



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

Μελέτη αγωγών Litz

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιντζέμπελης Θεόδωρος

Επιβλέπων καθηγητής: Αντώνιος Κλαδάς

Αθήνα, Ιούνιος 2022



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

Μελέτη αγωγών Litz

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιντζέμπελης Θεόδωρος

Επιβλέπων καθηγητής: Αντώνιος Κλαδάς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17/6/2022

.....

Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2022

.....

Ιντζέμπελης Θεόδωρος

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

Copyright © Ιντζέμπελης Θεόδωρος,2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

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 το συγγραφέα.

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

Αφιερώνεται στους γονείς μου Δημήτρη και Σεβαστή
και την αδελφή μου Ευαγγελία.

Περίληψη

Οι αγωγοί Litz έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές που απαιτούν τυλίγματα από αγωγούς ισχύος που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες, όπως σε διατάξεις επαγωγικής θέρμανσης και ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Συστρέφοντας μαζί πολλαπλούς κλώνους μονωμένων αγωγών μικρής διατομής, επιτυγχάνεται να μειωθούν οι απώλειες που οφείλονται στο επιδερμικό φαινόμενο, ωστόσο λόγω του υπερβολικού σχετικού πάχους της μόνωσης και του επιπλέον απαιτούμενου μήκους σύρματος εξαιτίας της δράσης συστροφής, οι αγωγοί Litz δεν είναι σκόπιμο να εφαρμοσθούν σε συχνότητες της τάξεως των MHz ή υψηλότερες.

Η παρούσα εργασία μελετά το πλαίσιο εφαρμογής των αγωγών Litz και την αξιοποίησή τους σε διάφορες διατάξεις. Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει εισαγωγικές πληροφορίες για τους αγωγούς Litz. Συγκεκριμένα, η πρώτη ενότητα του πρώτου κεφαλαίου αναφέρεται στη διαμόρφωση των αγωγών Litz, η δεύτερη ενότητα εξετάζει το πεδίο χρήσης των αγωγών Litz, ενώ η τρίτη ενότητα παρουσιάζει τις διάφορες κατηγορίες των αγωγών Litz.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το επιδερμικό φαινόμενο που διέπει την κατανομή του ρεύματος σε αγωγούς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), καθώς σε περιπτώσεις διατομών αγωγών μεγαλύτερες από το αντίστοιχο πάχος επιδερμίδας για τη συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας, η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και μειώνεται εκθετικά με την απόσταση από την επιφάνεια στο εσωτερικό του αγωγού. Συγκεκριμένα, η πρώτη ενότητα περιγράφει τα χαρακτηριστικά του επιδερμικού φαινομένου, ενώ η δεύτερη ενότητα αναλύει τις απώλειες του αγωγού. Στη συνέχεια, το τρίτο κεφάλαιο μελετά την ελικοειδή διαμόρφωση αγωγών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται μεθοδολογία επιλογής – διαχείρισης κατάλληλων αγωγών Litz με βάση αναλυτικές λύσεις. Συγκεκριμένα η πρώτη ενότητα αναφέρεται στην επιλογή του αριθμού και της διαμέτρου των κλώνων, ενώ στη δεύτερη ενότητα αναλύεται η επιλογή της συνολικής κατασκευής των τυλιγμάτων. Στην τρίτη ενότητα υπολογίζονται οι απώλειες, ενώ στην τέταρτη ενότητα αναλύεται η επιλογή του αριθμού των κλώνων βάσει της διαμέτρου του αγωγού. Το τέταρτο κεφάλαιο καταλήγει με την κατασκευή των τυλιγμάτων και τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων τύπων τυλιγμάτων .

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση της εφαρμογής του υπολογισμού αγωγών Litz και υπολογίζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής πηνίου υψηλής συχνότητας ενώ στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δύο διατάσεων. Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.

Λέξεις κλειδιά

Επιδερμικό φαινόμενο, βάθος επιδερμικού φαινομένου, φαινόμενο γειτνίασης, δινορρέυματα, αριθμός κλώνων, απώλειες, ελικοειδής διαμόρφωση αγωγών.

Abstract

Litz wires are designed for applications that require high frequency power conductors, such as induction heating and wireless charging devices. By twisting multiple wires of small insulated conductors together, the loss due to the skin effect can be reduced; however, due to excessive insulation thickness and extra wire length resulting from the twisting action, Litz conductors applications are not feasible in MHz and greater frequency ranges.

This work examines the structure of Litz wires and their utilization in different applications. The first chapter provides introductory information on Litz wires; thus, the first section of the chapter is devoted to the concept of Litz conductors, the second section refers to the use of Litz wires, while the third section describes the different categories of Litz wires.

In the second chapter the skin effect is described, illustrating that alternating current (AC) in conductors of greater cross section than the skin effect depth is distributed involving current densities higher near the surface of the conductor and decreasing exponentially with the depth in the conductor. To that respect, the first section describes the skin effect characteristics, the second section analyses the losses in the conductor, while the third chapter details the helical conduit configuration.

The fourth chapter presents the selection and management of the Litz wire in the form of a computational tool based on analytical solutions. To that respect, the first section examines the choice of the number and diameter of the strands, the second section analyzes the choice of constructional parameters, while in the third section the respective losses are calculated, and in the fourth section the overall winding configuration is analyzed. The fourth chapter is finalized by describing the construction of high frequency inductors.

Finally, the first part of the fifth chapter presents the implementation of the Litz wire calculation application, but also calculates the winding transformer, while the second part consists of the creation of a Litz conductor transformer, the FR coefficient of resistance is calculated both through the finite element program FEMM and the analytical model and then the results are being compared.

Keywords

Skin effect, skin effect depth, proximity effect, eddy currents, number of strands, losses, helical strand configuration

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας καθώς και για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερος ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να υποβάλλω και στην υποψήφια διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. Μαρία Σοφία Πεχλιβανίδου για την συνεχή υποστήριξη της και συμπαράστασής της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής αυτής.

Ευχαριστίες θα ήθελα να υποβάλλω και σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για την καθοριστική τους συμβολή στην διεκπεραίωση των σπουδών μου με τις πολύτιμες γνώσεις και απόψεις τους και την στήριξή τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την κατανόηση και την στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο ΕΜΠ.

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
1. Εισαγωγή.....	15
1.1. Η Έννοια των Αγωγών Litz.....	15
1.2. Χρήση των Αγωγών Litz.....	17
1.3. Τύποι Αγωγών Litz.....	20
Κεφάλαιο 2. Επιδερμικό Φαινόμενο.....	22
2.1. Ανάλυση του Επιδερμικού Φαινομένου.....	22
2.2. Απώλειες Κυκλώματος.....	27
Κεφάλαιο 3. Ελικοειδής Διαμόρφωση Αγωγών	49
Κεφάλαιο 4. Υπολογισμός Αγωγών Litz.....	66
4.1. Επιλογή αριθμού και διαμέτρου κλώνων	67
4.2. Επιλογή Κατασκευής.....	70
4.3. Υπολογισμός απωλειών.....	71
4.4. Επιλογή αριθμού κλώνων βάσει της διαμέτρου	73
4.5. Κατασκευαστική Διαμόρφωση Τυλιγμάτων	74
4.6. Πηνία Υψηλής Συχνότητας	76
Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία Υπολογισμού Αγωγών Litz	79
Κεφάλαιο 6: Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων με μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων.....	84
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα	94
Βιβλιογραφία	98

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Ιδιότητες της μεθόδου FEM και PEEC.....	35
Πίνακας 2. Λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων ποσοστών απώλειας ισχύος	50
Πίνακας 3. Παράμετροι για οικονομικό σχεδιασμό καλωδίων Litz, το κχρησιμοποιείται στην εξίσωση $ne=k(\delta^2 b)/Ns$	67
Πίνακας προς χάραξη χαρακτηριστικής Fr συχνότητας για καλώδιο	82
Πίνακας 4. Υπολογισμοί επιβάρυνσης αντίστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες...	87
Πίνακας 5. Υπολογισμοί επιβάρυνσης αντίστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες...	88
Πίνακας 6. Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου.....	92
Πίνακας 7. Σύγκριση αναυτικών λύσεων και λύσεων μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.....	9

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Καλώδιο Litz πλεγμένο από 8 επιμέρους σύρματα.....	16
Εικόνα 2. Αύξηση της πυκνότητας ισχύος των μετατροπέων ισχύος στο Fraunhofer IISB.....	25
Εικόνα 3. Οι κυρίαρχες παράμετροι σε ένα επαγωγικό στοιχείο που επηρεάζουν την κατανομή απώλειας ισχύος των τριών μεγάλων συνιστωσών.....	26
Εικόνα 4. Σχήματα καλωδίων Litz για διαφορετικά ηλεκτρικά, θερμικά και μηχανικά φορτία.....	27
Εικόνα 5. Η εσωτερική δομή και συναφείς όροι αγωγών καλωδίων Litz.....	29
Εικόνα 6. Χωρική πυκνότητα ρεύματος για το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο εγγύτητας.....	40
Εικόνα 7. Απώλειες ισχύος στο εύρος συχνοτήτων έως 1 MHz απεικονίζονται για έναν αγωγό διαμέτρου 0.25 mm χρησιμοποιώντας τους αναλυτικούς τύπους με βάση ένα ρεύμα διέγερσης 1 A.....	41
Εικόνα 8. Ιδανικό καλώδιο Litz.....	43
Εικόνα 9. (α) Επίπεδα πηνία με φερρίτη και σύρμα litz.(β) Τοπολογία κυκλώματος για IPT.....	45
Εικόνα 10. Απώλειες ισχύος αγωγών Litz.....	49
Εικόνα 11. Μοντέλο ομόκεντρου κύκλου του σπειροειδούς πηνίου N-σπειρών. (α) Κάτοψη, (β) διατομή.....	54
Εικόνα 12. Ισοδύναμο κύκλωμα σπειροειδούς πηνίου αγωγού Litz για σύστημα UWIPT.....	54
Εικόνα 13. (α) Κυλινδρική δομή του πειραματικού πηνίου με την πλάκα φερρίτη (b) Ισοδύναμη δομή του (a) όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εικόνας για τον υπολογισμό του $\langle B^2 \rangle$	63
Εικόνα 1. (a) Υπολογισμός $\langle B^2 \rangle$ για την ισοδύναμη δομή και προσομοιωμένο $\langle B^2 \rangle$ για την πραγματική δομή για διαφορετικές διαστάσεις της πλάκας σιδηρομαγνήτη(b) Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου ANSYS Maxwell με 1^A_{RMS} ρεύμα περιτύλιξης(c) αντίσταση επίδρασης εγγύτητας υπολογισμένη με τη χρήση $\langle B^2 \rangle$	63
Εικόνα 15. (a) Κατασκευασμένο πηνίο για τη δομή (a) με τετράγωνη πλάκα σιδηρομαγνητικού υλικού διαστάσεων 100 mm × 100 mm × 5 mm. (b) ESR αντίσταση επίδρασης εγγύτητας μέσω υπολογισμού (διακεκομμένη γραμμή) και μέσω μέτρησης (συνεχής γραμμή).....	65

Εικόνα 16. Μαγνητικό πεδίο $dB \rightarrow$ στο σημείο μέτρησης P που δημιουργήθηκε από το μικρό τμήμα του αγωγού $ds \rightarrow$ ρεύμα διέγερσης I	65
Εικόνα 17. Παραδείγματα για τον τρόπο με τον οποίο ο πλάτος περιέλιξης b και ο αριθμός σπειρών ανά ενότητα ορίζονται για ορισμένες κοινές γεωμετρίες περιέλιξης. Κάθε ενότητα που εμφανίζεται έχει έναν αριθμό σπειρών N_s . Ανάλογα με το αν τα διαφορετικά τμήματα μιας δεδομένης περιέλιξης (πρωτεύον P ή δευτερεύον S) είναι παράλληλα ή σειρά, ο συνολικός αριθμός σπειρών N για αυτήν την περιέλιξη μπορεί να είναι ίσος με N_s ή ίσος με το προϊόν N_s και τον αριθμό τμημάτων. Το N_s μπορεί να είναι διαφορετικό για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα.....	69
Εικόνα 28. Διάγραμμα Pareto. Στον άξονα x απεικονίζεται το κόστος χαλκού ενώ στον άξονα y οι απώλειες από την αγωγή του ρεύματος. Εάν θέλουμε να επιτύχουμε λιγότερες απώλειες στους αγωγούς Litz, το κόστος θα πρέπει να αυξηθεί. Υπάρχει όμως ένα μέτωπο όπου είναι δυνατόν να μειωθεί και το κόστος και οι απώλειες χωρίς να επιβαρυνθεί κάποια από τις δύο παραμέτρους. Ισχύει πάντα $1,5 < FR < 2,0$	70
Εικόνα 19. Η περιέλιξη απέχει από ένα διάκενο αέρα επαγωγέα κατά μια ακτίνα r_1	77
Εικόνα 20. Φαινόμενο γειτνίασης.....	85
Εικόνα 21. Κατανομή μονοδιάστατου μαγνητικού πεδίου σε πηνίο με αγωγούς Litz.....	85
Εικόνα 22. Διακριτότητα μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων.....	86
Εικόνα 23. Πυκνότητα μαγνητικής επαγωγής στην καρτεσιανή συμμετρία.....	89
Εικόνα 24. Γραφική απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου όπως αυτό μετρήθηκε από το προηγούμενο διάγραμμα	89
Εικόνα 25. Απεικόνιση της πυκνότητας ρεύματος στην καρτεσιανή συμμετρία.....	90
Εικόνα 26. Πυκνότητα μαγνητικής επαγωγής στην κυλινδρική συμμετρία.....	91
Εικόνα 27. Απεικόνιση της πυκνότητας ρεύματος στην καρτεσιανή συμμετρία.....	91

1. Εισαγωγή

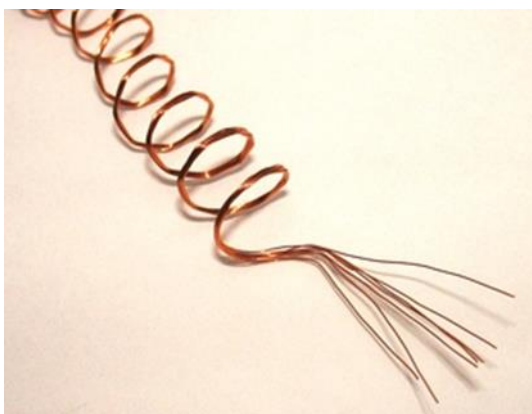
1.1. Η Έννοια των Αγωγών Litz

Τα ηλεκτρικά εξαρτήματα και τα συστήματα εξαπλώνονται σε όλο και περισσότερους τομείς της καθημερινής ζωής. Λόγω της σταθερής προόδου στην απόδοση, τη λειτουργικότητα και την ευρωστία, οι ηλεκτρικές συσκευές έγιναν επιτακτικός βοηθός σε όλες τις καταστάσεις. Επιπλέον, οι πρόσθετες απαιτήσεις σχετικά με την ευελιξία και τη συνδεσιμότητα οφείλονται στην αυξανόμενη σημασία της κινητικότητας στην σημερινή κοινωνία. Μαζί με αυτήν την εξέλιξη, η αποθήκευση, η μεταφορά και η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικές.

Σήμερα, για πολλά ηλεκτρονικά συστήματα υπάρχει μια σαφής τάση για επαγωγικές αντί για αγωγικές συνδέσεις εντός της εφαρμογής και στο δίκτυο. Μία από τις πρωτοποριακές συσκευές σε αυτό το πλαίσιο ήταν η ηλεκτρική οδοντόβουρτσα πριν από πολλές δεκαετίες χρησιμοποιώντας επαγωγική μεταφορά ισχύος. Ωστόσο, το πεδίο εφαρμογής για τέτοια επαγωγικά συστήματα είναι πολύ μεγαλύτερο και περιέχει κινητές και φορητές συσκευές καθώς και επαγωγική φόρτιση για ηλεκτρικά οχήματα.

Ο όρος αγωγός Litz είναι παράγωγο της γερμανικής λέξης "Litzendraht" που σημαίνει πλεκτός (ή αυτός που έχει υφανθεί). Ο αγωγός Litz είναι κατασκευασμένος από επιμέρους μονάδες μονωμένων μαγνητικών συρμάτων τα οποία πλέκονται ή περιστρέφονται για να σχηματίσουν ένα ενιαίο καλώδιο. Η πλέξη ή η περιστροφή των καλωδίων έχει σχεδιαστεί προκειμένου να εξισορροπηθεί η διάρκεια που κάθε μεμονωμένη ίνα καλωδίου καταναλώνει εκτός του αγωγού. Η εταιρεία MWS προσφέρει μονωμένο ή μη μονωμένο αγωγό Litz. Συνεργάζεται στενά με τους καλύτερους παραγωγούς της Litz στις ΗΠΑ, καθώς και με τη μητρική εταιρεία Elektrisola, η οποία είναι ένας από τους μεγαλύτερους παραγωγούς αγωγών Litz στον κόσμο. Σε αντίθεση με ένα απλό καλώδιο, η μόνωση στα μεμονωμένα καλώδια αναγκάζει το ρεύμα να μεταφέρεται εξίσου και ομοιόμορφα σε ολόκληρο τον αγωγό. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι παρουσιάζονται μειωμένες απώλειες από την επιφάνεια (skineffect) στον αγωγό, επιτρέποντας έτσι στο καλώδιο να

χρησιμοποιείται για μεταφορά μεγάλης συχνότητας. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα καλώδιο Litz πλεγμένο από 8 επιμέρους σύρματα.



Εικόνα 1. Καλώδιο Litz πλεγμένο από 8 επιμέρους σύρματα

Λόγω των χαμηλών ηλεκτρικών απωλειών και της ευκολίας συγκόλλησης, η μαγνητική μόνωση σύρματος που χρησιμοποιείται συνήθως είναι πολυουρεθάνη ή πολυουρεθάνη με επίστρωση νάιλον. Οι αγωγοί Litz είναι συχνά μονωμένοι με ένα συνολικό μονό ή διπλό περιτύλιγμα από νάιλονκλωστοϋφαντουργικό προϊόν που παρέχει επιπλέον αντοχή στην τριβή. Ο καθορισμός της συχνότητας λειτουργίας της εφαρμογής είναι το πιο σημαντικό κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός αγωγού Litz. Η συχνότητα λειτουργίας θα καθορίσει τόσο την κατασκευή Litz όσο και το μεμονωμένο εύρος καλωδίων.

Οι αγωγοί Litz χρησιμοποιούνται κατεξοχήν σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή συχνότητα από 10kHz μέχρι κάποια MHz. Ορισμένες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται αγωγοί Litz είναι τα συστήματα Αντένα, ο εξοπλισμός εμφιάλωσης, τα ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα, οι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ηλεκτρικές μηχανές, διάφορα μηχανήματα έγχυσης πλαστικών καλουπιών, οι μετασχηματιστές, οι ηλιακοί μετατροπείς, οι βιομηχανικοί κινητήρες, τα τραίνα Maglev με μαγνητική αιώρηση, οι αεροστρόβιλοι, τα συστήματα ασύρματης μετάδοσης κ.α.

Ο αγωγός Litz είναι κατασκευασμένος με μεμονωμένα σύρματα που κυμαίνονται από 28 έως 48 AWG. Οι τυποποιημένες μονωτικές μεμβράνες μαγνητικού φιλμ της MWS περιλαμβάνουν πολυουρεθάνη, πολυουρεθάνη/νάιλον σε μονή ή βαριά κατασκευή. Συνήθως παρέχεται συγκολλημένος πολυεστέρας, συγκολλημένος πολυεστέρας/νάιλον, πολυεστέρας/πολυαμίδιο-ιμίδιο και πολυιμίδιο -

που χρησιμοποιούνται για τη μόνωση κάθε σύρματος. Η εξωτερική μόνωση και η μόνωση στους αγωγούς των εξαρτημάτων, σε ορισμένα στυλ, μπορεί να είναι πλέξεις από νάιλον. Πολυεστέρας θερμοσφραγισμένος πολυεστέρας, πολυαμίδιο και ταινίες PTFE μαζί με εξώθηση των περισσότερων θερμοπλαστικών διατίθενται επίσης ως εξωτερική μόνωση εάν οι εφαρμογές υπαγορεύουν ειδικές απαιτήσεις για διακοπή τάσης ή προστασία του περιβάλλοντος.

1.2. Χρήση των Αγωγών Litz

Καθώς εφευρέθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του 1800, ο αγωγός Litz άλλαξε τον τρόπο διαμόρφωσης των καλωδίων. Ο αγωγός Litz χρησιμοποιείται συνήθως για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των μετασχηματιστών υψηλής συχνότητας, των επαγωγέων και των πηνίων και μεταφέρει εναλλασσόμενο ρεύμα σε ραδιοσυχνότητες. Αυτός ο τύπος καλωδίου προσφέρει πολλά σημαντικά οφέλη, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε μαγνητικά εξαρτήματα. Προσφέρει τα εξής βασικά οφέλη:

- Μείωση του επιδερμικού φαινομένου ("skineffect"). Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα σε αγωγούς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Τα ρεύματα αυτά εμφανίζονται πιο πυκνά κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Το επιδερμικό βάθος "skindpth" μειώνεται με τη μείωση των συχνοτήτων, καθιστώντας το ζήτημα αυτό μάλλον άτοπο σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας πολλαπλά καλώδια μέσα σε ένα καλώδιο, ο αγωγός Litz ελαχιστοποιεί αυτό το αποτέλεσμα διανέμοντας ρεύμα εναλλασσόμενου ρεύματος σε ολόκληρο το καλώδιο αντί να αφήνει να ταξιδέψει κατά μήκος της επιφάνειας. Η χρήση λεπτότερων καλωδίων χαλκού διασφαλίζει ότι κάθε ένα σύρμα διαθέτει μικρότερη ακτίνα από το επιδερμικό βάθος. Ως εκ τούτου, η διάμετρος κάθε χάλκινου σύρματος πρέπει να είναι μικρότερη, να σχετίζεται άμεσα με την τιμή της συχνότητας.
- Μείωση φαινομένου γεινίασης. Το φαινόμενο της γεινίασης συναντάται όταν δύο γειτονικοί αγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από τους δύο αγωγούς δημιουργούν αντίθετες μεταξύ τους δυνάμεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό του ρεύματος σε μικρότερες περιοχές, με την ενεργό διατομή του αγωγού να μειώνεται και παράλληλα να αυξάνεται η ωμική του αντίσταση.

- Αύξηση της απόδοσης. Η αυξημένη αντίσταση και οι απώλειες που προκαλούνται από τα δύο προαναφερθέντα φαινόμενα σχετίζονται με αξιοσημείωτες πτώσεις της απόδοσης. Αυτό ισχύει στα καλώδια, και διπλάσιες απώλειες παρατηρούνται σε μετασχηματιστές και επαγωγείς που χρησιμοποιούν καλώδια που επηρεάζονται. Ωστόσο, η χρήση αγωγού Litz σε επαγωγείς και μετασχηματιστές, επιτρέπει σε αυτά τα εξαρτήματα να λειτουργούν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα απόδοσης.
- Μείωση βάρους. Απαιτούνται χαμηλότεροι όγκοι αγώγιμου υλικού. Ένα τυπικό σύρμα χαλκού θα πρέπει να έχει πολύ μεγαλύτερη περιφέρεια από τις συνδυασμένες περιφέρειες όλων των συρμάτων ενός αγωγού Litz για να μεταφέρει αποτελεσματικά την ίδια ποσότητα ρεύματος υψηλής συχνότητας. Αν και το σύρμα Litz μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό συρμάτων, ο συνδυασμένος όγκος είναι χαμηλότερος, μειώνοντας έτσι το βάρος. Αυτό είναι ιδανικό για μια σειρά εφαρμογών, ιδιαίτερα επαγωγέων και μετασχηματιστών, οι οποίοι μειώνονται σε μέγεθος καθώς αυξάνονται οι συχνότητες λειτουργίας.
- Άλλα:
 - Αποφυγή εμφάνισης σημείων με υψηλή θερμοκρασία
 - Επιτρέπει χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας

Ο στόχος της χρήσης αγωγού Litz είναι να μειωθεί η αντίσταση τοποθετώντας περισσότερο αγώγιμο υλικό κοντά στην επιφάνεια του αγωγού, εκεί όπου ταξιδεύουν τα ρεύματα υψηλής συχνότητας. Ο αγωγός Litz μειώνει το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο εγγύτητας με τους ακόλουθους τρόπους:

- Οι λεπτοί αγωγοί σε μέγεθος μικρότερο από το επιδερμικό βάθος μετριάζουν σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες.
- Η μόνωση μεμβράνης πολυουρεθάνης-νάιλον μειώνει την ηλεκτρομαγνητική αντίσταση που παράγεται από το φαινόμενο εγγύτητας
- Τα μοτίβα ύφανσης και / ή συστροφής μειώνουν την αντίσταση επιτρέποντας σε κάθε σύρμα να εναλλάσσεται μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού μοτίβου ύφανσης, συστροφής ή πλεξούδας.
- Τα μαγνητικά πεδία των συρμάτων που δημιουργούνται από το ρέον ρεύμα κινούνται σε κατευθύνσεις που μειώνουν την τάση τους να δημιουργούν αντίθετα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μεταξύ των κλώνων. Η εξάλειψη ή η

σημαντική μείωση αυτών των δύο παραγόντων αντίστασης σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας είναι αυτό που το καθιστά αποτελεσματικό.

Επιδερμικό ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το εναλλασσόμενο ρεύμα διακλαδίζεται κατά μήκος του αγωγού με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος αντί να μεταφέρεται συσσωρεύεται στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού και απομακρύνεται από το εσωτερικό του χωρίς να έχει αξιοποιηθεί. Ο όρος επιδερμικό φαινόμενο προέρχεται από το γεγονός ότι, όταν η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ υψηλή μόνο μία πολύ μικρή στρώση ροής του ρεύματος αξιοποιείται και είναι εκείνη που βρίσκεται στην εσωτερική επιφάνεια του καλωδίου. Το βάθος στο οποίο βρίσκεται αυτό το λεπτό στρώμα ονομάζεται επιδερμικό βάθος. Δεδομένου ότι η αντίσταση ενός αγωγού είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογη με τη διατομή του υλικού, έχοντας εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας αντί για συνεχές ρεύματα, αυξάνεται σημαντικά η αντίσταση του αγωγού.

Προκειμένου να επιλυθεί το επιδερμικό φαινόμενο, επινοήθηκε ο αγωγός Litz. Χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο το οποίο είναι πολύ λεπτό, πιο λεπτό και από το επιδερμικό βάθος, ο αγωγός μονώνεται έτσι ώστε και στο κάθε επιμέρους σύρμα να μην εμφανίζεται το φαινόμενο οπότε ούτε και συνολικά στον αγωγό. Έτσι δημιουργούνται πολλές ηλεκτρικά πανομοιότυπες διαδρομές για την ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας την αντίσταση.

Οι αγωγοί Litz χρησιμοποιούνται κατεξοχήν σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή συχνότητα από 10kHz μέχρι κάποια MHz.

Τα μεγέθη αγωγών Litz εκφράζονται συχνά με δύο αριθμούς, N και AWG, όπου N είναι ο αριθμός των μεμονωμένων συρμάτων και AWG είναι το μέγεθος του AmericanWireGauge για κάθε σκέλος. Για παράδειγμα, ένα σύρμα 45/33 σημαίνει 45 σύρματα και τα 33 AWG είναι στριμμένα μεταξύ τους. Δεδομένου ότι το επιδερμικό φαινόμενο είναι αντιστρόφως ανάλογο με την τετραγωνική ρίζα της συχνότητας, για να είναι αποτελεσματικός ένας αγωγός Litz σε υψηλές συχνότητες θα πρέπει κάθε καλώδιο να έχει περίπου το ίδιο μέγεθος με το επιδερμικό βάθος σε αυτήν τη συχνότητα. Για χαλκό, το επιδερμικό βάθος στα 10 kHz είναι 660 μm , στα 100 kHz είναι 210 μm , στα 1 MHz είναι 66 μm , και στα 10 MHz είναι 21 μm . Αυτό ισοδυναμεί με 22 AWG για 10 kHz, 32 AWG για 100 kHz, 42 AWG για 1 MHz και

52 AWG για 10 MHz. Στην πραγματικότητα, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός AWG, τόσο πιο ακριβός γίνεται ο αγωγός Litz και τόσο πιο δύσκολο να το αγοράσετε. Μια εταιρεία όπως η NewEnglandWireTechnologies που ειδικεύεται σε καλώδια και καλώδια προσφέρει μόνο αγωγούς Litz έως 48 AWG, το οποίο έχει σχεδιαστεί για λειτουργία 1,4 MHz έως 2,8 MHz. Όταν το μέγεθος του σύρματος γίνεται τόσο μικρό, το πάχος της μόνωσης γύρω από κάθε σύρμα αρχίζει να γίνεται σημαντικό σε σύγκριση με το μέγεθος του σύρματος, οπότε αρχίζει να χρησιμοποιείται η διατομή του αγωγού. Στο τέλος του φάσματος, όταν η συχνότητα είναι πάνω από 6 MHz, ο αγωγός Litz δεν προσφέρει πλέον κανένα όφελος.

Η συγκεκριμένη εργασία μελετά τους αγωγούς Litz σε κάθε φάσμα τους. Έτσι, η εργασία προηγουμένως περιέγραψε το πεδίο των αγωγών Litz. Στα επόμενα κεφάλαια, η εργασία διερευνά το επιδερμικό φαινόμενο, την ελικοειδή διαμόρφωση αγωγών και τη διαχείριση αγωγού Litz με βάση κώδικα και καταλήγει με τα συμπεράσματα.

1.3. Τύποι Αγωγών Litz

Η NewEnglandWireTechnologies είναι ένας πρωτοπόρος και κορυφαίος σχεδιαστής και κατασκευαστής καλωδίων Litz και ειδικών περιελίξεων. Ο αγωγός Litz αποτελείται από έναν αριθμό μονωμένων συρμάτων που πλέκονται σε ομοιόμορφο σχέδιο με πρωταρχικό όφελος τη μείωση των απωλειών εναλλασσόμενου ρεύματος σε υψηλές συχνότητες. Προσφέρονται και οι 8 τύποι κατασκευών αγωγών Litz με πολλαπλές ποικιλίες μόνωσης για να ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις αντοχής στην τάση του οργανισμού ή / και της συγκεκριμένης τάσης των πελατών.

Τύπος 1: Ένα καλώδιο μονωμένο με λεπτό υμένιο σύρμα, στριμμένο με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 2: Δέσμες σύρματος τύπου 1 Litz στριμμένες μαζί με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 3: Δέσμες αγωγών Litz με μόνωση τύπου 2 στριμμένα μαζί με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 4: Δέσμες αγωγών Litz τύπου 2 που περιστρέφονται γύρω από έναν κεντρικό πυρήνα ιών με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 5: Μονωμένες δέσμες αγωγών Litz τύπου 2 που περιστρέφονται γύρω από έναν πυρήνα ιών με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 6: Μονωμένες δέσμες αγωγών Litz τύπου 4 που περιστρέφονται γύρω από έναν πυρήνα ιών με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 7: Μονωμένο με λεπτό υμένιο σύρμα πλεγμένο και διαμορφωμένο σε ορθογώνιο προφίλ με προαιρετική εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Τύπος 8: Σύμπλεγμα από μονωμένα με λεπτό υμένιο σύρματα ή ομάδες συμπιεσμένων μονωμένων με λεπτό υμένιο συρμάτων στριμμένα και συμπιεσμένα σε ορθογώνιο προφίλ με εξωτερική μόνωση υφαντικών νημάτων, ταινιών ή εξωθημένων ενώσεων.

Κεφάλαιο 2. Επιδερμικό Φαινόμενο

2.1. Ανάλυση του Επιδερμικού Φαινομένου

Το επιδερμικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC) κατανέμεται εντός ενός αγωγού έτσι ώστε η πυκνότητα ρεύματος να είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και να μειώνεται εκθετικά με το βάθος στον αγωγό. Το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει κυρίως στην «επιδερμίδα», μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας και ενός επιπέδου που ονομάζεται επιδερμικό βάθος. Το επιδερμικό βάθος εξαρτάται από τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. καθώς αυξάνεται η συχνότητα, η ροή ρεύματος κινείται στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα μικρότερο επιδερμικό βάθος. Το επιδερμικό φαινόμενο μειώνει την αποτελεσματική διατομή του αγωγού. Στα 60 Hz σε χαλκό, το επιδερμικό βάθος είναι περίπου 8,5 mm. Σε υψηλές συχνότητες το επιδερμικό βάθος γίνεται πολύ μικρότερο. Η αυξημένη αντίσταση AC που προκαλείται από το επιδερμικό φαινόμενο μπορεί να μετριαστεί χρησιμοποιώντας αγωγούς Litz. Το επιδερμικό φαινόμενο έχει πρακτικές συνέπειες στην ανάλυση και στο σχεδιασμό κυκλωμάτων ραδιοσυχνοτήτων και μικροκυμάτων, γραμμών μετάδοσης (ή κυματοδηγών) και κεραιών. Είναι επίσης σημαντικό στις συχνότητες δικτύου (50-60 Hz) στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος. Είναι ένας από τους λόγους για την προτίμηση συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης για μετάδοση ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Το αποτέλεσμα παρουσιάστηκε για πρώτη φορά σε ένα έγγραφο από τον Horace Lamb το 1883 για την περίπτωση των σφαιρικών αγωγών και γενικεύτηκε σε αγωγούς οποιουδήποτε σχήματος από τον Oliver Heaviside το 1885.

