



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Γ. Πατάκας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Γ. Πατάκας

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Νοεμβρίου 2023.

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ευστάθιος Συκάς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ιωάννης Γκόνος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

.....

Δημήτριος Γ. Πατάκας

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

Copyright © Δημήτριος Πατάκας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και βελτίωση των υποδομών ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Προς αυτόν τον στόχο, γίνεται δοκιμή των ιδιοτήτων νέων μαγνητικών υλικών και σύγκριση τους με κλασσικά για την εφαρμογή υλικά. Σε εισαγωγικό πλαίσιο, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στο ηλεκτρικό όχημα και μια αναφορά στη δομή του. Έπειτα παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι ενσύρματης και ασύρματης φόρτισης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Γίνεται εκτενής περιγραφή για την ασύρματη φόρτιση όπου αναλύονται διάφορα χαρακτηριστικά της, όπως οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις φόρτισης, τα διάφορα είδη μαγνητικών υλικών που συναντώνται αλλά και τεχνικές αντιστάθμισης και ελέγχου. Αναφέρεται, επίσης, και το υπάρχον νομικό παρασκήνιο για την προστασία από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προκύπτει από την τεχνολογία αυτή. Η υλοποίηση της μαγνητοστατικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Ansys Maxwell, στο οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκμαίευση αποτελεσμάτων. Για την ανάδειξη των ουσιαστικών διαφορών που προκύπτουν μεταξύ υλικών αλλά και διάκριση των καλύτερων υλικών εξ αυτών, δοκιμάστηκαν τα νανοκρυσταλλικά υλικά Finamet, Finemet, μαγνητικό υλικό από νανοσωματίδια σιδήρου και Vitroperm. Τα υλικά αυτά συγκρίθηκαν με έναν φερρίτη, συχνά χρησιμοποιούμενο σε κλασσικές εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης σε υψηλές συχνότητες. Τέθηκαν θέματα υπολογισμού της απόδοσης της διάταξης καθώς και μέτρησης της αποδιδόμενης ισχύος και των απωλειών πυρήνα, για κάθε υλικό. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους.

Λέξεις-κλειδιά:

Ηλεκτρικό όχημα, επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος, Ansys Maxwell, φερρίτης, Finamet, Finemet, Vitroperm.

Abstract

This thesis aims to study and improve the infrastructure of wireless charging of electric vehicles. Towards this goal, properties of new magnetic materials are tested and compared with classical for the application materials. In an introductory context, there is a historical review of the electric vehicle and a reference to its structure. The main methods of wired and wireless charging of an electric car are described. An extensive account of the technology of wireless charging is made where its various characteristics are analyzed. More specifically, the most frequently used wireless charging layouts, the various types of magnetic materials used as well as compensation techniques and control techniques are considered. There is also mention of the legal framework that exists for protection against electromagnetic radiation resulting from this technology. For the implementation of magnetostatic analysis, the Ansys Maxwell software was used, in which the methodology followed for the calculation of results is presented in detail. In order to highlight the essential differences that arise between materials and distinguish the best materials amongst them, the nanocrystalline materials Finamet, Finemet, a magnetic material made of Iron nanoparticles and Vitroperm were tested. These materials were compared to a ferrite which is used in classical high frequency inductive charging applications. Issues of calculating the device performance, measuring the delivered power and the core losses for each material were raised. Finally, the results were compared with each other.

Keywords:

Electric vehicle, inductive charging of electric vehicle, Ansys Maxwell, ferrite, Finamet, Finemet, Vitroperm.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ανάθεση ενός θέματος διπλωματικής εργασίας που είναι τόσο κοντά στα ενδιαφέροντα μου.

Ευχαριστώ επίσης θερμά την κυρία Τατιάνα Δαματοπούλου για την καθοδήγησή της καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που μου έδωσε την δυνατότητα και την στήριξη για να σπουδάσω αλλά και τους φίλους μου που κατάφεραν να κάνουν τα χρόνια αυτά αξιομνημόνευτα.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ιστορική Αναδρομή στο Ηλεκτρικό Όχημα.....	1
1.2	Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος.....	2
1.3	Ενσύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικού Οχήματος.....	5
1.4	Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικού Οχήματος.....	6
1.5	Χρησιμοποιούμενα Υλικά.....	9
1.6	Διατάξεις Επαγωγικής Φόρτισης.....	11
1.6.1	Διατάξεις Στατικής Επαγωγικής Φόρτισης.....	11
1.6.2	Διατάξεις Δυναμικής Επαγωγική Φόρτισης.....	14
1.7	Τεχνικές Αντιστάθμισης.....	17
1.8	Τεχνικές Ελέγχου.....	19
1.9	Προστασία από Έκθεση στο Η/Μ Πεδίο Επαγωγικού Φορτιστή.....	19
2	Μαγνητική Ανάλυση με Χρήση του Λογισμικού Ansys Maxwell.....	21
2.1	Μεγέθη Αξιολόγησης Διάταξης.....	21
2.2	Χρησιμοποιούμενη Διάταξη.....	23
2.3	Ορισμός Υλικών και Οριακών Συνθηκών.....	24
2.4	Ορισμός Διεγέρσεων.....	34
2.5	Ορισμός Μεταβλητών Εξόδου.....	38
2.6	Ορισμός Ανάλυσης.....	39
2.6.1	Ορισμός Ανάλυσης για Σταθερή Συχνότητα.....	40
2.6.2	Ορισμός Ανάλυσης για Μεταβλητή Συχνότητα.....	41
2.7	Εμφάνιση Αποτελεσμάτων.....	42
2.7.1	Εμφάνιση Αποτελεσμάτων για Σταθερή Συχνότητα.....	42
2.7.2	Εμφάνιση Αποτελεσμάτων για Μεταβλητή Συχνότητα.....	44
3	Δοκιμή Νέων Μαγνητικών Υλικών.....	49
3.1	Δοκιμή σε Περιοχή Συχνοτήτων από 0 έως 20 kHz.....	49
3.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων για την Μελέτη στα 0 έως 20 kHz.....	58
3.3	Υπολογισμός Απωλειών Πυρήνα σε Συχνότητα 100 kHz.....	63
4	Συμπεράσματα και Επεκτάσεις.....	67
4.1	Συμπεράσματα.....	67
4.2	Επεκτάσεις.....	68
	Βιβλιογραφία.....	71

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή στο Ηλεκτρικό Όχημα

Το ιστορικό των ηλεκτροκινούμενων οχημάτων έχει τις καταβολές του στην κατασκευή της πρώτης ηλεκτρικής μηχανής από τον William Sturgeon το 1832, ο οποίος στηριζόμενος στην δουλειά του Michael Faraday κατασκεύασε την πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος με μεταγωγέα. Από τότε εμφανίστηκαν οι πρώτες εφαρμογές ηλεκτροκίνησης σε σιδηροδρομικά τρένα (1837) αλλά και εφαρμογές σε Τρόλεϊ και Τραμ (1880). Για να εμφανιστούν τα πρώτα αυτοκίνητα προς εμπορική παραγωγή έπρεπε πρώτα να ωριμάσει η τεχνολογία των συσσωρευτών, ώστε να απεξαρτηθεί το όχημα από την παροχή του δικτύου. Έτσι μόνο μέχρι τα τέλη του 19^{ου} αιώνα δόθηκε η δυνατότητα για μαζική παραγωγή ιδιόκτητων ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Ταυτόχρονα είχε αναπτυχθεί η τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης, ωστόσο άργησαν να αξιοποιηθούν στην αυτοκίνηση καθώς οι εν λόγω μηχανές ήταν αναξιόπιστες και εξέπεμπαν ανυπόφορους ρύπους. Επίσης η εκκίνηση τους ως την ανακάλυψη του self-starter το 1911 έπρεπε να γίνεται χειροκίνητα. Από εκείνη την εποχή και έπειτα, μαζί με το ταυτόχρονο ολοένα και μειούμενο κόστους των καύσιμων πόρων, οι μηχανές εσωτερικής καύσης άρχισαν να χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Ακόμα και σήμερα, είναι η πιο προσιτή και οικονομική επιλογή στην αυτοκίνηση καθώς η πυκνότητα ενέργειας που μπορεί να αποδώσει ο ορυκτός πόρος σε σχέση με έναν συσσωρευτή είναι μεγαλύτερη [1].

Η παρουσία της ηλεκτροκίνησης σε σιδηροδρομικές εφαρμογές παρέμεινε αδιάκοπη. Η συνέχεια των εξελίξεων έφερε τα τρένα υψηλής ταχύτητας που μπορούν πλέον να φτάσουν μέγιστες ταχύτητες 581 χιλιομέτρων την ώρα (JR-Maglev στην Ιαπωνία), ενώ μια μέση ταχύτητα ταξιδιού με το τρένο TGV φτάνει τα 279.4 χιλιόμετρα την ώρα.

Η πρώτη προσπάθεια εξηλεκτισμού των μηχανοκίνητων αυτοκινήτων έγινε με την ανάπτυξη της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Η νέα αυτή τεχνολογία μπόρεσε να παρέχει την αναγκαία αυτονομία για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και οδήγησε πολλές εταιρίες όπως την Tesla, Nissan, Mitsubishi και Renault να κατασκευάσει μαζικά τα πρώτα τους ηλεκτρικά αυτοκίνητα.



Σχήμα 1.1. Nissan Leaf.

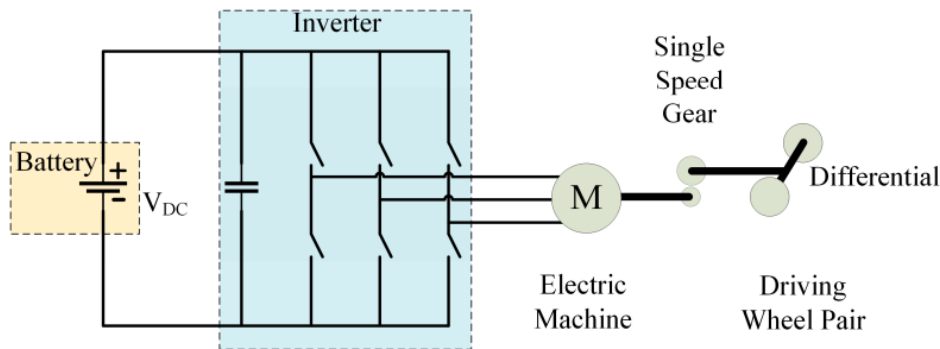


Σχήμα 1.2. Tesla Model 3.

Πλέον η κλιματική κρίση και οι δυσσιώνες προβλέψεις για τα αποθέματα των ορυκτών πόρων επιτάσσουν την μεταστροφή σε ηλεκτρικά οχήματα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση με την συμφωνία των «Fit for 55» [2, p. 24] έχει δεσμευτεί ως προς την παύση πωλήσεων συμβατικών ιδιόκτητων αυτοκινήτων μέχρι το 2035. Η ηλεκτροκίνηση λοιπόν είναι το μέλλον.

1.2 Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος

Στα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα η συνήθης δομή του οχήματος συντελείται από το σύστημα φόρτισης των ηλεκτρικών συσσωρευτών, τους συσσωρευτές, τον αντιστροφέα, την ηλεκτρική μηχανή και από το σύστημα μετάδοσης της κίνησης.



Σχήμα 1.3. Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος [3].

Οι συσσωρευτές είναι από τα βασικότερα μέλη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και μπορούν να παρομοιαστούν με την καρδιά του συστήματος, καθώς οι παράγοντες του κόστους, του βάρους και του χρόνου ζωής του καθορίζουν την λειτουργικότητα και την τελική τιμή ολόκληρου του οχήματος. Στις μέρες μας οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για συσσωρευτές είναι: οξέος μόλυβδου, NiMH (Nickel-Metal Hydride) και ιόντων λιθίου (Li-Ion). Παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά χαρακτηριστικά αλλά και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας [3].

Πίνακας 1.1

Τύπος Συσσωρευτή	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οξέος μόλυβδου	Θετικός πόλος: Μόλυβδος σε σπογγώδη μορφή Αρνητικός πόλος: οξείδιο του Μολύβδου Ηλεκτρολύτης: διαλυμένο θειικό οξύ	Ώριμη τεχνολογία. Δυνατότητα μαζικής παραγωγής με σχετικά μικρό κόστος.	Μικρή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας. Βαρύτερες μπαταρίες με μικρότερο κύκλο ζωής.
NiMH	Θετικό ηλεκτρόδιο: υδροξείδιο του Νικελίου Αρνητικό ηλεκτρόδιο: κράμα Νικελίου με άλλα μέταλλα Ηλεκτρολύτης: αλκαλικό διάλυμα	Διπλάσια πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τις μπαταρίες οξέος μόλυβδου, ενώ έχουν και μεγαλύτερο κύκλο ζωής. Ανακυκλώσιμες και μη επιβλαβείς για το περιβάλλον.	Παρουσιάζουν memory effect. Αν γίνει ακαριαία αποφόρτιση ο χρόνος ζωής του μπορεί να μειωθεί στους 200-300 κύκλους ζωής.
Li-Ion	Θετικό ηλεκτρόδιο: Υλικό από οξειδομένο Κοβάλτιο Αρνητικό ηλεκτρόδιο: Υλικό από Άνθρακα Ηλεκτρολύτης: Άλατα Λιθίου σε οργανικό διάλυμα	Σχεδόν διπλάσια πυκνότητα ενέργειας και από την NiMH μπαταρία. Χρόνος ζωής κοντά στους 1000 κύκλους ζωής. Ανακυκλώσιμες.	Υψηλό κόστος.

Ο αντιστροφέας σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα ελέγχου της μηχανής χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί με εναλλασσόμενο ή παλμικό ρεύμα την ηλεκτρική μηχανή.

Όσον αφορά τις ηλεκτρικές μηχανές, οι πιο συνήθεις επιλογές διαχρονικά είναι η μηχανή συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες, η DC μηχανή μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες (BLDC), η σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη (PMSM), η ασύγχρονη μηχανή και η Synchronous reluctance motor υποβοηθούμενη από μόνιμους μαγνήτες. Κατωτέρω παρουσιάζονται μερικά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας [3]:

Πίνακας 1.2

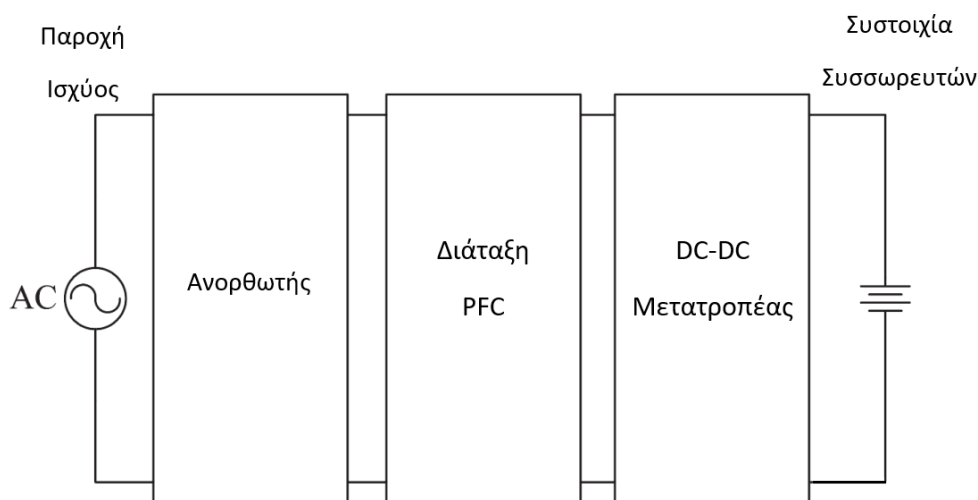
Τύπος Μηχανής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Αυτοκίνητα στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί
Μηχανή συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες	Στις χαμηλές ταχύτητες παρουσιάζεται μέγιστη ροπή.	Έκκληση θερμότητας στις ψήκτρες. Σχετικά ογκώδης κατασκευή. Χαμηλή απόδοση	Fiat Panda Elettra (Series DC motor), Conceptor G-Van (Separately excited DC motor)
BLDC	Μικρότερη και ελαφρύτερη κατασκευή. Λιγότερες θερμικές απώλειες. Πιο αποδοτική και από την ασύγχρονη μηχανή.	Υψηλό κόστος λόγω των μόνιμων μαγνητών. Με την αύξηση της ταχύτητας μειώνεται η ροπή.	Toyota Prius (2005)
PMSM	Αποδοτικές, συμπαγείς. Υψηλή ροπή ακόμα και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοντά στους κινητήριους τροχούς για αποφυγή μεταφοράς ροπής μέσω μηχανικού διαφορικού	Εφόσον χρησιμοποιηθεί κοντά στους τροχούς, προκύπτουν υψηλές απώλειες σιδήρου για λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες.	Toyota Prius, Nissan Leaf, Soul EV
Ασύγχρονη μηχανή	Είναι η πιο ώριμη για τα τεχνολογικά δεδομένα επιλογή μηχανής		Tesla Model S, Tesla Model X, Toyota AV4, GM EV1
Synchronous Reluctance Motor υποβοηθούμενη από μόνιμους μαγνήτες	Λύνει τα προβλήματα απομαγνητισμού που παρατηρούνται σε άλλες μηχανές μόνιμων μαγνητών.		BMW i3

Μια σύγχρονη τάση, θέλει την τοποθέτηση της ηλεκτρικής μηχανής όσο πιο κοντά στους κινητήριους τροχούς για την αποφυγή μεταφοράς ροπής μέσω μηχανικού διαφορικού και την σταδιακή μετατροπή του σε ηλεκτρικό [4, p. 53].

1.3 Ενσύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικού Οχήματος

Η πιο απλή διάταξη ενσύρματης φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου περιλαμβάνει την παροχή του δικτύου, τον αγωγό σύνδεσης του δικτύου με το ηλεκτρικό όχημα, έναν ανορθωτή AC-DC και έναν DC-DC μετατροπέα που να μεταβάλλει το επίπεδο της τάσης στο επιθυμητό. Στην είσοδο του DC-DC μετατροπέα υπάρχει επιπλέον μια διάταξη PFC (Power Factor Correction) για διόρθωση του συντελεστή ισχύος της τάσης εισόδου, ενώ στην έξοδο του DC-DC μετατροπέα υπάρχει και ο ρυθμιστής ρεύματος ή το BMS (Battery Management System) της μπαταρίας.

Οι ενσύρματοι φορτιστές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το αν ο ανορθωτής και οι ρυθμιστές ρεύματος της μπαταρίας βρίσκονται εντός ή εκτός του φορτιστή [5]. Έτσι αν τα ανωτέρω περιλαμβάνονται στο όχημα και όχι στον φορτιστή, ο φορτιστής καλείται on-board ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο φορτιστής καλείται off-board. Εν γένει, ένας off-board φορτιστής είναι σχεδιασμένος να μεταφέρει μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος από έναν on-board. Πιο συγκεκριμένα, οι on-board φορτιστές αποδίδουν ισχύ μέχρι λίγες δεκάδες kW, ενώ ένας off-board φορτιστής μπορεί να έχει απόδοση ισχύος λίγων εκατοντάδων kW. Η ανεξάρτηση δε του αυτοκινήτου από τον ανορθωτή και τον ρυθμιστή ρεύματος μειώνει το βάρος του οχήματος.



Σχήμα 1.4. Αναπαράσταση των κύριων μερών ενός συστήματος ενσύρματης φόρτισης: Σε περίπτωση που ο αντιστροφέας, η διάταξη PFC και ο μετατροπέας DC-DC βρίσκονται ενός οχήματος, το σύστημα ονομάζεται on-board. Διαφορετικά, αν βρίσκονται εκτός οχήματος ονομάζονται off-board.

Μια ακόμα κατηγοριοποίηση των ενσύρματων φορτιστών είναι με βάση την δυνατότητα μεταφοράς ισχύος τους [5]. Οι φορτιστές με δυνατότητα παροχής περί των 1.44 με 1.92 kW ονομάζονται AC επιπέδου 1. Ένας τέτοιος φορτιστής με παροχή ισχύος από το AC δίκτυο διανομής (230 V, ή 120 V για Η.Π.Α. και άλλες χώρες), χρειάζεται ρεύμα από 12 μέχρι 16 A, ενώ για να φορτίσει έναν συσσωρευτή 24 kWh απαιτεί μέχρι και 17 ώρες [5]. Οι οικιακοί φορτιστές είναι κατά κόρον τέτοιου είδους.

Φορτιστές με δυνατότητα απόδοσης ισχύος 3.1-19.2 kW ονομάζονται AC επιπέδου 2 και χρειάζονται AC πολυφασική παροχή 240 V και ρεύμα από 15 έως 80 A . Αυτοί οι φορτιστές φορτίζουν έναν συσσωρευτή 24 kWh σε περίπου 8 ώρες [5]. Τέλος, υπάρχει και η κατηγορία DC επιπέδου 3. Η απόδοση ισχύος τους είναι από 120 μέχρι 240 kW και με DC παροχή 300 V-750 V, μέγιστου ρεύματος 400 A, μπορούν να φορτίσουν τον συσσωρευτή 24 kWh σε λιγότερο από μισή ώρα [5]. Για αυτόν τον λόγο αυτοί οι φορτιστές είναι γνωστοί ως “fast chargers”.

Η απόδοση των ενσύρματων συστημάτων φόρτισης τόσο σε on-board όσο και σε off-board συστήματα βάσει προδιαγραφών αρμόδιων φορέων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 96% [5, p. 4].

1.4 Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικού Οχήματος

Οι τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαχωρίζονται σε κοντινού πεδίου (near-field) και μακρινού πεδίου (far-field). Η μεταφορά ενέργειας μέσω μακρινού πεδίου περιλαμβάνει τεχνικές όπως ακτινοβολία μικροκυμάτων, ραδιοκυμάτων και κυμάτων λέιζερ ως φορέα ενέργειας. Οι τεχνικές αυτές αν και είναι σε θέση να μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις, απαιτούν έναν ευθύ, χωρίς εμπόδια, δίαυλο μεταφοράς ενέργειας μεταξύ πομπού και αποδέκτη.

Επίσης, για να αξιοποιηθούν στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας που χρειάζονται, είναι αναγκαίες επαρκώς μεγάλες κεραίες για καλυφθούν τα κριτήρια μεταφοράς πυκνότητας ισχύος. Επομένως η τεχνολογία μακρινού πεδίου δεν είναι δόκιμη για την εφαρμογή ασύρματης φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος.

Η τεχνολογία κοντινού πεδίου χρησιμοποιεί κλασσικές τεχνικές επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος αλλά και τεχνικές μαγνητικού συντονισμού. Οι τεχνικές επαγωγικής μεταφοράς ισχύος καλούνται IPT (Inductive Power Transfer). Βασίζονται στην σύζευξη των μαγνητικών πεδίων δύο πηνίων και έχουν πολύ καλά αποτελέσματα σε μικρές και μέσες αποστάσεις. Για την μεταφορά επαρκούς ισχύος μέσω IPT συστήματα, είναι αναγκαία η χρήση υψηλών συχνοτήτων (από 50 kHz έως 500 kHz).

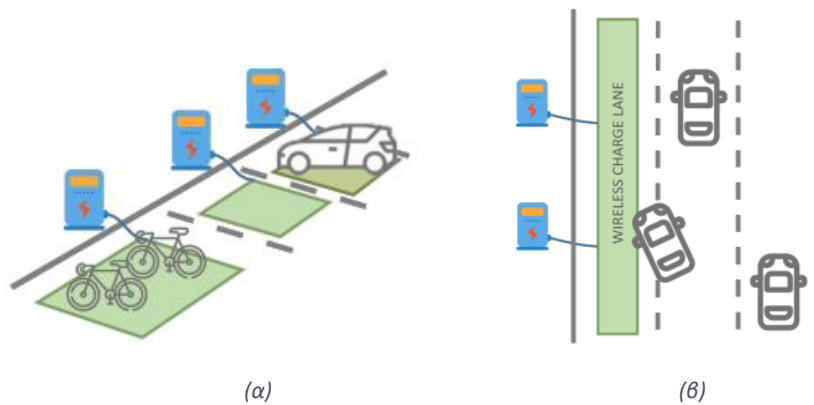
Οι τεχνικές IPT μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες, τις ισχυρά συζευγμένες και τις ασθενώς συζευγμένες. Οι ασθενώς συζευγμένες έχουν συντελεστή σύζευξης μικρότερο από 0.6 ενώ οι ισχυρά συζευγμένες έχουν συντελεστή σύζευξης μεγαλύτερο από 0.6 και έχουν μικρότερη ροή σκέδασης σε σχέση με τις ασθενώς συζευγμένες [6]. Συνεπώς έχουν καλύτερη απόδοση και μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

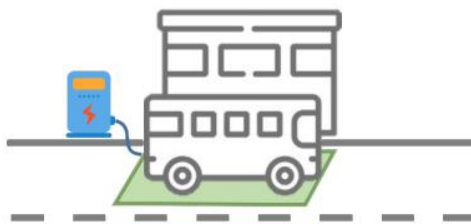
Οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ασύρματης φόρτισης αφορούν τους κλάδους της στατικής ασύρματης φόρτισης (Static Wireless Power Transfer, SWPT), της δυναμικής ασύρματης φόρτισης (Dynamic Wireless Power Transfer, DWPT) και της οιονεί-δυναμικής ασύρματης φόρτισης (Quasi-Dynamic Wireless Power Transfer, Q-DWPT) [7]. Η τεχνολογία SWPT αφορά την φόρτιση κατά την στάθμευση του αυτοκινήτου σε μια θέση parking ή ένα γκαράζ σπιτιού.



Σχήμα 1.5. Στατική Ασύρματη Φόρτιση.

Με τον όρο DWPT εννοείται η συνεχής και εν κινήσει φόρτιση του οχήματος μέσω υποδομών που υπάρχουν στον δρόμο. Η οιονεί-δυναμική ασύρματη φόρτιση είναι ένας συνδυασμός των δύο ανωτέρων μεθόδων καθώς το αυτοκίνητο φορτίζει κατά την διάρκεια μιας διαδρομής αλλά μόνο σε συγκεκριμένα σημεία, όπως κατά την στάση σε φωτεινούς σηματοδότες, ή αν μιλάμε για λεωφορείο κατά την ακινητοποίηση του οχήματος σε στάσεις.



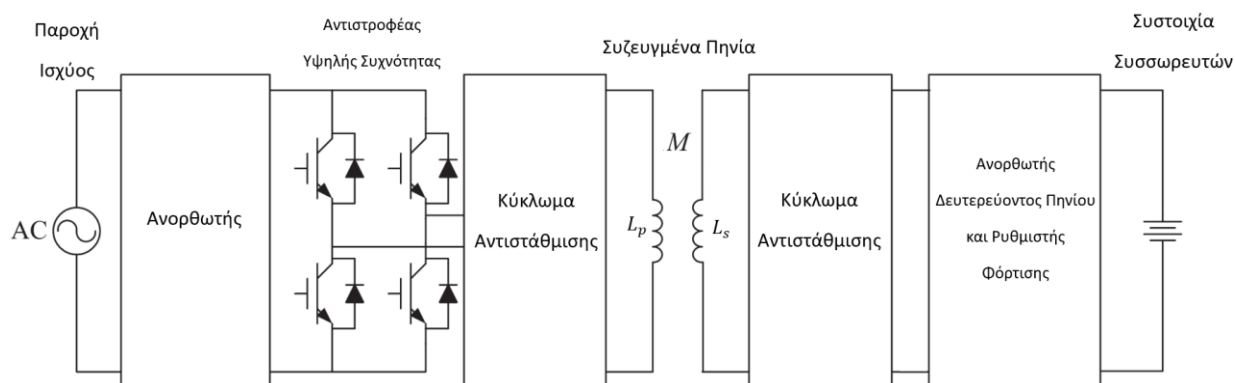


(γ)

Σχήμα 1.6. (α) Στατική Ασύρματη Φόρτιση, (β) Δυναμική Ασύρματη Φόρτιση, (γ) Οιονεί-Δυναμική Ασύρματη Φόρτιση [8].

Φορτιστές SWPT έχουν αρχίσει να παράγονται (αν και όχι μαζικά) από εταιρίες όπως η WiTricity Corp., BMW, κα., ενώ φορτιστές για DWPT και Q-DWPT έχουν αρχίσει να τοποθετούνται πιλοτικά σε πόλεις όπως το Τελ Αβίβ στο Ισραήλ και το Gotland στην Σουηδία από την εταιρία Electreon Inc.. Άλλες εταιρίες που ασχολούνται με επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων είναι η Wave Inc. και η Momentum Wireless Power.

Η διάταξη ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου αποτελείται από το δίκτυο παροχής ισχύος, έναν ανορθωτή της τάσης παροχής, έναν αντιστροφέα υψηλής συχνότητας, τα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου, τα κυκλώματα αντιστάθμισης/συντονισμού και τον ανορθωτή του δευτερεύοντος πηνίου μαζί με κάποιον ελεγκτή φόρτισης.



Σχήμα 1.7. Η διάταξη Συστήματος Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικού Οχήματος.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των ασύρματων φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων είναι:

- Μειώνουν την ανάγκη αυτονομίας του αυτοκινήτου κάτι που οδηγεί σε μικρότερες, ελαφρύτερες και πιο οικονομικές μπαταρίες.
- Φιλικότητα προς τον χρήστη καθώς αυτοματοποιούν μια διεργασία που θα έβρισκε μπροστά του μέσα στην μέρα.

- Περιορίζουν την πιθανότητα εμφάνισης ατυχημάτων όπως η ηλεκτροπληξία ή η πυρκαγιά, λόγω μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς αγωγούς.

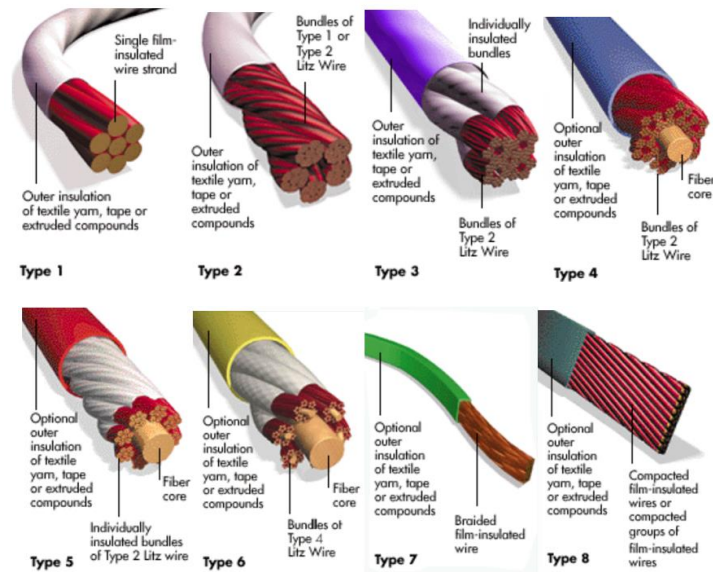
Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων παρουσιάζει όμως και αρκετά μειονεκτήματα:

- Συγκριτικά, δεδομένης της εξέλιξης της τωρινής τεχνολογίας, το κόστος του ενσύρματου φορτιστή είναι πιο μικρό από του ασύρματου.
- Οι απώλειες του ασύρματου φορτιστή είναι γενικά μεγαλύτερες από τον ενσύρματο φορτιστή.
- Είναι σημαντικό να μελετηθούν συστήματα θωράκισης από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία από WPT. Επίσης πρέπει να μελετηθούν ζητήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMI) και ψύξης του φορτιστή.
- Τα έργα υποδομών δυναμικής ασύρματης φόρτισης είναι αρκετά κοστοβόρα.
- Ομοίως, το κόστος μιας μαζικής εγκατάστασης SWPT σταθμών μπορεί να γίνει αρκετά ακριβό. Λόγου χάριν, σε έναν χώρο στάθμευσης πολλών κοντινών θέσεων (π.χ. σε εμπορικά κέντρα ή στον εξωτερικό χώρο υπερκαταστημάτων) οι σταθμοί ενσύρματης φόρτισης είναι δυνατό να έχουν αρκετούς διαθέσιμους αγωγούς προς χρήση ανά σταθμό. Ωστόσο τα rads που τοποθετούνται για SWPT είναι ατομικά, κάτι που κάνει το κόστος να αυξηθεί σημαντικά.

Είναι κατανοητό πως για την ωρίμανση της τεχνολογίας ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου πρέπει να λυθούν αρκετά προβλήματα. Όσο όμως η τεχνολογία εξελίσσεται και η «ψαλίδα» της απόδοσης μεταξύ ενσύρματης και ασύρματης φόρτισης κλείνει (στην ασύρματη φόρτιση πλέον έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 85%–96% [9]), τόσο μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι η ασύρματη φόρτιση θα γίνει κομμάτι της καθημερινότητας.

1.5 Χρησιμοποιούμενα Υλικά

Για το αγωγή υλικό των πηνίων επιλέγονται καλώδια χαλκού τύπου Litz [10]. Τα καλώδια Litz γενικά αποτελούνται από πολλούς μονωμένους αγωγούς συνεστραμμένους μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο εγγύτητας. Παρέχουν επαρκή πυκνότητα ισχύος, μειώνουν την παρασιτική αντίσταση και συνεπώς αυξάνουν τον παράγοντα ποιότητας της διάταξης. Ωστόσο, για συχνότητες πάνω από 1 MHz, τα καλώδια γίνονται λιγότερο αποδοτικά και χρησιμοποιούνται σπάνια.



Σχήμα 1.8. Τύποι καλωδίων Litz [11].

