το σταθμό από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Σε περίπτωση επιλογής της οβάλ διάταξης αυτή η συμμετρικότητα χάνεται με αποτέλεσμα να πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο με τον οποίο το όχημα προσεγγίζει το φορτιστή, στην περίπτωση που είναι επιθυμητή μία αυξημένη μεταφερόμενη ισχύς.

Επομένως, η συμμετρικότητα της κυκλικής διάταξης, με τα οφέλη που αυτή παρέχει, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα αξιόλογη ικανότητα μεταφοράς ισχύος, καθιστούν την κυκλική διάταξη πιο ικανοποιητική επιλογή σε σχέση με την οβάλ.

4.3 Διατάξεις με φερρίτη διαφόρων σχημάτων

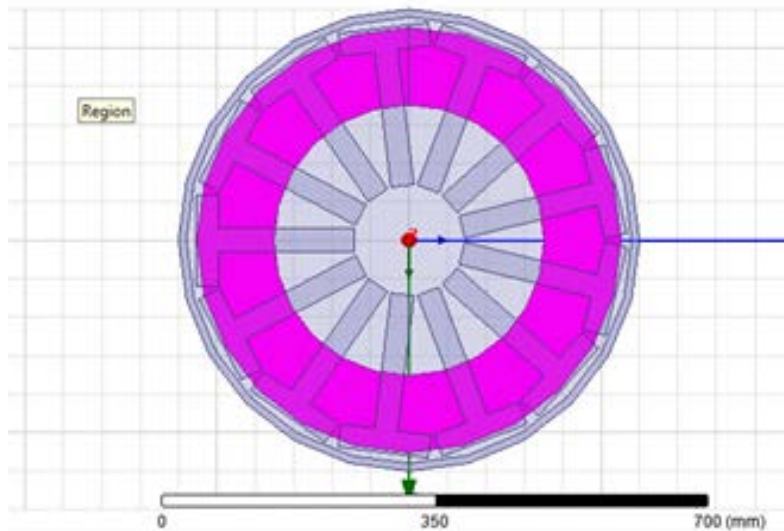


Σχήμα 4.7: Παρουσίαση διατάξεων με φερρίτη διαφόρων σχημάτων που θα μελετηθούν.

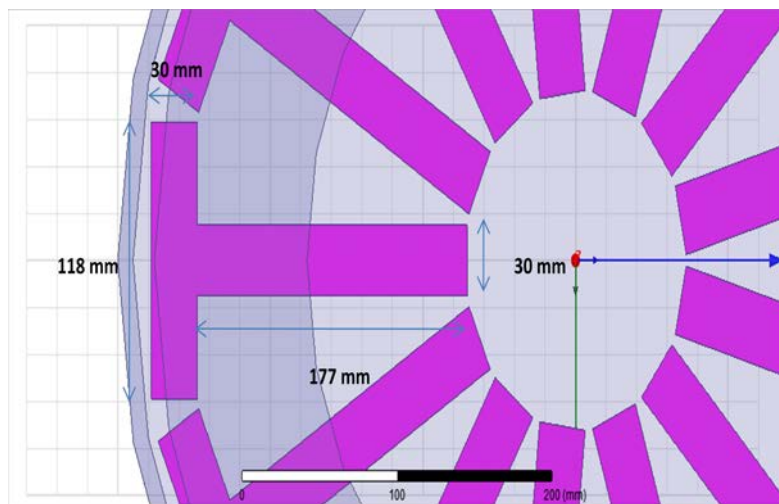
Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε μία πληθώρα διατάξεων συνολικής διαμέτρου 600mm, (παρόμοια δηλαδή με τη διάταξη που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο), ώστε να δούμε πώς επηρεάζει η τοποθέτηση των φερριτών τη μεταφερόμενη ισχύ. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι διατάξεις που θα συγκρίνουμε για να καταλήξουμε στην βέλτιστη. Για κάθε διάταξη υπολογίζεται ο βαθμός αποτελεσματικότητας: Υπολογίζοντας τον όγκο του φερρίτη σε κυβικά εκατοστά και διαιρώντας την ισχύ με αυτόν υπολογίζουμε την αποτελεσματικότητα στην χρήση του φερρίτη. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για ένα σταθερό διάκενο ίσο με 100mm.

❖ Διάταξη a

Σ αυτήν τη διάταξη ο φερρίτης έχει σχήμα T όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Χρησιμοποιούνται 13 ίδια τμήματα φερρίτη το καθένα με πάχος 10mm και διαστάσεις που δίνονται στο Σχήμα 4.8.



(α)



(β)

Σχήμα 4.8: (α) Διάταξη α και (β) διαστάσεις της ράβδου που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη διάταξη

Ο όγκος του φερρίτη είναι:

$$\text{Volume (a)} = 13 \cdot [(118 \cdot 30 \cdot 10) + (177 \cdot 30 \cdot 10)] = 11590500 \text{ mm}^3 = 1150,5 \text{ cm}^3$$

Η μη αντισταθμισμένη ισχύς για διάκενο 100mm σύμφωνα με την αντίστοιχη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε είναι:

$$P_{su} = 24390,77 \text{ VA}$$

Τέλος βγαίνει ο βαθμός αποτελεσματικότητας στην χρησιμοποίηση φερρίτη που είναι:

$$\text{Use (a)} = \frac{P_{su}}{\text{Volume}} = \frac{24390,77}{1150,5} = 21,20 \text{ VA/cm}^3$$

❖ Διάταξη b

Εδώ οι ράβδοι είναι 18 από τις οποίες οι 9 έχουν μήκος 236mm και οι υπόλοιπες 9 177mm (Σχήμα 4.6). Το πλάτος και το πάχος των ράβδων είναι κοινό στα 30mm και 10mm αντίστοιχα. Ο φερρίτης έχει όγκο:

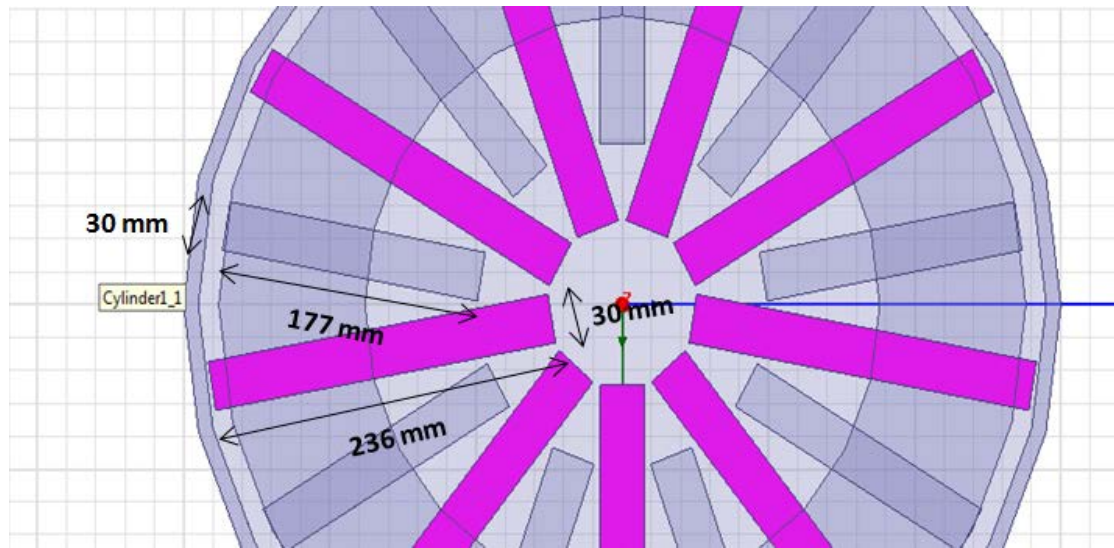
$$\text{Volume (b)} = 9 \cdot (236 \cdot 30 \cdot 10) + 9 \cdot (177 \cdot 30 \cdot 10) = 1115100 \text{ mm}^3 = 1115,1 \text{ cm}^3$$

Σύμφωνα με την αντίστοιχη προσομοίωση η ισχύς που παίρνουμε είναι:

$$P_{su} = 22054,22 \text{ VA}$$

Επομένως ο βαθμός αποτελεσματικότητας υπολογίζεται:

$$\text{Use (b)} = \frac{P_{su}}{\text{Volume}} = \frac{22054,22}{1115,1} = 19,7777 \approx 19,78 \text{ VA/cm}^3$$



Σχήμα 4.9: Δύο είδη ράβδων για την διάταξη b.

❖ Διάταξη c

Στην διάταξη c ο φερρίτης έχει σχήμα Y και διαστάσεις οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 4.10. Έχουμε 9 ίδια τμήματα και το πάχος του κάθε τμήματος είναι 10mm. Οπότε αυτή η διάταξη έχει φερρίτη συνολικού όγκου:

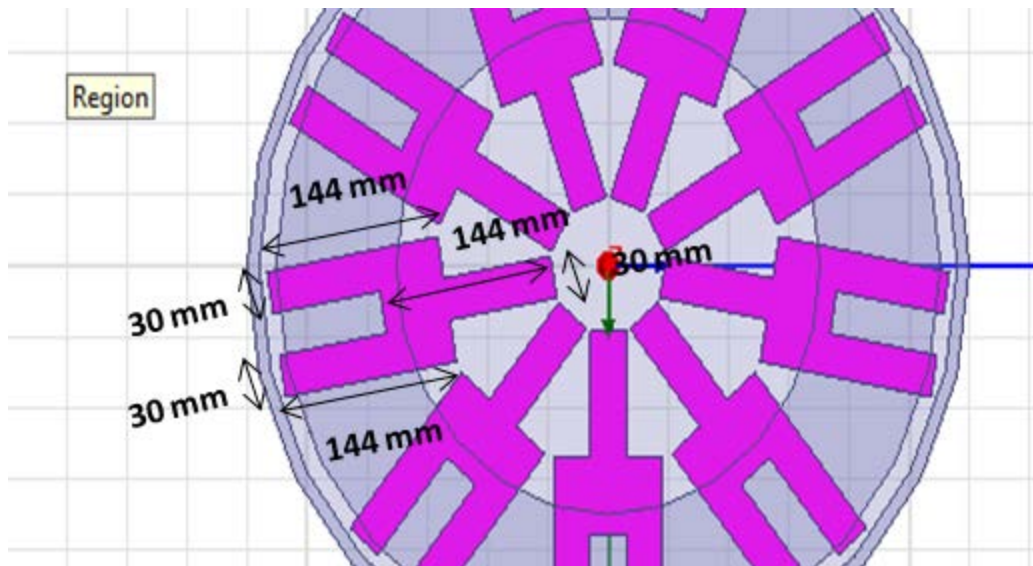
$$\text{Volume (c)} = (3 \cdot 144 \cdot 30 \cdot 10) \cdot 9 = 1166076 \text{ mm}^3 = 1166,076 \text{ cm}^3 \approx 1166,1 \text{ cm}^3$$

Σύμφωνα με την αντίστοιχη προσομοίωση η ισχύς που παίρνουμε είναι:

$$P_{su} = 21944,09 \text{ VA}$$

Επομένως ο βαθμός αποτελεσματικότητας υπολογίζεται:

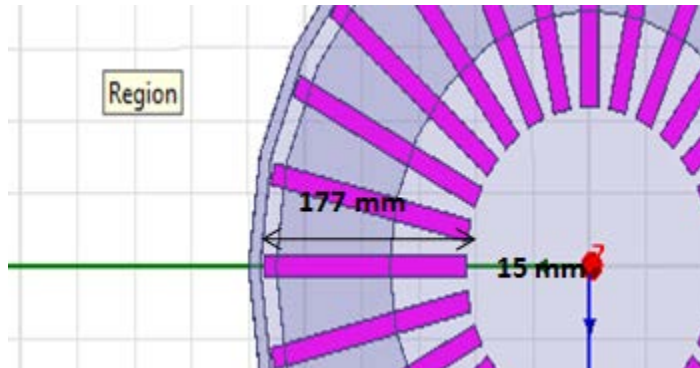
$$\text{Use (c)} = \frac{P_{su}}{\text{Volume}} = \frac{21944,09}{1166,1} = 18,8183 \approx 18,82 \text{ VA/cm}^3$$



Σχήμα 4.10: Διαστάσεις φερρίτη διάταξης c.

❖ Διάταξη d

Σε αυτήν τη διάταξη έχουμε ράβδους όπως και στην αρχική διάταξη των 420mm μόνο που εδώ οι ράβδοι έχουν το μισό από το πλάτος των αρχικών δηλαδή 15mm και μήκος 177mm. Το πλήθος τους είναι 28. Οι διαστάσεις των ράβδων φαίνονται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Απεικόνιση ράβδου που χρησιμοποιεί η διάταξη d.

Ο όγκος φερρίτη στη διάταξη αυτή είναι:

$$\text{Volume (d)} = 177 * 15 * 10 * 28 = 743400 \text{ mm}^3 = 743,4 \text{ cm}^3$$

Σύμφωνα με την αντίστοιχη προσομοίωση η ισχύς που παίρνουμε είναι:

$$P_{su} = 22586,78 \text{ VA}$$

Επομένως ο βαθμός αποτελεσματικότητας υπολογίζεται:

$$\text{Use (d)} = \frac{P_{su}}{\text{Volume}} = \frac{22586,78}{743,4} = 30,3830 \approx 30,38 \text{ VA/cm}^3$$

❖ Διάταξη e

Στην τελευταία διάταξη που θα μελετήσουμε οι φερρίτες είναι και πάλι σε μορφή ράβδου και είναι 9 αυτή τη φορά, ωστόσο με αρκετά αυξημένο μήκος. Πιο συγκεκριμένα το μήκος τους είναι 236mm. Το πάχος τους είναι 10mm και το πλάτος 30mm, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.12. Ο όγκος του φερρίτη που έχουμε εδώ είναι:

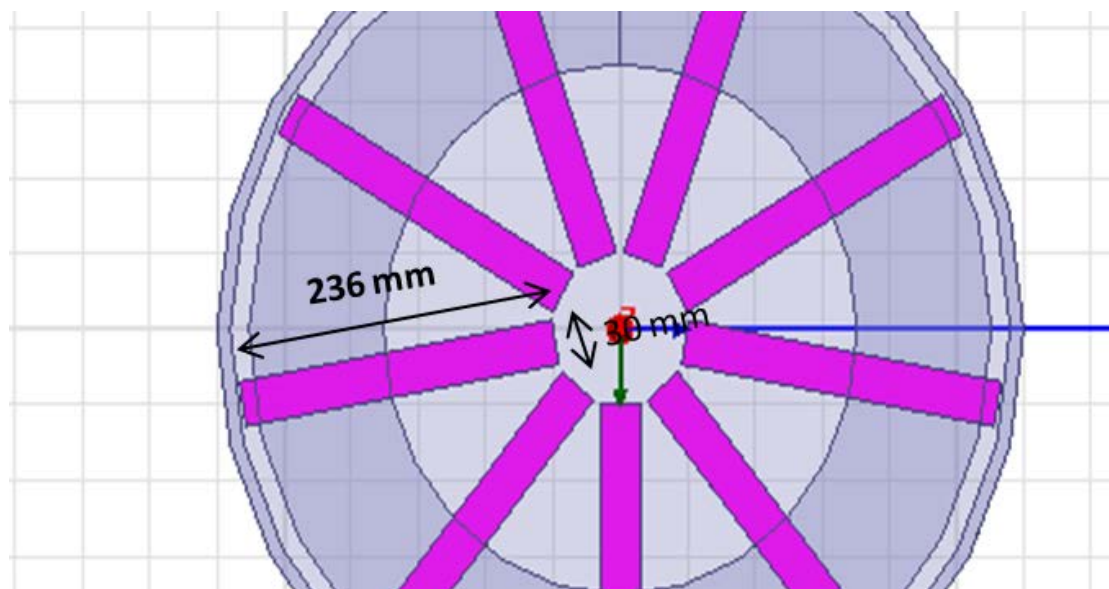
$$\text{Volume (e)} = 236 * 30 * 10 * 9 = 637.200\text{mm}^3 = 637,2 \text{ cm}^3$$

Η ισχύς που βρήκαμε τώρα μετά την προσομοίωση είναι:

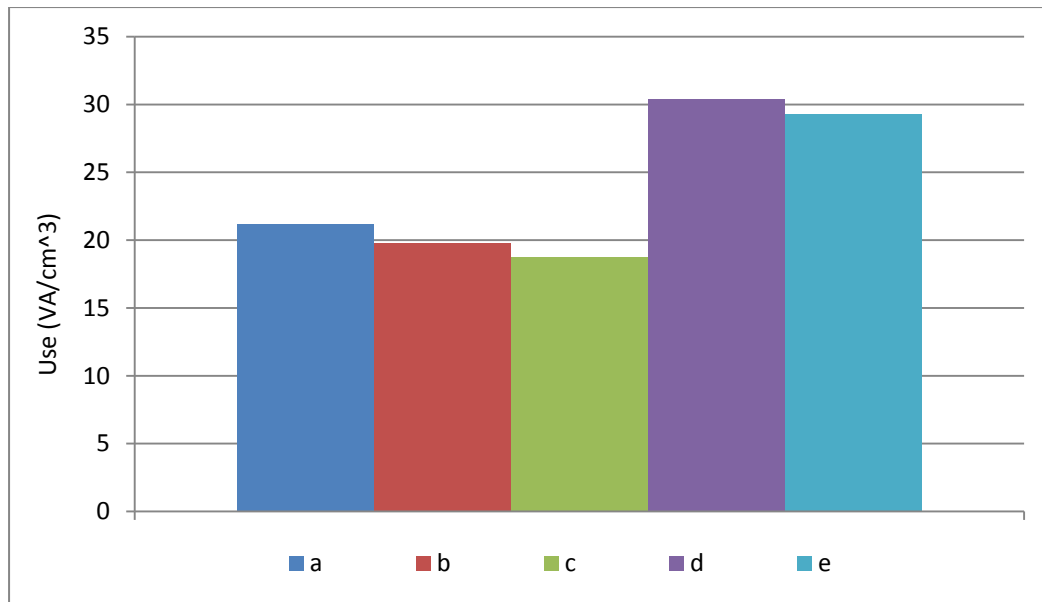
$$P_{su}=18.655,85 \text{ VA}$$

Επομένως ο βαθμός αποτελεσματικότητας υπολογίζεται:

$$\text{Use (e)} = \frac{P_{su}}{\text{Volume}} = \frac{18.655,85}{637,2} = 29,2778 \approx 29,28 \text{ VA/cm}^3$$



Σχήμα 4.12: Μορφή και διαστάσεις για τις ράβδους της διάταξης e.



Διάγραμμα 4.1: Βαθμοί χρησιμοποίησης φερρίτη για τις πέντε διατάξεις.

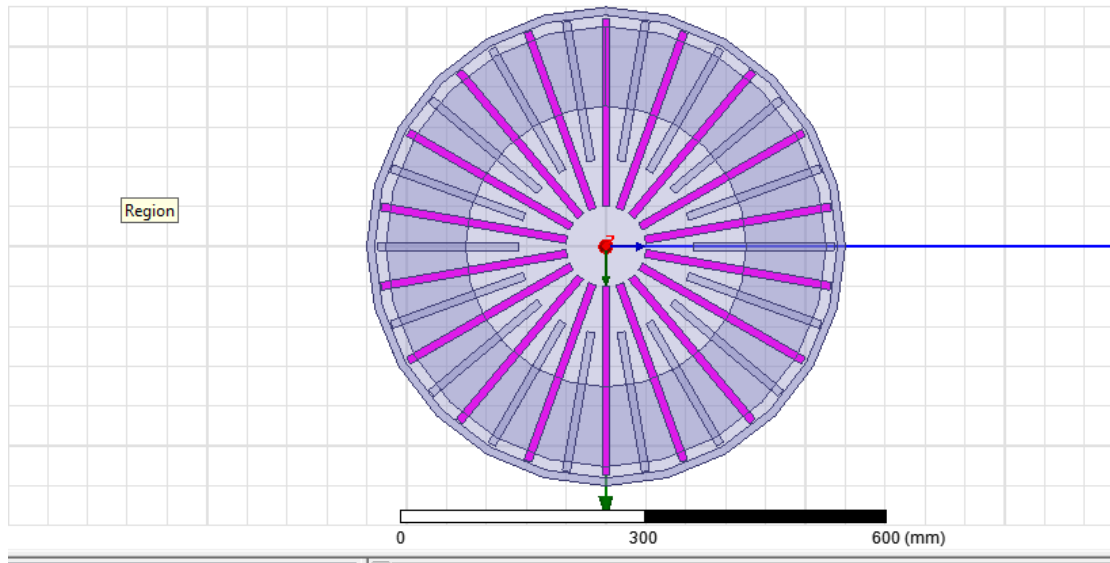
Σύμφωνα με το βαθμό αποτελεσματικότητας για κάθε διάταξη (Διάγραμμα 4.1) παρατηρούμε ότι η καλύτερη είναι η διάταξη d η οποία έχει και τον μεγαλύτερο βαθμό χρησιμοποίησης φερρίτη που είναι 30,38 VA ανά τετραγωνικό εκατοστό φερρίτη. Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο αριθμό ράβδων με μικρότερο πλάτος. Παρόμοιο βαθμό χρησιμοποίησης φερρίτη, ίσο με 29,28 VA/cm^3 , έχει και η διάταξη e, όπου αυξάνεται το μήκος των ράβδων φερρίτη. Παρατηρούμε δηλαδή ότι καλύτερη χρησιμοποίηση φερρίτη έχουμε στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε όσο το δυνατόν περισσότερες ράβδους με όσο το δυνατό μεγαλύτερο μήκος.

4.4 Βέλτιστη διάταξη

Μία βέλτιστη διάταξη ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος θα πρέπει να συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των διατάξεων d και e που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Θα πρέπει δηλαδή να αποτελείται από πολλές ράβδους μικρού πλάτους, αλλά και να έχει ράβδους με αρκετά αυξημένο μήκος.

Κατασκευάζεται επομένως μία διάταξη με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 18 ράβδους με μήκος 236mm και άλλες 18 ράβδους με μήκος 177mm.
- Το πλάτος όλων των 36 ράβδων είναι ίσο με 10mm.
- Όλες οι ράβδοι ισαπέχουν μεταξύ τους και η γωνία της μιας με την άλλη είναι ίση με $360/36 = 10^\circ$.



Σχήμα 4.10: Κάτοψη της βέλτιστης κυκλικής διάταξης.