Οι αγωγοί, συνήθως με τη μορφή καλωδίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας ή σημάτων χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενο ρεύμα που ρέει μέσω αυτού του αγωγού. Οι φορείς φορτίου που συνιστούν αυτό το ρεύμα, συνήθως ηλεκτρόνια, οδηγούνται από ένα ηλεκτρικό πεδίο λόγω της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα ρεύμα σε έναν αγωγό παράγει ένα μαγνητικό πεδίο μέσα και γύρω από τον αγωγό. Όταν αλλάζει η ένταση του ρεύματος σε έναν αγωγό, αλλάζει επίσης και το μαγνητικό πεδίο. Η αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο, με τη σειρά της, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο που αντιτίθεται στη μεταβολή της έντασης ρεύματος. Αυτό το αντίθετο ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη ΗΕΔ. Ανεξάρτητα από την κινητήρια δύναμη, η τρέχουσα πυκνότητα είναι

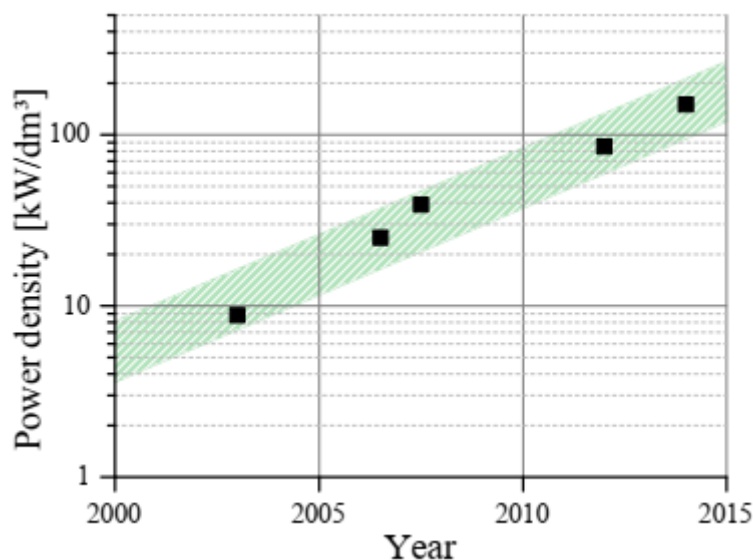
μεγαλύτερη στην επιφάνεια του αγωγού, και μειώνεται με το βάθος. Αυτή η μείωση της τρέχουσας πυκνότητας είναι γνωστή ως επιδερμικό φαινόμενο και το επιδερμικό βάθος αποτελεί το βάθος εκείνο στο οποίο η τρέχουσα πυκνότητα πέφτει στο $1/e$ της ονομαστικής τιμής της κοντά στην επιφάνεια. Πάνω από το 98% του ρεύματος θα ρέει μέσα σε ένα στρώμα 4 φορές το βάθος του δέρματος από την επιφάνεια. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει από εκείνη του συνεχούς ρεύματος που συνήθως θα κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή του καλωδίου. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα μπορεί επίσης να προκληθεί σε έναν αγωγό λόγω εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με το νόμο επαγωγής. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που προσκρούει σε έναν αγωγό θα παράγει γενικά ένα τέτοιο ρεύμα. Αυτό εξηγεί την αντανάκλαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από μέταλλα. Μάλιστα το επιδερμικό βάθος ελαττώνεται με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος

Μία τεχνική για τη μείωση της αντίστασης είναι η τοποθέτηση περισσότερου αγώγιμου υλικού κοντά στην επιφάνεια όπου βρίσκεται το ρεύμα αντικαθιστώντας το σύρμα με ένα κοίλο χαλκόσωληνα. Η μεγαλύτερη επιφάνεια του αγωγού παρουσιάζει πολύ μικρότερη αντίσταση σε σχέση με ένα σύρμα ίδιας διατομής. Τα πηνία δεξαμενής ραδιοπομπού υψηλής ισχύος είναι συχνά κατασκευασμένα από χαλκοσωλήνες, επιχρυσωμένες στο εξωτερικό, για μείωση της αντίστασης. Ωστόσο, η σωλήνωση δεν είναι ευέλικτη και απαιτεί ειδικά εργαλεία για κάμψη και σχήμα. Ο αγωγός Litz είναι μια άλλη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί ένα λανθάνον σύρμα με ατομικά μονωμένους αγωγούς (σχηματίζοντας δέσμη). Κάθε λεπτός αγωγός έχει μικρότερο βάθος από το δέρμα, οπότε ένας μεμονωμένος κλώνος δεν υφίσταται σημαντική απώλεια επίδρασης στο δέρμα. Τα νήματα πρέπει να είναι μονωμένα το ένα από το άλλο - αλλιώς όλα τα καλώδια στη δέσμη θα βραχυκυκλώνονταν μεταξύ τους, θα συμπεριφερόταν σαν ένα μεγάλο καλώδιο και θα εξακολουθούσαν να έχουν προβλήματα στο δέρμα. Επιπλέον, οι κλώνοι δεν μπορούν να καταλάβουν την ίδια ακτινική θέση στη δέσμη σε μεγάλες αποστάσεις: τα ηλεκτρομαγνητικά αποτελέσματα που προκαλούν το αποτέλεσμα του δέρματος θα εξακολουθούσαν να διαταράσσουν την αγωγιμότητα. Το μοτίβο ύφανσης ή συστροφής των συρμάτων στη δέσμη έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα μεμονωμένα σκέλη να βρίσκονται στο εξωτερικό της δέσμης για μια απόσταση (όπου οι αλλαγές H/M πεδίου είναι μικρότερες και το σκέλος βλέπει χαμηλή αντίσταση), και είναι μέσα σε απόσταση (όπου οι αλλαγές H/M πεδίου είναι οι ισχυρότερες και η αντίσταση είναι υψηλότερη). Εάν κάθε σκέλος έχει συγκρίσιμη σύνθετη αντίσταση, το ρεύμα κατανέμεται εξίσου μεταξύ κάθε σκέλους

εντός του καλωδίου. Αυτό επιτρέπει στο εσωτερικό του αγωγού Litz να συμβάλει στη συνολική αγωγιμότητα της δέσμης. Ένας άλλος τρόπος για να εξηγήσουμε το πλεονέκτημα της πλέξης Litz είναι ο εξής: τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από το ρεύμα που ρέει στους κλώνους είναι σε κατευθύνσεις έτσι ώστε να έχουν μειωμένη τάση να δημιουργούν ένα αντίθετο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στους άλλους κλώνους. Έτσι, για τον αγωγό στο σύνολό του, μειώνεται το επιδερμικό φαινόμενο καθώς και οι σχετικές απώλειες ισχύος όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Η αναλογία κατανεμημένης επαγωγής προς κατανεμημένη αντίσταση αυξάνεται, σε σχέση με έναν συμπαγή αγωγό, με αποτέλεσμα υψηλότερο συντελεστή Q σε αυτές τις συχνότητες. Ο αγωγός Litz είναι πολύ αποτελεσματικός κάτω από 500 kHz. Σπάνια χρησιμοποιείται πάνω από 2 MHz καθώς είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματικό εκεί. Σε συχνότητες άνω των 1 MHz, τα οφέλη αντισταθμίζονται σταδιακά από την επίδραση της παρασιτικής χωρητικότητας μεταξύ των κλώνων. Στις συχνότητες μικροκυμάτων, το επιδερμικό βάθος είναι πολύ μικρότερο από τη διάμετρο των κλώνων και το ρεύμα που ωθείται μέσω των εσωτερικών κλώνων προκαλεί έντονα ρεύματα στα εξωτερικά σκέλη, γεγονός που αναιρεί τα πλεονεκτήματα του αγωγού Litz. Ο αγωγός Litz παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση ανά μονάδα διατομής, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερα πάχη, προκειμένου να μειωθεί ή να διατηρηθεί η αντίσταση του αγωγού σε υψηλότερες συχνότητες. Η κατασκευή αγωγών Litz συνήθως περιλαμβάνει εξαιρετικά λεπτά σύρματα που συχνά διατίθενται με ασημένια πλάκα ή συμπαγές ασήμι. Οι μεμονωμένοι κλώνοι χρησιμοποιούν συχνά μια επίστρωση βερνικιού χαμηλής θερμοκρασίας που κατά τη σύνδεση αφαιρείται, ενώ απαιτεί τήξη σιδήρου στην επαφή που επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικού κολλητηριού που αναπτύσσει μεγάλη θερμοκρασία στο σημείο της σύνδεσης. Οι δέσμες των καλωδίων μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν εξωτερική μόνωση από μετάξι.

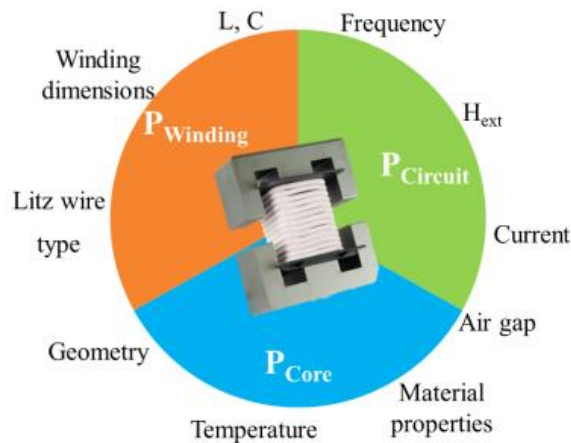
Σε εφαρμογές όπου πολλαπλά καλώδια που φέρουν το ίδιο ρεύμα βρίσκονται δίπλα-δίπλα, όπως σε περιελίξεις επαγωγέα και μετασχηματιστή, ένα δεύτερο παρόμοιο φαινόμενο που ονομάζεται φαινόμενο εγγύτητας προκαλεί πρόσθετο συσσωρευμένο ρεύμα, με αποτέλεσμα μια επιπλέον αύξηση της αντίστασης του σύρματος, ως αποτέλεσμα της αύξησης της συχνότητας. Το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με αυτό του επιδερμικού φαινομένου. Το ρεύμα συσσωρεύεται σε μια μικρότερη περιοχή διατομής του καλωδίου με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης

Τις τελευταίες δεκαετίες, η απόδοση βασικών εξαρτημάτων στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και κατά συνέπεια ολόκληρη η απόδοση του συστήματος παρουσίασε σημαντική πρόοδο. Σε αυτήν τη διαδικασία, η πιο αξιοσημείωτη ανάπτυξη λαμβάνει χώρα στον τομέα των συσκευών ημιαγωγών. Παρακάτω φαίνεται η αύξηση της πυκνότητας ισχύος των μετατροπέων ισχύος στο Fraunhofer IISB.



Εικόνα 2. Αύξηση της πυκνότητας ισχύος των μετατροπέων ισχύος στο Fraunhofer IISB

Τα κοινά διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) επιτρέπουν διακοπτικές συχνότητες στην περιοχή εκατοντάδων kilohertz ή ακόμη και gigahertz για εφαρμογές αρκετών κιλοβάτ. Σε συνδυασμό με νέα υλικά και βελτιώσεις στη διαδικασία κατασκευής πυκνωτών, σιδηρομαγνητών και αγωγών, η απόδοση των ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος συνεχώς βελτιώνεται. Στην εικόνα 3, φαίνονται οι κυρίαρχες παράμετροι σε ένα επαγωγικό στοιχείο που επηρεάζουν την κατανομή απώλειας ισχύος των τριών μεγάλων συνιστωσών, δηλαδή τις απώλειες κυκλώματος, πυρήνα και τυλιγμάτων.



Εικόνα 3. Οι κυρίαρχες παράμετροι σε ένα επαγωγικό στοιχείο που επηρεάζουν την κατανομή απώλειας ισχύος των τριών μεγάλων συνιστωσών.

Εκτός από μια μοναδική αύξηση ισχύος, η μείωση του χώρου εγκατάστασης και η υψηλότερη απόδοση των συσκευών έγινε μια από τις κινητήριες δυνάμεις για έρευνα και ανάπτυξη. Από αυτή την άποψη, οι συνολικές απώλειες ισχύος ανήκουν στους πιο κρίσιμους παράγοντες στο σχεδιασμό επαγωγικών συστημάτων. Γενικά, αυτές οι απώλειες διαχωρίζονται συνήθως σε απώλειες κυκλώματος, πυρήνα και τυλιγμάτων. Η πρώτη συνιστώσα αντιστοιχεί σε όλες τις απώλειες που δημιουργούνται στην πλακέτα κυκλώματος, όπως οιδιακοπτικές απώλειες του τρανζίστορ ή οι απώλειες στις διόδους. Τόσο ο πυρήνας όσο και οι απώλειες τυλίγματος συμβαίνουν στο επαγωγικό στοιχείο - το πρώτο στον πυρήνα που προκαλείται από τη χρονική αλλαγή της μαγνήτισης, το δεύτερο προκύπτει από την ωμική αντίσταση του αγωγού.

Στην πραγματικότητα, ο ποσοτικός προσδιορισμός των διαφόρων συνιστωσών απωλειών είναι πολύ περίπλοκος, επειδή οι περισσότερες απώλειες μετατρέπονται σε θερμότητα. Μια διάκριση με τη χρήση μετρήσεων για το ποιο μέρος ενός επαγωγικού συστήματος θερμαίνεται από ποιο παρασιτικό φαινόμενο, είναι πολύ χρονοβόρα και δαπανηρή και σχεδόν αδύνατη όσον αφορά τις ρεαλιστικές συνθήκες εργασίας. Κατά συνέπεια, μια στοχευμένη βελτιστοποίηση επαγωγικών συστημάτων είναι πολύ δύσκολη, ειδικά σε μια κατάσταση πρώιμης ανάπτυξης ή στην περίπτωση νέων σχεδιαστικών εννοιών. Ωστόσο, εκτός από μετρήσεις και βασικούς αναλυτικούς τύπους, οι μηχανικοί υποστηρίζονται όλο και περισσότερο από μια ποικιλία προσομοιώσεων που καλύπτουν τον ηλεκτρικό, μηχανικό τομέα. Λαμβάνοντας υπόψη τον διαχωρισμό των συνολικών απωλειών ισχύος που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα διαφορετικά στοιχεία απώλειας απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις

επίλυσης. Στη συνέχεια, η τρέχουσα κατάσταση των μεθόδων προσομοίωσης συνοψίζεται και για τις τρεις περιπτώσεις (απώλειες κυκλώματος, πυρήνα και τυλιγμάτων) και αναλύεται με έμφαση στα βασικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες όσον αφορά την επίλυση των απωλειών για επαγωγικά συστήματα.

2.2. Απώλειες Κυκλώματος

Οι απώλειες κυκλώματος επιλύονται κυρίως σε προσομοιωτές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όπως το SPICE, το PLECS ή το Simploer. Όλα έχουν κοινό, ότι η τοπολογία του κυκλώματος μεταφέρεται σε ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων. Το πιο δύσκολο έργο σε αυτό το πλαίσιο δεν είναι η μαθηματική αξιολόγηση των εξισώσεων, αλλά η ακριβής περιγραφή των ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Συνήθως, οι πληροφορίες που παρέχονται στα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών δεν καλύπτουν ολόκληρη την πολυπλοκότητα των πραγματικών συσκευών. Λόγω της έντονης μη γραμμικής συμπεριφοράς των διόδων ή των τρανζίστορ, οι οριακές αποκλίσεις σε μία μόνο χαρακτηριστική τιμή αποδίδουν εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα για ολόκληρο το κύκλωμα, ειδικά όσον αφορά τις ποσότητες που εξαρτώνται από το χρόνο. Κατά συνέπεια, όσον αφορά τις απώλειες κυκλώματος, επενδύονται σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες [1], [2] για τη βελτίωση του χαρακτηρισμού των ηλεκτρικών εξαρτημάτων, ενώ η ενίσχυση της προσέγγισης επίλυσης και των βασικών αλγορίθμων έχει μικρή μόνο σημασία. Παρακάτω, φαίνονται διάφορα σχήματα αγωγών Litz για διαφορετικά ηλεκτρικά, θερμικά και μηχανικά φορτία.



Εικόνα 4. Σχήματα καλωδίων Litz για διαφορετικά ηλεκτρικά, θερμικά και μηχανικά φορτία

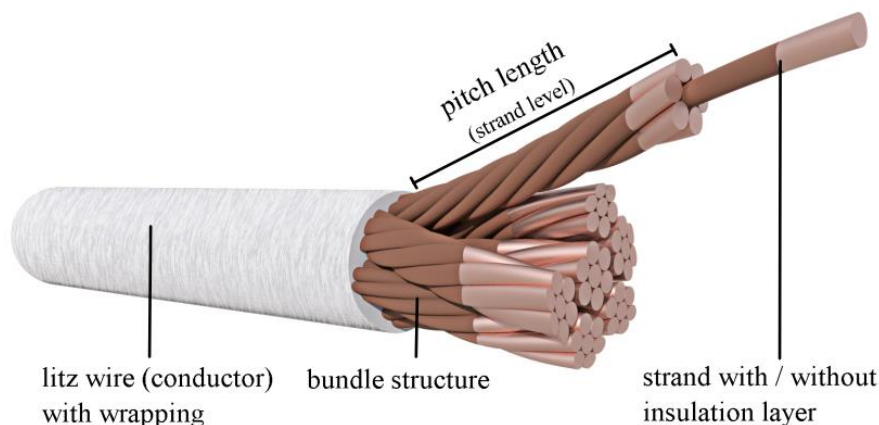
Τα βασικά αποτελέσματα των απωλειών/ πυρήνα έχουν ήδη μελετηθεί πριν από έναν αιώνα από τον K. Steinmetz[3]. Η μαγνήτιση και η απομαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού λόγω της έκθεσης σε ένα χρονικά εξαρτώμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί τις αποκαλούμενες απώλειες υστέρησης. Με τη βοήθεια του τύπου

Steinmetz αυτές οι απώλειες μπορούν να προσεγγιστούν για ένα καθορισμένο υλικό. Σε κοινά εμπορικά προγράμματα που χρησιμοποιούν τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η προσέγγιση Steinmetz υλοποιείται και εφαρμόζεται σε κάθε στοιχείο λαμβάνοντας υπόψη το τοπικό μαγνητικό πεδίο[4]. Γενικά, οι απαιτούμενοι συντελεστές Steinmetz (ή σχετικές καμπύλες για τον υπολογισμό τους) βασίζονται σε μετρήσεις ενός συγκεκριμένου γεωμετρικού σχήματος, συνήθως ενός τοροειδούς. Ωστόσο, οι μετρήσεις επαλήθευσης έχουν αποδείξει σημαντική απόκλιση αυτών των συντελεστών ανάλογα με τη συχνότητα και τη γεωμετρία. Επομένως, λόγω της έλλειψης προσεγγίσεων μεταφοράς από τοροειδές σχήμα σε αυθαίρετες γεωμετρίες, αυτές οι μετρήσεις απαιτούνται για όλες τις γεωμετρικές τροποποιήσεις των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Επιπλέον, σε αυξανόμενες συχνότητες αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού. Παρόλο που οι απόλυτες τιμές είναι αρκετά μικρές (0.2 – 2.0 S/m), οι κοινές προσομοιώσεις FEM επιτρέπουν την ανάλυση των δινορευμάτων που οδηγούν σε επιπλέον απώλειες στους πυρήνες από μαγνητικό υλικό. Παρόμοια με τις απώλειες υστέρησης, μια ακριβής πρόβλεψη αυτών των αποτελεσμάτων στην προσομοίωση απαιτεί έναν καλό χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του υλικού. Από αριθμητική άποψη, ένας ακριβής υπολογισμός των βασικών απωλειών είναι εφικτός με κοινές μεθόδους, αλλά απαιτεί λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το υλικό που είναι πολύ δαπανηρό και χρονοβόρο σε περίπτωση μη τυποποιημένων γεωμετριών.

Οι απώλειες τυλιγμάτων (επίσης γνωστές ως απώλειες χαλκού) περιλαμβάνουν όλες τις ωμικές απώλειες εντός του αγωγού. Με βάση τη γεωμετρία και το υλικό του αγωγού, οι απώλειες συνεχούς ρεύματος (DC) μπορούν να υπολογιστούν για μια δεδομένη διέγερση. Σε περίπτωση εναλλασσόμενων ρευμάτων (AC), η κατανομή πυκνότητας ρεύματος εντός του αγωγού αλλάζει σημαντικά λόγω των επαγόμενων δινορευμάτων. Πρώτον, το ίδιο το εναλλασσόμενο ρεύμα προκαλεί αυξανόμενη πυκνότητα ρεύματος στα εξωτερικά στρώματα του αγωγού (επιδερμικό φαινόμενο). Δεύτερον, τα χρονικά μεταβαλλόμενα εξωτερικά μαγνητικά πεδία επάγουν δινορεύματα εντός του αγωγού, με αποτέλεσμα μια ανομοιογενή συγκέντρωση της πυκνότητας ρεύματος εντός της διατομής (φαινόμενο εγγύτητας). Στην πραγματικότητα, αυτά τα δύο αποτελέσματα μειώνουν την ενεργό περιοχή της αγωγίμης διατομής και ως εκ τούτου προκαλούν το κυρίαρχο ποσοστό των απωλειών τυλιγμάτων σε κοινές εφαρμογές.

Παρακάτω φαίνεται η εσωτερική δομή και συναφείς όροι αγωγών καλωδίων Litz.



Εικόνα 5. Η εσωτερική δομή και συναφείς όροι αγωγών καλωδίων Litz.

Οι επιπτώσεις των επιδερμικών απωλειών και απωλειών εγγύτητας καθώς και η αναλυτική σχέση για απλοποιημένους συμπαγείς αγωγούς σε 2D είναι αρκετά γνωστές. Ωστόσο, το σχήμα των αγωγών έχει αλλάξει τις τελευταίες δεκαετίες. Αντί των μονόκλωνων καλωδίων, οι κοινές εφαρμογές υψηλής συχνότητας χρησιμοποιούν αγωγούς με αρκετές εκατοντάδες κλώνους που έχουν απομονωθεί μεταξύ τους και στρίβονται με έναν εξελιγμένο τρόπο σε διάφορα επίπεδα γεωμετρίας.

Δυστυχώς, η ορολογία των λεγόμενων «αγωγών Litz» δεν είναι αντίστοιχη στη βιβλιογραφία και τη βιομηχανία. Στην προηγούμενη εικόνα παρέχονται οι σχετικοί τεχνικοί όροι που χρησιμοποιούνται με βάση ένα σχηματικό ενός αγωγού Litz, ξεκινώντας από ολόκληρο τον αγωγό, τη δομή της δέσμης, και τους κλώνους καθώς και τα μήκη βήματος σε διάφορα επίπεδα γεωμετρίας.

Αυτοί οι ειδικοί αγωγοί μειώνουν σημαντικά τις απώλειες τυλιγμάτων, αλλά περιπλέκουν επίσης την προσομοίωσή τους λόγω της υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας και της υπέρθεσης διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων σε διαφορετικά επίπεδα γεωμετρίας (κλώνοι, δέσμη ή αγωγός). Οι κοινές μέθοδοι χρησιμοποιούν μετρημένους συντελεστές του πραγματικού αγωγού ή προσπαθούν να προσεγγίσουν την κλωνική δομή με ομογενοποίηση. Τα τελευταία χρόνια, οι πρώτες αριθμητικές προσεγγίσεις έχουν αποδείξει τις δυνατότητές τους ακόμη και για σύνθετες δομές καλωδίων Litz με βάση τη μέθοδο ισοδύναμου κυκλώματος μερικών στοιχείων (PEEC)[5].

Όλες αυτές οι προσεγγίσεις έχουν από κοινού ότι περιορίζονται στον ίδιο τον αγωγό Litz. Ωστόσο, εκτός από την απαίτηση για περαιτέρω βελτιώσεις αυτών των

μεμονωμένων μεθόδων, η κύρια πρόκληση προκύπτει από τη χρήση αυτών των σύνθετων αγωγών Litz σε ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος: Η εσωτερική δομή micro μεγέθους του αγωγού Litz επηρεάζει τις απώλειες ισχύος στο μακροσκοπικό επίπεδο συστήματος.

Μέχρι τώρα, δεν υπάρχει διαθέσιμη αλγοριθμική προσέγγιση, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό ενός τέτοιου προβλήματος πολλαπλής κλίμακας για ένα ολόκληρο επαγωγικό σύστημα, όπως απλά πηνία αέρα ή στραγγαλιστικά πηνία με πυρήνες φερρίτη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η λίστα δεν παρέχει ένα συμπέρασμα όλων των δραστηριοτήτων όσον αφορά την έρευνα και τις δυνατότητες βελτίωσης, αλλά μάλλον καταδεικνύει ποια σημεία εμποδίζουν την ακριβέστερη προσομοίωση στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος [6].

Προς το παρόν, ο κύριος περιορισμός που λαμβάνει υπόψη τον προσδιορισμό των απωλειών κυκλώματος και πυρήνα δίνεται από τον ανεπαρκή χαρακτηρισμό των ηλεκτρικών εξαρτημάτων και των μαγνητικών υλικών. Εάν αυτά τα δεδομένα εισόδου είναι γνωστά, οι αλγόριθμοι προσομοίωσης θα επιτύχουν μια αρκετά υψηλή ακρίβεια και στις δύο περιπτώσεις. Σε αντίθεση με αυτό, ο υπολογισμός των απωλειών τυλιγμάτων αποτυγχάνει κυρίως λόγω της έλλειψης κατάλληλης μεθοδολογίας προσομοίωσης. Ακόμα κι αν υπάρχει ακριβής χαρακτηρισμός ενός αγωγού καλωδίου Litz, δεν θα υπάρχει διαθέσιμη στρατηγική ή ροή εργασίας προσομοίωσης για τη χρήση αυτών των δεδομένων για τον προσδιορισμό των απωλειών τυλιγμάτων σε μια ηλεκτρονική συσκευή ή σύστημα ισχύος.

Κατά συνέπεια, το πεδίο της εργασίας του [6] καλύπτει το σχεδιασμό και την εφαρμογή μιας ροής εργασίας προσομοίωσης, επιτρέποντας τον υπολογισμό των απωλειών τυλίγματος σε επαγωγικά συστήματα με αγωγούς καλωδίων Litz. Ο πρωταρχικός στόχος αποσκοπεί συνεπώς στην επίλυση της πολυπλοκότητας των πραγματικών εφαρμογών, αφενός, η λεπτομερής γεωμετρία των επαγωγικών εξαρτημάτων και αφετέρου, η εσωτερική δομή των αγωγών καλωδίου Litz.

Εκτός από αυτό, πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες απαιτήσεις όπως:

- Για λόγους επαλήθευσης, τα θεμελιώδη φυσικά φαινόμενα πρέπει να αναγνωριστούν και να επιλυθούν ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα διαφορετικών προσεγγίσεων επίλυσης πρέπει να αξιολογούνται σε σχέση με την ακρίβεια και την προσπάθειά τους και να συγκρίνονται με τις αναλυτικές μεθόδους.

- Οι επαληθεύσεις με μετρήσεις ολόκληρου του συστήματος πρέπει να αποδεικνύουν την ακρίβεια της ροής εργασιών προσομοίωσης ή να υποδεικνύουν ποιες προσαρμογές και βελτιώσεις απαιτούνται επιπλέον.
- Η προσομοίωση πρέπει να ταιριάζει σε κοινές διαδικασίες ανάπτυξης επαγωγικών στοιχείων και να παρέχει διεπαφές σε τυπικές μορφές αρχείων CAD.
- Μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) που παρέχει το χειρισμό αρχείων και την οπτικοποίηση όλων των σχετικών αποτελεσμάτων, επιτρέπει σε μια μεγαλύτερη κοινότητα χρηστών να χρησιμοποιήσει τη ροή εργασιών προσομοίωσης. Η προκύπτουσα ανατροφοδότηση επιτρέπει μια διαδικασία ανάπτυξης που καθοδηγείται από τον χρήστη και συνοδεύεται από προσαρμοσμένη υιοθέτηση και βελτίωση της ροής εργασίας.

Ακόμη και αν πληρούνται όλα τα αναφερόμενα στοιχεία, η καθιέρωση μιας νέας προσέγγισης προσομοίωσης ή ακόμη και η αποδοχή της στην κοινότητα των μηχανικών δεν είναι εγγυημένη καθόλου. Ωστόσο, θα βοηθούσε να ξεπεραστεί ή ακόμη και να μειωθεί το χάσμα μεταξύ των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και των μετρήσεων.

Το θεωρητικό υπόβαθρο των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παρουσιάζεται με έμφαση στις απώλειες ισχύος στα συστήματα καλωδίων Litz. Αναλυτικές και αριθμητικές προσεγγίσεις επίλυσης συζητούνται και συγκρίνονται ως προς την πρακτική τους εφαρμογή.

Στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, η κύρια εστίαση είναι στα επίπεδα στοιχείου και συστήματος. Η ηλεκτρική συμπεριφορά μιας συσκευής είναι ως επί το πλείστον πολύ περίπλοκη - ωστόσο, προκύπτει από την υπέρθεση διαφορετικών φυσικών φαινομένων. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται βασικές μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν το φυσικό σύστημα στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής.

Στο πρώτο μισό του 19ου αιώνα, πραγματοποιήθηκαν βασικές επιστημονικές έρευνες για την ηλεκτρική αντίσταση και τις ηλεκτρικές απώλειες από τους GeorgSimonOhm(1827) και JamesPrescottJoule(1842). Ο νόμος των Ohm και Joule που προκύπτει επιτρέπει τον υπολογισμό των ηλεκτρικών απωλειών για συνεχή ρεύματα (DC): Οι απώλειες ισχύος σε ένα γραμμικό αγωγό μήκους l με μια διατομή A και μια ειδική ηλεκτρική αντίσταση ρ δίνονται από

$$P_{DC} = I \cdot U = I^2 \cdot R_{DC} = I^2 \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

για συνεχές ρεύμα I .

Σε κοινές εφαρμογές ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος, αυτοί οι υπολογισμοί πρέπει να επεκταθούν στον τομέα των εναλλασσόμενων ρευμάτων (AC). Λόγω της υπέρθεσης των χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εμφανίζονται επιπλέον φαινόμενα.

Η γενική περιγραφή της φυσικής πίσω από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία δίνεται πρώτα από τις εξισώσεις του Maxwell(1865). Αυτές οι εξισώσεις είναι τυποποιημένες για περισσότερο από έναν αιώνα, συνεπώς η προέλευση είναι καλά τεκμηριωμένη και μπορεί να μελετηθεί σε διάφορες δημοσιεύσεις[7].

Από μαθηματική άποψη, οι εξισώσεις του Maxwell είναι ένα συζευγμένο σύστημα γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDE) για τις μεταβλητές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου \vec{E} , \vec{H} , \vec{B} , και \vec{D} , και τις πυκνότητες ρεύματος και φορτίου \vec{J} και ρ , αντίστοιχα. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι σταθερές ιδιότητες υλικού των ϵ , μ και σ .

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο κοινές διατυπώσεις των εξισώσεων του Maxwell που περιγράφουν πώς δημιουργούνται και αλληλεπιδρούν ρεύματα και φορτία με ηλεκτρομαγνητικά πεδία:

Διαφορική μορφή

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

Ολοκληρωτική μορφή

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_A \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A} \quad (3)$$

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_v \rho_v dv \quad (4)$$

$$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (5)$$

Και επιπρόσθετα

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \vec{B} = \mu \vec{H} \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

Με

$\vec{E} \left[\frac{V}{m} \right]$ – Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

$\vec{H} \left[\frac{A}{m} \right]$ – Ένταση μαγνητικού πεδίου

$\vec{D} \left[\frac{C}{m^2} \right]$ – Πυκνότητα ηλεκτρικής ροής

$\vec{B} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ – Πυκνότητα μαγνητικής ροής

$\rho_v \left[\frac{C}{m^3} \right]$ – Χωρική πυκνότητα φορτίου

$\vec{j} \left[\frac{A}{m^2} \right]$ – Χωρική πυκνότητα ρεύματος

$\epsilon \left[\frac{F}{m} \right]$ – Χωρητικότητα του μέσου

$\mu \left[\frac{H}{m} \right]$ – Επαγωγή του μέσου

$\sigma \left[\frac{1}{\Omega m} \right]$ – Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Κατ' αρχήν, και οι δύο μορφές περιγράφουν το ίδιο φυσικό σύστημα και είναι κατάλληλες για την επίλυση όλων των ειδών ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Ωστόσο, η μαθηματική και υπολογιστική προσπάθεια ποικίλλει έντονα από περίπτωση σε περίπτωση, ανάλογα με την επιλεγμένη μορφή. Λεπτομέρειες για τη μαθηματική θεωρία του συστήματος εξισώσεων παρέχονται από [8], ειδικά με έμφαση στη μοναδικότητα και την ύπαρξη της λύσης.

