



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Μελέτη της επίδρασης φερριτών
στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης
με χρήση μοντέλων προσομοίωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΔΡΕΑΣ Κ. ΚΟΤΣΛΑΡΙ

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Μελέτη της επίδρασης φερριτών
στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης
με χρήση μοντέλων προσομοίωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΔΡΕΑΣ Κ. ΚΟΤΣΛΑΡΙ

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος

Χρήστος Α. Χριστοδούλου

Αντώνιος Αντωνόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024

.....
Ανδρέας, Κ. Κοτσλάρι

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

Copyright © Ανδρέας, Κ. Κοτσλάρι, 2024.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την μελέτη της επίδρασης στο ρεύμα εκφόρτισης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (electrostatic discharges, ESD) που έχει η εισαγωγή φερρίτη στο καλώδιο επιστροφή του ρεύματος. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται με προσομοίωση υπό διάφορες συνθήκες στο πρόγραμμα CST Studio Suite και μοντελοποίηση δύο τύπων γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και τεσσάρων φερριτών διαφορετικού υλικού.

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και χρήσιμοι ορισμοί σχετικά με αυτές τις έννοιες και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται μέρη του εξοπλισμού από τις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Στη συνέχεια, αναλύονται τα χαρακτηριστικά, οι μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των φερριτών και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

Στη συνέχεια, αναφέρεται το φαινόμενο ringing (αποσβενυμένες ταλαντώσεις), το οποίο επηρεάζει τις κυματομορφές ρεύματος γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, καθώς και η ανάγκη για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού, ώστε οι γεννήτριες να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις της νέας, προτεινόμενης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2. Επιπλέον, παρατίθενται έρευνες και μελέτες, οι οποίες έχουν αναδείξει πειραματικά την επίδραση της εισαγωγής φερρίτη στο ρεύμα εκφόρτισης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Έπειτα, περιγράφονται τα δύο μοντέλα γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα προσομοίωσης. Κατόπιν, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναλύονται με απεικόνιση τους με τη μορφή κατάλληλων γραφημάτων, τα οποία προέκυψαν με τη χρήση του κατάλληλου προγράμματος MATLAB, πινάκων και με προσθήκη των απαραίτητων σχολίων. Έτσι, συγκρίνονται οι κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης, καθώς και το φασματικό τους περιεχόμενο, οι οποίες προέκυψαν με την εισαγωγή των φερριτών σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς παρουσία φερρίτη και ελέγχονται αν συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του Προτύπου. Τέλος, παρατίθενται και οι πειραματικές μετρήσεις και κυματομορφές για τον συσχετισμό τους με τα μοντέλα προσομοίωσης.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, πρότυπο IEC 61000-4-2, φερρίτης, πρόγραμμα CST Studio Suite, προσομοίωση, ρεύμα εκφόρτισης, φαινόμενο ringing, γεννήτρια ESD, μοντέλο

Abstract

This thesis aims to study the effect of ferrite insertion into the return current cable on the discharge current of an electrostatic discharge (ESD) generator. This study is carried out by simulation under different conditions in the CST Studio Suite program and by modeling two types of electrostatic discharge generators and four ferrites of different material.

Specifically, it presents the basic concepts of electromagnetic compatibility, electrostatic discharge and useful definitions related to these concepts and the way parts of the equipment are affected by electromagnetic disturbances. Furthermore, it analyzes the characteristics, magnetic and electrical properties of ferrites and the characteristics of the ferrites used in the simulations.

The ringing effect (damped oscillations), which affects the current waveforms of electrostatic discharge generators as well as the need to eliminate this effect in order for the generators to comply with the requirements of the new, proposed version of IEC 61000-4-2 Standard, is then discussed. In addition, research and studies are cited, which have experimentally demonstrated the effect of ferrite insertion on the discharge current of an electrostatic discharge generator.

Then, it describes the two electrostatic discharge generator models and it presents the simulation steps. Additionally, the results of the simulations are analyzed by displaying them in the form of graphs, obtained using the appropriate MATLAB program, tables and by adding the necessary comments. Thus, the discharge current waveforms, as well as their spectral content, obtained with the insertion of ferrites, are compared with the waveform without ferrite and checked for compliance with the requirements of the Standard. Finally, experimental measurements and waveforms are presented and are quoted for their correlation with the simulation models.

Keywords: Electromagnetic compatibility, electrostatic discharge, IEC 61000-4-2, ferrite, CST Studio Suite program, simulation, discharge current, ringing effect, ESD generator, model

Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	5
<i>Abstract</i>	7
<i>Ευρετήριο Σχημάτων</i>	10
<i>Ευρετήριο Πινάκων</i>	17
<i>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση</i>	21
1.1 Ιστορική αναδρομή και εισαγωγή στην έννοια της EMC	21
1.2. Τομείς της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας	23
1.2.1. Μηχανισμοί σύζευξης παρεμβολών	24
1.2.2. Κοινού και διαφορικού τρόπου σύζευξη.....	26
1.2.3. Μονάδες μέτρησης στην EMC.....	27
1.3. Εισαγωγή στην έννοια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	28
1.3.1. Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	29
1.3.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	31
1.3.3 Μοντέλο ανθρώπινου σώματος.....	32
1.3.4 Στατική εκφόρτιση και χρόνος απόσβεσης	33
1.3.5 Προστασία έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στον σχεδιασμό του εξοπλισμού	35
<i>Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στους Φερρίτες</i>	37
2.1 Ιστορική αναδρομή και χαρακτηριστικά των φερριτών.....	37
2.2 Μαγνητισμός σε φερρίτες	39
2.2.1 Φερρομαγνητισμός	39
2.2.2 Μαγνήτιση.....	41
2.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες φερριτών	44
2.3.1 Απώλειες δινορρευμάτων	45
2.3.2 Αρχική διαπερατότητα	48
2.3.3 Αποσυντονισμός.....	50
2.3.4 Απώλειες πυρήνα.....	50
2.3.5 Λογικές και αποθηκευτικές ιδιότητες.....	51
2.4 Γενικές κατηγορίες εφαρμογών φερριτών.....	52
2.5 Φερρίτες και EMI.....	53
2.5.1 Μηχανισμός καταστολής ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών	54

2.5.2	Φίλτρα κοινού και διαφορικού τρόπου	56
2.6	Χαρακτηριστικά φερριτών της παρούσας εργασίας.....	57
<i>Κεφάλαιο 3: Φερρίτες και ESD</i>		<i>63</i>
3.1	Φαινόμενο ringing.....	63
3.2	Χρήση φερριτών για την μείωση του ringing.....	72
<i>Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων</i>		<i>77</i>
4.1	Το περιβάλλον προσομοιώσεων στο πρόγραμμα CST.....	77
4.1.1	Εισαγωγή του μοντέλου του φερρίτη	79
4.1.2	Ορισμός των υλικών.....	82
4.1.3	Παράμετροι Προσομοίωσης.....	84
4.2	Λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων	85
4.2.1	Επεξεργασία αποτελεσμάτων	86
4.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	88
4.3.1	Αποτελέσματα προσομοιώσεων πρώτου μοντέλου.....	88
4.3.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων δεύτερου μοντέλου	100
4.4	Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα	110
<i>Κεφάλαιο 5: Σύνοψη – Συμπεράσματα – Επόμενη μέρα</i>		<i>113</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>		<i>115</i>