Για το μαγνητικό υλικό του πυρήνα, το πιο συχνό υλικό επιλογής είναι ο φερρίτης [12]. Οι φερρίτες είναι κεραμικά υλικά αποτελούμενα κυρίως από οξείδιο του σιδήρου FeO_3 και άλλα μέταλλα όπως Νικέλιο, Ψευδάργυρο και Βάριο σε μικρότερη ποσότητα. Είναι ένα υλικό μη αγώγιμο που μαγνητίζεται εύκολα από έναν μαγνήτη ή κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Οι φερρίτες μπορούν να διαχωριστούν σε σκληρούς φερρίτες και μαλακούς φερρίτες. Οι σκληροί φερρίτες χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή μόνιμων μαγνητών σε εφαρμογές ηλεκτρικών μηχανών χαμηλής ισχύος λόγω της ιδιότητας της αργής απομαγνήτισης του. Οι μαλακοί φερρίτες, από την άλλη, επιτρέπουν την γρήγορη μαγνήτιση και απομαγνήτιση τους, χρησιμοποιούνται σε επαγωγείς υψηλής συχνότητας και μετασχηματιστές. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενοι μαλακοί φερρίτες στην ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι αυτοί με προσμίξεις Μαγνησίου-Ψευδαργύρου και Νικελίου-Ψευδαργύρου γιατί παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές απώλειες σε υψηλές συχνότητες. Η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και η χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα τους περιορίζει τα δινορεύματα. Επίσης είναι ανθεκτικοί στην υπερθέρμανση.

Οι φερρίτες παρά τις εξαιρετικές του ιδιότητες έχουν μερικά ελαττώματα, είναι ψαθυροί και εύθραστοι. Αυτό σημαίνει ότι σε εφαρμογές αυτοκίνησης που απαιτείται η μετακίνηση και η καταπόνηση τους μπορεί να θραυτούν ή και να σπάσουν. Ο φερρίτης επιπλέον είναι υλικό με μεγάλη πυκνότητα και επομένως αυξάνει το συνολικό βάρος του αυτοκινήτου. Επίσης οι φερρίτες εισέρχονται στον κορεσμό αρκετά εύκολα, κάτι που περιορίζει την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας τους σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Για αυτούς τους λόγους έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία πυρήνα από νανοσωματίδια. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από νανοδομές υλικών με καλές μαγνητικές ιδιότητες όπως υψηλή διαπερατότητα (Σίδηρος ή Κοβάλτιο). Το πλάτος κόκκου αυτών των δομών είναι συνήθως μικρότερο από 10 nm και εισέρχονται εντός μιας μήτρας άμορφου μονωτικού υλικού [13]. Τα νανοσωματίδια

αυτά μπορούν να συνδυαστούν με νανοδομές πολυμερών υλικών ώστε να έχουν βελτιωμένη μαγνητική συμπεριφορά και να είναι ανθεκτικά στις καταπονήσεις [12].

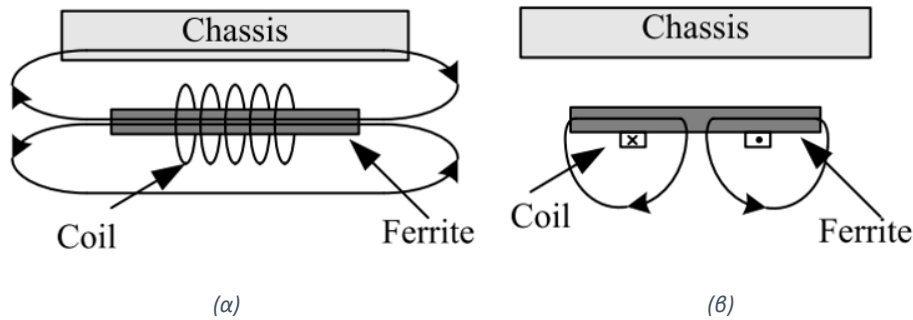
Ένα ακόμα είδος μαγνητικού πυρήνα που λύνει τα προβλήματα του κλασσικού φερρίτη είναι ο πυρήνας από εύκαμπτο μαγνητικό υλικό. Αυτό το μαγνητικό υλικό μπορεί να παραχθεί με την τεχνική της ηλεκτραπόθεσης που χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος αλλά και ευκολία και ακρίβεια παραγωγής. Προτιμώνται υλικά όπως *NiFe* που έχουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση. Έτσι προκύπτουν μικρότερες απώλειες πυρήνα και βελτιωμένη μεταφορά ισχύος. Για την περαιτέρω βελτίωση της ευκαμψίας και της βιοσυμβατότητας του υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπόστρωμα παραξυλολίου.

Όσον αφορά το πρωτεύον πηνίο, επειδή τα υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν είναι κατάλληλα για τοποθέτηση στην άσφαλτο, σε περίπτωση που η εφαρμογή το απαιτεί, έχει προταθεί ένα είδος μαγνητικού τσιμέντου συμβατό με το ασφαλτόστρωμα. Αυτό το υλικό αποτελείται από μικρά σωματίδια μαγνητικού υλικού (π.χ. Μαγνησίο-Ψευδαργύρο και Νικέλιο-Ψευδάργυρο) καλυμμένα με ένα λεπτό υμένιο από μονωτικό υλικό (π.χ. πολυαιθυλένιο). Αυτό το μαγνητικό υλικό τοποθετείται ύστερα σε τσιμέντο σε αναλογία που να ελέγχονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού αλλά και η ομογένεια των σωματιδίων. Οι πυρήνες από μαγνητικό τσιμέντο είναι αρκετά οικονομικοί και έχουν άριστες μηχανικές ιδιότητες. Με αυτόν τον τρόπο το πρωτεύον πηνίο ενσωματώνεται καλύτερα στην άσφαλτο χωρίς σημαντικό περιορισμό της μεταφοράς ισχύος προς το δευτερεύον [14].

1.6 Διατάξεις Επαγωγικής Φόρτισης

1.6.1 Διατάξεις Στατικής Επαγωγικής Φόρτισης

Διαφορετικές διατάξεις επαγωγικών φορτιστών με χρήση φερρίτη μπορούν να μελετηθούν ανάλογα με την εφαρμογή. Έτσι για στατική ασύρματη φόρτιση μπορούν να διακριθούν οι κατηγορίες φορτιστών ανάλογα με τον τρόπο διάχυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε συζεύκτες μαγνητικής ροής μονής και διπλής όψης:

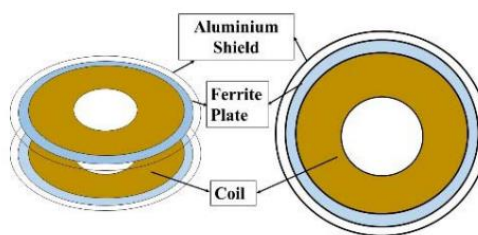


Σχήμα 1.9. Κατανομή του πεδίου σε συζεύκτες διπλής (α) και μονής όψης (β), [15].

Οι μαγνητικοί συζεύκτες διπλής όψης συνήθως αποτελούνται από ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από έναν πυρήνα φερριτή σχήματος ράβδου. Οι άκρες της ράβδου σε αυτήν την περίπτωση μοιάζουν με μαγνητικούς πόλους από τους οποίους η μαγνητική ροή εισέρχεται και εξέρχεται αντίστοιχα. Με αυτή την διάταξη δημιουργείται μαγνητικό πεδίο περιμετρικά του πηνίου, το οποίο δεν χρησιμοποιείται όλο από το δευτερεύον με αποτέλεσμα να προκύπτουν αρκετά μεγάλες απώλειες. Με χρήση θωράκισης από αλουμίνιο οι απώλειες μπορούν να πέσουν έως και το 1%-2%. Η θωράκιση αλουμινίου όμως ρίχνει τον παράγοντα ποιότητας του συντονισμού [15], με αποτέλεσμα η χρήση μαγνητικών συζευκτών διπλής όψης να μην είναι δόκιμη επιλογή.

Όσον αφορά τους μαγνητικούς συζεύκτες απλής όψης, η μαγνητική ροή εμφανίζεται κυρίως από την μια πλευρά του πρωτεύοντος πηνίου και για αυτό έχουν λιγότερες απώλειες και δεν απαιτούν την θωράκιση των συζευκτών διπλής όψης. Από τους συζεύκτες μονής όψης που έχουν διερευνηθεί διακρίνονται:

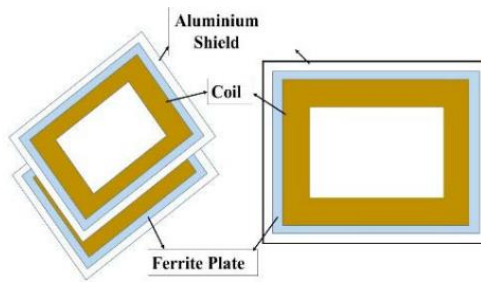
- Οι κυκλικοί συζεύκτες:



Σχήμα 1.10. Κυκλικός συζεύκτης [9].

Οι κυκλικοί συζεύκτες για δεδομένο διάκενο και ευθυγράμμιση πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πηνίου έχουν σχετικά μικρότερο συντελεστή σύζευξης σε σχέση με άλλες γεωμετρίες όμοιου μεγέθους. Παρ' όλα αυτά είναι ακόμα μια από τις πιο χρησιμοποιούμενες διατάξεις στην στατική ασύρματη φόρτιση.

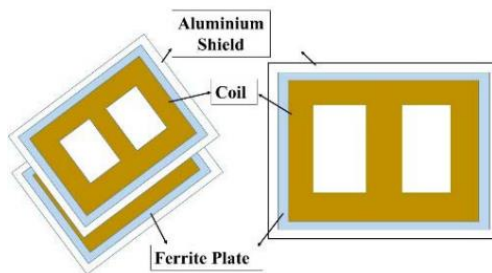
- Ορθογώνιοι συζεύκτες:



Σχήμα 1.11. Ορθογώνιος συζεύκτης [9].

Με τους ορθογώνιους συζεύκτες προκύπτουν τα πλεονεκτήματα ότι η ροή σκέδασης μειώνεται, επίσης παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις, ενώ είναι πιο συμπαγής και ελαφριά κατασκευή. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές δυναμικής φόρτισης.

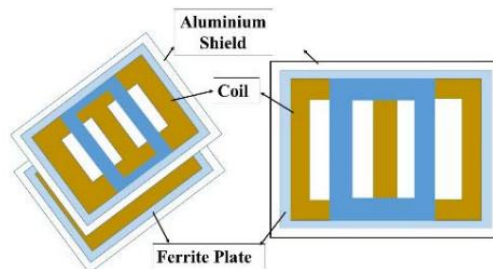
- Συζεύκτες Double D (DD) πηνίου:



Σχήμα 1.12. Συζεύκτης Double D πηνίου [9].

Αυτή η κατηγορία ορθογώνιων συζευκτών, μπορεί να μεταφέρει ικανοποιητικά ποσά ισχύος σε μεγάλα διάκενα. Επίσης έχει μεγάλη ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις.

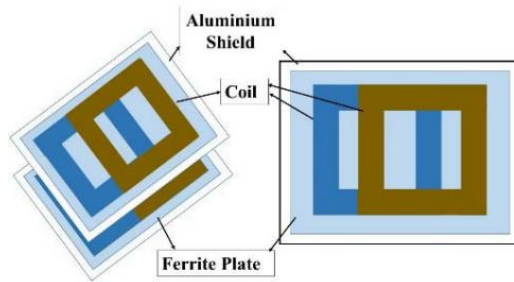
- Συζεύκτες DDQ πηνίου:



Σχήμα 1.13. Συζεύκτης DDQ πηνίου [9].

Η προσθήκη ενός επιπλέον πηνίου «Q» στην διάταξη DD πηνίου οδηγεί σε μεγαλύτερη ανοχή σε πλευρικές και οριζόντιες μετατοπίσεις. Χρειάζονται ωστόσο πλέον δύο αντιστροφείς στο πρωτεύον και δύο ανορθωτές στο δευτερεύον. Έτσι καθίστανται πιο οικονομικά ασύμφοροι.

- Συζεύκτες Bi-Polar (BP) πηνίου:



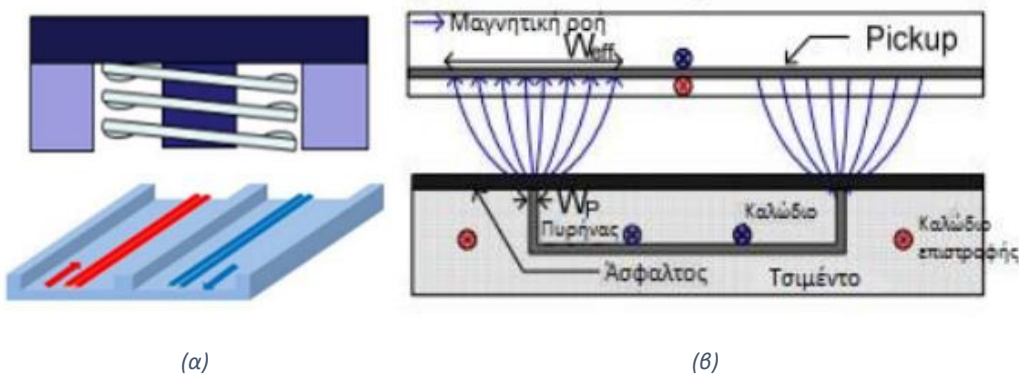
Σχήμα 1.14. Συζεύκτης Bi-Polar πηνίου [9].

Μπορεί να επιτύχει τα πλεονεκτήματα του DDQ πηνίου με λιγότερο χαλκό, αν και χρειάζεται ξανά δύο αντιστροφείς στο πρωτεύον και δύο ανορθωτές στο δευτερεύον για την οδήγηση των πηνίων. Επίσης σε περίπτωση γωνιακών μετατοπίσεων παρουσιάζεται αισθητή μείωση της σύζευξης.

1.6.2 Διατάξεις Δυναμικής Επαγωγικής Φόρτισης

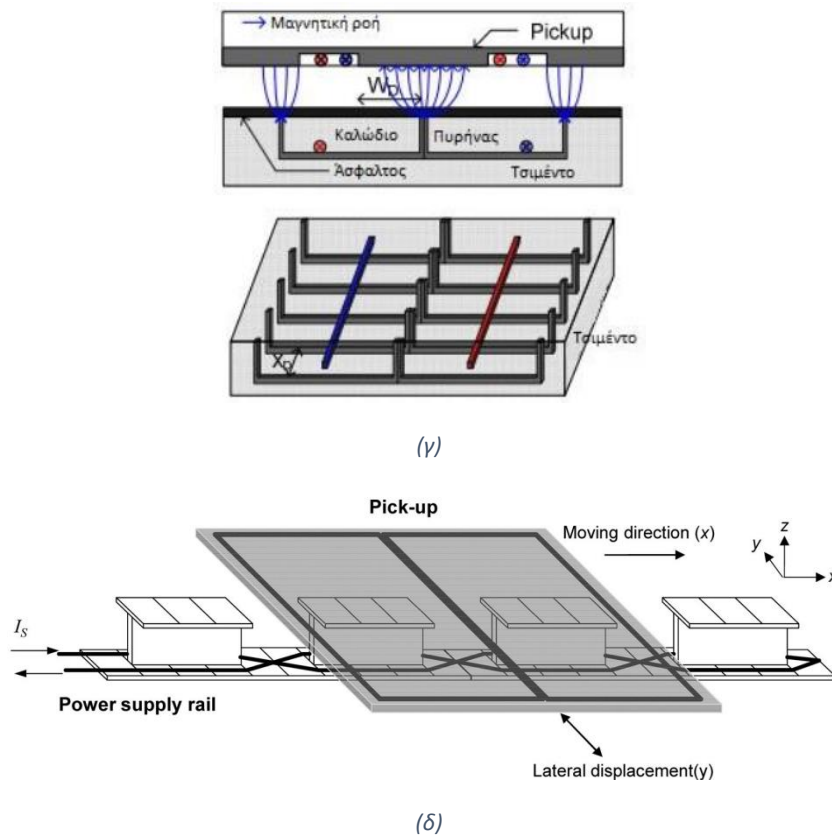
Για την δυναμική ασύρματη φόρτιση μπορούν να διακριθούν οι κατηγορίες ενιαίων και τμηματικών φορτιστών.

Οι ενιαίοι φορτιστές αποτελούνται από τον πυρήνα φερρίτη και από μεγάλου μήκους ευθεία καλώδια που δρουν ως το πρωτεύον πηνίο τις διάταξης. Ο τύπος του πυρήνα μπορεί να ακολουθεί την δομή E-τύπου, U-τύπου, W-τύπου και I-τύπου, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



(α)

(β)



Σχήμα 1.15. (α) Διάταξη τύπου E [16], (β) Διάταξη τύπου U [16], (γ) Διάταξη τύπου W [16] και (δ) Διάταξη τύπου I [17].

Ο τύπου E φορτιστής που προτάθηκε στο [16], κατάφερε με απόδοση 80% να μεταφέρει ισχύ 3 kW με απόσταση διακένου 3 cm. Συζεύκτες τύπου U χρησιμοποιήθηκαν για την αύξηση του διακένου, όπου και κατάφεραν να μεταφέρουν 52 kW (χωρισμένα σε 10 pick-up διατάξεις των 5.2 kW) μέσω διακένου 17 cm, με απόδοση 72%. Η διάταξη W-τύπου έχει το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιεί λιγότερη ποσότητα φερριτή. Χρησιμοποιήθηκε για μεταφορά ενέργειας της τάξης των 15 kW ανά pick-up διαμέσω διακένου 20 cm, ενώ η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε είναι 74%. Με την διάταξη τύπου I επιτεύχθηκε μεταφορά ισχύος μέσω διακένου 20 cm για μεγάλη πλευρική μετατόπιση στα 24 cm, ενώ σε άλλες μελέτες [17] διαπιστώθηκε ότι κατάφερε να μεταφέρει ισχύ 27 kW με απόδοση 74%.

Για εξοικονόμηση ενέργειας έχουν επιτευχθεί τεχνολογίες απενεργοποίησης της διάταξης ενώ δεν υπάρχει διερχόμενο όχημα [18]. Παρ' όλα αυτά, λόγω του μεγάλου μήκους των pick-ups η απόδοση είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 1.16. Ενιαίος Φορτιστής Δυναμικής Ασύρματης Φόρτισης.

Οι τμηματικοί φορτιστές αφορούν φορτιστές όμοιους με αυτούς της στατικής φόρτισης, τοποθετημένους σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η απόδοση τους μπορεί να είναι κοντά στην απόδοση της στατικής φόρτισης. Επειδή όμως κάθε μονάδα φόρτισης πρέπει να ενεργοποιείται όταν το όχημα βρίσκεται στην εγγύτητα της, έχουν το μειονέκτημα ότι χρειάζεται ένας μετατροπέας οδήγησης για κάθε μονάδα, κάτι που είναι κοστοβόρο. Έχουν παρουσιαστεί άρθρα βέβια, που ένας μόνο μετατροπέας μπορεί να οδηγεί περισσότερες από μία μονάδα φόρτισης [19].



Σχήμα 1.17. Τμηματικός Φορτιστής Δυναμικής Ασύρματης Φόρτισης.

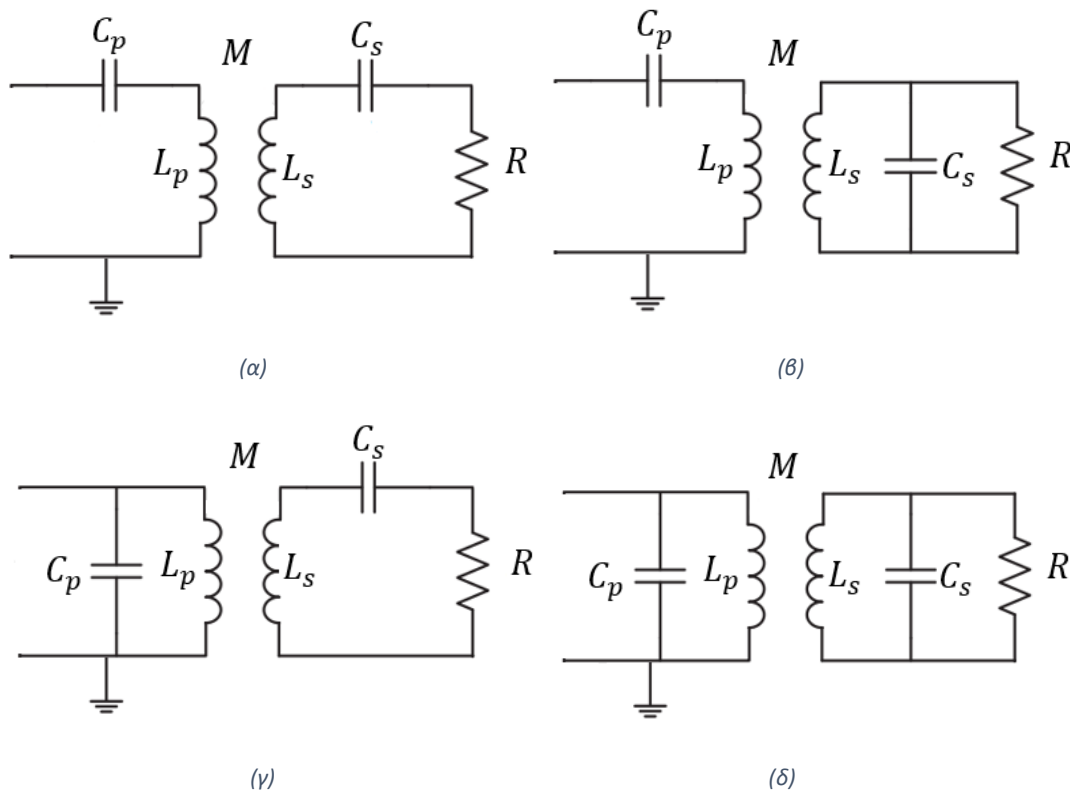
1.7 Τεχνικές Αντιστάθμισης

Η βελτίωση του συντελεστή σύζευξης στην τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ισχύος επιτυγχάνεται με ζεύξη των μαγνητικών πεδίων των δύο πηνίων μέσω μαγνητικού συντονισμού αλλά και με χρήση κατάλληλων υλικών πυρήνα ή και διαφορετικής χωροταξικής κατανομής του πυρήνα και των τυλιγμάτων. Στο πλαίσιο επίτευξης μαγνητικού συντονισμού, στο δευτερεύον πηνίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές αντιστάθμισης με σκοπό την μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος.

Επιπλέον, τεχνικές αντιστάθμισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο πρωτεύον πηνίο για την μείωση της μεταφοράς άεργου ισχύος και συνεπώς τον μηδενισμό της γωνίας του ρεύματος εισόδου σε σχέση με την τάση εισόδου.

Οι πιο συνήθεις τεχνικές αντιστάθμισης είναι οι εξής [15]:

- α) Σειρά-Σειρά
- β) Σειρά-Παράλληλα
- γ) Παράλληλα-Σειρά
- δ) Παράλληλα-Παράλληλα



Σχήμα 1.18. Κύριες Τοπολογίες Αντιστάθμισης. (α) Σειρά-Σειρά, (β) Σειρά-Παράλληλα, (γ) Παράλληλα-Σειρά, (δ) Παράλληλα-Παράλληλα.

Όπως προειπώθηκε, η αντιστάθμιση στο δευτερεύον πηνίο χρησιμοποιείται για να φέρει τα δύο πηνία σε μαγνητικό συντονισμό. Έτσι ο πυκνωτής αντιστάθμισης C_s του δευτερεύοντος πηνίου πρέπει να βρίσκεται σε συντονισμό με το πηνίο L_s . Θα πρέπει να ισχύει:

$$C_s = \frac{1}{L_s \omega_0^2}$$

Όπου $\omega_0 = 2\pi * f$, η συχνότητα συντονισμού (f η συχνότητα του ρεύματος του πρωτεύοντος).

Στο πρωτεύον πηνίο, ο πυκνωτής που χρησιμοποιείται θα πρέπει να μηδενίζει την άεργο ισχύ στην είσοδο και να επιτυγχάνει μηδενική φάση γωνίας ρεύματος (Zero Phase Angle, ZPA). Οπότε για κάθε μια από τις τοπολογίες, είναι επιθυμητή χωρητικότητα πρωτεύοντος:

$$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} \text{ για SS,}$$

$$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} * \frac{1}{1-k^2} \text{ για SP,}$$

$$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} * \frac{1}{Q_{s,PS}^2 * k^4 + 1} \text{ για PS και}$$

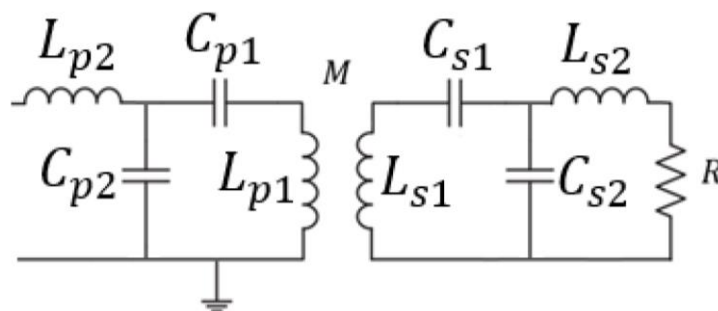
$$C_p = \frac{C_s L_s}{L_p} * \frac{1-k^2}{Q_{s,PP}^2 * k^4 + (1-k^2)^2} \text{ για PP}$$

Όπου $k = \frac{M}{\sqrt{L_p * L_s}}$ και $Q_{s,PS}$, $Q_{s,PP}$ οι συντελεστές ποιότητας φορτίου για αντιστάθμιση

Παράλληλα-Σειρά και Παράλληλα-Παράλληλα, με $Q_{s,PS} = \frac{\omega_0 L_s}{R}$ και $Q_{s,PP} = \frac{R}{\omega_0 L_s}$.

Από όλες τις τεχνικές που παρατέθηκαν, οι PS και PP εξαρτώνται από το φορτίο R . Επομένως για εφαρμογές μεταβλητού φορτίου, δεδομένου ότι η ο συντονισμός επιτυγχάνεται, είναι καλύτερο να προτιμώνται τοπολογίες SS και PP.

Μια επιπλέον σημαντική διάταξη αντιστάθμισης είναι η double sided LCC που αποτελείται από δύο πυκνωτές και από ένα πηνίο στο πρωτεύον και δευτερεύον της διάταξης, αντίστοιχα. Δηλαδή:



Σχήμα 1.19. Αντιστάθμιση Τύπου LCC.

Σε αυτήν την περίπτωση τα στοιχεία L_{p2} και C_{p2} βρίσκονται σε συντονισμό ενώ στο κύκλωμα λήψεως τα στοιχεία L_{s1} και C_{s1} συντονίζονται με το C_{s2} και συνεπώς η συχνότητα συντονισμού είναι ανεξάρτητη του φορτίου αλλά και του συντελεστή σύζευξης, κάτι που δεν είχε προκύψει σε καμία από τις ανωτέρω περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά, η αντιστάθμιση LCC είναι μια διάταξη που καταλαμβάνει περισσότερο χώρο και χρειάζεται να ενσωματωθεί στην υπάρχουσα διάταξη με διάφορες τεχνικές [20], [21].

1.8 Τεχνικές Ελέγχου

Σημαντικό παράγοντα για την βέλτιστη αξιοποίηση του επαγωγικού φορτιστή αποτελεί επιπλέον και ο έλεγχος του ρεύματος των πηνίων. Μελετώνται οι τεχνικές ελέγχου του πρωτεύοντος πηνίου, του δευτερεύοντος πηνίου και ο συνδυασμός ελέγχου των δύο πηνίων.

Όσον αφορά τον έλεγχο του πρωτεύοντος πηνίου, αυτός επί το πλείστον στοχεύει στην διατήρηση σταθερού ρεύματος και συχνότητας στο πρωτεύον. Αυτή η τεχνική ελέγχου αποφεύγεται στην περίπτωση που η εφαρμογή απαιτεί την διαχείριση πολλών δευτερευόντων πηνίων, καθώς οι αλλαγές που επιφέρει ο έλεγχος στο πρωτεύον έχουν επιπτώσεις σε κάθε δευτερεύον που χειρίζεται η εφαρμογή. Επομένως συναντάται κυρίως σε εφαρμογές στατικής φόρτισης και όχι δυναμικής φόρτισης.

Ο έλεγχος δευτερεύοντος πηνίου είναι μια τεχνική που αφορά κυρίως εφαρμογές δυναμικής φόρτισης. Δεδομένου του σταθερού ρεύματος στο πρωτεύον, γίνεται να ρυθμιστεί το ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο για την μέγιστη μεταφορά ισχύος στο πηνίο αυτό.

Ο έλεγχος και του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου είναι η καλύτερη επιλογή για συστήματα δυναμικής φόρτισης. Συνδυάζει την παροχή κατάλληλου ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο με τον έλεγχο της μεταφερόμενης ισχύος στο δευτερεύον.

1.9 Προστασία από Έκθεση στο Η/Μ Πεδίο Επαγωγικού Φορτιστή

Ένα από τα μειονεκτήματα της ασύρματης φόρτισης είναι ότι τίθενται θέματα ασφάλειας εξαιτίας του υψίσυχνου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που παράγεται. Είναι ανάγκη να υπάρξει μέριμνα για την προστασία του οδηγού, των επιβατών του αυτοκινήτου αλλά και των ζωντανών οργανισμών που διέρχονται κοντά από τον επαγωγικό φορτιστή. Χρειάζεται δε να προσεχθεί ιδιαίτερως η ηλικιακή κατηγορία των μικρών παιδιών, των ηλικιωμένων αλλά και ατόμων με ηλεκτρικά εμφυτεύματα (λόγου χάριν βηματοδότες και νευροδιεγέρτες). Για αυτό τον λόγο, διάφοροι αρμόδιοι οργανισμοί έχουν εκδώσει συστάσεις και οδηγίες για τους περιορισμούς έκθεσης σε υψίσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Σημαντικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται από τις οδηγίες για την περιγραφή επικινδυνότητάς της έκθεσης σε ένα Η/Μ πεδίο είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής (T), η ένταση ηλεκτρικού αλλά και μαγνητικού πεδίου (V/m και A/m αντίστοιχα), και το μέγιστο ρεύμα επαφής (A).

Σε διεθνή κλίμακα, από τους πιο σημαντικούς οργανισμούς που εκδίδει συστάσεις για την προστασία από Η/Μ πεδία υψηλής συχνότητας είναι η επιτροπή ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Το 2010 εξέδωσε μια νέα οδηγία [22] και για την προς μελέτη εφαρμογή, δηλαδή για συχνότητες λειτουργίας από 3 kHz έως και 10 MHz, προτείνει έκθεση του γενικού πληθυσμού σε ηλεκτρικό πεδίο μικρότερο από 83 V/m, μαγνητικό πεδίο 21 A/m και πυκνότητα μαγνητικής ροής έως 27 μ T. Για την έκθεση των επαγγελματιών προτείνει μέχρι 170 V/m, 80 A/m και 100 μ T. Η τελευταία αναθεώρηση των συστάσεων που έγινε το 2020 [23] δεν έχει προτείνει αλλαγές ως προς τα μεγέθη αυτά.

Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, βρίσκεται εν ισχύ από το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο η σύσταση 1999/519/EC [24] που θέτει το όριο έκθεσης του γενικού πληθυσμού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας από 3 kHz έως και 150 kHz στα 87 V/m, 5 A/m και 6.25 μ T. Η Ευρωπαϊκή Ένωση επιπλέον έχει εκδώσει και την σύσταση 2013/35/EU [25] που αφορά την έκθεση του επαγγελματικού πληθυσμού σε υψίσυχνα Η/Μ πεδία. Για τις συχνότητες 3 kHz έως 10 MHz προτείνει έκθεση σε πυκνότητα μαγνητικής ροής μέγιστου μεγέθους 100 μ T.

2 Μαγνητική Ανάλυση με Χρήση του Λογισμικού Ansys Maxwell

2.1 Μεγέθη Αξιολόγησης Διάταξης

Για την αξιολόγηση της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να οριστούν συγκεκριμένα μεγέθη. Στις αναφορές [15], [26] χρησιμοποιείται ως μέθοδος αξιολόγησης της ποιότητας της διάταξης η απόδοση μεταφερόμενης ισχύος. Δηλαδή το μέγεθος:

$$\eta = \frac{k^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s})^2}$$

Οι συντελεστές σύζευξης του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου υπολογίζονται από τους τύπους:

$$Q_p = \frac{\omega * L_p}{R_p} = \frac{2\pi f * L_p}{R_p} \text{ και } Q_s = \frac{\omega * L_s}{R_s} = \frac{2\pi f * L_s}{R_s}$$

Επίσης ο συντελεστής σύζευξης k μπορεί να εκτιμηθεί στην προσομοίωση που θα παρουσιαστεί κατωτέρω. Έτσι θα προκύψει εύκολα ο υπολογισμός του η . Οι αντιστάσεις R_p και R_s θα υπολογιστούν με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο [27]. Όπου δηλαδή:

$$R_{DC} = \frac{l}{\sigma * S}$$

Όπου l το συνολικό μήκος του αγωγού σε μέτρα, $\sigma = 58 \text{ MS/m}$, και S η διατομή του αγωγού σε μέτρα. Επομένως, με έναν μέσο όρο ακτίνας πηνίου $\frac{18+7}{2} = 12.5 \text{ cm}$, 10 ελίγματα καλωδίου γύρω από το πηνίο και χρήση καλωδίου Litz $0.25 \text{ mm } \varnothing \times 384$ παράλληλων αγωγών, υπολογίζεται $l = (2 * \pi * 125 * 10^{-3}) * 10/384 = 0.0205 \text{ m}$ αλλά και $S = \pi * r^2 = \left(\frac{0.25}{2}\right)^2 * \pi * 10^{-6} = 4.9087 * 10^{-8} \text{ m}$. Εν τέλη, και οι δύο αντιστάσεις R_p, R_s υπολογίστηκαν στα $7.2 \text{ m}\Omega$.