Ο όγκος του φερρίτη που έχουμε σ' αυτήν την διάταξη είναι:

$$\text{Volume (optimal)} = 18 * 236 * 10 * 10 * 0,001 + 18 * 177 * 10 * 10 * 0,001$$

$$\text{Volume (optimal)} = 743,4 \text{ cm}^3$$

Η ισχύς που μεταφέρεται για ένα διάκενο ίσο με 10mm και μηδενική μετατόπιση υπολογίζεται ίση με:

$$P_{su} = 23.735,79 \text{ VA}$$

Οπότε από τα παραπάνω θα υπολογίσουμε τον βαθμό χρησιμοποίησης φερρίτη ο οποίος είναι:

$$\text{Use (optimal)} = \frac{P_{su}}{\text{Volume}} = \frac{23735,79}{743,4} = 31,9286 \approx 31,93 \text{ VA/cm}^3$$

Παρατηρούμε ότι συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά των διατάξεων d και e είναι δυνατό να κατασκευαστεί μία διάταξη με ιδιαίτερα ικανοποιητική χρησιμοποίηση φερρίτη.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

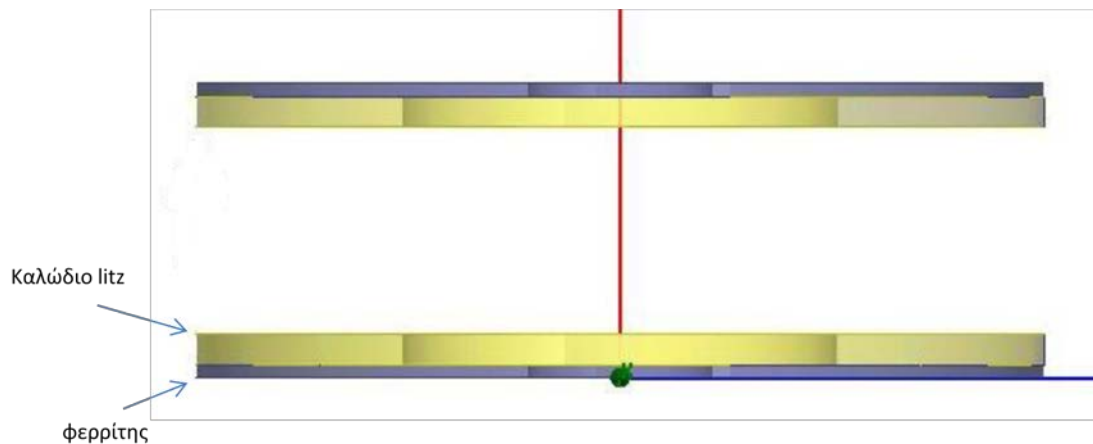
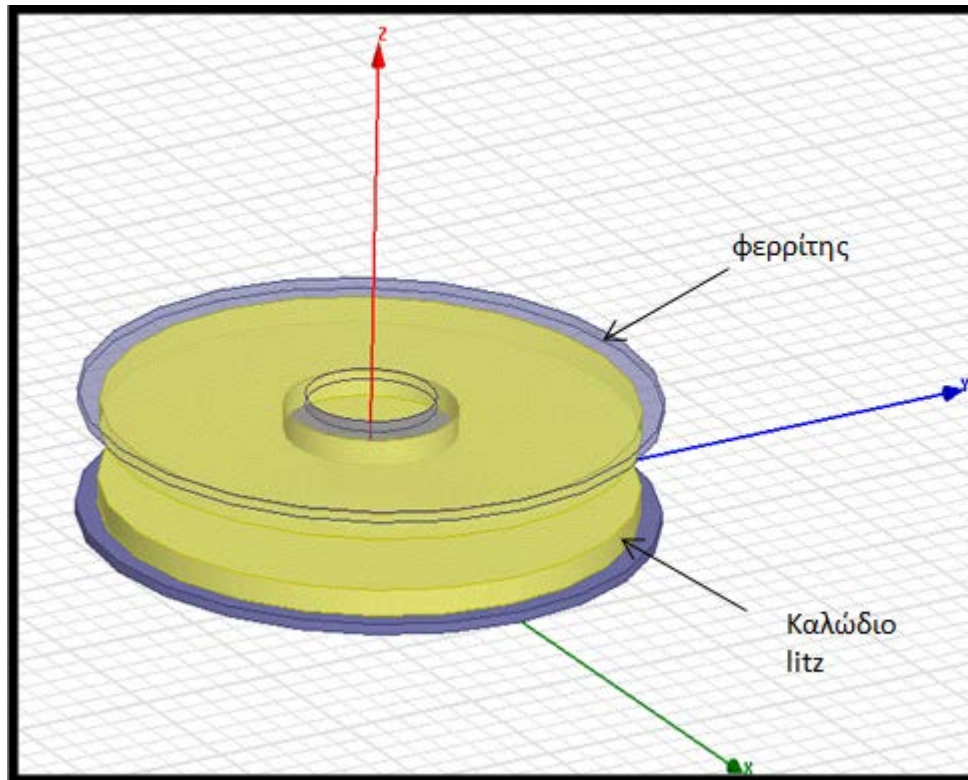
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΙΑΙΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ

5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκε η συμπεριφορά της κυκλικής διάταξης με ράβδους φερρίτη σχετικά με τη μεταφερόμενη ισχύ. Στο κεφάλαιο αυτό η διάταξη αυτή θα συγκριθεί με κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη [36], ώστε να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα ως προς το πώς επηρεάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κυκλικών διατάξεων γενικότερα τη μεταφερόμενη ισχύ. Τα δύο διαφορετικά αυτά είδη κυκλικών διατάξεων θα συγκριθούν ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος, τη συμπεριφορά τους ως προς τη μετατόπιση, ενώ παράλληλα θα εξετασθεί και η διαλειτουργικότητα μεταξύ τους.

5.2 Χαρακτηριστικά διάταξης και μεταφερόμενη ισχύς

Σ αυτήν την ενότητα θα μελετήσουμε το πώς επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των κυκλικών διατάξεων τη μεταφερόμενη ισχύ. Παρακάτω παρουσιάζεται μία διάταξη ενιαίου φερρίτη [36].



Σχήμα 5.1: Διάταξη ενιαίου φερρίτη.[36]

Για την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη έχει μελετηθεί πώς επηρεάζει το πάχος φερρίτη ,το μέγεθος της διάταξης και η θέση των τυλιγμάτων τη μεταφορά ισχύος [36]. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με την κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, η μεταφερόμενη ισχύ P_{su} θα δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης κάθε φορά μεταφερόμενης ισχύος.

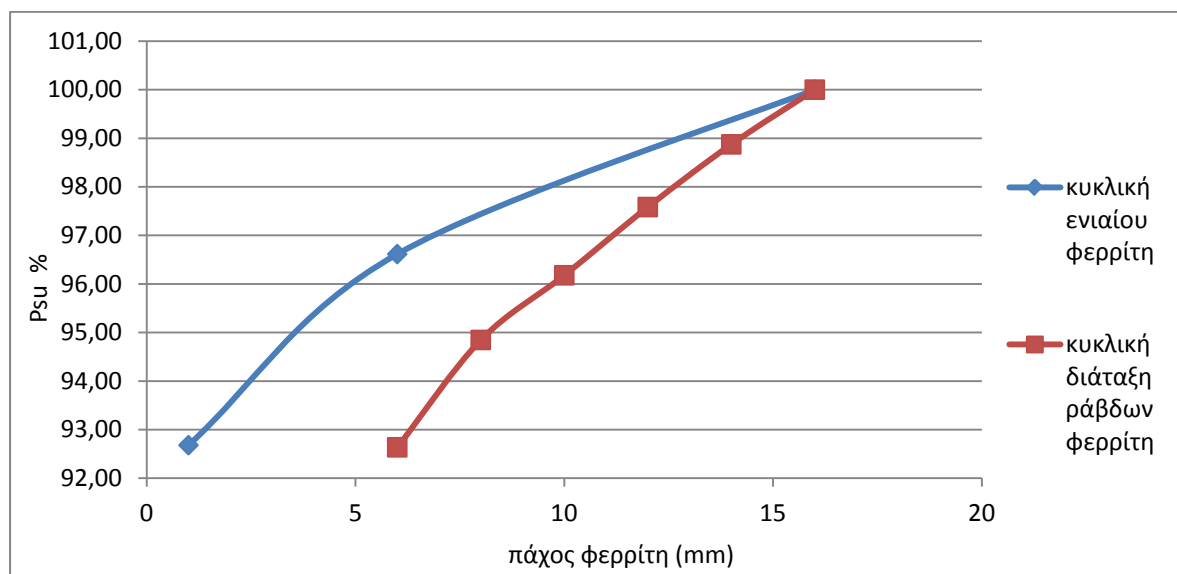
5.2.1 Πάχος φερρίτη

Αρχικά θα μελετήσουμε το πάχος του φερρίτη και το πώς επηρεάζει κάθε διάταξη.

Οι μετρήσεις που ακολουθούν [36], αφορούν πάχη φερρίτη από 1mm έως 16mm και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πάχος φερρίτη (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)	Psu/Pmax
1	56,946	56,991	33,777	3.325,23	0,926796
6	58,097	58,085	34,816	3.466,40	0,966145
16	58,979	59,021	35,705	3.587,87	1

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις για πάχος φερρίτη στην διάταξη ενιαίου φερρίτη [36].



Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση μεταξύ κυκλικής διάταξης ράβδων φερρίτη 420mm και κυκλικής διάταξης ενιαίου φερρίτη για διάφορα πάχη φερρίτη.

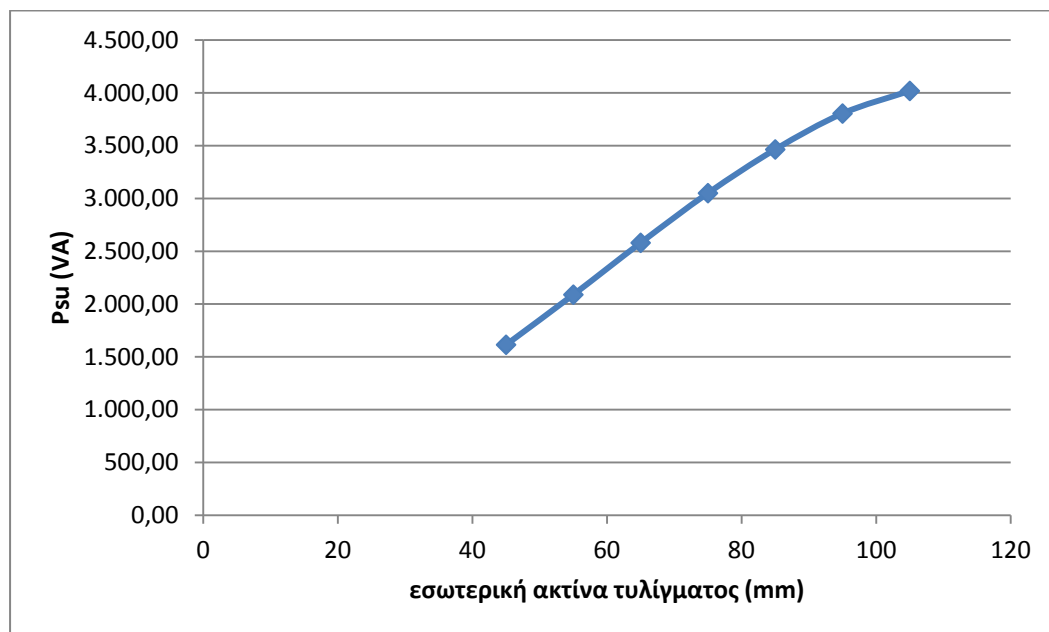
Στο Διάγραμμα 5.1 δίνεται η μεταφερόμενη ισχύς σε σχέση με το πάχος φερρίτη για την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη και την κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη που μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η μεταφερόμενη ισχύς δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης ισχύος (που παρατηρείται στο μέγιστο πάχος) για την κάθε διάταξη. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι και για τις δύο διατάξεις ισχύει ότι το πάχος του φερρίτη δεν επιδρά σημαντικά στη μεταφερόμενη ισχύ.

5.2.2 Θέση τυλίγματος

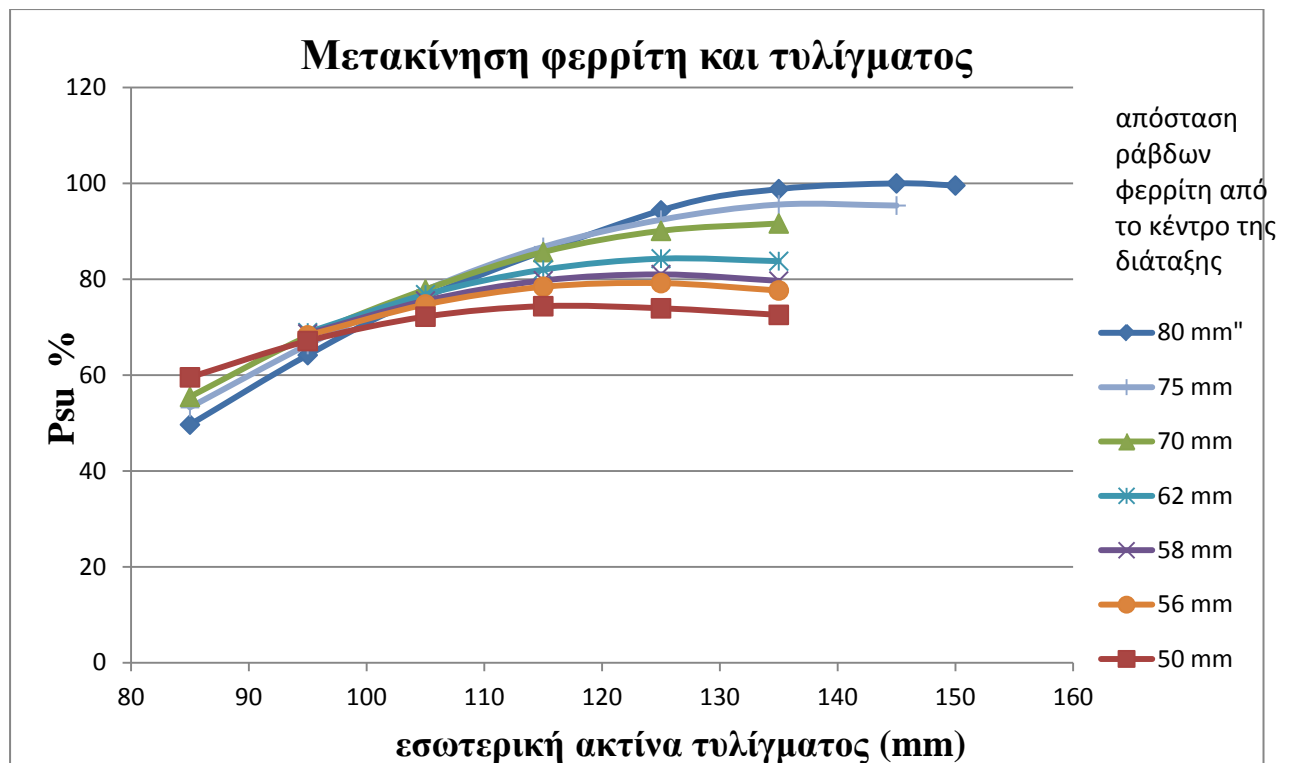
Εδώ θα ασχοληθούμε με την θέση του τυλίγματος και το πώς επηρεάζει την ισχύ που λαμβάνουμε. Με τον όρο θέση τυλίγματος εννοούμε την απόσταση του εσωτερικού άκρου του τυλίγματος από το κέντρο της διάταξης. Οι μετρήσεις που δίνονται στον πίνακα 5.2 αφορούν την διάταξη ενιαίου φερρίτη [36] και δίνουν την ισχύ σε VA αλλά και ως ποσοστό της μέγιστης ισχύος (η ισχύς που μεταφέρεται για εσωτερική ακτίνα τυλίγματος 105mm) .

Εσωτερική ακτίνα τυλίγματος (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)	Psu/Pmax
45	33,741	33,739	18,111	1.614,87	0,401861
55	40,157	40,151	22,472	2.089,16	0,519888
65	46,517	46,497	26,875	2.580,22	0,642089
75	52,573	52,577	31,073	3.050,39	0,75909
85	58,097	58,122	34,816	3.464,20	0,862065
95	62,886	62,834	37,935	3.804,27	0,946691
105	66,237	66,236	40,03	4.018,49	1

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις για θέση τυλίγματος στην διάταξη ενιαίου φερρίτη [36].



(α)

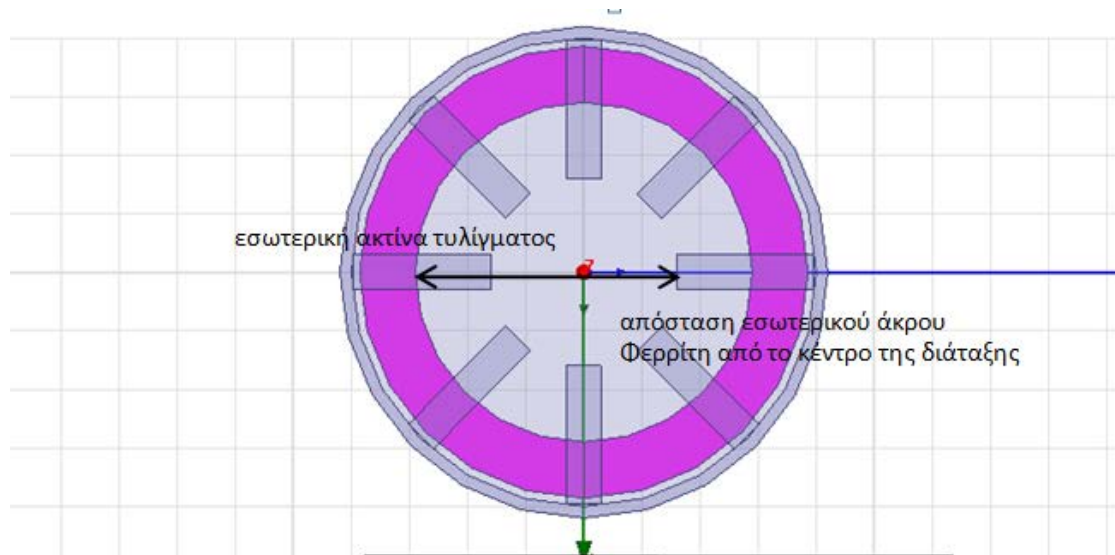


(β)

Διάγραμμα 5.2: Ισχύς εξόδου σε σχέση με την εσωτερική ακτίνα των τυλιγμάτων για α) την διάταξη ενιαίου φερρίτη και β) κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη.

Στο διάγραμμα 5.2β βλέπουμε στον οριζόντιο άξονα την εσωτερική ακτίνα των τυλιγμάτων που παίρνει τιμές από 85 έως 150 mm και στον κατακόρυφο την ισχύ σε ποσοστό επί τοις εκατό τη μέγιστης δυνατής και όλα αυτά για αποστάσεις του εσωτερικού άκρου φερρίτη από το κέντρο της διάταξης (Σχήμα 5.2) από 50 μέχρι 80mm.

Το συμπέρασμα που βγάζουμε από το διάγραμμα 5.2 (α) είναι ότι η ισχύς αυξάνεται όσο τα τυλίγματα μεταφέρονται εξωτερικά. Οπότε η βέλτιστη θέση των τυλιγμάτων για τη διάταξη ενιαίου φερρίτη είναι όσο το δυνατό προς το εξωτερικό μέρος της διάταξης. Αντίθετα στην κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη η βέλτιστη θέση των τυλιγμάτων καθορίζεται σύμφωνα και με τη θέση των ράβδων φερρίτη (Διάγραμμα 5.2 β). Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 3 η μέγιστη απόδοση ισχύος παρατηρείται για απόσταση των ράβδων φερρίτη από το κέντρο της διάταξης ίση με 80mm (εσωτερικό άκρο φερρίτη) . Για τη συγκεκριμένη περίπτωση η βέλτιστη εσωτερική ακτίνα των τυλιγμάτων είναι ίση με 145 mm. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα και με τον τύπο 3.4 που παρουσιάζεται στο 3^ο Κεφάλαιο, όταν η εξωτερική ακτίνα του πηνίου βρίσκεται στο 92% της ακτίνας της διάταξης παρατηρείται η μέγιστη μεταφορά ισχύος.



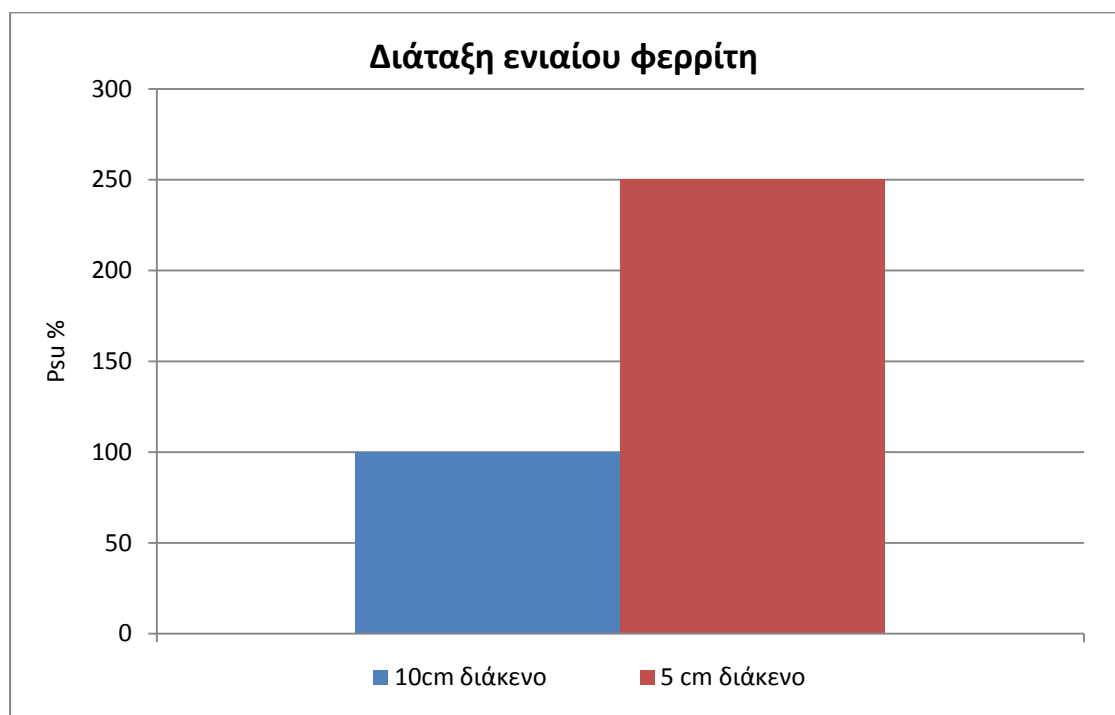
Σχήμα 5.2 : Αποστάσεις τυλίγματος και φερρίτη στη διάταξη ράβδων φερρίτη.