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Οι τρεις τομείς ενός προβλήματος EMC	σελ.23
Σχήμα 1.2	Μηχανισμοί σύζευξης παρεμβολών	σελ.24
Σχήμα 1.3	Σύζευξη μέσω αγωγού	σελ.25
Σχήμα 1.4	Σύζευξη μέσω χωρητικότητας	σελ.25
Σχήμα 1.5	Σύζευξη μέσω επαγωγής	σελ.26
Σχήμα 1.6	Κοινός και διαφορικός τρόπος σύζευξης	σελ.26
Σχήμα 1.7	Απεικόνιση των κύριων διαταραχών Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας	σελ.27
Σχήμα 1.8	Φορτισμένο αντικείμενο και ουδέτερος αγωγός	σελ.31
Σχήμα 1.9	Φορτισμένο αντικείμενο και γειωμένος ουδέτερος αγωγός	σελ.32
Σχήμα 1.10	Μοντέλο ανθρώπινου σώματος	σελ.33
Σχήμα 2.1	Διαφορετικοί τύποι φερριτών	σελ.38
Σχήμα 2.2	Μοναδιαία κυψελίδα πλέγματος σπινελίου	σελ.40
Σχήμα 2.3	Αριθμός ιόντων στη μοναδιαία κυψελίδα σπινελίου	σελ.41
Σχήμα 2.4	Μετάβαση της κατεύθυνσης του σπιν σε τοίχωμα Bloch 180°	σελ.42
Σχήμα 2.5	Απλουστευμένη αναπαράσταση του ρόλου που διαδραματίζουν τα τοιχώματα των περιοχών στη διαδικασία της μαγνήτισης	σελ.43
Σχήμα 2.6	Βρόχος υστέρησης	σελ.44
Σχήμα 2.7	Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη σχέση του ρεύματος ημιτονοειδούς κύματος που οδηγεί τη μαγνήτιση μέσω ενός βρόχου υστέρησης ανά κύκλο ημιτονοειδούς κύματος	σελ.45
Σχήμα 2.8	Διάγραμμα φάσματος διαπερατότητας ενός φερρίτη νικελίου που δείχνει την πορεία συχνότητας της πραγματικής και της φανταστικής διαπερατότητας	σελ.49
Σχήμα 2.9	Αποσυντονισμός ή χρονική μείωση της διαπερατότητας σε φερρίτη μαγγάνιου	σελ.50
Σχήμα 2.10	Καμπύλες απώλειας πυρήνα ενός φερρίτη ισχύος ψευδαργύρου MnZn ως συνάρτηση της συχνότητας	σελ.51
Σχήμα 2.11	Βρόχος υστέρησης ενός φερρίτη τετραγωνικού βρόχου. Το ανώτερο σημείο επαναφοράς αντιπροσωπεύει ένα λογικό «ένα» σε δυαδικό συμβολισμό, ενώ το κατώτερο σημείο επαναφοράς ένα «μηδέν».	σελ.52
Σχήμα 2.12	Τυπική χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης συναρτήσει της συχνότητας του σφικτήρα φερρίτη	σελ.55
Σχήμα 2.13	Αρχή λειτουργίας σφικτήρα φερρίτη	σελ.55
Σχήμα 2.14	Φίλτρα κοινού και διαφορικού τρόπου σύζευξης	σελ.56
Σχήμα 2.15α	Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 75 Material με πάχος 4.90mm	σελ.58

Σχήμα 2.15β	Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 31 Material με πάχος 4.90mm	σελ.58
Σχήμα 2.15γ	Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 44 Material με πάχος 4.90mm	σελ.58
Σχήμα 2.15δ	Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 61 Material με πάχος 4.90mm	σελ.58
Σχήμα 2.16α	Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης για διάφορες περιστροφές N του καλωδίου – συχνότητας για φερρίτη τύπου 75 Material με πάχος 4.90mm	σελ.59
Σχήμα 2.16β	Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης για διάφορες περιστροφές N του καλωδίου – συχνότητας για φερρίτη τύπου 31 Material με πάχος 4.90mm	σελ.59
Σχήμα 2.17	Συνιστώμενο εύρος συχνοτήτων διαφόρων υλικών φερρίτη όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές καταστολής θορύβου	σελ.60
Σχήμα 2.18α	Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερρίτη τύπου 75 Material	σελ.60
Σχήμα 2.18β	Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερρίτη τύπου 31 Material	σελ.60
Σχήμα 2.18γ	Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερρίτη τύπου 44 Material	σελ.60
Σχήμα 2.18δ	Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερρίτη τύπου 61 Material	σελ.60
Σχήμα 2.19α	Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 75 Material	σελ. 61
Σχήμα 2.19β	Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 31 Material	σελ. 61
Σχήμα 2.19γ	Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 44 Material	σελ. 61
Σχήμα 2.19δ	Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 61 Material	σελ. 61
Σχήμα 2.20α	Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 4.90mm	σελ. 62
Σχήμα 2.20β	Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 6.30mm	σελ. 62
Σχήμα 2.20γ	Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 8.70mm	σελ. 62
Σχήμα 2.20δ	Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 9.85mm	σελ. 62
Σχήμα 3.1	Ιδανική κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής +4kV με βάση το IEC 61000-4-2 2008	σελ.63
Σχήμα 3.2	Καθορισμένη κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής με βάση την προτεινόμενη έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2	σελ.65
Σχήμα 3.3	Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και μέτρησης της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής	σελ.66
Σχήμα 3.4	Διάταξη μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και τη μελέτη της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος μήκους 2m. Οι διατάξεις (α), (β) και (γ) συμμορφώνονται με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, ενώ η διάταξη	σελ.67