Όπως γίνεται κατανοητό είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της απόδοσης της μεταφερόμενης ισχύος. Το μέγεθος η εν γένει εξαρτάται από την συχνότητα και όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο η απόδοση θα μεγαλώνει. Ωστόσο, επειδή η χρήση μεγάλων συχνοτήτων θέτει θέματα ασφάλειας και κόστους [15], είναι επιθυμητό να έχουμε όσο δυνατόν μικρότερες απώλειες σε επαρκώς χαμηλές ισχύς.

Ένας ακόμα τρόπος αξιολόγησης της αποδοτικότητας της διάταξης μας είναι να υπολογιστεί κάποιο ενδεικτικό μέγεθος ισχύος μέσω της προσομοίωσης.

Η μεταφερόμενη ισχύς από το πρωτεύον στο δευτερεύον πηνίο υπολογίζεται ως το γινόμενο της μη αντισταθμισμένης ισχύος, καλούμενη P_{su} , με τον συντελεστή ποιότητας Q [28]. Δηλαδή:

$$P_{out} = P_{su} * Q$$

Ο συντελεστής ποιότητας αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.7 των τεχνικών αντιστάθμισης και εξαρτάται από το είδος της αντιστάθμισης, τα φορτία που υπάρχουν και από τον έλεγχο που ασκείται στα πηνία. Η μη αντισταθμισμένη ισχύς είναι το γινόμενο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και επομένως είναι η μέγιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί στο δευτερεύον πηνίο. Δηλαδή:

$$P_{out} = P_{su} * Q = I_{sc} * V_{oc} * Q$$

Έστω ότι υπάρχουν τα δύο πηνία, με το πρώτο να διαρρέεται από ρεύμα I_p και να έχει αυτεπαγωγή L_p , ενώ το δεύτερο να διαρρέεται από ρεύμα I_s και να έχει αυτεπαγωγή L_s . Έστω επίσης η αμοιβαία επαγωγή των πηνίων M . Η τάση που επάγεται στο δευτερεύον πηνίο είναι ίση με $V_{oc} = j\omega MI_p$ και ονομάζεται τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης για βραχυκυκλωμένο δευτερεύον πηνίο δίνεται από τον τύπο:

$$I_{sc} = \frac{V_{oc}}{j\omega L_s}$$

Και συνεπώς,

$$I_{sc} = \frac{j\omega MI_p}{j\omega L_s} = \frac{MI_p}{L_s}$$

Αντικαθιστώντας στον τύπο της ισχύος εξόδου, προκύπτει:

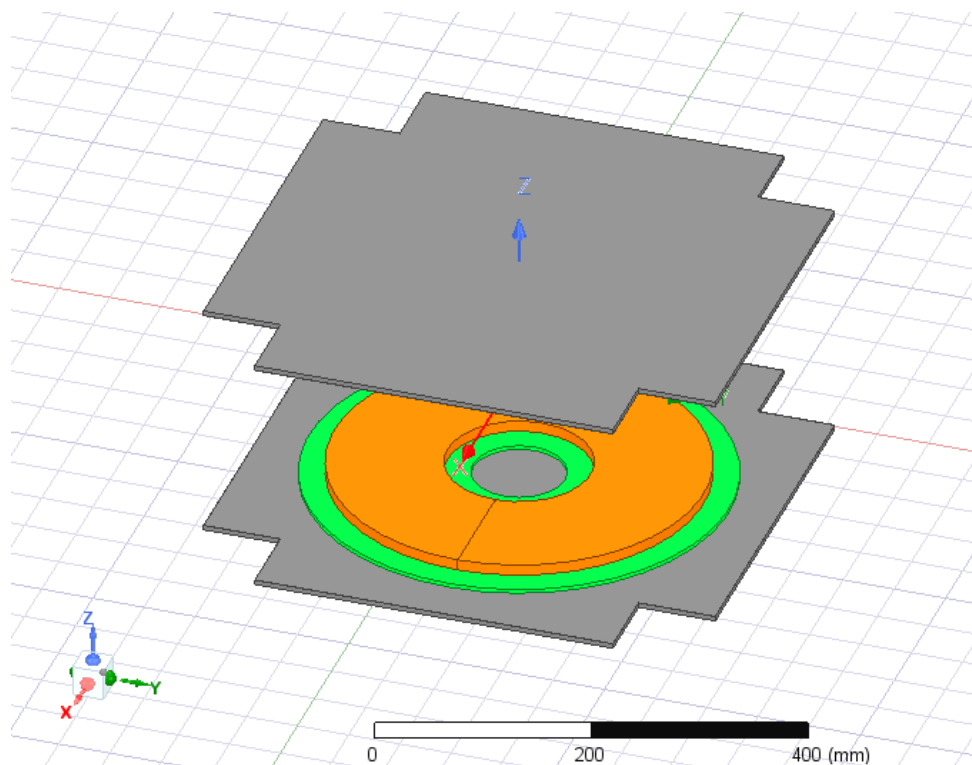
$$P_{out} = \omega MI_p * \frac{MI_p}{L_s} * Q = \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_s} Q$$

$$\text{και } P_{su} = \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_s}$$

Άρα δεδομένου ότι είναι γνωστό το ρεύμα και η συχνότητα διέγερσης, αν έχουμε τιμές για την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος πηνίου και την τιμή της αμοιβαίας αυτεπαγωγής, μπορεί να υπολογιστεί το μέγεθος P_{su} . Η ισχύς αυτή είναι ενδεικτική της αποδοτικότητας της διάταξης καθώς ο συντελεστής ποιότητας παραμένει ίδιος για διαφορετικές διεγέρσεις της ίδιας διάταξης.

2.2 Χρησιμοποιούμενη Διάταξη

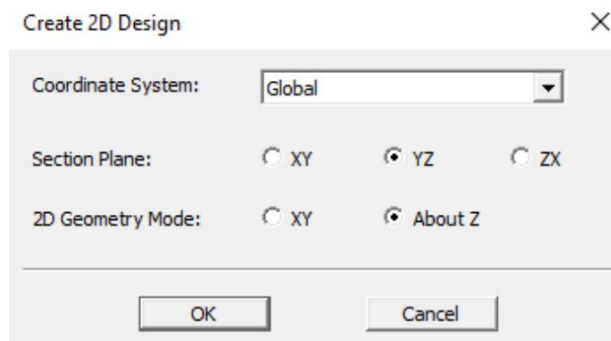
Θα χρησιμοποιηθεί η κυκλική διάταξη στατικής επαγωγικής φόρτισης που δίνεται ως παράδειγμα από το Ansys σε πολλές εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης όπως το ηλεκτρονικό σεμινάριο [26].



Σχήμα 2.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στο Ansys.

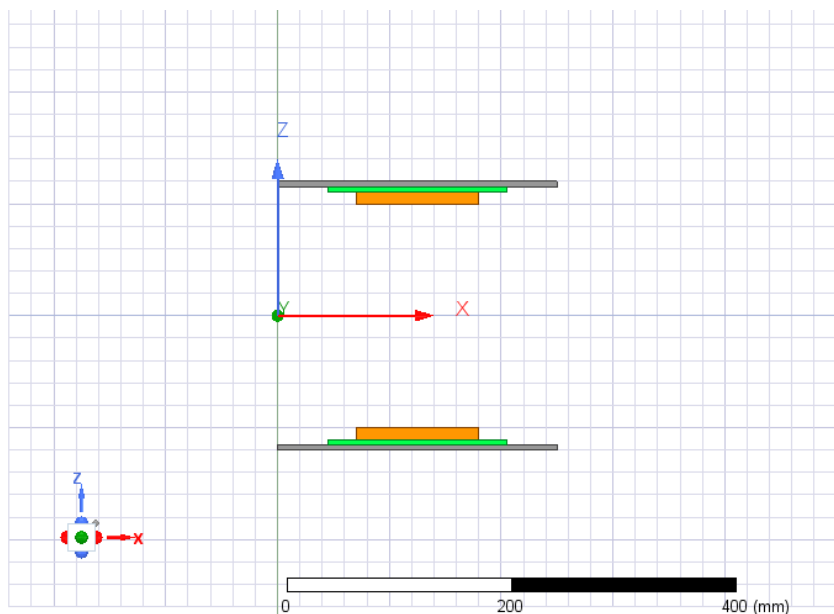
Οι διαστάσεις που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία της διάταξης είναι: το μέγιστο πλάτος του καλύμματος αλουμινίου $35\text{ cm} + 7.5\text{ cm} + 7.5\text{ cm} = 50\text{ cm}$, ενώ το πάχος του καλύμματος είναι 0.5 cm . Η εσωτερική ακτίνα του δακτυλίου του μαγνητικού υλικού είναι 4.5 cm και η εξωτερική 20.5 cm και έχει πάχος 0.3 cm . Η εσωτερική ακτίνα του πηνίου είναι 7 cm και η εξωτερική 18 cm . Το πηνίο έχει πάχος 1.1 cm . Το διάκενο έχει οριστεί ως 20 cm . Η ευρύτερη περιοχή όπου θα γίνει η επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών εξισώσεων και θα προκύψουν τα αποτελέσματα, θα ονομαστεί Region και είναι μια περιοχή $400\text{ cm} * 400\text{ cm} * 400\text{ cm}$ με κέντρο την αρχή των αξόνων.

Για την διευκόλυνση των υπολογισμών, το πρόβλημα μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα 2 διαστάσεων, αξιοποιώντας την κυλινδρική συμμετρία. Αυτό μπορεί να γίνει επιλέγοντας όλη την διάταξη και μετά πατώντας **Maxwell 3D, Create 2D Design** και επιλέγοντας τις επιλογές: **Coordinate System: Global, Section Plane: YZ, 2D Geometry Mode: About Z**, ως ακολούθως:



Σχήμα 2.2: Επιλογές για την μετατροπή του μοντέλου από τρισδιάστατο σε δισδιάστατο.

Επομένως προκύπτει,



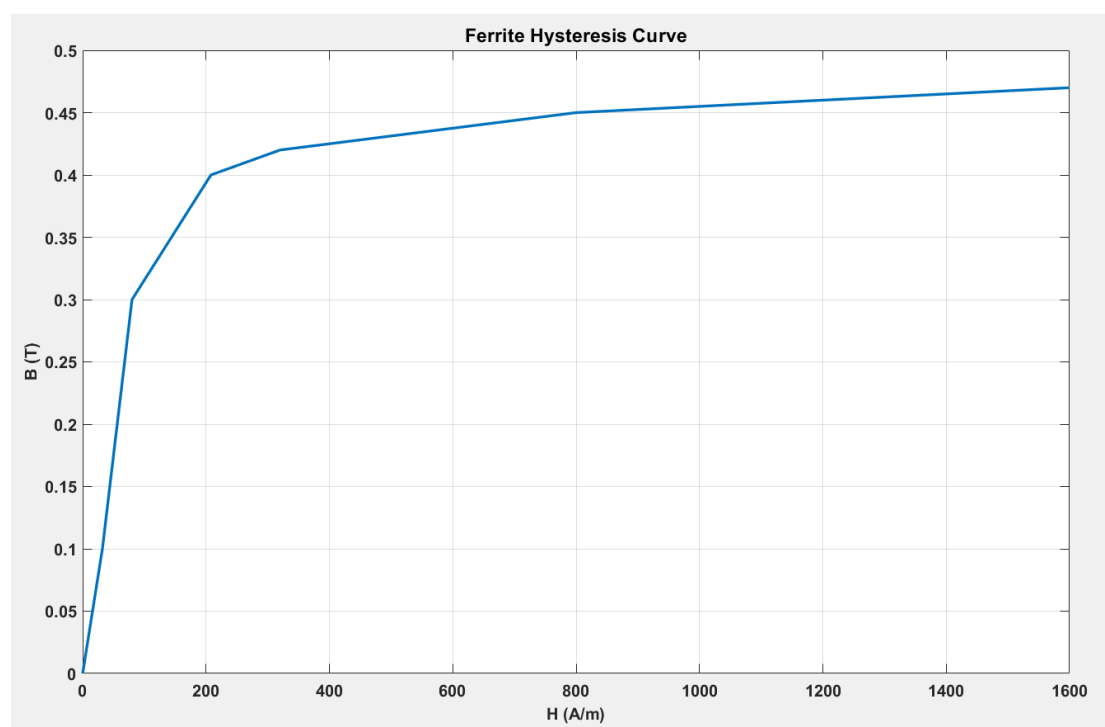
Σχήμα 2.3: Δισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στο Ansys.

2.3 Ορισμός Υλικών και Οριακών Συνθηκών

Όσον αφορά τον μαγνητικό πυρήνα, θα γίνουν πέντε διαφορετικές δοκιμές. Σε αρχική προσομοίωση θα θεωρηθεί ότι το μαγνητικό υλικό (αλλά και η θωράκιση από αλουμίνιο) δεν υπάρχει. Έπειτα θα χρησιμοποιηθεί φερρίτης με μη γραμμικό βρόχο υστέρησης τον οποίον θα τον εισάγουμε εμείς. Επίσης, για την μέτρηση των απωλειών που θα υλοποιηθεί αργότερα, θα εισαχθεί και καμπύλη απωλειών πυρήνα συναρτήσεως του πεδίου B (B - P Curve). Συγκεκριμένα το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ο φερρίτης TDK PC40 (υπόθεση λειτουργίας στους 60°C) [29], [30]. Επίσης θα γίνει χρήση μαγνητικού υλικού από νανοσωματίδια τύπου Finamet [31] με βρόχο υστέρησης που θα εισάγουμε. Θα γίνει επιπλέον προσομοίωση με μαγνητικό υλικό από νανοσωματίδια τύπου Finamet FT3M της Hitachi Metals, το οποίο προϋπάρχει

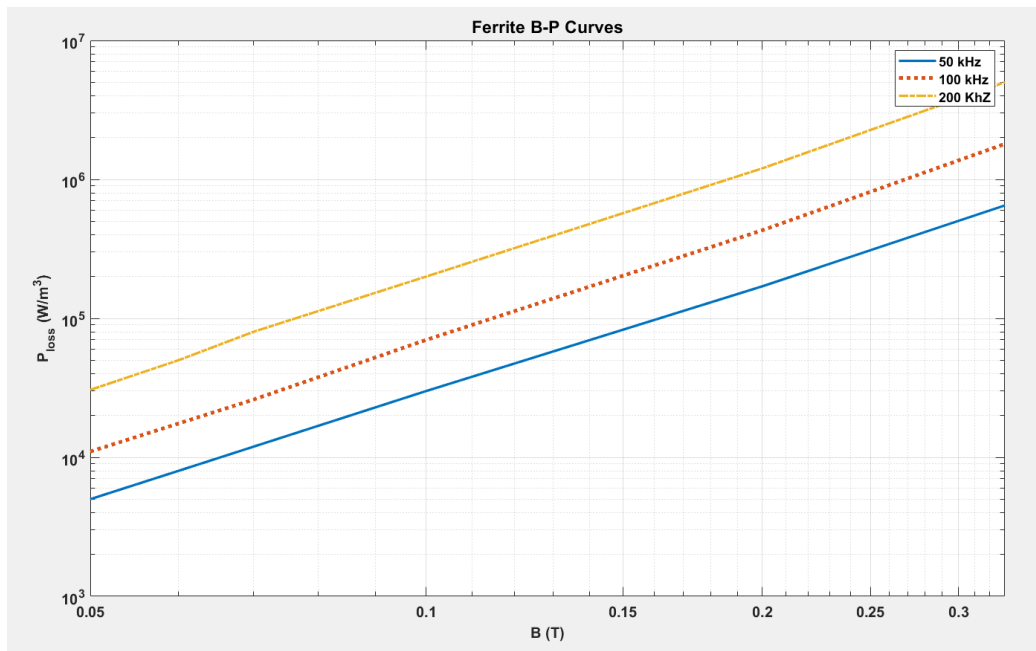
στην βιβλιοθήκη του Ansys Maxwell αλλά και έχουμε την καμπύλη απωλειών πυρήνα συναρτήσει της πυκνότητας μαγνητικής ροής από το [32], που θα την εισάγουμε αργότερα. Θα χρησιμοποιηθεί μαγνητικό υλικό από νανοσωματίδια σιδήρου, του οποίου τον βρόχο υστέρησης θα εισάγουμε πάλι εμείς, αλλά και μαγνητικό υλικό Vitroperm 500 F [33] του οποίου θα βρεθούν οι καμπύλες βρόχου υστέρησης και απωλειών πυρήνα.

Το υλικό TDK PC40 [29] είναι ένας φερρίτης που αποτελείται από Μαγνήσιο και Ψευδάργυρο. Έχει αγωγιμότητα $0.1538 S/m$, θερμοκρασία Curie κοντά στα $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, και παρουσιάζει πυκνότητα $4800\text{ }kg/m^3$. Ο φερρίτης TDK PC40 έχει τον βρόχο υστέρησης [29]:



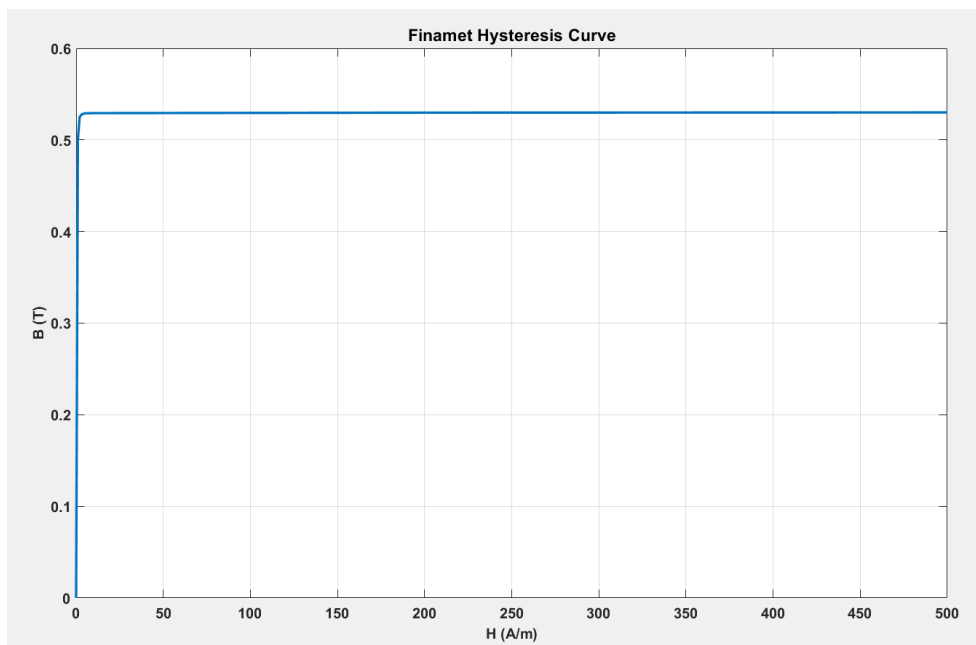
Σχήμα 2.4: Ο βρόχος υστέρησης του φερρίτη TDK PC40.

Ο φερρίτης αυτός είναι σχεδιασμένος για να έχει σχετικά μικρές απώλειες πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα, βάσει του [30] οι απώλειες σε συχνότητες διέγερσης $50\text{ }kHz$, $100\text{ }kHz$, $200\text{ }kHz$ περιγράφονται από τις γραφικές παραστάσεις:



Σχήμα 2.5: B-P καμπύλες για τον φερρίτη TDK PC40 σε διάφορες συχνότητες.

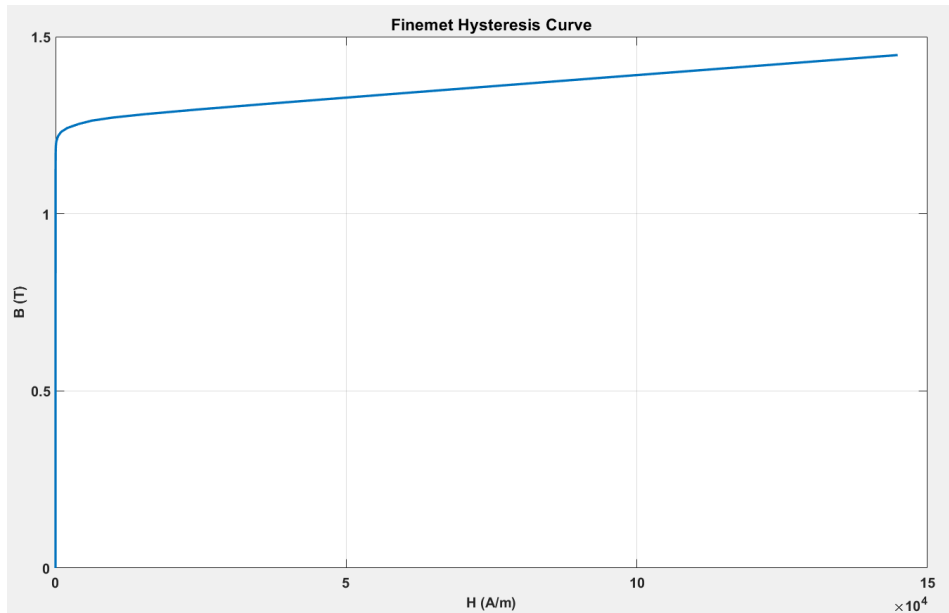
Το υλικό Finamet [31] είναι ένα νανοκρυσταλλικό υλικό που τρίβεται σε μικρά ribbons μεγέθους 20 με 25 nm. Το υλικό αυτό μπορεί να τοποθετηθεί σε μήτρα ρητίνης. Έχει υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα της τάξης του 10⁵ και ηλεκτρική αγωγιμότητα 10 S/m. Το υλικό αυτό έχει μελετηθεί στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητηρίων του Ε.Μ.Π. όπου προέκυψε η γραφική παράσταση του βρόχου υστέρησης του υλικού:



Σχήμα 2.6: Ο βρόχος υστέρησης του μαγνητικού υλικού Finamet.

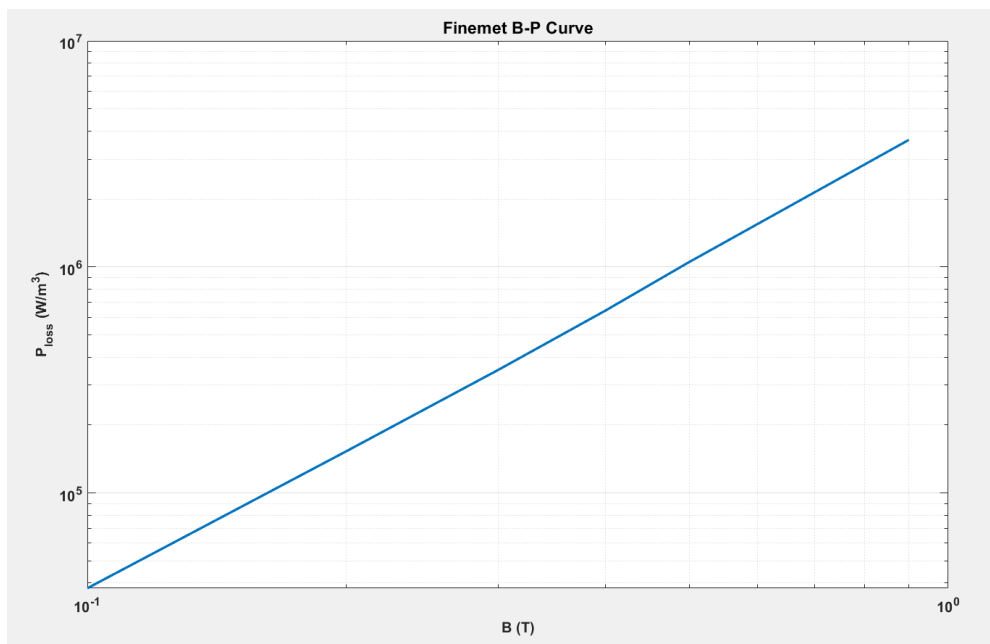
Το Finemet [34] είναι και αυτό ένα νανοκρυσταλλικό υλικό που αποτελείται από Σίδηρο, Πυρίτιο, Βόριο και μικρά ποσοστά Χαλκού και Νιόβιο. Τοποθετείται σε μήτρα

ρητίνης αφού τριφθεί σε μέγεθος κόκκου περίπου 10 nm. Έχει υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα που αγγίζει τα 10^5 στα 100 kHz και ηλεκτρική αγωγιμότητα 833.333 S/m. Επιπλέον έχει υψηλή θερμοκρασία Curie (570 °C) κάτι που σημαίνει ότι για ορισμένη μεταβολή της θερμοκρασίας προκύπτει πολύ μικρή μεταβολή της διαπερατότητας. Παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του βρόχου υστέρησης του υλικού:



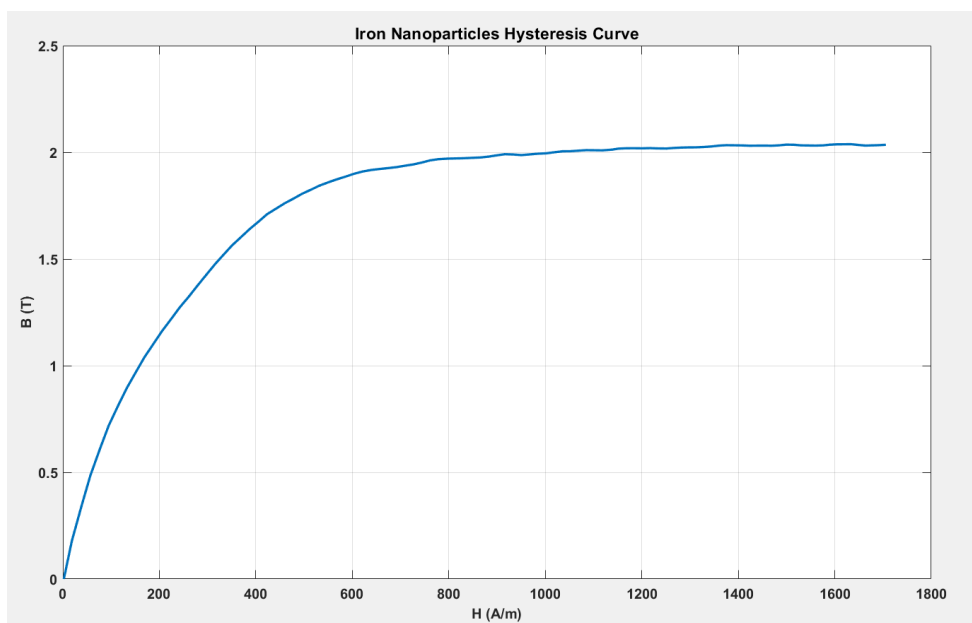
Σχήμα 2.7: Ο βρόχος υστέρησης του μαγνητικού υλικού Finemet.

Έχει χαμηλές απώλειες πυρήνα, η γραφική των οποίων παρουσιάζονται κατωτέρω για τα 100 kHz [32]:



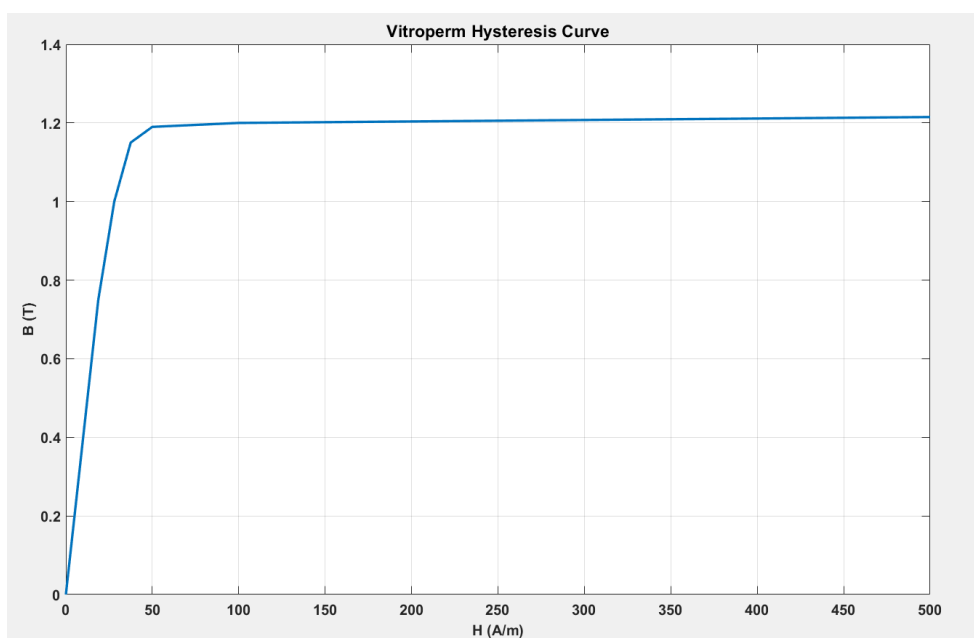
Σχήμα 2.8: B-P καμπύλη για το Finemet.

Το υλικό από νανοσωματίδια σιδήρου έχει μελετηθεί στο εργαστήριο ηλεκτρονικών αισθητηρίων του Ε.Μ.Π., έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα $10 S/m$, πυκνότητα $5240 kg/m^3$ και ο βρόχος υστέρησης του δίνεται από την γραφική παράσταση:



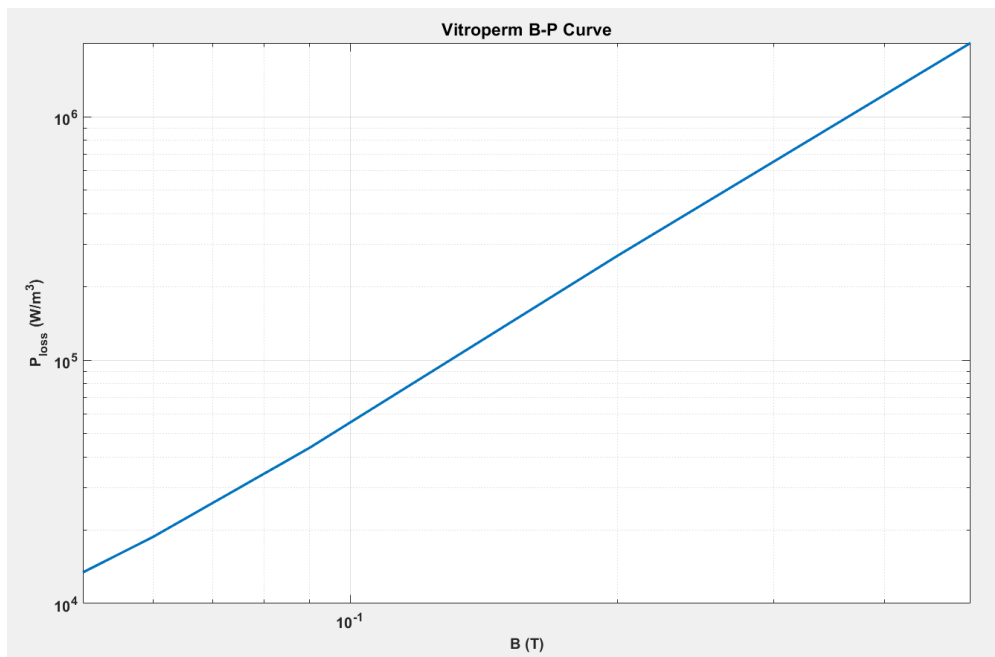
Σχήμα 2.9: Ο βρόχος υστέρησης του μαγνητικού υλικού νανοσωματιδίων σιδήρου.

Το μαγνητικό υλικό Vitroperm είναι ένα νανοκρυσταλλικό που αποτελείται κυρίως από νανοσωματίδια Σιδήρου, Πυριτίου, Βορίου και Νιόβιου. Έχει πυκνότητα $6709 kg/m^3$, ηλεκτρική αντίσταση $278 \mu\Omega/cm$ [35] και βρόχο υστέρησης [33]:



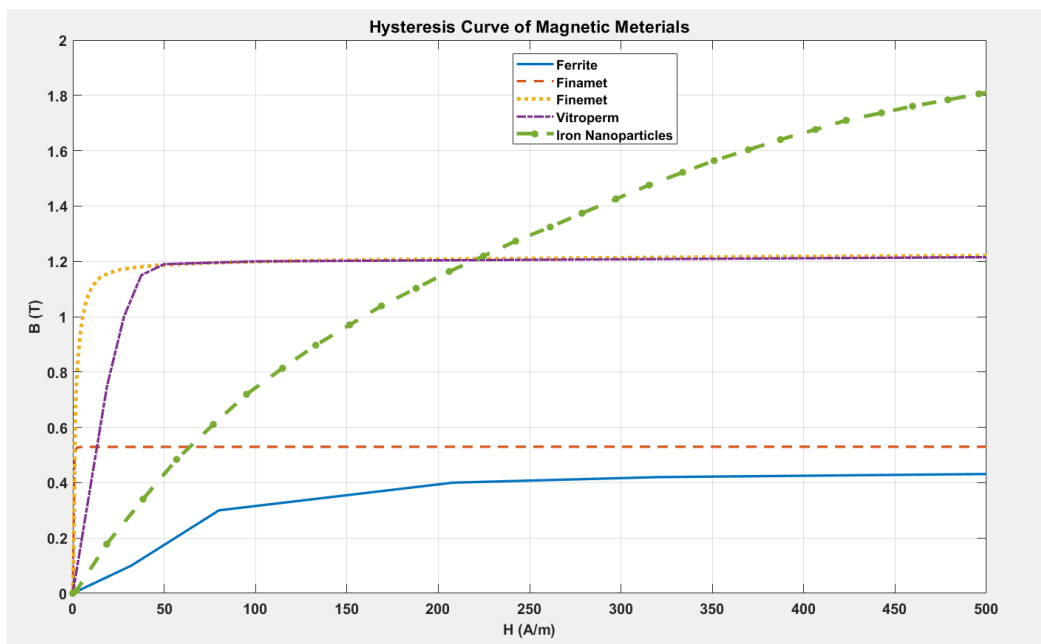
Σχήμα 2.10: Ο βρόχος υστέρησης του μαγνητικού υλικού Vitroperm.