Οι απλοποιήσεις των εξισώσεων του Maxwell είναι συχνές στην εφαρμογή σε πραγματικά συστήματα και χρησιμοποιούνται συχνά σε περίπτωση κυρίαρχων φαινομένων:

- Μαγνητοστατική περίπτωση

Οι χρονικά μεταβαλλόμενοι όροι ηλεκτρικού (dD/dt) ή μαγνητικού πεδίου (dB/dt) παραμελούνται, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των εξισώσεων για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

- Ηλεκτροστατική περίπτωση

Λαμβάνονται υπόψη μόνο τα σταθερά ηλεκτρικά φορτία και συνεπώς οι όροι πεδίου που μεταβάλλονται με το χρόνο (dD/dt και dB/dt) παραλείπονται σε επίπεδο εξίσωσης.

- Τμηματικά στατική περίπτωση

Πλήρεις εξισώσεις του Maxwell στις οποίες τα ρεύματα μετατόπισης (λόγω χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων dD/dt) παραμελούνται.

Με βάση αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο, οι προσεγγίσεις επίλυσης συζητούνται στα επόμενα κεφάλαια με έμφαση στα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος που χρησιμοποιούν αγωγούς καλωδίων Litz.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος «επίλυσης» σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων και επομένως των εξισώσεων του Maxwell, είναι μια πειραματική ρύθμιση και μετρήσεις. Ωστόσο, στο πεδίο των πειραμάτων, ο διαχωρισμός των αποτελεσμάτων είναι πολύ δύσκολος ή ακόμη και αδύνατος. Επιπλέον, ειδικά στις βιομηχανίες, ο αριθμός των πειραμάτων και των πρωτύπων κατά τη διαδικασία ανάπτυξης πρέπει να μειωθεί για λόγους κόστους και χρόνου.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα, η μόνη εναλλακτική λύση στα πειράματα ήταν οι αναλυτικές προσεγγίσεις που επιλύουν τις εξισώσεις του Maxwell για απλοποιημένες γεωμετρίες. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι χρησιμοποιούν διαχωρισμό μεταβλητών ή επεκτάσεις σειράς για την επίλυση του αντίστοιχου PDE[8]. Μερικοί γνωστοί τύποι για απώλεια επιδερμικού φαινομένου και απώλεια φαινομένου εγγύτητας στο 2D που βασίζονται στον διαχωρισμό των μεταβλητών παρουσιάζονται στο επόμενο μέρος. Αν και αυτά τα αποτελέσματα είναι μια ακριβής λύση των εξισώσεων του Maxwell, η χρήση σε επίπεδο συστήματος είναι περιορισμένη λόγω του περιορισμού σε πολύ βασικές γεωμετρίες.

Στο 2ο μισό του 20ού αιώνα, νέες μέθοδοι βασισμένες σε αριθμητικές προσεγγίσεις έγιναν δημοφιλείς[9] λεπτομέρειες σχετικά με τις πρώτες ιστορικές μεθόδους μέχρι τις τελευταίες τεχνικές προσεγγίσεις παρέχονται χρονολογικά από τον[10]. Σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους, οι αριθμητικές προσεγγίσεις υπολογίζουν μια προσέγγιση της ακριβούς λύσης. Στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής, καθορίζονται δύο βασικές προσεγγίσεις που διαφέρουν σημαντικά στις αριθμητικές τεχνικές τους και στην υποκείμενη μαθηματική διατύπωση:

Σε τεχνικές που βασίζονται σε διαφορικά, ολόκληρη η δομή - συμπεριλαμβανομένου του περιβάλλοντος μέσου (δηλαδή αέρα) - πρέπει να διακριτοποιηθεί. Εκτός από τον ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών στα σύνορα του πεδίου προσομοίωσης, το αριθμητικό σύστημα πρέπει να

παραμετροποιηθεί για να δώσει μια μοναδική λύση. Η λύση αποτελείται από τιμές πεδίου (\vec{E} , \vec{H} , και \vec{J}) στους κόμβους των στοιχείων.

Οι προσεγγίσεις με ολοκληρώματα στην ηλεκτρομαγνητική λαμβάνουν υπόψη μόνο αγώγιμα υλικά και τη διέγερσή τους. Τα στοιχεία του πλέγματος που προκύπτουν αντιμετωπίζονται σαν στοιχεία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Μετά το συνδυασμό όλων των στοιχείων σε ένα τεράστιο ηλεκτρικό κύκλωμα, το σύστημα μπορεί να απλοποιηθεί και να επιλυθεί σε επίπεδο κυκλώματος (δηλαδή με εργαλεία προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων). Η προκύπτουσα λύση εκφράζεται με ακέραιες ποσότητες όπως L , R και C . Παρακάτω, αναφέρονται ορισμένες σημαντικές ιδιότητες της μεθόδου FEM και PEEC.

Πίνακας 1. Ιδιότητες της μεθόδου FEM και PEEC

	FEM	PEEC
Μορφή	Διαφορική	Ολοκληρωτική
Μεταβλητή Λύσης	H/M Πεδίο	Κύκλωμα
ΠεδίοΛύσης	Πεδίοχρόνου, συχνότητας	Πεδίοχρόνου, συχνότητας
Πλεονεκτήματα	Πολύπλοκα υλικά, δυνατότητα για μειωμένο μοντέλο χρησιμοποιώντας συμμετρικές οριακές συνθήκες, τυποποιημένα εργαλεία και διαθέσιμα CAD.	Μειωμένη πολυπλοκότητα στην επίλυση σάρωσης συχνότητας, μείωση του αριθμού των στοιχείων με περιορισμό σε αγώγιμα υλικά.
Μειονεκτήματα	Μεγάλοι αραιοί πίνακες, ακρίβεια ανάλυσης αέρα.	Αξιολόγηση της συνάρτησης του Green, μη αραιοί πίνακες, προβλήματα με μαγνητικά υλικά.

Στον τομέα των ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων, η διαφορική μορφή χρησιμοποιείται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (FDM) και στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Η ολοκληρωτική μορφή επιτρέπει τη χρήση μεθόδων οριακών στοιχείων (BE), όπως στη μέθοδο ροπών (MoM) και στη μέθοδο ισοδύναμου κυκλώματος μερικών στοιχείων (PEEC).

Αναφορές σχετικά με τις τέσσερις μεθόδους παρέχονται από τον[11], συμπεριλαμβανομένου ενός σημείου αναφοράς σχετικά με την ακρίβεια και την

ανάλυση σύνθετων γεωμετριών. Στη συνέχεια, η περιγραφή περιορίζεται στη μέθοδο FEM και PEEC, επειδή αυτές οι μέθοδοι είναι οι πιο προηγμένες και στις δύο συνθέσεις που περιγράφονται παραπάνω. Με βάση τον [11], ορισμένες σχετικές ιδιότητες και των δύο μεθόδων συνοψίζονται στον παραπάνω πίνακα.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου FEM και PEEC είναι πολύ γενικά και διαφέρουν σημαντικά όσον αφορά την εφαρμογή και τη σχετική περίπτωση γεωμετρίας. Στα ακόλουθα υποκεφάλαια, οι αναπτύξεις εστιάζονται σε μονόκλωνους και πολύκλωνους αγωγούς σε ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος. Οι σχετικές προσεγγίσεις τελευταίας τεχνολογίας παρουσιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τις μεθόδους ανάλυσης και τις αριθμητικές τεχνικές FEM και PEEC. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι προσεγγίσεις εισάγονται αρχικά γενικά, ακολουθούμενες από περιγραφή της προσαρμογής τους σε συστήματα αγωγών Litz. Τα ακριβή αναλυτικά αποτελέσματα για έναν μονόκλωνο αγωγό χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων για τη μέθοδο FEM ώστε να επιτευχθεί επαρκώς υψηλή ακρίβεια της λύσης. Αυτές οι απαιτήσεις για τη μέθοδο FEM επιβάλλονται σε γεωμετρίες πολύ μεγαλύτερης πολυπλοκότητας και τα αποτελέσματα της μεθόδου FEM συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της μεθόδου PEEC.

Τα συγκεκριμένα οφέλη της μεθόδου PEEC σε σύγκριση με την προσέγγιση FEM επεξεργάζονται με έμφαση στα συστήματα αγωγών Litz και όλα τα ευρήματα συνοψίζονται σε ξεχωριστή ενότητα συμπερασμάτων στο τέλος αυτού του κεφαλαίου.

Σε όλους τους φυσικούς τομείς οι αναλυτικές προσεγγίσεις είναι κοινές, αλλά η πολυπλοκότητά τους διαφέρει έντονα μεταξύ διαφορετικών φυσικών συστημάτων. Οι εξισώσεις κίνησης είναι απλές στην επίλυσή τους ωστόσο η ύπαρξη και ομαλότητα τρισδιάστατων λύσεων των εξισώσεων Navier-Stokes δεν έχουν ακόμη αποδειχθεί.

Στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής, η διατύπωση των εξισώσεων του Maxwell (2) - (5) περιγράφει όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ρευμάτων, φορτίων και (ηλεκτρικών και μαγνητικών) πεδίων. Ωστόσο, οι αναλυτικές προσεγγίσεις λύσεων για πλήρη συστήματα 3D είναι πολύ περίπλοκες και είναι διαθέσιμες μόνο για ορισμένα θεωρητικά παραδείγματα [8]. Κατά συνέπεια, σε γενικές γραμμές, δεν υπάρχουν ακριβείς αναλυτικές προσεγγίσεις για την επίλυση πραγματικών τρισδιάστατων ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων [12] [13].

Ωστόσο, χωρίς απώλεια ακρίβειας, η πολυπλοκότητα ορισμένων πραγματικών συστημάτων μπορεί να μειωθεί και επομένως απλοποιεί το σύστημα εξισώσεων:

- Το αμελητέο των μικρών επιδράσεων όπως τα ρεύματα μετατόπισης οδηγεί σε παράλειψη όρων σε επίπεδο εξίσωσης.
- Τα συμμετρικά συστήματα μπορούν να μειωθούν σε προβλήματα με χαμηλότερη πολυπλοκότητα ή ακόμα και χαμηλότερη διάσταση που επιτρέπουν λιγότερο πολύπλοκες μαθηματικές λειτουργίες και μεγαλύτερη ποικιλία μαθηματικών προσεγγίσεων.

Μια πολύ συνηθισμένη απλοποίηση στον τομέα των γραμμών μεταφοράς [14] είναι η χρήση τμηματικά στατικών μοντέλων σε μια δισδιάστατη γεωμετρία. Το φυσικό σύστημα θεωρείται ότι είναι ίσο κατά μήκος του αγωγού με δύο κυρίαρχα αποτελέσματα:

Η χρονικά μεταβαλλόμενη διέγερση προκαλεί δινορεύματα στον ίδιο τον αγωγό και επίσης σε γειτονικούς αγωγούς. Σε υψηλότερες συχνότητες, η κατανομή πυκνότητας ρεύματος τείνει να είναι υψηλότερη σε περιοχές κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Επιπλέον, τα εναλλασσόμενα ρεύματα επηρεάζουν τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία έξω από τους αγωγούς. Αυτά τα πεδία διεγείρουν ρεύματα σε διπλανούς αγωγούς και προκαλούν επιπρόσθετες τροποποιήσεις της κατανομής πυκνότητας ρεύματος από το λεγόμενο *φαινόμενο εγγύτητας*. Και οι δύο επιδράσεις στην κατανομή πυκνότητας ρεύματος μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά, ξεκινώντας από τη λειτουργία *στροβιλισμού (curl)* και στις δύο πλευρές της εξίσωσης (3):

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\frac{d(\nabla \times \vec{B})}{dt} = -\frac{d(\nabla \times \mu \vec{H})}{dt} = -\mu \frac{d\left(\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}\right)}{dt} \quad (7)$$

Στο επόμενο βήμα, η εξίσωση (7) τροποποιείται αμελώντας το ρεύμα μετατόπισης $d\vec{D}/dt$ (τμηματικά στατική λύση) και υποθέτοντας ένα ομοιογενές μέσο $\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\kappa}$:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{J} = -\mu \kappa \frac{d\vec{J}}{dt} \quad (8)$$

Σε περίπτωση κυκλικού γραμμικού αγωγού στην κατεύθυνση z , το σύστημα συντεταγμένων μπορεί να αλλάξει σε κυλινδρικές συντεταγμένες, με αποτέλεσμα πυκνότητα ρεύματος $\vec{J} = \vec{J}(r, \varphi, z) = J_r \vec{e}_r + J_\varphi \vec{e}_\varphi + J_z \vec{e}_z$

Εστιάζοντας στην επίδραση του επιδερμικού φαινομένου, πρέπει να ληφθεί υπόψη μόνο μια ακτινική εξάρτηση της πυκνότητας ρεύματος (η οποία έχει μόνο μια συνιστώσα στην κατεύθυνση z):

$$\vec{J} = J_z(r)\vec{e}_z \quad (9)$$

Η λειτουργία στροβιλισμού στις αντίστοιχες κυλινδρικές συντεταγμένες [23] αποδίδει

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{J} &= -\vec{e}_\phi \frac{dJ_z}{dr} \\ \nabla \times \nabla \times \vec{J} &= -\left[\frac{1}{r} \frac{dJ_z}{dr} + \frac{d^2J_z}{d^2r} \right] \cdot \vec{e}_z \end{aligned} \quad (10)$$

Η χρονική διακύμανση του J_z εξαρτάται από το σήμα της διέγερσης. Υποθέτοντας μια ημιτονοειδήσμορφή, η πυκνότητα ρεύματος δίνεται από:

$$J_z(r, t) = \hat{J}_z(r)e^{j\omega t} \quad (11)$$

που μπορούν να εφαρμοστούν στο συνδυασμό εξισώσεων (8) και (10):

$$\frac{d^2\hat{J}_z(r)e^{j\omega t}}{d^2r} + \frac{1}{r} \frac{d\hat{J}_z(r)e^{j\omega t}}{dr} = \mu\kappa \frac{d(\hat{J}_z(r)e^{j\omega t})}{dt} = \mu\kappa j\omega \hat{J}_z(r)e^{j\omega t} \quad (12)$$

$$\Rightarrow \& \frac{d^2\hat{J}_z(r)}{d^2r} + \frac{1}{r} \frac{d\hat{J}_z(r)}{dr} - \mu\kappa j\omega \hat{J}_z(r) = 0$$

Αυτή η μερική διαφορική εξίσωση μπορεί να μετατραπεί σε διαφορική εξίσωση Bessel (Muhtethaler, 2012) με αντικατάσταση (από το z). Το προκύπτον απλοποιημένο σύστημα:

$$z^2 \frac{d^2\hat{J}_z}{dz^2} + z \frac{d\hat{J}_z}{dz} + (z^2 - 0)\hat{J}_z = 0 \quad (13)$$

μπορεί να λυθεί με δύο κύριες προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις Kelvin ή Bessel. [7].

Σε αυτή την εργασία, προσεγγίσεις που βασίζονται σε τροποποιημένες συναρτήσεις Bessel του μηδενικού (I_0) και του πρώτου (I_1) είδους χρησιμοποιούνται για την επίλυση της (13).

Υποθέτοντας έναν μονόκλωνο αγωγό με διάμετρο $2a$, η προκύπτουσα κατανομή πυκνότητας ρεύματος σε δεδομένη ακτίνα r δίνεται από:

$$\hat{J}(r) = \frac{\hat{I}}{2\pi a^2} \frac{\alpha a I_0(\alpha r)}{I_1(\alpha a)} \quad (14)$$

Για το επιδερμικό φαινόμενο, και:

$$\hat{j}(r, \varphi) = \frac{2\hat{H}}{a} \frac{\alpha a I_1(\alpha r)}{I_0(\alpha a)} \sin \varphi \quad (15)$$

Για το φαινόμενο εγγύτητας. Και οι δύο εξισώσεις επιτρέπουν τον υπολογισμό της (κατευθυνόμενης-z) πυκνότητας ρεύματος σε 2D. Ωστόσο, στην περίπτωση του φαινομένου εγγύτητας, η κατανομή δεν είναι πλέον περιστροφικά συμμετρική και εξαρτάται από την κατεύθυνση του πλάτους του ημιτονοειδούς εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H: Πιο συγκεκριμένα, το j (στην εξίσωση 15) αντιστοιχεί στη γωνία μεταξύ της συντεταγμένης ενός σημείου μέσα στον αγωγό (σε κυλινδρικές συντεταγμένες) και της κατεύθυνσης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στον οποίο εκτίθεται ο αγωγός. Η εξάρτηση συχνότητας περιλαμβάνεται και στις δύο περιπτώσεις στο:

$$\alpha = \frac{1+j}{\delta} \quad (16)$$

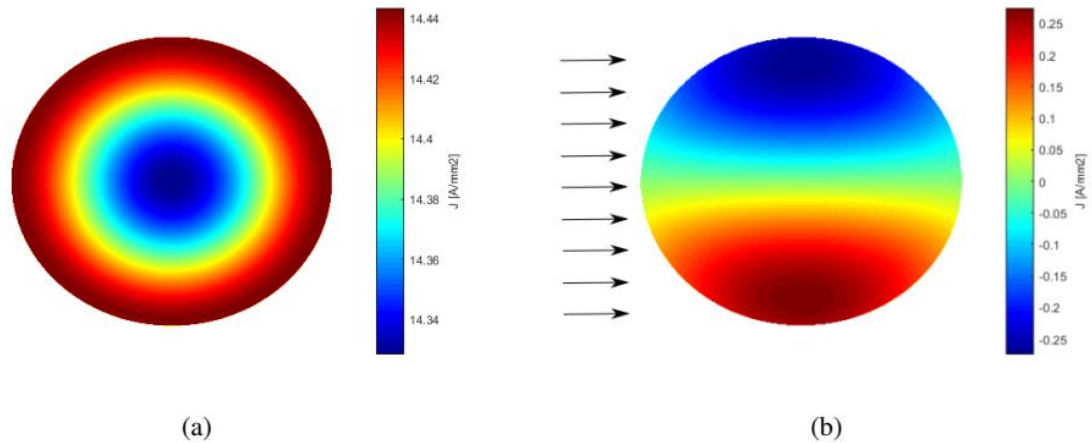
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}, \quad (17)$$

όπου δ το επιδερμικό βάθος, χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική ειδική αντίσταση ρ και τη μαγνητική διαπερατότητα μ .

Στην παρακάτω εικόνα, η κατανομή πυκνότητας ρεύματος των φαινομένων επιδερμίδας (100 kHz) και εγγύτητας (100 kHz με πλάτος εξωτερικού μαγνητικού πεδίου 500 A/m) απεικονίζεται για έναν αγωγό με διάμετρο 0.25 mm.

Συνοψίζοντας, η αναλυτική μέθοδος που περιγράφεται παραπάνω παρέχει μια ακριβή λύση της χωρικής πυκνότητας του ρεύματος για το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο εγγύτητας, λαμβάνοντας υπόψη τους ακόλουθους περιορισμούς:

- Το φυσικό μοντέλο απλοποιείται στην τμηματικά στατική περίπτωση (εξίσωση 8).
- Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του μέσου θεωρούνται ότι είναι ομοιογενείς (εξίσωση 8).
- Η γεωμετρία του αγωγού θεωρείται ότι είναι ευθεία με μήκος που εκτείνεται στο άπειρο με μόνο μια ακτινική εξάρτηση της κατανομής πυκνότητας ρεύματος (εξίσωση 9).
- Η διέγερση έχει ημιτονοειδές σχήμα (εξίσωση 11) και η ποσότητα εισόδου αντιστοιχεί στο ρεύμα I και πλάτος του (εξωτερικού) μαγνητικού πεδίου H, αντίστοιχα.



Εικόνα 6. Χωρική πυκνότητα ρεύματος για το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο εγγύτητας

Η απλούστερη περίπτωση ενός καλωδίου είναι ένας απλός μονόκλωνος γραμμικός αγωγός. Υποθέτοντας έναν άπειρα μεγάλο αγωγό, η ακριβής λύση της κατανομής πυκνότητας ρεύματος σε αυτό το τρισδιάστατο σύστημα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση τμηματικά στατικής επίλυσης που εφαρμόζεται στην 2D διατομή.

Στα πραγματικά συστήματα, ειδικά στον τομέα των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος, η δομή του αγωγού είναι πολύ πιο σύνθετη και συγκεκριμένα δεν είναι ευθεία. Ωστόσο, όλα τα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε αγωγούς - ακόμη και σε καλώδια υψηλής συχνότητας (HF) Litz με εκατοντάδες κλώνους - μπορούν να προσεγγιστούν τοπικά με αυτό το απλοποιημένο μοντέλο.

Το μεγάλο όφελος των αναλυτικών προσεγγίσεων είναι η δυνατότητα διαχωρισμού των φυσικών αποτελεσμάτων και προσδιορισμού της συνάφειάς τους σε σύγκριση με το σύνολο των απωλειών.

Σε περίπτωση κυκλικών αγωγών και ομοιογενών εξωτερικών μαγνητικών πεδίων, οι απώλειες του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου εγγύτητας μπορούν να υπολογιστούν ξεχωριστά λόγω της ορθογωνικότητάς τους. Με βάση τις απώλειες συνεχούς ρεύματος P_{DC} (εξίσωση 1), το σύνολο των απωλειών ισχύος που εξαρτώνται από τη συχνότητα δίνονται από:

$$P_{loss} = P_{DC} + P_{skin} + P_{prox} \quad (18)$$

Μια πολύ βολική μέθοδος για τον υπολογισμό των απωλειών που εξαρτώνται από τη συχνότητα βασίζεται στην ολοκλήρωση της εξίσωσης (14) και (15) στην εγκάρσια τομή του αγωγού [30]. Οι προκύπτουσες εξισώσεις παρέχουν μια κλειστή μορφή για απώλειες του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου εγγύτητας σε

γραμμικούς αγωγούς. Η επιδερμική απώλεια P_{skin} σε έναν αγωγό με ακτίνα a δίνεται από

$$P_{\text{skin}} = I_{\text{RMS}}^2 R_{\text{DC}} \cdot (F_s - 1) \quad (19)$$

Με τον επιδερμικό συντελεστή

$$F_s = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \alpha a \frac{I_0(\alpha a)}{I_1(\alpha a)} \right\} \quad (20)$$

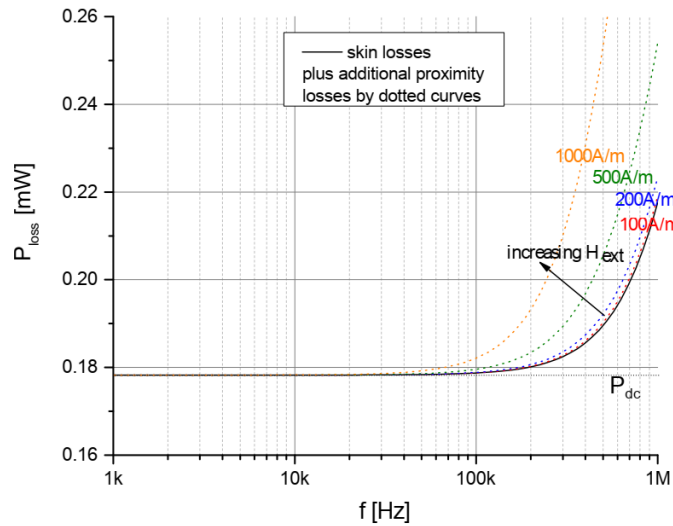
Ο επισημασμένος όρος -1 στην εξίσωση (19) συχνά παραλείπεται - σε τέτοιες περιπτώσεις ο τύπος αντιπροσωπεύει και τις δύο, τις απώλειες του επιδερμικού οι οποίες εξαρτώνται από τη συχνότητα, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών DC.

Υποθέτοντας έναν γραμμικό αγωγό μήκους l που εκτίθεται σε ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο \hat{H} (ορθογώνιο προς την κατεύθυνση του l), οι απώλειες εγγύτητας δίδονται από

$$P_{\text{prox}} = \frac{l}{\kappa} \hat{H}^2 \cdot D_s \quad (21)$$

Με το συντελεστή εγγύτητας και την ειδική αγωγιμότητα κ .

$$D_s = 2\pi \text{Re} \left\{ \alpha a \frac{I_1(\alpha a)}{I_0(\alpha a)} \right\} \quad (22)$$



Εικόνα 7. Απώλειες ισχύος στο εύρος συχνοτήτων έως 1 MHz απεικονίζονται για έναν αγωγό διαμέτρου 0.25 mm χρησιμοποιώντας τους αναλυτικούς τύπους με βάση ένα ρεύμα διέγερσης 1 A

Στην Εικόνα 7, οι απώλειες ισχύος στο εύρος συχνοτήτων έως 1 MHz απεικονίζονται για έναν αγωγό διαμέτρου 0.25 mm χρησιμοποιώντας τους αναλυτικούς τύπους με βάση ένα ρεύμα διέγερσης 1 A. Εκτός από το βασικό

ποσοστό απώλειας του R_{DC} , απώλειες που εξαρτώνται από τη συχνότητα του P_{skin} απεικονίζονται ως μια μαύρη συμπαγής γραμμή.

Επιπλέον, οι P_{prox} για ποικίλα εξωτερικά μαγνητικά πεδία στο σχετικό εύρος συχνοτήτων απεικονίζονται με διακεκομμένες χρωματιστές γραμμές. Με τα αυξανόμενα εξωτερικά μαγνητικά πεδία οι απώλειες εγγύτητας παίρνουν τον κυρίαρχο παράγοντα των απωλειών ισχύος που εξαρτώνται από τη συχνότητα, λόγω της τετραγωνικής επίδρασης του \hat{H} (στην εξίσωση 21).

Λαμβάνοντας υπόψη και τους δύο τύπους για τις απώλειες επιδερμίδας και εγγύτητας, οι απώλειες καθοδηγούνται από το ρεύμα διέγερσης I_{RMS} και το (εξωτερικό) μαγνητικό πεδίο \hat{H} , αντίστοιχα. Ωστόσο, σε πραγματικά συστήματα, η αύξηση της πυκνότητας ισχύος συχνά συνοδεύεται από τη χρήση αγωγών που βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, όπως πυκνές περιελίξεις σε πηνίο. Σε μια τέτοια ρύθμιση, τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία και κατά συνέπεια το P_{prox} εξαρτώνται άμεσα από το ρεύμα διέγερσης.

Μέχρι τώρα, όλα τα φυσικά αποτελέσματα σε αυτόν τον απλό γραμμικό αγωγό επιλύονται με αναλυτικούς και κλειστούς τύπους. Κατά συνέπεια, στη συνέχεια αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τις αριθμητικές προσεγγίσεις όσον αφορά την ακρίβειά τους. Η υπολογιστική προσπάθεια δεν λαμβάνεται υπόψη, επειδή ο χρόνος για την αξιολόγηση των αναλυτικών τύπων είναι αμελητέος, καθώς ακόμη και χιλιάδες αναλυτικοί υπολογισμοί απαιτούν μόνο ένα κλάσμα του δευτερολέπτου.

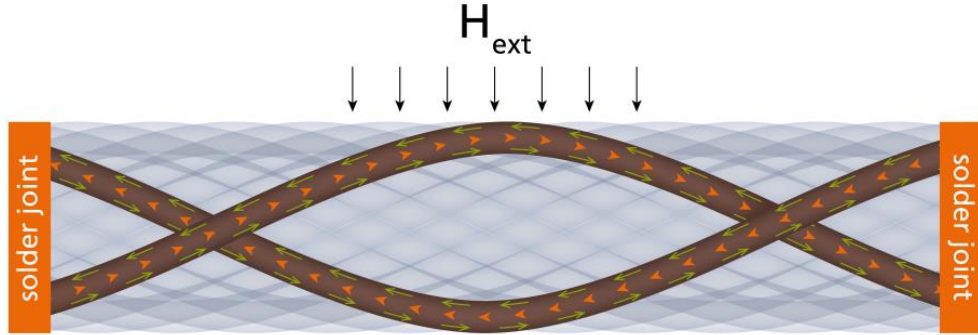
Συνήθως, η αντίσταση συνεχούς ρεύματος των αγωγών Litz παρέχεται από τα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή. Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι μετρήσεις των πραγματικών εφαρμογών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της ποιότητας της συγκόλλησης.

Επιπλέον, η αντίσταση συνεχούς ρεύματος ενός αγωγού καλωδίου Litz μπορεί να προσεγγιστεί αναλυτικά. Υποθέτοντας N κλώνους χαλκού με ακτίνα r_s και μήκος l , η αντίσταση DC δίνεται από:

$$R_{DC} = \frac{l}{Nr_s^2 \pi \sigma_{cu}} \quad (23)$$

Ένας επιπλέον παράγοντας που αναφέρεται συχνά στα φύλλα δεδομένων των αγωγών Litz είναι ο επονομαζόμενος παράγοντας πλήρωσης χαλκού δ_{cu} . Όσον αφορά τη δομή ενός αγωγού καλωδίου Litz με πλήρη ακτίνα r_c , ο συντελεστής δ_{cu} ορίζεται από την αναλογία της περιοχής χαλκού προς την περιοχή του αγωγού:

$$\delta_{cu} = \frac{Nr_s^2\pi}{r_c^2\pi} = N \left(\frac{r_s}{r_c} \right)^2 \quad (24)$$



Εικόνα 8. Ιδανικό καλώδιο Litz.

Υποθέτοντας ένα ιδανικό καλώδιο litz, οι κλώνοι στρίβονται με έναν ειδικό τρόπο, ώστε όλα τα επαγόμενα δινορεύματα σε βρόχους μεταξύ των κλώνων (κόκκινες καμπύλες, όπως φαίνονται στην παραπάνω εικόνα) να ακυρώνονται σε όλο το μήκος του αγωγού (R_{skin_bundle} και $R_{prox_int_bundle}$ εξαφανίζονται). Κατά συνέπεια, το ρεύμα διέγερσης I_{RMS} κατανέμεται εξίσου μεταξύ όλων των N κλώνων.

Για να απλοποιηθεί η διάκριση των διαφόρων ακτίνων, η κανονικοποιημένη παράμετρος επιδερμικού βάθους για χάλκινους κλώνους ορίζεται ως:

$$x_s = \alpha \cdot r_s (1 + j) \sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_{cu}} \cdot r_s \quad (25)$$

Υποθέτοντας ότι όλοι οι κλώνοι έχουν το ίδιο μήκος, η αντίσταση κάθε κλώνου δίνεται από το $R_{DC_strand} = R_{DC}N$ και η απώλεια συνεχούς ρεύματος του πολύκλωνου αγωγού:

$$P_{DC_strand} = N \left(\frac{I_{RMS}}{N} \right)^2 (R_{DC}N) = I_{RMS}^2 R_0 \quad (26)$$

είναι ίση με αυτήν ενός μονόκλωνου αγωγού με αντίσταση R_0 .

Με βάση την εξίσωση (19), οι απώλειες ισχύος λόγω της επιδερμικής επίδρασης σε έναν εξιδανικευμένο πολύκλωνο αγωγό μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$P_{skin_strand} = I_{RMS}^2 R_{DC} \cdot (F_{skin_strand} - 1) \quad (27)$$

Με τον επιδερμικό συντελεστή

$$F_{skin_strand} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ x_s \frac{I_0(x_s)}{I_1(x_s)} \right\} \quad (28)$$

Σε επίπεδο κλώνου.