	(δ) δεν είναι αποδεκτή για τη συγκεκριμένη διαδικασία διακρίβωσης	
Σχήμα 3.5	Σύγκριση κυματομορφής των ρευμάτων εκφόρτισης εξεπαφής που μετρήθηκαν από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε τάση +4 kV σε διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος	σελ. 68
Σχήμα 3.6	Σύγκριση κυματομορφής των ρευμάτων εκφόρτισης εξ επαφής που μετρήθηκαν από τη γεννήτρια ESD 4 kV με διαφορετική διάταξη του καλωδίου ρεύματος επιστροφής που δεν συμμορφώνεται με το πρότυπο βαθμονόμησης IEC, μαζί με την καθορισμένη κυματομορφή IEC	σελ. 69
Σχήμα 3.7	Φασματική σύγκριση των ρευμάτων εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ESD 4 kV με διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου ρεύματος επιστροφής μαζί με το φάσμα κυματομορφής που καθορίζεται από το IEC	σελ.70
Σχήμα 3.8	Σύνθετες κυματομορφές A και B με τις μετρημένες κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής και την κυματομορφή που καθορίζεται από το IEC από γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων 4 kV	σελ. 71
Σχήμα 3.9	Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης έντεκα εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (εκφόρτιση επαφής, επίπεδο 8 kV)	σελ. 72
Σχήμα 3.10	Τριγωνική (α) και πραγματική (β) διάταξη καλωδίου επιστροφής ρεύματος	σελ.73
Σχήμα 3.11	Αποτελέσματα του πρώτου γύρου μετρήσεων	σελ.74
Σχήμα 3.12	Επισκόπηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων δεύτερου γύρου	σελ.75
Σχήμα 4.1	Περιβάλλον προσομοιώσεων στο πρόγραμμα CST Microwave Studio	σελ.77
Σχήμα 4.2	Πρώτο μοντέλο προσομοίωσης	σελ.78
Σχήμα 4.3	Δεύτερο μοντέλο προσομοίωσης	σελ.78
Σχήμα 4.4	Στόχος ρεύματος πρώτου μοντέλου σε πλάγια όψη	σελ.78
Σχήμα 4.5	Στόχος ρεύματος δεύτερου μοντέλου σε πλάγια όψη	σελ.78
Σχήμα 4.6	Εισαγωγή του μοντέλου του φερρίτη στο περιβάλλον της προσομοίωσης	σελ.79
Σχήμα 4.7	Τοποθέτηση του φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος (1 σπείρα)	σελ.79
Σχήμα 4.8	Πρόσοψη του στόχου ρεύματος με το καλώδιο περασμένο μέσα από τον φερρίτη σε διάταξη μίας σπείρας	σελ.80
Σχήμα 4.9	Τοποθέτηση του φερρίτη, ώστε το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος να δημιουργεί δύο σπείρες εντός του φερρίτη	σελ.80
Σχήμα 4.10	Τοποθέτηση του φερρίτη στη θέση 1 – αρχή του καλωδίου	σελ.81
Σχήμα 4.11	Τοποθέτηση του φερρίτη στη θέση 2 – μέσο του καλωδίου	σελ.81

Σχήμα 4.12	Τοποθέτηση του φερριτή στη θέση 3 – τέλος του καλωδίου	σελ.82
Σχήμα 4.13	Προσθήκη υλικών στο μοντέλο	σελ.82
Σχήμα 4.14	Φόρτωση ιδιοτήτων του υλικού	σελ.83
Σχήμα 4.15	Ενσωμάτωση του επιθυμητού υλικού στον φερριτή	σελ.83
Σχήμα 4.16	Παράθυρο Parameter List με τις παραμέτρους του πρώτου μοντέλου	σελ.84
Σχήμα 4.17	Παράθυρο Parameter List με τις παραμέτρους του δεύτερου μοντέλου	σελ.84
Σχήμα 4.18	Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης πρώτου μοντέλου χωρίς την παρουσία φερριτή που καταγράφηκε από τον στόχο ρεύματος.	σελ.85
Σχήμα 4.19	Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης δεύτερου μοντέλου χωρίς την παρουσία φερριτή που καταγράφηκε από τον στόχο ρεύματος.	σελ.85
Σχήμα 4.20	Γράφημα ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερριτή στη θέση 1	σελ.88
Σχήμα 4.21	Γράφημα ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 6.30mm και χωρίς παρουσία φερριτή στη θέση 1	σελ.89
Σχήμα 4.22	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 31 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(με 1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3	σελ.90
Σχήμα 4.23	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 44 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(με 1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3	σελ.91
Σχήμα 4.24	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 61 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3	σελ.91
Σχήμα 4.25	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 75 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(με 1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3	σελ.92
Σχήμα 4.26	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm ² και 2.5mm ² στη θέση 1	σελ.93
Σχήμα 4.27	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm ² και 2.5mm ² στη θέση 1	σελ.93
Σχήμα 4.28	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm ² και 2.5mm ² στη θέση 1	σελ.94

Σχήμα 4.29	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm ² και 2.5mm ² στη θέση 1	σελ.94
Σχήμα 4.30	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.95
Σχήμα 4.31	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.96
Σχήμα 4.32	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.96
Σχήμα 4.33	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.97
Σχήμα 4.34	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.97
Σχήμα 4.35	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.98
Σχήμα 4.36	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 9.85mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.98
Σχήμα 4.37	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.99
Σχήμα 4.38	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.99
Σχήμα 4.39	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 8.70mm στις θέσεις 1,2,3	σελ.100
Σχήμα 4.40	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση 31 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns	σελ.101
Σχήμα 4.41	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns	σελ.101
Σχήμα 4.42	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns	σελ.102
Σχήμα 4.43	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns	σελ.102
Σχήμα 4.44	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns	σελ.103
Σχήμα 4.45	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns	σελ.103
Σχήμα 4.46	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns	σελ.104

Σχήμα 4.47	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 61 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns	σελ.104
Σχήμα 4.48	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 61 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns	σελ.105
Σχήμα 4.49	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 75 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns	σελ.105
Σχήμα 4.50	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 75 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns	σελ.106
Σχήμα 4.51	Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 75 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns	σελ.106
Σχήμα 4.52	Ρεύμα εκφόρτισης με χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1	σελ.107
Σχήμα 4.53	Φασματικό περιεχόμενο ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1	σελ.108
Σχήμα 4.54	Ρεύμα εκφόρτισης με χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1	σελ.111
Σχήμα 4.55	Φασματικό περιεχόμενο του μετρούμενου ρεύματος εκφόρτισης με χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1	σελ.111

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1	Τριβηλεκτρική σειρά υλικών	σελ.29- σελ.30
Πίνακας 1.2	Τυπικές τιμές αναπτυσσόμενης ηλεκτροστατικής τάσης	σελ.30
Πίνακας 1.3	Ταξινόμηση υλικών με βάση την επιφανειακή τους αντίσταση	σελ.34
Πίνακας 2.1	Τυπικές τιμές ειδικής αντίστασης διαφόρων φερριτών μαζί με εκείνες ορισμένων μεταλλικών σιδηρομαγνητικών υλικών	σελ.47
Πίνακας 2.2	Ιδιότητες των προαναφερθέντων υλικών	σελ.57
Πίνακας 3.1	Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) εξ επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2008	σελ.64
Πίνακας 3.2	Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) εξ επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2023	σελ.65
Πίνακας 4.1	Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) εξ επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2023 [45] και με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2008 [38] όσο αφορά την απαίτηση του I30	σελ.109
Πίνακας 4.2	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Edition 2.0 και 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 1 (κοντά στο σώμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων)	σελ.109
Πίνακας 4.3	Ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2.0 και Edition 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 3 (κοντά στο σημείο σύνδεσης με το κάθετο επίπεδο γείωσης)	σελ.109
Πίνακας 4.4	Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2.0 και Edition 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 3 (κοντά στο σημείο σύνδεσης με το κάθετο επίπεδο γείωσης)	σελ.110
Πίνακας 4.5	Ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2.0 και Edition 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 3 (κοντά στο σώμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων)	σελ.110

Πρόλογος

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. είναι η μελέτη, μέσω προσομοίωσης, εισαγωγής φερρίτη στο καλώδιο επιστροφή του ρεύματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (electrostatic discharges, ESD).