5.3 Επίδραση οριζόντιας μετατόπισης και διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ

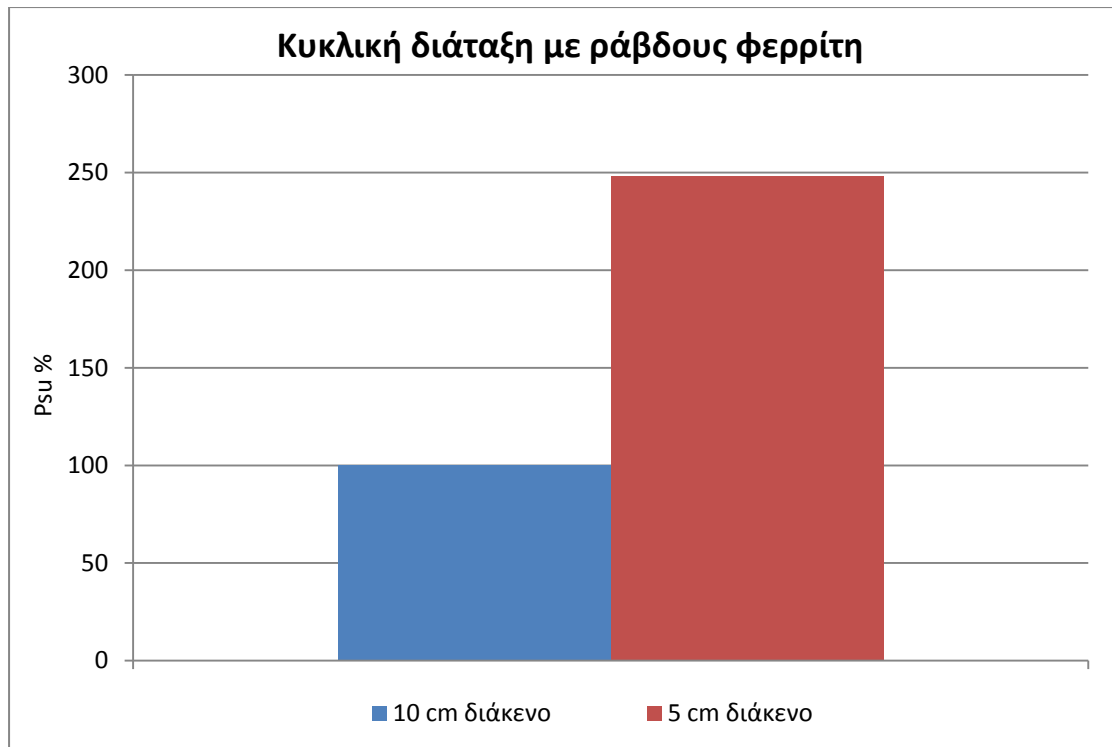
Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί πώς επιδρά η οριζόντια μετατόπιση και το διάκενο στη μεταφερόμενη ισχύ στην περίπτωση των κυκλικών διατάξεων επαγωγικής φόρτισης.

Διάκενο

Στο διάγραμμα 5.4 απεικονίζεται η αύξηση της ισχύος που παρατηρείται όταν το διάκενο μειωθεί από 10 σε 5 cm για τη διάταξη ενιαίου φερρίτη (διαμέτρου 600mm) [41]. Αντίστοιχες μετρήσεις για διάταξη διαμέτρου 600mm με ράβδους φερρίτη έχουν πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 3 (Πίνακας 3.17, 3.18) και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 5.5.



Διάγραμμα 5.4: Μηδενική μετατόπιση διάταξης ενιαίου φερρίτη σε διάκενα 5 και 10cm.



Διάγραμμα 5.5: Μηδενική μετατόπιση κυκλικής διάταξης με ράβδους φερρίτη για διάκενο 5 και 10cm.

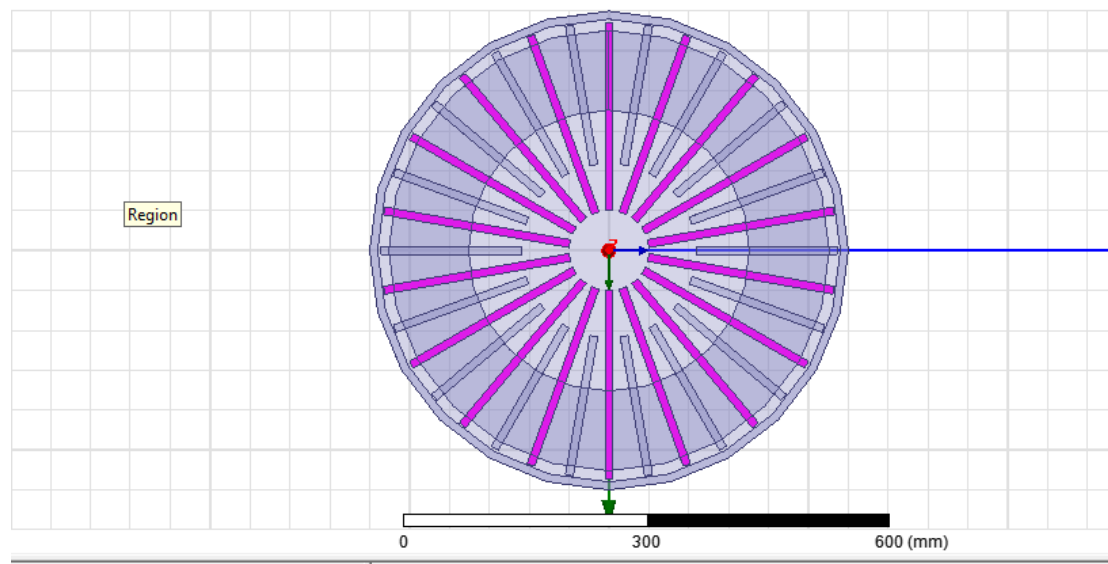
Η συμπεριφορά των δύο διατάξεων ως προς το διάκενο είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Και στις δύο διατάξεις ένας υποδιπλασιασμός του διακένου από 10 σε 5 εκατοστά οδηγεί σε μία αύξηση της ισχύος κατά 250% περίπου.

5.4 Επίδραση του όγκου φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ.

Στην ενότητα αυτή θα δούμε πώς επιδρά ο όγκος του φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ. Για το σκοπό αυτό θα κατασκευάσουμε μία κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη με όγκο ακριβώς ίδιο με τη διάταξη που χρησιμοποιεί ράβδους φερρίτη. Ως αντιπροσωπευτική διάταξη ράβδων φερρίτη θεωρούμε τη βέλτιστη διάταξη ράβδων φερρίτη όπως αυτή περιγράφηκε στην ενότητα 4.4 και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Η διάταξη αυτή έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Διάμετρος διάταξης	600mm
Εξωτερική ακτίνα πηνίου	222 mm
Εσωτερική ακτίνα πηνίου	174 mm
Μήκος διατομής πηνίου	48 mm
Μήκος 18 μεγαλύτερων ράβδων	236 mm
Μήκος 18 μικρότερων ράβδων	177 mm
Πλάτος ράβδων	10 mm
Πάχος φερρίτη	10 mm
Πάχος Αλουμινένιου δίσκου	6 mm
Ύψος αλουμινένιου δακτυλίου	19 mm
Πάχος αλουμινένιου δακτυλίου	10 mm

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά βέλτιστης κυκλικής διάταξης ράβδων φερρίτη 600mm.



Σχήμα 5.3: Βέλτιστη διάταξη 600mm.

Στο σχήμα 5.3 θυμίζουμε την μορφή της βέλτιστης διάταξης.

Απαιτείται επομένως η κατασκευή μίας διάταξης ενιαίου φερρίτη με διάμετρο 600mm. Η ακτίνα του αλουμινίου θα πρέπει να είναι ίση με 300mm. Στη διάταξη αυτή το δακτυλίδι του αλουμινίου θα έχει το ίδιο πάχος με την κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη: 10mm. Επίσης, όμοια με την κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη, στη διάταξη ενιαίου φερρίτη το πάχος του φερρίτη θα είναι 10mm, και το πάχος του πηνίου θα είναι 4mm.

Ο φερρίτης κυλινδρικού σχήματος θα έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακτίνα, τέτοια ώστε να μην ακουμπά στο αλουμίνιο. Υπολογίζεται επομένως μία ακτίνα φερρίτη ίση με 286mm. Η εσωτερική του ακτίνα R υπολογίζεται ούτως ώστε να έχουμε τον ίδιο όγκο με τον φερρίτη στη διάταξη με τις ράβδους φερρίτη :

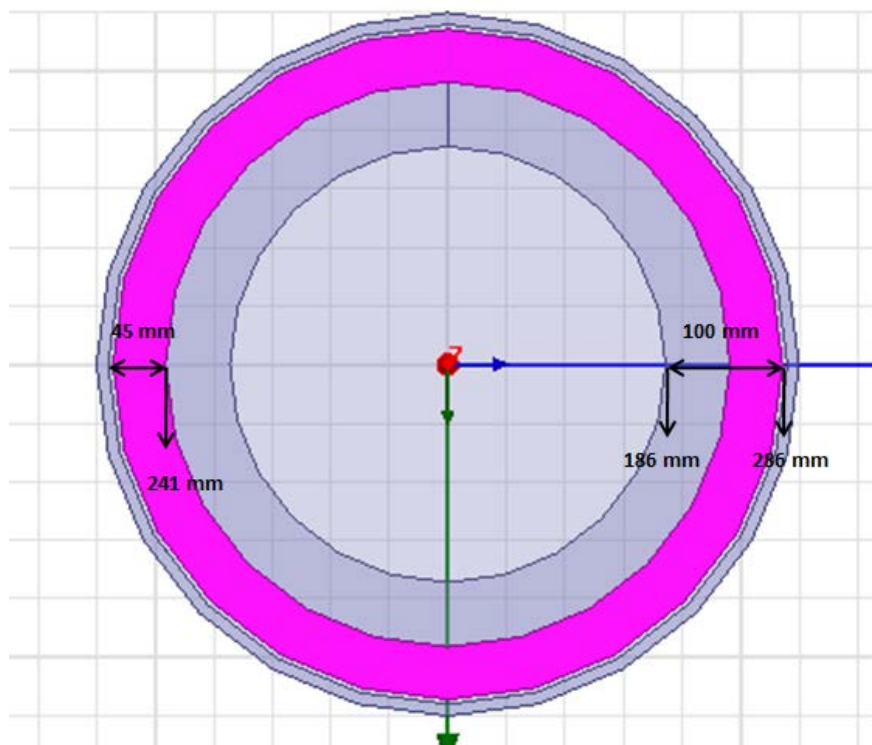
$$\text{Όγκος φερρίτη διάταξης με ράβδους} = 21 * 118 * 30 * 10 = 743,4 \text{ cm}^3 = 743.400 \text{ mm}^3 \text{ (5.1)}$$

Άρα, αν R η εσωτερική ακτίνα του τυλίγματος στη διάταξη ενιαίου φερρίτη, πρέπει:

Όγκος φερρίτη διάταξης με ράβδους= Όγκος φερρίτη διάταξης με ενιαίο φερρίτη \Rightarrow

$$74340 = \pi * 280^2 - \pi * R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{\pi * 280^2 - 74340}{\pi}} \rightarrow R = 241 \text{ mm}$$

Άρα η εσωτερική ακτίνα του φερρίτη είναι 241 mm, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



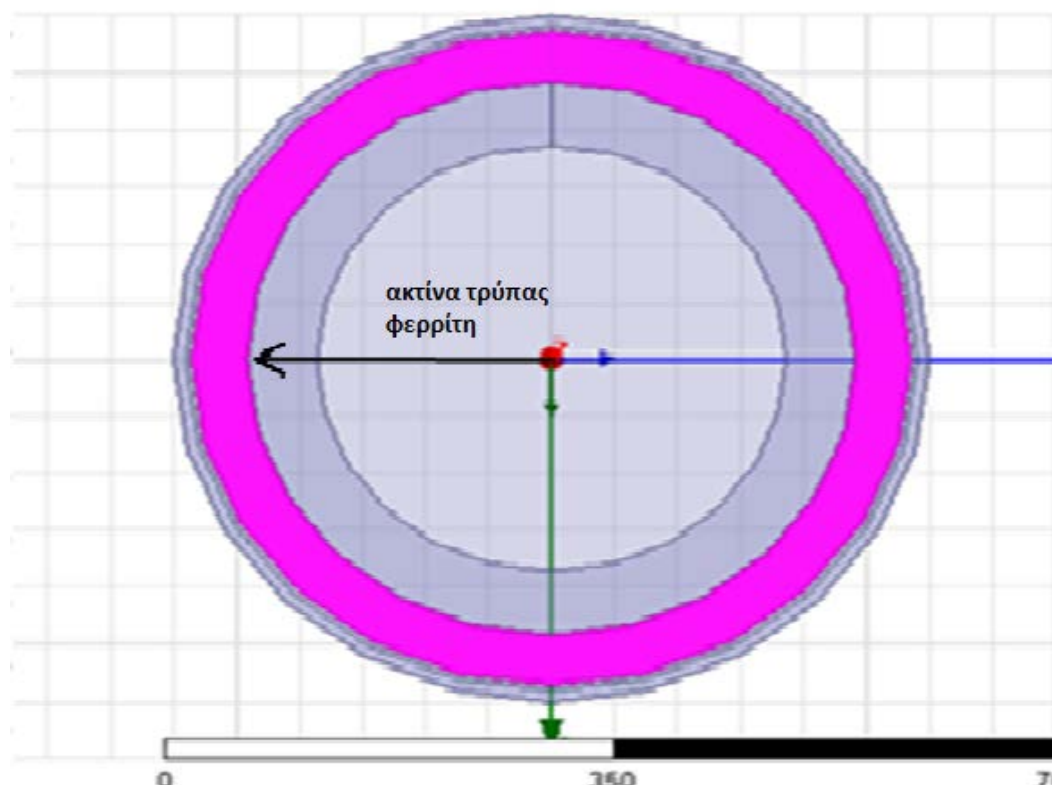
Σχήμα 5.4: Μήκος διατομής τυλιγμάτων και διαστάσεις φερρίτη στη διάταξη ενιαίου φερρίτη.

Σχετικά με τη διάταξη ενιαίου φερρίτη έχει βρεθεί ότι η βέλτιστη θέση των τυλιγμάτων για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος είναι όσο το δυνατό εξωτερικά της διάταξης. Η εξωτερική ακτίνα των ελιγμάτων γίνεται επομένως όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώστε να μην έρχεται σε επαφή με το αλουμινένιο δαχτυλίδι. Με τον αριθμό των ελιγμάτων στα 25 και την διάμετρο κάθε ελίγματος στα 4mm το μήκος της διατομής του τυλίγματος υπολογίζεται στα 100 mm. Επομένως τα τυλίγματα ξεκινούν από τα 186mm έως τα 286mm, όπως στο Σχήμα 5.4.

Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο Maxwell έδειξε ότι για μηδενική μετατόπιση και διάκενο 10mm η διάταξη ενιαίου φερρίτη αποδίδει μία ισχύ 10063,28 VA. Η διάταξη με ράβδους φερρίτη αποδίδει μία ισχύ 23.735,79 VA, ίση δηλαδή με 235,8% σε σχέση με την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη. Είναι, επομένως, σαφές ότι η σωστή αξιοποίηση ενός συγκεκριμένου όγκου φερρίτη δύναται να μεταφέρει πολύ μεγαλύτερα ποσά ισχύος.

Είναι σαφές ότι για να μπορέσει η διάταξη ενιαίου φερρίτη να μεταφέρει μία ισχύ ίση με τη διάταξη ράβδων φερρίτη ($P_{su} = 23.735,79VA$), θα πρέπει να μειωθεί σημαντικά η τρύπα φερρίτη (Σχήμα 5.7).

Από προσομοιώσεις που έγιναν για μεταβλητή τρύπα φερρίτη, παρατηρούμε ότι μειώνοντας την τρύπα του φερρίτη η ισχύς αυξάνεται. (Πίνακας 5.3).

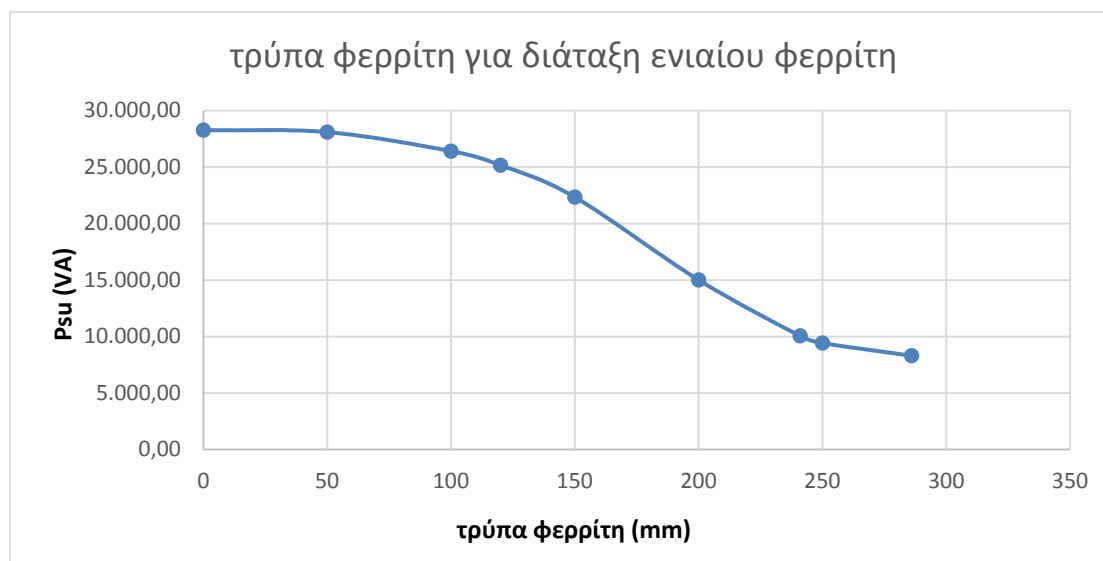


Σχήμα 5.5: Τρύπα φερρίτη διάταξης ενιαίου φερρίτη.

Τρύπα φερρίτη (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	789,33	790,37	366,76	28.269,54
50	788,69	788,94	365,31	28.097,29
100	774,55	774,74	350,97	26.410,06
120	762,72	762,13	339,82	25.168,31
150	736,28	735,13	314,46	22.343,54
200	622	620,61	236,82	15.010,78
241	492,17	493,67	172,94	10.063,28
250	473,02	474,17	164,06	9.428,81
286	432,41	432,17	146,99	8.304,36

Πίνακας 5.4: Τρύπες φερρίτη και ισχύς που αποδίδεται.

Παρατηρούμε από το Διάγραμμα 5.6 ότι η τιμή ισχύος $P_{su} = 23.735,79\text{VA}$ που μεταφέρει η αντίστοιχη διάταξη με ράβδους φερρίτη, δύναται να μεταφερθεί από μία διάταξη ενιαίου φερρίτη, η οποία έχει μία τρύπα φερρίτη ακτίνας μεταξύ 120mm και 150mm.



Διάγραμμα 5.6: Τιμές ισχύος για διάφορες τιμές τρύπας φερρίτη.

Υποθέτουμε ότι μεταξύ αυτών των δύο σημείων η σχέση των μεγεθών είναι γραμμική και η ισχύς θα δίνεται από την σχέση:

$$P = ax + b(1)$$

όπου P η ισχύς και x η τρύπα του φερρίτη. Από τον πίνακα 5.5 έχω τις τιμές της ισχύος για τρύπα 120 και 150 οπότε αρκεί η επίλυση του συστήματος:

$$22.343,54 = 150a + b \quad (2)$$

$$25.168,31 = 120a + b \quad (3)$$

Λύνοντάς το σύστημα των (1) και (2) παίρνω:

$$a = -94,159 \quad \text{και} \quad b = 36467,39$$

Οπότε για να βρω την τιμή της τρύπας φερρίτη που αναζητώ αντικαθιστώ στη σχέση (1) όπου P την τιμή που είχαμε βρει για την μέγιστη ισχύ που είχε η κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη ($P_{su} = 23.735,79 \text{ VA}$)

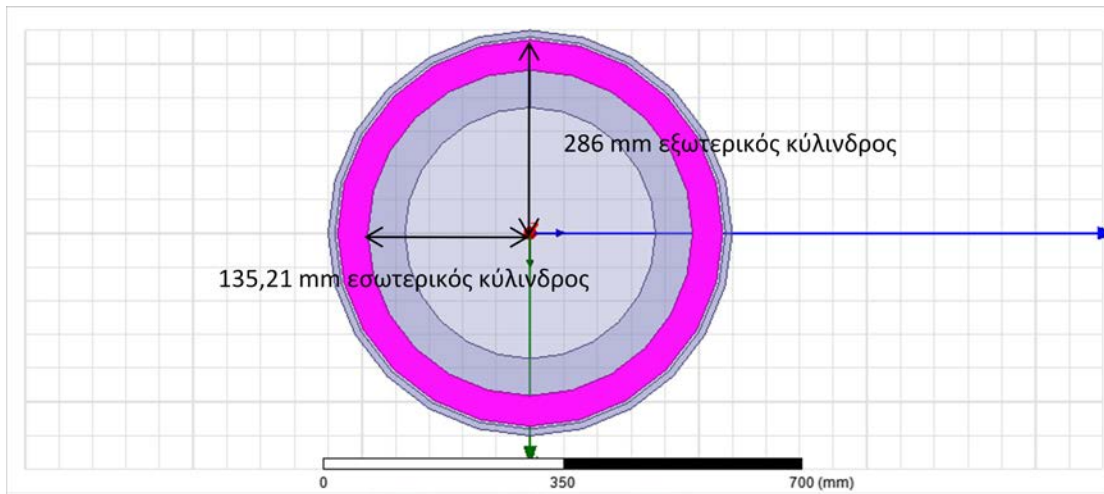
$$23.735,79 = -94,159x + 36.467,39 \Rightarrow x = 135,21 \text{ mm}$$

Καταλήγουμε επομένως ότι για να μεταφέρουμε μία ισχύ ίση με 23.735,79 με τη διάταξη ενιαίου φερρίτη, απαιτείται μία τρύπα φερρίτη ίση με 135,21mm.