Επίσης έχει καμπύλη απωλειών στα 100 kHz [36]:



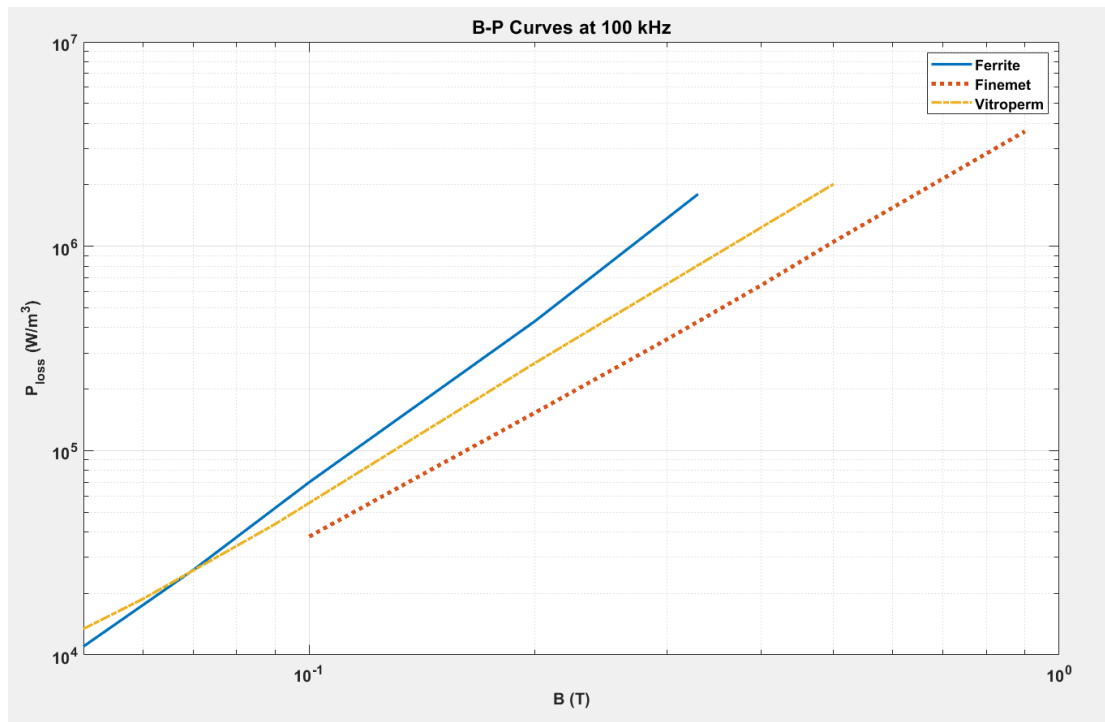
Σχήμα 2.11: B-P καμπύλη για το Vitrperme.

Παρουσιάζονται, τώρα, όλοι οι βρόχοι υστέρησης των υλικών μαζί:



Σχήμα 2.12: Οι βρόχοι υστέρησης των τεσσάρων μαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται.

Παρουσιάζουμε και τις γραφικές παραστάσεις των απωλειών πυρήνα σε συνάρτηση με την πυκνότητα μαγνητικής ροής στα 100 kHz:

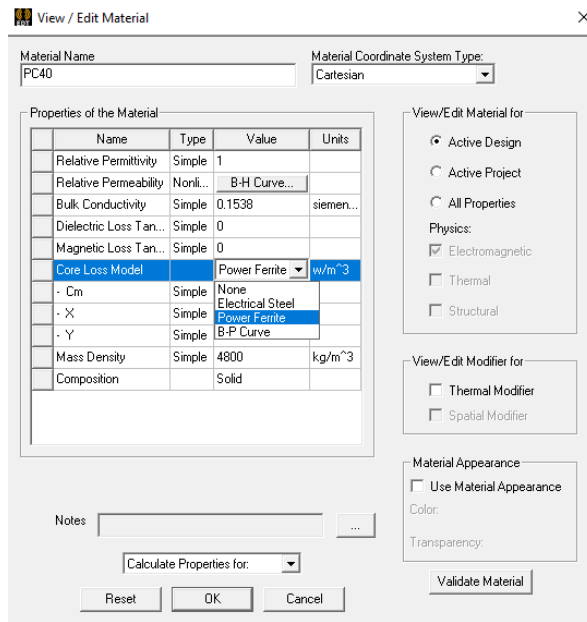


Σχήμα 2.13: Οι B-P καμπύλες του φερρίτη, του Finemet και των νανοσωματιδίων σιδήρου στα 100 kHz.

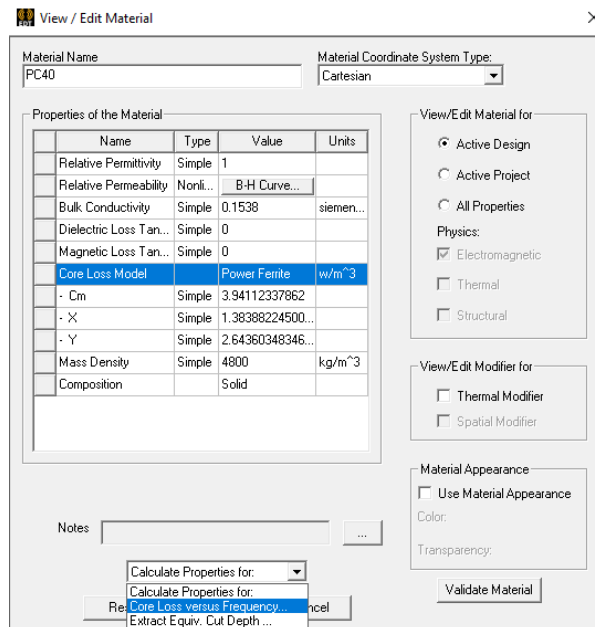
Βλέπουμε με μια πρώτη ματιά πως ο φερρίτης έχει ανά μονάδα όγκου μεγαλύτερες απώλειες πυρήνα από το υλικά Vitroperm και Finemet.

Τα υλικά που δεν υπάρχουν στο Ansys, μπορούν να οριστούν από τα **Tools, Edit Libraries, Materials** και να επιλεγεί το **Add Material**. Σε αυτό το σημείο μπορεί να ονομαστεί το υλικό και να τοποθετηθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του. Για την τοποθέτηση ενός νέου βρόχου υστέρησης επιλέγεται στο **Type** του **Relative Permeability** την επιλογή **Nonlinear**. Στο **Value** στο πεδίο **B-H Curve** εισάγεται ο επιθυμητός βρόχος υστέρησης μέσω **Import Datasheet**.

Η μεθοδολογία τοποθέτησης των καμπυλών απωλειών διαφέρει ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται. Έτσι, για τον φερρίτη, στο παράθυρο επεξεργασίας των ιδιοτήτων των υλικών, στην ιδιότητα **Core Loss Model**, επιλέγεται το **Power Ferrite** και στην επιλογή **Calculate Properties for**, επιλέγεται **Core Loss versus Frequency**. Η επιλογή **Composition** παραμένει **Solid** καθώς δεν επιθυμούμε κάποιο είδος λαμαρίνας.

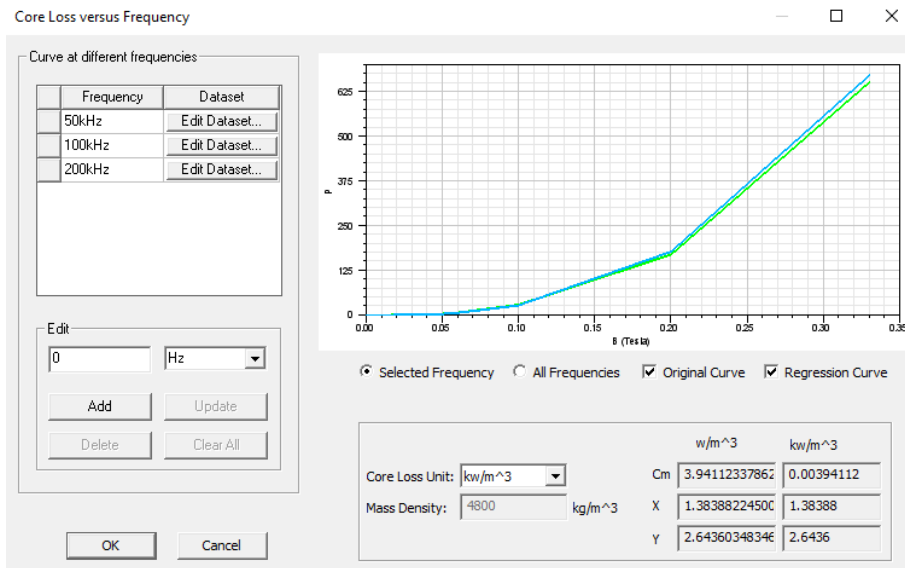


Σχήμα 2.14: Επιλογή Power Ferrite για την μοντελοποίηση των απωλειών στον φερρίτη.



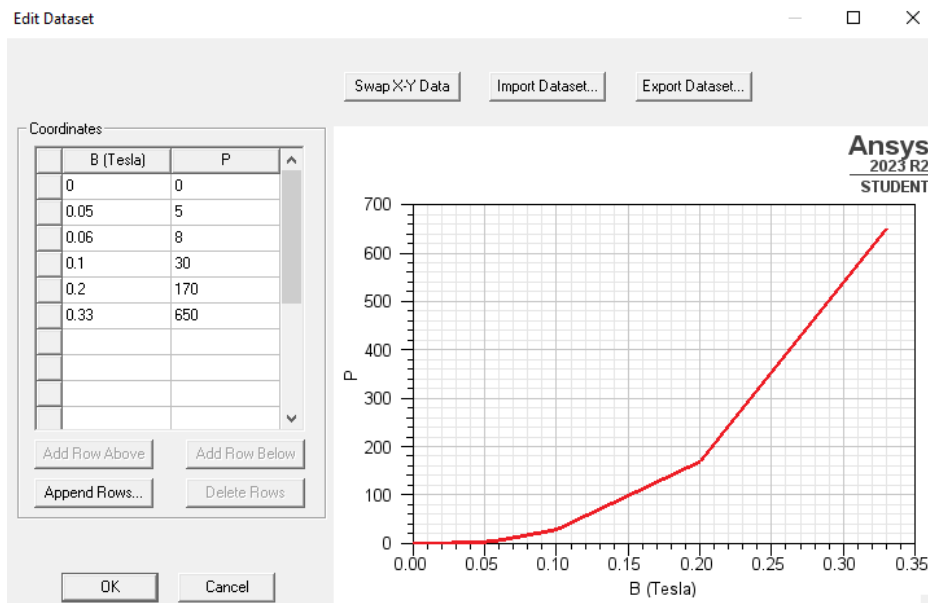
Σχήμα 2.15: Επιλογή Core Loss versus Frequency στο πλαίσιο Calculate Properties for.

Εδώ θα ανοίξει ένα παράθυρο στο οποίο θα εισαχθούν τα B-P Curves των 50 kHz, 100 kHz και 200 kHz που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Οπότε το **Core Loss Unit** τίθεται σε kw/m^3 και γίνεται **Add** της τιμής της συχνότητας για την οποία θέλουμε να τοποθετήσουμε την γραφική παράσταση απωλειών όπου και κάνουμε **Edit Dataset**.



Σχήμα 2.16: Τοποθέτηση B-P γραφικών παραστάσεων στο παράθυρο Core Loss versus Frequency

Αναδύεται ένα παράθυρο στο οποίο μπορεί να γίνει **Import Dataset**. Έτσι, λόγω χάριν για τα 50 kHz προκύπτει:

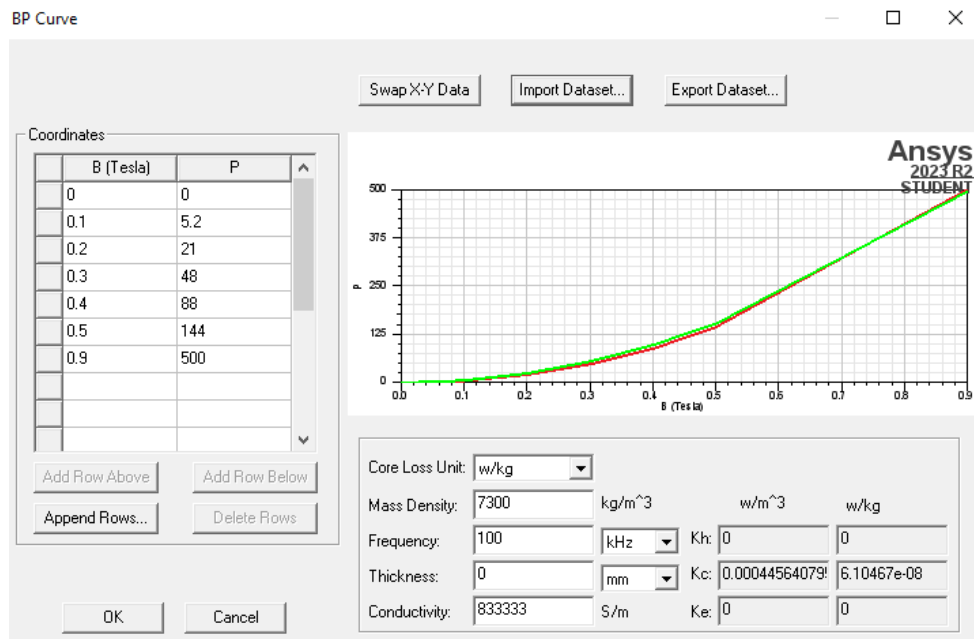


Σχήμα 2.17: Τοποθέτηση της γραφικής παράστασης απωλειών στο παράθυρο Edit Dataset.

Επαναλαμβάνεται η διαδικασία για τις υπόλοιπες 2 συχνότητες.

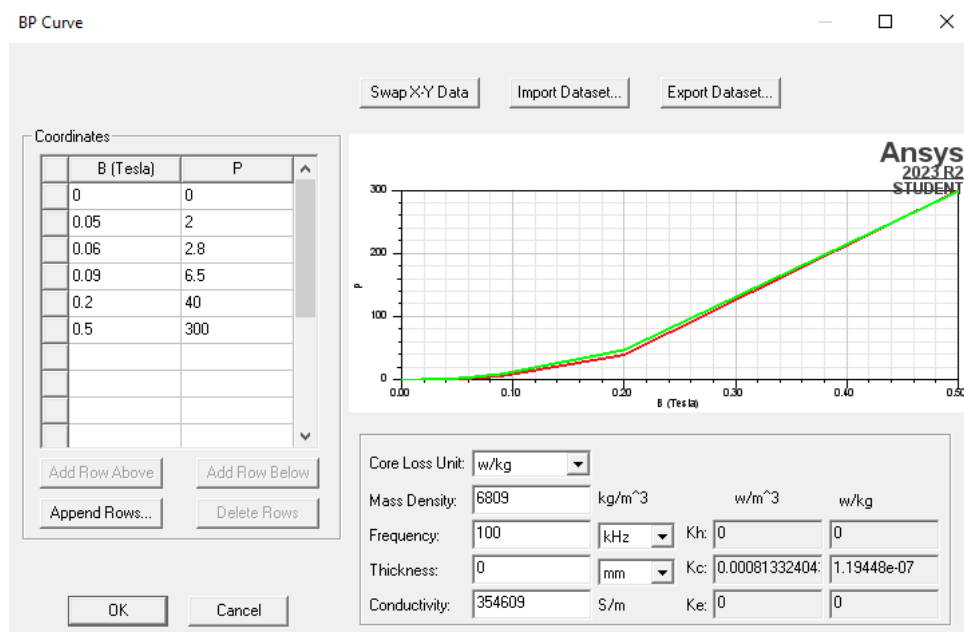
Όσον αφορά το Finemet, στην ιδιότητα **Core Loss Model**, βλέπουμε ότι είναι ήδη επιλεγμένο το **Electrical Steel**. Για την εισαγωγή της καμπύλης απωλειών, στο κάτω μέρος του παραθύρου επεξεργασίας ιδιοτήτων υλικού υπάρχει η επιλογή **Calculate Properties for**. Εκεί επιλέγεται το **Core Loss at One Frequency**. Η επιλογή **Composition** παραμένει και εδώ **Solid** καθώς δεν θα υπάρχει λαμαρίνα. Στο αναδυόμενο παράθυρο μπορεί να γίνει εισαγωγή γραφικής παράστασης. Επίσης, μπορούν να επεξεργαστούν τα δεδομένα για τις μονάδες των εισαγόμενων μεγεθών αλλά και της

συχνότητας, του πάχους λαμαρίνας και της αγωγιμότητας. Συνολικά, έγιναν οι ακόλουθες επιλογές:



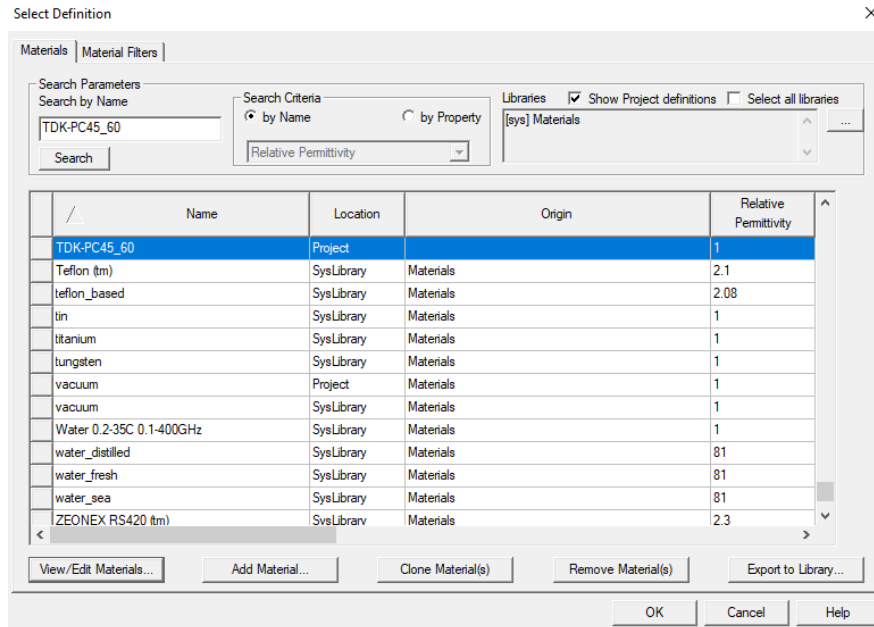
Σχήμα 2.18: Επεξεργασία B-P καμπύλης και λοιπών δεδομένων για το Finemet.

Για το υλικό Vitroperm, όντας και αυτό ναοκρυσταλλικό υλικό, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι παρόμοια με την διαδικασία της επεξεργασίας του υλικού Finemet. Δηλαδή οι απώλειες του μοντελοποιήθηκαν ως **Electric Steel** και χρησιμοποιήθηκε γραφική παράσταση απωλειών για τα 100 kHz με πάχος λαμαρίνας 0 mm και αγωγιμότητα 10 S/m.



Σχήμα 2.19: Επεξεργασία B-P καμπύλης και λοιπών δεδομένων για το Vitroperm.

Έχοντας ακολουθήσει όλες τις ενέργειες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, για την τρέχουσα προσομοίωση, θα επιλεγεί το υλικό TDK PC40. Αυτό μπορεί να γίνει με την επιλογή των δύο πυρήνων στην διάταξη, δεξιά κλικ και **Assign Material**. Επιλέγουμε το υλικό που επιθυμούμε και επιβεβαιώνουμε την επιλογή.



Σχήμα 2.20: Επιλογή του φερριτή TDK-PC40.

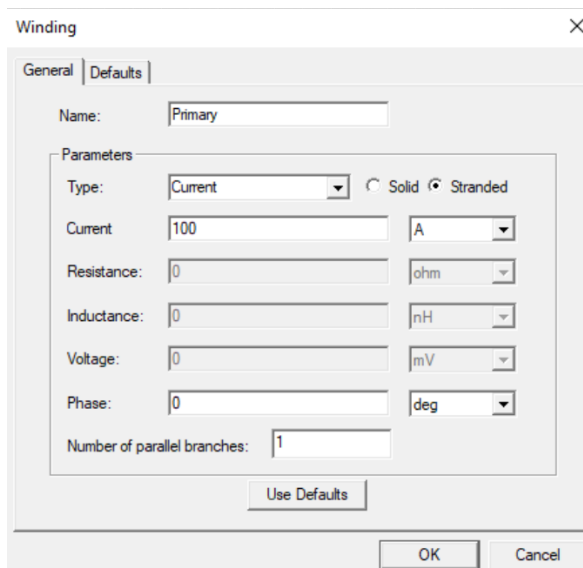
Για το υλικό του πηνίου θα χρησιμοποιηθεί το υλικό **copper**, χαλκός ειδικής αγωγιμότητας 58 Ms/m , ενώ το υλικό της ηλεκτρομαγνητικής προστασίας θα είναι από το προϋπάρχον υλικό **aluminum** του προγράμματος προσομοίωσης. Αναφέρεται τέλος, πως η περιοχή που περιλαμβάνει την διάταξη και περικλείεται από τις ακμές που εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες θα είναι από κενό (υλικό **vacuum**). Ένας από τους τρόπους που μπορούν να τοποθετηθούν τα υλικά είναι επιλέγοντας την διάταξη που μας ενδιαφέρει και πατώντας **Edit** και μετά **Properties**, να επιλέξουμε το επιθυμητό υλικό.

Οι οριακές συνθήκες στις ακμές αυτές θα είναι τύπου **balloon**. Οι οριακές συνθήκες στο **Region** μπορούν να τοποθετηθούν με την επιλογή του **Region**, επιλέγοντας **Edges** στο **Selection Mode** και έπειτα με επιλογή όλων των ακμών, κάνουμε **Assign Boundary** και ύστερα **Balloon**. Ονομάζουμε την οριακή συνθήκη και επαληθεύουμε την επιλογή μας.

2.4 Ορισμός Διεγέρσεων

Για να οριστούν τα ρεύματα διέγερσης θα επιλεγεί αρχικά το πρωτεύον πηνίο και έπειτα στην επιλογή **Assign Excitation, Add Winding** γίνεται να ονομαστεί το winding

ως **Primary** και να τεθεί το **Type** σε **Current**, με επιλεγμένη τη κουκίδα **Stranded**. Για ρεύμα θα χρησιμοποιηθεί 100 A με μηδενική φάση. Δηλαδή:

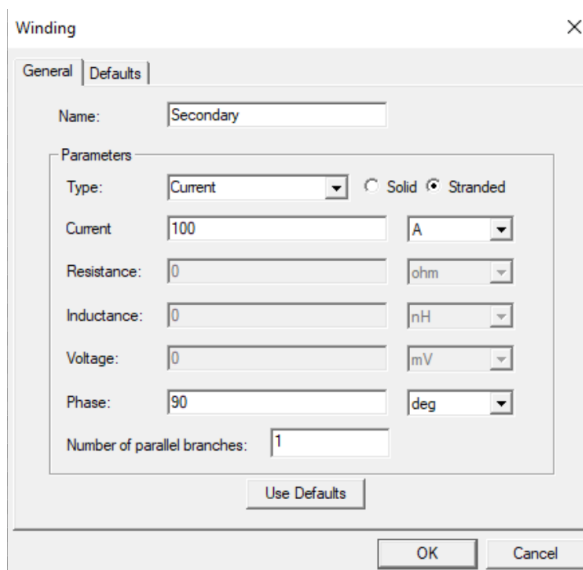


The image shows a 'Winding' dialog box with the following settings:

- Name: Primary
- Type: Current (dropdown)
- Stranded (radio button selected)
- Current: 100 (text box), A (dropdown)
- Resistance: 0 (text box), ohm (dropdown)
- Inductance: 0 (text box), nH (dropdown)
- Voltage: 0 (text box), mV (dropdown)
- Phase: 0 (text box), deg (dropdown)
- Number of parallel branches: 1 (text box)

Σχήμα 2.21: Ορισμός των ρευμάτων διέγερσης του πρωτεύοντος πηνίου.

Στο δευτερεύον πηνίο θα γίνει η ίδια διαδικασία μόνο που θα δοθεί το όνομα **Secondary** και θα εισαχθεί φάση 90 μοιρών, όπως φαίνεται κατωτέρω:

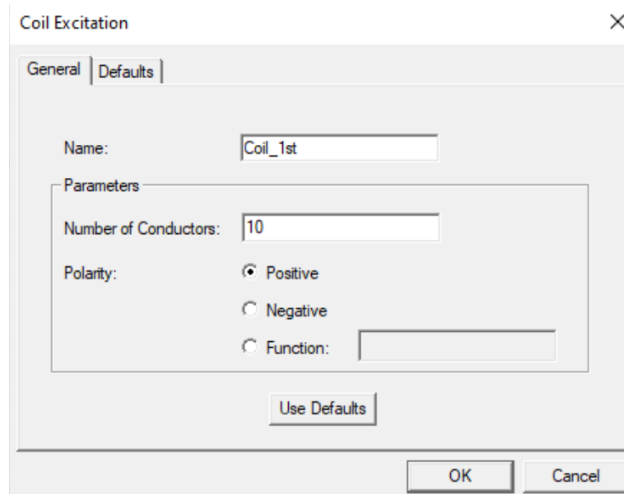


The image shows a 'Winding' dialog box with the following settings:

- Name: Secondary
- Type: Current (dropdown)
- Stranded (radio button selected)
- Current: 100 (text box), A (dropdown)
- Resistance: 0 (text box), ohm (dropdown)
- Inductance: 0 (text box), nH (dropdown)
- Voltage: 0 (text box), mV (dropdown)
- Phase: 90 (text box), deg (dropdown)
- Number of parallel branches: 1 (text box)

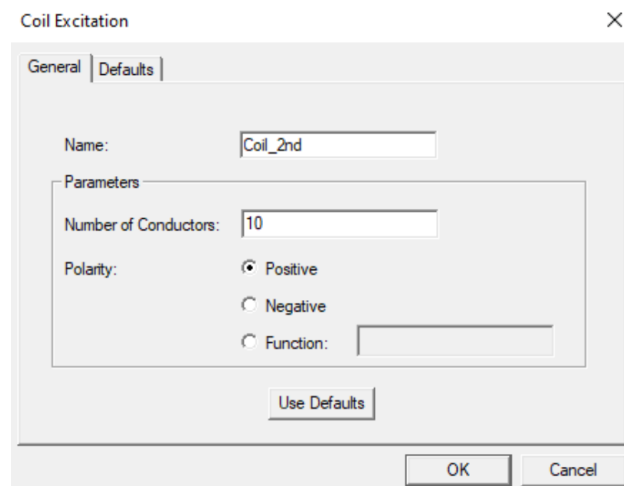
Σχήμα 2.22: Ορισμός των ρευμάτων διέγερσης του δευτερεύοντος πηνίου.

Έπειτα επιλέγεται στο **Project Manager, Excitations, Primary** και **Assign Coil**, όπου θα εισαχθεί ο αριθμός των αγωγών, οι οποίοι για τώρα θα είναι 10. Επιλέγεται τέλος η κουκίδα **Positive**. Γίνεται επίσης να αποδοθεί ένα όνομα. Επιλέξαμε το **Coil_1st** :



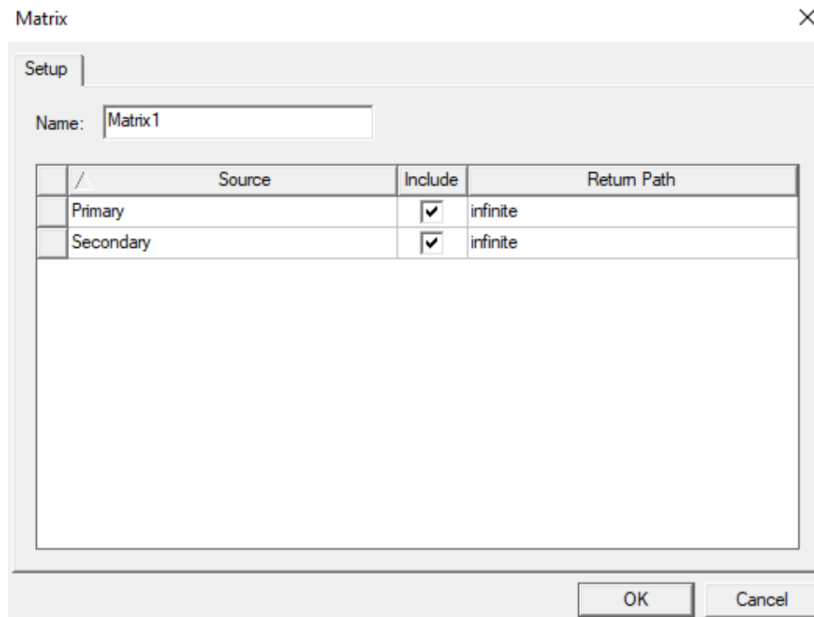
Σχήμα 2.23: Ορισμός αριθμού τυλιγμάτων πρωτεύοντος πηνίου.

Για το δεύτερο πηνίο, θα γίνει η ίδια διαδικασία, όπου προκύπτει:



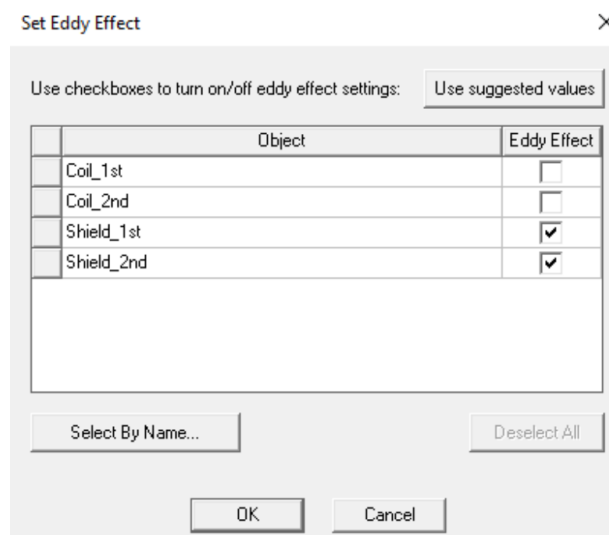
Σχήμα 2.24: Ορισμός αριθμού τυλιγμάτων δευτερεύοντος πηνίου.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει ανάθεση παραμέτρου σε μορφή πίνακα με όνομα **Matrix1**. Ο **Matrix1** είναι ένας πίνακας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό διάφορων τιμών (αυτεπαγωγή, συντελεστής σύζευξης) που προκύπτουν μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Οπότε στο **Project Manager** επιλέγεται το **Assign, Matrix** και ύστερα επιλέγονται τα **Primary** και **Secondary**.



Σχήμα 2.25: Επιλογή των Primary και Secondary στοιχείων στον ορισμό του πίνακα Matrix1.

Τα επιδερμικά ρεύματα στα πηνία θα τεθούν εκτός των υπολογισμών καθώς για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται, τα καλώδια Litz δεν εμφανίζουν επιδερμικά φαινόμενα. Αντιθέτως στην αλουμινένια πλάκα που χρησιμοποιείται για ηλεκτρομαγνητική θωράκιση η επίδραση των επιδερμικών ρευμάτων θα επιτραπεί. Αυτό θα γίνει επιλέγοντας στο **Project Manager** το **Excitations** και **Set Eddy Effects** όπου θα αναδυθεί ένα παράθυρο στο οποίο είναι δυνατόν να επιλεγούν και να αποεπιλεγούν οι διατάξεις στις οποίες θέλουμε να υπάρχουν επιφανειακά ρεύματα, όπως φαίνεται ακολούθως:



Σχήμα 2.26: Ορισμός επιφανειακών ρευμάτων στα επιθυμητά αντικείμενα.

2.5 Ορισμός Μεταβλητών Εξόδου

Για να μπορέσουμε να υπολογιστούν και να απεικονιστούν τα επιθυμητά μεγέθη με το Ansys, πρέπει να οριστούν μερικές μεταβλητές εξόδου. Έτσι στο **Project Manager** και στα **Results** επιλέγεται το **Output Variables**. Θα αναδυθεί ένα παράθυρο στο οποίο γίνεται να προστεθούν οι ποσότητες που χρειαζόμαστε. Γίνεται να περιηγηθούμε στα **Quantities** και να επιλεγεί κάποιο μέγεθος αναζητώντας το. Πιο απλά όμως, δεδομένου ότι είναι γνωστή η έκφραση των παραμέτρων που χρειάζεται, γίνεται να πληκτρολογήσουμε στην περιοχή **Expression** την μαθηματική έκφραση που θέλουμε να έχει η μεταβλητή.

Αρχικά ορίζονται $R_p = 0.0072 \Omega$, $R_s = 0.0072 \Omega$ οι αντιστάσεις του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου, που υπολογίστηκαν στην ενότητα **2.1**.