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τους διαφορετικούς μηχανισμούς που την προκαλούν και τα μοντέλα του φαινομένου.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται αναλυτικά τα γενικά χαρακτηριστικά των φερριτών. Αναλύεται ο μαγνητισμός τους και οι ηλεκτρικές ιδιότητές τους. Παρουσιάζονται, ακόμη, οι φερρίτες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις της εργασίας αυτής και τα χαρακτηριστικά τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναφέρεται η ύπαρξη του φαινομένου ringing σε γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και παρατίθενται έρευνες και μελέτες για την αντιμετώπιση του με την εισαγωγή φερριτών στο καλώδιο επιστροφής. Ακόμη, παρουσιάζονται τα σχετικά όρια του Προτύπου IEC 61000-4-2 της έκδοσης του 2008, καθώς και της προτεινόμενης νέας έκδοσης του 2023.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύονται λεπτομερώς τα μοντέλα προσομοίωσης και η επεξεργασία των κυματομορφών ρεύματος με την εισαγωγή φερριτών. Ακόμη, παρουσιάζονται σε διαγράμματα και πίνακες τα μετρούμενα μεγέθη και οι κυματομορφές ρεύματος για μελέτη και σύγκριση αυτών. Επίσης παρατίθενται και οι αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις και κυματομορφές για τον συσχετισμό τους με το μοντέλα προσομοίωσης.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις και αναφέρεται η μελλοντική συνέχεια της έρευνας με βάση τα αποτελέσματα που αναδεικνύονται στην παρούσα εργασία.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Υ.Δ. κ. Π. Κ. Παπασταμάτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη μας επικοινωνία μέχρι και σήμερα και την άριστη καθοδήγηση και συνεργασία. Επίσης, ευχαριστώ τον Καθηγητή μου κ. Ι. Φ. Γκόνο, για τη διευκόλυνση που μου παρείχε για τη διπλωματική εργασία αλλά και τις γνώσεις και εμπειρία κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου, την αδερφή μου, τους φίλους μου και κοντινούς μου ανθρώπους για την απεριόριστη στήριξη και ώθηση που μου έδωσαν καθ' όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία και τα φοιτητικά μου χρόνια.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.1 Ιστορική αναδρομή και εισαγωγή στην έννοια της EMC

Η ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (ElectroMagnetic Compatibility - EMC) παρουσιάζει ένα πλούσιο ιστορικό υπόβαθρο το οποίο σχετίζεται με την ανάπτυξη της τηλεγραφίας και των πρώτων συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας. Τα τέλη του 19ου και οι αρχές του 20ού αιώνα σηματοδότησαν μια περίοδο σημαντικών εξελίξεων σε αυτούς τους τομείς, με πρωτοπόρους τους Guglielmo Marconi και Nikola Tesla, οι οποίοι διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της αντίληψης των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Τα πειράματα του Marconi στην ασύρματη τηλεγραφία και η συνεισφορά του Tesla στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), έθεσαν τις βάσεις για την κατανόηση των αρχών της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (ElectroMagnetic Interference - EMI) και των επιπτώσεών της στα συστήματα επικοινωνίας.

Η εμφάνιση της τεχνολογίας ραδιοκυμάτων υπογράμμισε περαιτέρω τη σημασία της διαχείρισης των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών για την επίτευξη αξιόπιστης επικοινωνίας. Η εργασία του Ernst Alexanderson πάνω σε εναλλακτικές υψηλής συχνότητας και η εφεύρεση της βαλβίδας Fleming από τον John Ambrose Fleming κατέδειξαν τις δυνατότητες της ραδιοφωνικής μετάδοσης, αλλά ανέδειξαν επίσης την ευαισθησία των ηλεκτρονικών συστημάτων σε εξωτερικές παρεμβολές.

Ρυθμιστικές προσπάθειες, όπως η ίδρυση της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC) στις Ηνωμένες Πολιτείες, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη προτυποποίηση των εφαρμογών EMC και στον περιορισμό των παρεμβολών. Ο ρόλος της FCC να ρυθμίζει τις διακρατικές και διεθνείς επικοινωνίες που υλοποιούνταν μέσω ραδιοφώνου, τηλεόρασης, καλωδιακών συνδέσεων και δορυφόρου εξασφάλισε την ομαλή ανάπτυξη και λειτουργία των συστημάτων επικοινωνίας, ενώ παράλληλα αντιμετώπισε τα προβλήματα που σχετίζονταν με τις παρεμβολές και τη διαχείριση του φάσματος [1].

Η ιστορική αναδρομή της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας χαρακτηρίζεται από τεχνολογικές καινοτομίες, ρυθμιστικές παρεμβάσεις και προσπάθειες συνεργασίας της επιστημονικής κοινότητας. Αυτές οι πρώιμες εξελίξεις έθεσαν τα θεμέλια για τις σύγχρονες αρχές και πρακτικές της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, τονίζοντας τη σημασία της μείωσης των παρεμβολών για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των ηλεκτρονικών συστημάτων [4].

Στη σύγχρονη ηλεκτρονική, η έννοια της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ElectroStatic Discharge - ESD) είναι ιδιαίτερα σημαντική. Καθώς οι ηλεκτρονικές συσκευές γίνονται ολοένα και πιο πολύπλοκες και

διασυνδεδεμένες, ο κίνδυνος βλαβών λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αυξάνεται σημαντικά. Ως εκ τούτου, το παρόν κεφάλαιο αποσκοπεί στη μελέτη της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και των φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, εστιάζοντας στη σημασία, τις αρχές και τις μεθόδους περιορισμού τους.

Στο πεδίο της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας παρουσιάζονται δύο έννοιες, οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και η ηλεκτρομαγνητική ευαισθησία:

Η ευαισθησία αναφέρεται στην ικανότητα μιας συσκευής ή ενός κυκλώματος να ανταποκρίνεται στην ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (δηλ. στο θόρυβο).

Το επίπεδο ατρωσίας ενός κυκλώματος ή μιας συσκευής είναι το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον στο οποίο ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά, χωρίς κάποια υποβάθμιση της λειτουργίας του, αλλά και με ένα καθορισμένο επίπεδο ασφαλείας. Μια δυσκολία στον προσδιορισμό των επιπέδων ατρωσίας ή της ευαισθησίας είναι ο καθορισμός του τι συνιστά υποβάθμιση της απόδοσης.

Το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών αξιολογεί την ικανότητα ενός προϊόντος να μην προκαλεί παρεμβολές στο περιβάλλον του. Ο σκοπός του ελέγχου των εκπομπών είναι ο περιορισμός της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και συνεπώς ο έλεγχος του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργούν άλλα προϊόντα. Ο έλεγχος των εκπομπών μιας συσκευής μπορεί να εξαλείψει παρεμβολές, οι οποίες ίσως να επηρεάζουν άλλα προϊόντα. Επομένως, ο έλεγχος της εκπομπής είναι επιθυμητός σε μια προσπάθεια διασφάλισης ενός ηλεκτρομαγνητικά συμβατού περιβάλλοντος.