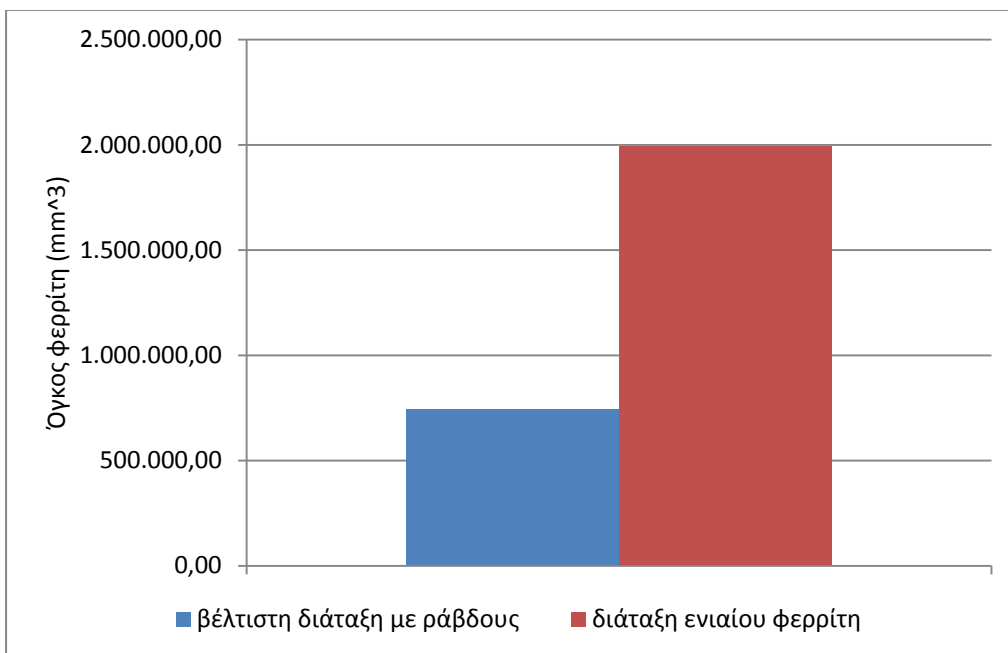
Ο υπολογισμός αυτός επιβεβαιώνεται και από την προσομοίωση για κυκλική διάταξη με ενιαίο φερρίτη και τρύπα φερρίτη ίση με 135,21mm, όπου υπολογίζεται ότι η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 23.986,38.

Για τη συγκεκριμένη ακτίνα τρύπας φερρίτη ο όγκος της διάταξης ενιαίου φερρίτη υπολογίζεται ως διαφορά των όγκων δύο κυλίνδρων (Σχήμα 5.6), ο ένας με την εξωτερική ακτίνα του φερρίτη 286mm και ο άλλος με την εσωτερική ακτίνα του που υπολογίστηκε στα 135,21mm:

Όγκος διάταξης ενιαίου φερρίτη = $3,14 * 286^2 * 10 - 3,14 * 135,21^2 * 10 = 1.994.347,64 \text{ mm}^3$



Σχήμα 5.6: Οι δύο κύλινδροι (σε κάτοψη) που αφαιρούμε μεταξύ τους για να πάρουμε τον όγκο του κυλινδρικού δακτυλίου.



Διάγραμμα 5.7: Όγκος φερρίτη για διάταξη ενιαίου φερρίτη και κυκλική με ράβδους, με στόχο την απόδοση ίδιας ισχύος.

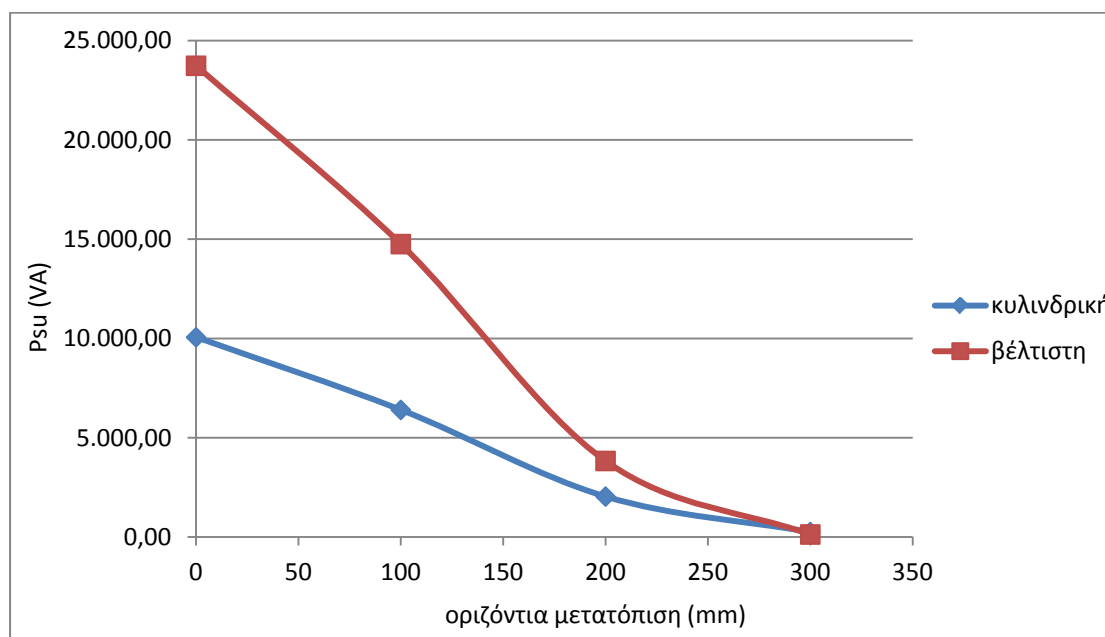
Από το διάγραμμα 5.7 είναι φανερό ότι η διάταξη ενιαίου φερρίτη χρησιμοποιεί πολύ περισσότερο φερρίτη –πάνω από τον διπλάσιο- για να επιτύχει ίδια ισχύ εξόδου. Συγκεκριμένα ο όγκος του φερρίτη στην διάταξη ενιαίου φερρίτη είναι 168% αυξημένος σε σχέση με τη διάταξη με ράβδους φερρίτη γεγονός που δείχνει ότι η διάταξη με τις ράβδους κάνει καλύτερη αξιοποίηση του φερρίτη.

5.5 Οριζόντια μετατόπιση

Στην υποενότητα αυτή θα εξετασθεί η επίδραση της οριζόντιας μετατόπισης στη μεταφορά ισχύος για τις δύο διατάξεις: τη διάταξη με ράβδους φερρίτη, όπου γίνεται η βέλτιστη αξιοποίηση φερρίτη και της διάταξης ενιαίου φερρίτη ίδιου όγκου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη διάταξη ενιαίου φερρίτη φαίνονται στον Πίνακα 5.5. Αντίστοιχα αποτελέσματα για τη διάταξη ράβδων φερρίτη έχουν δοθεί στην υποενότητα 4.4.

Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	492,17	493,67	172,94	10.063,28
100	502,78	502,63	139,21	6.404,39
200	513,02	512,72	79,387	2.041,76
300	513,31	515,06	28,233	257,06

Πίνακας 5.5: Οριζόντιες μετατοπίσεις για την διάταξη ενιαίου φερρίτη και αποδιδόμενη ισχύς.



Διάγραμμα 5.8: Επίδραση οριζόντιας μετατόπισης στην μη αντισταθμισμένη ισχύ για βέλτιστη κυκλική με ράβδους 10 mm πάχους και κυλινδρικού φερρίτη διάταξη.

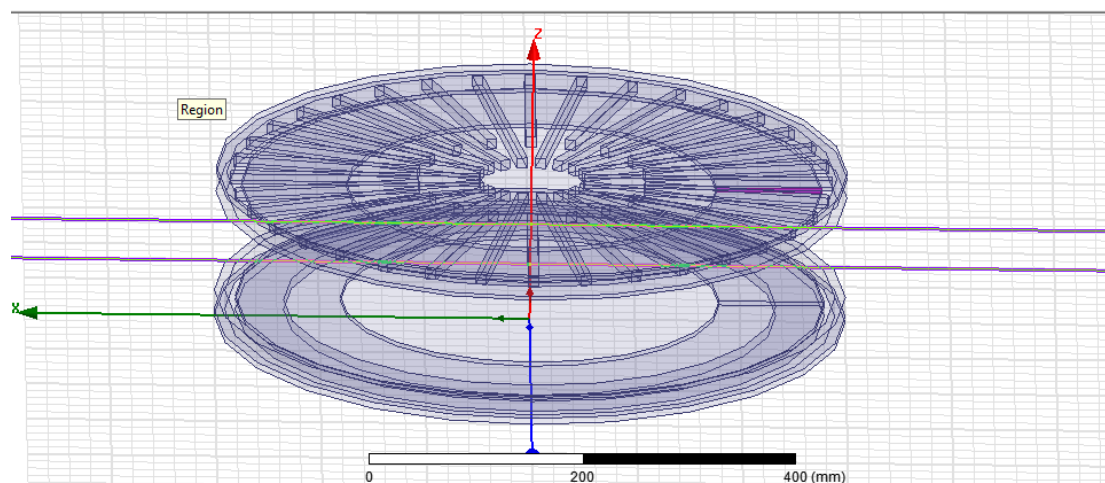
Παρατηρούμε ότι και οι δύο διατάξεις συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο ως προς τη μετατόπιση. Πιο συγκεκριμένα και στις δύο διατάξεις παρατηρείται ένας μηδενισμός σχεδόν της ισχύος για μία μετατόπιση ίση με το 50% της διαμέτρου.

5.6 Διαλειτουργικότητα μεταξύ κυκλικής διάταξης με ράβδους φερρίτη και κυκλικής διάταξης με ενιαίο φερρίτη.

Εδώ θα δούμε πως αλληλεπιδρά η διάταξη ενιαίου φερρίτη με την κυκλική διάταξη με ράβδους όταν τοποθετηθεί η μία ως δευτερεύον και η άλλη ως πρωτεύον. Εδώ θεωρούμε ότι

οι δύο συγκρινόμενες διατάξεις έχουν τον ίδιο όγκο φερρίτη (Σχήμα 5.7). Πιο συγκεκριμένα μελετούνται:

- Η διάταξη ράβδων φερρίτη, όπως αυτή περιγράφεται για βέλτιστη αξιοποίηση του φερρίτη.
- Η διάταξη ενιαίου φερρίτη με τρύπα φερρίτη ίση με 241mm.

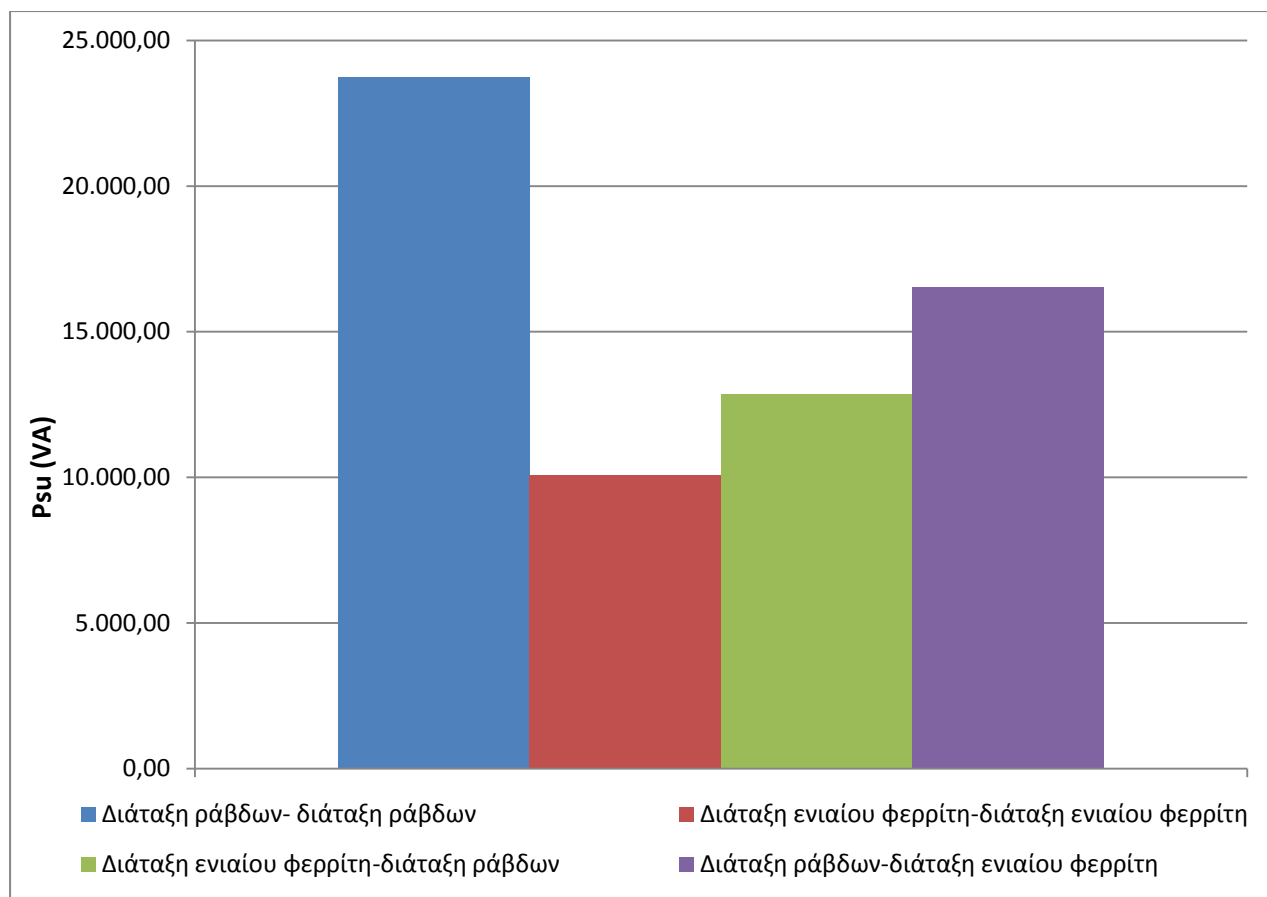


Σχήμα 5.7: Διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε διάταξη ενιαίου φερρίτη (πρωτεύον) και κυκλική με ράβδους φερρίτη (δευτερεύον).

Οι διάφοροι συνδυασμοί για πρωτεύον – δευτερεύον παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6. Αυτό που είναι εμφανές είναι ότι με την διάταξη ράβδων φερρίτη στη θέση του πρωτεύοντος η ισχύς παίρνει μεγαλύτερες τιμές από όταν για πρωτεύον έχουμε την διάταξη ενιαίου φερρίτη. Βέβαια ο καλύτερος συνδυασμός όλων παραμένει η διάταξη ράβδων και στα δύο pads ενώ αυτός που δίνει την μικρότερη δυνατή ισχύ είναι η διάταξη ενιαίου φερρίτη σε πρωτεύον και δευτερεύον.

Πρωτεύον	Δευτερεύον	Psu
Διάταξη Ράβδων	Διάταξη Ράβδων	23.735,79
Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη	Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη	10.063,28
Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη	Διάταξη Ράβδων	12.844,49
Διάταξη Ράβδων	Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη	16.542,99

Πίνακας 5.6: Τιμές ισχύος διαλειτουργικότητας για όλα τα πιθανά ζεύγη ανάμεσα σε διάταξη ενιαίου φερρίτη και διάταξη ράβδων.



Διάγραμμα 5.9: Ισχύς για διάφορες διαλειτουργικότητες.

5.6.1 Διαλειτουργικότητα και μετατόπιση

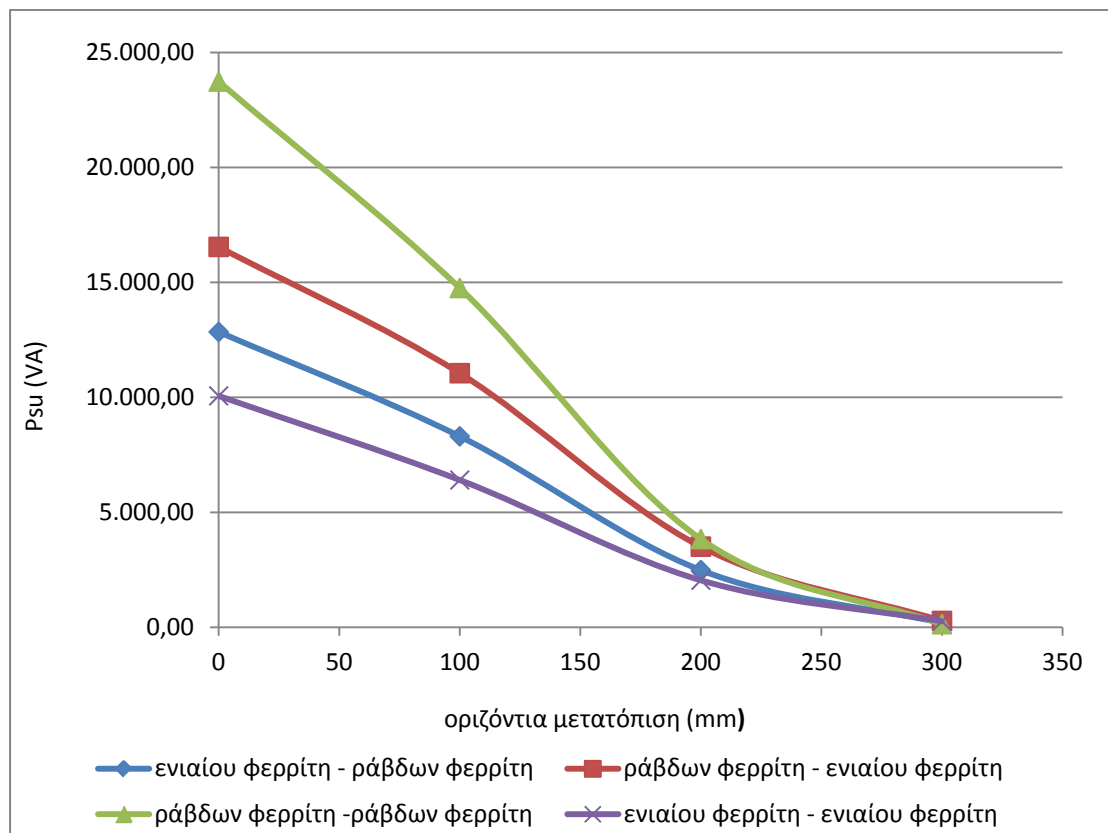
Εξετάστηκε επίσης και η μετατόπιση στην περίπτωση που μεταφορά ισχύος πραγματοποιείται μεταξύ δύο διαφορετικών παρ. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται στους Πίνακες 5.7 και 5.8.

Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu(VA)
0	513,71	661,63	226,19	12.844,49
100	507,93	675,96	-183,82	8.303,28
200	494,31	697,14	102,14	2.485,75
300	494,96	699,94	28,532	193,19

Πίνακας 5.7: Διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε διάταξη ενιαίου φερρίτη και βέλτιστη κυκλική διάταξη με την διάταξη ενιαίου φερρίτη ως πρωτεύον και τη διάταξη ράβδων φερρίτη ως δευτερεύον.

Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	661,63	513,71	226,19	16.542,99
100	675,96	507,93	-183,82	11.050,12
200	697,14	494,31	102,14	3.505,72
300	699,94	494,96	28,532	273,20

Πίνακας 5.8: Διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε διάταξη ενιαίου φερρίτη και βέλτιστη κυκλική διάταξη με τη διάταξη ράβδων φερρίτη ως πρωτεύον και τη διάταξη ενιαίου φερρίτη ως δευτερεύον.



Διάγραμμα 5.10: Ισχύς και διαλειτουργικότητα με εναλλαγές για πρωτεύον δευτερεύον μεταξύ των διατάξεων.

Από το Διάγραμμα 5.10 είναι φανερό ότι η συμπεριφορά των διατάξεων ως προς τη μετατόπιση είναι παρόμοια για όλους τους εξεταζόμενους συνδυασμούς μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Πιο συγκεκριμένα για όλους τους συνδυασμούς που εξετάστηκαν η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται όταν η μετατόπιση γίνει ίση με το 50% της διαμέτρου της διάταξης.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

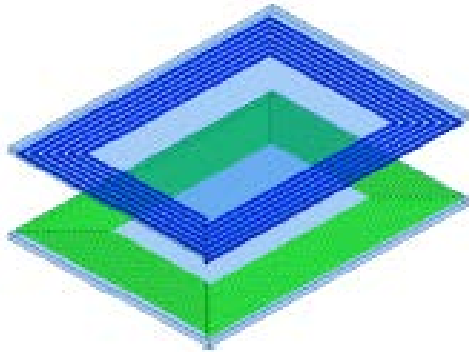
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί μία ορθογώνια διάταξη, ώστε να συγκριθεί με τις κυκλικές διατάξεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Αρχικά θα μελετηθεί πώς επηρεάζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ορθογώνιας διάταξης (το πάχος του φερρίτη, η τρύπα του φερρίτη και η θέση των τυλιγμάτων) τη μεταφερόμενη ισχύ. Θα εξετασθεί επίσης η διαλειτουργικότητα ανάμεσα στην ορθογώνια αυτή διάταξη και τις προηγούμενες κυκλικές διατάξεις που μελετήθηκαν.

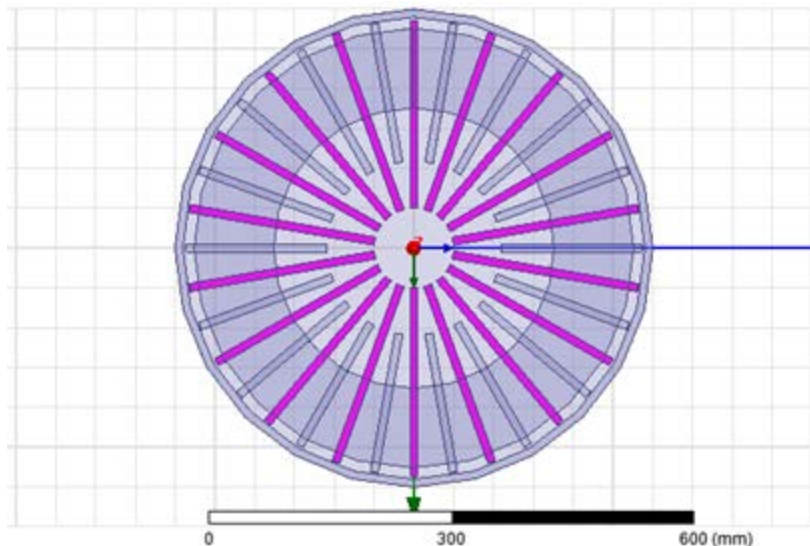
6.2 Περιγραφή διάταξης

Η ορθογώνια διάταξη που θα μελετηθεί στο κεφάλαιο αυτό είναι παρόμοια με την ορθογώνια διάταξη που παρουσιάζεται στην αναφορά [37] και απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.

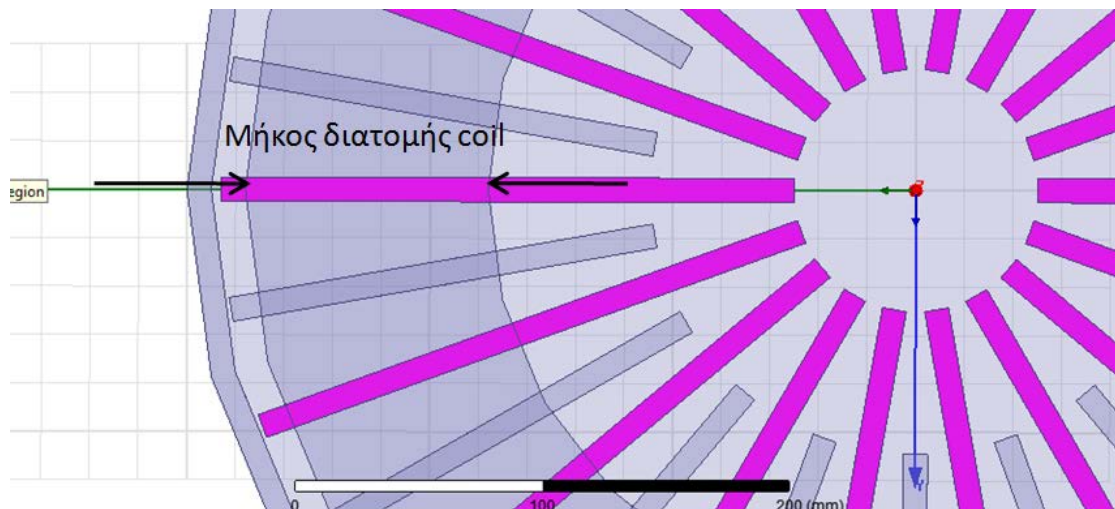


Σχήμα 6.1: Ορθογώνια διάταξη [37].