Όσον αφορά την απώλεια εγγύτητας, κάθε κλώνος στον αγωγό Litz μπορεί να θεωρηθεί ως μονόκλωνος αγωγός με $N - 1$ γειτονικούς αγωγούς. Ανάλογα με τη θέση

ενός κλώνου εντός του αγωγού, η υπέρθεση του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται από τους γειτονικούς κλώνους διαφέρει. Ωστόσο, σε περίπτωση αγωγών Litz με μεγάλη ποσότητα κλώνων, το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου σε ακτίνα r μπορεί να προσεγγιστεί κατά

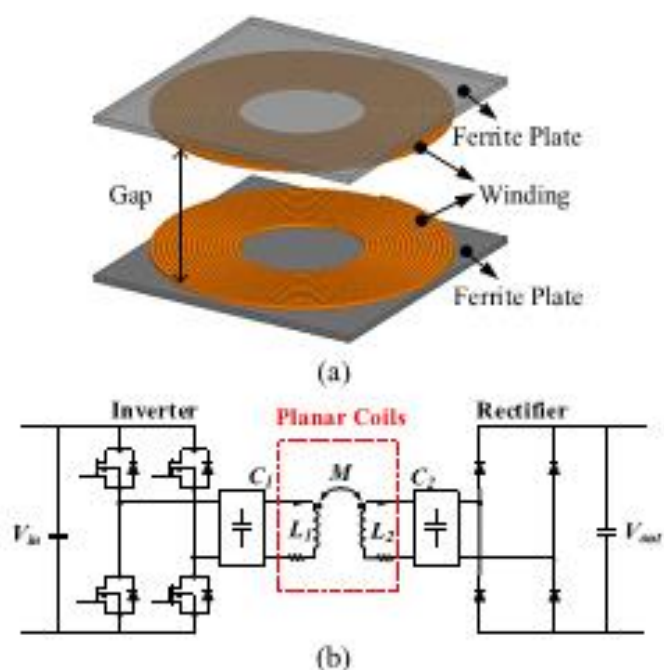
$$H(\rho) = \frac{I\rho}{2\pi r_c^2} \quad (29)$$

για οποιοδήποτε ρεύμα διέγερσης I . Αυτή η χωρική κατανομή του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου μπορεί να εφαρμοστεί στην εξίσωση (21) για την αξιολόγηση των απωλειών εσωτερικής εγγύτητας.

Τα επίπεδα πηνία χρησιμοποιούνται ευρέως σε επαγωγικές εφαρμογές μεταφοράς ισχύος. Η απόδοση των πηνίων βελτιώνεται με τον αγωγό Litz, εξαλείφοντας την απώλεια επίδρασης του επιδερμικού φαινομένου του περιελίγματος, αλλά πρέπει ακόμη να ληφθεί υπόψη η επίδραση εγγύτητας απώλειας. Για τον υπολογισμό της επίδρασης της αντίστασης εγγύτητας, απαιτούνται μαγνητικά πεδία κατά μήκος των περιελίξεων. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης των πηνίων, οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού πεδίου είναι πολύ χρονοβόρες λόγω της παραμετρικής σάρωσης των φυσικών παραμέτρων. Ο αναλυτικός υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου προτιμάται σε αυτό το σενάριο, αλλά γίνεται πολύπλοκος με την ύπαρξη της πλάκας σιδηρομαγνήτη, η οποία χρησιμοποιείται για την αύξηση της σύζευξης των πηνίων. Στην εργασία τους οι [47] εφάρμοσαν τη μέθοδο εικόνας για την απλοποίηση του αναλυτικού υπολογισμού, στον οποίο τα μαγνητικά πεδία κατά μήκος των περιελίξεων προέρχονται από τον νόμο του Ampere και τον νόμο των Biot-Savart. Η αντίσταση στο φαινόμενο εγγύτητας υπολογίζεται στη συνέχεια με αυτά τα πεδία. Η μελέτη αποδεικνύει επίσης ότι το μέγεθος της πλάκας φερριτή έχει αμελητέα επίδραση στην αντίσταση στην επίδραση εγγύτητας, εφόσον είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος της περιέλιξης. Κατασκευάστηκε και μετρήθηκε ένα επίπεδο πηνίο για να επαληθευτεί ο αναλυτικός υπολογισμός της αντίστασης στην επίδραση εγγύτητας, χρησιμοποιώντας αγωγό Litz αποτελούμενο από 100 κλώνους με διάμετρο 0,1 mm. Κάτω από την περιέλιξη τοποθετήθηκε τετράγωνη πλάκα σιδηρομαγνητικού υλικού 3C96 με διαστάσεις 100 mm × 100 mm × 5 mm. Η διαφορά μεταξύ υπολογισμού και μέτρησης είναι μικρότερη από 15%.

Τα πηνία PLANAR χρησιμοποιούνται στην επαγωγική μεταφορά ισχύος (inductive power transfer-IPT) για την αντικατάσταση των καλωδίων με παραδοσιακή μέθοδο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (electric vehicles-EV) [15][16]. Η ισχύς

μεταφέρεται σε διάκενο αέρα έως δεκάδες εκατοστά από το πηνίο πομπού στο πηνίο δέκτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9(α). Λόγω της χαμηλής σύζευξης που προκαλείται από το διάκενο αέρα, η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος IPT επηρεάζεται σημαντικά από τις αντιστάσεις περιέλιξης των πηνίων. Η απώλεια περιέλιξης συνεισφέρει 30% –50% στη συνολική απώλεια ενός κυκλώματος IPT, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9(β)[17]. Ο αγωγός Litz χρησιμοποιείται ευρέως για τη μείωση της απώλειας περιέλιξης, ειδικά για την απώλεια δινορεύματος [18].



Εικόνα 9. (α) Επίπεδα πηνία με φερρίτη και σύρμα litz.(β) Τοπολογία κυκλώματος για IPT.

Η αντίσταση τυλίγματος του αγωγού Litz περιλαμβάνει τμήμα dc και τμήμα ac. Η αντίσταση dc υπολογίζεται αναλυτικά από φυσικές παραμέτρους του καλωδίου συμπεριλαμβανομένης της περιοχής και του μήκους διατομής. Η αντίσταση εναλλασσόμενου ρεύματος ac προέρχεται από το δινορεύμα που προκαλεί απώλεια επιδερμικής επίδρασης και απώλεια επίδρασης εγγύτητας στο σύρμα [19] και οι αντίστοιχες αντιστάσεις που προκαλούν τέτοιες απώλειες αναφέρονται ως επιδερμική αντίσταση και αντίσταση επίδρασης εγγύτητας. Η επίδραση της επιδερμικής απώλεια είναι αμελητέα όταν η διάμετρος κλώνου του αγωγού litz επιλέγεται σωστά ανάλογα με το βάθος του δέρματος. Έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για τον υπολογισμό της απώλειας επίδρασης εγγύτητας [20] [21], η οποία είναι ανάλογη με το τετράγωνο των μαγνητικών πεδίων στις σπείρες της περιέλιξης. Ως εκ τούτου, η παραγωγή

μαγνητικών πεδίων είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της απώλειας εγγύτητας του αγωγού Litz.

Τα μαγνητικά πεδία σε όλες τις σπείρες μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας είτε αριθμητική είτε αναλυτική μέθοδο. Η αριθμητική μέθοδος με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων παράγει ακριβή αποτελέσματα, αλλά είναι χρονοβόρα ειδικά με τρισδιάστατες προσομοιώσεις. Τα πράγματα γίνονται ακόμη χειρότερα όταν τα πηνία βελτιστοποιούνται με παραμετρική σάρωση, κάτι που απαιτεί μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων [18]. Η αναλυτική μέθοδος είναι ταχύτερη για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου και πιο κατάλληλη για τη βελτιστοποίηση των πηνίων. Ωστόσο, όταν η πλάκα φερριτική με πεπερασμένο μέγεθος τοποθετείται κάτω από το τύλιγμα, οι αναλυτικές εξισώσεις γίνονται περίπλοκες [22] ή λιγότερο ακριβείς. Στην εργασία τους οι [18] παρουσίασαν μια αναλυτική μέθοδο που είναι απλή και ακριβής για τον υπολογισμό των μαγνητικών πεδίων σε στροφές επίπεδου πηνίου με σιδηρομαγνήτη.

Η μέθοδος εικόνας [23] εφαρμόζεται στην εργασία των [47]. Η πλάκα από σιδηρομαγνητικό υλικό αντικαθίσταται από τις κατοπτρικές σπείρες που έχουν το ίδιο ρεύμα με τις αρχικές [18]. Το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σπείρα διακρίνεται σε εσωτερικό και εξωτερικό. Το εσωτερικό πεδίο δημιουργείται από την ίδια τη περιέλιξη και υπολογίζεται από τον νόμο του Ampere. Το εξωτερικό πεδίο δημιουργείται από όλες τις άλλες περιελίξεις και υπολογίζεται από τον νόμο Biot – Savart. Η απώλεια επίδρασης εγγύτητας προκύπτει από εσωτερικά και εξωτερικά πεδία. Χάρη στο ημιτονοειδές ρεύμα στην περιέλιξη στο IPT[24], οι αναλυτικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των μαγνητικών πεδίων απλοποιούνται περαιτέρω.

Διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος της πλάκας σιδηρομαγνήτη έχει αμελητέα επίδραση στην απώλεια επίδρασης εγγύτητας εφόσον είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος της περιέλιξης. Αυτή η απαίτηση είναι εύλογη σε IPT για φόρτιση EV, επειδή το μέγεθος της πλάκας σιδηρομαγνήτη είναι πάντα σχεδιασμένο ώστε να μην είναι μικρότερο από το τύλιγμα προκειμένου να αυξηθεί η ζεύξη [17] και να μειωθεί η εκπομπή πεδίου [25] εντός περιορισμένων διαστάσεων.

Ένα πειραματικό επίπεδο πηνίο κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τον αγωγό litz αποτελούμενο από 100 κλώνους με διάμετρο 0,1 mm. Κάτω από την περιέλιξη τοποθετήθηκε τετράγωνη πλάκα σιδηρομαγνήτη 3C96 με διαστάσεις 100 mm × 100 mm × 5 mm. Η αντίσταση επίδρασης εγγύτητας του πηνίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας αναλυτή σύνθετης αντίστασης, με συχνότητα διέγερσης έως 200

kHz. Η αντίσταση προέκυψε επίσης με τα υπολογισμένα μαγνητικά πεδία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της εικόνας. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων υπολογισμού και μέτρησης για την αντίσταση στο φαινόμενο εγγύτητας είναι μικρότερη από 15%.

Η [47] διαμορφώθηκε ως εξής: Εισήχθησαν εξισώσεις για τον υπολογισμό της απώλειας επίδρασης εγγύτητας του αγωγού Litz και της ισοδύναμης δομής των επίπεδων πηνίων την πλάκα από σιδηρομαγνήτη. Παρουσιάστηκε η μέθοδος υπολογισμού των μαγνητικών πεδίων στις στροφές της περιέλιξης. Αποδείχθηκε η επίδραση του μεγέθους του σιδηρομαγνήτη στην αντίσταση υπό την επίδραση εγγύτητας. Τέλος επαληθεύτηκε ο υπολογισμός συγκρινόμενος με τα αποτελέσματα της μέτρησης.

Οι μέθοδοι για τον υπολογισμό της απώλειας εγγύτητας-αποτελέσματος του αγωγού litz παρουσιάζονται στην εργασία των [20]. Η απώλεια της επίδρασης της εγγύτητας προκαλείται από την επίδραση εγγύτητας σε επίπεδο κλώνου και σε επίπεδο δέσμης. Η επίδραση επιπέδου δέσμης είναι αμελητέα, επειδή ελέγχεται από το μοτίβο συστροφής ή ύφανσης του αγωγού litz. Εφαρμόστηκε η εξίσωση στο [46] για να υπολογιστεί την απώλεια που προκλήθηκε από την επίδραση εγγύτητας στο επίπεδο κλώνου ως

$$P_e = \frac{\pi l_t N d_c^4}{64 \rho_c} \left\langle \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 \right\rangle \quad (30)$$

όπου P_e είναι η απώλεια επίδρασης εγγύτητας μιας σπείρας, l_t το μέσο μήκος της σπείρας, N ο αριθμός των κλώνων, d_c η διάμετρος του κλώνου, ρ_c η αντίσταση του χαλκού, $B(t)$ η χρονική μεταβαλλόμενη πυκνότητα ροής κατά τη σπείρα, $\langle x \rangle$ ο χωρικός μέσος όρος πάνω από τη διατομή της σπείρας και \bar{x} ο μέσος χρόνος.

Ο χωρικός μέσος όρος του $(dB(t)/dt)^2$ πάνω από τη διατομή της σπείρας θα πρέπει πρώτα να ληφθεί για τον υπολογισμό της απώλειας επίδρασης εγγύτητας στην προηγούμενη σχέση. Η προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων είναι ακριβής, αλλά είναι χρονοβόρα ειδικά κατά τη βελτιστοποίηση των φυσικών παραμέτρων του πηνίου. Ο στόχος είναι να διερευνηθεί μια απλή και ακριβής μέθοδος υπολογισμού $\left\langle (dB(t)/dt)^2 \right\rangle$.

Για κύκλωμα IPT στο Σχ. 10 (b), το ρεύμα περιέλιξης είναι σχεδόν ημιτονοειδές

$$i(t) = I \cdot \sin(\omega t) \quad (31)$$

όπου I είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος περιέλιξης και το ω είναι η ακτινική συχνότητα της συχνότητας μεταγωγής του μετατροπέα. Επειδή το μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογο με το ρεύμα [26], το πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση είναι επίσης ημιτονοειδές

$$B(t) = B \cdot \sin(\omega t) \quad (32)$$

όπου το B είναι η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου και το ω είναι η ακτινική συχνότητα του ρεύματος περιέλιξης. Ο μέσος χρόνος $(dB(t)/dt)^2$ υπολογίζεται από την $B(t) = B \cdot \sin(\omega t)$ ως:

$$\left(\frac{dB(t)}{dt}\right)^2 = \frac{\omega^2}{2} \cdot B^2 \quad (33)$$

Ο χωρικός μέσος όρος του $\left\langle \left(\frac{dB(t)}{dt}\right)^2 \right\rangle$ απλοποιείται σε συνδυασμό με την προηγούμενη εξίσωση ως εξής:

$$\left\langle \left(\frac{dB(t)}{dt}\right)^2 \right\rangle = \frac{\omega^2}{2} \cdot \langle B^2 \rangle \quad (34)$$

Εάν ληφθεί υπόψη ότι $P_e = \frac{\pi l_t N d_c^4}{64 \rho_c} \left\langle \left(\frac{dB(t)}{dt}\right)^2 \right\rangle$, η απώλεια επίδρασης εγγύτητας

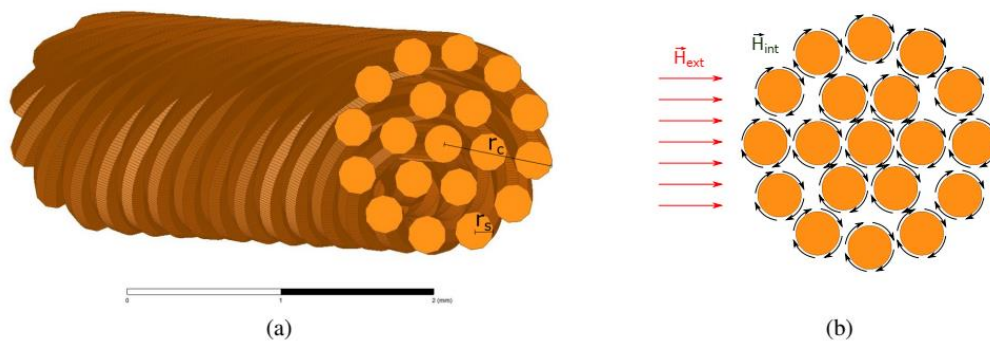
του αγωγού Litz στην εφαρμογή IPT υπολογίζεται ως

$$P_e = \frac{\pi l_t N d_c^4 \omega^2}{128 \rho_c} \cdot \langle B^2 \rangle \quad (35)$$

Η απώλεια εγγύτητας-αποτελέσματος προκύπτει ως P_e / I^2 .

Κεφάλαιο 3. Ελικοειδής Διαμόρφωση Αγωγών

Σε πολλές εφαρμογές στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, οι μονόκλωνοι αγωγοί αντικαθίστανται από καλώδια Litz. Εκτός από την υψηλότερη ευελιξία (μικρότερες ακτίνες καμπυλότητας), η ηλεκτρική συμπεριφορά σε υψηλότερες συχνότητες βελτιώνεται με τη χρήση απομονωμένων κλώνων με μικρότερη διάμετρο, κάτι το οποίο φαίνεται από την παρακάτω εικόνα. Συνήθως, η διάσταση των κλώνων είναι μικρότερη από το επιδερμικό βάθος και συνεπώς οι απώλειες του επιδερμικού φαινομένου μειώνονται σημαντικά.



Εικόνα 10. Απώλειες ισχύος αγωγών Litz

Ωστόσο, οι απώλειες ισχύος ποικίλλουν έντονα ακόμη και για αγωγούς Litz με την ίδια ποσότητα κλώνων ανάλογα με την εσωτερική συνεστραμμένη δομή. Για να δοθεί μια εντύπωση για τη διακύμανση των προκύπτοντων απωλειών ισχύος, αυτή η ενότητα εστιάζει και στις δύο περιοριστικές περιπτώσεις.

Ο «χειρότερος» αγωγός Litz αποτελείται από παράλληλους κλώνους, ενώ σε ένα τέλεια συνεστραμμένο αγωγό Litz κάθε κλώνος βρίσκεται σε κάθε πιθανή θέση της διατομής κατά μήκος ενός βήματος. Και οι δύο περιπτώσεις θα ονομάζονται παράλληλος (par) και ιδανικός (id) αγωγός Litz.

Σε γενικές γραμμές, τα ίδια βασικά ηλεκτρομαγνητικά αποτελέσματα συμβαίνουν τόσο σε μονόκλωνους όσο και σε αγωγούς καλωδίων Litz. Ωστόσο, η γεωμετρική δομή είναι πολύ πιο περίπλοκη, λόγω της συστροφής, των διαφορετικών επιπέδων κλώνου και δέσμης και της συγκόλλησης. Κατά συνέπεια, οι προκύπτουσες απώλειες μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τα διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης, εξαρτήσεων και διαστάσεων. Στους αγωγούς Litz, οι τυπικές απώλειες συνεχούς ρεύματος και κλώνων (υπολογιζόμενες με προσεγγίσεις 1D και 2D όπως ακριβώς για τους μονόκλωνους αγωγούς) αυξάνονται από επαγόμενα ρεύματα βρόχου διεγερμένα

από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε γειτονικούς κλώνους που συνδέονται αγωγίμα μέσω της άρθρωσης συγκολλήσεως (απαιτείται ανάλυση 3D).

Δυστυχώς, η διάκριση των τεχνικών όρων στον τομέα των καλωδίων Litzποικίλλει στις δημοσιεύσεις των κορυφαίων ομάδων [27] [28]. Σε αντίθεση με άλλους ορισμούς, αυτοί οι όροι διακρίνουν τις απώλειες ανάλογα με τη διέγερση (απώλειες επιδερμίδας και εσωτερικές απώλειες εγγύτητας) και τις απώλειες που προκαλούνται από εξωτερικά μαγνητικά πεδία (απώλειες εγγύτητας). Επειδή το πρώτο ποσοστό προκαλείται από (και συνεπώς εξαρτάται από) το ρεύμα διέγερσης στον αγωγό, ο όρος αντίστασης R χρησιμοποιείται συχνά για τον προσδιορισμό της απώλειας ισχύος σε ένα δεδομένο ρεύμα. Για συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τύπων καλωδίων Litzόσον αφορά τις απώλειες ισχύος τους, απαιτούνται και τα δύο μέρη. Οι κανονικοποιημένες απώλειες ισχύος υπολογίζονται αθροίζοντας τις απώλειες επιδερμίδας με ρεύμα διέγερσης 1A (RMS) σε καθορισμένη συχνότητα και τις απώλειες εγγύτητας σε ένα δεδομένο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Στο παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται μια λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων ποσοστών απώλειας ισχύος με βάση τον [27]. Η επεξεργασία χρησιμοποιεί και εξηγεί τις συνοπτικές πληροφορίες του πίνακα και παρέχει αναλυτικές προσεγγίσεις και για τις ακραίες περιπτώσεις παράλληλων (par) και ιδανικών (id) Litzκαλωδίων.

Πίνακας 2. Λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων ποσοστών απώλειας ισχύος

	Technical term	Dependencies	Dimension	
I dep. {	R_{DC}	I	1D	} P_{skin}
	P_{skin_strand}	I, f	2D	
	P_{skin_bundle}	I, f, solder	3D	
H_{ext} dep. {	$P_{int_prox_strand}$	I, f	2D	} P_{int_prox}
	$P_{int_prox_bundle}$	I, f, solder	3D	
	$P_{ext_prox_strand}$	H_{ext} , f	2D	
$P_{ext_prox_bundle}$	H_{ext} , f, solder	3D		

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος (Inductive power transfer-IPT) είναι μια σημαντική τεχνολογία στο σχεδιασμό συστημάτων φόρτισης οχημάτων οδοστρώματος και υποβρύχιων οχημάτων. Για υποβρύχια συστήματα IPT (underwater IPT-UWIPT), ειδικά για αυτά με μικρά πηλίκια και υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η εκτίμηση των απωλειών δινορεύματος του θαλασσινού νερού, οι οποίες αυξάνονται εκθετικά με το μέγεθος

και τη συχνότητα του πηνίου. Η [48] πρότεινε μια αναλυτική προσέγγιση για την επίτευξη της εκτίμησης αυτής όσον αφορά την αντίσταση απώλειας πηνίου για τα ευρέως χρησιμοποιούμενα σπειροειδή πηνία κατασκευασμένα από αγωγό Litz. Παρουσίασε επίσης μια μέθοδο βελτιστοποίησης ενός συστήματος UWIPT χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές εξισώσεις, έτσι ώστε να αποφευχθεί χρονοβόρα βελτιστοποίηση μέσω ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση των πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό της αντίστασης απώλειας δινορευμάτων χρησιμοποιείται για την επικύρωση της ανάλυσης. Η βελτιστοποίηση παρουσιάζεται μέσω του παραδείγματος ενός συστήματος 1kW ικανό να επιτύχει 96% απόδοση μαγνητικής σύζευξης με διάκενο θαλασσινού νερού 8 mm. Ο σχεδιασμός επικυρώνεται μέσω πειραμάτων με ένα σύστημα εισόδου τάσης dc 1kW IPT, με είσοδο 48V και έξοδο 48V, επιτυγχάνοντας απόδοση μαγνητικής σύζευξης 96,4%.

Οι εργασίες σε αυτόν τον τομέα επικεντρώνονται κυρίως στη γεωμετρία πηνίων, στο μέγεθος πηνίου ή στη βελτιστοποίηση συχνότητας. Τα σπειροειδή πηνία [29], τα ομοαξονικά ή ελικοειδή πηνία [30] (Shietal., 2014) και τα τριφασικά πηνία [31] είναι μερικές από τις γεωμετρίες πηνίων που ερευνήθηκαν. Μεταξύ των πηνίων αυτών, τα σπειροειδή πηνία παρέχουν την καλύτερη σύζευξη στον μικρότερο όγκο. Η βελτιστοποίηση των σπειροειδών πηνίων για το UWIPT εστιάζει στη μοντελοποίηση και την ελαχιστοποίηση των απωλειών του θαλασσινού νερού, οι οποίες συνήθως διαμορφώνονται ως μια επιπλέον αντίσταση σε σειρά με τα πηνία, που αναφέρεται ως αντίσταση στην ακτινοβολία ή σύνθετη αντίσταση απώλειας Eddy. Στο [48] δηλώθηκε ως αντίσταση απώλειας Eddy (R_{eddy}).

Οι δημοσιευμένες τεχνικές για τον υπολογισμό R_{eddy} και η βελτιστοποίηση των πηνίων για συστήματα UWIPT περιλαμβάνουν μέθοδο ολοκληρωμένων πεδίων [32], οι οποίες είναι δύσκολο να αξιολογηθούν και ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις, οι οποίες είναι συχνά χρονοβόρες και υπολογιστικά απαιτητικές. Η χρήση ανάλυσης με κατά προσέγγιση ολοκληρωμένες συναρτήσεις για βελτιστοποίηση απλοποιεί τον σχεδιασμό και βοηθά επίσης στη βελτίωση του χρόνου και της χρήσης υπολογιστικών πόρων αντικαθιστώντας την ολοκληρωμένη μοντελοποίηση που απαιτείται στην ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση. Οι τεχνικές προσαρμογής καμπυλών έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στις αναλυτικές βελτιστοποιήσεις [33], αλλά αυτές ισχύουν μόνο για συστήματα εντός του αέρα. Μια εναλλακτική λύση είναι η χρήση της

μεθόδου του Kraichman[34] που δείχνει μια κατά προσέγγιση απλοποιημένη έκφραση για την εκτίμηση R_{eddy} για ένα πηνίο βρόχου βυθισμένο σε ένα άπειρο αγωγίμο μέσο και προβλέπει επίσης την έκφραση ενός ελικοειδούς πηνίου με N ίσες ακτινικές σπείρες. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι σπείρες έχουν διαφορετικές ακτίνες σε ένα σπειροειδές πηνίο, η πρόβλεψη ελικοειδούς πηνίου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτές χωρίς τροποποίηση.

Στο [48], η μεθοδος του Kraichman τροποποιήθηκε για να αντλήσει μια κατά προσέγγιση έκφραση βασισμένη στη συνάρτηση για την R_{eddy} των σπειροειδών πηνίων που βυθίζονται στο θαλασσινό νερό. Συνδυάζεται με άλλες ιδιότητες των πηνίων UWIPT, όπως η αντίσταση εναλλασσόμενου ρεύματος στον αέρα, αγωγιμότητα και η αμοιβαία αυτεπαγωγή στο θαλασσινό νερό για τη δημιουργία ενός πλήρους αναλυτικού μοντέλου. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση ενός συστήματος UWIPT για διάμετρο AUV 100mm. Η μέθοδος της αναλυτικής βελτιστοποίησης εξοικονομεί χρόνο κύκλου σχεδιασμού, καθώς απαιτεί περίπου πέντε φορές λιγότερο χρόνο υπολογισμού από την ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση για την ανάλυση του συστήματος για το ίδιο σύνολο συνθηκών λειτουργίας. Το προτεινόμενο μοντέλο αντίστασης απώλειας Eddyεπικυρώνεται μέσω σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων για δύο πηνία με 8 και 5 σπείρες, με αγωγιμότητα θαλασσινού νερού 5 S/m. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση επικυρώνεται μέσω υποβρύχιων πειραμάτων με ένα πρωτότυπο αντισταθμισμένο IPT 1kWSeries-Series κατασκευασμένο με τα βελτιστοποιημένα πηνία. Το σύστημα επιτυγχάνει μαγνητική απόδοση ζεύξης 96,4% που λειτουργεί με συχνότητα μεταγωγής 255 kHz και διάκενο θαλασσινού νερού 8 mm.

Ένα σπειροειδές πηνίο N-ΣΠΕΙΡΩΝ φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 11(α)) με τις σημαντικές διαστάσεις του, δηλαδή εσωτερική ακτίνα r_{in} , εξωτερική ακτίνα r_{out} και διάμετρο καλωδίου d_w . Η απόσταση από κέντρο προς κέντρο μεταξύ δύο παρακείμενων σπειρών ορίζεται ως βήμα. Το βήμα κάθε σπείρας μπορεί να είναι ίσο ή άνισο [35]. Ως γενική έκφραση, το βήμα για την n -ιστή σπείρα από την εσωτερική πλευρά ορίζεται ως p_n στην Εικόνα 11, που αντιπροσωπεύει την απόσταση από κέντρο προς κέντρο της n -ιστής και της $(n+1)$ -ιστής σπείρας και ισχύει:

$$p_n = r_{n+1} - r_n \quad (36)$$

Ένα πηνίο N σπειρών έχει $(N-1)$ βήματα, και η διαστατική σχέση για πηνίο N -σπειρών είναι:

$$r_{\text{out}} = r_{\text{in}} + \sum_{i=1}^{N-1} p_i \quad (37)$$

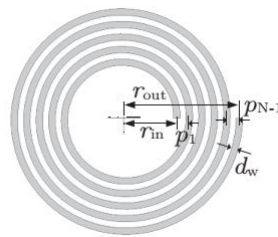
Το μοντέλο διατομής του φαίνεται στην Εικόνα 11(β) και δείχνει το πλάτος b και το πάχος t του πηνίου. Χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις που εισήχθησαν παραπάνω, οι εκφράσεις για b και t για ένα σπειροειδές πηνίο μονής στρώσης λαμβάνονται ως

$$\begin{aligned} b &= d_w \\ t &= d_w + \sum_{i=1}^{N-1} p_i. \end{aligned} \quad (38)$$

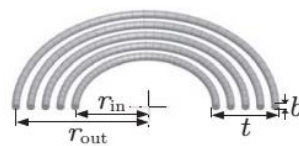
Για απλοποίηση της ανάλυσης, το σπειροειδές πηνίο πολλαπλών σπειρών προσεγγίζεται ως ο συνδυασμός N ομόκεντρων κυκλικών αγωγών όπως φαίνεται στην Εικόνα 11 [36]. Οι σημαντικές διαστάσεις σημειώνονται στην Εικόνα 11. Κάθε σπείρα θεωρείται κύκλος με ακτίνα ίση με τον μέσο όρο της εσωτερικής και εξωτερικής ακτίνας. Η ακτίνα της n -ιστής σπείρας συμβολίζεται με a_n και σύμφωνα με τον προαναφερθέντα ορισμό του βήματος μιας σπείρας, η έκφραση για a_n μπορεί να γραφτεί ως:

$$a_n = (r_n + r_{n+1})/2 = r_n + p_n/2 \quad (39)$$

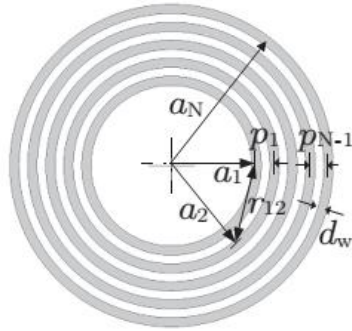
Οι κύριες ιδιότητες ενός σπειροειδούς πηνίου με βάση τον αγωγό litz για εφαρμογές UWIPT περιλαμβάνουν την αντίσταση και την επαγωγικότητά του. Με ένα σωστά επιλεγμένο αγωγό litz, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στο πηνίο και η επίδραση εγγύτητας εντός των περιελίξεων είναι αμελητέα



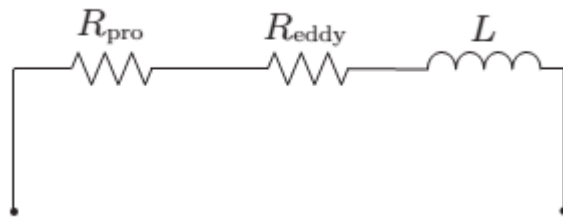
(α) κάτοψη



(β) διατομή



Εικόνα 11. Μοντέλο ομόκεντρου κύκλου του σπειροειδούς πηνίου N -σπειρών. (α) Κάτοψη, (β) διατομή.



Εικόνα 12. Ισοδύναμο κύκλωμα σπειροειδούς πηνίου αγωγού Litz για σύστημα UWIPT

Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, το μοντέλο ενός συστήματος σπειροειδούς πηνίου UWIPT απαιτείται για να εκφράσει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- A. Αντίσταση AC κάθε πηνίου λόγω της επίδρασης εγγύτητας μεταξύ των σπειρών του πηνίου (R_{pro})
- B. Αντίσταση απώλειας Eddy σε θαλασσινό νερό για κάθε πηνίο (R_{eddy})
- Γ. Αυτεπαγωγή κάθε πηνίου (L)
- Δ. Αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των πηνίων (M)

Το ισοδύναμο μοντέλο κυκλώματος για ένα πηνίο φαίνεται στην Εικόνα 12, το οποίο δείχνει τις παραπάνω συνιστώσες, εκτός από την αμοιβαία επαγωγή η οποία υπάρχει μεταξύ κάθε ζεύγους πηνίου στο σύστημα IPT. Κάθε υποβρύχιο πηνίο υφίσταται επίσης αμελητέα τροποποίηση στην επαγωγικότητά του, που εκδηλώνεται ως αντιδραστική διόρθωση με τη μέθοδο Kraichman. Ωστόσο, φαίνεται ότι έχει αμελητέα τιμή και αμελητέα διακύμανση με τη συχνότητα.

Λεπτομερής μοντελοποίηση πηνίων αγωγού litz για εκτίμηση αντίστασης ac καθώς και κατά προσέγγιση μέθοδοι [37] είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, οι οποίες εξετάζονται [48]. Ωστόσο, με διάμετρο κλώνου μικρότερη από το βάθος του δέρματος στη συχνότητα λειτουργίας, δηλαδή με σωστή επιλογή αγωγού litz, η αντίσταση εγγύτητας R_{pro} μεταξύ δεσμών είναι ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει. Εξαρτάται από την κατασκευή αγωγών Litz και υπάρχει τόσο για λειτουργία στον αέρα, όσο και για υποβρύχια λειτουργία. Μια κατά προσέγγιση έκφραση για την R_{pro} είναι διαθέσιμη για ένα σπειροειδές πηνίο N-σπειρών, και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται άμεσα στη βελτιστοποίηση. Οι ακόλουθες εξισώσεις δείχνουν τις απαραίτητες εκφράσεις με τις παραμέτρους του πηνίου σύμφωνα με το Σχ. 1 (a) και το Σχ. 1 (b).

$$\begin{aligned} R_{\text{dc}} &= N\rho \left(\frac{2\pi r_{\text{avg}}}{A_w} \right) 1.06^{N_b} 1.03^{N_c} \\ R_{\text{pro}} &= R_{\text{dc}} (1 + 409.6 N N_{\text{st}} d_{\text{st}}^4 n B f_s^2) \end{aligned} \quad (40)$$

όπου ρ είναι η αντίσταση του χαλκού (σε Ωm), το r_{avg} είναι η μέση ακτίνα του πηνίου (σε m), που δίνεται από το $(r_{\text{in}} + r_{\text{out}})/2$, το A_w είναι η περιοχή περιέλιξης (σε m^2), που δίνεται από το $N_{\text{st}}\pi (d_{\text{st}}/2)^2$, N_{st} είναι ο αριθμός κλώνων στον αγωγό Litz, d_{st} είναι η διάμετρος κλώνου του αγωγού Litz (σε m), N_b είναι ο αριθμός λειτουργίας δέσμης στον αγωγό Litz, N_c είναι ο αριθμός λειτουργίας καλωδίωσης στον αγωγό Litz, f_s είναι η συχνότητα λειτουργίας (σε Hz). Όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με τον αγωγό Litz λαμβάνονται από τον οδηγό επιλογής προϊόντων του προμηθευτή.