Σε κάποιο βαθμό, η ευαισθησία αυτορυθμίζεται. Εάν ένα προϊόν είναι ευαίσθητο στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, ο χρήστης θα το αντιληφθεί και ίσως να μη επιλέξει στο μέλλον, κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις ηλεκτρομαγνητικές του εκπομπές. Ένα προϊόν που αποτελεί πηγή εκπομπής μπορεί να μην επηρεάζεται το ίδιο από την εκπομπή αυτή. Για να διασφαλιστεί ότι η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό όλων των ηλεκτρονικών προϊόντων, διάφορες κυβερνητικές υπηρεσίες και ρυθμιστικοί φορείς έχουν επιβάλει κανονισμούς Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, που πρέπει να πληροί ένα προϊόν πριν από την κυκλοφορία του στην αγορά. Οι κανονισμοί αυτοί ελέγχουν τις επιτρεπόμενες εκπομπές και σε ορισμένες περιπτώσεις καθορίζουν τον βαθμό ατρωσίας που απαιτείται [2].

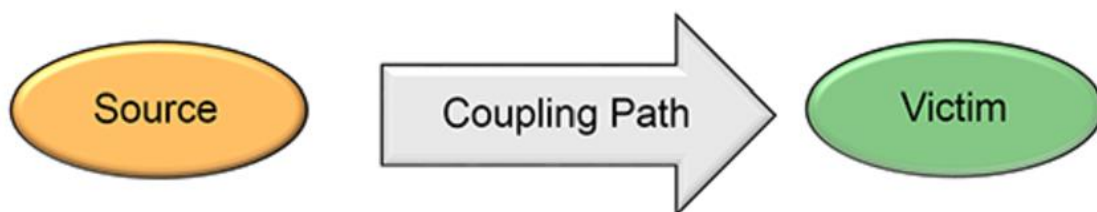
Στη συνέχεια δίνονται ορισμοί για την πληρέστερη και καλύτερη κατανόηση της έννοιας της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας.

- Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level): η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μία διάταξη ή σύστημα που λειτουργεί υπό ορισμένες συνθήκες.

- Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin): ο λόγος του ορίου ατρωσίας μίας διάταξης ή συστήματος προς μια διαταραχή αναφοράς.
- Επίπεδο Ατρωσίας (Immunity level): το ανώτατο επίπεδο μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.
- Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (EMI): Οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που διακόπτει, παρεμποδίζει ή με άλλο τρόπο υποβαθμίζει ή περιορίζει την αποτελεσματική απόδοση των ηλεκτρονικών στοιχείων και του ηλεκτρικού εξοπλισμού. [3]

1.2. Τομείς της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

Υπάρχουν τρεις βασικοί τομείς, οι οποίοι απαρτίζουν ένα πρόβλημα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.1. Η ανάλυση ξεκινά από μία πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (source), έναν δέκτη (victim), ο οποίος επεξεργάζεται την ενέργεια και οδηγείται σε επιθυμητή ή μη συμπεριφορά, και ένα μονοπάτι σύζευξης (coupling path) μεταξύ τους που διοχετεύει την ενέργεια από την πηγή στον δέκτη. Μία πηγή ή ένας δέκτης μπορεί να λειτουργεί με δύο μοντέλα, το εκούσιο και το ακούσιο. Έχει τη δυνατότητα να συμπεριφέρεται και με τα δύο μοντέλα και εξαρτάται τόσο από το μονοπάτι σύζευξης όσο και από την πηγή ή το δέκτη. Η μη επιθυμητή συμπεριφορά του δέκτη αποτελεί την παρεμβολή. Κάθε ένα από αυτά τα τρία στοιχεία υπάρχουν σε κάθε τέτοιο πρόβλημα, αν και μπορεί να μην αναγνωρισθούν εύκολα σε κάθε κατάσταση. Τα προβλήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας συνήθως επιλύονται με τον εντοπισμό τουλάχιστον δύο εκ των τριών στοιχείων και την εξάλειψη (ή τον περιορισμό) ενός από αυτά.[1], [4]



Σχήμα 1.1 Οι τρεις τομείς ενός προβλήματος EMC [1]

Συνήθως η μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας γίνεται μέσω ακούσιων μονοπατιών σύζευξης. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η ακούσια μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας θα προκαλέσει παρεμβολή. Σημαντικός παράγοντας στην εμφάνιση παρεμβολής είναι η επεξεργασία της ενέργειας από το δέκτη.

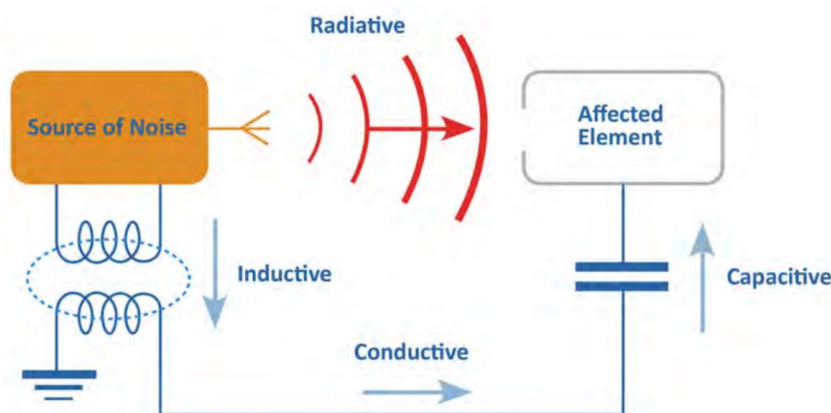
Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) μπορούν να αποφευχθούν με τους ακόλουθους τρόπους:

- Περιορισμός των εκπομπών από την πηγή
- Μείωση αποτελεσματικότητας μονοπατιού σύζευξης
- Μείωση της ευαισθησίας του δέκτη [5]

Πιθανές πηγές των προβλημάτων Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας είναι ραδιοπομποί, γραμμές ισχύος, ηλεκτρονικά κυκλώματα, κερανοί, λαμπτήρες, ηλεκτρικοί κινητήρες και σχεδόν οτιδήποτε χρησιμοποιεί ή δημιουργεί ηλεκτρική ενέργεια. Οι πιθανοί δέκτες περιλαμβάνουν ραδιόφωνα, ηλεκτρονικά κυκλώματα, συσκευές, ανθρώπους και σχεδόν οτιδήποτε χρησιμοποιεί ή μπορεί να ανιχνεύσει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. [1]

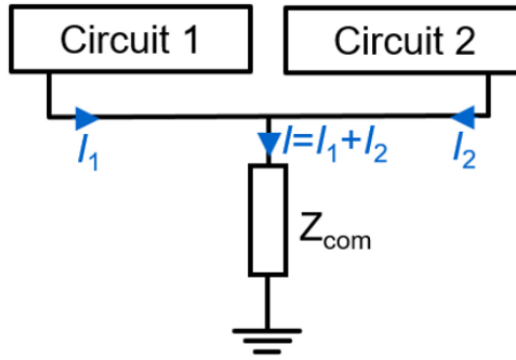
1.2.1. Μηχανισμοί σύζευξης παρεμβολών

Ο όρος σύζευξη αναφέρεται στη σύνδεση, τη μεταφορά ή τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από τον πομπό σε ευαίσθητες γειτονικές συσκευές. Η μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών γίνεται μέσω μιας ποικιλίας μέσων, όπως η αλληλεπαγωγή, ο αέρας, το κενό. Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι σύζευξης EMI μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικούς μηχανισμούς: μέσω αγωγών (conductive), μέσω χωρητικότητας (capacitive), μέσω ακτινοβολίας (radiative) και επαγωγικά (inductive), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2 [6].