Μπορούν να ληφθούν τα παρακάτω μεγέθη από τον πίνακα παραμέτρων Matrix1 που ορίστηκε:

$$L_p = \text{Matrix1.L(Primary, Primary)},$$

$$L_s = \text{Matrix1.L(Secondary, Secondary)},$$

$$M = \text{Matrix1.L(Primary, Secondary)},$$

$$k = \text{Matrix1.CplCoef(Primary, Secondary)}.$$

Τέλος ορίζονται τα $\Omega = 2 * \pi * f$, $Q_p = \frac{\Omega * L_p}{R_p}$, $Q_s = \frac{\Omega * L_s}{R_s}$ και τα μεγέθη απ' όπου θα ληφθούν τα αποτελέσματα:

$$\eta = \frac{k^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s})^2}$$

$$P_{su} = \frac{\omega M^2 I_{p1}^2}{L_s}$$

Εν τέλη δηλαδή στο Ansys προκύπτουν τα ακόλουθα μεγέθη:

Output Variables

Validate output variables for selected context

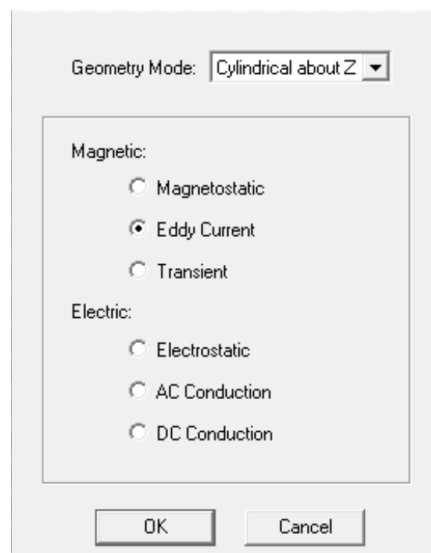
	Name	Expression
1	Eff	$((k^2) * Qp * Qs) / (1 + \sqrt{1 + (k^2) * Qp * Qs})^2$
2	Lp	Matrix 1.L(Primary,Primary)
3	Ls	Matrix 1.L(Secondary,Secondary)
4	M	Matrix 1.L(Primary,Secondary)
5	Omega	$2 * \pi * \text{Freq}$
6	P	$(\text{Omega} * (M^2) * (100)^2) / (Ls)$
7	Qp	$\text{Omega} * Lp / Rp$
8	Qs	$\text{Omega} * Ls / Rs$
9	Rp	0.00715
10	Rs	0.00715
11	k	Matrix 1.CplCoeff(Primary,Secondary)

Σχήμα 2.27: Τελικός πίνακας Μεταβλητών εξόδου.

Το μέγεθος η ονομάστηκε συμβολικά *Eff* γιατί γίνονται αποδεκτά μόνο λατινικά σύμβολα.

2.6 Ορισμός Ανάλυσης

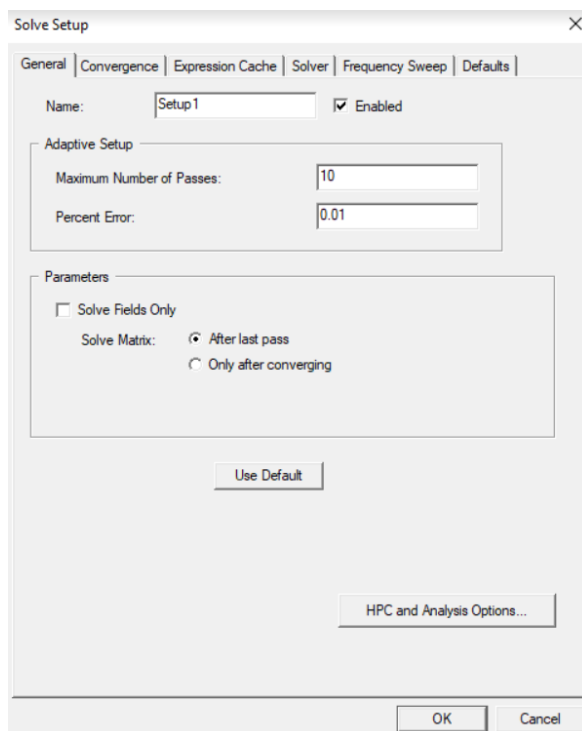
Θα θέσουμε στο **Maxwell 2D** που βρίσκεται στην άνω μπάρα στο **Solution Type**, το **Geometry Mode: Cylindrical about Z**, την επιλογή **Magnetic: Eddy Current**, ως ακολούθως:



Σχήμα 2.28: Ορισμός επιθυμητής ανάλυσης στον δισδιάστατο χώρο.

Στο **Project Manager** επιλέγεται **Analysis, Add Solution Setup** και γίνεται μεταφορά σε ένα παράθυρο, όπου στην επιλογή **General** μπορεί να ονομαστεί η ανάλυση που κάνουμε και να επιλεγεί ο αριθμός επαναλήψεων της μεθόδου και το εκατοστιαίο σφάλμα στα αποτελέσματα. Γενικά όσο περισσότερες επαναλήψεις γίνουν, τόσο

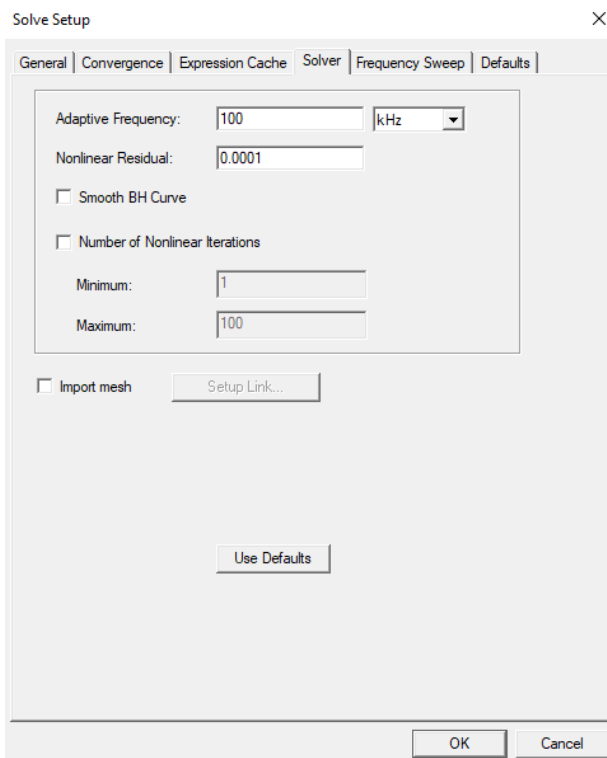
καλύτερα θα είναι τα αποτελέσματα, με κόστος ωστόσο σε χρόνο εκτέλεσης. Για το **Percent Error** χρησιμοποιήσαμε 0.01.



Σχήμα 2.29: Ορισμός παραμέτρων στη ταμπέλα *General* στο *Solve Setup*.

2.6.1 Ορισμός Ανάλυσης για Σταθερή Συχνότητα

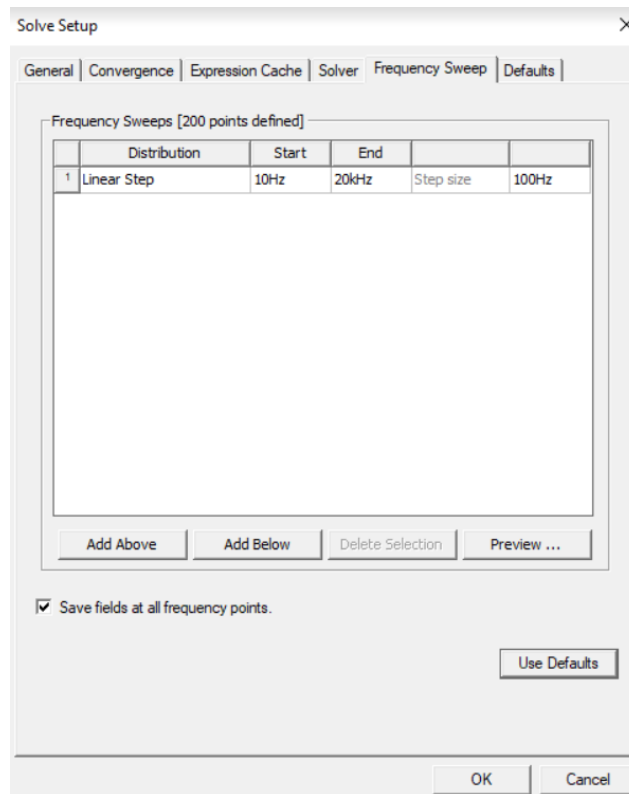
Σε αυτό το σημείο είναι δυνατόν να ορίσουμε μια ανάλυση για συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτό θα χρειαστεί να γίνει για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα στα 20 kHz. Στο **Solve Setup** και στη κατηγορία του **Solver**, επιλέγεται **Adaptive Frequency 20 kHz**. Αφήνουμε το **Nonlinear Residual** στο 0.0001.



Σχήμα 2.30: Ορισμός παραμέτρων στη ταμπέλα Solver στο Solve Setup.

2.6.2 Ορισμός Ανάλυσης για Μεταβλητή Συχνότητα

Αντιθέτως τώρα, υπάρχει η δυνατότητα να υλοποιηθεί για ένα εύρος συχνοτήτων. Επομένως θα οριστεί νέα ανάλυση και τώρα στην ταμπέλα **Frequency Sweep** του **Solve Setup** επιλέγεται το **Add Above** και με γραμμικό βήμα ανά 100 Hz, έχουμε ως εκκίνηση τα 10 Hz (κοντά στα 0 Hz δηλαδή) μέχρι τα 20 kHz. Η επιλογή **Save field at frequency points** πρέπει να είναι επιλεγμένη.



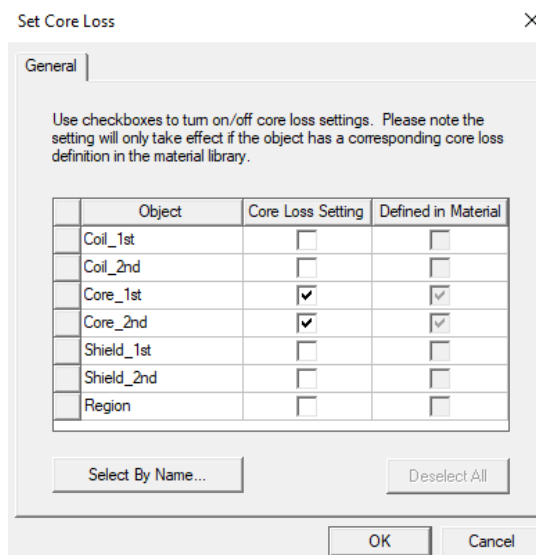
Σχήμα 2.31: Ορισμός παραμέτρων στη ταμπέλα *Frequency Sweep* στο *Solve Setup*.

2.7 Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

Για την εμφάνιση αποτελεσμάτων για μεταβλητή συχνότητα, θα γίνει μια ανασκόπηση των δεδομένων βάσει των οποίων θα γίνει αυτή η δοκιμαστική προσομοίωση. Υπενθυμίζεται λοιπόν πως τα αμπεροεπίγματα είναι 1000 (100 A σε 10 ελίγματα σε κάθε πηνίο) και υπάρχει 20 εκατοστά διάκενο. Γίνεται επίσης εφαρμογή φερρίτη στους πυρήνες και των 2 πηνίων.

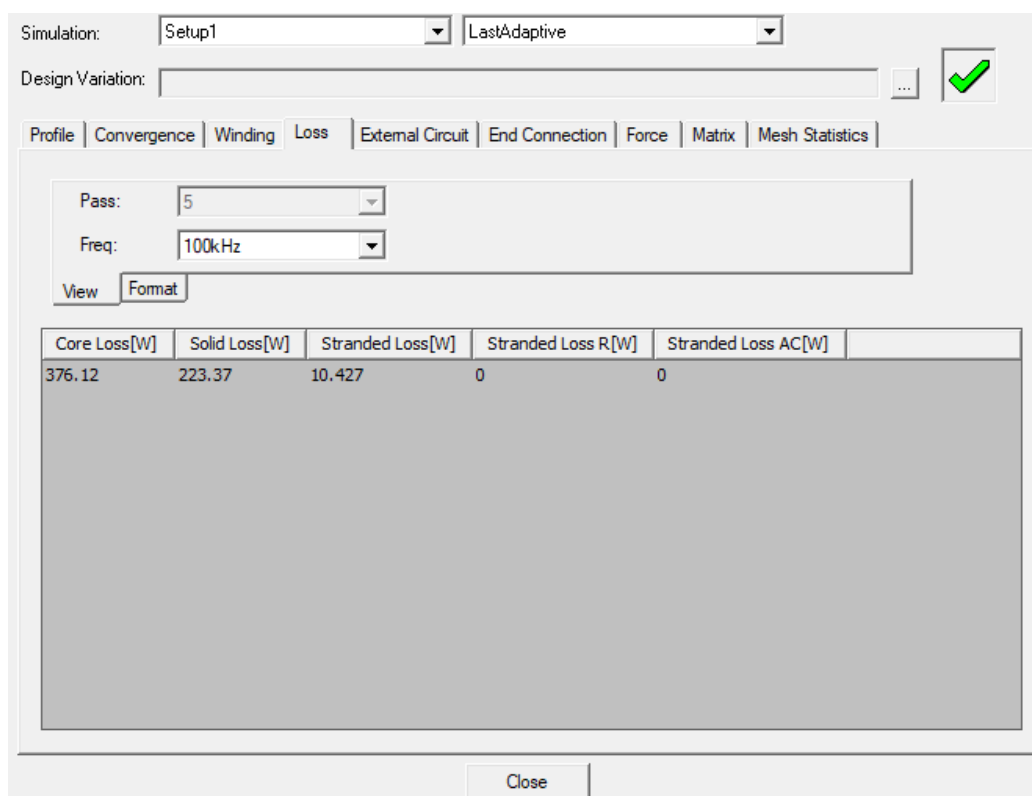
2.7.1 Εμφάνιση Αποτελεσμάτων για Σταθερή Συχνότητα

Αρχικά για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα είναι σημαντικό στο **Project Manager**, με δεξί κλικ στο **Excitations**, και στο **Set Core Loss**, να επιλεγούν και οι δύο πυρήνες **Core_1** και **Core_2**:



Σχήμα 2.32: Επιλογή των περιοχών στις οποίες θα γίνει ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα.

Από αυτό το σημείο είναι εύκολο να εμφανιστούν και τα αποτελέσματα για τις απώλειες πυρήνα. Στο **Project Manager**, στο **Setup1** κάτω από την κατηγορία **Analysis** αφού γίνει **Analyze** γίνεται στην ίδια **κατηγορία** να επιλέξουμε το **Profile** και στην κατηγορία **Loss** να ληφθούν τα αποτελέσματα. Σε αυτή τη προσομοίωση προέκυψαν:

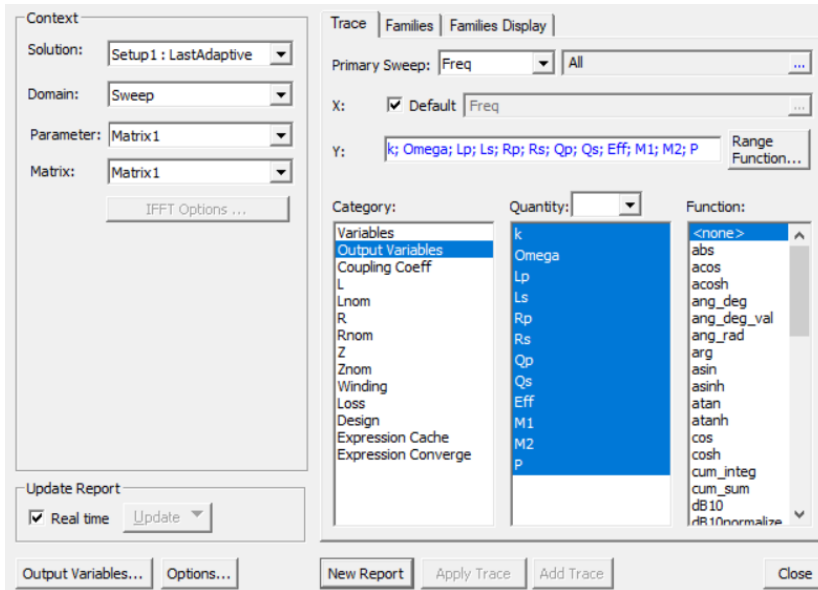


Σχήμα 2.33: Παράθυρο εμφάνισης των απωλειών πυρήνα.

Βλέπουμε ότι προέκυψαν 376.12 VA σε απώλειες πυρήνα. Αυτή η τιμή αφορά τα 100 kHz.

2.7.2 Εμφάνιση Αποτελεσμάτων για Μεταβλητή Συχνότητα

Είναι σημαντικό αρχικά να αποκτηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε έναν πίνακα που θα διευκολύνει την επεξεργασία και στη συνέχεια παρουσίαση των δεδομένων. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα μέσω του **Project Manager**, **Create EddyCurrent Report** και **Data table**. Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγεται στο **Parameter** το **Matrix1** και στο **Category** το **Output Variables**. Έτσι, τώρα γίνεται να επιλεγεί κάθε μεταβλητή εξόδου που είχε τεθεί προηγουμένως:



Σχήμα 2.34: Επιλογές για την δημιουργία πίνακα τιμών μεταβλητών εξόδου

Επαληθεύοντας την επιλογή, δημιουργείται ένας πίνακας σαν τον παρακάτω:

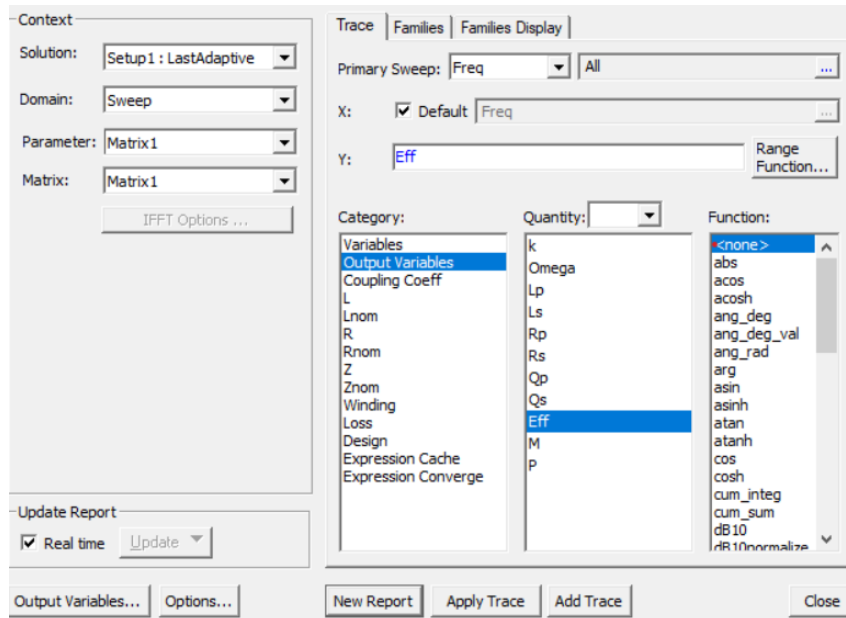
	Freq [kHz]	k Setup1 : LastAdaptive	Omega [Hz] Setup1 : LastAdaptive	Lp [μH] Setup1 : LastAdaptive	Ls [μH] Setup1 : LastAdaptive	Qp Setup1 : LastAdaptive	Qs Setup1 : LastAda...
1	0.010000	0.107947	0.062832	44.160355	44.162313	0.388067	0.388084
2	0.110000	0.082565	0.691150	41.638550	41.641240	4.024965	4.025225
3	0.210000	0.081173	1.319469	41.419427	41.421807	7.643587	7.644026
4	0.310000	0.080743	1.947787	41.343272	41.345519	11.262644	11.263256
5	0.410000	0.080517	2.576106	41.302882	41.305057	14.881203	14.881986
6	0.510000	0.080365	3.204425	41.276381	41.278511	18.498887	18.499842
7	0.610000	0.080250	3.832743	41.256532	41.258636	22.115481	22.116608
8	0.710000	0.080155	4.461062	41.240343	41.242430	25.730868	25.732171
9	0.810000	0.080072	5.089380	41.226408	41.228486	29.345015	29.346495
10	0.910000	0.079997	5.717699	41.214017	41.216090	32.957948	32.959606
11	1.010000	0.079930	6.346017	41.202784	41.204854	36.569730	36.571568
12	1.110000	0.079867	6.974336	41.192487	41.194557	40.180452	40.182472
13	1.210000	0.079810	7.602654	41.182990	41.185061	43.790214	43.792416
14	1.310000	0.079757	8.230973	41.174198	41.176271	47.399119	47.401506
15	1.410000	0.079707	8.859291	41.166043	41.168118	51.007268	51.009840
16	1.510000	0.079661	9.487610	41.158467	41.160546	54.614752	54.617511
17	1.610000	0.079619	10.115928	41.151422	41.153505	58.221656	58.224603
18	1.710000	0.079579	10.744247	41.144864	41.146952	61.828053	61.831190

Σχήμα 2.35: Ο πίνακας που προκύπτει ύστερα από την διαδικασία εμφάνισής του.

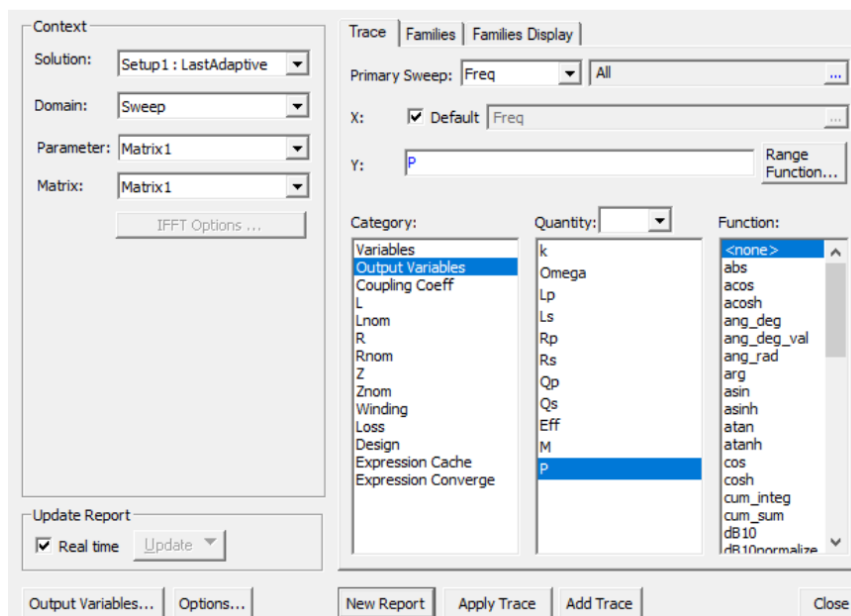
Ο πίνακας αυτός μπορεί να σωθεί πατώντας **Export** και αποθηκεύοντας τον κατάλληλα στον υπολογιστή.

Γίνεται επιπλέον να σχηματιστεί η γραφική παράσταση των ποσοτήτων *Eff* και *P* που είναι σημαντικά για μια αρχική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ακόμα και εάν

η επεξεργασία των δεδομένων θα γίνει από την πίνακα που έχει αποθηκευτεί ανωτέρω. Έτσι επιλέγεται στο **Project Manager**, το **Results**, από εκεί το **Create EddyCurrent Report** και το **Rectangular Plot**. Στο νέο παράθυρο θα τεθεί στο **Parameter** η επιλογή **Matrix1** και στο **Category** επιλέγεται το **Output Variables** και τώρα **Eff**. Σε επόμενο στάδιο με την ίδια διαδικασία μπορεί να επιλεγεί η ισχύς **P**, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

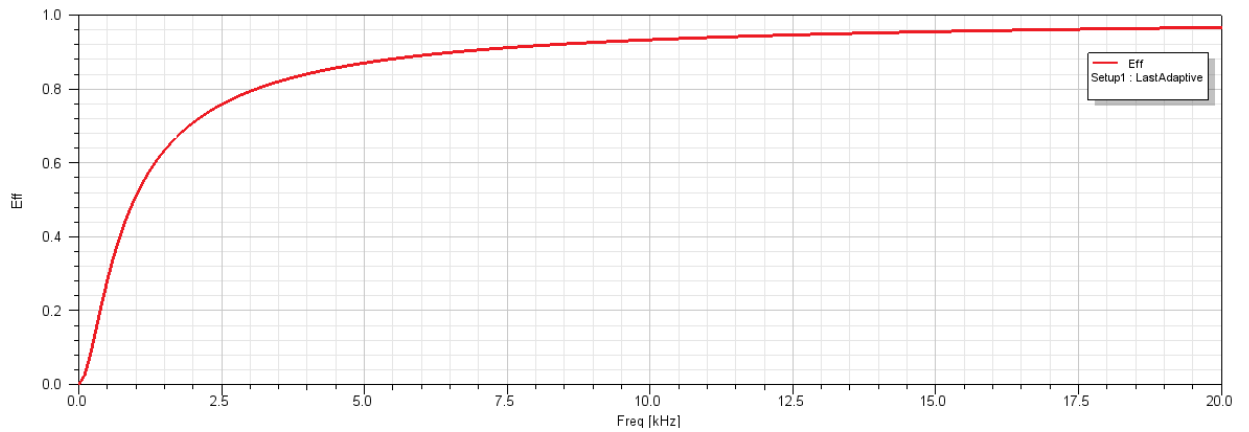


Σχήμα 2.36: Επιλογές για την δημιουργία γραφικής παράστασης της απόδοσης μεταφερόμενης ισχύος η .



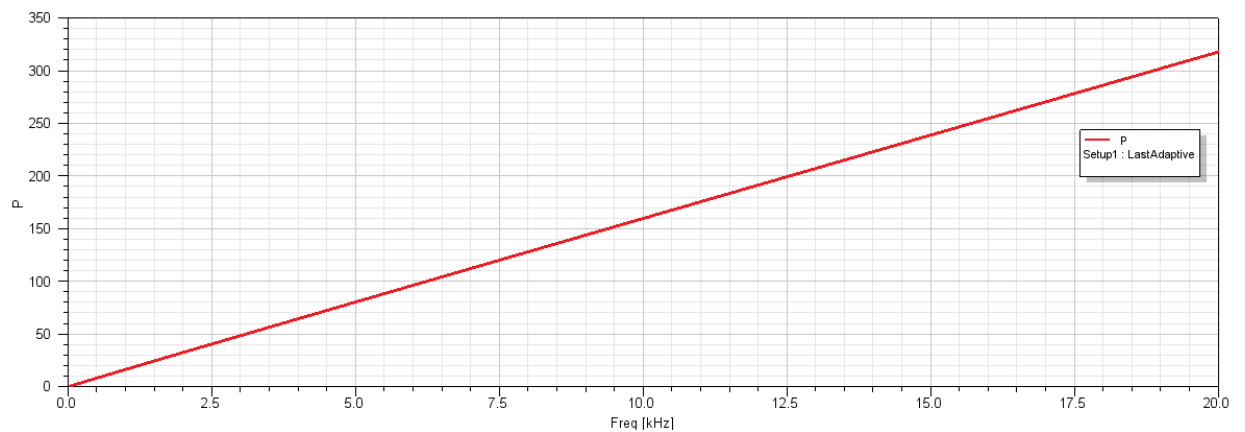
Σχήμα 2.37: Επιλογές για την δημιουργία γραφικής παράστασης της ισχύος P .

Για το **Eff** με τα τρέχοντα δεδομένα λαμβάνεται η γραφική παράσταση:



Σχήμα 2.38: Γραφική παράσταση απόδοσης μεταφερόμενης ισχύος η .

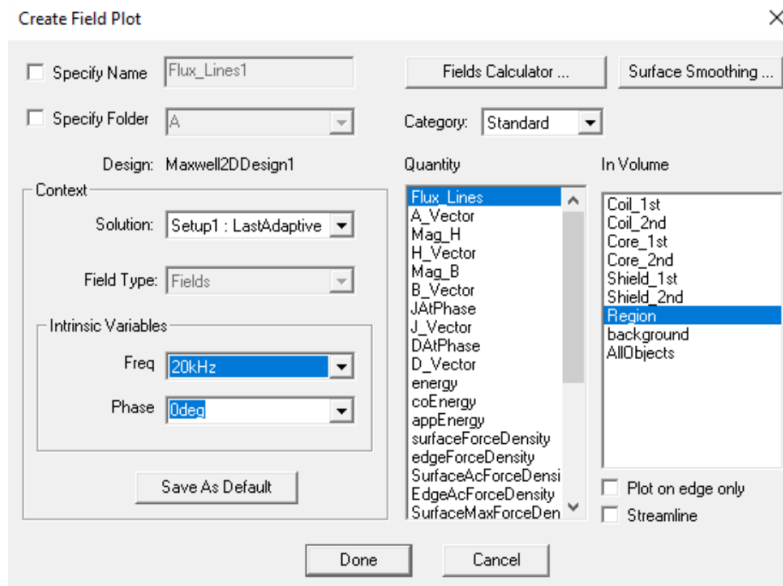
Και για την μη αντισταθμισμένη ισχύ P_{Su} λαμβάνεται η γραφική παράσταση:



Σχήμα 2.39: Γραφική παράσταση μη αντισταθμισμένης μεταφερόμενης ισχύος.

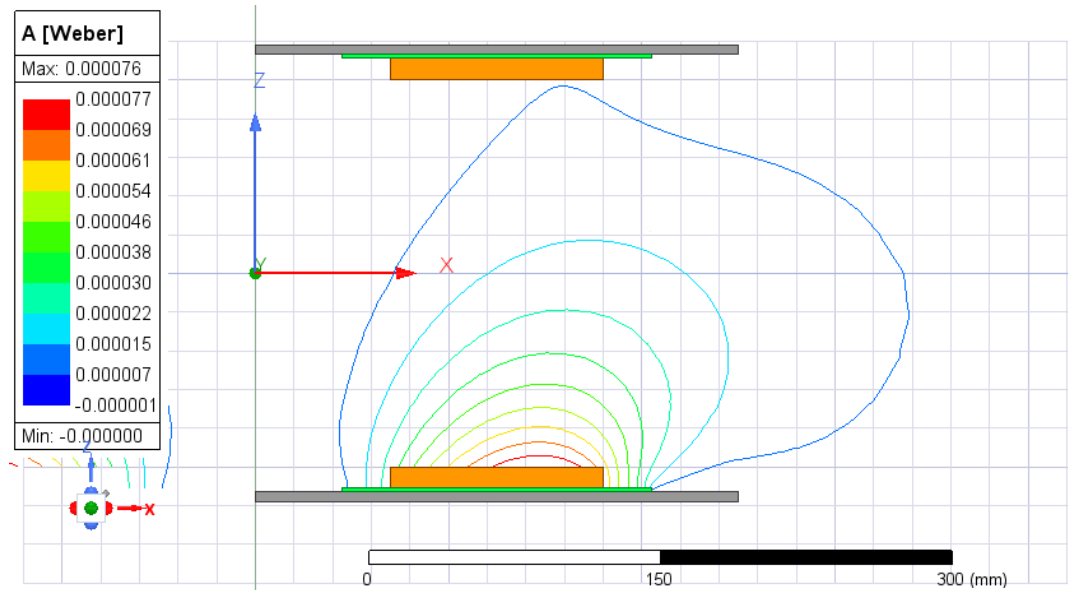
Αν είναι επιθυμητό, γίνεται και σε αυτές τις γραφικές παραστάσεις να αποθηκευτούν τα δεδομένα που απεικονίζονται, με τον ίδιο τρόπο που σώσαμε τα δεδομένα του πίνακα των μεταβλητών εξόδου.

Ακόμη μπορεί να απεικονιστούν οπτικά οι δυναμικές γραμμές του διανυσματικού δυναμικού A . Αρχικά πρέπει να επιλεγεί το κομμάτι της διάταξης στο οποίο θέλουμε να γίνει ο υπολογισμός. Επιλέγεται το ευρύτερο **Region** στο οποίο βρίσκεται η διάταξη. Έπειτα οδηγούμαστε στο **Project Manager** και από το **Field Overlays** στο **Fields** στο **A** και στο **Flux Lines**. Θα εμφανιστεί ένα παράθυρο στο οποίο γίνεται: να εισαχθεί η συχνότητα για την οποία θέλουμε να γίνει ο υπολογισμός στην επιλογή **Freq**, να επαληθευτεί η προς μέτρηση ποσότητα στην επιλογή **Quantity** και να επιλεγεί η περιοχή στην οποία θα εμφανιστούν οι μετρήσεις στην επιλογή **In Volume**. Επιλέγεται όλο το **Region** για να σχηματιστεί η κατανομή του διανυσματικού δυναμικού A στην ευρύτερη περιοχή, εντός των ορίων που έχουν τεθεί.



Σχήμα 2.40: Επιλογές για την εμφάνιση του διανυσματικού πεδίου A στο Region.

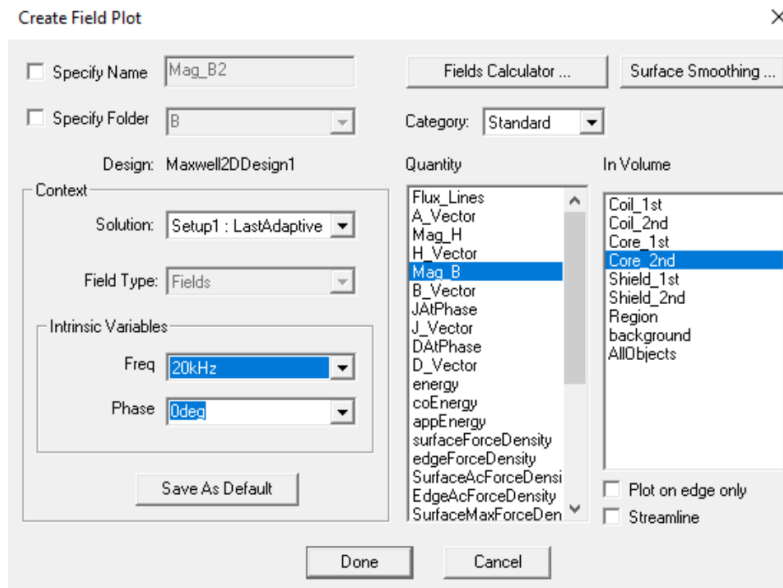
Επομένως για συχνότητα 20 kHz:



Σχήμα 2.41: Απεικόνιση δυναμικών γραμμών διανυσματικού δυναμικού A στην περιοχή Region.