Στο 4^ο Κεφάλαιο εξάγεται το συμπέρασμα ότι η βέλτιστη κυκλική διάταξη σύμφωνα με τον βαθμό χρησιμοποίησης φερρίτη που υπολογίσθηκε αποτελείται από 18 φερρίτες μήκους 236mm και 18 φερρίτες μήκους 177mm ενώ το πλάτος όλων τους είναι 10mm (Σχήμα 6.2). Αποτελείται επίσης από 25 ελίγματα με διάμετρο 4mm για καθένα οπότε το μήκος διατομής του πηνίου είναι 100mm (σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.2: Κυκλική βέλτιστη διάταξη με ράβδους φερρίτη διαμέτρου 600mm.



Σχήμα 6.3: Μήκος διατομής τυλίγματος βέλτιστης κυκλικής διάταξης με ράβδους 10mm πλάτους.

Ο απώτερος σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η σύγκριση των κυκλικών διατάξεων με τις ορθογώνιες. Με στόχο την κατασκευή μίας ορθογώνιας διάταξης εμβαδού ίσου με αυτό μίας κυκλικής διαμέτρου 600mm (Σχήμα 6.1) καταλήγουμε στον υπολογισμό μίας παρόμοιας ορθογώνιας διάταξης:

$$\text{Εμβαδό ορθογώνιας διάταξης} = \text{Εμβαδό κυκλικής διάταξης} = \pi * R^2 = \pi * 300^2 = 282.600\text{mm}^2 \quad (6.1)$$

Για την ορθογώνια διάταξη θεωρούμε αρχικά πλευρές ίσου μήκους (τετράγωνη διάταξη). Στη συνέχεια θα προβούμε σε προσομοιώσεις μεταβάλλοντας το μήκος της κάθε πλευράς, ώστε να εξετασθεί πώς επηρεάζει η μεταβολή αυτή τη μεταφερόμενη ισχύ. Για μία τετράγωνη διάταξη με εμβαδό που δίνεται από τον τύπο (6.1) προκύπτει για το μήκος της κάθε πλευράς ότι:

$$(\text{Μήκος πλευράς})^2 = 282.600 \Rightarrow \text{Μήκος πλευράς} = \sqrt{282.600} \Rightarrow$$

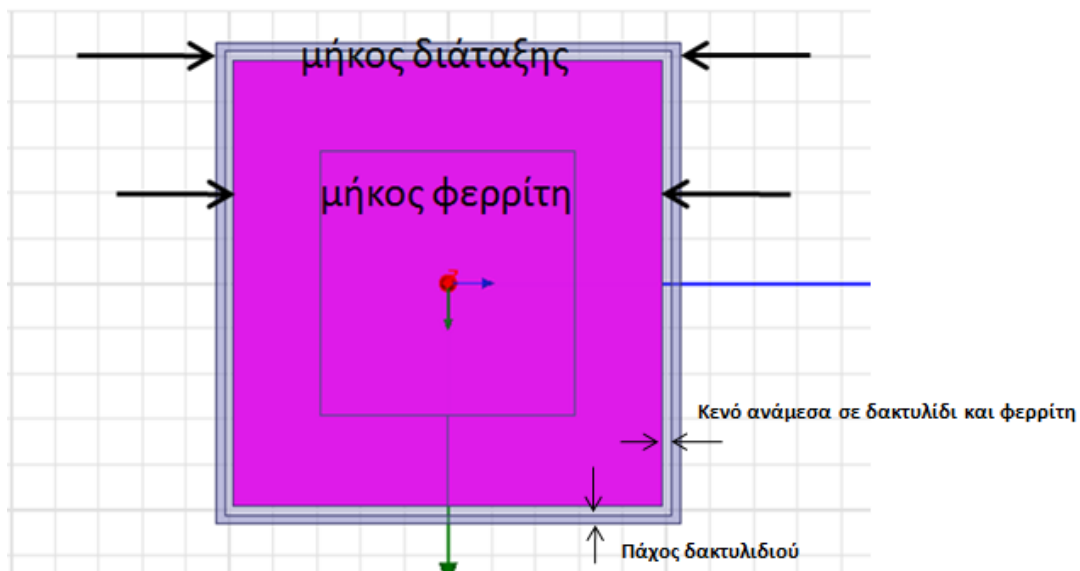
Μήκος πλευράς $\approx 531,6 \text{ mm}$

Στην ορθογώνια διάταξη, παρόμοια με τις κυκλικές που μελετήθηκαν, ένας αλουμινένιος δακτύλιος χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των μαγνητικών πεδίων που διαρρέονται στον εγγύτερο κοντινό χώρο της διάταξης. Το πάχος του δακτυλιδιού αλουμινίου είναι 10mm, ενώ θεωρούμε 10mm κενό ανάμεσα σ αυτό και τον φερρίτη. Επομένως η μέγιστη δυνατή διάσταση του φερρίτη θα είναι:

$$\text{Μήκος φερρίτη} = 531,6 - 20 - 20$$

Μήκος φερρίτη = 491,6mm

Οι διαστάσεις φαίνονται στο σχήμα 6.4 που ακολουθεί.



Σχήμα 6.4: Μήκος ορθογώνιας διάταξης και φερρίτη.

Αρχικά θα χρησιμοποιηθεί ενιαίος φερρίτης χωρίς κάποια τρύπα στο εσωτερικό του. Η επίδραση της τρύπας φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ θα εξετασθεί στη συνέχεια. Το πάχος του φερρίτη θεωρείται ίδιο με αυτή της κυκλικής διάταξης και ίσο με 10mm .

Σχετικά με το τύλιγμα που θα χρησιμοποιηθεί, θεωρούμε αρχικά ότι θα βρίσκεται όσο το δυνατό εξωτερικά της διάταξης. Οπότε το μήκος της εξωτερικής πλευράς του πηνίου θα είναι ίσο με το μήκος του φερρίτη, δηλαδή:

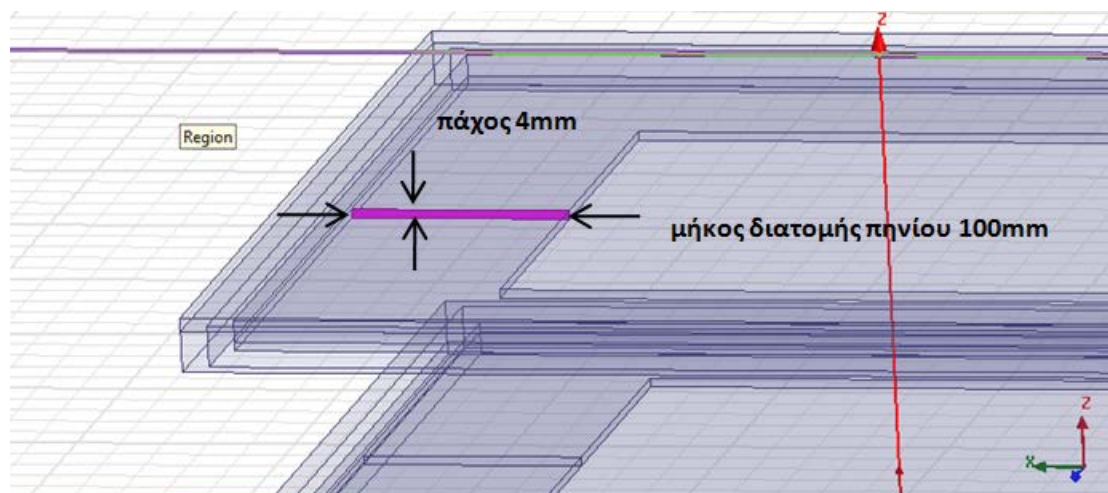
Μήκος εξωτερικής πλευράς πηνίου = 491,6mm

Για να επιτραπεί η σύγκριση με τις κυκλικές διατάξεις θεωρούμε ότι το τύλιγμα θα αποτελείται από 25 ελίγματα (παρόμοια με την κυκλική διάταξη που θεωρήσαμε αρχικά (Σχήμα 6.1). Και επειδή το κάθε τύλιγμα έχει διάμετρο 4mm το συνολικό μήκος διατομής θα είναι 100mm, ενώ το πάχος του πηνίου θα είναι 4mm. (Σχήμα 6.5) Επομένως υπολογίζεται ότι:

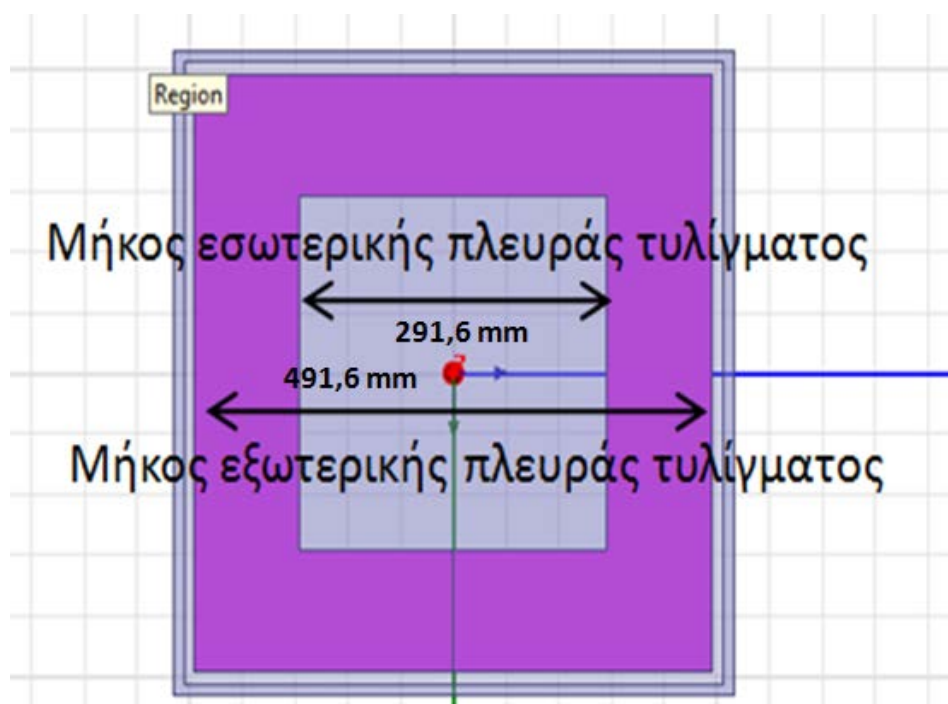
$$\text{Εξωτερική ακτίνα πηνίου} = 491,6/2 = 245,8\text{mm}$$

Εσωτερική ακτίνα πηνίου = $245,8 - 100 = 145,8 \text{ mm}$

Οι διαστάσεις για την εσωτερική και την εξωτερική διάσταση του πηνίου φαίνονται στο Σχήμα 6.6.

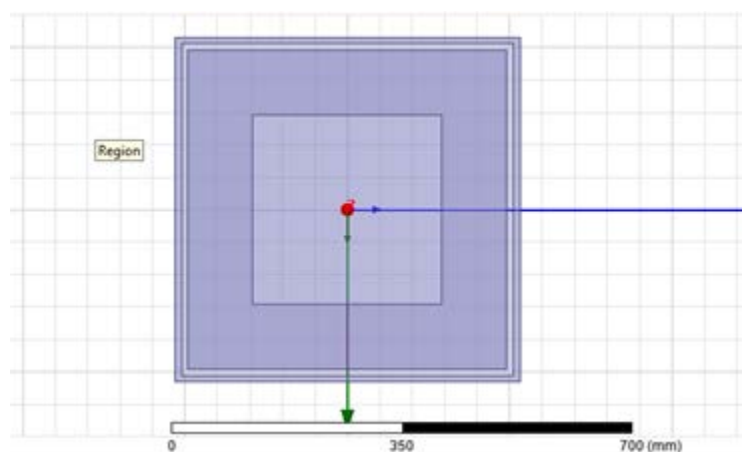


Σχήμα 6.5: Μήκος διατομής τυλίγματος ορθογώνιας διάταξης.



Σχήμα 6.6: Μήκη τυλίγματος ορθογώνιας διάταξης.

Η διάταξη που κατασκευάστηκε απεικονίζεται στο σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7: Ορθογώνια διάταξη

6.3 Χαρακτηριστικά ορθογώνιας διάταξης και μεταφερόμενη ισχύς

Εδώ θα παρατηρήσουμε πως τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης καθώς και τα χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων επιδρούν στη μεταφερόμενη ισχύ.

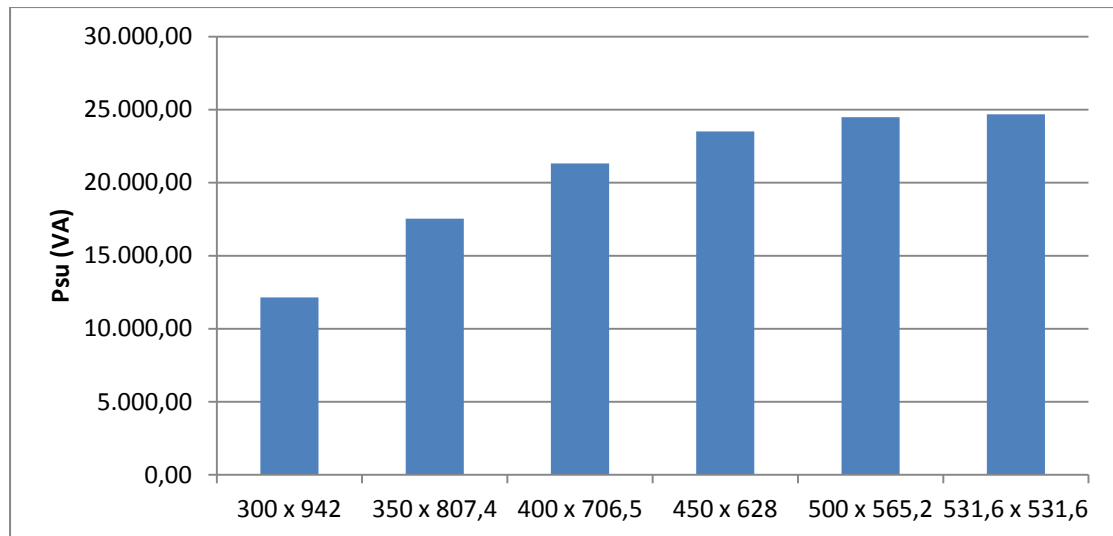
6.3.1 Χαρακτηριστικά φερρίτη

6.3.1.1 Μεταβολή διαστάσεων

Η διάταξη που κατασκευάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα είχε εμβαδό ίσο με το αντίστοιχο της υπό μελέτη κυκλικής διάταξης και θεωρήθηκε τετράγωνη (ίδιο μήκος και πλάτος), Ωστόσο το ίδιο εμβαδό μπορεί να έχουν και ορθογώνιες διατάξεις διαφορετικού μήκους και πλάτους. Παρακάτω παρουσιάζουμε τις προσομοιώσεις που έγιναν για διαφορετικά μήκη και πλάτη για την ορθογώνια διάταξη που δίνουν όμως σταθερό εμβαδό κάθε φορά ίσο με της κυκλικής διάταξης 600mm.

Μήκος διάταξης (mm)	Πλάτος διάταξης (mm)	L1 (μH)	L2(μH)	M (μH)	Psu (VA)
300	942	728,48	728,53	230,79	12.144,28
350	807,4	741,6	741,51	279,83	17.541,10
400	706,5	744.34	744,62	309,12	21.315,96
450	628	743,11	743,21	324,32	23.508,30
500	565,2	742,1	742,03	330,74	24.487,10
531,6	531,6	742,55	742,86	332,25	24.683,59

Πίνακας 6.1: Μεταβολή εξωτερικών διαστάσεων διάταξης και ισχύς που αποδίδεται.



Διάγραμμα 6.1: Ισχύς που αποδίδεται ανάλογα με τις εξωτερικές διαστάσεις της ορθογώνιας διάταξης.

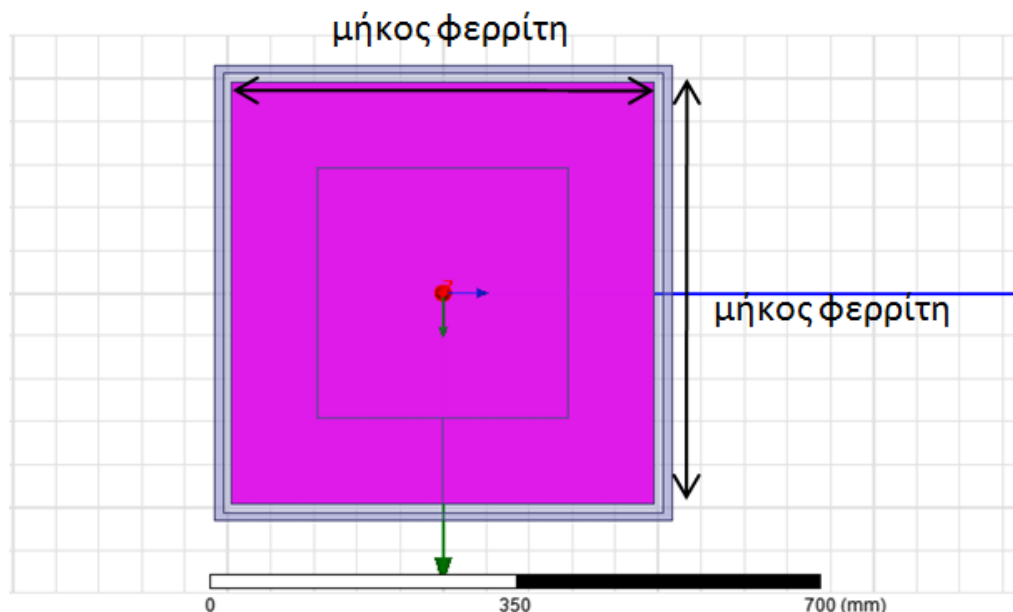
Από το διάγραμμα 6.1 είναι φανερό ότι η τετράγωνη διάταξη αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Στη συνέχεια επομένως θεωρούμε την τετράγωνη διάταξη ως αντιπροσωπευτική μεταξύ των ορθογώνιων διατάξεων. Έτσι είναι λογικό να καταλήξουμε στην χρήση τετράγωνης και όχι ορθογώνιας διάταξης με διαστάσεις 531,6 x 531,6 mm.

6.3.1.2 Διάσταση φερρίτη

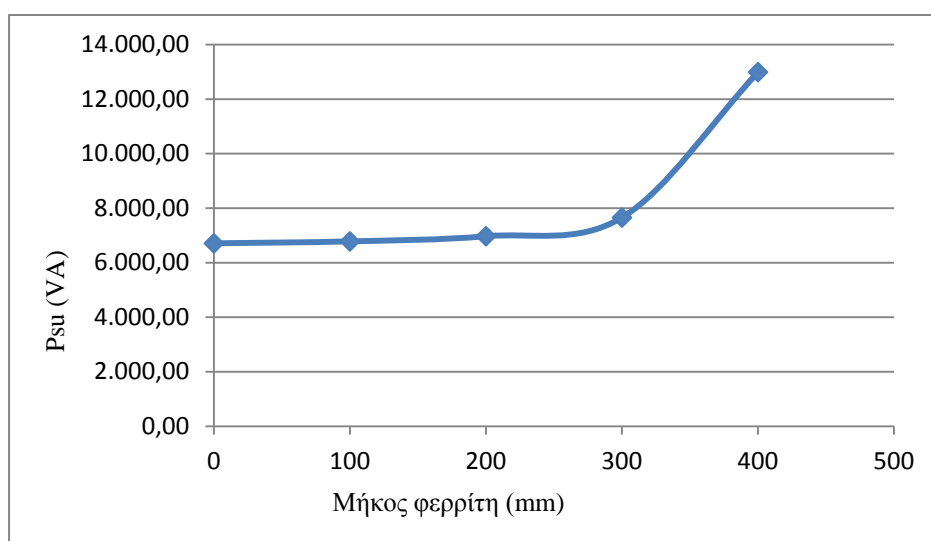
Σ' αυτές τις προσομοιώσεις μεταβάλλουμε την εξωτερική διάσταση του φερρίτη από 0mm έως 400mm. Επειδή η διάταξη είναι τετράγωνη η μεταβολή είναι και για τις δύο πλευρές. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 6.2.

Μήκος φερρίτη (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	398,32	398,23	126,83	6.709,58
100	399,3	399,15	127,65	6.780,95
200	402,37	402,45	129,95	6.969,89
300	418,29	418,5	138,87	7.654,32
400	528,19	528,3	203,26	12.989,98

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για μεταβολή του μήκους του φερρίτη



Σχήμα 6.8: Μήκος φερρίτη.



Διάγραμμα 6.2: Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για μεταβολή του μήκους του φερρίτη.