Η αντίσταση απώλειας Eddy αντιπροσωπεύει την πρόσθετη απώλεια ισχύος στο πηνίο για να διατηρήσει το ρεύμα της έναντι του πεδίου που παράγεται από τα δινορεύματα στο θαλασσινό νερό, και ως εκ τούτου αντιπροσωπεύει σωστά τη συμβολή του θαλασσινού νερού στην απώλεια ισχύος. Η έκφραση του R_{eddy} ενός μονωμένου κυκλικού αγωγού ($R_{\text{eddy, a}}$) σε ένα άπειρο αγώγιμο μέσο δείχνει ότι το $R_{\text{eddy, a}}$ αυξάνεται εκθετικά με τη συχνότητα. Δεδομένου ότι αυτό το στοιχείο σχετίζεται άμεσα με τις απώλειες των δινορευμάτων, η ακριβής εκτίμησή του για ένα σπειροειδές πηνίο N-σπειρών είναι σημαντικό για τη βελτιστοποίηση τέτοιων πηνίων για μικρό μέγεθος με υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας.

Η έκφραση του R_{eddy} για τον αγωγό λεπτής μόνωσης μιας σπείρας είναι

$$R_{\text{eddy},a} = \omega\mu a \left[\frac{4}{3}(\beta a)^2 - \frac{\pi}{3}(\beta a)^3 + \frac{2\pi}{15}(\beta a)^5 - \dots \right] \quad (41)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα του ρεύματος βρόχου (σε rad/s), που δίνεται από $2\pi f_s$, μ είναι η διαπερατότητα του αγωγίμου μέσου (σε H/m), a είναι η ακτίνα του αγωγίμου βρόχου (σε m), β είναι το φανταστικό μέρος της σύνθετης σταθεράς διάδοσης του αγωγίμου μέσου, που δίνεται από $\sqrt{\omega\mu\sigma/2}$ και σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του άπειρου μέσου (σε S/m).

Για ένα υποβρύχιο πηνίο, το άπειρο αγωγίμο μέσο είναι το θαλασσινό νερό, του οποίου η διαπερατότητα είναι περίπου ισοδύναμη με εκείνη του αέρα ($\mu_{\text{sea}} \approx \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$). Η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού σ ποικίλλει ανάλογα με την αλατότητα και τη θερμοκρασία, και έτσι η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού θεωρείται ως παράμετρος.

Για την έκφραση της αντίστασης απώλειας Eddyγια το πηνίο, εξετάζεται το μοντέλο ομόκεντρου κύκλου στην Εικόνα 13. Η αντίσταση απώλειας eddy κάθε κυκλικής σπείρας αποτελείται από την αντίσταση ιδιο-απώλειας του Eddyκαι την αμοιβαία αντίσταση απώλειας Eddy. Η αντίσταση ιδιο-απώλειας ενός κυκλικού αγωγού ($R_{\text{eddy, self}}$, για την n -ιοστή σπείρα) αντιπροσωπεύει την απώλεια ισχύος που προκαλείται από τα δινορεύματα που παράγονται από το δικό της ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αμοιβαία αντίσταση απώλειας Eddyτου κυκλικού αγωγού ($R_{\text{eddy, mut}}$, για την n -ιοστή σπείρα) αντιπροσωπεύει τη συνολική απώλεια ισχύος που προκαλείται σε αυτό λόγω των δινορευμάτων που παράγονται από τους άλλους κυκλικούς αγωγούς στο πηνίο.

Σύμφωνα με τον ορισμό, η μέθοδος του Kraichman δίνει ουσιαστικά την έκφραση για την αντίσταση ιδιο- απώλειας κάθε σπείρας. Έτσι, η έκφραση για την n -ιοστή σπείρα μπορεί να ληφθεί απευθείας χρησιμοποιώντας την προηγούμενη σχέση, και η συνολική αντίσταση απώλειας του σπειροειδούς εαυτού του πηνίου λαμβάνεται με το άθροισμα για όλες τις σπείρες:

$$R_{\text{eddy,self}} = \sum_{n=1}^N \omega\mu_0 a_n \left[\frac{4}{3}(\beta a_n)^2 - \frac{\pi}{3}(\beta a_n)^3 + \frac{2\pi}{15}(\beta a_n)^5 - \dots \right] \quad (42)$$

Η αμοιβαία αντίσταση απώλειας Eddy κάθε κυκλικού αγωγού με οποιονδήποτε άλλο κυκλικό αγωγό στο πηνίο επιτυγχάνεται τροποποιώντας την ακέραια αντίσταση

που παρουσιάζεται στην μέθοδο Kraichman για ένα ζεύγος πηνίων. Λαμβάνοντας υπόψη τους νηματώδεις αγωγούς με λεπτά στρώματα μόνωσης, η ακτίνα του αγωγού μπορεί να αγνοηθεί. Η προκύπτουσα κατάσταση είναι ένα ειδικό σενάριο του ακεραίου αμοιβαίου συντελεστή σύνθετης αντίστασης με τους θεωρούμενους ομόκεντρους κυκλικούς αγωγούς που σχηματίζουν το ζεύγος βρόχων ρεύματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για δύο σπείρες με σήμανση 1 και 2. Η αντίστοιχη ολοκλήρωση αντίστασης μπορεί να είναι εκφραστεί ως

$$R_{\text{eddy,mut,12}} = \frac{\omega\mu_0}{4\pi} \iint \frac{\sin(\beta r_{12})}{r_{12}} \cos(\psi) ds_1 ds_2 \quad (42)$$

Όπου

$$r_{12} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\psi)} \quad (43)$$

Η απλούστευση του ολοκληρώματος στην παραπάνω σχέση και η γενίκευση για κάθε ζεύγος κυκλικών αγωγών στο πηνίο οδηγούν στην πλήρη αμοιβαία αντίσταση απώλειας eddy του συστήματος. Η έκφραση του r_{12} υποδηλώνει ότι το ολοκλήρωμα περιλαμβάνει ελλειπτικά ολοκληρώματα, που απλοποιούνται χρησιμοποιώντας τις τυπικές κατά προσέγγιση μορφές για τα πλήρη ελλειπτικά ολοκληρώματα του πρώτου είδους ($K(\cdot)$) και δεύτερου είδους ($E(\cdot)$). Οι απλουστευμένες σχέσεις :

$$R_{\text{eddy,mut,12}} = \frac{\omega\mu_0\beta^2 a_1 a_2}{2\pi} \left[I_{1,12} - \frac{2\beta}{3} \pi^2 a_1 a_2 + \frac{2\beta^3}{15} \pi^2 a_1 a_2 (a_1 + a_2)^2 (\kappa_{12}^2 - 2) \right] \quad (44)$$

Με

$$I_{1,12} = 4\pi(a_1 + a_2) \left[E(\kappa_{12}) - \frac{2\sqrt{1-\kappa_{12}^2}}{3\kappa_{12}^2} \left[K\left(\frac{\kappa_{12}^2}{\kappa_{12}^2-1}\right) - (2\kappa_{12}^2 - 1)E\left(\frac{\kappa_{12}^2}{\kappa_{12}^2-1}\right) \right] \right] \quad (45)$$

όπου κ_{12} είναι ο παράγοντας κ για τους κυκλικούς αγωγούς 1 και 2, που δίδονται από το $2\sqrt{a_1 a_2}/(a_1 + a_2)$. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, υπολογίζεται η αμοιβαία αντίσταση απώλειας eddy μεταξύ κάθε ζεύγους κυκλικού αγωγού και το άθροισμά τους δίνει τη συνολική αμοιβαία αντίσταση απώλειας eddy του πηνίου, η οποία μπορεί να γραφτεί με γενικευμένους όρους ως

$$R_{\text{eddy,mutual}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\omega\mu_0\beta^2 a_i a_j}{2\pi} \left[I_1 - \frac{2\beta}{3} \pi^2 a_i a_j + \frac{2\beta^3}{15} \pi^2 a_i a_j (a_i + a_j)^2 (\kappa_{i,j}^2 - 2) \right] (1 - \delta_{i,j}) \quad (46)$$

Με

$$I_1 = 4\pi(a_i + a_j)E(\kappa_{i,j}) - \frac{2\sqrt{1-\kappa_{i,j}^2}}{3\kappa_{i,j}^2} \left[K\left(\frac{\kappa_{i,j}^2}{\kappa_{i,j}^2-1}\right) - (2\kappa_{i,j}^2 - 1)E\left(\frac{\kappa_{i,j}^2}{\kappa_{i,j}^2-1}\right) \right] \quad (47)$$

όπου $\delta_{i,j} = 1$ για $i = j$ & $\delta_{i,j} = 0$ για $i \neq j$, $\kappa_{i,j}$ είναι ο παράγοντας κ για κυκλικούς αγωγούς i και j , που δίδονται από το $2\sqrt{a_i a_j} / (a_i + a_j)$. Ο παράγοντας $\delta_{i,j}$ διασφαλίζει ότι η αμοιβαία αντίσταση απώλειας eddy δεν υπολογίζεται για $i = j$. Σε αυτήν την περίπτωση, η αντίσταση απώλειας eddy υπολογίζεται με τον τύπο αντίστασης απώλειας eddy.

Το άθροισμα των αντιστάσεων της ιδιο-απώλειας και της αμοιβαίας απώλειας των σπειρών του πηνίου δίνει τη συνολική αντίσταση απώλειας του σπειροειδούς πηνίου

$$R_{\text{eddy}} = R_{\text{eddy,self}} + R_{\text{eddy,mutual}} \quad (48)$$

Από τη διαμόρφωση στο Σχ. 3, η συνολική αντίσταση a_c για κάθε πηνίο στο θαλασσινό νερό λαμβάνεται από:

$$R_{\text{ac,sea}} = R_{\text{pro}} + R_{\text{eddy}} \quad (49)$$

Η ιδιο-επαγωγή και η αμοιβαία επαγωγή των σπειροειδών πηνίων για το IPT είναι οι βασικές ιδιότητες και διατίθενται σε ελλειπτική ολοκληρωμένη μορφή σε [36] για ένα μοντέλο ομόκεντρου κύκλου. Επομένως, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα στη βελτιστοποίηση του μοντέλου στο παρακάτω σχήμα. Οι ακόλουθες εξισώσεις δείχνουν τις αντίστοιχες εκφράσεις, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχει ευθυγράμμιση μεταξύ των πηνίων και το κενό μεταξύ των πηνίων που υποδηλώνονται με g (σε m) Οι δείκτες «p» και «s» χρησιμοποιούνται για πρωτεύοντα και δευτερεύοντα

πηνία αντίστοιχα για την έκφραση αμοιβαίας επαγωγής.

$$L = \sum_{i=1}^N \mu_0 a_i \left[\ln\left(\frac{8a_i}{r_w}\right) - 2 \right] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_0 \sqrt{a_i a_j} \left[\left(\frac{2}{\kappa_0} - \kappa_0\right) K(\kappa_0) - \frac{2}{\kappa_0} E(\kappa_0) \right] (1 - \delta_{i,j}), \quad (50)$$

$$\sum_{i_p=1}^{N_p} \sum_{j_s=1}^{N_s} \mu_0 \sqrt{a_{i_p} a_{j_s}} \left[\left(\frac{2}{\kappa_g} - \kappa_g\right) K(\kappa_g) - \frac{2}{\kappa_g} E(\kappa_g) \right]$$

όπου κ_g είναι ο συντελεστής κ για περιελίξεις που βρίσκονται σε επίπεδα διαχωρισμένα με απόσταση g , που δίδεται από $2\sqrt{a_{i_p} a_{j_s}} / \left((a_{i_p} + a_{j_s})^2 + g^2 \right)$. Για

μη ευθυγραμμισμένα πηνία, οι εκφράσεις της συνάρτησης Bessel μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της αμοιβαίας επαγωγής.

Οι προαναφερθείσες εξισώσεις παρέχουν τις απαραίτητες εκφράσεις για την αναλυτική μοντελοποίηση ενός υποβρύχιου συστήματος IPT. Οι εκφράσεις αντίστασης και ιδιο-επαγωγής πρέπει να αξιολογούνται για κάθε πηνίο στην εγκατάσταση, ενώ η αμοιβαία αυτεπαγωγή πρέπει να υπολογίζεται για κάθε ζεύγος πηνίων στην εγκατάσταση, για να ληφθεί το πλήρες αναλυτικό μοντέλο του συστήματος UWIPT.

Ο κύριος περιορισμός ενός συστήματος UWIPT για μικρή εφαρμογή AUV είναι το μέγεθος του δευτερεύοντος πηνίου, καθώς είναι τοποθετημένο στο AUV. Ως εκ τούτου, απαιτείται η βελτιστοποίηση της διεπαφής IPT για μέγεθος πηνίου, απόσταση μεταφοράς ισχύος ή διάκενο θαλασσινού νερού και συχνότητα λειτουργίας. Απαιτείται πρόσθετη προσοχή για τις απώλειες του θαλασσινού νερού, που εκδηλώνονται με τη απώλειας αντίστασης eddy. Η μέθοδος βελτιστοποίησης παρουσιάζεται με το παράδειγμα ενός συστήματος UWIPT με αντιστάθμιση Σειρά-Σειρά (SS), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η κύρια πλευρά έχει έναν μονοφασικό μετατροπέα fullbridge και η δευτερεύουσα έχει έναν ανορθωτή διόδων fullbridge. Για περιορισμούς στο μέγεθος του πηνίου του δέκτη, λαμβάνεται υπόψη ένα μικρό AUV με διάμετρο 100 mm. Ο στόχος είναι να προσδιοριστούν οι βέλτιστες διαστάσεις των πηνίων και η συχνότητα λειτουργίας για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης μαγνητικής ζεύξης του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών θαλασσινού νερού. Η απόδοση μαγνητικής ζεύξης (η_{mag}) ορίζεται ως:

$$\eta_{mag} = \frac{P_{out,sec}}{P_{in,pri}} = \frac{P_{out,sec}}{P_{out,sec} + P_{loss,pri} + P_{loss,sec}} = \frac{P_{in,pri} - P_{loss,pri} - P_{loss,sec}}{P_{in,pri}} \quad (51)$$

όπου $P_{out, sec}$ είναι η έξοδος ισχύος του δευτερεύοντος πηνίου, $P_{in, pri}$ είναι η ισχύς εισόδου στο πρωτεύον πηνίο, $P_{loss, pri}$ είναι οι απώλειες στο πρωτεύον πηνίο, $I_{pri}^2 R_{pri}$, $P_{loss,sec}$ είναι οι απώλειες στο δευτερεύον πηνίο, $I_{sec}^2 R_{sec}$, I_{pri} είναι η τιμή rms του πρωτεύοντος ρεύματος πηνίου (i_{pri}), το I_{sec} είναι η τιμή rms του δευτερεύοντος ρεύματος πηνίου (i_{sec}), R_{pri} είναι η αντίσταση του πρωτεύοντος πηνίου και R_{sec} είναι η δευτερεύουσα αντίσταση στο πηνίο. Και οι δύο αντιστάσεις ac περιλαμβάνουν την επίδραση των αντιστάσεων απώλειας Eddy.

Συνήθως τα συστήματα IPT βελτιστοποιούνται σύμφωνα με τη μέγιστη εφικτή απόδοση και ικανότητα μεταφοράς ισχύος (Samrath et al., 2016), η οποία μπορεί να μην είναι εφικτή υπό τους περισσότερους περιορισμούς λειτουργίας. Ως εκ τούτου, το η_{mag} έχει χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητή βελτιστοποίησης. Αυτό δίνει περισσότερες πληροφορίες για την απόδοση των μαγνητικών, ενώ φέρνει τις ηλεκτρικές προδιαγραφές στους περιορισμούς βελτιστοποίησης.

Τώρα, εφαρμόζεται η διαδικασία για τη βελτιστοποίηση του υποβρύχιου συστήματος IPT για το AUV διαμέτρου 100 mm, με την απαίτηση εξόδου DC 48V, 20A. Παρέχεται από πηγή 48VDC. Τα κύρια πόδια του μετατροπέα λειτουργούν σε μετατόπιση φάσης 180 °. Ο στόχος του πλήρους σχεδιασμού του συστήματος είναι η επίτευξη εισόδου DC σε απόδοση εξόδου 90% και επομένως είναι επιθυμητό η απόδοση της μαγνητικής ζεύξης να είναι τουλάχιστον 96%. Ως εκ τούτου, κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, το η_{mag} μεγιστοποιείται και παρακολουθείται έτσι ώστε να υπερβαίνει την επιθυμητή τιμή ($\eta_{\text{mag, des}}$) του 96%.

Το δευτερεύον πηνίο εκτός της ακτίνας, το s είναι 35mm έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί εντός του AUV μαζί με αξεσουάρ όπως ακροδέκτες σύνδεσης, καλώδια μολύβδου κ.λπ. Θεωρείται η ονομαστική αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού 5S/m. Για τέτοια μικρά συστήματα IPT, προτιμώνται σπειροειδή πηνία με ομοιόμορφο βήμα ίσο με τη διάμετρο της περιέλιξης και συμπαγή συστήματα με μικρό διάκενο μεταξύ των πηνίων. Ως εκ τούτου, θεωρούνται σπειροειδή πηνία με ομοιόμορφο βήμα σε αυτήν τη βελτιστοποίηση με ένα ονομαστικό διάκενο θαλασσινού νερού g 8 mm Από το ηλεκτρικό κύκλωμα στο παρακάτω σχήμα, αγνοώντας τις απώλειες των σχετικών ηλεκτρονικών ισχύος, τα ρεύματα μέσω των πρωτογενών και δευτερευόντων πηνίων λαμβάνονται ως

$$\begin{aligned} I_{\text{pri}} &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \\ \frac{P_{\text{out}}}{V_{\text{in}}\eta_{\text{mag, des}}} &= 24.1\text{A}, \quad (52) \\ I_{\text{sec}} &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{P_{\text{out}}}{V_{\text{out}}} = 23.14\text{A}. \end{aligned}$$

Ως εκ τούτου, και τα δύο πηνία επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη ένα μέγιστο ρεύμα rms 30A. που οδηγεί στην επιλογή EqAWG # 10 αγωγού litz με 2625 AWG # 44 κλώνους, με περιοχή περιέλιξης (A_w) 6,77 mm² με εύρος συχνοτήτων από 100 kHz έως 850 kHz.

Με αυτήν την επιλογή αγωγού litz, ο δευτερεύων αριθμός σπειρών N_s ορίζεται 5, το οποίο διατηρεί λίγο χώρο κοντά στο κέντρο του πηνίου για ρυθμίσεις, εάν είναι

απαραίτητο. Τώρα το σύστημα αναλύεται για πρωτεύον πηνίο εκτός διαδρομής ακτίνας $r_{out,p}$, στην περιοχή 35mm έως 55mm, πρωτεύον αριθμό πηνίου σπερών N_p στην περιοχή 4 έως 12 και f_s στην περιοχή 100 kHz έως 500 kHz.

Από τα αποτελέσματα, τα σχέδια που βοηθούν στην επίτευξη V_{in} 48V εξετάζονται για περαιτέρω ανάλυση. Για τα εξειδικευμένα σχέδια λαμβάνονται υπόψη, η_{mag} και τη συχνότητα όπου εμφανίζεται το η_{mag} (για να ονομαστεί ως βέλτιστη συχνότητα $f_{s, opt}$) σχεδιάζονται έναντι του N_p για το εύρος της διαδρομής. Τα επισημασμένα σημεία δείχνουν ότι το πρωτεύον πηνίο με $N_p = 7$, $r_{out,p} = 40$ mm στο $f_{s, opt} = 325$ kHz παρέχει το βέλτιστο η_{mag} του 97,3%. Εξ ου και αυτός είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε και η απόδοση μαγνητικής ζεύξης του συστήματος UWIPT επικυρώνονται μέσω πειραμάτων.

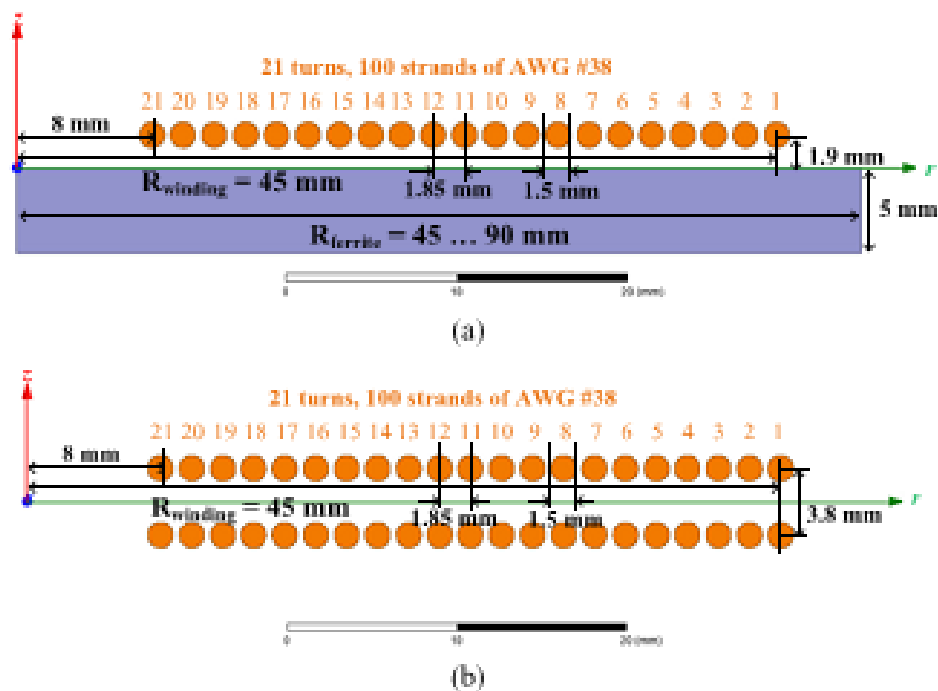
Προκειμένου να εξαχθούν ακριβείς τιμές μαγνητικών πεδίων για το επίπεδο πηνίο με πεπερασμένο μέγεθος πλάκας φερρίτη, τα ρεύματα περιέλιξης πρέπει να αντικατοπτρίζονται στις επιφάνειες της πλάκας φερρίτη για άπειρους χρόνους [38]. Οι αρχικές σπείρες αντικατοπτρίζονται στην άνω επιφάνεια της πλάκας φερρίτη μόνο μία φορά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της ισοδύναμης δομής στο παρακάτω σχήμα είναι ο απλούστερος και ταχύτερος υπολογισμός του πεδίου, αλλά δεν είναι σε θέση να προβλέψει την επίδραση του μεγέθους της πλάκας φερρίτη στην αντίσταση κατά την επίδραση εγγύτητας. Η επίδραση αυτή μελετάται παραμετρικά με ένα πειραματικό επίπεδο πηνίο με σάρωση του μεγέθους της πλάκας φερρίτη.

Η Εικόνα 13 δείχνει τη δομή και τις διαστάσεις του πειραματικού επιπέδου πηνίου. Οι εσωτερικές και εξωτερικές ακτίνες του περιελίγματος είναι 8 και 45 mm, αντίστοιχα. Ο αγωγός Litz αποτελείται από 100 κλώνους διαμέτρου 0,1 mm. Το πάχος της πλάκας φερρίτη είναι 5 mm. Το παρακάτω σχήμα είναι η ισοδύναμη δομή για τον υπολογισμό του $\langle B^2 \rangle$. Η απόσταση κατά την αξονική κατεύθυνση μεταξύ μιας αρχικής στροφής και της αντίστοιχης στροφής του κατοπτρισμού είναι 3,8 mm.

Η Εικόνα 14 (α) δείχνει το υπολογιζόμενο $\langle B^2 \rangle$ χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη δομή της Εικόνας 13(β) και το προσομοιωμένο $\langle B^2 \rangle$ χρησιμοποιώντας το πηνίο με πλάκα σιδηρομαγνητικού υλικού στην Εικόνα 13(α). Η ακτίνα της πλάκας σιδηρομαγνητικού υλικού σαρώνεται παραμετρικά από 45 έως 90 mm στο ANSYS Maxwell. Το μέγεθος της πλάκας φερρίτη δεν είναι μικρότερο από αυτό της περιέλιξης, προκειμένου να αυξηθεί η σύζευξη [39] και να μειωθεί η εκπομπή πεδίου

[25] σε IPT. Η εικόνα 14(β) αποτυπώνει την γραφική παράσταση προσομοίωσης μαγνητικών πεδίων σε κάθε στροφή. Η προσομοίωση υλοποιείται με χρήση κλώνου διέγερσης και δινορεύμα, με συχνότητα 100 kHz και ρεύμα περιέλιξης 1 ARMS.

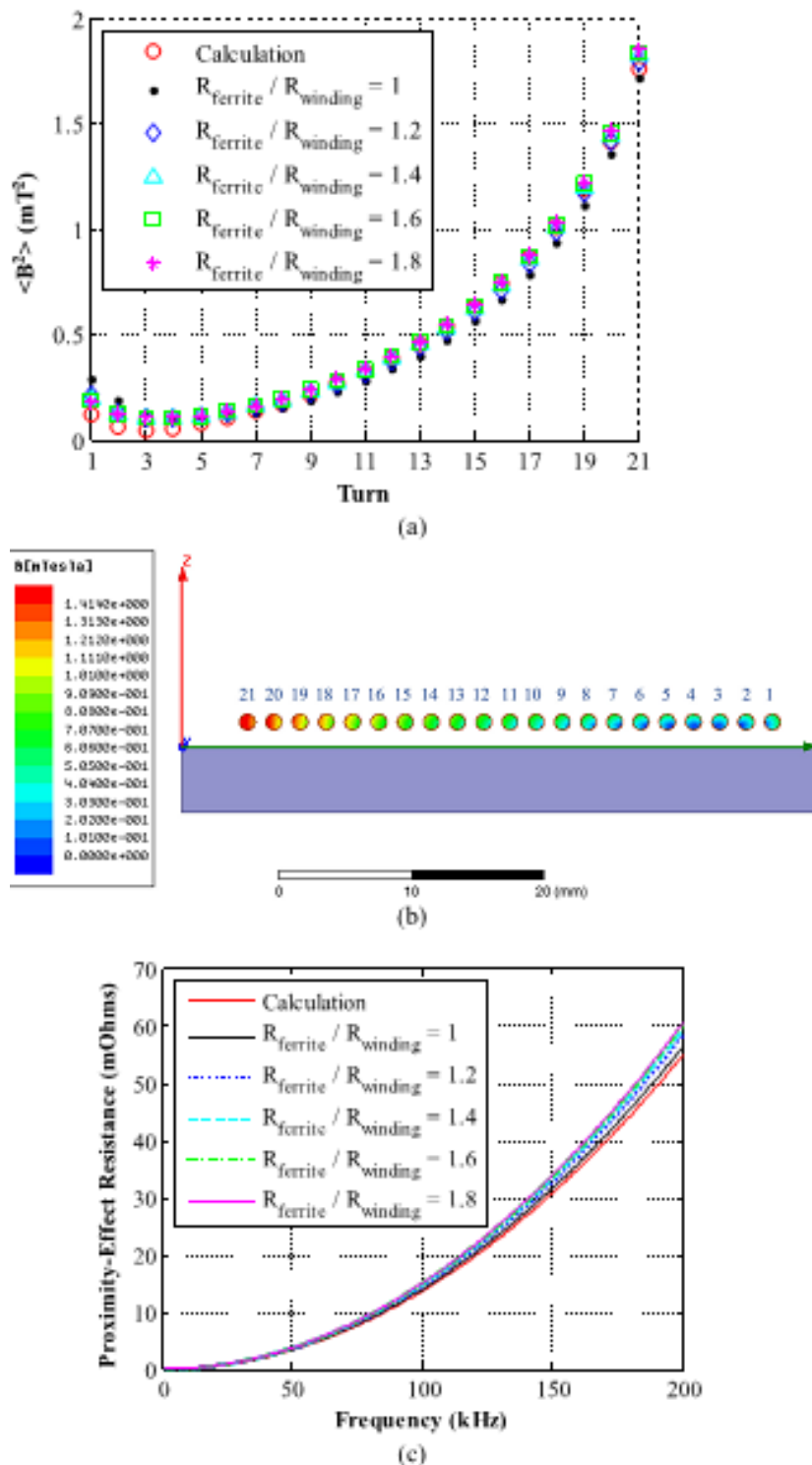
Τα μαγνητικά πεδία είναι ακριβή για τις περισσότερες εσωτερικές σπείρες. Υπάρχουν σφάλματα για τις εξωτερικές σπείρες, αλλά οι επιδράσεις τους στην αντίσταση στο φαινόμενο εγγύτητας είναι αμελητέες επειδή τα μαγνητικά πεδία στις εξωτερικές σπείρες είναι πολύ ασθενέστερα από εκείνα στις εσωτερικές. Για σωστό σχεδιασμό πηνίου, οι εσωτερικές ακτίνες περιελίξεως είναι μικρότερες από τις μισές εξωτερικές ακτίνες προκειμένου να βελτιωθεί ο συντελεστής ποιότητας του πηνίου και η σύνδεση μεταξύ πηνίων πομπού και δέκτη [39]. Σε αυτήν την περίπτωση, οι περισσότερες σπείρες τοποθετούνται μακρύτερα από την άκρη της πλάκας σιδηρομαγνήτη ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση του περιθωρίου.



Εικόνα 13. (α) Κυλινδρική δομή του πειραματικού πηνίου με την πλάκα φερρίτη (β) Ισοδύναμη δομή του (α) όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εικόνας για τον υπολογισμό του $\langle B^2 \rangle$

Οι αντιστάσεις επίδρασης εγγύτητας στην Εικόνα 14(γ) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις τιμές του $\langle B^2 \rangle$ στην Εικόνα 14(α). Οι διαφορές είναι μικρότερες από 8% μεταξύ υπολογισμού με κατοπτρικές σπείρες και προσομοίωσης με

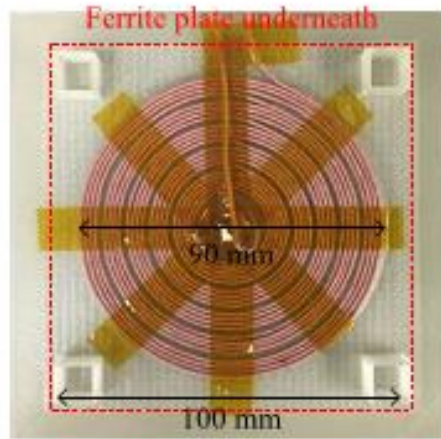
σιδηρομαγνητικό υλικό. Επομένως, η επίδραση του μεγέθους του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι αμελητέα στην αντίσταση στο φαινόμενο επίδρασης εγγύτητας.