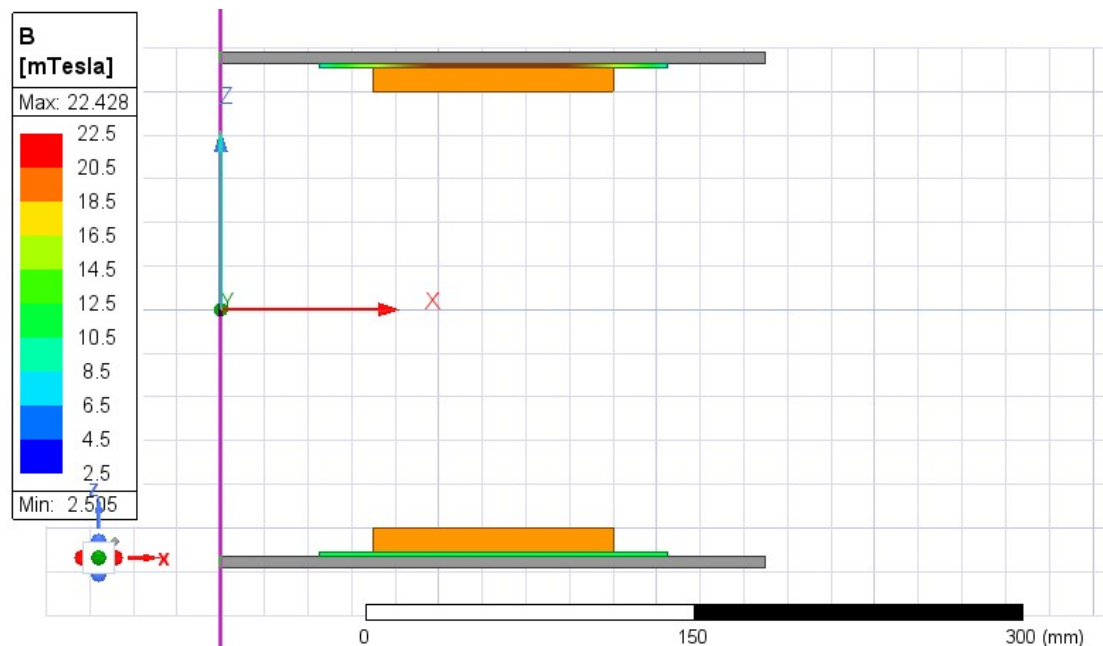
Δημιουργούνται γραμμές διανυσματικού δυναμικού και στην συμμετρική ως προς τον άξονα z επιφάνεια xz.

Γίνεται τέλος να απεικονιστεί και η πυκνότητα μαγνητικής ροής B. Στο **Project Manager**, πατάμε **Field Overlays, Fields, B** και **Mag_B**, όπου ξανά στο νέο παράθυρο, επιλέγεται η συχνότητα για την οποία θα γίνουν οι υπολογισμοί και επαληθεύεται το μέγεθος και η περιοχή που θα γίνουν οι μετρήσεις. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται το **Core_2nd**.



Σχήμα 2.42: Επιλογές για την εμφάνιση του μαγνητικού πεδίου B στον δεύτερο μαγνητικό πυρήνα.

Αυτή η απεικόνιση βοηθά στο να γίνει κατανοητό το πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο στον μαγνητικό πυρήνα και να παρατηρηθεί πόσο βαθιά στον κορεσμό είναι τα μαγνητικά υλικά. Επιλέγεται συχνότητα 20 kHz , οπότε εμφανίζεται:



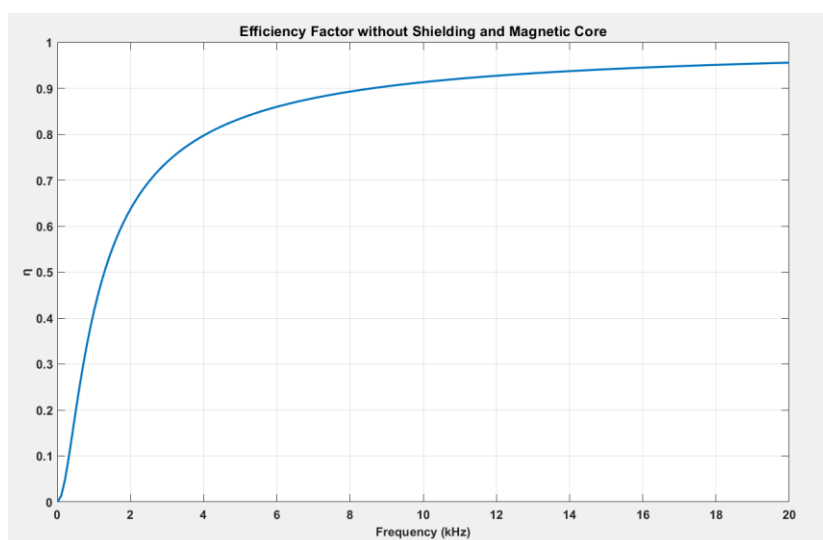
Σχήμα 2.43: Απεικόνιση πυκνότητας μαγνητικής ροής στον πυρήνα του δευτερεύοντος πηνίου.

Προκύπτει και εδώ το συμμετρικό B πεδίο ως προς τον άξονα z .

3 Δοκιμή Νέων Μαγνητικών Υλικών

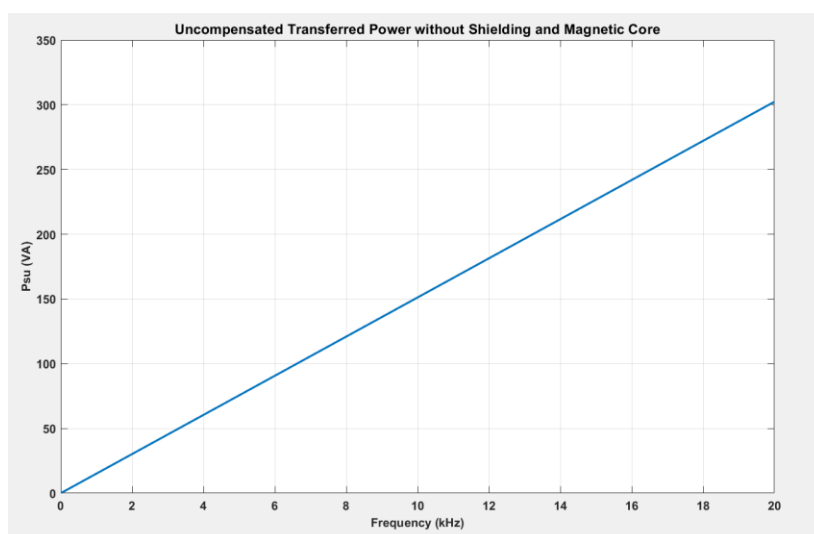
3.1 Δοκιμή σε περιοχή συχνοτήτων από 0 έως 20 kHz

Δεδομένων των αποτελεσμάτων για τον φερρίτη μπορούν τώρα να παρουσιαστούν διαδοχικά τα αποτελέσματα για ανύπαρκτο μαγνητικό υλικό και θωράκιση, για πυρήνα από νανοκρυσταλλικό μαγνητικό Finemet, πυρήνα από νανοκρυσταλλικό μαγνητικό υλικό Finemet, πυρήνα από νανοσωματίδια σιδήρου και Vitroperm. Επομένως ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων της προσομοίωσης για ανύπαρκτο μαγνητικό υλικό προκύπτει η γραφική παράσταση της απόδοσης μεταφερόμενης ισχύος η :



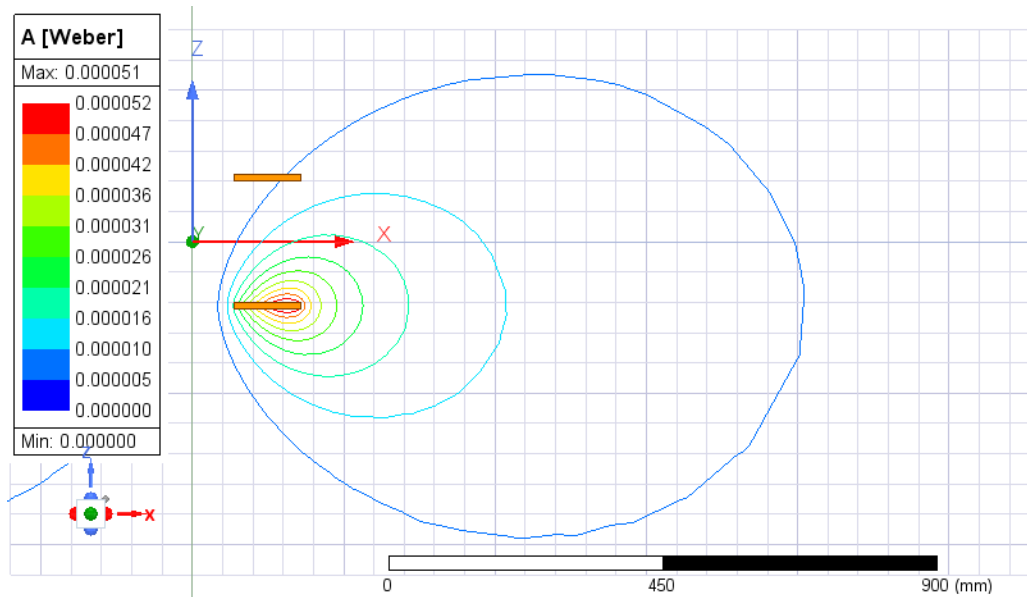
Σχήμα 3.1: Απόδοση ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz, χωρίς μαγνητικό πυρήνα και κάλυμμα αλουμινίου.

Και η γραφική παράσταση για την ισχύ P :



Σχήμα 3.2: Προκύπτουσα ισχύς σε W ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz, χωρίς μαγνητικό πυρήνα και κάλυμμα αλουμινίου.

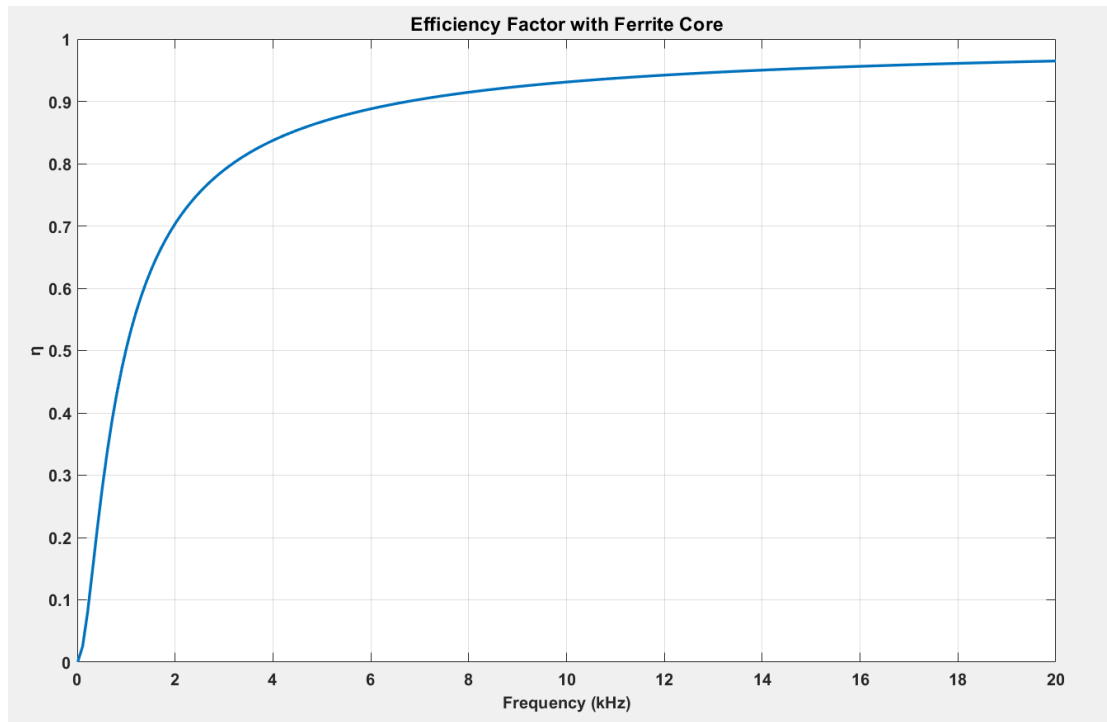
Επίσης παρουσιάζεται η απεικόνιση των δυναμικών γραμμών διανυσματικού δυναμικού:



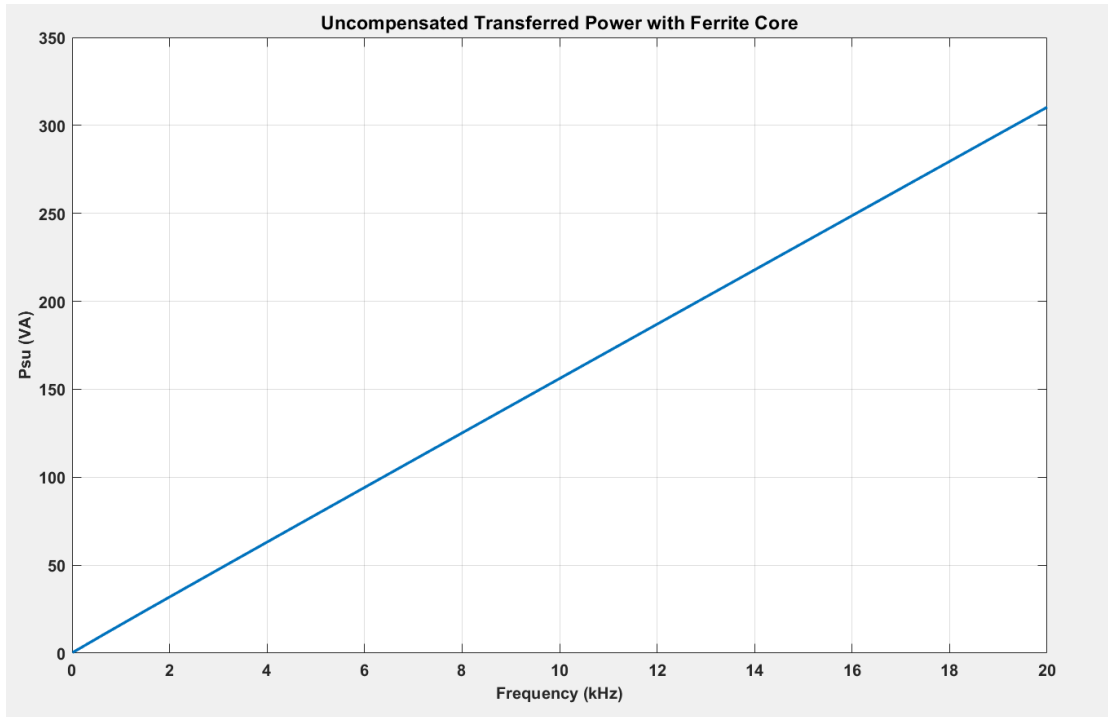
Σχήμα 3.3: Διανυσματικό δυναμικό χωρίς μαγνητικό πυρήνα και κάλυμμα αλουμινίου.

Εδώ δεν θα γίνει κάποια παρουσίαση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στον πυρήνα μαγνητικού υλικού αφού έχει γίνει η υπόθεση ότι δεν υπάρχει.

Για τον φερρίτη σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα στην ενότητα 2.7.2 προκύπτουν:

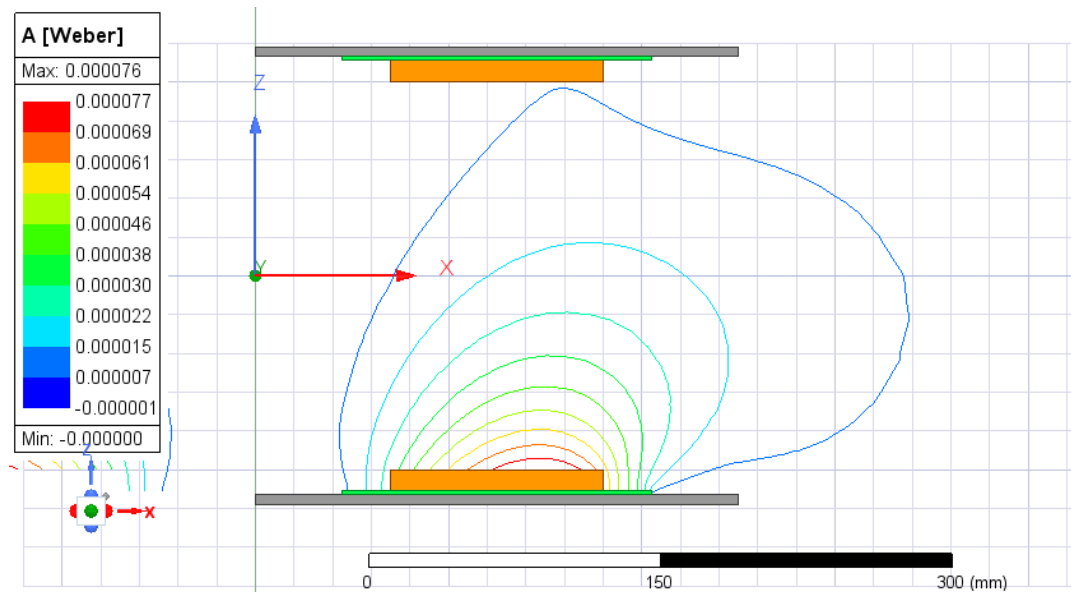


Σχήμα 3.4: Απόδοση ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Φερρίτη.

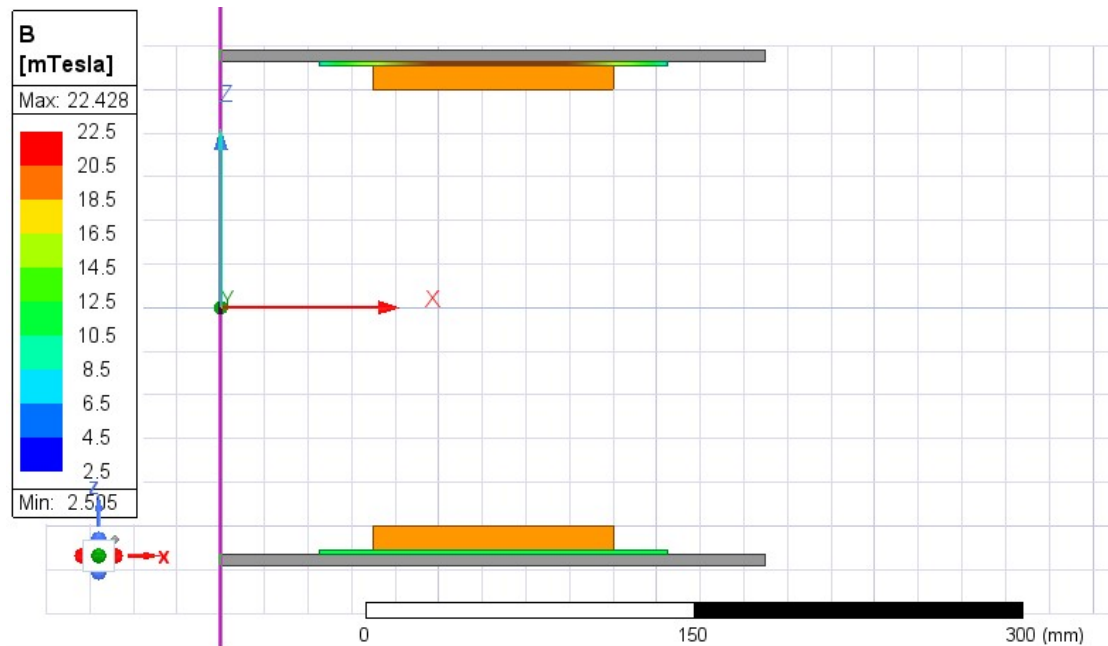


Σχήμα 3.5: Προκύπτουσα ισχύς σε W ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Φερρίτη.

Παρουσιάζονται και οι απεικονίσεις του A και B που παρουσιάστηκαν νωρίτερα:



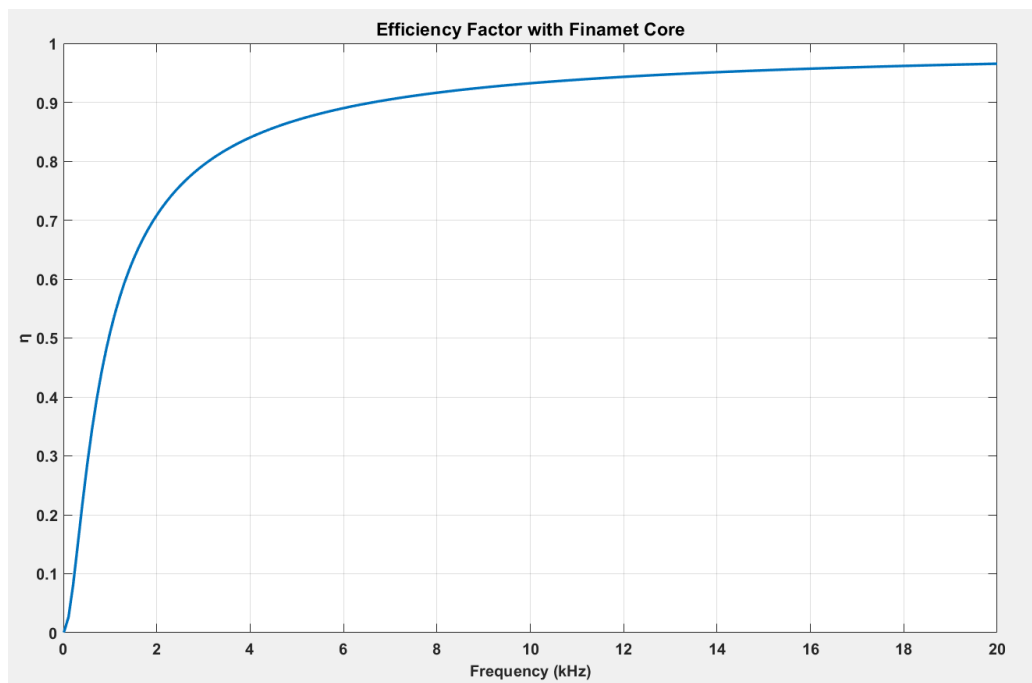
Σχήμα 3.6: Διανυσματικό δυναμικό με χρήση Φερρίτη.



Σχήμα 3.7: Πυκνότητα μαγνητικής ροής με χρήση Φερρίτη.

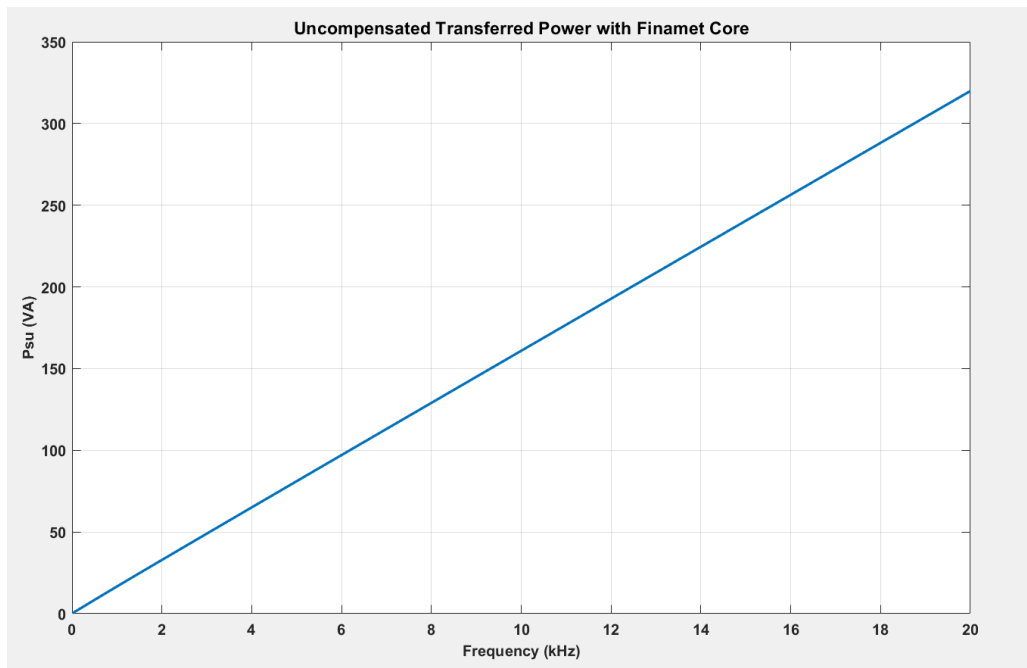
Υπενθυμίζεται ότι όλες οι απεικονίσεις του διανυσματικού δυναμικού και της πυκνότητας μαγνητικής ροής αυτού του κεφαλαίου θα γίνονται στα 20 kHz , στη μέγιστη δηλαδή συχνότητα της frequency sweep προσομοίωσης.

Παρουσιάζονται τώρα οι αντίστοιχες καμπύλες για μαγνητικό υλικό Finamet. Η απόδοση η δόθηκε:



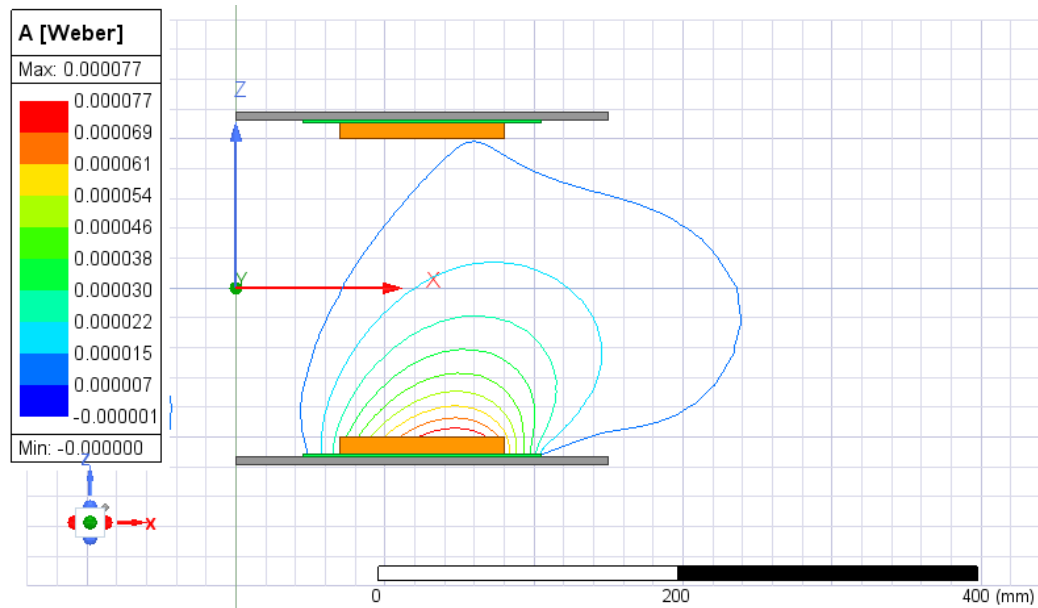
Σχήμα 3.8: Απόδοση ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Finamet.

Η μη αντισταθμισμένη ισχύς P_{su} :



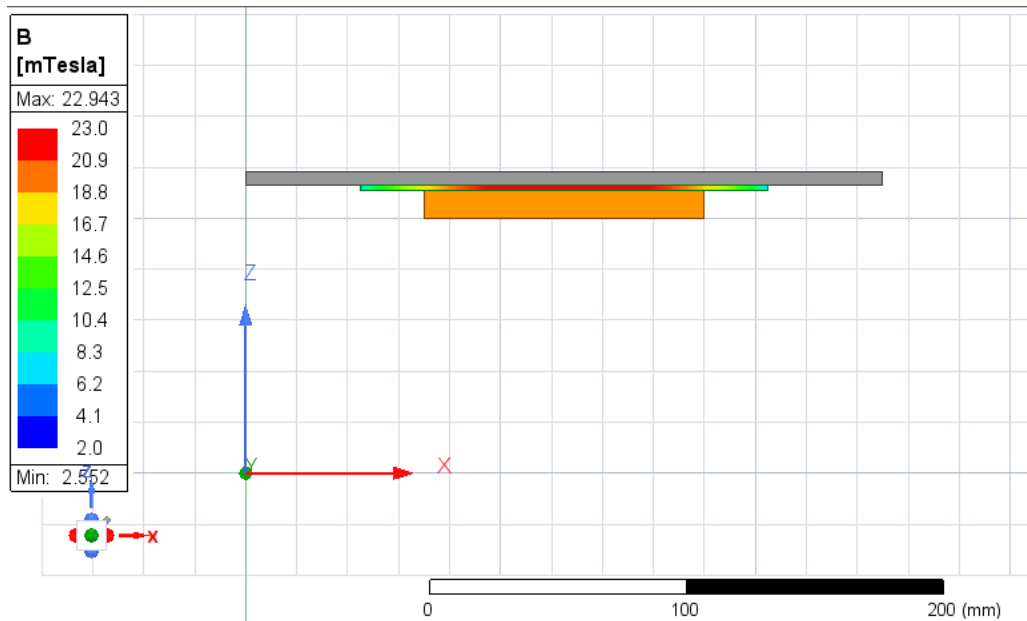
Σχήμα 3.9: Προκύπτουσα ισχύς σε W ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Finamet.

Για το διανυσματικό δυναμικό προκύπτει:



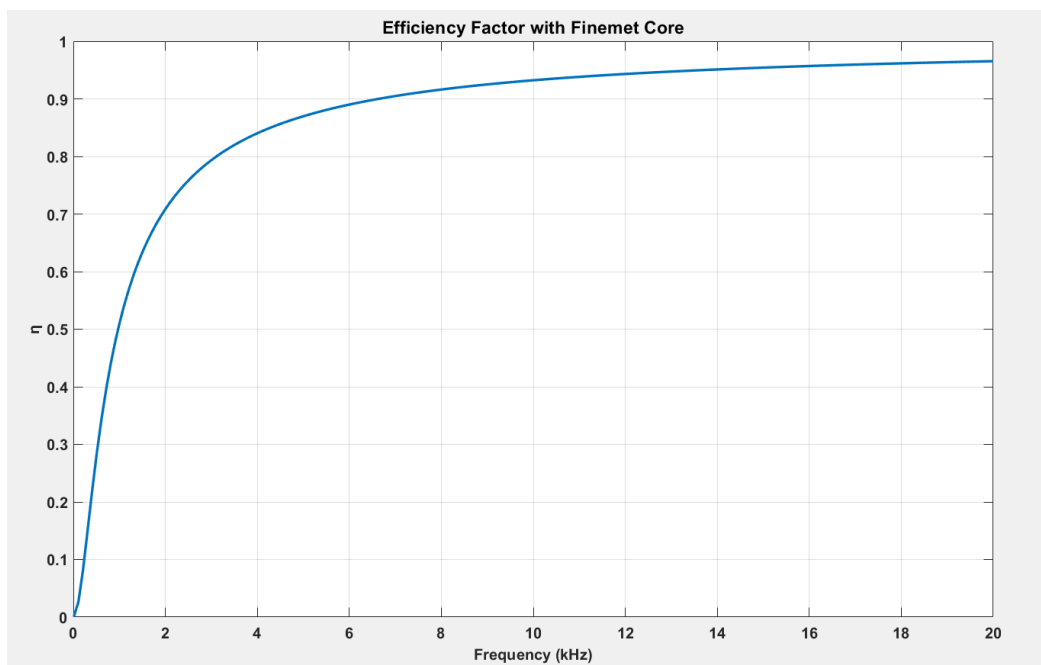
Σχήμα 3.10: Διανυσματικό δυναμικό με χρήση Finamet.

Και για την πυκνότητα μαγνητικής ροής:

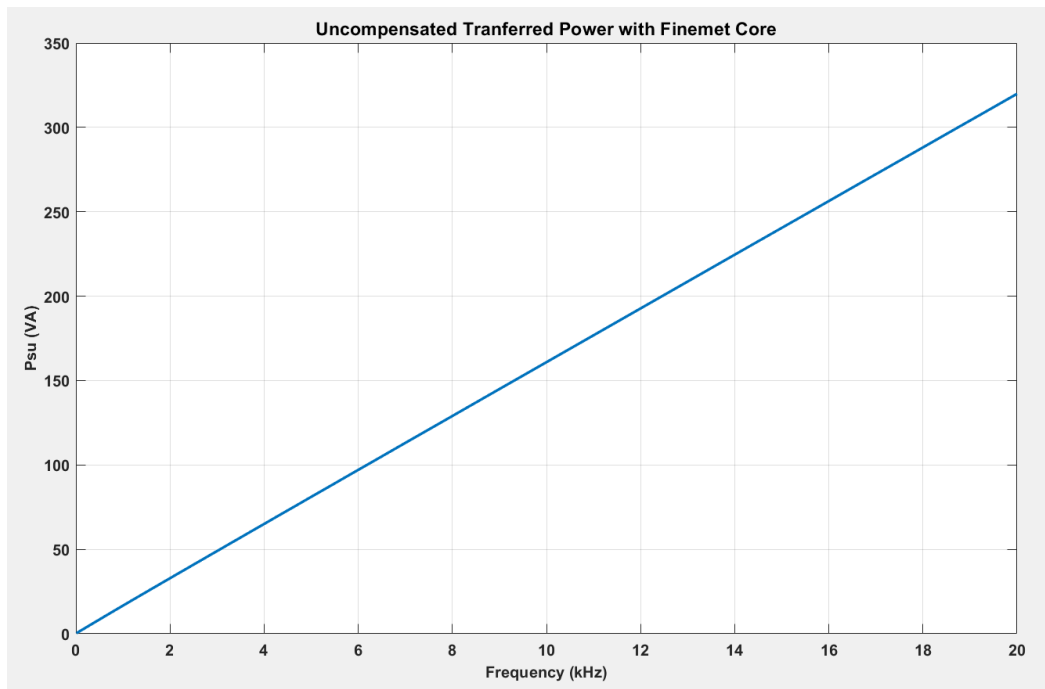


Σχήμα 3.11: Πυκνότητα μαγνητικής ροής με χρήση Finamet.