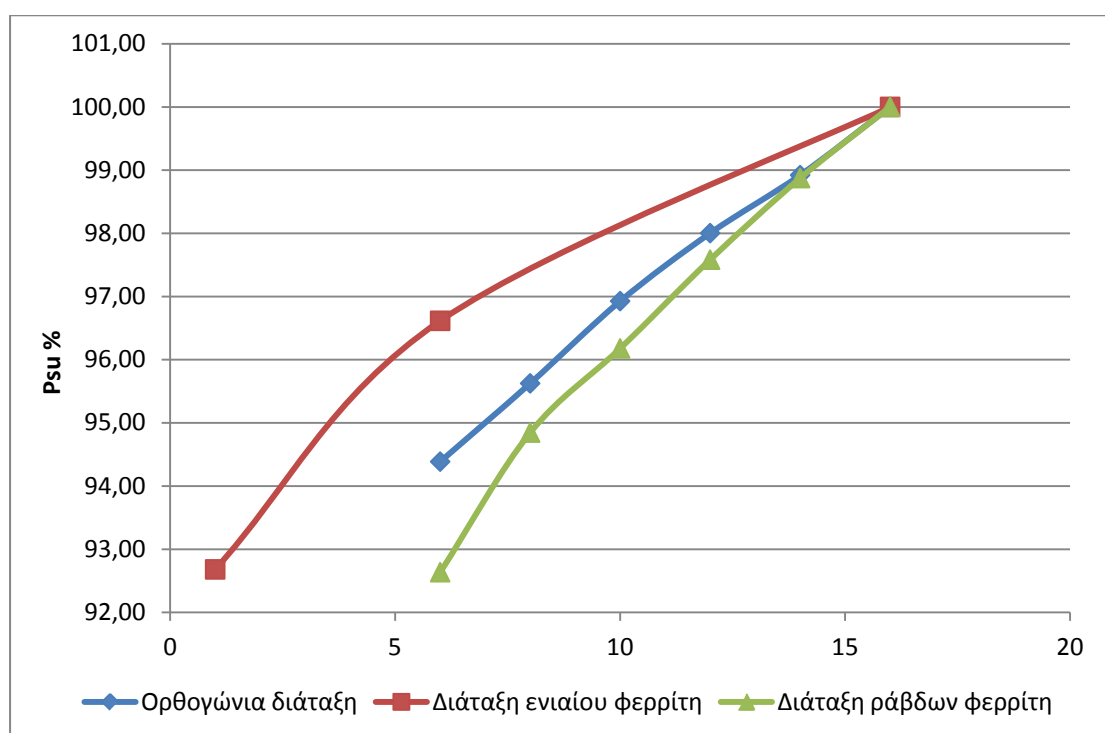
Από το διάγραμμα 6.1 μπορούμε να δούμε ότι η ισχύς παραμένει σχεδόν σταθερή για μεταβολή του μήκους φερρίτη από 0mm έως και 300mm ενώ για μεταβολή του μήκους φερρίτη από 300mm μέχρι 400mm η μεταβολή της ισχύος είναι πολύ μεγάλη. Η ισχύς δηλαδή από την μη χρήση φερρίτη (όταν το μήκος δηλαδή είναι μηδέν) μέχρι και την τοποθέτηση φερρίτη μήκους 300mm παρουσιάζει αύξηση 14 % ενώ αντίστοιχα για μεταβολή του μήκους φερρίτη από 300mm μέχρι και τα 400mm η αύξηση αυτή γίνεται ίση με 69,7 %.

6.3.1.3 Πάχος φερρίτη

Σ αυτήν την ενότητα θα εξετάσουμε το πάχος του φερρίτη, για την τετράγωνη διάταξη, μεταβάλλοντάς το από 6 μέχρι και 16mm. Οι μετρήσεις που παίρνουμε φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πάχος φερρίτη (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
6	735,68	735,78	326,3	24.036,51
8	739,16	738,99	329,15	24.351,99
10	742,55	742,86	332,25	24.683,59
12	745,48	745,22	334,62	24.957,70
14	747,45	747,69	336,74	25.191,45
16	750,6	751,04	339,33	25.466,35

Πίνακας 6.5: Μετρήσεις για μεταβολή του πάχους του φερρίτη.

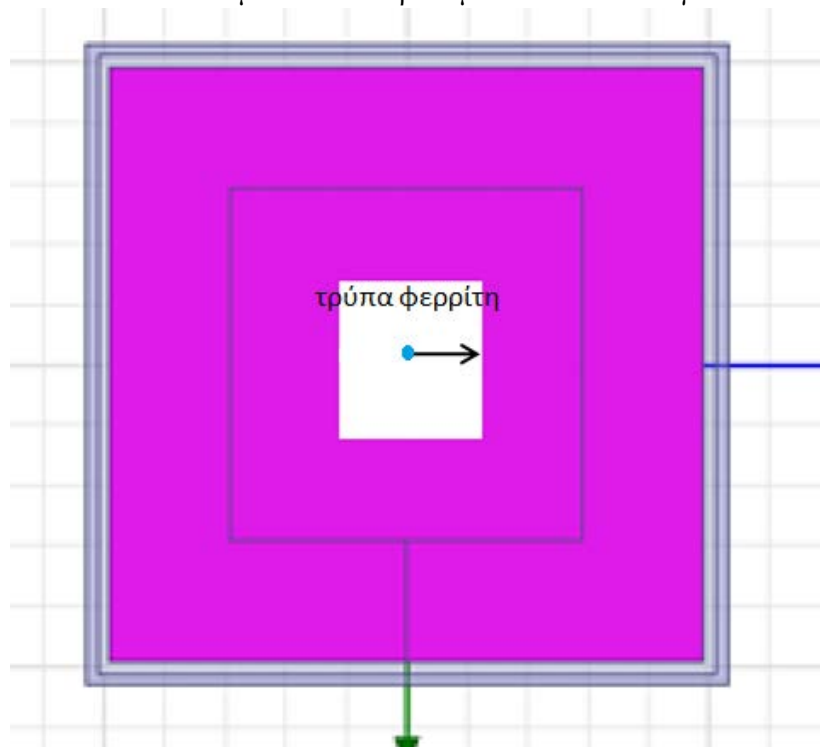


Διάγραμμα 6.5: Ισχύς επί τις εκατό ως προς διάφορα πάχη φερρίτη.

Το πάχος φερρίτη φαίνεται να μην έχει ιδιαίτερα σημαντική επίδραση στη μεταφορά ισχύος. Πιο συγκεκριμένα για την τετραγωνική διάταξη παρατηρούμε ότι για μια μεταβολή 200% στο πάχος (από 6 σε 16mm) η ισχύς παρουσιάζει αύξηση μόλις 5,9%, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 6.5. Παρόμοια, η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη διαμέτρου 420mm για ίδια μεταβολή πάχους παρουσιάζει αύξηση 7,36 % ενώ η διάταξη ενιαίου φερρίτη εμφάνιζε αύξηση ισχύος 7,33%.

6.3.1.4 Τρύπα φερρίτη

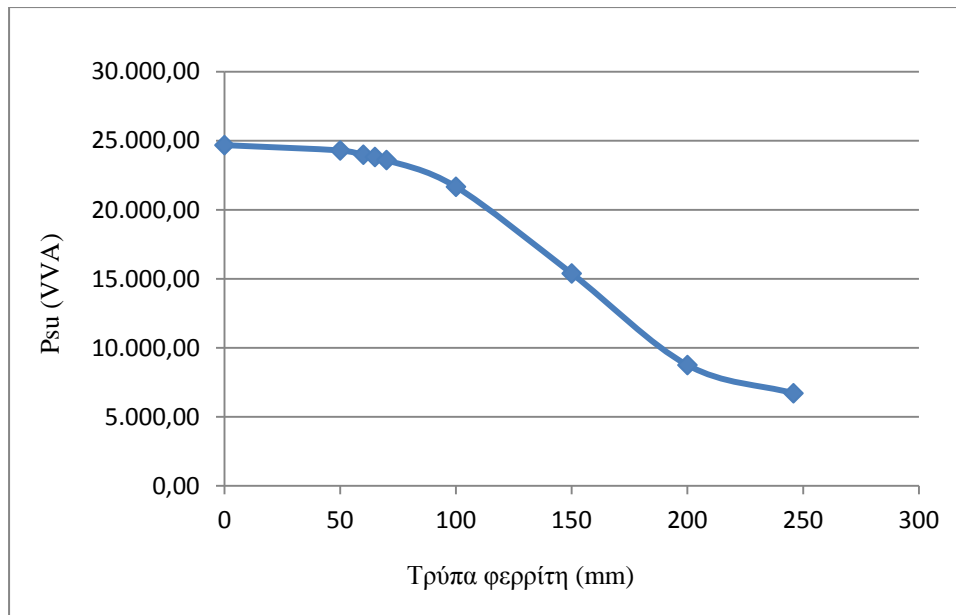
Το τελευταίο χαρακτηριστικό του φερρίτη που έμεινε προς εξέταση είναι η τρύπα που σχηματίζει στο κέντρο του. Η τρύπα είναι τετράγωνου σχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν δίνονται στον Πίνακα 6.6.



Σχήμα 6.7: Τρύπα φερρίτη στην τετραγωνική διάταξη.

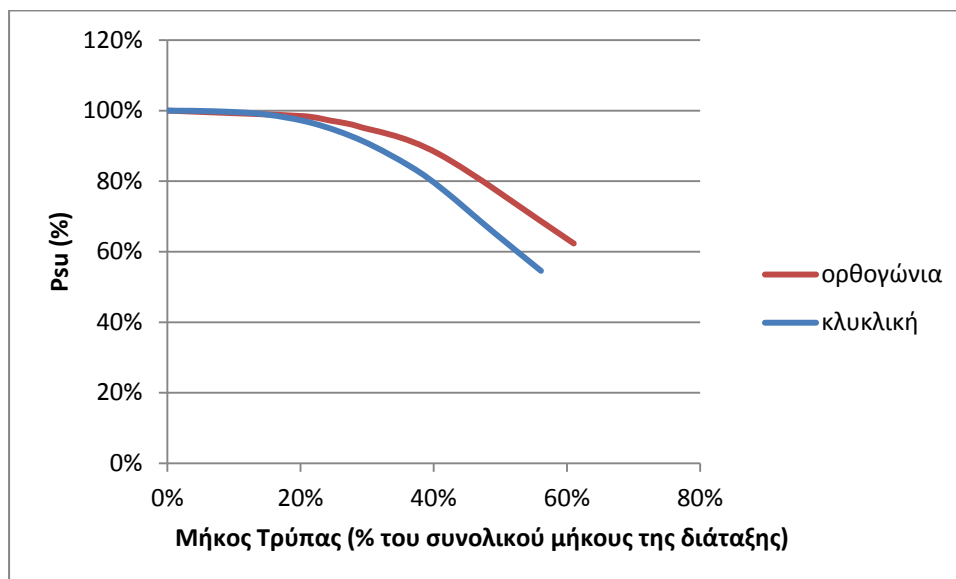
Τρύπα φερρίτη (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	742,55	742,86	332,25	24.683,59
50	739,01	739,15	328,83	24.299,40
60	735,85	735,95	326,02	23.989,74
65	734,53	734,48	324,58	23.825,87
70	732,42	732,16	322,56	23.604,80
100	714,64	714,7	305,33	21.667,09
150	631,65	631,75	241,92	15.388,05
200	465,77	466,03	156,71	8.753,16
245,8	398,32	398,23	126,83	6.709,58

Πίνακας 6.6: Μετρήσεις για μεταβολή της τρύπας του φερρίτη.



Διάγραμμα 6.6: Επίδραση της τρύπας του φερρίτη στην ισχύ εξόδου.

Από το Διάγραμμα 6.7 φαίνεται ότι μέχρι ένα μήκος τρύπας φερρίτη 70mm δεν προκαλείται ουσιαστική διαφορά στην ισχύ. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά στην ισχύ υπολογίζεται -4,4 %. Όμως έπειτα η ισχύς μειώνεται δραματικά με μεταβολή που αγγίζει το -62,9 % μέχρι και τα 200mm.



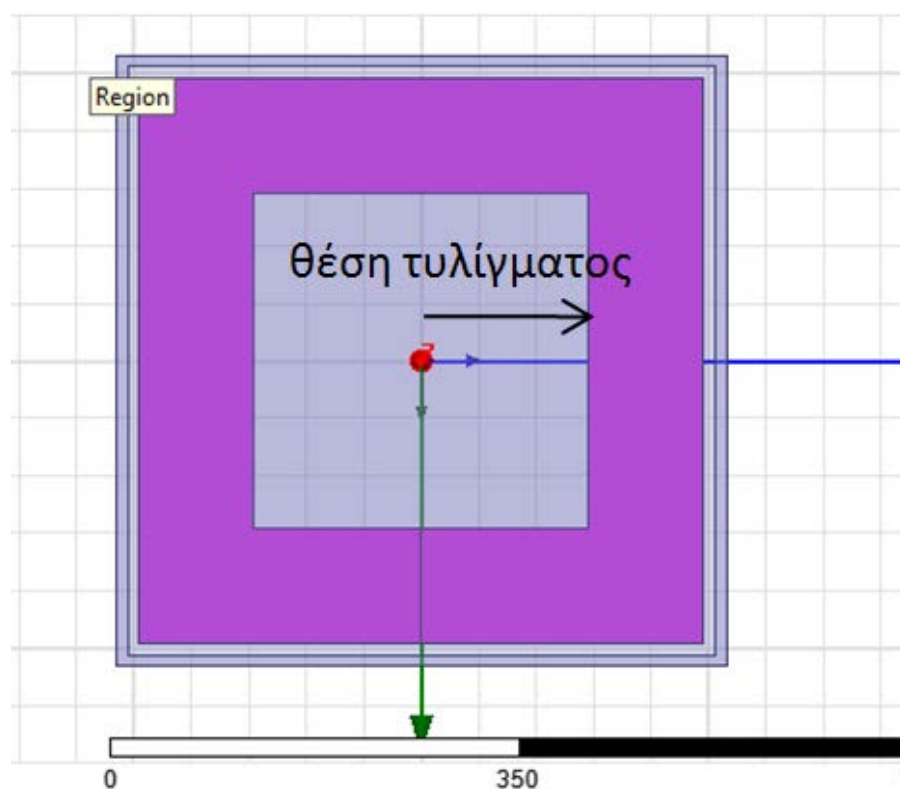
Διάγραμμα 6.7: Μήκος φερρίτη (ως ποσοστό του συνολικού μήκους της διάταξης) και ισχύς που αποδίδεται σε ποσοστό επί τις εκατό της μέγιστης κάθε φορά.

Συγκρίνοντας την ορθογώνια διάταξη με την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη (Διάγραμμα 6.7), παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν μία παρόμοια συμπεριφορά. Και η κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη παρουσιάζει μία σχεδόν σταθερή ισχύ μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο που αντιστοιχεί στο 20% περίπου της τρύπας φερρίτη ως προς το συνολικό μήκος της διάταξης. Μία απότομη μεταβολή παρατηρείται για μεγαλύτερη τρύπα φερρίτη και στις δύο διατάξεις.

6.3.2 Χαρακτηριστικά τυλίγματος

6.3.2.1 Θέση τυλίγματος

Σε αυτές τις προσομοιώσεις μετακινούμε την εσωτερική πλευρά του τυλίγματος κρατώντας τον αριθμό των ελιγμάτων σταθερό. Δηλαδή μεταβάλλεται η εσωτερική και εξωτερική θέση των πλευρών του τυλίγματος μεταφέροντάς το έτσι κάθε φορά όλο και πιο εξωτερικά. Στο σχήμα 6.8 φαίνεται αυτή η μεταβολή (στο συγκεκριμένο σχήμα έχουμε μείωση της θέσης).



Σχήμα 6.8: Θέση τυλίγματος..

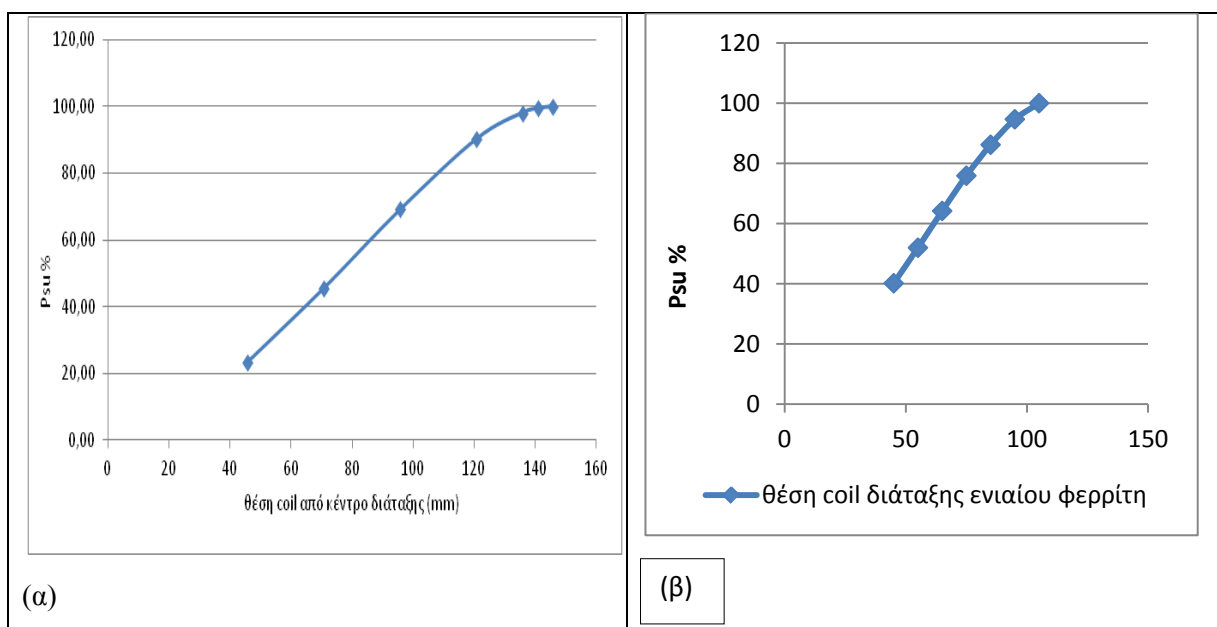
Ξεκινάμε με εσωτερική πλευρά για το τύλιγμα ίση με 45,8mm και εξωτερική 145,8mm και καταλήγουμε σε 145,8mm και 245,8mm αντίστοιχα. Ακολουθεί ο πίνακας με τις μετρήσεις για τις αυτεπαγωγές και την υπολογισμένη τιμή ισχύος.

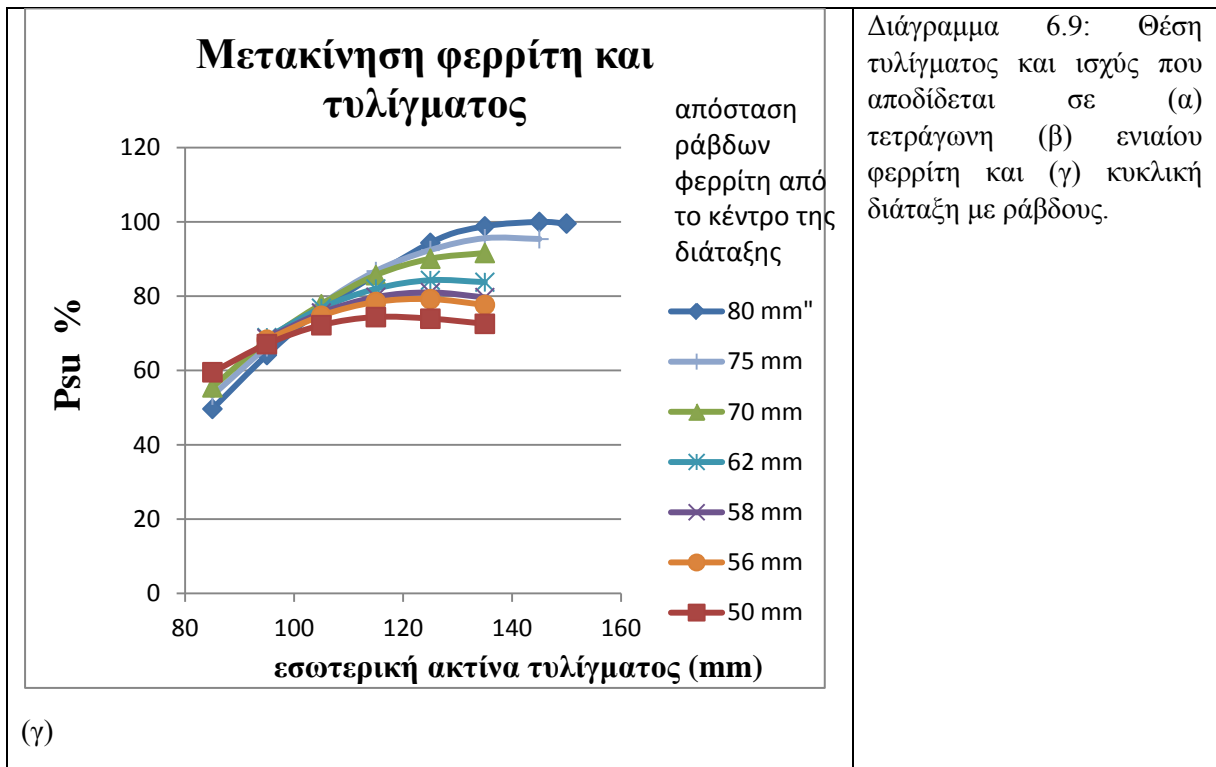
Θέση πηνίου - εσωτερική διάσταση(mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
45,8	282,29	282,05	98,984	5.770,18
70,8	411,97	412,26	166,98	11.234,22
95,8	540,01	540,06	235,49	17.056,43
120,8	660,89	660,84	297,67	22.272,00
135,8	719,72	719,95	323,86	24.199,01
140,8	731,17	730,77	328,48	24.525,76
145,8	740,15	739,91	331,49	24.668,76

Πίνακας 6.7: Μετρήσεις για την μετακίνηση του τυλίγματος.

Από το διάγραμμα 6.9α βλέπουμε την κατακόρυφη αύξηση της ισχύος καθώς μετακινούμε το τύλιγμα όλο και πιο εξωτερικά. Πιο συγκεκριμένα για αύξηση της θέσης τυλίγματος από 45,8mm σε 135,8mm η ισχύς αυξάνεται κατά 319%. Από την θέση 135,8mm και έπειτα η αύξηση της ισχύος δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Πιο συγκεκριμένα για αύξηση της θέσης τυλίγματος από 135,8mm σε 145,8mm η αύξηση της ισχύος είναι ίση με 1,9 %.

Παρατηρούμε επίσης ότι η βέλτιστη θέση για το τύλιγμα είναι όσο το δυνατό εξωτερικά της διάταξης (Διάγραμμα 6.9α). Παρόμοια και στην κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη η βέλτιστη θέση για τα τυλίγματα με στόχο τη μεγιστοποίηση της ισχύος είναι όσο το δυνατό εξωτερικά της διάταξης, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 6.9β. Αντίθετα για την κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη (Διάγραμμα 6.9γ) η βέλτιστη θέση για το τύλιγμα εξαρτάται και από τη θέση των ράβδων φερρίτη. Πιο συγκεκριμένα η ισχύς μεγιστοποιείται όταν το εσωτερικό άκρο του φερρίτη απέχει 80mm από το κέντρο τη διάταξης και τότε η βέλτιστη εσωτερική ακτίνα των τυλιγμάτων είναι 145mm.