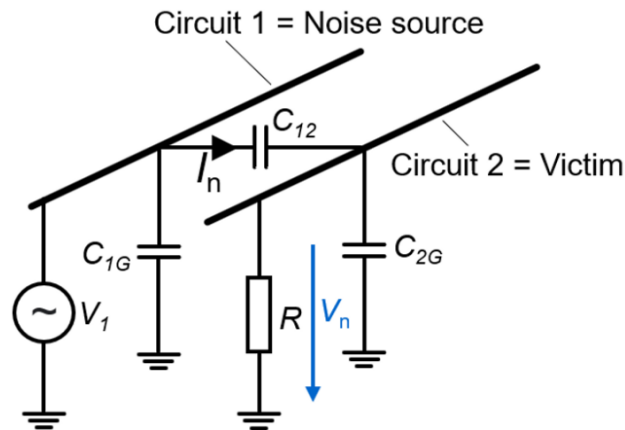
Σχήμα 1.2 Μηχανισμοί σύζευξης παρεμβολών [6]

Η σύζευξη μέσω αγωγών παρουσιάζεται όταν δύο ή περισσότερα κυκλώματα μοιράζονται μια κοινή διαδρομή ή έναν κοινό αγωγό και, ως εκ τούτου μια κοινή εμπέδηση Z_{com} (Σχήμα 1.3). Αυτή η κοινή διαδρομή οδηγεί συνήθως στη γη ή σε κάποιο άλλο επίπεδο αναφοράς. Τα ρεύματα που προκαλούνται από πηγές EMI όπως σφάλματα ή αστραπές μπορούν να ταξιδέψουν μέσα από τα κοινά αυτά καλώδια, με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν ανεπιθύμητες τάσεις που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία των κυκλωμάτων. Συνεπώς είναι ζωτικής σημασίας να εξασφαλίζονται επίπεδα γης χαμηλής αντίστασης.



Σχήμα 1.3 Σύζευξη μέσω αγωγού [9]

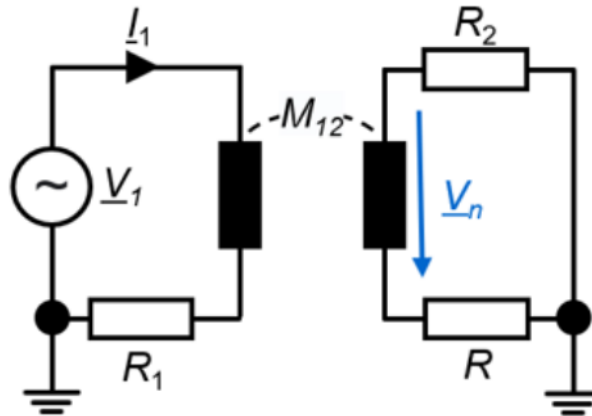
Η σύζευξη μέσω χωρητικότητας μπορεί να εμφανιστεί εάν υπάρχει χωρητικότητα C [F] μεταξύ δύο κυκλωμάτων (Σχήμα 1.4). Έτσι, η χωρητική σύζευξη είναι μια σύνδεση στο κοντινό πεδίο, πράγμα που σημαίνει ότι η πηγή θορύβου και ο δέκτης, ο οποίος λαμβάνει τον θόρυβο, είναι τοποθετημένοι σε κοντινή απόσταση.



Σχήμα 1.4 Σύζευξη μέσω χωρητικότητας [9]

Το επίπεδο διαταραχής εξαρτάται από την χωρητικότητα μεταξύ της πηγής και του δέκτη και τη μεταβολή της τάσης (dv/dt) [9]. Οι μεταβολές της τάσης και της χωρητικότητας προκαλούν ανεπιθύμητα ρεύματα στο δέκτη. Η απόσταση μεταξύ της πηγής και του δέκτη, ο προσανατολισμός τους, η συχνότητα, η μόνωση των καλωδίων και το ύψος των καλωδίων από το έδαφος είναι μερικές από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη σύζευξη μέσω χωρητικότητας [8].

Η σύζευξη μέσω επαγωγής μπορεί να παρουσιαστεί εάν υπάρχει αμοιβαία επαγωγή M [H] μεταξύ δύο ή περισσότερων κυκλωμάτων (Σχήμα 1.5). Το πεδίο μέσω του οποίου γίνεται η σύζευξη είναι το μαγνητικό H -πεδίο. Έτσι, η επαγωγική σύζευξη είναι κι αυτή μια σύνδεση στο κοντινό πεδίο [9].

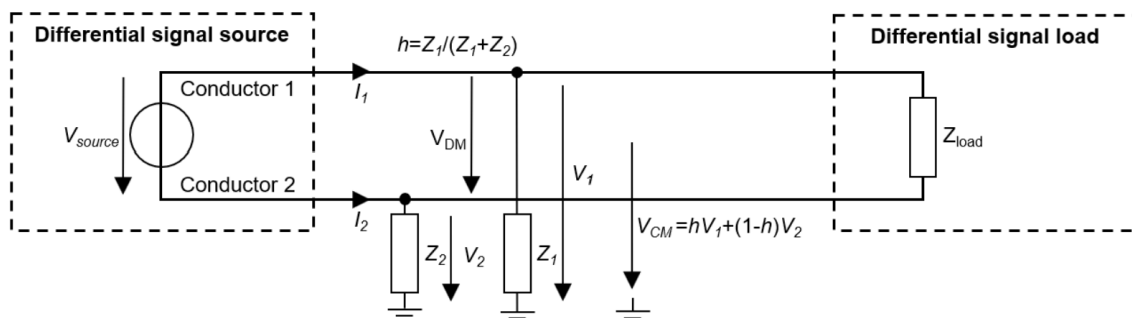


Σχήμα 1.5 Σύζευξη μέσω επαγωγής [9]

Στην σύζευξη μέσω ακτινοβολίας η πηγή και ο δέκτης είναι τοποθετημένοι σε μακρινή απόσταση σε σύγκριση με το μήκος κύματος. Οι διαταραχές διαδίδονται μέσω του αέρα ή του κενού. Τα πεδία μέσω των οποίων γίνεται η σύζευξη είναι το μαγνητικό H-πεδίο και το ηλεκτρικό E-πεδίο. Τα δύο πεδία συνυπάρχουν, όμως ένα πεδίο θα έχει μεγαλύτερο εύρος και ένταση από το άλλο, αλλά σε μια απόσταση $1/d$, όπου d [m] είναι η απόσταση από την πηγή ακτινοβολίας, και τα δύο πεδία εξασθενούν [8], [9]. Επίσης, δεδομένου ότι δεν απαιτείται φυσική επαφή για την σύζευξη μέσω ακτινοβολίας EMI, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα δυσμενούς επίδρασης των γειτονικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Για να εξασφαλιστεί η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, η εκτίμηση της σύζευξης μέσω ακτινοβολίας σε ηλεκτρονικά κυκλώματα κρίνεται ιδιαίτερος σημαντική [10].