Οι αντίστοιχες καμπύλες απόδοσης και μη αντισταθμισμένης ισχύος για το μαγνητικό υλικό Finemet είναι:

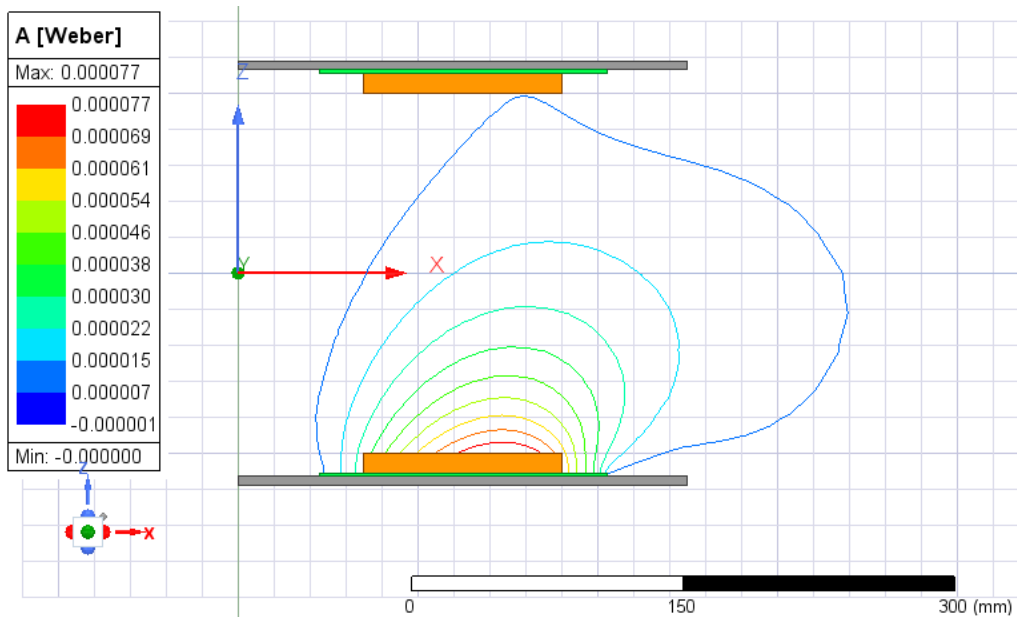


Σχήμα 3.12: Απόδοση ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Finemet.



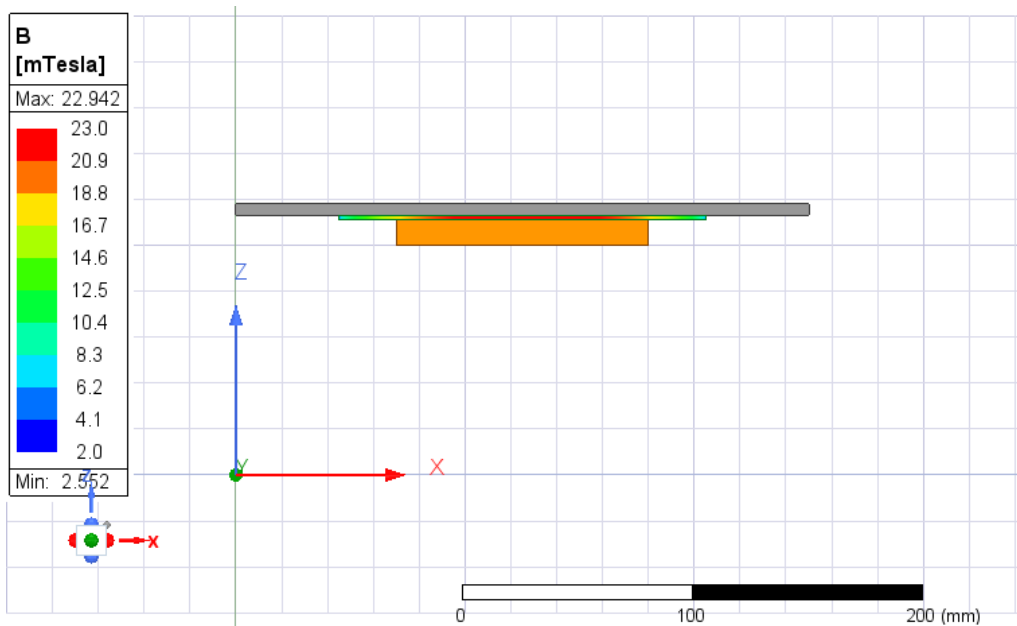
Σχήμα 3.13: Προκύπτουσα ισχύς σε W ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Finemet.

Οι δυναμικές γραμμές διανυσματικού δυναμικού απεικονίστηκαν:



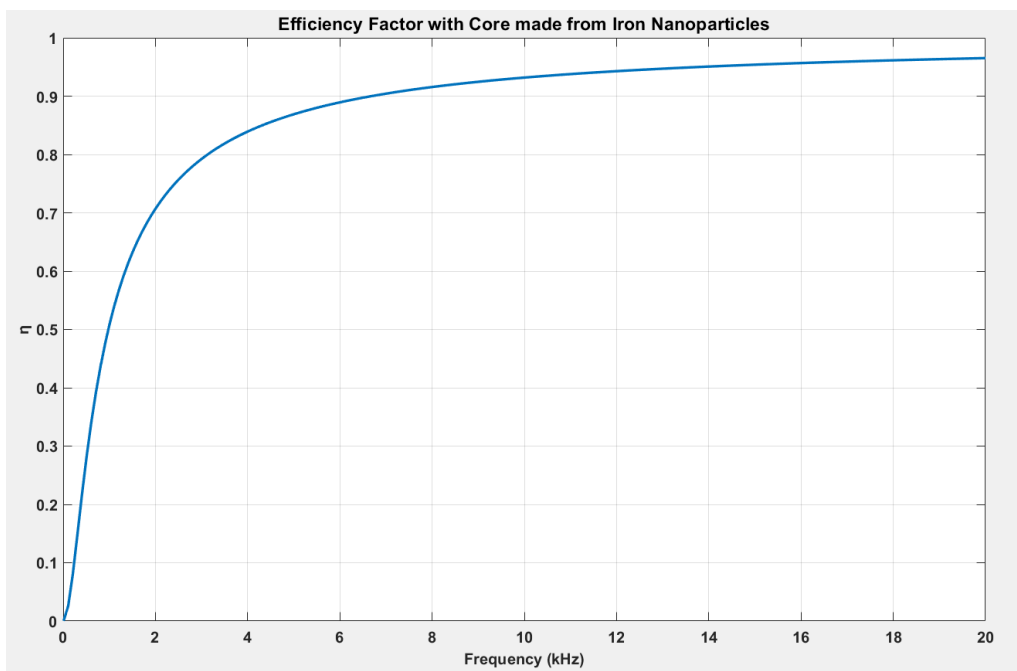
Σχήμα 3.14: Διανυσματικό δυναμικό με χρήση Finemet.

Και η πυκνότητα μαγνητικής ροής:

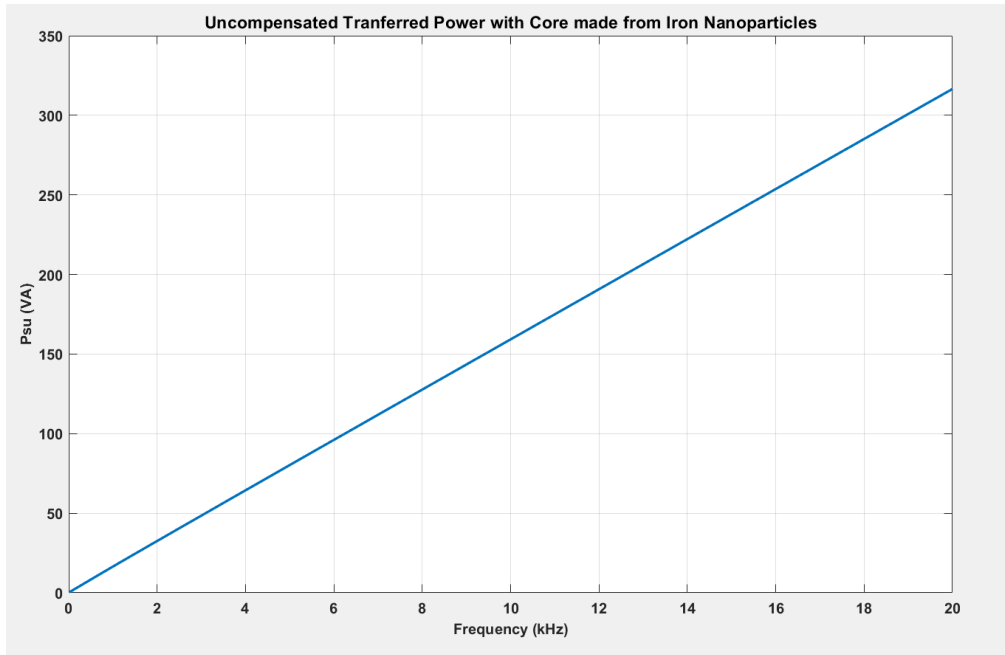


Σχήμα 3.15: Πυκνότητα μαγνητικής ροής με χρήση Finemet.

Ακόμη, για το μαγνητικό υλικό νανοσωματιδίων σιδήρου, οι καμπύλες απόδοσης ισχύος και μη αντισταθμισμένης ισχύος για το μαγνητικό υλικό Finemet είναι:

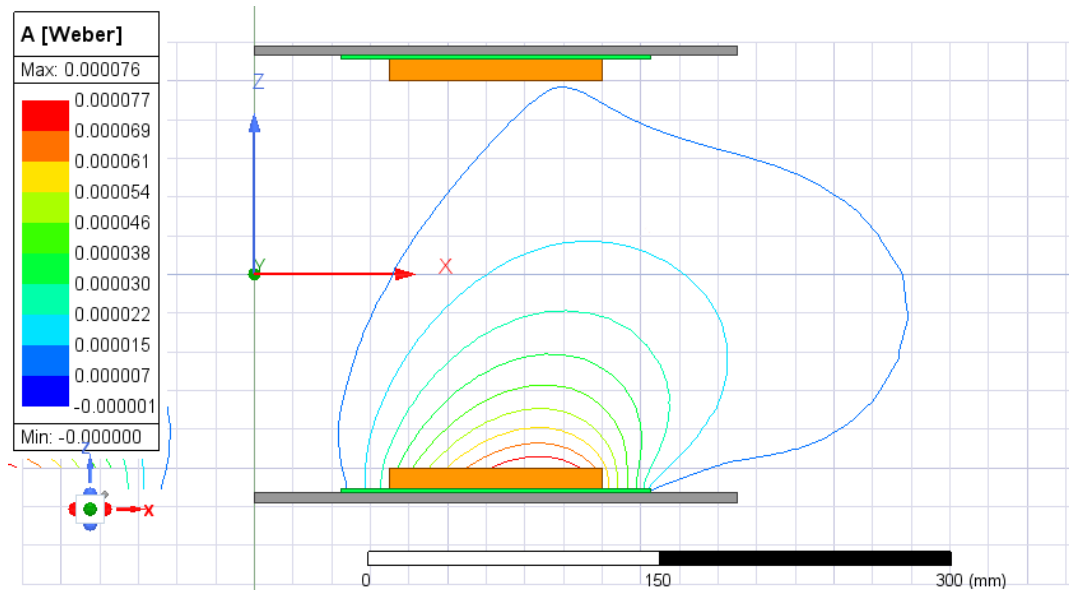


Σχήμα 3.16: Απόδοση ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση νανοσωματιδίων Σιδήρου.



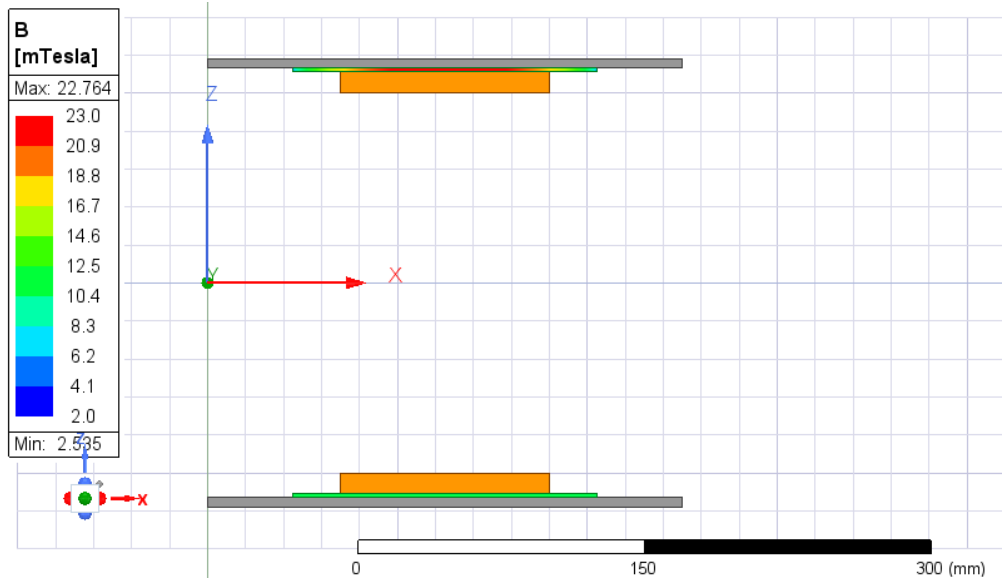
Σχήμα 3.17: Προκύπτουσα ισχύς σε VA ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση νανοσωματιδίων σιδήρου.

Οι δυναμικές γραμμές που δόθηκαν:



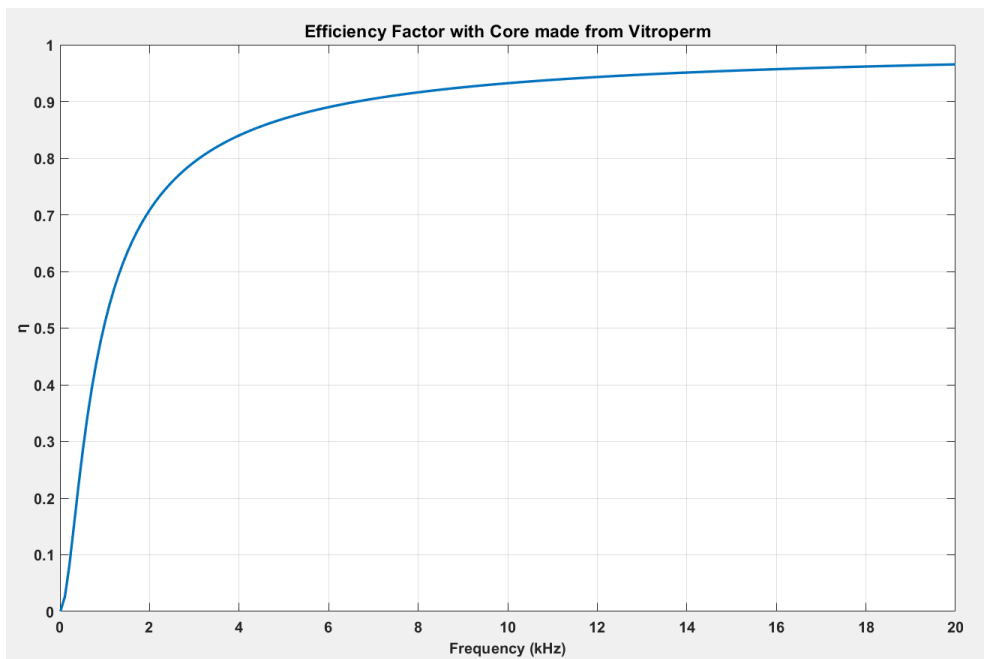
Σχήμα 3.18: Διανυσματικό δυναμικό με χρήση νανοσωματιδίων σιδήρου.

Το B πεδίο προέκυψε:

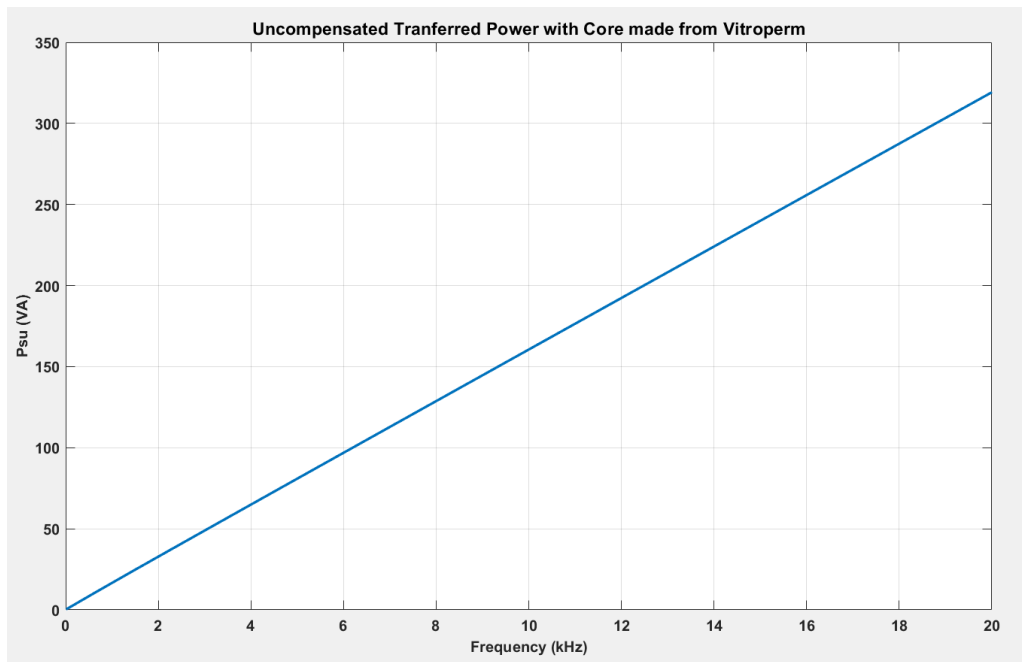


Σχήμα 3.19: Πυκνότητα μαγνητικής ροής με χρήση ναοσωματιδίων σιδήρου.

Οι αντίστοιχες καμπύλες απόδοσης και μη αντισταθμισμένης ισχύος για το ναοκρυσταλλικό μαγνητικό υλικό Vitroperm είναι:

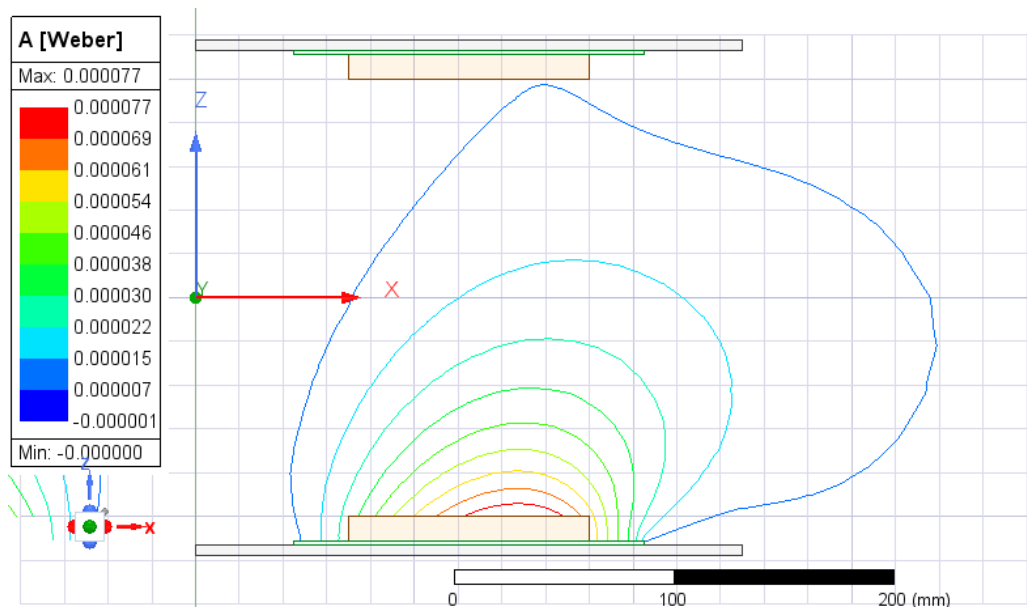


Σχήμα 3.20: Απόδοση ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με χρήση Vitroperm.



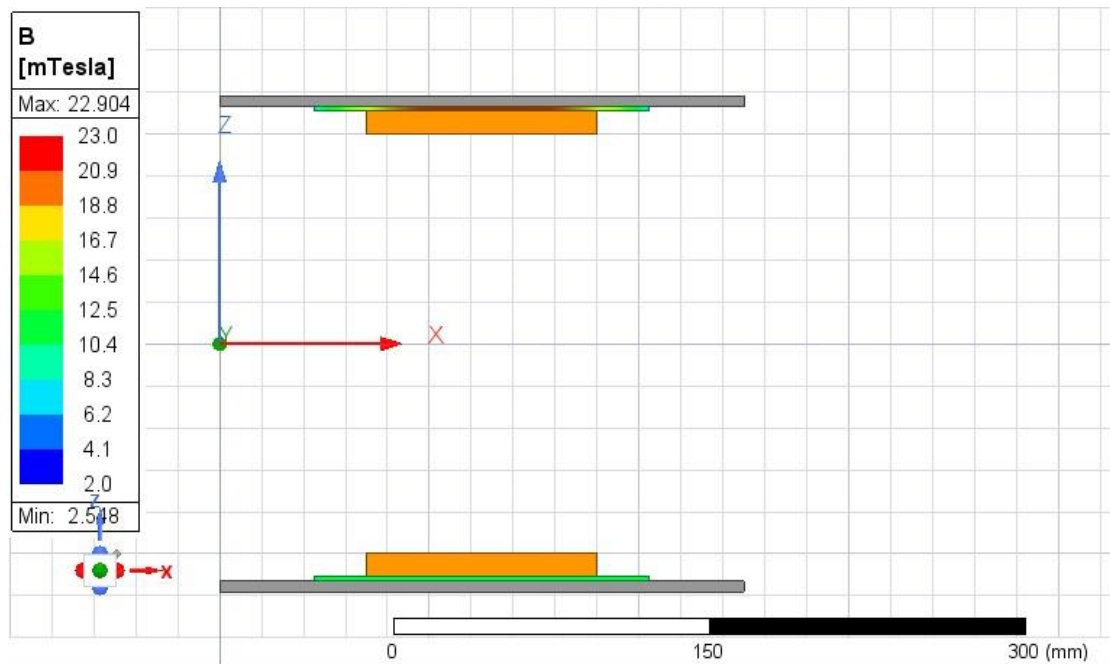
Σχήμα 3.21: Προκύπτουσα ισχύς σε VA ως συνάρτηση της συχνότητας σε kHz με Vitroperm.

Το διανυσματικό δυναμικό:



Σχήμα 3.22: Διανυσματικό δυναμικό με χρήση Vitroperm.

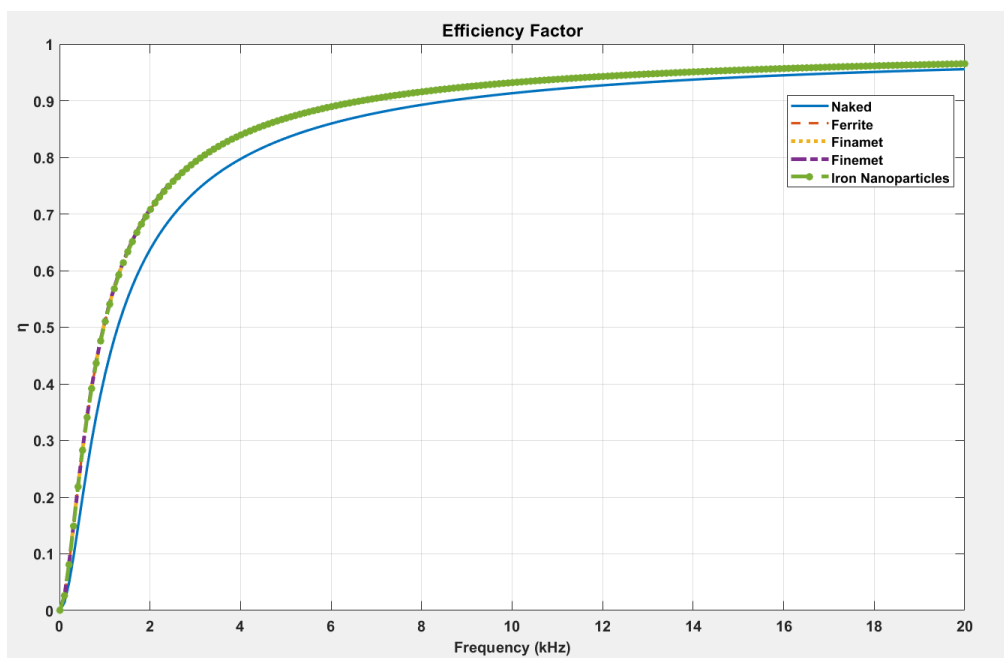
Το B πεδίο προέκυψε:



Σχήμα 3.23: Πυκνότητα μαγνητικής ροής με χρήση Vitroperm.

3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων για την μελέτη στα 0 έως 20 kHz

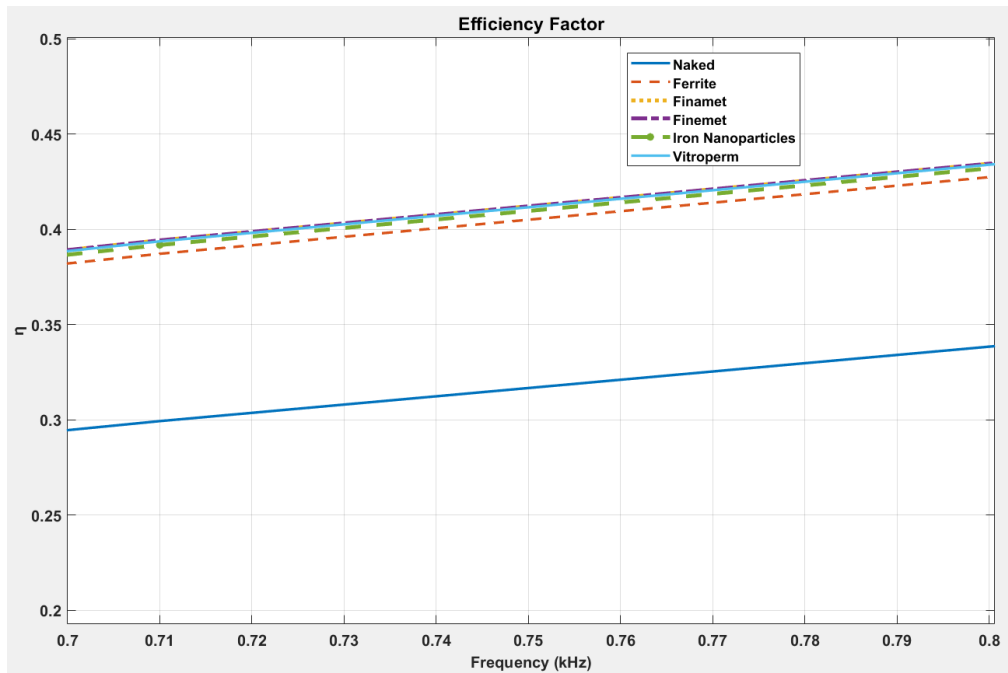
Παρουσιάζονται όλες οι γραφικές παραστάσεις του η που έχουν προκύψει.



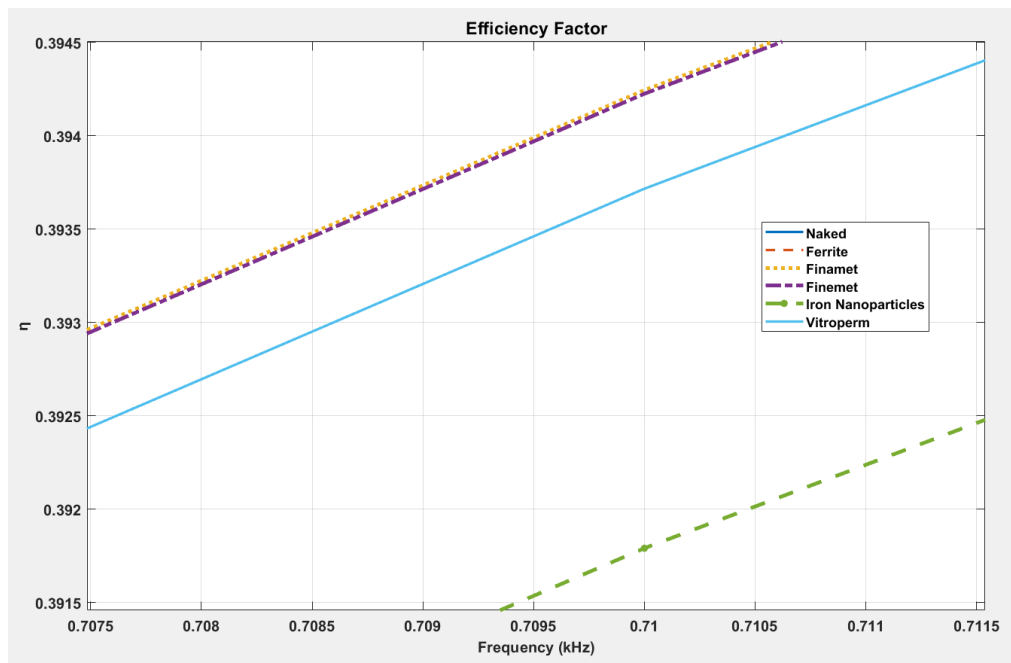
Σχήμα 3.24: Παρουσίαση όλων των γραφικών παραστάσεων απόδοσης μεταφερόμενης ισχύος.

Αρχικά βλέπουμε πως όλες οι καμπύλες έχουν συμπεριφορά αύξουσα και ασυμπτωτική προς την μονάδα. Παρατηρούμε δε πως κάθε μαγνητικό υλικό συμπεριφέρεται πολύ καλύτερα σε σχέση με την «γυμνή» (χωρίς μαγνητικό πυρήνα και κάλυμμα αλουμινίου) διάταξη.

Για να εντοπιστούν περαιτέρω διαφορές μεταξύ των μαγνητικών υλικών θα πρέπει να δούμε μια λεπτομέρεια στις μετρήσεις:



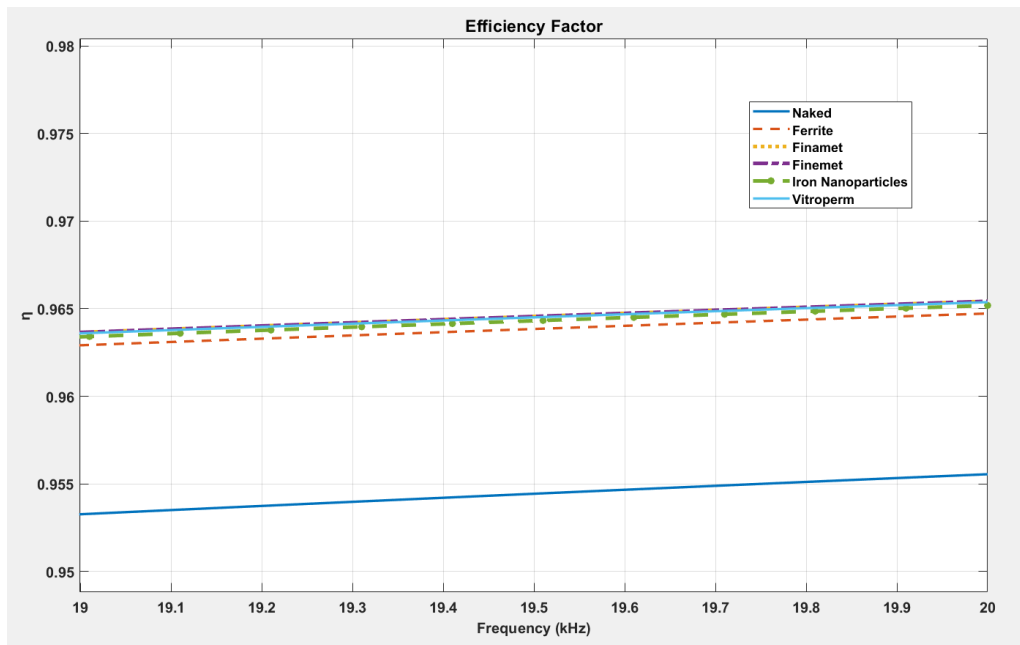
Σχήμα 3.25: Λεπτομέρεια των γραφικών παραστάσεων απόδοσης σε χαμηλές συχνότητες.