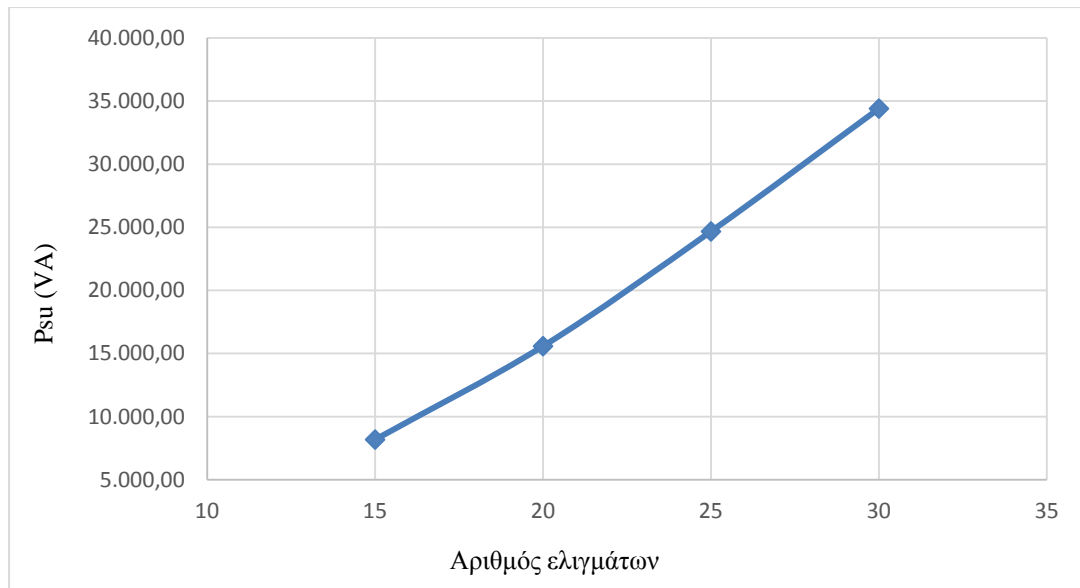


6.3.2.2 Αριθμός ελιγμάτων

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό των τυλιγμάτων το οποίο θα μελετήσουμε είναι ο αριθμός των ελιγμάτων. Αυτός θα μεταβληθεί από 15 έως 30 με βήμα 5.

Αριθμός ελιγμάτων	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
15	350,35	350,43	-131,35	8.177,95
20	543,95	543,82	-225,85	15.580,10
25	740,15	739,91	-331,49	24.668,76
30	929,89	930,04	-438,89	34.402,90

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για διάφορες τιμές αριθμού ελιγμάτων.

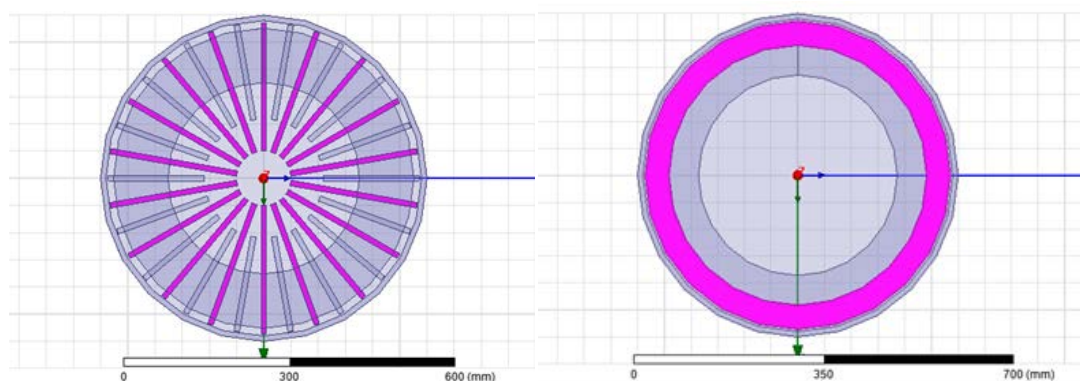


Διάγραμμα 6.10: Αποδιδόμενη ισχύς – αριθμός ελιγμάτων.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που βοηθάει στην αύξηση ισχύος όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα 6.10 είναι ο αριθμός των ελιγμάτων. Όσο πιο πολλά ελίγματα τόσο μεγαλύτερη η ισχύς στην έξοδο. Πιο συγκεκριμένα η μεταφερόμενη ισχύς για μία διάταξη με 30 ελίγματα σε σχέση με αντίστοιχη με μόνο 15, αυξάνεται κατά 320,6 %.

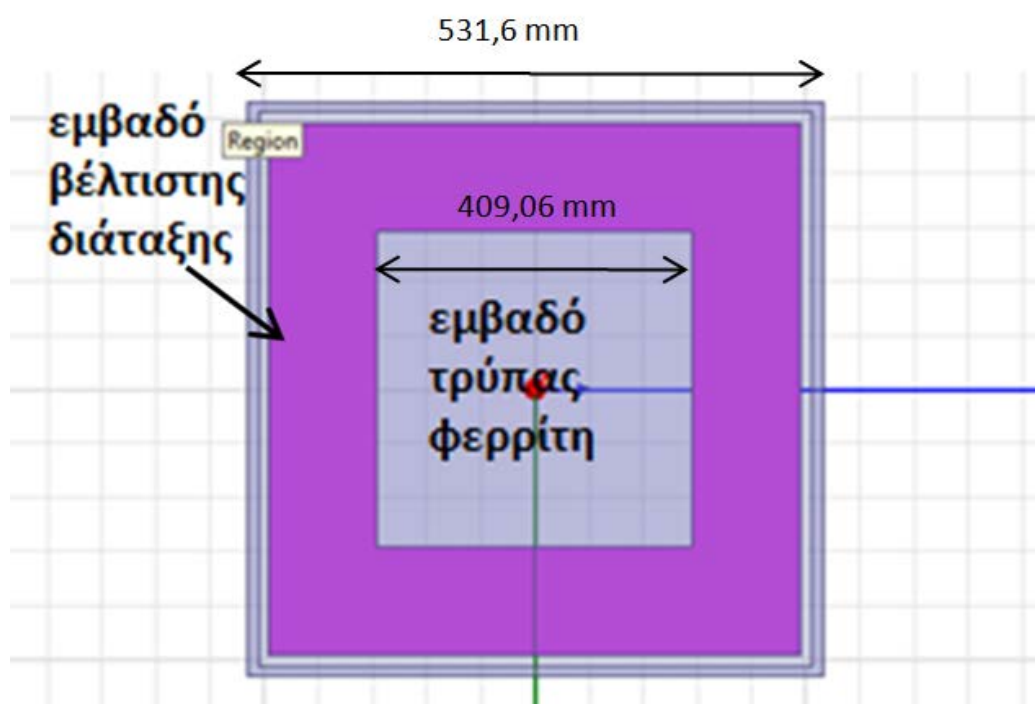
6.4 Επίδραση του όγκου φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ.

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε την επίδραση του όγκου του φερρίτη στη μεταφερόμενη ισχύ. Στο προηγούμενο κεφάλαιο συγκρίθηκαν δύο διαφορετικές κυκλικές διατάξεις (μία με ενιαίο φερρίτη και μία με ράβδους φερρίτη) με διάμετρο 600mm και ίδιο όγκο φερρίτη (σχήμα 6.10). Το διάκενο στις προσομοιώσεις αυτές ήταν ίσο με 100mm. Για να επιτραπεί μία σύγκριση των διατάξεων αυτών με την ορθογώνια διάταξη, θα κατασκευασθεί μία διάταξη με ακριβώς τον ίδιο όγκο φερρίτη, αλλά και το ίδιο εμβαδό με τις αντίστοιχες κυκλικές. Το εμβαδό των κυκλικών διατάξεων είναι 282.600mm^2 . Στην αρχή του κεφαλαίου είδαμε ότι μία τετραγωνική διάταξη με αυτό το εμβαδό θα πρέπει να έχει ένα συνολικό μήκος πλευράς ίσο με 531,6mm.



Σχήμα 6.10: Διάταξη με ράβδους φερρίτη και ενιαίου φερρίτη αντίστοιχα.

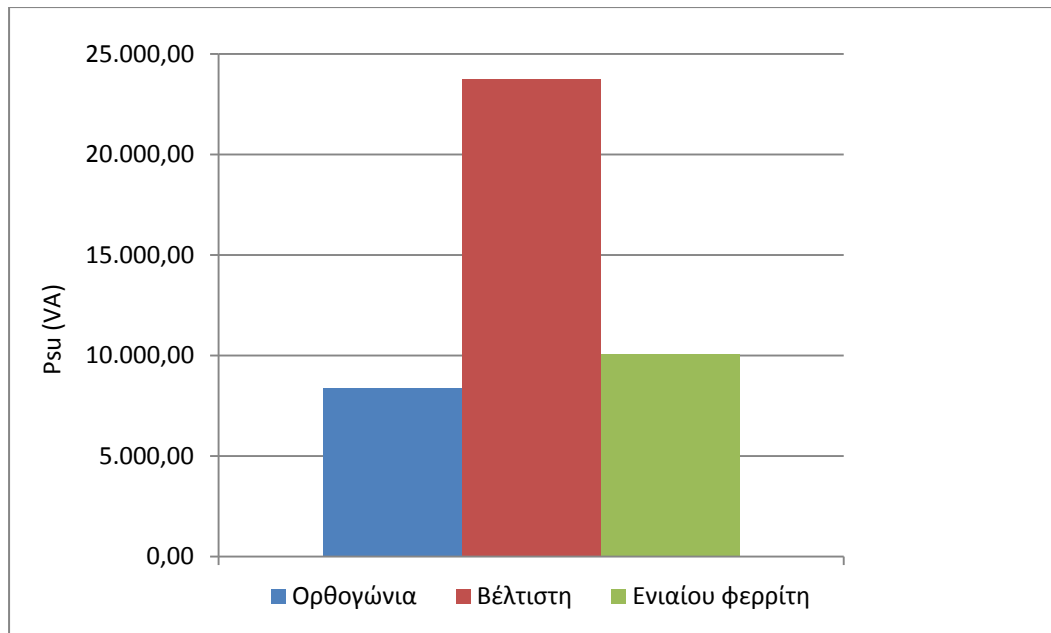
Το πάχος του φερρίτη στις κυκλικές διατάξεις ήταν ίσο με 10mm, και το ίδιο πάχος θα διατηρηθεί για τον φερρίτη σχετικά με την κατασκευή της επιθυμητής ορθογώνιας διάταξης. Είδαμε από τον τύπο (5.1) ότι ο όγκος φερρίτη των κυκλικών διατάξεων του Σχήματος 6.10 είναι 743.400 mm^3 . Ο φερρίτης στην τετράγωνη διάταξη (ίδιου εμβαδού με τις κυκλικές) που κατασκευάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου έχει μήκος 491,6mm. Για να έχει η επιθυμητή ορθογώνια διάταξη όγκο φερρίτη ίσο με τις κυκλικές υπολογίζουμε ότι απαιτείται μία τρύπα φερρίτη μήκους ίσο με 409.06mm (Σχήμα 6.12).



Σχήμα 6.12: Φερρίτης για την κατασκευή ορθογώνιας διάταξης εμβαδού ίσου με τις κυκλικές που μελετήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα τυλίγματα είναι ακριβώς ίδια με αυτά της διάταξης που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου δηλαδή 25 τυλίγματα και διατομής 4 mm^2 . Επίσης το εξωτερικό μήκος των ελιγμάτων στη διάταξη είναι 245,8 mm.

Για ένα διάκενο ίσο με 10 εκατοστά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγιναν για την ορθογώνια διάταξη όγκου φερρίτη 743.400 mm^3 δίνουν μία μεταφερόμενη ισχύ ίση με 8388,54VA. Η διάταξη με ράβδους φερρίτη τοποθετημένους σε βέλτιστη θέση χρησιμοποιώντας τον ίδιο ακριβώς όγκο φερρίτη είδαμε προηγουμένως ότι δύναται να μεταφέρει 23.735,79VA, ενώ η αντίστοιχη διάταξη ενιαίου φερρίτη μπορεί να μεταφέρει 10063,28VA, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.11. Παρατηρούμε ότι την καλύτερη αξιοποίηση του φερρίτη κάνει η κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη. Η ορθογώνια διάταξη έχει χειρότερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος ακόμη και από την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη καθώς αποδίδει 16,6% λιγότερη ισχύ.



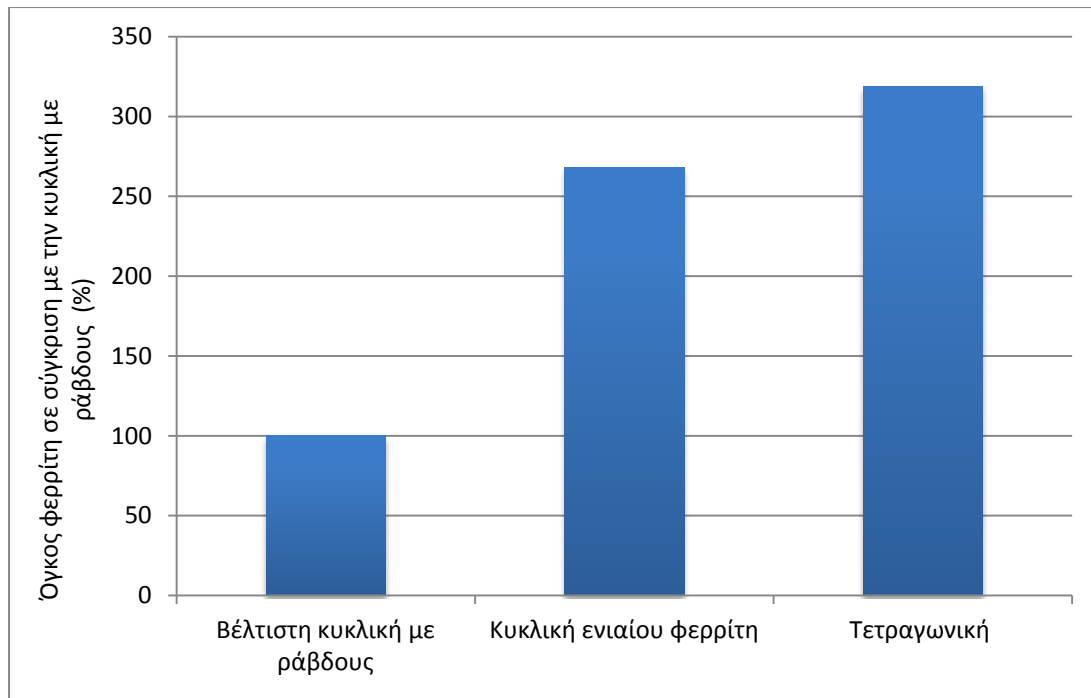
Διάγραμμα 6.11: Ισχύς σε ορθογώνια, βέλτιστη κυκλική με ράβδους και ενιαίου φερρίτη διατάξεις για 10cm διάκενο.

Στη συνέχεια θα μελετηθεί ο όγκος του φερρίτη που απαιτείται σε μία ορθογώνια διάταξη για να μεταφερθεί η ισχύς που μεταφέρεται και με τη διάταξη ράβδων φερρίτη και διάμετρο 600mm, δηλαδή 23.735,79VA.

Από το Διάγραμμα 6.5 παρατηρούμε τη σχέση μεταξύ τρύπας φερρίτη και μεταφοράς ισχύος στην ορθογώνια διάταξη . Βλέπουμε ότι η ισχύς των 23.735,79VA μεταφέρεται για μία τρύπα φερρίτη μεταξύ 65 και 75 χιλιοστά. Υποθέτοντας ότι η καμπύλη είναι γραμμική μεταξύ 65 και 70 mm η τιμή για την τρύπα φερρίτη που δίνει την επιθυμητή ισχύ είναι 67.03 χιλιοστά.

Επομένως στην περίπτωση αυτή ο όγκος φερρίτη που απαιτείται για μία μεταφορά ισχύος ίδιας με αυτή της διάταξης με ράβδους φερρίτη είναι ίσος με :

$$\text{Όγκος φερρίτη τετραγωνικής} = (491,6^2 - 67,03^2) * 10 = 2.371.775,39 \text{ mm}^3$$

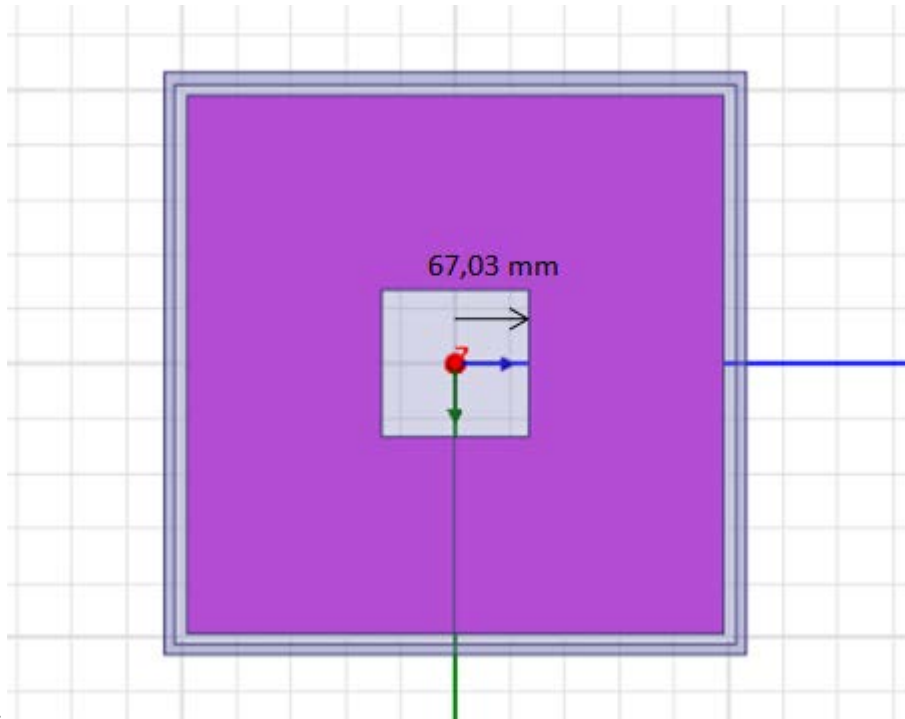


Διάγραμμα 6.12: Όγκοι φερρίτη για βέλτιστη κυκλική με ράβδους, ενιαίου φερρίτη και τετραγωνική διάταξη για αποδιδόμενη ισχύ 23,7kVA.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι ο όγκος της κυκλικής διάταξης ενιαίου φερρίτη που απαιτείται για το ακριβώς ίδιο ποσό ισχύος είναι $1.994.347,63 \text{ mm}^3$. Από το Διάγραμμα 6.12, βλέπουμε ότι η κυκλική διάταξη με ράβδους πετυχαίνει την καλύτερη δυνατή ισχύ με πολύ λιγότερη χρήση φερρίτη από τις άλλες δύο. Πιο συγκεκριμένα η κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη χρησιμοποιεί 168 % περισσότερο όγκο φερρίτη, ενώ η τετραγωνική 219%.

6.5 Συμπεριφορά της ορθογώνιας διάταξης σε σχέση με την οριζόντια μετατόπιση

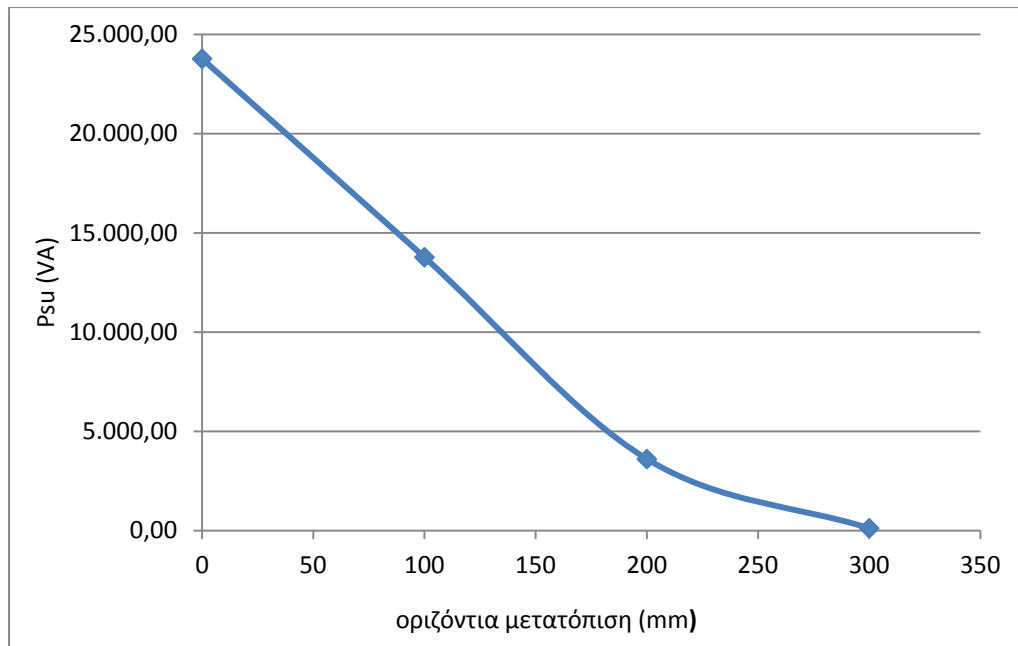
Είδαμε στην προηγούμενη υποενότητα ότι για να μεταφέρουμε με μία ορθογώνια διάταξη μία ισχύ ίση με αυτή που μεταφέρεται με τη διάταξη ράβδων φερρίτη απαιτείται ένας όγκος φερρίτη ίσος με $2.371.775,39 \text{ mm}^3$ και μία τρύπα φερρίτη ίση με 67,03 mm. Για τη συγκεκριμένη ορθογώνια διάταξη (Σχήμα 6.13) πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για οριζόντια μετατόπιση από 0mm μέχρι 300mm και για διάκενο 10mm.



Σχήμα 6.13: Ορθογώνια διάταξη με τρύπα φερρίτη 67,03mm για την μεταφορά ισχύος 23,7kVA.

Οριζόντια μετατόπιση (mm)	L1 (μH)	L2 (μH)	M (μH)	Psu (VA)
0	734,47	734,55	324,23	23.772,25
100	739,31	739,37	247,6	13.772,88
200	743,4	743,61	127,07	3.606,83
300	728,12	727,93	23,175	122,56

Πίνακας 6.9: Μετρήσεις για οριζόντιες μετατοπίσεις ορθογώνιας διάταξης για τρύπα φερρίτη 67,03mm.



Διάγραμμα 6.13: Οριζόντια μετατόπιση τετραγωνικής διάταξης για τρύπα φερρίτη 67,03mm.