1.2.2. Κοινού και διαφορικού τρόπου σύζευξη

Στα προβλήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, γίνεται διάκριση μεταξύ κοινών και διαφορικών ρευμάτων και τάσεων θορύβου, εκ των οποίων και τα δύο θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακούσια ακτινοβολία. Το παρακάτω Σχήμα παρουσιάζει τη διαφορά μεταξύ των διαφορικών και κοινών σημάτων:



Σχήμα 1.6 Κοινός και διαφορικός τρόπος σύζευξης [10]

- Διαφορική τάση (Differential-mode): Η διαφορική τάση V_{DM} [V] ορίζεται ως η διαφορά δυναμικών τάσης του αγωγού 1 και του αγωγού 2: $V_{DM} = V_1 - V_2$.

- Κοινότροπη τάση: Στην περίπτωση που και οι δύο αγωγοί έχουν ίση αντίσταση προς τη γη, η κοινότροπη τάση (Common-mode) V_{CM} [V] είναι ίση με το μισό του αθροίσματος των τάσεων του αγωγού 1 και του αγωγού 2: $V_{CM}=(V_1+V_2)/2$. Ωστόσο, σε διαφορετική περίπτωση πρέπει να υπολογιστεί ο λόγος καταμερισμού h [11]:

$$h = \frac{Z_1}{Z_1+Z_2} \quad [1.1],$$

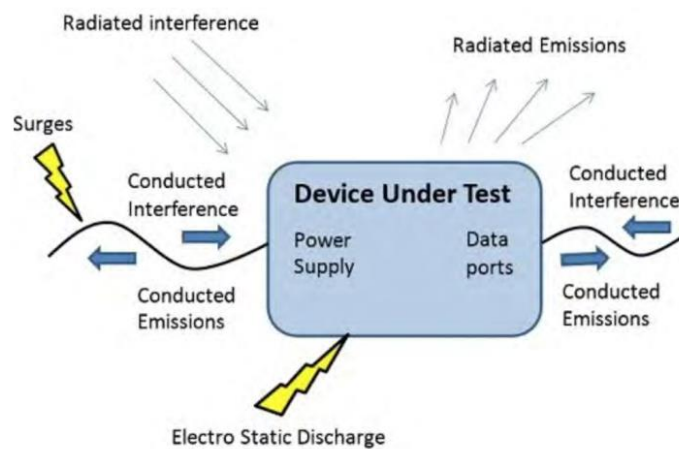
όπου Z_1, Z_2 οι αντιστάσεις των αγωγών 1 και 2 αντίστοιχα ως προς γη.

Στην περίπτωση αυτή, η τάση κοινού τρόπου (Common-mode) V_{CM} [V] είναι ίση με [11]:

$$V_{CM} = h \cdot V_1 + (1 - h) \cdot V_2 \quad [1.2],$$

- Ρεύμα διαφορικού τρόπου: Το ρεύμα διαφορικού τρόπου ρέει προς όλες τις κατευθύνσεις ενός καλωδίου.
- Ρεύμα κοινού τρόπου: Το ρεύμα κοινού τρόπου ρέει προς μία κοινή κατεύθυνση ενός καλωδίου (όπως τα I_1, I_2 στο Σχήμα 1.6) [10].

Η σύζευξη μέσω επαγωγής και η σύζευξη μέσω χωρητικότητας θεωρούνται συγκριτικά με τις άλλες λιγότερο ισχυρές. Συνεπώς, το κύριο ενδιαφέρον γύρω από την πρόληψη των διαταραχών αυτών συγκεντρώνεται σε τέσσερις υποκατηγορίες: ακτινοβολημένες εκπομπές, ακτινοβολούμενη ευαισθησία, αγόμενες εκπομπές, και αγόμενη ευαισθησία/ατρωσία (Σχήμα 1.7) [5].



Σχήμα 1.7 Απεικόνιση των κύριων διαταραχών Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας [8]

1.2.3. Μονάδες μέτρησης στην EMC

Τα κύρια σημεία ενδιαφέροντος στα προβλήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, όπως αναφέρθηκε, είναι οι εκπομπές μέσω αγωγής [η τάση σε βολτ (V), το ρεύμα σε αμπέρ (A)] και οι ακτινοβολούμενες εκπομπές [ηλεκτρικό πεδίο σε Βολτ ανά μέτρο (V/m) και Μαγνητικό πεδία σε Αμπέρ ανά μέτρο (A / m)]. Σχετιζόμενες με αυτές τις βασικές μονάδες μέτρησης είναι αυτές της ισχύος σε Watts (W) ή της πυκνότητας ισχύος σε Watts ανά

τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Το αριθμητικό εύρος αυτών των μονάδων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρικά πεδία μπορούν να έχουν τιμές που κυμαίνονται από $1 \mu V/m$ έως $200 V/m$. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα εύρος πάνω από οκτώ τάξεις μεγέθους (10^8). Επειδή αυτές οι ευρείες περιοχές σε μονάδες συναντώνται συχνά σε προβλήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, τα μεγέθη εκφράζονται σε ντεσιμπέλ (dB). Τα ντεσιμπέλ έχουν την ιδιότητα της συμπίεσης δεδομένων, π.χ., ένα εύρος τάσεων 10^8 είναι 160 dB. Για να είμαστε σαφείς στα ζητήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, πρέπει να είμαστε σε θέση να εκφράσουμε και να χειριστούμε μονάδες που εκφράζονται σε dB. Είναι επίσης σημαντικό να συγκεκριμενοποιούμε τις τιμές των διαφόρων μονάδων όταν εκφράζονται σε dB, σε αντιστοιχία με τη μετατροπή από το αγγλικό σύστημα μονάδων (ιντσών, ποδιών, γαλόνων, κ.λπ.) στο μετρικό σύστημα των μονάδων (μέτρα εκατοστά, λίτρα κλπ.).

Μια μέτρηση σε dB είναι μια μέθοδος μέτρησης σε αναλογία δύο τιμών και ως εκ τούτου είναι αδιάστατη. Η ανάλυση ενός συστήματος σε dB επιτρέπει τον υπολογισμό του κέρδους ως άθροισμα και όχι ως προϊόν, απλοποιώντας περαιτέρω την ανάλυσή του. Οι μετρήσεις dB μπορούν επίσης να είναι συγκρίσιμες με μια τιμή αναφοράς, όπως το $1 \mu V$. Ως εκ τούτου, μια μέτρηση ενός σήματος σε dBμV είναι η αναλογία της ισχύος του σήματός του σε $1 \mu V$. Οι κοινές μονάδες αναφέρονται σε $1 \mu V/m$, $1 mV/m$, $1 \mu A/m$ ή $1 mA/m$ ως dBμV / m, dBmV / m, dBμA / m ή dB mA / m αντίστοιχα. Για παράδειγμα, ένα από τα όρια για το ηλεκτρικό πεδίο ακτινοβολίας είναι $100 \mu V/m$. Αυτό μεταφράζεται σε 40 dBμV/m [5].