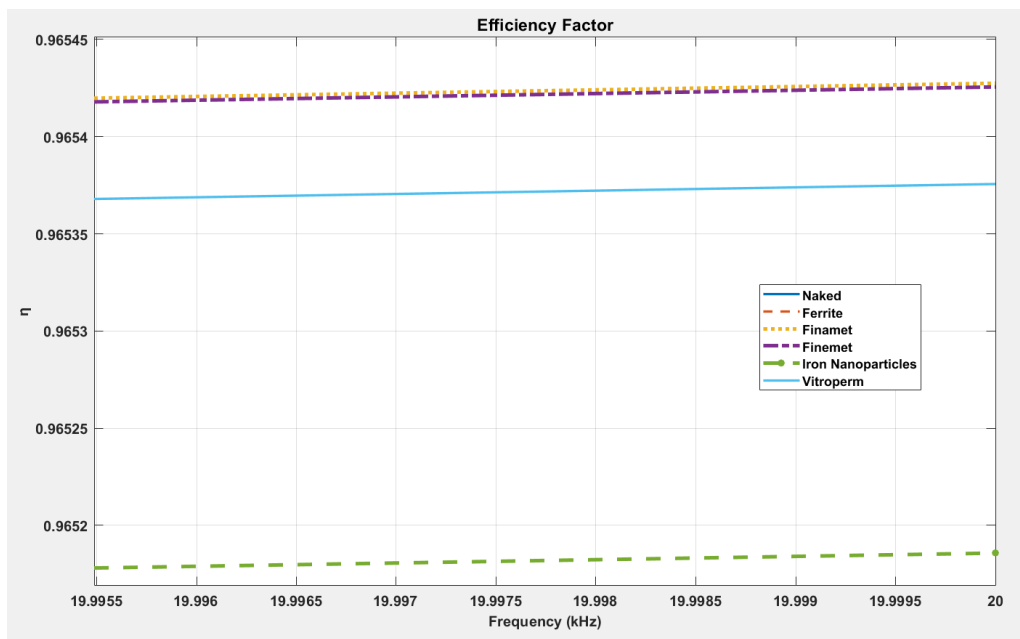
Σχήμα 3.26: Λεπτομέρεια των γραφικών παραστάσεων απόδοσης σε χαμηλές συχνότητες. Διακρίνονται οι γραφικές που προκύπτουν με Finamet, Finemet, νανοσωματίδια σιδήρου και Vitroperm.

Αναλύοντας τα δεδομένα, αρχικά φαίνεται πως το Finamet έχει την βέλτιστη συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες διαφορές στην απόδοση που παρουσιάζει το Finamet είναι 0.0962 σε σχέση με την «γυμνή» διάταξη στα 810 Hz, 0.00706 με τον φερρίτη και στα 710 Hz, 1.9371×10^{-5} με το Finamet στα 710 Hz, 0.00245 με τον πυρήνα νανοσωματιδίων σιδήρου στα 710 Hz και 5.281×10^{-4} στα 710 Hz με το Vitroperm.

Επίσης κοντά στα 20 kHz, παρατηρείται:

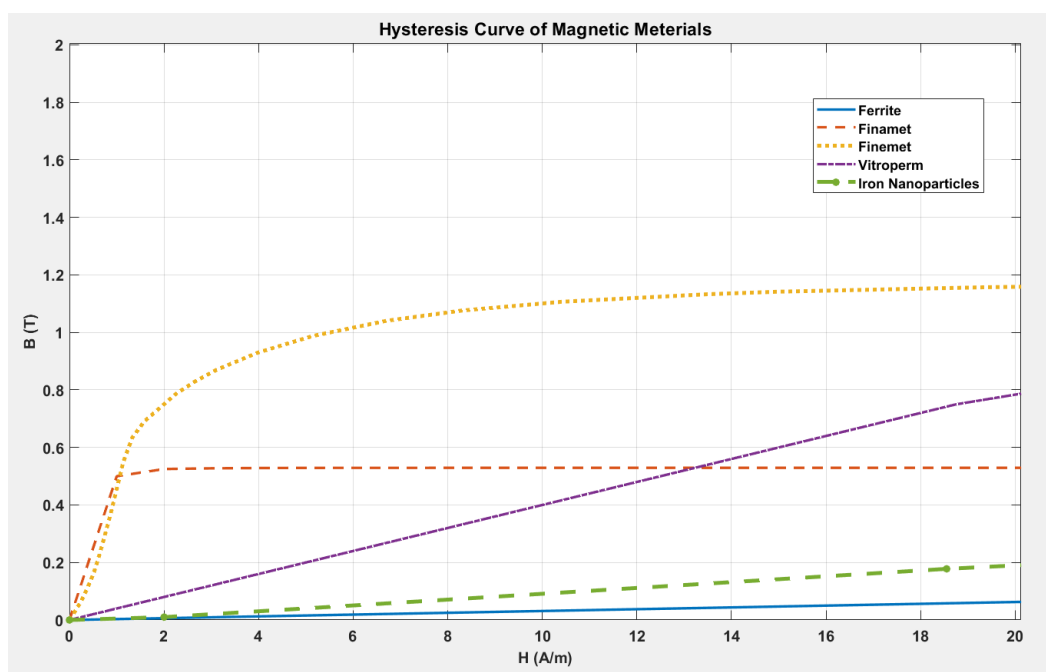


Σχήμα 3.27: Λεπτομέρεια των γραφικών παραστάσεων απόδοσης κοντά στα 20 kHz.



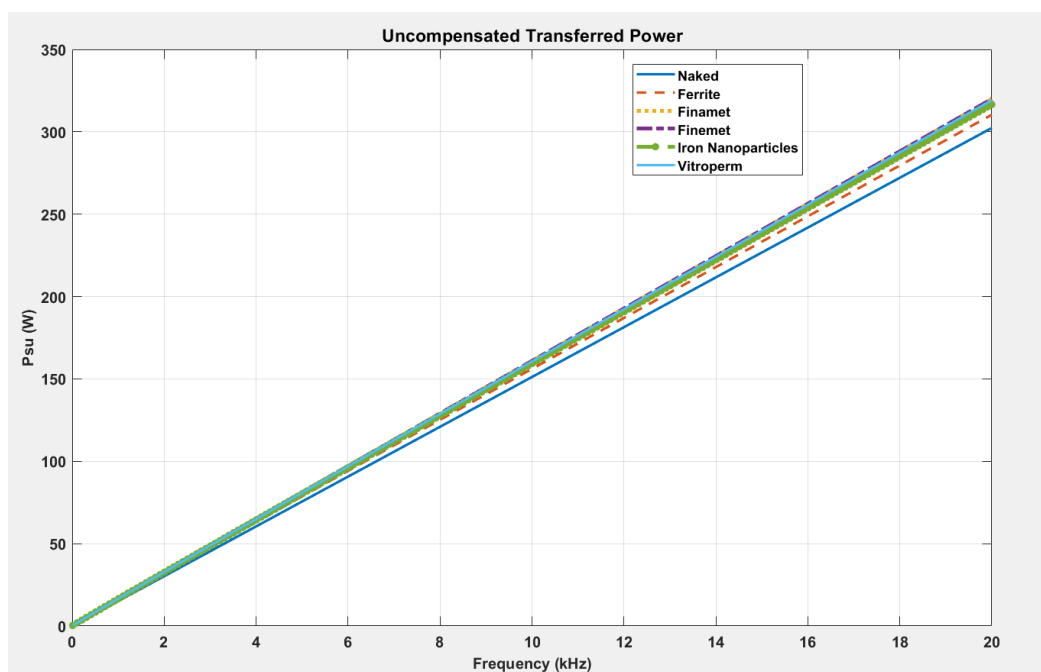
Σχήμα 3.28: Λεπτομέρεια των γραφικών παραστάσεων απόδοσης κοντά στα 20 kHz. Διακρίνονται οι γραφικές που προκύπτουν με φερρίτη, με Finamet, Finamet και νανοσωματίδια σιδήρου.

Το Finamet αυτή τη φορά λαμβάνει τιμή απόδοσης 0.9654 και η διαφορά που προκύπτει είναι 0.01 σε σχέση με την «γυμνή» διάταξη, $7 * 10^{-4}$ με τον φερρίτη, $1.91 * 10^{-6}$ με το Finemet, $2.417 * 10^{-4}$ σε σχέση με τον πυρήνα νανοσωματιδίων σιδήρου και $5.187 * 10^{-5}$ με το Vitroperm. Εν γένει φαίνεται πως οι διαφορές στην απόδοση μεταξύ των μαγνητικών υλικών -και δη μεταξύ Finamet και Finemet- είναι ελάχιστες, και ο λόγος που υπάρχουν είναι οι πολύ μικρές διαφορές που εντοπίζονται στον βρόχο υστέρησης στην κατάσταση του μη κορεσμού. Μάλιστα παρατηρείται πως για τις συγκεκριμένες πυκνότητες μαγνητικής ροής που προκύπτουν, η καμπύλη του Finamet είναι πιο απότομη από του Finemet και των λοιπών υλικών. Για αυτόν τον λόγο το Finamet παρουσιάζει οριακά καλύτερη απόδοση. Επίσης, η καμπύλη του φερρίτη PC40 είναι λιγότερο απότομη από κάθε νανοκρυσταλλικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.29: Λεπτομέρεια στις γραφικές παραστάσεις βρόχου υστέρησης των υλικών.

Συνέχεια έχει η παρουσίαση των γραφικών παραστάσεων της μη αντισταθμισμένης μεταφερόμενης ισχύος:



Σχήμα 3.30: Παρουσίαση όλων των γραφικών παραστάσεων ισχύος.

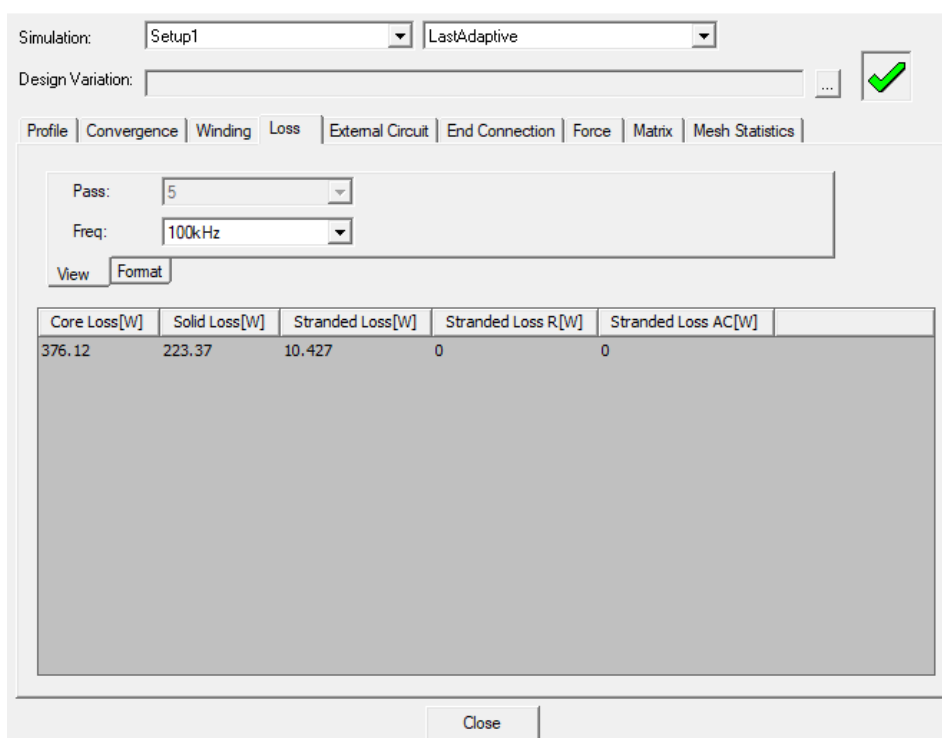
Παρατηρείται πως η αύξηση της συχνότητας, σε κάθε περίπτωση επιφέρει γραμμική αύξηση της ισχύος. Οι μέγιστες τιμές των ισχύων, που προκύπτουν και για 20 kHz είναι: 302.329 VA για «γυμνή» διάταξη, 310.354 VA για διάταξη με φερρίτη, 319.925 VA για το Finamet, 319.898 VA για το Finemet και 316.565 VA για τον πυρήνα νανοσωματιδίων σιδήρου και 319.2 VA για το Vitroperm. Βλέπουμε δηλαδή πάλι πως το Finamet συμπεριφέρεται καλύτερα από κάθε υλικό. Συγκεκριμένα, το Finamet είναι κατά 5.82 % καλύτερο από την γυμνή διάταξη, 3.084 % καλύτερο από τον φερρίτη, 0.00845 % καλύτερο από το Finemet, 1.0615 % καλύτερο από το μαγνητικό υλικό νανοσωματιδίων σιδήρου και 0.227 % καλύτερο από το Vitroperm.

Όσον αφορά τα διανυσματικά δυναμικά που έχουν προκύψει, μεταξύ νανοκρυσταλλικών μαγνητικών υλικών δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά ούτε στον τρόπο που κατανέμονται οι δυναμικές γραμμές ούτε στις τιμές που αυτές παίρνουν. Ο φερρίτης παρουσιάζει μια μικρή εξασθένιση δυναμικών γραμμών αλλά η πιο σημαντική παρατήρηση είναι πως διακρίνεται πόσο σπουδαία διαφορά που προκύπτει χωρίς την χρήση του καλύμματος αλουμινίου αλλά και του μαγνητικού πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα χωρίς μαγνητικό υλικό και μαγνητική θωράκιση η μέγιστη τιμή του διανυσματικού δυναμικού λαμβάνει τιμή 51 nWeber, ενώ στην περίπτωση χρήσης Finamet λαμβάνει 77 nWeber. Σημαντική διαφορά υπάρχει και ως προς την κατανομή των δυναμικών γραμμών στον χώρο, όπου φαίνεται πόσο ουσιαστικά βοηθά στον προσανατολισμό του πεδίου και περιορισμό των απωλειών η διάταξη με μαγνητικό υλικό και κάλυμμα από αλουμίνιο.

3.3 Υπολογισμός Απωλειών Πυρήνα σε Συχνότητα 100 kHz.

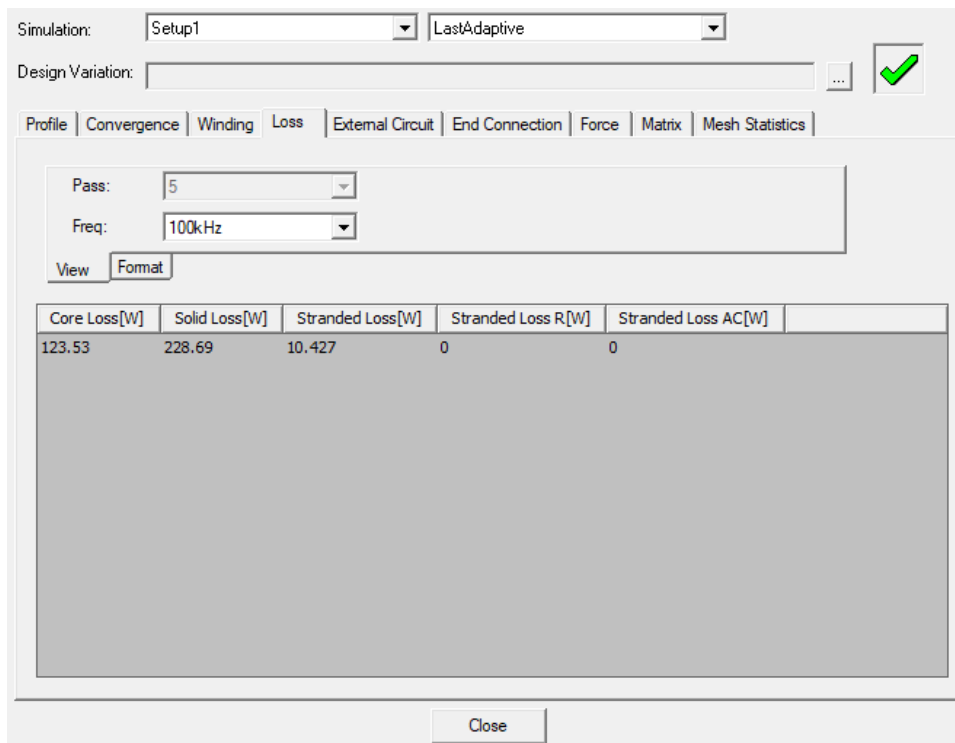
Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθούν οι απώλειες πυρήνα που προκύπτουν στα 100 kHz για κάθε υλικό εκ των φερρίτη, Finemet και Vitroperm. Αυτό το μέγεθος είναι σημαντικό για την περαιτέρω κατανόηση της αποδοτικότητας της διάταξης με τα νέα υλικά. Η ανάλυση θα γίνει με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα **2.6.1** και **2.7.1**. Παράλληλα, θα αναφερθούν και η απόδοση και η υπολογισμένη μη αντισταθμισμένη ισχύς για τη συγκεκριμένη συχνότητα.

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα 20 kHz. Για τον φερρίτη έχουμε:



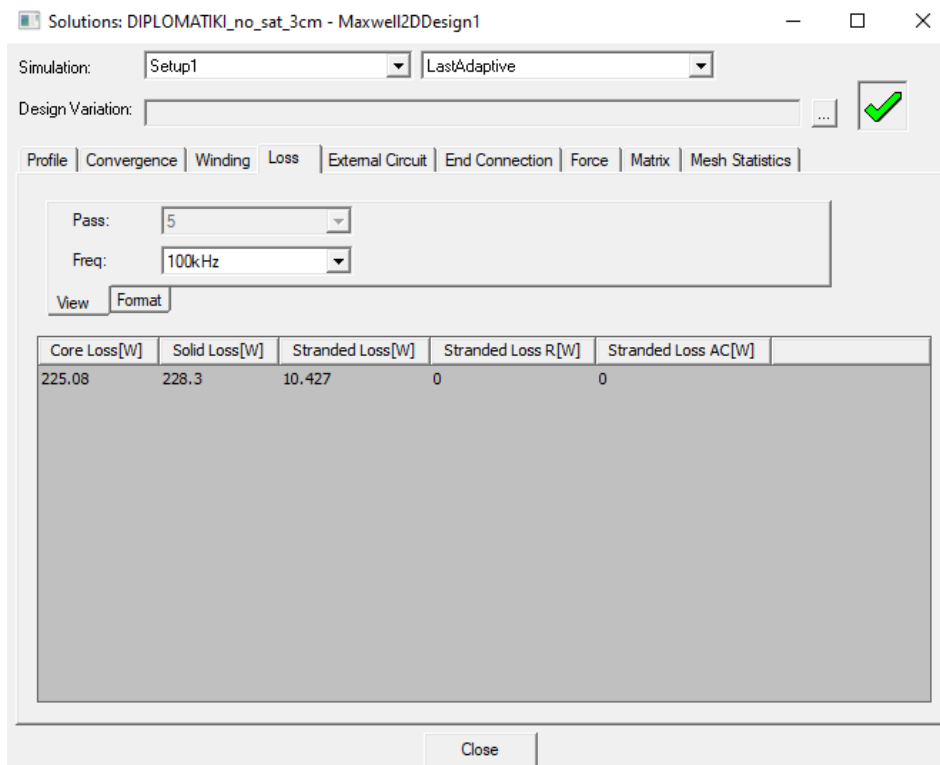
Σχήμα 3.31: Εμφάνιση απωλειών πυρήνα για τον φερρίτη.

Για το υλικό Finemet:



Σχήμα 3.32: Εμφάνιση απωλειών πυρήνα για το Finemet.

Και για το υλικό από νανοσωματίδια σιδήρου:



Σχήμα 3.33: Εμφάνιση απωλειών πυρήνα για το υλικό Vitroperm.

Επομένως για τον φερρίτη προέκυψαν απώλειες πυρήνα 376.12 W , για το Finemet 123.53 W και για το Vitroperm 225.08 W . Βλέπουμε πως οι απώλειες πυρήνα των νανοκρυσταλλικών υλικών είναι μικρότερες σε σχέση με τον φερρίτη.

Παρουσιάζεται και η απόδοση μεταφερόμενης ισχύος αλλά και η μη αντισταθμισμένη ισχύς στα 100 kHz . Για τον φερρίτη προέκυψε απόδοση $\eta = 0.9927$ και μη αντισταθμισμένη ισχύς 1537.84 VA , για το Finemet $\eta = 0.99295$, μη αντισταθμισμένη ισχύς 1585 VA ενώ για το Vitroperm, $\eta = 0.99294$ και μη αντισταθμισμένη ισχύς 1581.57 VA .

Παραθέτουμε τα αποτελέσματα για την απόδοση και μη αντισταθμισμένη ισχύ και για τα υλικά Finamet και νανοσωματιδίων Σιδήρου. Το Finamet πέτυχε απόδοση $\eta = 0.99295$ και μη αντισταθμισμένη ισχύ $P_{su} = 1585.16\text{ VA}$, ενώ τα νανοσωματίδια σιδήρου πέτυχαν απόδοση $\eta = 0.9929$ και μη αντισταθμισμένη ισχύ $P_{su} = 1568.55\text{ VA}$.

4 Συμπεράσματα και Επεκτάσεις

4.1 Συμπεράσματα

Η επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων είναι μια τεχνολογία η οποία είναι πολλά υποσχόμενη. Η τεχνολογία αυτή τα τελευταία χρόνια έχει γίνει επίκεντρο σημαντικής μελέτης και έχει επέλθει μεγάλη πρόοδος στην εξέλιξή της. Σημαντικό κομμάτι αυτής της εξέλιξης είναι η εμφάνιση νέων υλικών που καλούνται να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά των επαγωγικών φορτιστών. Στην κατηγορία των νέων υλικών ανήκουν και τα υλικά από νανοσωματίδια μαγνητικών υλικών, δηλαδή μικροδομές συνήθως με βάση τον Σίδηρο ή το Κοβάλτιο και άλλα μη μαγνητικά υλικά διαμέτρου δεκάδων νανομέτρων, συχνά τοποθετημένα σε κάποια μήτρα μονωτικού υλικού. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν άριστες μαγνητικές ιδιότητες (υψηλή μαγνήτιση κορεσμού, υψηλή διαπερατότητα) που αποδίδονται στα νανοσωματίδια του μαγνητικού υλικού, αλλά και καλές μηχανικές ιδιότητες (είναι μη ψαθυρά, ανεκτικά σε καταπονήσεις) που αποδίδονται στο άμορφο μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται. Σε αυτή τη διπλωματική μελετήθηκαν τα νανοκρυσταλλικά υλικά Finamet, Finemet και μαγνητικό υλικό από νανοσωματίδια σιδήρου.

Για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση των πεδίων αλλά και τον υπολογισμό των επιθυμητών λύσεων έγινε χρήση του λογισμικού Ansys Maxwell. Μελετήθηκε η λειτουργική κατάσταση του μη κορεσμού στα υλικά και παρουσιάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις της απόδοσης μεταφερόμενης ισχύος η και της προκύπτουσας μη αντισταθμισμένης ισχύος, καλούμενη ως P_{su} . Απεικονίστηκαν επίσης οι δυναμικές γραμμές του διανυσματικού δυναμικού στην ευρύτερη περιοχή για την κατανόηση του τρόπου που κατανέμονται οι δυναμικές αυτές γραμμές αλλά και την σύγκριση των μέτρων τους. Επίσης παρουσιάστηκε η πυκνότητα μαγνητικής ροής εντός του μαγνητικού υλικού, από όπου έγινε κατανοητό ότι βρισκόμαστε σε μικρές τιμές μαγνητικού πεδίου κάτι που μας βοήθησε να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα.

Εν γένει τα νέα αυτά υλικά πετύχαν σε κάθε κατάσταση λειτουργίας να έχουμε καλύτερη απόδοση η από τον συμβατικό φερρίτη. Στις καταστάσεις λειτουργίας που μελετήθηκαν, παρατηρήθηκε πως το υλικό Finamet είχε το συγκριτικό πλεονέκτημα καθώς η απόδοση ήταν καλύτερη σε κάθε συχνότητα που δοκιμάστηκε. Επίσης με αυτό το υλικό προέκυψε η μέγιστη μη αντισταθμισμένη ισχύς, στα 319.925 W. Η ισχύς αυτή ήταν μεγαλύτερη κατά 5.82 % σε σχέση με την «γυμνή» διάταξη, 3.084 % σε σχέση με τον φερρίτη, 0.00845 % σε σχέση με το Finamet, 1.0615 % σε σχέση με τα νανοσωματίδια σιδήρου και 0.227 % σε σχέση με το Vitroperm. Υπενθυμίζεται ότι η ισχύς που μετριέται είναι η μη αντισταθμισμένη ισχύς, δηλαδή ελλείπει του συντελεστή ποιότητας Q αλλά και των λοιπών απωλειών του συστήματος. Δεδομένων των τιμών του Q [37], περιμένουμε την τελική τιμή στην έξοδο να είναι μεγαλύτερη.

Όσον αφορά τις απώλειες πυρήνα, σε συχνότητα λειτουργίας 100 kHz, το Finemet παρουσίασε μείωση στις απώλειες πυρήνα κατά 204.476 % σε σχέση με τον φερρίτη ενώ το υλικό από νανοσωματίδια σιδήρου παρουσίασε μείωση κατά 67.105 %. Στα 100 kHz παρατηρήθηκε πάλι πως τα νανοκρυσταλλικά υλικά είχαν ελαφρώς καλύτερη απόδοση από τον φερρίτη PC40, με το Finamet να έχει ξανά τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

Δεδομένων των ανωτέρω αποτελεσμάτων αλλά και των μηχανικών χαρακτηριστικών των νανοκρυσταλλικών υλικών που μελετήθηκαν, μπορούμε να συμπεράνουμε πως τα υλικά αυτά είναι μια λογική επιλογή σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Σημειώνεται ότι στα μαγνητικά υλικά αυτά δεν έχει γίνει είσοδος καθόλου στον κορεσμό, οπότε σε περίπτωση που αυτό κριθεί σκόπιμο για την εφαρμογή, μπορεί να γίνει διείσδυση σε ακόμα μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής.

Αξίζει να σχολιαστεί πως τα αποτελέσματα έχουν γίνει υπό ιδανικές συνθήκες και θα διαφέρουν σημαντικά από μια πειραματική υλοποίηση. Υπενθυμίζεται ότι στην προσομοίωση δεν υπάρχει υλικό που να περιβάλλει την διάταξη αφού έχει χρησιμοποιηθεί υλικό «vacuum». Ο μαγνητικός συντονισμός επίσης θεωρείται δεδομένος και δεν έχουν προσμετρηθεί οι απώλειες των ηλεκτρονικών ισχύος που θα χρησιμοποιηθούν σε μια πραγματική διάταξη για την επίτευξη μαγνητικού συντονισμού. Όλοι αυτοί είναι παράγοντες οι οποίοι σαφώς επηρεάζουν τα αποτελέσματα σε σχέση με μια πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

4.2 Επεκτάσεις

Η διπλωματική αυτή εργασία είναι μια προσπάθεια προσέγγισης του πολυσχιδούς θέματος της επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος. Υπάρχουν αρκετές πτυχές αυτής της μελέτης που επιδέχονται περαιτέρω μελέτη. Πιο συγκεκριμένα:

Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο το οποίο προτείνει η Ansys για εφαρμογές ασύρματης φόρτισης. Ως επέκταση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα επαγωγική φόρτισης τα οποία έχουν μελετηθεί και έχουν βελτιστοποιηθεί για επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου [38].

Επίσης μπορούν σίγουρα να μελετηθούν περισσότερα υλικά. Υλικά και από τις υπόλοιπες κατηγορίες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.5, όπως πυρήνες από εύκαμπτο μαγνητικό υλικό μπορούν να γίνουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης. Ενδιαφέρον θα είχε και η μελέτη των απωλειών πυρήνα του Finamet του οποίου την γραφική παράσταση B-P δεν είχαμε λόγω της περιορισμένης μελέτης που έχει γίνει στο υλικό αυτό.

Θα έχει μεγάλο ενδιαφέρον μελλοντικά να μελετηθούν, όσο είναι δυνατό, τα αποτελέσματα και πειραματικά. Ενδιαφέρον θα έχει σε αυτή τη περίπτωση η πρακτική σχεδίαση των κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος και αντιστάθμισης που θα χρησιμοποιηθούν σε πραγματική υλοποίηση, καθώς σε αυτή τη διπλωματική εργασία η επίτευξη μαγνητικού συντονισμού θεωρούταν δεδομένη.

Βιβλιογραφία

- [1] "Energy Density," [Online]. Available: <https://chemistry.beloit.edu/edetc/SlideShow/slides/energy/density.html>. [Accessed 07 May 2023].
- [2] "PE-CONS 66/22", The European Parliament and the Council of the European Union, 2023.
- [3] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah and E. Hossain, "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development," *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 12-17, 2017.
- [4] T. B. Δαματοπούλου, "Μαγνητική Θωράκιση Ηλεκτρικών Οχημάτων," Απρίλιος, 2023.
- [5] X. Gong και J. Rangaraju, Taking charge of electric vehicles – both in the vehicle and on the grid, Texas Instruments, 2020.
- [6] Σ. Ν. Μανιάς, Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, 3η έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2021.
- [7] G. Rajendran, C. A. Vaithilingam, N. Misron, K. Naidu and M. R. Ahmed, "A comprehensive review on system architecture and international standards for electric vehicle charging stations," *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103099, 2021.
- [8] A. Triviño, J. M. González-González and J. A. Aguado, "Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 14, no. 6, p. 1547, 2021.
- [9] A. Ahmad, M. S. Alam and R. Chabaan, "A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 38-63, March 2018.
- [10] C. Qiu, K. T. Chau, T. W. Ching and C. Liu, "Overview of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicle," *Journal of Asian Electric Vehicles*, vol. 12, no. 1, pp. 1679-1685, June 2014.
- [11] "Bharat Supply PVU Copper Litz Wire," [Online]. Available: <https://bharatsupply.com/electrical-and-lightning/pvu-copper-litz-wire/>. [Accessed 16 May 2023].
- [12] P. Vishnuram, S. Panchanathan, N. Rajamanickam, V. Krishnasamy, M. Bajaj, M. Piecha, V. Blazek and L. Prokop, "Review of Wireless Charging System: Magnetic Materials, Coil Configurations, Challenges, and Future Perspectives," *Energies*, vol. 16, no. 10, p. 4020, 2023.
- [13] D. Mishra, S. Sitaraman, S. Gandhi, S. Teng, P. M. Raj, H. Sharma and R. Tummala, "Nanomagnetic Structures for Inductive Coupling and Shielding in Wireless Charging

Applications," *2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 941-945, 2015.

- [14] R. Tavakoli, A. Echols, U. Pratik, Z. Pantic, F. Pozo, A. Malakooti and M. Maguire, "Magnetizable concrete composite materials for road-embedded wireless power transfer pads," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 4041-4048, 2017.
- [15] S. Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, 2015.
- [16] H. Jin, L. Wooyoung, G.-H. C., L. Byunghun and R. Chun-Taek, "Characterization of novel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles," *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1975-1979, 2011.
- [17] 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," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 12, p. 3666–3679, 2011.
- [18] 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, no. 12, pp. 5832-5841, 2013.
- [19] K. Lee, Z. Pantic and S. Lukic, "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4592-4602, 2014.
- [20] J. Deng, W. Li, T.-D. Nguyen and S. Li, "Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6130-6140, 2015.
- [21] T. Kan, T.-D. Nguyen, J. C. White, R. K. Malhan and C. C. Mi, "A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology: Analysis and Design," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1638-1650, 2017.
- [22] "GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz to 100 kHz)," *Health Physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [23] "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp. 483-524, 2020.
- [24] "On the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)" (1999/519/EC), Official Journal of the European Communities, 1999.
- [25] "On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)..." (2013/35/EU), Official Journal of the European Union, 2013.

- [26] T. Kan, "Modeling Inductive-Based Wireless Power Transfer Using Ansys Maxwell," Ansys, Inc., May 5, 2020.
- [27] Z. Tang, M. Christini and T. Koga, "Wireless Power Transfer Using Maxwell and Simplorer," Ansys, Inc., 2012.
- [28] G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 28-41, 2013.
- [29] TDK, "Ferrite For Switching Power Supplies", 002-01/20030729/e140, 2004.
- [30] TDK, "Ferrite for Switching Power Supplies", 001-03/20071011/e140_1.
- [31] T. Damatopoulou, S. Angelopoulos, C. Christodoulou, I. Gonos, A. Kladas and E. Hristoforou, "Magnetic Shielding for Electric Car Power Cables," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 59, no. 2, pp. 1-7, 2023.
- [32] Z. Li, K. Yao, D. Li, X. Ni and Z. Lu, "Core loss analysis of Finemet type nanocrystalline alloy ribbon with different thickness.," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 27, no. 5, pp. 588-592, 2017.
- [33] VACUUMSCHMELZE, "EMC Products Based on Nanocrystalline Vitroperm", 2021.
- [34] Hitachi Metals Ltd., "FINEMET EMC COMPONENTS", 2010.
- [35] J. Füzér, P. Kollár, J. Füzérová and S. Roth, "Soft Magnetic Properties of Nanostructured Vitroperm Alloy Powder Cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 2, pp. 471-474, 2010.
- [36] D. Ruiz-Robles, V. Venegas-Rebollar, A. Anaya-Ruiz, E. L. Moreno-Goytia and J. R. Rodríguez-Rodríguez, "Designing an Prototyping Medium-Frequency Transformers Featuring a Nanocrystalline Core for DC–DC Converters," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 2081, 2018.
- [37] M. Budhia, G. A. Covic and J. T. Boys, "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096-3108, 2011.
- [38] Π. Γιακουμάκης, "Μελέτη Κυκλικών Διατάξεων για την Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων," Μαρτίος 2017.
- [39] J. Larminie και J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [40] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao and G. A. Keoleian, "A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility," *Applied Energy*, vol. 179, pp. 413-425, 2016.