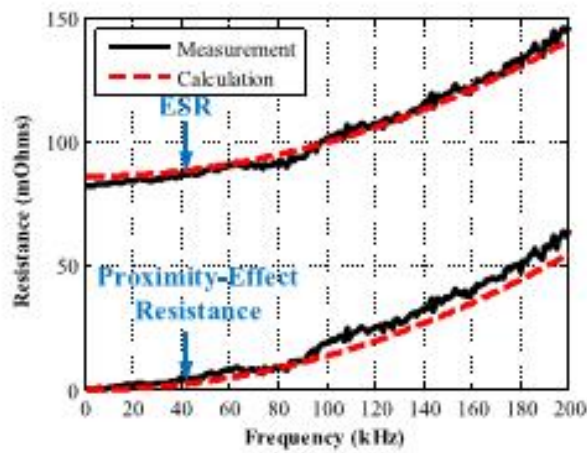
Εικόνα 14. (α) Υπολογισμός $\langle B^2 \rangle$ για την ισοδύναμη δομή και προσομοιωμένο $\langle B^2 \rangle$ για την πραγματική δομή για διαφορετικές διαστάσεις της πλάκας σιδηρομαγνήτη (β) Απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου ANSYS Maxwell με

I^{RMS} ρεύμα περιτύλιξης(c) αντίσταση επίδρασης εγγύτητας υπολογισμένη με τη χρήση $\langle B^2 \rangle$

Το πειραματικό επίπεδο πηνίο στην Εικόνα 13 (α) κατασκευάστηκε όπως φαίνεται στην Εικόνα 15(α). Η εμπορική πλάκα σιδηρομαγνήτη με διαστάσεις 100 mm × 100 mm × 5 mm τοποθετείται κάτω από το τυλίγμα. Το μέγεθος του σιδηρομαγνήτη είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος τυλίγματος, οπότε η επίδραση του σχήματος του είναι αμελητέα. Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (Equivalentseriesresistance-ESR) του πηνίου μετρήθηκε με τον αναλυτή σύνθετης αντίστασης Agilent 4294A από 40 Hz έως 200 kHz. Η μετρηθείσα αντίσταση επίδρασης εγγύτητας προήλθε αφαιρώντας την αντίσταση dc από το ESR. Η αντίσταση dc προσεγγίζεται να είναι ίδια με τη μετρούμενη ESR στα 40 Hz, η οποία είναι η χαμηλότερη συχνότητα που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο αναλυτής σύνθετης αντίστασης για τη μέτρηση. Η Εικόνα15(β) δείχνει τη σύγκριση μεταξύ υπολογισμού και μέτρησης. Η διαφορά είναι μικρότερη από 7% για το ESR και λιγότερο από 15% για την αντίσταση στο φαινόμενο εγγύτητας.

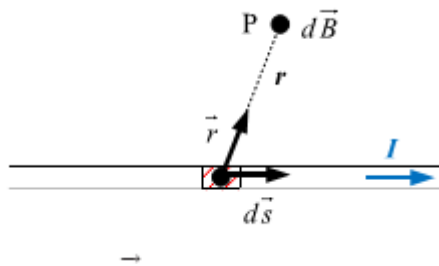


(a)



(b)

Εικόνα 15. (a) Κατασκευασμένο πηνίο για τη δομή (a) με τετράγωνη πλάκα σιδηρομαγνητικού υλικού διαστάσεων 100 mm × 100 mm × 5 mm. (b) ESR αντίσταση επίδρασης εγγύτητας μέσω υπολογισμού (διακεκομμένη γραμμή) και μέσω μέτρησης (συνεχής γραμμή).



Εικόνα 16. Μαγνητικό πεδίο $d\vec{B}$ στο σημείο μέτρησης P που δημιουργήθηκε από το μικρό τμήμα του αγωγού $d\vec{s}$ ρεύμα διέγερσης I

Κεφάλαιο 4. Υπολογισμός Αγωγών Litz

Οι αγωγοί Litz αποτελούν ένα βασικό εργαλείο για ηλεκτρονικά ισχύος, επιτρέποντας αγωγούς χαμηλής αντίστασης υψηλού ρεύματος σε συχνότητες έως και εκατοντάδες kHz. Αλλά η αποτελεσματική εφαρμογή του αγωγού Litz δεν είναι εύκολη. Απλές προσεγγίσεις, όπως πίνακες συνιστώμενης διαμέτρου κλώνου κατά συχνότητα, μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγούν σε υψηλότερη αντίσταση από ένα απλό καλώδιο ή ένα τύλιγμα και σχεδόν πάντα οδηγούν σε υψηλότερο κόστος και απώλεια από ό, τι θα μπορούσε να επιτευχθεί με πιο προσεκτικό σχεδιασμό. Ωστόσο, η βιβλιογραφία για πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις ανάλυσης και σχεδιασμού μπορεί να είναι εκφοβιστική, με προτεινόμενες προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένων συναρτήσεων Bessel [40], συνδυασμών συναρτήσεων Bessel [27] ή επαναληπτική εφαρμογή αυτών, καθώς και περίπλοκα μοντέλα διαπερατότητας [41] μεταξύ άλλων. Ακόμη και η σχετικά απλή προσέγγιση απαιτεί έναν τύπο αποτελούμενο από δέκα όρους να αυξάνονται σε διάφορες δυνάμεις. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι γενικά βοηθούν μόνο στην επιλογή του αριθμού των κλώνων και προσφέρουν λίγη καθοδήγηση σχετικά με τις λεπτομέρειες της κατασκευής - τον αριθμό των κλώνων που πρέπει να συνδυάζονται σε κάθε βήμα της περιστροφής. (Για παράδειγμα, ο αγωγός litz 120 κλώνων θα μπορούσε να κατασκευαστεί ως 12×10 , ως $8 \times 5 \times 3$ ή ως $3 \times 5 \times 8$.)

Αυτή η εργασία των [28] προσφέρει μια απλοποιημένη προσέγγιση για την επιλογή του αριθμού και της διαμέτρου των αγωγών litz, και δείχνει ότι είναι ισοδύναμη με τις πιο περίπλοκες προσεγγίσεις σε άλλες εργασίες. Η προσέγγιση μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί με ένα υπολογιστικό φύλλο, αλλά είναι επίσης αρκετά απλή για υπολογισμούς με το χέρι. Η απλότητά της την καθιστά χρήσιμη για την εξάσκηση μηχανικών, και επίσης διευκολύνει τους επαγγελματίες και τους ερευνητές να αποκτήσουν γνώση του σχεδιαστικού προβλήματος και των φαινομένων απώλειας. Η εργασία αυτή προσφέρει επίσης μια απλή προσέγγιση βασισμένη σε κανόνες για την επιλογή της κατασκευής μόλις επιλεγεί ο αριθμός και η διάμετρος των κλώνων.

Για γρήγορη αναφορά, αυτή η ενότητα παρέχει αναλυτικές οδηγίες για τη βασική μέθοδο, όπως εφαρμόζεται σε έναν μετασχηματιστή περιελίξεως, και η ακόλουθη ενότητα επεκτείνει τη μέθοδο σε επαγωγείς με κενό. Η θεωρητική βάση και η αιτιολόγηση της μεθόδου συζητούνται παρακάτω.

4.1. Επιλογή αριθμού και διαμέτρου κλώνων

Τα τέσσερα βήματα της διαδικασίας για την επιλογή του αριθμού και της διαμέτρου των κλώνων είναι:

- 1) Υπολογισμός του βάθους του δέρματος: Το βάθος του δέρματος δίνεται ως

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (53)$$

όπου ρ είναι η αντίσταση του αγωγού ($1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ για χαλκό σε θερμοκρασία δωματίου ή $2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ στους $60^\circ C$), f είναι η συχνότητα ενός ημιτονοειδούς ρεύματος στην περιέλιξη και μ_0 είναι η διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου ($4 \times 10^{-7} \pi H/m$). Η χρήση μονάδων MKS για όλες τις μεταβλητές σε αυτήν την εξίσωση οδηγεί σε βάθος δέρματος μετρούμενο σε μέτρα. Για μη ημιτονοειδή ρεύματα και συνδυασμούς ρεύματος dc και ac, ο ίδιος τύπος για το βάθος δέρματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν η συχνότητα αντικατασταθεί από την πραγματική συχνότητα που εισήχθη.

2) Παράμετροι περιέλιξης: Οι παράμετροι περιέλιξης που απαιτούνται για τον υπολογισμό, b και N_s , απεικονίζονται στην Εικόνα 17 για ορισμένες κοινές γεωμετρικές περιέλιξης. b είναι το πλάτος της περιέλιξης, κατά μήκος της όψης όπου η μία περιέλιξη βλέπει την άλλη, και N_s είναι ο αριθμός σπειρών στο τμήμα της εν λόγω περιέλιξης. Σε απλές περιελίξεις χωρίς παρεμβολή, το N_s είναι απλώς ο αριθμός σπειρών στο τύλιγμα ($N_s = N$) ενώ σε περιελίξεις με παρεμβολές, είναι ο αριθμός των σπειρών που μετράται από μια επιφάνεια μηδενικού πεδίου προς την όψη μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Η επιφάνεια μηδενικού πεδίου είναι είτε απέναντι σε πυρήνα υψηλής διαπερατότητας, είτε στο κέντρο μιας περιέλιξης σε συμμετρικό σχέδιο με παρεμβολές.

Πίνακας 3. Παράμετροι για οικονομικό σχεδιασμό καλωδίων Litz, το k χρησιμοποιείται στην εξίσωση $n_e = k (\delta^2 b) / N_s$

Strand AWG size	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Strand diameter (mm)	0.202	0.180	0.160	0.143	0.127	0.113	0.101	0.090	0.080	0.071	0.063	0.056	0.050	0.045	0.040	0.035	0.032
Economical F_R	1.06	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.18	1.22	1.25	1.30	1.35	1.41	1.47	1.54	1.60	1.64	1.68
k (mm^{-3})	130	203	318	496	771	1.2k	1.8k	2.8k	4.4k	6.7k	10k	16k	24k	36k	54k	79k	115k

3) Συνιστώμενος αριθμός κλώνων: Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός ενός προτεινόμενου αριθμού κλώνων για καθεμία από τις διαμέτρους κλώνου που εξετάζεται, χρησιμοποιώντας

$$n_e = k \frac{\delta^2 b}{N_s} \quad (54)$$

όπου k είναι μια σταθερά για κάθε διάμετρο κλώνου και δίνεται σε μονάδες mm^{-3} , έτσι b και δ θα πρέπει επίσης να είναι σε μονάδες mm , έτσι ώστε να προκύπτει μια τιμή n_e χωρίς μονάδα.

Οι συνιστώμενες τιμές του n_e που δίνονται από την παραπάνω εξίσωση πρέπει να λαμβάνονται ως γενικές ενδείξεις. Οι τιμές του n έως και 25% πάνω ή κάτω από το n_e μπορούν ακόμα να είναι καλές επιλογές.

4) Τελική διάμετρος και επιλογή αριθμού: Από την προηγούμενη σχέση παράγεται μια σειρά από καλές επιλογές σχεδιασμού για διαφορετικές διαμέτρους κλώνου. Για την επιλογή ενός συνδυασμού, απαιτείται πρώτα έλεγχος εάν τα σχέδια που δίνονται από την προηγούμενη σχέση ταιριάζουν στο διαθέσιμο παράθυρο. Μια πρώτη προσέγγιση για αυτόν τον υπολογισμό είναι να θεωρηθεί μία συνολική επιφάνεια πραγματικού χαλκού, NnA_s , όπου N είναι ο αριθμός των σπειρών, n είναι ο αριθμός των κλώνων, και A_s είναι η περιοχή διατομής ενός μόνο κλώνου, η οποία πρέπει να είναι μικρότερη περισσότερο από 25 έως 30% της περιοχής παραθύρου που διατίθεται για αυτήν την περιέλιξη. Εάν ο αριθμός των προτεινόμενων κλώνων δεν ταιριάζει στο παράθυρο, μπορεί κανείς να εξετάσει το ενδεχόμενο χρήσης του μεγαλύτερου αριθμού που ταιριάζει, αλλά εάν αυτό απαιτεί τη μείωση του αριθμού των κλώνων κατά περισσότερο από περίπου 25%, θα έχει σχεδόν εξίσου καλή απόδοση με σημαντικά χαμηλότερο κόστος.

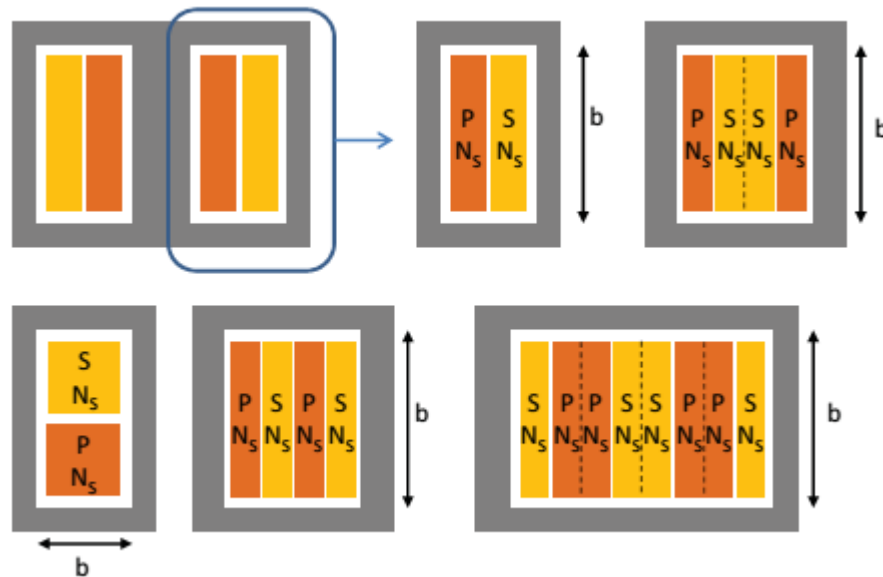
Όταν ο αριθμός των κλώνων επιλέγεται ως n_e , ο συντελεστής αντίστασης a_c είναι όπως δίνεται στον προαναφερθέντα πίνακα. Από αυτές τις πληροφορίες και έναν απλό υπολογισμό της αντίστασης d_c , είναι απλό να καταρτιστεί ένας πίνακας της αντίστασης a_c των οικονομικών και αποτελεσματικών σχεδίων για κάθε μία από τις διαμέτρους κλώνου που εξετάζεται, παρέχοντας μια σειρά πιθανών αντισταθμίσεων μεταξύ απώλειας και κόστους. Δεδομένης της απώλειας (και επομένως της αντίστασης a_c), μπορεί κανείς να επιλέξει τη συνάντηση σχεδιασμού χαμηλότερου κόστους που προδιαγράφεται από τον πίνακα.

Εάν ο αριθμός κλώνων που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί αποκλίνει από τις τιμές που δίνονται από την προηγούμενη σχέση, είτε λόγω περιορισμών χώρου ή διαθεσιμότητας του καλωδίου, ο συντελεστής αντίστασης a_c για οποιοδήποτε αριθμό κλώνων μπορεί να υπολογιστεί με

$$F_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + \frac{(\pi n N_s)^2 d_s^6}{192 \cdot \delta^4 b^2} \quad (55)$$

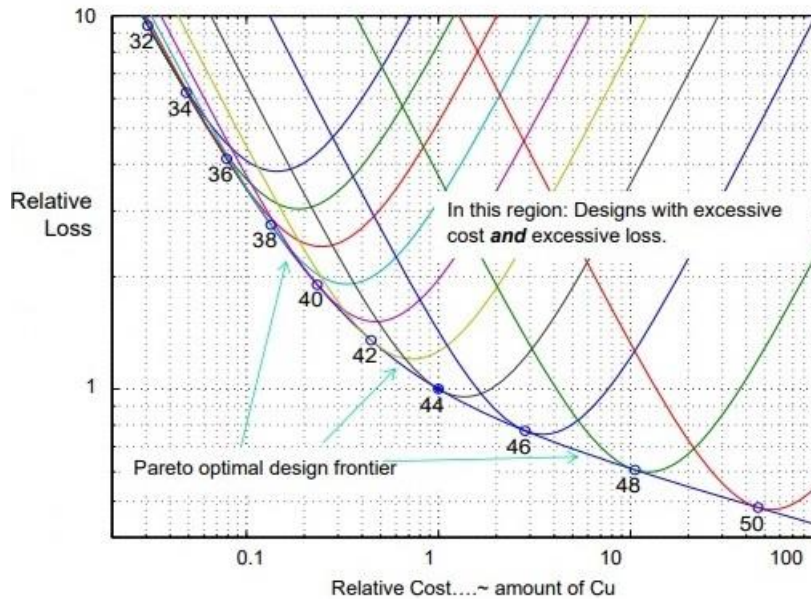
όπου n είναι ο αριθμός των κλώνων που χρησιμοποιούνται πραγματικά και d_s είναι η διάμετρος του κλώνου. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα μήκη που αναφέρονται στον παραπάνω τύπο (d_s , δ και b) πρέπει να εκφράζονται στις ίδιες μονάδες (mm). Σημειώνεται πως βέλτιστη τιμή για το F_R θεωρείται $F_{R, opt} = 1.5$.

Οι σχεδιαστές τυλίγματος ακολουθούν συχνά έναν κανόνα σχετικά με το «κυκλικό mils ανά amp "ή" amp ανά τετραγωνικό mm».



Εικόνα 17. Παραδείγματα για τον τρόπο με τον οποίο ο πλάτος περιέλιξης b και ο αριθμός σπειρών ανά ενότητα ορίζονται για ορισμένες κοινές γεωμετρικές περιέλιξης.

Κάθε ενότητα που εμφανίζεται έχει έναν αριθμό σπειρών N_s . Ανάλογα με το αν τα διαφορετικά τμήματα μιας δεδομένης περιέλιξης (πρωτεύον P ή δευτερεύον S) είναι παράλληλα ή σειρά, ο συνολικός αριθμός σπειρών N για αυτήν την περιέλιξη μπορεί να είναι ίσος με N_s ή ίσος με το προϊόν N_s και τον αριθμό τμημάτων. Το N_s μπορεί να είναι διαφορετικό για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα.



Εικόνα 18. Διάγραμμα Pareto. Στον άξονα χ απεικονίζεται το κόστος χαλκού ενώ στον άξονα ψ οι απώλειες από την αγωγή του ρεύματος. Εάν θέλουμε να επιτύχουμε λιγότερες απώλειες στους αγωγούς Litz, το κόστος θα πρέπει να αυξηθεί. Υπάρχει όμως ένα μέτωπο όπου είναι δυνατόν να μειωθεί και το κόστος και οι απώλειες χωρίς να επιβαρυνθεί κάποια από τις δύο παραμέτρους. Ισχύει πάντα $1,5 < FR < 2,0$

4.2. Επιλογή Κατασκευής

Εάν ένας μεγάλος αριθμός κλώνων απλώς περιστρέφεται μαζί με τους άλλους, αντί να κατασκευάζεται με πολλαπλά επίπεδα περιστροφής (μερικές φορές ονομάζεται κατασκευή «πραγματικού litz»), μπορεί να υπάρξει ένα επιδερμικό πρόβλημα: το ρεύμα υψηλής συχνότητας θα ρέει κατά προτίμηση στους επιφανειακούς κλώνους, ενώ οι εσωτερικοί κλώνοι δεν χρησιμοποιούνται [42]. Η κατασκευή που απαιτείται για την αποφυγή αυτού του προβλήματος μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής.

Ο κατά προσέγγιση μέγιστος συνιστώμενος αριθμός μονών κλώνων που πρέπει να περιστραφούν μαζί στο πρώτο βήμα είναι

$$n_{1,max} = 4 \frac{\delta^2}{d_s^2} \quad (56)$$

όπου δ είναι το βάθος του δέρματος για έναν συμπαγή αγωγό που δίνεται από την $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}}$ και d_s είναι η διάμετρος ενός μεμονωμένου κλώνου.

Εάν ο συνολικός αριθμός κλώνων, n είναι μικρότερος από $n_{1,max}$, τότε όλοι οι κλώνοι μπορούν απλά να περιστραφούν σε μία λειτουργία χωρίς προβλήματα από το επιδερμικό αποτέλεσμα σε επίπεδο δέσμης. Εάν $n > n_{1,max}$, τότε πολλαπλές λειτουργίες περιστροφής μπορεί να βελτιώσουν την απόδοση. Το πρώτο βήμα περιστροφής πρέπει να συνδυάζει $n_{1,max}$ ή λιγότερους κλώνους. Οι επόμενες λειτουργίες θα πρέπει να συνδυάζουν μόνο 3, 4 ή 5 δέσμες από προηγούμενες λειτουργίες.

Για παράδειγμα, με $d_s = \delta/4$, $n_{1,max} = 64$. Για $n \leq 64$, χρειάζεται μόνο μια απλή λειτουργία περιστροφής. Για μεγαλύτερους αριθμούς κλώνων, απαιτούνται πολλαπλές λειτουργίες. Η πρώτη λειτουργία μπορεί να συνδυάσει έως και 64 κλώνους. Η επόμενη λειτουργία μπορεί να συνδυάσει έως 5 από τις δέσμες 64 κλώνων για να κατασκευάσει αγωγό litz με έως και 320 συνολικούς κλώνους. Στη συνέχεια, έως 5 από αυτές τις δέσμες 320 κλώνων (5×64) μπορούν να συνδυαστούν για τη δημιουργία αγωγού litz με έως και 1600 κλώνους ($5 \times 5 \times 64$). Άλλοι αριθμοί κλώνων μπορούν να δημιουργηθούν ή να προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε αριθμό έως 64 στο πρώτο βήμα και 3, 4 ή 5 στα επόμενα βήματα.

Η τιμή του $n_{1,max}$ που δίνεται από την προηγούμενη εξίσωση είναι συντηρητική. Η τήρηση αυτών των ορίων εγγυάται την αποφυγή προβλημάτων.

4.3. Υπολογισμός απωλειών

Η βάση του υπολογισμού των απωλειών που χρησιμοποιείται εδώ είναι ένας άμεσος υπολογισμός των δινορευμάτων και η επακόλουθη απώλεια που προκαλείται σε έναν κύλινδρο που υποβάλλεται σε ομοιόμορφο εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο. Μία προσέγγιση σε αυτόν τον υπολογισμό είναι να εξαχθεί η ακριβής αναλυτική λύση για έναν μεμονωμένο κύλινδρο βυθισμένο σε ένα ομοιόμορφο πεδίο που εκτείνεται απείρως μακριά από τον κύλινδρο. Αυτό οδηγεί σε λύση συνάρτησης Bessel [40]. Αυτή είναι μια ακριβής λύση για ένα μόνο καλώδιο χωρίς τίποτα κοντά του, αλλά είναι μόνο μια προσέγγιση όταν τα καλώδια είναι πιο κοντά μεταξύ τους [43], και συνήθως δεν είναι καλύτερη από τη φαινομενικά λιγότερο εξελιγμένη μέθοδο Dowell όταν τα καλώδια είναι σφιχτά συσκευασμένα μαζί όπως σε μια περιέλιξη [44].

Ευτυχώς, η απόκλιση μεταξύ της πραγματικής συμπεριφοράς και της λύσης της συνάρτησης Bessel είναι μόνο σε υψηλές συχνότητες, όπου $d_s > \delta$, εκτός του εύρους ορθών πρακτικών σχεδιασμού. Έτσι, για το σχεδιασμό, η προσέγγιση συνάρτησης Bessel είναι επαρκής.

Ωστόσο, στο εύρηστο εύρος σχεδίασης όπου $d_s \leq \delta$ και η διαμόρφωση της συνάρτησης Bessel είναι ακριβής, είναι επίσης υπερβολή. Ο τύπος μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά λαμβάνοντας μόνο τους πρώτους όρους μιας σειράς επέκτασης της λύσης της συνάρτησης Bessel. Εναλλακτικά, ένας πανομοιότυπος τύπος μπορεί να προέλθει απευθείας από μια απλή φυσική ανάλυση των δινορευμάτων που προκαλούνται σε έναν κύλινδρο με ένα ομοιόμορφο εγκάρσιο πεδίο, υποθέτοντας ότι το πεδίο διεισδύει στον κύλινδρο ομοιόμορφα χωρίς να μειώνεται σημαντικά από το αυτοπροστατευτικό αποτέλεσμα των δινορευμάτων. Το επιδερμικό φαινόμενο είναι η εκδήλωση μιας τέτοιας αυτοπροστατευτικής συμπεριφοράς, η υπόθεση ενός πεδίου που διεισδύει ομοιόμορφα στον κύλινδρο ισχύει για $d_s < \delta$. Έτσι, μια τόσο απλή ανάλυση ισχύει για το ίδιο εύρος d_s/δ στο οποίο η προσέγγιση της συνάρτησης Bessel λειτουργεί καλά. Δεδομένου ότι η προσέγγιση της συνάρτησης Bessel είναι πιο περίπλοκη και δεν προσφέρει κανένα πλεονέκτημα στο εύρος ενδιαφέροντος, χρησιμοποιείται η απλοποιημένη διατύπωση.

Η απλουστευμένη διατύπωση για την απώλεια δινορευμάτων σε κύλινδρο για $d_s \leq \delta$ δίνεται στο (Snelling, 1988) και παράγεται ως

$$P(t) = \frac{\pi \ell d_c^4}{64 \rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (57)$$

Για μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η μέση χρονική τιμή του τετραγωνικού παραγώγου του $B(t)$ είναι $\omega^2 \hat{B}^2 / 2$ όπου ω είναι η ακτινική συχνότητα και το \hat{B} είναι το μέγιστο πλάτος του πεδίου, οπότε η απώλεια μέσου-χρόνου γίνεται:

$$P = \frac{\pi \ell d_c^4 \omega^2 \hat{B}^2}{128 \rho} \quad (58)$$

όπως παρουσιάζεται στην εργασία του [45]. Αυτές οι διατυπώσεις ισχύουν για οποιοδήποτε σχήμα πεδίου. Για διαμόρφωση περιέλιξης που οδηγεί σε ισχύ πεδίου που αυξάνεται γραμμικά καθώς η περιέλιξη συσσωρεύεται και είναι σταθερή σε όλο το πλάτος (πεδίο 1-D), αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν παράγοντα αντίστασης a_c :

$$F_R = 1 + \frac{\pi^2 \mu_0^2 N^2 n^2 \omega^2 d_c^6}{768 \rho^2 b^2} \quad (59)$$

Προτείνεται μια μικρή αναδιατύπωση της προηγούμενης σχέσης που την καθιστά σταδιακά, αλλά ίσως σημαντικά, απλούστερη και ευκολότερη στη χρήση.

$$\frac{z}{\delta^2} = \frac{\omega\mu_0}{p} \quad (60)$$

Πραγματοποιώντας αντικατάσταση των αποτελεσμάτων προκύπτει

$$F_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + \frac{(\pi n N)^2 d_s^6}{192 \cdot \delta^4 b^2} \quad (61)$$

Εκτός από το ότι είναι απλούστερη, η τελευταία εξίσωση έχει το πλεονέκτημα ότι είναι εύκολο να δει πώς λειτουργούν οι διαστάσεις: ο αριθμητής και ο παρονομαστής έχουν και οι δύο διαστάσεις μήκους έως την έκτη δύναμη. Επιπλέον, η εξίσωση $F_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + \frac{(\pi n N_s)^2 d_s^6}{192 \cdot \delta^4 b^2}$ βασίζεται σε άμεση φυσική ανάλυση ενός κυλινδρικού αγωγού, αποφεύγονται σφάλματα που σχετίζονται με την προσέγγιση των στρογγυλών αγωγών ως τετράγωνο ή ορθογώνιο. Όπως συζητήθηκε παραπάνω, ισχύει όταν $ds < \delta$ και για γεωμετρία πεδίου 1-D.

4.4. Επιλογή αριθμού κλώνων βάσει της διαμέτρου

Η εύρεση ενός τρόπου για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης a_c , F_R είναι μόνο το πρώτο βήμα για την επιλογή ενός σχεδίου. Ακόμη και με επιλεγμένη τιμή στόχου για F_R , υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί αριθμών και διαμέτρων κλώνων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη της ίδιας τιμής F_R . Μια προσέγγιση σχεδιασμού θα ήταν να διατηρηθεί ο αριθμός των κλώνων σταθερός και να βρεθεί η βέλτιστη διάμετρος. Μία άλλη θα ήταν να παραμείνει η διάμετρος σταθερή και να υπολογιστεί ο βέλτιστος αριθμός κλώνων.

Μια προσέγγιση που συνδέεται καλύτερα με εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο είναι να διατηρηθεί η απώλεια σταθερή και να βρεθεί ο σχεδιασμός του ελάχιστου κόστους. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με πολύπλοκο τρόπο στην εργασία του [46], αλλά τα αποτελέσματα μπορούν να συμπυκνωθούν σε έναν απλό πίνακα της πιο οικονομικά αποδοτικής τιμής F_R για μια δεδομένη διάμετρο κλώνου. Συνδέοντας τιμές F_R από τον πίνακα στην εξίσωση για την F_R και λύνοντας ως προς τον αποτελεσματικό και οικονομικό συνιστώμενο αριθμό κλώνων:

$$n_e = \frac{\delta^2 b \sqrt{192(F_R - 1)}}{\pi N d_s^3} \quad (70)$$

Για απλοποίηση της εφαρμογής αυτού του τύπου, μπορεί να υπολογιστεί εκ των προτέρων

$$k = \frac{\sqrt{192(F_R - 1)}}{\pi d_s^3} \quad (71)$$

και να καταγραφούν οι τιμές k για χρήση στον πολύ απλό τύπο

$$n_e = k \frac{\delta^2 b}{N} \quad (72)$$

Επειδή οι τιμές F_R βασίζονται σε δεδομένα κόστους που είναι πλέον πάνω από μια δεκαετία, τα νέα δεδομένα κόστους συγκρίθηκαν με το μοντέλο και οι παράμετροι για τη λειτουργία καμπύλης προσαρμογής κόστους προσαρμόστηκαν ελαφρά σε $k_1 = 6 \times 10^{-26} \text{m}^{-6}$ και $k_2 = 2,7 \times 10^{-9} \text{m}^{-2}$.

Οι τιμές του n κοντά σε εκείνες που παρέχονται από την προηγούμενη σχέση θα παρέχουν εύλογους παράγοντες αντίστασης a_c και θα δώσουν μια καλή οικονομική αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους του αγωγού Litz και της αντίστασης a_c . Ο υπολογισμός του αριθμού των κλώνων για διαφορετικές διαμέτρους (και επομένως διαφορετικές τιμές του k) παρέχει μια σειρά επιλογών από σχέδια χαμηλού κόστους με μικρό αριθμό κλώνων μεγάλης διαμέτρου χαμηλού κόστους έως σχέδια υψηλής απόδοσης με πολύ μεγαλύτερο αριθμό πολύ λεπτότερων κλώνων.

4.5. Κατασκευαστική Διαμόρφωση Τυλιγμάτων

Δεδομένης της επιλογής για τον αριθμό και τη διάμετρο των κλώνων, πρέπει να επιλεγεί η ακολουθία των λειτουργιών συστροφής. Ο στόχος είναι να κατασκευαστεί το σύρμα έτσι ώστε το ρεύμα που ρέει σε κάθε κλώνο να είναι περίπου ίσο. Οι πρωταρχικές επιδράσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε άνιση ροή μεταξύ των κλώνων θα ήταν η επίδραση εγγύτητας και η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου στο επίπεδο της δέσμης. Στο φαινόμενο εγγύτητας επιπέδου δέσμης το ρεύμα κυκλοφορεί μεταξύ διαφορετικών κλώνων και στο επιδερμικό αποτέλεσμα επιπέδου δέσμης ρέει ρεύμα στους κλώνους κοντά στην επιφάνεια μιας δέσμης (ή δευτερεύουσα δέσμη) ενώ οι κλώνοι που τρέχουν κάτω από το κέντρο δεν χρησιμοποιούνται επαρκώς [42]. Η επίδραση εγγύτητας επιπέδου δέσμης αντιμετωπίζεται απλώς με περιστροφή και το κριτήριο σχεδιασμού που προκύπτει είναι ακριβώς ότι το βήμα της συστροφής πρέπει να είναι μικρό σε σύγκριση με το συνολικό μήκος του σύρματος ή με το μήκος του καλωδίου που εκτίθεται σε μια δεδομένη ισχύ πεδίου.

Η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου σε επίπεδο δέσμης, από την άλλη πλευρά, δεν επηρεάζεται από απλές συστροφές και πρέπει να καταπολεμηθεί με τεχνικές κατασκευής που μεταφέρουν κλώνοι μεταξύ διαφορετικών ακτινικών θέσεων στη δέσμη κατά μήκος. Αυτό γίνεται κυρίως χρησιμοποιώντας κατασκευή

πολλαπλών επιπέδων: πρώτα στρίβοντας μαζί n_1 κλώνους μαγνητικού σύρματος και, στη συνέχεια, στρίβοντας μαζί n_2 από αυτά τα υποσυστήματα, ακολουθούμενα προαιρετικά από πρόσθετα στάδια περιστροφής. Μια προσέγγιση για την αποφυγή της επίδρασης του επιδερμικού φαινομένου προκειμένου να καταστεί βέβαιο, ότι σε κάθε στάδιο, δεν μπορεί να έχουν περιστραφεί μεταξύ τους περισσότεροι από 5 κλώνοι ή υποσυστήματα. Μια ομάδα πέντε ή λιγότερων κλώνων δεν έχει κλώνο στο κέντρο, ενώ μια ομάδα επτά έχει έξι γύρω από το εξωτερικό και έναν στο κέντρο. Μια ομάδα των έξι δεν λειτουργεί τόσο καλά όσο μια ομάδα των επτά, αλλά είναι πιθανό να εμπίπτει σε μια παρόμοια διαμόρφωση με έναν στο κέντρο.