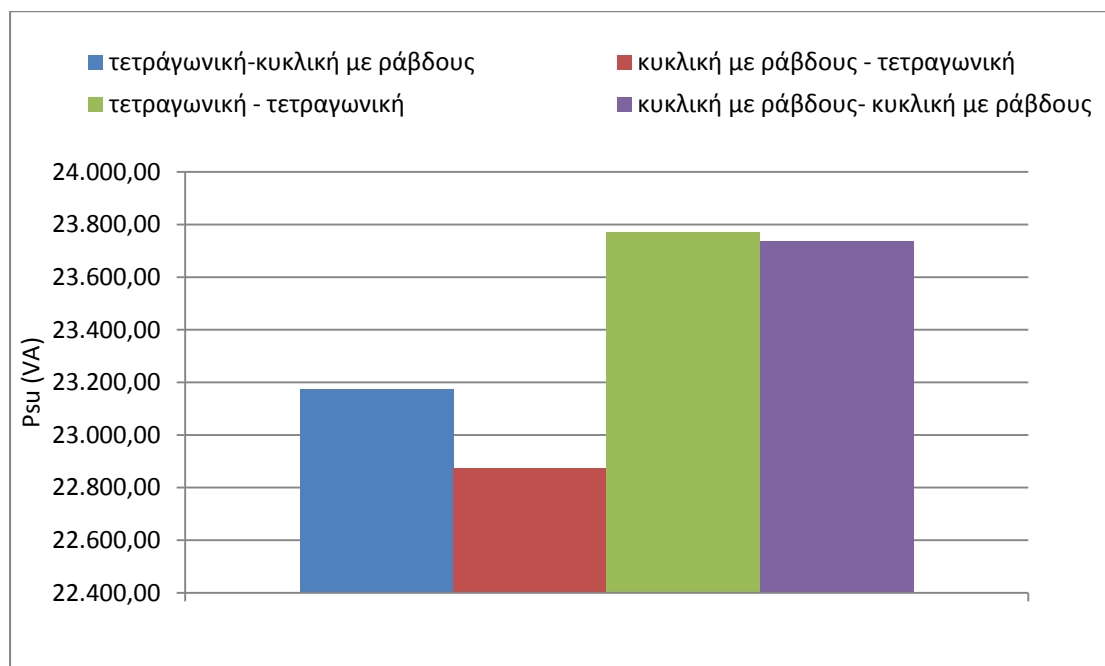
Και στην περίπτωση της ορθογώνιας διάταξης παρατηρούμε ότι η ισχύς σχεδόν μηδενίζεται για μία μετατόπιση ίση με το 50% του συνολικού μήκους της. Πιο συγκεκριμένα στα 265.8mm (το 50% του συνολικού μήκους των 531.6 mm της διάταξης) η αποδιδόμενη ισχύς στην ορθογώνια διάταξη είναι 5,5 % της αρχικής. Αντίστοιχα στην κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη η μεταδιδόμενη ισχύς είναι ίση με το 1,5% της μέγιστης ισχύος στην περίπτωση μετατόπισης ίσης με το 50% της διαμέτρου. Στην περίπτωση της κυκλικής διάταξης ράβδων φερρίτη το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης της ισχύος είναι 5,9% για την ίδια μετατόπιση. Παρατηρούμε δηλαδή ότι και στην περίπτωση των κυκλικών διατάξεων, αλλά και στην περίπτωση της ορθογώνιας η μεταδιδόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται στην περίπτωση μετατόπισης ίσης με το 50% του συνολικού μήκους της διάταξης.

6.6 Διαλειτουργικότητα

Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο την υπεροχή της κυκλικής διάταξης με ράβδους φερρίτη έναντι της αντίστοιχης κυκλικής με ενιαίο φερρίτη. Θεωρούμε επομένως τη διάταξη ράβδων φερρίτη ως αντιπροσωπευτική των κυκλικών διατάξεων και στην υποενότητα αυτή θα εξετάσουμε τη διαλειτουργικότητα μεταξύ αυτής της κυκλικής διάταξης και της τετραγωνικής διάταξης. Μία διάταξη ράβδων φερρίτη και διαμέτρου 600mm μεταφέρει μία ισχύ ίση με 23.735,79 VA, όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 4.4 . Για να μεταφερθεί η ίδια ισχύς με μία ορθογώνια διάταξη εμβαδού ίσου με αυτό της αντίστοιχης κυκλικής με ράβδους φερρίτη, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 6.4 απαιτείται ένας όγκος φερρίτη 2.371.775,39 mm και μία τρύπα φερρίτη 67,03 mm. Για μηδενική μετατόπιση και για διάφορες εναλλαγές μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος για τις δύο προαναφερθείσες διατάξεις (κυκλική με ράβδους φερρίτη διαμέτρου 600mm και τετραγωνική μήκους 531,6mm και με τρύπα φερρίτη 67,03 mm) τα αποτελέσματα για τη μεταφερόμενη ισχύ δίνονται στο Διάγραμμα 6.14.

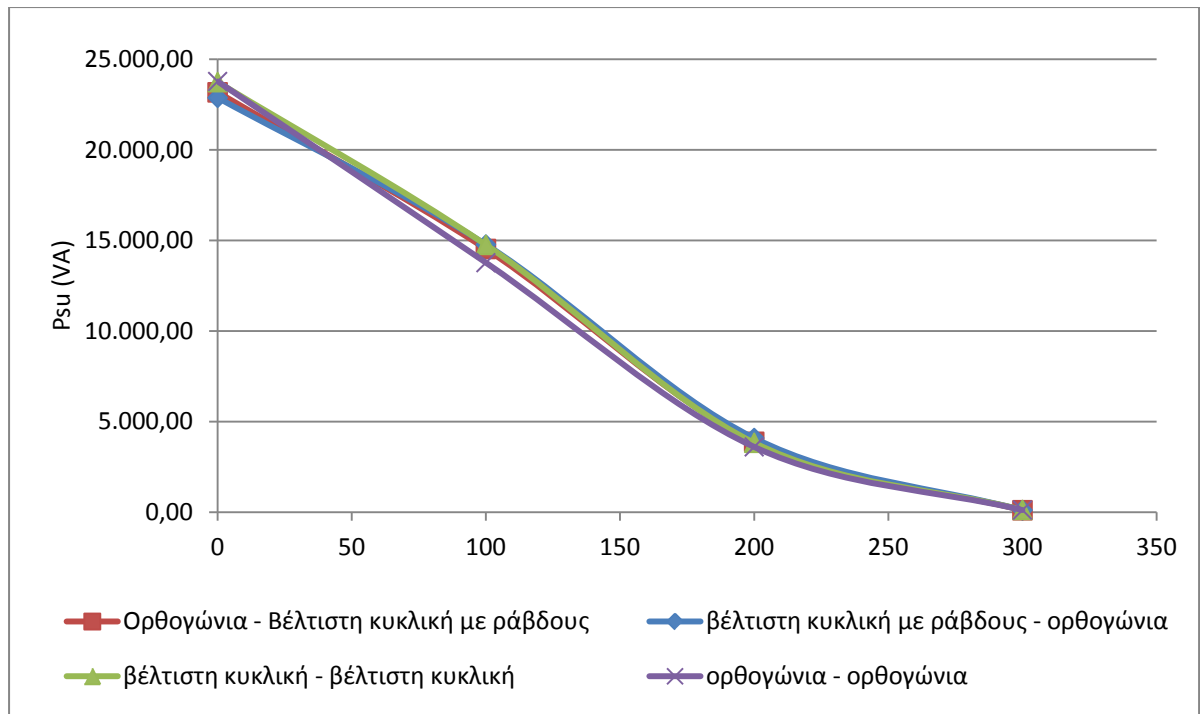
Παρατηρούμε ότι είναι δυνατή η χρήση διαφορετικού είδους πρωτεύοντος και δευτερεύοντος με μία μικρή πτώση ωστόσο στη μεταφερόμενη ισχύ. Μάλιστα προκύπτει ότι ελαφρώς

περισσότερη ισχύ στην έξοδο δίνεται όταν η τετραγωνική είναι στη θέση του πρωτεύοντος και η κυκλική με ράβδους φερρίτη στη θέση του δευτερεύοντος.



Διάγραμμα 6.14: Μηδενικές μετατοπίσεις και ισχύς για όλους τους συνδυασμούς πρωτεύοντος - δευτερεύοντος μεταξύ τετραγωνικής και κυκλικής με ράβδους φερρίτη.

Εξετάζουμε επίσης τη συμπεριφορά ως προς τη μετατόπιση σε περίπτωση που πρωτεύον και δευτερεύον είναι διαφορετικών διατάξεων. Αυτό που συμπεραίνουμε από το διάγραμμα 6.15 είναι ότι με την εναλλαγή μεταξύ ορθογώνιας και κυκλικής διάταξης στη θέση του πρωτεύοντος – δευτερεύοντος δεν επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος ως προς τη μετατόπιση.



Διάγραμμα 6.15: Διαλειτουργικότητα με ορθογώνια και βέλτιστη διάταξη.

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος μπορεί να βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά το ηλεκτρικό όχημα, η επαγωγική φόρτιση μπορεί να κάνει την διαδικασία της φόρτισης ασφαλέστερη, πιο εύκολη για το χρήστη και να φέρει τα ηλεκτρικά οχήματα πιο γρήγορα στην πρώτη προτίμηση των καταναλωτών.

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν κυκλικές διατάξεις επαγωγικής φόρτισης χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα Ansoft Maxwell. Αρχικά εξετάστηκαν κυκλικές διατάξεις που χρησιμοποιούν ράβδους φερρίτη. Σχετικά με τη διάταξη αυτή παρατηρήθηκε πώς επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του φερρίτη (μήκος, πλάτος και πάχος των ράβδων καθώς και ο αριθμός των ράβδων) καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του τυλίγματος, τη μεταφερόμενη ισχύ. Παρατηρήθηκε ότι το πάχος των ράβδων είναι το χαρακτηριστικό εκείνο που επηρεάζει λιγότερο τη μεταφορά ισχύος. Αντίθετα μεγάλη επίδραση στην ισχύ που αποδίδεται στο όχημα έχει τόσο το μήκος των ράβδων όσο και ο αριθμός τους. Σχετικά με τα ελιγμάτα, παρατηρήθηκε ότι η βέλτιστη μεταφορά ισχύος παρατηρείται όταν η εξωτερική ακτίνα των τυλιγμάτων βρίσκεται στο 92% της συνολικής ακτίνας της διάταξης.

Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι το μέγεθος της διάταξης επιδρά σημαντικά στην ισχύ που μεταφέρεται στο όχημα. Πιο συγκεκριμένα μία αύξηση της διαμέτρου από 420mm σε 600mm (για ένα διάκενο ίσο με 10cm) οδηγεί σε μία αύξηση της ισχύος κατά 1262%. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και με την αύξηση του μεγέθους της διάταξης επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, ωστόσο, παρουσιάζεται μία σημαντικά έντονη μεταβολή της ισχύος ως προς τη μετατόπιση. Καταλήξαμε, επίσης, ότι η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται όταν η οριζόντια μετατόπιση γίνει ίση με το 50% της διαμέτρου της διάταξης γεγονός που είναι ανεξάρτητο του διακένου και του μεγέθους της διάταξης.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης και η επίδραση του διακένου στη μεταφερόμενη ισχύ. Πιο συγκεκριμένα σε μία διάταξη διαμέτρου 600mm ο διπλασιασμός του διακένου από 5cm σε 10cm οδηγεί σε μία μείωση της ισχύος κατά 59,7%.

Μελετήθηκε επίσης παρόμοια διάταξη με ράβδους φερρίτη, αλλά οβάλ σχήματος. Η οβάλ διάταξη φαίνεται να έχει ελαφρώς καλύτερη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος ως προς την κυκλική όσον αφορά τη μετατόπιση κατά τον άξονα x. Πιο συγκεκριμένα, για μία μετατόπιση ως προς τον άξονα x ίση με 25mm ή 50mm η οβάλ διάταξη κατορθώνει μία αύξηση της ισχύος μόλις 5,6% και 8,4% αντίστοιχα σε σχέση με την κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη. Επίσης, κατά τη μετατόπιση στον y άξονα η οβάλ διάταξη αδυνατεί να μεταφέρει την ισχύ

που μεταφέρει η κυκλική διάταξη. Επομένως, η συμμετρικότητα της κυκλικής διάταξης, με τα οφέλη που αυτή παρέχει, λόγω συμμετρικότητας, ως προς την προσέγγιση του οχήματος στο φορτιστή, σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα αξιόλογη ικανότητα μεταφοράς ισχύος, καθιστούν την κυκλική διάταξη πιο ικανοποιητική επιλογή σε σχέση με την οβάλ.

Μελετήθηκαν επίσης παρόμοιες κυκλικές διατάξεις αλλά με διαφορετικά σχήματα ράβδων φερρίτη με στόχο την καλύτερη επιλογή όσον αφορά στη χρησιμοποίηση του φερρίτη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η βέλτιστη διάταξη έχει ράβδους όσο το δυνατόν πιο λεπτές σε πάχος και πιο μακριές σε μήκος. Με βάση το συμπέρασμα αυτό κατασκευάστηκε κυκλική διάταξη με αυξημένο αριθμό ράβδων φερριτών, μικρότερου πλάτους από τις αρχικές και ιδιαίτερα αυξημένου μήκους. Παρατηρήθηκε ότι η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί με τον καλύτερο τρόπο το φερρίτη σε σχέση με όλες τις προηγούμενες που μελετήθηκαν.

Μελετήθηκε επίσης η συμπεριφορά της κυκλικής διάταξης ράβδων φερρίτη σε σχέση με κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη. Αποδεικνύεται ότι το πάχος φερρίτη δεν επιδρά σημαντικά στη μεταφερόμενη ισχύ σε καμία από τις κυκλικές διατάξεις. Αντίθετα, ανάλογα με την κυκλική διάταξη που εξετάζεται κάθε φορά, η θέση του τυλίγματος παίζει σημαντικό ρόλο. Πιο συγκεκριμένα στη διάταξη ενιαίου φερρίτη, θα πρέπει το τύλιγμα να βρίσκεται όσο το δυνατό εξωτερικά της διάταξης. Αντίθετα στη διάταξη με ράβδους φερρίτη η εξωτερική ακτίνα του τυλίγματος θα πρέπει να βρίσκεται στο 92% της διαμέτρου της διάταξης. Ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος φαίνεται ότι η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη είναι ικανή να μεταφέρει πολύ μεγαλύτερα ποσά ισχύος σε σχέση με την αντίστοιχη κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη. Πιο συγκεκριμένα με τον ίδιο όγκο φερρίτη, η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη δύναται να μεταφέρει 235,8% περισσότερη ισχύ. Αποδεικνύεται δηλαδή ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο τρόπος με τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά ο διαθέσιμος φερρίτης. Εξετάστηκε επίσης η διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο αυτών κυκλικών διατάξεων. Αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η μεταφορά ισχύος μεταξύ δύο διαφορετικών κυκλικών διατάξεων ίδιου μεγέθους, χωρίς ιδιαίτερα μεγάλες μεταβολές στο ποσό της ισχύος που μεταφέρεται.

Μελετήθηκε τέλος μία ορθογώνια διάταξη ενιαίου φερρίτη, ώστε να συγκριθεί με τις προηγούμενες κυκλικές. Αποδεικνύεται ότι το πάχος του φερρίτη δεν επιδρά σημαντικά στη μεταφερόμενη ισχύ μίας επαγωγικής διάταξης, είτε αυτή είναι ορθογώνια είτε κυκλική. Παρόμοια με την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη, έτσι και στην ορθογώνια διάταξη το τύλιγμα θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατό πιο εξωτερικά της διάταξης, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Και στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη φαίνεται να υπερτερεί ως προς την ορθογώνια σχετικά με την ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Πιο συγκεκριμένα με τον ίδιο όγκο φερρίτη η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη δύναται να μεταφέρει 282,9% περισσότερη ισχύ σε σχέση με την ορθογώνια. Εξετάστηκε επίσης η διαλειτουργικότητα μεταξύ ορθογώνιας διάταξης και κυκλικής διάταξης ράβδων φερρίτη. Αποδεικνύεται ότι με δύο παρόμοιες διατάξεις είναι δυνατόν να επιτευχθεί μεταφορά ισχύος, σε ιδιαίτερα ικανοποιητικά επίπεδα. Μάλιστα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα η συμπεριφορά ως προς τη μετατόπιση σε περίπτωση που δύο διαφορετικές διατάξεις (ορθογώνια και κυκλική) χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.

7.2 Επεκτάσεις

Υπάρχουν διάφορα θέματα όσον αφορά την επαγωγική φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος που δέχονται περαιτέρω μελέτη και ανάπτυξη. Κάποια από αυτά ενδεικτικά είναι τα ακόλουθα:

- Στη διπλωματική αυτή εξετάστηκε μία ορθογώνια διάταξη ενιαίου φερρίτη η οποία συγκρίθηκε με τις κυκλικές διατάξεις που μελετήθηκαν. Εκτός από αυτή τη διάταξη υπάρχουν επιπλέον διατάξεις ορθογωνίου σχήματος οι οποίες αξίζει να μελετηθούν.
- Φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος δυναμικά: Η συγκεκριμένη διπλωματική επικεντρώθηκε στην στατική φόρτιση. Παρ' όλα αυτά έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η χρησιμοποίηση της κυκλική διάταξης με ράβδους φερρίτη για φόρτιση του οχήματος εν κινήσει.
- Μία διάταξη επαγωγικής φόρτισης αποτελείται εκτός από το συζευκτή που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική και από το κύκλωμα ελέγχου των ηλεκτρονικών ισχύος, που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της διάταξης, αλλά και των κυκλωμάτων συντονισμού. Για τους συζευκτές που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική είναι ενδιαφέρον να μελετηθούν τα απαραίτητα κυκλώματα ελέγχου, αλλά και τα αντίστοιχα κυκλώματα συντονισμού.

Αναφορές

- [1] Grand Anthony Covic and John Talbot Boys, “Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 1, No. 1, 2013, Page(s) 28-41.
- [2] I. Karakitsios, E. L. Karfopoulos and N. Hatzargyriou, “Fast Inductive Charging: The General Concept, The Definition of the Energy Needs and the Energy Management System”.
- [3] Mickel Budhia, Grant A. Covic and John T. Boys, “Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems” IEEE Transactions on Power Electronics , Vol. 26, No. 11, 2011, Page(s) 3096-3108.
- [4] Lucas, J. R., (2001), “Resonance and Mutual Inductance”.
- [5] K. W. Klontz, A. Esser, R. R. Bacon, D. M. Divan, D. W. Novotny, R. D. Lorenz, “An electric vehicle charging system with universal inductive interface”. Power Conversion Conference, 1993 Yokohama, Page(s) 227-232.
- [6] R. Severns, E. Yeow, G. Woody, J. Hall, J. Hayes, “An ultra-compact transformer for a 100W to 120kW inductive coupler for electric vehicle battery charging” Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996, APEC '96 .Conference Proceedings, Eleventh Annual Volume:1, vol. 1, Page(s) 32-38.
- [7] D. A. G. Pedder, A. D. Brown and J. A. Skinner, “A contactless electrical energy transmission system”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 46, 1999, Page(s) 23-30.
- [8] Chwei-Sen Wang, O.H. Stielau, G. A. Covic, “ Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 52, Issue: 5, 2005, Page(s) 1308-1314.
- [9] Siqi Li and Chunting Chris Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications”, Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of (early access articles).
- [10] Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe and T. Yasuda, “Compact contactless power transfer system for electric vehicles” 2010, Page(s) 807-813.
- [11] M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda and A. Suzuki “Small Size Light-Weight Transformer with New Core Structure for Contactless Electric Vehicle Power Transfer System”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, Page(s) 260-266.
- [12] M. Budhia, G. Covic and J. Boys, “A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems”, in ECON 2010- 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, Page(s) 2487-2492
- [13] R. Mecke and C. Rathge, “High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap”, in Power Electronics Specialists Conference, 2004, PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, Vol. 3, Page(s) 1737-1743.
- [14] Mickel Budhia, Grand A. Covic and John T. Boys, “Design and Optimization of Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems”, IEEE, 2009.
- [15] Trong-Duy Nguyen, Siqi Li., Weihan Li, Chunting Chris Mi, “Feasibility Study on Bipolar Pads for Efficient Wireless Power Chargers”, 2014, IEEE.
- [16] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic and H. Chang-Yu, “Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems.” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 60, 2013, page(s) 318-328
- [17] M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys and H. Chang-Yu. “Development and evaluation of single-sided flux couplers for contactless electric vehicle charging” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, page(s) 614-621.

- [18] G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen and H. Hao, "A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling", in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, page(s) 1832-1838.
- [19] H. Jin, L. Wooyoung, C. Gyu-Hyeong, L. Byunghun and R. Chun-Taek, "Characterization of novel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles", in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 2011, pp. 1975-1979.
- [20] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho and C. T. Rim, "Narrow-width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 3666-3679, 2011.
- [21] S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee and C. T. Rim, "New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway -Powered Electric Vehicles", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 5832-5841, 2013.
- [22] Seungyong Shin, Jaegue Shin, Yangsu Kim, Seokhwan Lee, Boyune Song, Guho Jung, Seongjeub Jeon, "Hybrid inverter segmentation control for Online Electric Vehicle", Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, Page(s): 1-6.
- [23] G. R. Nagendra, J. T. Boys, G. A. Covic, B. S. Riar and A. Sondhi, "Design of a double coupled IPT EV highway", in Industrial Electronics Society IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, 2013, pp. 4606-4611.
- [24] K. Lee, Z. Pantic and S. Lukic, "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems", Power Electronics, IEEE Transactions on, vol PP, pp. 1-1, 2013.
- [25] J. U. W. Hsu, A. P. Hu and A. Swain, "A Wireless Power Pickup Based on Directional Tuning Control of Magnetic Amplifier", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 56, pp. 2771-2781, 2009.
- [26] Z. Pantic and S. M. Lukic, "Framework and topology for active tuning of parallel compensated receivers in power transfer systems", IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4503-4513, Nov. 2012.
- [27] Thrimawithana, D. J. Madawala, U.K., "A primary side controller for inductive power transfer systems", Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, pp. 661-666, 2010.
- [28] S. Krishnan, S. Bhuyan, V. P. Kumar, W. Wenjiang, J. A. Afif and L. Khoon Seong, "Frequency agile resonance-based wireless charging system for Electric Vehicles", in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1-4.
- [29] J. L. Villa, J. Sallan, J. F. Sanz Osorio and A. Llombart, "High Misalignment Tolerant Compensation Topology for ICPT Systems", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.59, pp. 945-951, 2012.
- [30] <https://www.pluglesspower.com>.
- [31] <http://www.engadget.com/2011/04/14/bmw-and-siemens-partnering-for-wireless-charging-evs-cutting-th>.
- [32] R. Severns, E. Yeow, G. Woody, J. Hall, J. Hayes, "An ultra-compact transformer for a 100W to 120kW inductive coupler for electric vehicle battery charging" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996, APEC '96 .Conference Proceedings, Eleventh Annual Volume:1, vol. 1, Page(s) 32-38.
- [33] <http://insideevs.com/bosch-now-taking-orders-for-evatrans-plugless-level-2-charging-system-first-commercially-available-wireless-charger>.
- [34] <http://www.cnet.com/roadshow/news/wirelessly-charge-your-tesla-model-s-with-new-plugless-power-system>.
- [35] Zed (Zhangjun) Tang, Mark Christini, Takahiro Koga, "Wireless Power Transfer using Maxwell and Simplorer", Automotive Simulation World Congress, 2012.

- [36] Μπεζεντές Κ. Νικόλαος, « Μαγνητοστατική ανάλυση κυκλικής διάταξης σε σταθμό επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων», Ιούλιος 2015.
- [37] Trong-DuyNguyen, SiqiLi., WeihanLi, ChuntingChrisMi, "Feasibility Study on Bipolar Pads for Efficient Wireless Power Chargers", 2014, IEEE