Για τη δημιουργία μιας δέσμης 100 κλώνων, θα μπορούσε κανείς να ξεκινήσει περιστρέφοντας πέντε καλώδια μαγνητών, έπειτα πέντε από αυτές τις δευτερεύουσες δέσμες χαμηλότερου επιπέδου μαζί, και τέλος τέσσερις από αυτά τα μεγαλύτερα υποσυγκροτήματα μαζί για να προκύψει μια δέσμη 100 κλώνων χωρίς επίδραση επιδερμικού φαινομένου εκτός από το επιδερμικό φαινόμενο σε επίπεδο κλώνου που καθίσταται αμελητέο με τη χρήση κλώνων πολύ μικρότερων από το βάθος του επιδερμικού φαινομένου. Αυτό θα οριζόταν ως 4/5/5 εάν η περιστροφή σε κάθε επίπεδο ήταν στην ίδια κατεύθυνση ("λειτουργίες συσώρευσης"), ή ως $4 \times 5 \times 5$ εάν η περιστροφή εναλλάσσει κατευθύνσεις σε κάθε επίπεδο ("λειτουργίες καλωδίωσης")

Συνδυάζοντας μόνο κλώνους ή υποσυστήματα σε ομάδες των 3, 4 ή 5, μπορεί κανείς να αποφύγει εντελώς την επίδραση του επιδερμικού φαινομένου σε επίπεδο δέσμης για οποιοδήποτε από τα επίπεδα δέσμης. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε μεγάλο αριθμό λειτουργιών που αυξάνουν το κόστος και επίσης αυξάνουν την αντίσταση dc, καθώς κάθε λειτουργία εισάγει μία μικρή τοις εκατό αύξηση του μήκους στην πραγματική διαδρομή κλώνου. Ευτυχώς, μια τέτοια ακραία προσέγγιση είναι σπάνια απαραίτητη. Σε ένα τυπικό σενάριο, η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου σε επίπεδο δέσμης δεν αποτελεί πρόβλημα για τα πρώτα βήματα της κατασκευής. Για παράδειγμα, ένας τυπικός σχεδιασμός μπορεί να χρησιμοποιεί διαμέτρους κλώνου ενός τετάρτου βάθους δέρματος. Μια κατασκευή που ξεκίνησε με την περιστροφή επτά τέτοιων κλώνων δεν θα είχε κανένα πρόβλημα με το επιδερμικό φαινόμενο, επειδή η συνολική διάμετρος αυτής της πρώτης δέσμης θα ήταν μόνο $\frac{3}{4}$ του βάθους δέρματος. Η επίδραση δέρματος δεν είναι σημαντική μέχρι η διάμετρος να είναι τουλάχιστον δύο βάθη δέρματος.

Η διαδικασία για την επιλογή μιας κατασκευής βασίζεται στην πρώτη, υπολογίζοντας τον μέγιστο αριθμό κλώνων για τις οποίες η διάμετρος της δέσμης

είναι μικρότερη από δύο βάθη δέρματος και χρησιμοποιώντας αυτήν ως $n_{1, \max}$, τον μέγιστο αριθμό κλώνων για την πρώτη λειτουργία. Αυτό αποφεύγει το αποτέλεσμα του επιδερμικού φαινομένου σε επίπεδο δεσμίδας στο πρώτο επίπεδο. Κάθε επόμενη λειτουργία περιορίζεται να χρησιμοποιεί 3, 4 ή 5 υποσύνολα, και έτσι αποφεύγει τυχόν περαιτέρω επιδράσεις του επιδερμικού φαινομένου σε επίπεδο δέσμης.

Ο υπολογισμός του αριθμού των κλώνων για τα οποία η διάμετρος της δέσμης είναι μικρότερη από δύο βάθη δέρματος περιπλέκεται από το γεγονός ότι πρέπει να είναι γνωστό το βάθος του δέρματος όχι σε έναν συμπαγή αγωγό, αλλά σε ένα μέσο που περιλαμβάνει χάλκινα σκέλη που διαχωρίζονται από λεπτή μόνωση και αέρα. Ως μια κατά προσέγγιση, θεωρείται η απλή προσέγγιση της χρήσης της μέσης αγωγιμότητας για αυτό το σύνθετο μέσο. Σύμφωνα με αυτήν την υπόθεση, το πραγματικό βάθος δέρματος για τη δέσμη είναι

$$\delta_{\text{eff}} = \frac{\delta}{\sqrt{F_{p,\text{litz}}}} \quad (74)$$

όπου $F_{p,\text{litz}}$ είναι ο παράγοντας συσκευασίας litz, που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής περιοχής διατομής χαλκού στη δέσμη ($n\pi d_s^2/4$) προς την περιοχή της συνολικής δέσμης ($\pi d_b^2/4$). Η αναλογία της διαμέτρου δέσμης προς το αποτελεσματικό βάθος δέρματος είναι

$$\frac{d_b}{\delta_{\text{eff}}} = \frac{d_b}{\delta} \sqrt{F_{p,\text{litz}}} = \frac{d_b}{\delta} \sqrt{\frac{n\pi d_s^2/4}{\pi d_b^2/4}} = \frac{d_s}{\delta\sqrt{n}} \quad (75)$$

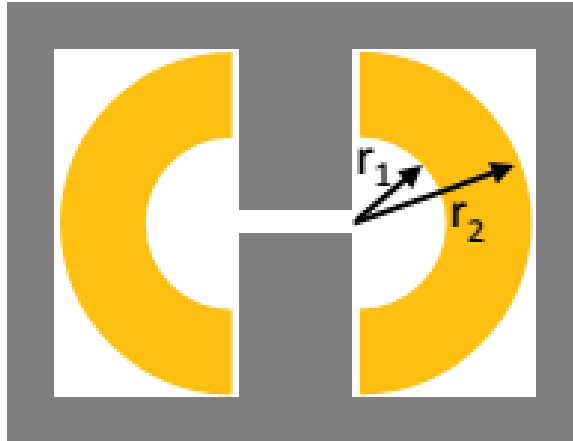
Ο καθορισμός αυτής της αναλογίας ισούται με 2 για τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό κλώνων στην πρώτη λειτουργία περιστροφής ($n_{1,\max}$) και εκφράζεται ως:

$$n_{1,\max} = 4 \frac{\delta^2}{d_s^2} \quad (76)$$

όπου δ είναι το βάθος του δέρματος για έναν στερεό αγωγό και το d_s είναι η διάμετρος ενός μεμονωμένου κλώνου.

4.6. Πηνία Υψηλής Συχνότητας

Η επίδραση του πεδίου διακένου στον αγωγό Litz μπορεί να περιγραφεί από τη μέση τιμή του τετραγώνου της επαγωγής B^2 στην περιοχή της περιέλιξης. Για έναν κατά προσέγγιση υπολογισμό αυτού του πεδίου, θεωρείται ότι η περιέλιξη απέχει από το διάκενο απόσταση r_1 και ότι το σχήμα της είναι όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα ή ότι αυτό το σχήμα είναι μια λογική προσέγγιση. Η υπόθεση ότι η περιέλιξη απέχει από το διάκενο περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της ανάλυσης, αλλά η απόσταση του τρόπου περιέλιξης από το διάκενο είναι συνήθως καλή ιδέα.



Εικόνα 19. Η περιέλιξη απέχει από ένα διάκενο αέρα πηνίου με πυρήνα κατά ακτίνα r_1

Για αυτήν την ανάλυση, θεωρήθηκε η γεωμετρία στο παραπάνω σχήμα σε ορθογώνιες συντεταγμένες αντί να εξεταστεί η καμπυλότητα του αγωγού γύρω από τον κεντρικό στύλο, τόσο για την απλοποίηση της μαθηματικής ανάλυσης όσο και για την απλοποίηση της εφαρμογής της μεθόδου μειώνοντας τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου. Σε αυτήν την περίπτωση, οι γραμμές πεδίου είναι ημικύκλια γύρω από το κενό, με ισχύ πεδίου

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{\pi r} \quad (77)$$

στην περιοχή μεταξύ του κενού και του τυλίγματος. Μέσα στην περιέλιξη, αυτό μειώνεται κατά έναν παράγοντα ίσο με το κλάσμα της περιοχής περιέλιξης εκτός της ακτίνας στην οποία αξιολογείται το πεδίο, έτσι ώστε

$$B(r) = \frac{\mu_0 I (r_2^2 - r^2)}{\pi r (r_2^2 - r_1^2)} \quad (78)$$

Παίρνοντας τον μέσο όρο B^2 πάνω από την περιοχή περιέλιξης και συγκρίνοντάς τον με τον χωρικό μέσο όρο του τετραγωνικού πεδίου στη μονοδιάστατη περίπτωση

$$\langle B^2 \rangle = \frac{\mu_0^2 I^2}{3b^2} \quad (79)$$

Υπάρχει μία τιμή b_{eff} που δίνει την ίδια τιμή B^2 με το πεδίο στην σχέση

$$B(r) = \frac{\mu_0 I (r_2^2 - r^2)}{\pi r (r_2^2 - r_1^2)}$$

Και προκύπτει

$$b_{eff} = \frac{\pi (r_2^2 - r_1^2)^{1.5}}{r_2^2 \sqrt{\ln \frac{r_2 + r_1}{r_1} + \frac{r_1^2}{r_2^2} - \frac{r_1^4}{4r_2^4}} - 0.75} \quad (80)$$

Επειδή η σχέση αυτή είναι υπερβολικά περίπλοκη, θεωρήθηκε μια καμπύλη κατάλληλη με παραμέτρους βελτιστοποιημένες ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέγιστο ποσοστό σφάλματος σε οποιοδήποτε σημείο στην περιοχή των r_2/r_1 έως και 100. Η εφαρμογή έχει λιγότερο από 1% σφάλμα σε αυτό το εύρος.

Από τα προηγούμενα φάνηκε ότι μπορεί να παρέχεται επαρκής ακρίβεια ακόμη και όταν το εξωτερικό όριο της περιέλιξης δεν είναι ημικύκλιο. Για την απόδειξη αυτού, πραγματοποιήθηκε μια 2-D προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων ενός πυρήνα PQ35 /35 με κεντρικό κενό 1 mm και μια περιέλιξη που γεμίζει το παράθυρο περιέλιξης εκτός από μια ημικυκλική περιοχή ακτίνας 5 mm κοντά στο κενό. Ένα ισοδύναμο του r_2 υπολογίστηκε ως 11 mm με βάση την αντιστοίχιση της πραγματικής περιοχής περιέλιξης με την περιοχή μιας ημικυκλικής περιοχής μεταξύ $r_1 = 5$ mm και r_2 . Η υπολογιζόμενη τιμή $b_{\text{eff}} = 20,77$ mm οδηγεί σε εκτίμηση B2 14% υψηλότερη από την προσομοιωμένη τιμή. Αυτή είναι επαρκής ακρίβεια για μια κατά προσέγγιση ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η πραγματική περιοχή περιέλιξης έχει πολύ διαφορετικό σχήμα (το παράθυρο είναι 25 mm × 8,8 mm).

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία Υπολογισμού Αγωγών Litz

Στην παρούσα ενότητα αναπτύσσεται υπολογιστική μεθοδολογία των εκτεθέντων στο θεωρητικό μέρος της εργασίας για τον υπολογισμό αγωγού Litz σε μετασχηματιστή. Σκοπός της υλοποίησης ήταν να δημιουργηθεί ένα απλό – εύχρηστο - χωρίς ιδιαίτερες υπολογιστικές γνώσεις - και χωρίς την απαίτηση ειδικού λογισμικού περιβάλλοντος υπολογισμού αγωγών Litz για μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Έμφαση δόθηκε στο να είναι οι υπολογισμοί άμεσοι και χωρίς την χρήση βρόχων υπολογισμού ή επαναλήψεων.

Προς τούτο κρίθηκε πλέον κατάλληλη η υλοποίηση της εφαρμογής σε φύλλο υπολογισμού στο Microsoft Excel καθώς το Excel είναι ένα λογισμικό που έχουν όλοι οι χρήστες Microsoft Office και Windows. Η είσοδος των δεδομένων σε αυτό το φύλλο υπολογισμού γίνεται άμεσα στους διατιθέμενους πίνακες και οι υπολογισμοί είναι άμεσοι χωρίς την χρήση κάποιας ιδιαίτερης γλώσσας προγραμματισμού χρησιμοποιώντας τις εντολές του Excel. Τα αποτελέσματα είναι σε εύρος τιμών από όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον κατάλληλο για αυτόν συνδυασμό.

Οι υπολογισμοί αυτού του φύλλου εργασίας γίνονται με βάση τα εκτεθέντα στις σελίδες 66 έως 76 της εργασίας.

Με βάση τα εκτεθέντα η πορεία υλοποίησης του φύλλου υπολογισμού για μετασχηματιστή περιέλιξης ήταν ως ακολούθως:

1. Εισήχθηκε ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά αγωγών Litz όπως αυτός δίνεται στην εργασία των Sullivan&Zhang (2014)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΓΩΓΩΝ LITZ																	
STRAND AWG WIRE	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
STRAND DIAMETER (mm)	0,202	0,18	0,16	0,143	0,127	0,113	0,101	0,09	0,08	0,071	0,063	0,056	0,05	0,045	0,04	0,035	0,032
Fr	1,06	1,07	1,09	1,11	1,13	1,15	1,18	1,22	1,25	1,3	1,35	1,41	1,47	1,54	1,6	1,64	1,68

2. Εισάγονται τα δεδομένα υπολογισμού της εφαρμογής. Κάποια από αυτά εισάγονται από τον χρήστη και κάποια υπολογίζονται με βάση τα εισαχθέντα και τις εξισώσεις της θεωρίας που αναπτύσσεται στην εργασία των Sullivan&Zhang(2014) (οι εξισώσεις αναφέρονται στις σελίδες 66-76 της εργασίας), ενώ τα δεδομένα selectedstranddiameter , selectedFr επιλέγονται από τον πίνακα του βήματος 1 για την λύση που δοκιμάζεται

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ					
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	50	(δεδομένο υπολογισμού εισάγεται)			
ρ	2,14E-08	(υπολογίζεται από θερμοκρασία δεν εισάγεται)			
f (Hz)	10000	(δεδομένο υπολογισμού εισάγεται)			
μ_0	0,0000004	(σταθερά)			
selected strand diameter(mm)	0,18	(από ανωτέρω πίνακα)			
πλάτος περιέλιξης b (mm)	10	(δεδομένο υπολογισμού εισάγεται)			
αριθμός σπειρών ανά περιέλιξη Ns	4	(δεδομένο υπολογισμού εισάγεται)			
αριθμός σπειρών τυλίγματος N	4	(δεδομένο υπολογισμού εισάγεται ακεραίο πολ/σιο του Ns)			
selected Fr	1,07	(από ανωτέρω πίνακα)			

3. Με βάση τον πίνακα του βήματος 2 το Excel υπολογίζει τα αποτελέσματα του ακόλουθου πίνακα όπου βρίσκονται τα εύρη λύσεων και δυνατοτήτων εφαρμογής για τις επιλεγόμενες τιμές για την διάμετρο κλώνου και πλάτος περιέλιξης, αριθμό σπειρών ανά περιέλιξη και αριθμό σπειρών τυλίγματος. Συγκεκριμένα βρίσκονται οι τιμές για τον μέγιστο αριθμό του 1^{ου} επιπέδου τυλιγμάτων $n_{1,max}$, οι συνιστώμενες τιμές για τον μέγιστο – κανονικό και ελάχιστο αριθμό κλώνων για το πρόβλημα, η τιμή της ανηγμένης αντίστασης για τον ελάχιστο-κανονικό και μέγιστο αριθμό κλώνων όπως και το διατιθέμενο δυνατό παράθυρο περιέλιξης για τον ελάχιστο-κανονικό και μέγιστο αριθμό κλώνων.

Τυπολόγιο:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}}$$

$$n_{1,max} = 4 \frac{\delta^2}{d_s^2}$$

$$k = \frac{\sqrt{192(F_R - 1)}}{\pi d_s^3}$$

$$n_e = k \frac{\delta^2 b}{N}$$

Για την εύρεση της ελάχιστης και μέγιστης τιμής του n σύμφωνα με την εργασία των Sullivan&Zhang (2014), οι τιμές του n έως και 25% πάνω ή κάτω από αυτές που δίνονται από την ανωτέρω εξίσωση για το n_e μπορούν ακόμα να είναι καλές επιλογές.

$$F_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + \frac{(\pi n N)^2 d_s^6}{192 \cdot \delta^4 b^2}$$

Για τον υπολογισμό του διατιθέμενου παραθύρου λήφθηκε σαν 1^η παραδοχή ότι μία συνολική επιφάνεια πραγματικού χαλκού, NnA_s , όπου N είναι ο αριθμός των σπειρών, n είναι ο αριθμός των κλώνων, και A_s είναι η περιοχή διατομής ενός μόνο κλώνου, πρέπει να είναι μικρότερη τουλάχιστον από 25 έως 30% της περιοχής παραθύρου που διατίθεται για αυτήν την περιέλιξη

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	
Βάθος δέρματος (mm)	1,3049743
k	200,09316
n1max για 1η λειτουργία περιστροφής	210
min αριθμος κλώνων	639
αριθμός κλώνων	852
max αριθμός κλώνων	1065
Fr για min αρ. κλώνων	1,0393865
Fr για μέσο αρ. κλώνων	1,0700205
Fr για max αρ. κλώνων	1,109407
παραθυρο για min αρ κλώνων (mm2)	216,80759
παραθυρο για αρ. Κλωνων (mm2)	289,07679
παραθυρο για max αρ. Κλώνων (mm2)	361,34599

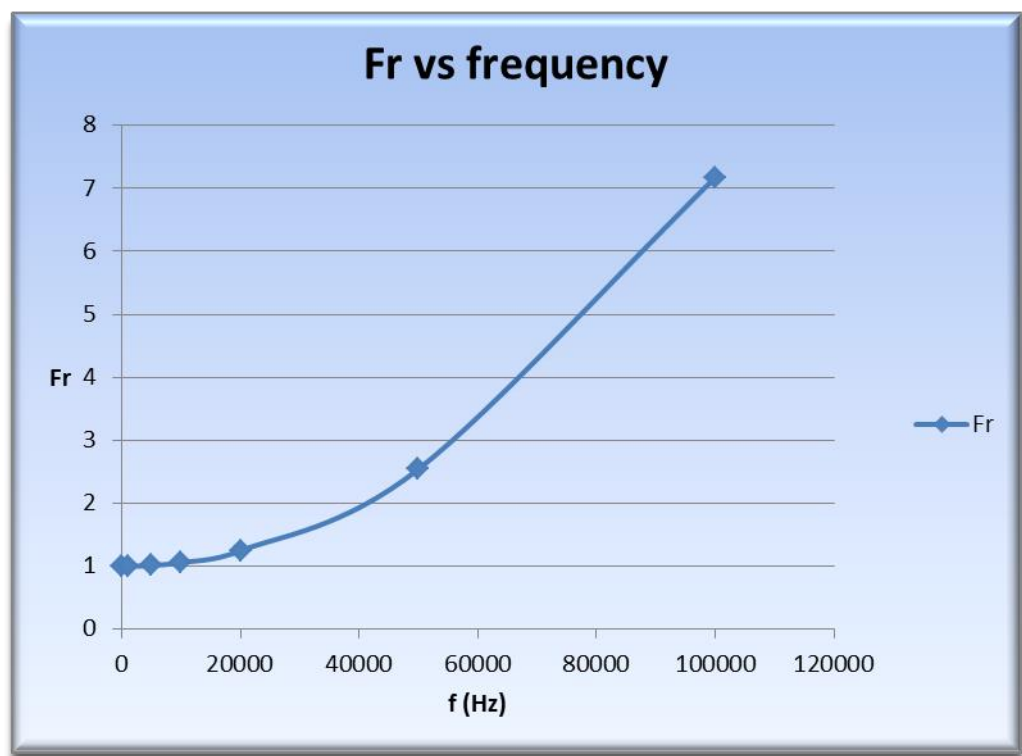
4. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα από το 3^ο βήμα εκλέγονται τα τελικά μεγέθη του αγωγού και προκύπτουν τα τελικά αποτελέσματα όπως και οι διαδοχικές δέσμες προσέχοντας στο 1^ο βήμα το $n1$ να είναι μικρότερο από $n1max$ που εξάγεται από τον πίνακα του 3^{ου} βήματος και τα επόμενα διαδοχικά βήματα να έχουν $3 \leq n \leq 5$ δέσμες.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΛΟΓΗΣ					
ne	n1	n2	n3	Fr	Window(mm2)
800	200	4	1	1,061734	271,4336053

Στο παράδειγμα μας εκλέγουμε 800 κλώνους με 1^η λειτουργία να έχει 200 κλώνους και 2^η λειτουργία να έχει 4 δέσμες των 200 κλώνων να συστρέφονται ώστε να έχουμε τους 800 κλώνους με διατιθέμενο παράθυρο 271,43 mm² και ανοιγμένη αντίσταση $Fr=1,061734$.

5. Για την επιλεχθείσα διάταξη χαράζεται το διάγραμμα Fr – Frequency

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΣ ΧΑΡΑΞΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ Fr-συχνότητας για καλώδια					
F(Hz)	δ	ne	Ns	b	Fr
100	13,04974	800	4	10	1,000006
1000	4,126691	800	4	10	1,000617
5000	1,845512	800	4	10	1,015434
10000	1,304974	800	4	10	1,061734
20000	0,922756	800	4	10	1,246937
50000	0,583602	800	4	10	2,543355
100000	0,412669	800	4	10	7,173418



Ανάλογα με τους περιορισμούς του προβλήματος μπορούν να δοκιμαστούν και άλλες τιμές του $dstrand$, Fg από τον πίνακα του 1^{ου} βήματος και να επιλεγθεί τελικά η βέλτιστη τιμή για το εκάστοτε πρόβλημα.

Κεφάλαιο 6: Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων με μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

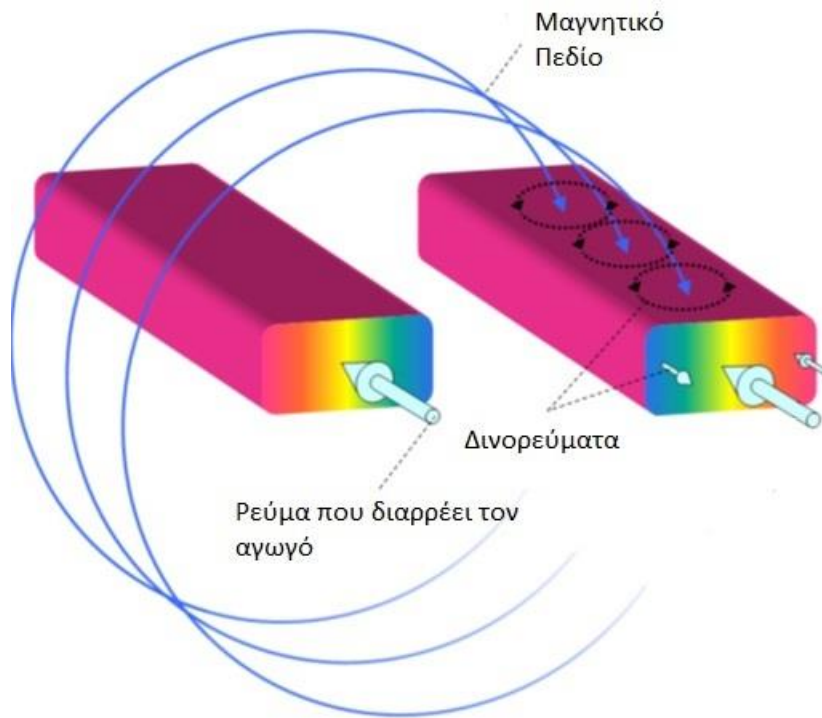
Είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια πως οι αγωγοί Litz χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές πηνίων και μετασχηματιστών έναντι των κοινών αγωγών λόγω της ιδιότητάς τους να περιορίζουν σημαντικά το επιδερμικό και το φαινόμενο γειτνίασης.

Το επιδερμικό φαινόμενο αντιμετωπίζεται εύκολα εάν επιλεγούν αρκούτσως λεπτοί αγωγοί ώστε η διάμετρός τους να είναι μικρότερη από το βάθος δέρματος, συνήθως για διάμετρο μικρότερη από 2 βάθη δέρματος έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στο εμπόριο υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από μια ευρεία γκάμα προτεινόμενων αγωγών Litz με κατάλληλες διαμέτρους που μπορούν να οδηγήσουν στις κατάλληλες σχεδιαστικές λύσεις όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το φαινόμενο γειτνίασης όμως μπορεί να έχει πολύ πιο δριμέα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φαινόμενο γειτνίασης εξαρτάται όχι μόνο από τη συχνότητα αλλά και από το πλήθος των αγωγών σε ένα πηνίο.

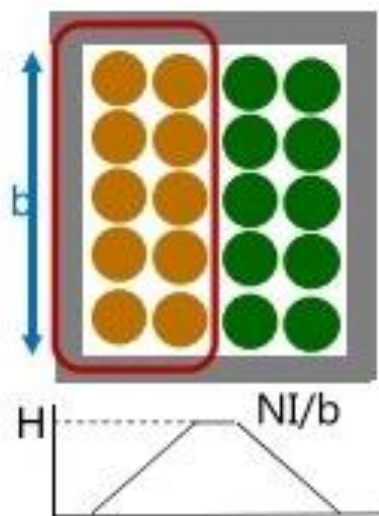
Οποιοδήποτε ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω του και αυτό το πεδίο διεισδύει σε οποιονδήποτε γειτονικό αγωγό. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, εάν το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, τότε θα προκληθεί τάση σε έναν αγωγίμο βρόχο άμεσα, ανάλογα με το πλάτος και τη συχνότητα του πεδίου που τον διαπερνά. Μια τέτοια επαγόμενη τάση προκαλεί δινορεύμα, του οποίου η θέση και η κατεύθυνση είναι τέτοια ώστε να αντιτίθενται στο μαγνητικό πεδίο που το δημιουργεί (όπως ορίζεται από το νόμο του Lenz).

Για γειτονικούς αγωγούς το φαινόμενο οδηγεί σε «πλευρικά» δινορεύματα (Εικόνα 20). Τα πλάτη των δινορευμάτων προστίθενται/αφαιρούνται ανάλογα με την κατεύθυνση του κύριου ρεύματος και ως εκ τούτου η τοπική πυκνότητα ρεύματος στον αγωγό δεν είναι ομοιόμορφη. Ως αποτέλεσμα, η αποτελεσματική αντίσταση του σύρματος αυξάνεται για εναλλασσόμενα ρεύματα (η λεγόμενη αντίσταση AC) και έτσι οι απώλειες χαλκού μπορούν να αυξηθούν σημαντικά.



Εικόνα 20. Φαινόμενο γειτνίασης

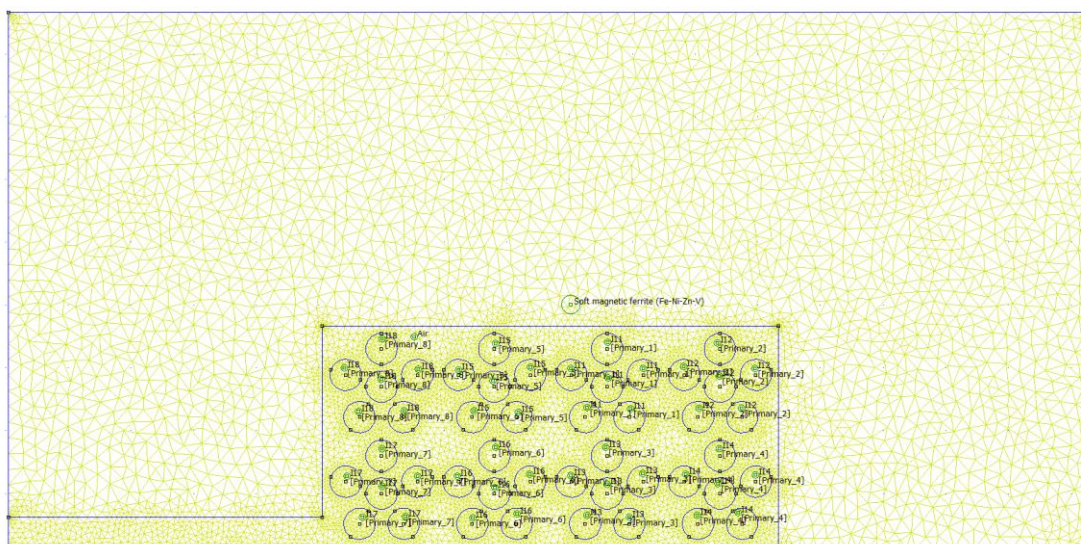
Η ένταση του μαγνητικού πεδίου H αυξάνεται με κάθε στρώμα του πρωτεύοντος τυλίγματος, για να φτάσει το μέγιστο μεταξύ των περιελίξεων. Το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση και έτσι το H μειώνεται με κάθε στρώμα δευτερεύοντος (Εικόνα 21).



Εικόνα 21.

Κατανομή μονοδιάστατου μαγνητικού πεδίου σε πηνίο με αγωγούς Litz

Τα παραπάνω καθώς και όσα παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, επιβεβαιώθηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για ένα συγκεκριμένο πηνίο. Η γεωμετρία του υλικού αποτελείται από έναν πυρήνα με λεπτό διάκενο και αγωγούς Litz οι οποίοι είναι οι απλούστεροι που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για λόγους μοντελοποίησης. Έχει χρησιμοποιηθεί δηλαδή ο πιο μικρός αριθμός κλώνων και η μεγαλύτερη δυνατή διάμετρος αγωγών που είναι 0,5mm ενώ το διάκενο είναι 1 χιλιοστό (εικόνα 22).



Εικόνα 22. Διακριτότητα μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων

Η τροφοδοσία επιλέχθηκε να είναι της τάξεως του 1 KHz ώστε να εξυπηρετεί την γεωμετρία που επιλέχθηκε καθώς για μεγαλύτερες συχνότητες θα ξεκινήσει σταδιακά να υπάρχει επίδραση και από το επιδερμικό φαινόμενο. Οι αγωγοί Litz όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα είναι 8 για λόγους συμμετρίας (συνολικά είναι 16). Το ρεύμα ρεύμα πρωτεύοντος είναι ίσο με 7,071 A. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τόσο για ευθύγραμμο μαγνητικό κύκλωμα όσο και για κύκλωμα σε κυλινδρική συμμετρία (ο αριστερός άξονας είναι και ο άξονας συμμετρίας).

Στους κάτωθι πίνακες υπολογίζεται η επιβάρυνση της αντίστασης στο AC για τις εξεταζόμενες συχνότητες:

Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων(καρτεσιανές συντεταγμένες)		
z	Total losses (W)	Rac/Rdc
	0,0441285	1
00	0,0883656	1,001249701
50	0,0889443	1,007806814
00	0,0910104	1,031217304
00	0,0936529	1,061158846
00	0,0971725	1,101038601
000	0,0992604	1,124696102
000	0,132033	1,496034676

Πίνακας 4.Υπολογισμοί επιβάρυνσης αντίστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες

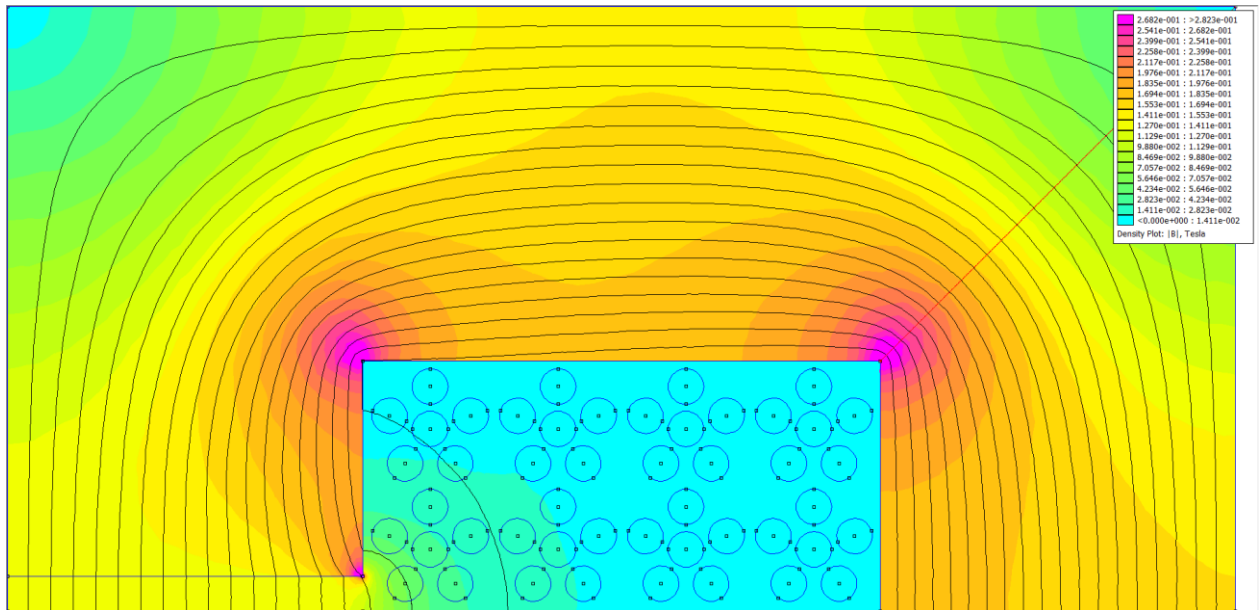
Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων(κυλινδρικές συντεταγμένες)		
z	Total losses (W)	Rac/Rdc
	0,0797577	1
00	0,0798337	1,000954922
50	0,0802324	1,005953822
00	0,0816556	1,023797904
00	0,0834759	1,046620824
00	0,0859004	1,077019204
000	0,0873385	1,095050102
000	0,109912	1,378076642

Πίνακας 5.Υπολογισμοί επιβάρυνσης αντίστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες

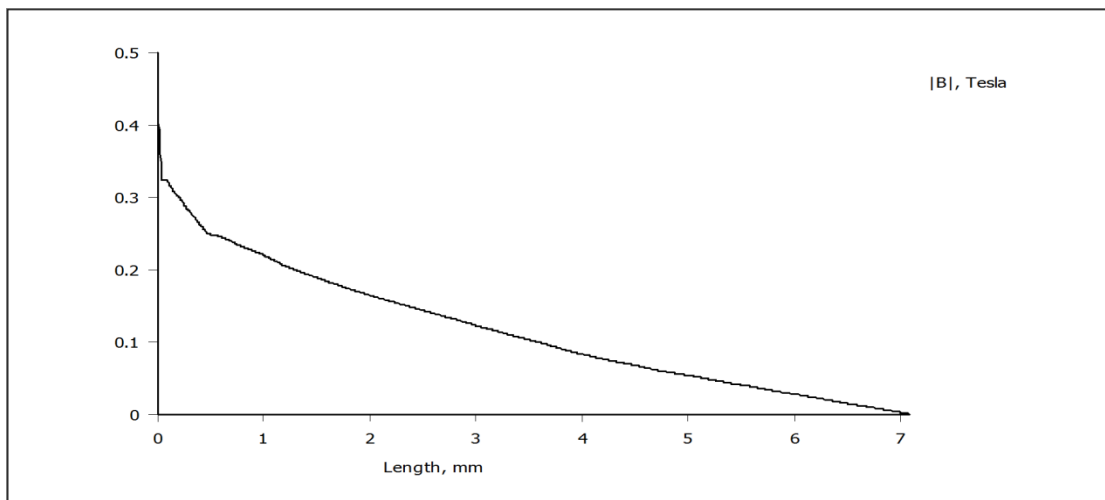
Στην εικόνα 23 βλέπουμε την κατανομή του πεδίου για **καρτεσιανή συμμετρία**.Κοντά στο υλικό και στο διάκενο η κατανομή του πεδίου είναι πιο έντονη.Το πεδίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιοχή του πυρήνα ενώ στις εσωτερικές γωνίες είναι πιο ενισχυμένο,λόγω της μικρότερης διαδρομής γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την χαρακτηριστική της εικόνας 24 όπου απεικονίζεται η επαγωγή διαγώνια.Στην περιοχή του διακένου το πεδίο είναι πιο αραιό λόγω σκέδασης.Στις εξωτερικές γωνίες αναμενόμενα το πεδίο είναι πολύ χαμηλό.

Επιπλέον η κατανομή των ρευμάτων(εικόνα 25) αναδεικνύεται ότι παρότι χρησιμοποιούνται 8 αγωγοί Litz(8 σπείρες για λόγους συμμετρίας,συνολικά είναι 16) το ρεύμα αποτειπώνεται έντονο λόγω του φαινομένου γειτνίασης ιδιαίτερος για τους αγωγούς κοντά στο διάκενο.Δηλαδή, ο κλωνος που βρίσκεται κοντά στο διάκενο

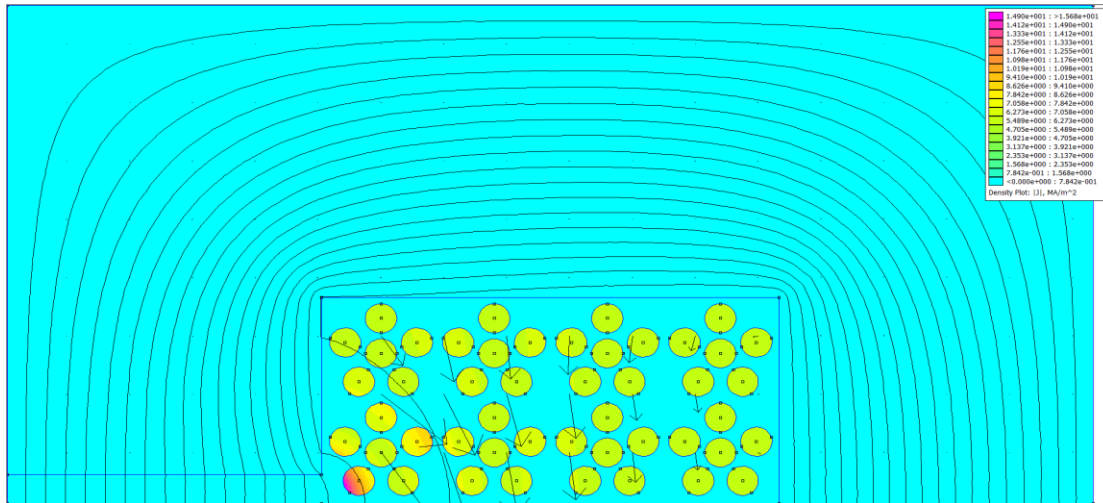
καταπονείται περισσότερο καθώς λόγω του φαινομένου γειτνίασης, λόγω μαγνητικής σκέδασης εκεί παρατηρείται η μεγαλύτερη κατανομή ρευμάτων.



Εικόνα 23. Πυκνότητα μαγνητικής επαγωγής στην καρτεσιανή συμμετρία



Εικόνα 24. Γραφική απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου όπως αυτό μετρήθηκε από το προηγούμενο διάγραμμα

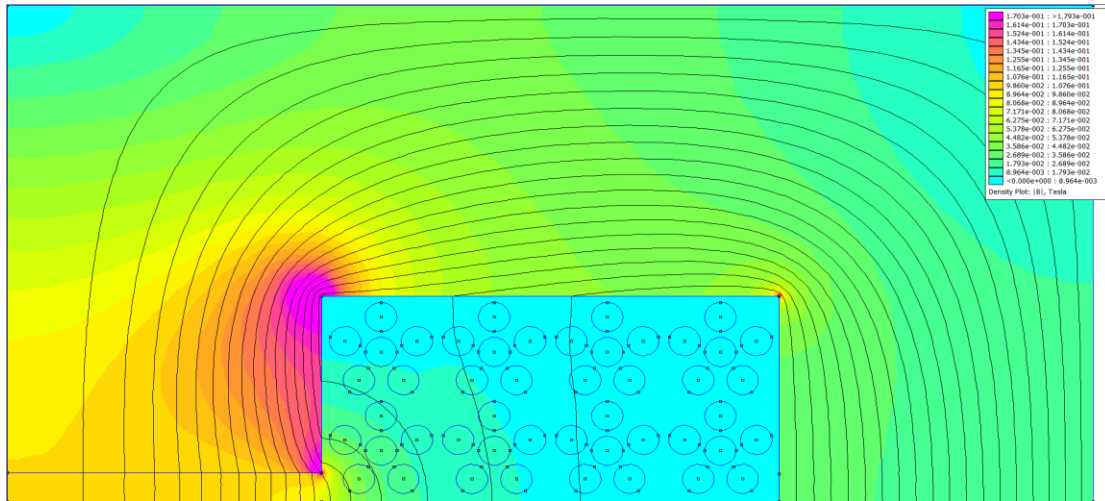


Εικόνα 25. Απεικόνιση της πυκνότητας ρεύματος στην καρτεσιανή συμμετρία

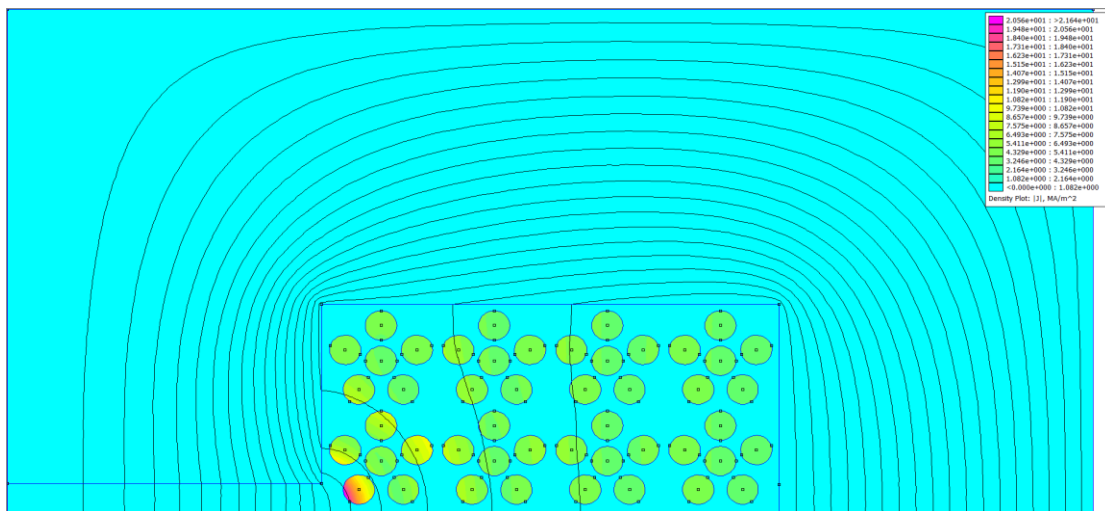
Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούμε και στην περίπτωση της **κυλινδρικής συμμετρίας** με μερικώς διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά διότι το μαγνητικό κύκλωμα δεν είναι ευθύγραμμο αλλά κυλινδρικό.

Παρατηρούμε και εδώ αντίστοιχα φαινόμενα με κάποιες διαφοροποιήσεις όπως στην κατανομή του μαγνητικού πεδίου όπου το αριστερό «πόδι» με το διάκενο έχει λιγότερο υλικό(καθώς το υλικό είναι εκ περιστροφής).Συνεπώς εφόσον το υλικό είναι λιγότερο,στο εσωτερικό μέρος θα έχουμε πολύ πιο έντονο πεδίο(εικόνα 26).Στο καρτεσιανό επίπεδο το έσω και το έξω «πόδι» είναι συμμετρικά.

Όσον αφορά την πυκνότητα του ρεύματος, σε κάθε περίπτωση ο αγωγός που βρίσκεται στο διάκενο καταπονείται με περισσότερη σκέδαση και άρα μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος λόγω του φαινομένου γεινίασης(εικόνα 27).



Εικόνα 26. Πυκνότητα μαγνητικής επαγωγής στην κυλινδρική συμμετρία



Εικόνα 27. Απεικόνιση της πυκνότητας ρεύματος στην καρτεσιανή συμμετρία

Κατόπιν έγινε χρήση των αναλυτικών σχέσεων για τον εκ νέου υπολογισμό του συντελεστή F_R . Συγκεκριμένα, για την ειδική αντίσταση ρ και την ειδική μαγνήτιση του χαλκού και πλάτος περιέλιξης b ίσο με μισό χιλιοστό, υπολογίστηκε σε πρώτη φάση για κάθε μία από τις εξεταζόμενες συχνότητες το βάθος δέρματος με χρήση της σχέσης :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}}$$

Εν συνεχεία ο υπολογισμός του συντελεστή F_R χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

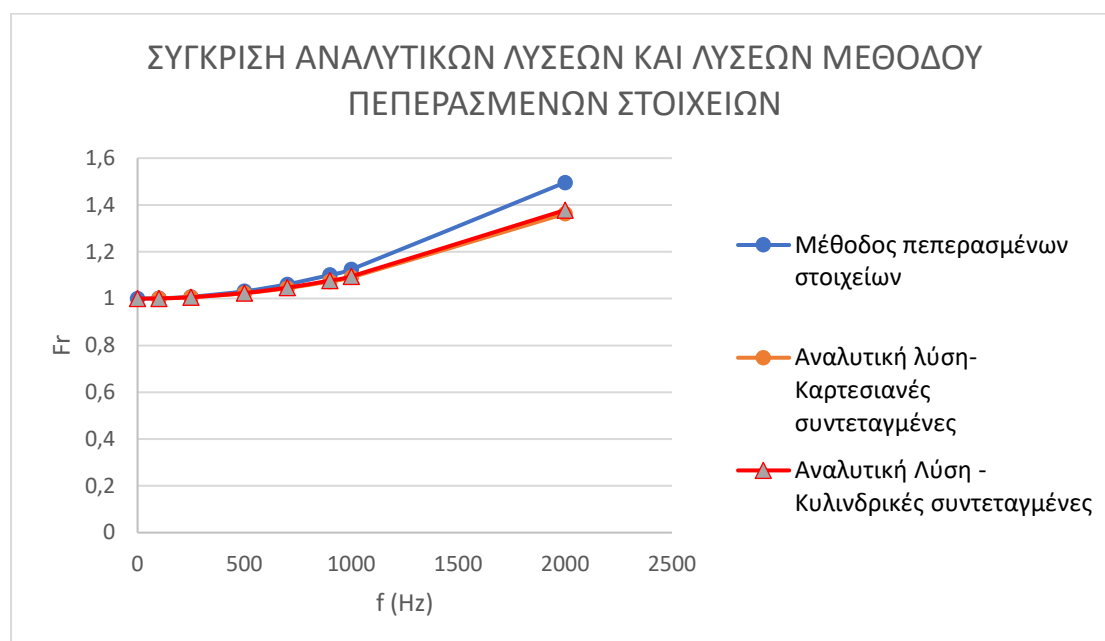
$$F_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + \frac{(\pi n N)^2 d_s^6}{192 \cdot \delta^4 b^2}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα:

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ					
F(Hz)	δ	n	Ns	b	F
100	0,007363	48	6	5	1,000907
250	0,004657	48	6	5	1,005667
500	0,003293	48	6	5	1,022668
700	0,002783	48	6	5	1,044429
900	0,002454	48	6	5	1,073444
1000	0,002328	48	6	5	1,090671
2000	0,001646	48	6	5	1,362684

Πίνακας 6. Αποτελέσματα Αναλυτικής μεθόδου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των 2 μεθόδων



Πίνακας 7. Σύγκριση αναλυτικών λύσεων και λύσεων μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Παρατηρούμε ότι μέχρι το 1 kHz περίπου τα αποτελέσματα των 2 μεθόδων ταυτίζονται καθώς μετά από αυτήν την τιμή, τα αποτελέσματα της πραγματικής κατανομής του πεδίου και της αναλυτικής λύσης αρχίζουν να αποκλίνουν. Επιβεβαιώνεται πάραυτα, πως η περιοχή του $Fr=1,5$ είναι όντως η περιοχή επιβάρυνσης των αντιστάσεων εναλλασσόμενου ρεύματος. Η αναλυτική προσέγγιση είναι επομένως επαρκής παρότι βασίζεται σε μονοδιάστατη αναπαράσταση με κάποιες λογικές αποκλίσεις οι οποίες φείλονται στη διδιάστατη γεωμετρία, διότι η θεώρηση που γίνεται κατά Sullivan για τις αναλυτικές λύσεις, είναι για μονοδιάστατη κατανομή πεδίου με απλουστευτικές προσεγγίσεις.

Εάν θέλουμε μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διδιάστατες αναπαραστάσεις που όμως είναι περισσότερο χρονοβόρες και υπολογιστικά πολύ πιο επιβαρυνμένες.

Σαν εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση θα προτείναμε τη γενικευμένη διαχείριση αγωγών διότι σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται μόνο οι τυποποιημένες διαμορφώσεις αγωγών Litz που υπάρχουν στο εμπόριο για χρήση στις διάφορες διατάξεις. Επιπλέον αυτή η γενίκευση θα μπορούσε να έχει πολυπλοκότερες διαμορφώσεις αγωγών Litz.

Κεφάλιο 7. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, οι αγωγοί Litz έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές που απαιτούν αγωγούς ισχύος σε διατάξεις υψηλής συχνότητας, όπως επαγωγικής θέρμανσης και ασύρματους μεταφοράς ισχύος. Συστρέφοντας μαζί πολλαπλούς κλώνους μονωμένων αγωγών μικρής διατομής, επιτυγχάνεται να μειωθούν οι απώλειες που οφείλονται στο επιδερμικό φαινόμενο, ωστόσο λόγω του υπερβολικού σχετικού πάχους της μόνωσης και του επιπλέον απαιτούμενου μήκους σύρματος εξαιτίας της δράσης συστροφής, οι αγωγοί Litz δεν είναι σκόπιμο να εφαρμοσθούν σε συχνότητες της τάξεως των MHz ή υψηλότερες..

Στην παρούσα εργασία μελετάται η διαμόρφωση των αγωγών Litz και η δυνατότητα βέλτιστης αξιοποίησής τους σε διάφορες διατάξεις. Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει εισαγωγικές πληροφορίες για τους αγωγούς Litz. Συγκεκριμένα, η πρώτη ενότητα του πρώτου κεφαλαίου αναφέρεται στη διαμόρφωση των αγωγών Litz, η δεύτερη ενότητα εξετάζει το πεδίο χρήσης των αγωγών Litz, ενώ η τρίτη ενότητα παρουσιάζει τις διάφορες κατηγορίες των αγωγών Litz.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το επιδερμικό φαινόμενο που διέπει την κατανομή του ρεύματος σε αγωγούς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), καθώς σε περιπτώσεις διατομών αγωγών μεγαλύτερες από το αντίστοιχο πάχος επιδερμίδας για τη συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας, η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και μειώνεται εκθετικά με την απόσταση από την επιφάνεια στο εσωτερικό του αγωγού. Συγκεκριμένα, η πρώτη ενότητα περιγράφει τα χαρακτηριστικά του επιδερμικού φαινομένου, ενώ η δεύτερη ενότητα αναλύει τις απώλειες του αγωγού. Στη συνέχεια, το τρίτο κεφάλαιο μελετά την ελικοειδή διαμόρφωση αγωγών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται μεθοδολογία επιλογής – διαχείρισης κατάλληλων αγωγών Litz με βάση αναλυτικές λύσεις. Συγκεκριμένα η πρώτη ενότητα αναφέρεται στην επιλογή του αριθμού και της διαμέτρου των κλώνων, ενώ στη δεύτερη ενότητα αναλύεται η επιλογή της συνολικής κατασκευής των τυλιγμάτων. Στην τρίτη ενότητα υπολογίζονται οι απώλειες, ενώ στην τέταρτη

ενότητα αναλύεται η επιλογή του αριθμού των κλώνων βάσει της διαμέτρου του αγωγού. Το τέταρτο κεφάλαιο καταλήγει με την κατασκευή των τυλιγμάτων και τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων τύπων τυλιγμάτων .

Τέλος στο πρώτο μέρος του πέμπτου κεφαλαίου παρουσιάζεται η υλοποίηση της εφαρμογής του υπολογισμού αγωγών Litz και υπολογίζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής πηνίου υψηλής συχνότητας ενώ στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δύο διατάσεων.

Πολλές κατασκευές αγωγών Litz είναι πλέον εμπορικά διαθέσιμες με πολλαπλά στρώματα μόνωσης για την κάλυψη απαιτήσεων διηλεκτρικής αντοχής σε τάση βάσει των διεθνών προτύπων. Η χρησιμοποίηση πολλαπλών στρωμάτων φθοροπολυμερών είναι αρκετά συνηθισμένη. Τα στρώματα αυτά προσφέρονται σε διαφορετικά χρώματα, έτσι ώστε τα διαφορετικά στρώματα να διακρίνονται εύκολα. Διάφορες επικαλύψεις ταινιών, όπως από πολυϊμίδια και πολυεστέρες, διατίθενται για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη αντίσταση στην κοπή και ελάχιστη διάμετρο. Αυτά τα προϊόντα, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στον εξοπλισμό μετατροπέων ισχύος, είναι επιθυμητά σε οποιαδήποτε εφαρμογή που απαιτεί επιπλέον διηλεκτρική αντοχή σε τάση μεταξύ των περιελίξεων. Όλες οι μονώσεις που διατίθενται για σύνθετες διαμορφώσεις είναι επίσης διαθέσιμες σε γυμνό σύρμα, επικαλυμμένες σε ασημένιο χαλκό, καθώς και διάφορα κράματα χαλκού και σύρματα μαγνητών.

Οι αγωγοί Litz έχουν εδραιωθεί ως ένα απαραίτητο εργαλείο για τα ηλεκτρονικά ισχύος, επιτρέποντας τη χρήση αγωγών υψηλού ρεύματος και χαμηλής αντίστασης σε συχνότητες έως και εκατοντάδες kHz. Αλλά η αποτελεσματική εφαρμογή επιλογής και σχεδιασμού του αγωγού litz δεν είναι εύκολη. Απλές προσεγγίσεις, όπως η χρήση πινάκων συνιστώμενων διαμέτρων του κλώνου ανά συχνότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αποτύχουν οδηγώντας σε χρήση αγωγού υψηλότερης αντίστασης από ένα απλό συμπαγή αγωγό ή φύλλο περιέλιξης, και σχεδόν πάντα οδηγούν σε υψηλότερο κόστος και απώλειες από ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί με έναν πιο συστηματικό σχεδιασμό. Ωστόσο, η βιβλιογραφία για πιο εξελιγμένες προσεγγίσεις ανάλυσης και σχεδιασμού μπορεί να είναι αρκετά δυσχερής στην εφαρμογή της, με προτεινόμενες προσεγγίσεις συμπεριλαμβανομένων των συναρτήσεων Bessel, συνδυασμών διαφόρων τύπων συναρτήσεων Bessel ή επαναληπτική εφαρμογή τους, όπως και χρήση σύνθετων μοντέλων διαπερατότητας μεταξύ άλλων.

Οι περισσότερες μέθοδοι γενικά βοηθούν μόνο στην επιλογή του αριθμού των κλώνων, και προσφέρουν ελάχιστη καθοδήγηση σχετικά με τις λεπτομέρειες της κατασκευής — τον αριθμό των κλώνων που πρέπει να συνδυάζονται σε κάθε βήμα της συστροφής. (Για παράδειγμα, ο αγωγός litz 120 κλώνων θα μπορούσε να κατασκευαστεί ως 12×10 , ως $8 \times 5 \times 3$ ή ως $3 \times 5 \times 8$.) Σε αυτό το πρακτικό μέρος της εργασίας προσφέρεται μια απλοποιημένη προσέγγιση για την επιλογή του αριθμού και της διαμέτρου των κλώνων του αγωγού litz, και δείχνεται ότι η ακολουθούμενη προσέγγιση είναι ισοδύναμη με τις πιο σύνθετες προσεγγίσεις σε άλλες εργασίες. Η προσέγγιση μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί με ένα υπολογιστικό φύλλο αλλά είναι επίσης αρκετά απλή ακόμη και για υπολογισμούς με το χέρι. Η απλότητά της την καθιστά χρήσιμη για τους επαγγελματίες και τους ερευνητές, επιτρέποντας να αποκτήσουν μια εικόνα για το ποια σχεδιαστικά προβλήματα και φαινόμενα απώλειας εξελίσσονται. Επίσης σε αυτό το τμήμα της εργασίας δίνεται μία απλή προσέγγιση βασισμένη σε κανόνες για την επιλογή της κατασκευής από τη στιγμή που έχει επιλεγεί ο αριθμός και η διάμετρος των κλώνων.

Τέλος με την βασική ανάλυση που παρέχεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων επιβεβαιώνεται πως είναι ακριβής για μονοδιάστατη προσέγγιση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου και για συχνότητες όπου η διάμετρος του κλώνου είναι μικρότερη από το βάθος επιδερμίδας δ . Ωστόσο, η προτεινόμενη τεχνική υπερεκτιμά κάπως τις απώλειες για υψηλότερες συχνότητες, όταν η διάμετρος του κλώνου είναι σχεδόν διπλάσια του βάθους επιδερμίδας. Οι κύριες εφαρμογές αφορούν τους μετασχηματιστές και τα πηνία υψηλών συχνοτήτων όπου λόγω του διακένου το φαινόμενο γειτνίασης έχει σημαντική επίδραση.

Επίσης επιβεβαιώθηκε πως χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη τεχνική που βασίζεται σε αναλυτικές λύσεις επιτυγχάνεται επαρκής προσέγγιση με κάποιες εύλογες αποκλίσεις λόγω των διαφορετικών εξεταζόμενων γεωμετριών.

Διδιάστατες αναπαραστάσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα όμως είναι περισσότερο χρονοβόρες και υπολογιστικά πολύ πιο επιβαρυνμένες.

Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν αφετηρία για περαιτέρω διερεύνηση που θα φορά γενικευμένη διαχείριση αγωγών διότι εδώ χρησιμοποιήθηκε ιδανικός αγωγός Litz ώστε να έχουμε αριθμητικά την απλούστερη δυνατή διερεύνηση, δηλαδή αγωγός με τους πιο χοντρούς και λιγότερους κλώνους (6 κλώνους με διάμετρο 0,5mm) ενώ στην πραγματικότητα θα μπορούσαμε να έχουμε

πολύ πιο πολύπλοκα προβλήματα, για παράδειγμα προβλήματα με 500 κλώνους διαμέτρου του 1/10 του χιλιοστού.

Βιβλιογραφία

- [1] Selberherr, S. (2012). *Analysis and simulation of semiconductor devices*. Springer Science & Business.
- [2] Heckel, T., Rettner, C., &Marz, M. (2015). Fundamental efficiency limits in power electronic systems. *2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, (σσ. 1-6).
- [3] Tziouvaras, D. A., McLaren, P., Alexander, G., Dawson, D., Esztergalyos, J., Fromen, C., . . . Kojovic, L. (2000). Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), σσ. 62-72.
- [4] Kaimori, H., Kameari, A., & Fujiwara, K. (2007). Fem computation of magnetic field and iron loss in laminated iron core using homogenization method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(4), σσ. 1405-1408.
- [5] Zhang, R., White, J., &Kassakian, J. (2014). Fast simulation of complicated 3-d structures above lossy magnetic media. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 50, σσ. 1-16.
- [6] Roskopf, A., Joffe, C., Baer, E., &Bonse, C. (2015). Calculation of power losses in litz wire systems by coupling FEM and PEEC method. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, PP(99), σ. 1.
- [7] Lammeraner, J., &Stafl, M. (1966). *Eddy Currents*. Iliffe Books Ltd.
- [8] Kirsch, A., &Hettlich, F. (2009). *The mathematical theory of maxwell's equations*. Lecture notes.
- [9] Turner, T. M., & Clough, R. W. (1956). Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9).
- [10] Lupi, S., Dughiero, F., Baake, E., & Lavers, J. (2008). State of the art of numerical modeling for induction processes. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 27(2), σσ. 335-349.
- [11] Sadiku, M. N. (2001). *Numerical Techniques in Electromagnetics*. CRC Press LLC.
- [12] Rosa, E. B. (1908). *The self and mutual inductances of linear conductors*. US Department of Commerce and Labor, Bureau of Standards.

- [13] Grover, F. W. (2004). Inductance calculations: working formulas and tables. Courier Corporation.
- [14] Lucht, P. (2014). Transmission lines and maxwell's equations.
- [15] Hui, S. Y. R., Zhong, W., & Lee, C. K. (2013). A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(9), 4500-4511.
- [16] Covic, G. A., & Boys, J. T. (2013). Modern trends in inductive power transfer for transportation applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected topics in power electronics*, 1(1), 28-41.
- [17] Bosshard, R., Kolar, J. W., Mühlethaler, J., Stevanović, I., Wunsch, B., & Canales, F. (2014). Modeling and η - α -Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(1), 50-64.
- [18] Lu, M., & Ngo, K. D. (2017). Systematic design of coils in series-series inductive power transfer for power transferability and efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(4), 3333-3345.
- [19] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media.
- [20] Lope, I., Acero, J., & Carretero, C. (2015). Analysis and optimization of the efficiency of induction heating applications with litz-wire planar and solenoidal coils. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(7), 5089-5101.
- [21] Mühlethaler, J. (2012). Modeling and multi-objective optimization of inductive power components (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [22] Lu, M., Ngo, K. D., Filippa, M., & Bicknell, W. (2014). Model for electromagnetic actuator with significant fringing using minimal fitting parameters. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(1), 1-7.
- [23] Curti, M., Paulides, J. J., & Lomonova, E. A. (2015, March). An overview of analytical methods for magnetic field computation. In *2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pp. 1-7). IEEE.
- [24] Esteban, B., Sid-Ahmed, M., & Kar, N. C. (2015). A comparative study of power supply architectures in wireless EV charging systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6408-6422.

- [25] Lu, M., & Ngo, K. D. (2016, October). Pareto fronts for coils' efficiency versus stray magnetic field in inductive power transfer. In *2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)* (pp. 140-144). IEEE.
- [26] Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). Clarendon press.
- [27] Rossmannith, H., Dobroniti, M., Albach, M., & Exner, D. (2011). Measurement and characterization of high frequency losses in nonideal litz wires. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26, σσ. 3386-3394.
- [28] Sullivan, C., & Zhang, R. (2014). Analytical model for effects of twisting on litz-wire losses. *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2014 IEEE 15th Workshop on*, (σσ. 1-10).
- [29] Orekan, T., Zhang, P., & Shih, C. (2017). Analysis, design, and maximum power-efficiency tracking for undersea wireless power transfer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), 843-854.
- [30] Shi, J. G., Li, D. J., & Yang, C. J. (2014). Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 15(1), 51-62.
- [31] Kan, T., Mai, R., Mercier, P. P., & Mi, C. (2017, March). A three-phase wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles. In *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1407-1411). IEEE.
- [32] Zhang, K. H., Zhu, Z. B., Song, B. W., & Xu, D. M. (2016, December). A power distribution model of magnetic resonance WPT system in seawater. In *2016 IEEE 2nd annual southern power electronics conference (SPEC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [33] Sampath, J. P. K., Alphones, A., & Shimasaki, H. (2016, November). Coil design guidelines for high efficiency of wireless power transfer (WPT). In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 726-729). IEEE.
- [34] Kraichman, M. B. (1962). Impedance of a circular loop in an infinite conducting medium. *J. Res. Nat. Bureau of Standards, D. Radio propagation*, 66(4), 499-503.

- [35] Kim, J., & Park, Y. J. (2014). Approximate closed-form formula for calculating ohmic resistance in coils of parallel round wires with unequal pitches. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3482-3489.
- [36] Zierhofer, C. M., & Hochmair, E. S. (1996). Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils. *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, 43(7), 708-714.
- [37] Tanzania, R., Choo, F. H., & Siek, L. (2015, November). Design of WPT coils to minimize AC resistance and capacitor stress applied to SS-topology. In *IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 000118-000122). IEEE.
- [38] Muhlethaler, J., Schweizer, M., Blattmann, R., Kolar, J. W., & Ecklebe, A. (2012). Optimal design of LCL harmonic filters for three-phase PFC rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(7), 3114-3125.
- [39] Bosshard, R., Mühlethaler, J., Kolar, J. W., & Stevanović, I. (2013, March). Optimized magnetic design for inductive power transfer coils. In *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1812-1819). IEEE
- [40] Carretero, C., Acero, J., & Alonso, R. (2012). TM-TE decomposition of power losses in multi-stranded litz-wires used in electronic devices. *Progress In Electromagnetics Research*, 123, 83-103.
- [41] Meeker, D. C. (2012). An improved continuum skin and proximity effect model for hexagonally packed wires. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 236(18), 4635-4644.
- [42] Sullivan, C. R. (1999). Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding. *IEEE transactions on power electronics*, 14(2), 283-291.
- [43] Van den Bossche, A., & Valchev, V. C. (2005). Eddy currents in conductors. *Inductors and Transformers for Power Electronics*, 173-174.
- [44] Nan, X., & Sullivan, C. R. (2004, June). Simplified high-accuracy calculation of eddy-current loss in round-wire windings. In *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)* (Vol. 2, pp. 873-879). IEEE.
- [45] Snelling, E. C. (1988). Soft Ferrites--Properties and Applications.(Retroactive Coverage). *Butterworths, Borough Green, Sevenoaks TN 15 8 PQ, UK, 1988.*

- [46] Sullivan, C. R. (2001). Cost-constrained selection of strand diameter and number in a litz-wire transformer winding. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16(2), 281-288.
- [47] Lu, M., & Ngo, K. D. (2019). Analytical calculation of proximity-effect resistance for planar coil with litz wire and ferrite plate in inductive power transfer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2984-2991.
- [48] Bagchi, A. C., Saha, T., Kamineni, A., & Zane, R. (2018, June). Analysis and design of a wireless charger for underwater vehicles fed from a constant current distribution cable. In *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)* (pp. 1-8). IEEE.
- [49] Yang, Z., Liu, W., & Basham, E. (2007). Inductor modeling in wireless links for implantable electronics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(10), 3851-3860.