1.3.Εισαγωγή στην έννοια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση ορίζεται συχνά ως η παροδική ροή ρεύματος που αντισταθμίζει την ανισορροπία φορτίου μεταξύ των σωμάτων. Το φυσικό φαινόμενο του ηλεκτρικού τόξου είναι ίσως το πιο εντυπωσιακό και γνωστό παράδειγμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το ίδιο φαινόμενο, σε πολύ μικρότερη κλίμακα σε σχέση με την αρχική ηλεκτροστατική τάση και τα προκύπτοντα μήκη διάσπασης, μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια του χειρισμού των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και του μικροηλεκτρονικού εξοπλισμού. Εάν δεν υπάρχουν κατάλληλα μέτρα προστασίας, το αποτέλεσμα και των δύο φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης θα είναι καταστροφικό [12].

Στην εποχή μας, ο στατικός ηλεκτρισμός έχει αξιοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Παραδείγματα προϊόντων που χρησιμοποιούν αυτή την αρχή είναι οι ηλεκτροστατικοί αντιγραφείς, οι κρημνιστές σκόνης, οι καθαριστές αέρα και οι ηλεκτροστατικοί ψεκαστές χρώματος. Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD) αποτελεί συχνά κίνδυνο για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών προϊόντων. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, γνωρίζουμε ότι πολλά κυκλώματα, ημιαγωγοί μετάλλων-οξειδίου (MOSs), διακριτά ηλεκτρικά μέρη όπως αντιστάσεις ταινιών και πυκνωτές, και κρύσταλλοι είναι ευαίσθητα

στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Καθώς οι ηλεκτρονικές συσκευές γίνονται μικρότερες, ταχύτερες και λειτουργούν σε χαμηλότερες τάσεις, η ευαισθησία τους αυξάνεται.

Ο έλεγχος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι μια ειδική περίπτωση του γενικού θέματος της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας και ατρωσίας. Είναι γνωστό ακόμη, ότι πολλές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ευαισθησίας ενός συστήματος σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι παρόμοιες με εκείνες που εφαρμόζονται για την παροχή μεταβατικής ατρωσίας και τον έλεγχο των εκπομπών ακτινοβολίας [2].

1.3.1. Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Ο στατικός ηλεκτρισμός μπορεί να δημιουργηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, αλλά ο πιο κοινός είναι εξ απαγωγής. Τα υλικά μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Όταν δύο μη αγωγοί (μονωτές) έρχονται σε επαφή, κάποιο φορτίο (ηλεκτρόνια) μεταφέρεται από το ένα υλικό στο άλλο. Επειδή το φορτίο δεν είναι πολύ κινητό σε έναν μονωτή, όταν τα δύο υλικά διαχωρίζονται, αυτό το φορτίο μπορεί να μην επιστρέψει στο αρχικό υλικό. Εάν τα δύο υλικά ήταν αρχικά ουδέτερα, θα φορτώνονταν το ένα θετικά και το άλλο αρνητικά. Αυτή η μέθοδος παραγωγής στατικής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται τριβοηλεκτρικό φαινόμενο. Αν και υπάρχει η γενική πεποίθηση ότι η τριβή είναι απαραίτητη για να δημιουργηθεί φόρτιση μεταξύ δύο υλικών, αυτό δεν αληθεύει, καθώς το μόνο που απαιτείται στην πραγματικότητα είναι τα υλικά απλά να έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια να διαχωριστούν.

Μερικά υλικά απορροφούν εύκολα τα ηλεκτρόνια, ενώ άλλα τείνουν να τα χάνουν εύκολα [2]. Στον Πίνακα 1.1. παρατίθεται η τριβοηλεκτρική σειρά υλικών τα οποία κατατάσσονται ανάλογα με το αν αποκτούν θετική ή αρνητική φόρτιση [13].

Πίνακας 1.1. Τριβοηλεκτρική σειρά υλικών [13]

Πολικότητα φόρτισης λόγω τριβοηλεκτρικού φαινομένου σε διάφορα υλικά	
Υλικά που φορτίζονται θετικά	Υλικά που φορτίζονται αρνητικά
Αέρας	Κερί γυαλίσματος
Ανθρώπινο δέρμα	Σκληρό λάστιχο
Γυαλί	Κόλλα συγκόλλησης
Ανθρώπινα μαλλιά	Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι
Νάιλον	Ανοξείδωτο ατσάλι
Μαλλί	Συνθετικό λάστιχο
Γούνα	Ακρυλικό
Μόλυβδος	Αφρός πολυουρεθάνης

Μετάξι	Πολυεστέρας
Αλουμίνιο	Πολυαιθυλένιο
Χαρτί	PVC
Πολυουρεθάνη	TEFLON
Βαμβάκι	
Ξύλο	Λάστιχο σιλικόνης
Ατσάλι	

Όταν δύο υλικά έρχονται σε επαφή, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το υλικό υψηλότερο στη λίστα στο υλικό χαμηλότερο στην λίστα. Ο βαθμός διαχωρισμού των δύο υλικών στον πίνακα 1.1 δεν δείχνει απαραίτητα το μέγεθος της φόρτισης που δημιουργείται. Το μέγεθος εξαρτάται όχι μόνο από τη θέση των υλικών της λίστας, αλλά και από την καθαρότητα της επιφάνειας, την υγρασία, την πίεση της επαφής, την τριβή, την επιφάνεια επαφής, την ομαλότητα των επιφανειών, και την ταχύτητα της επαφής. Φόρτιση μπορεί να συμβεί ακόμη όταν δύο αντικείμενα του ίδιου υλικού έρθουν σε επαφή, αν και σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να προβλεφθεί ποιο θα φορτιστεί θετικά και ποιο αρνητικά.

Πίνακας 1.2. Τυπικές τιμές αναπτυσσόμενης ηλεκτροστατικής τάσης [14]

Τρόποι δημιουργίας στατικού ηλεκτρισμού	Αναπτυσσόμενη Τάση(V)	
	10%-20% Σχετική Υγρασία	65%-90% Σχετική Υγρασία
Περπάτημα πάνω σε χαλί	35.000	1500
Περπάτημα πάνω σε δάπεδο παρκέ	12.000	250
Άνοιγμα πλαστικού φακέλου	7000	600
Σήκωμα πλαστικής σακούλας	20.000	1200
Κάθιση σε καρέκλα από αφρό πολυουρεθάνης	18.000	1500

Ο Πίνακας 1.2 παρουσιάζει τυπικές τιμές τάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν υπό ποικίλες συνθήκες. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση της υγρασίας. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας, τόσο πιο ήπιες είναι οι εκφορτίσεις. Αντίθετα όταν υπάρχει

αυξημένη ξηρασία οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (και αυτό το διαπιστώνουμε και στις παραμέτρους της κυματομορφής ρεύματος όπου έχουμε μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλο χρόνο ανόδου) [13], [14].

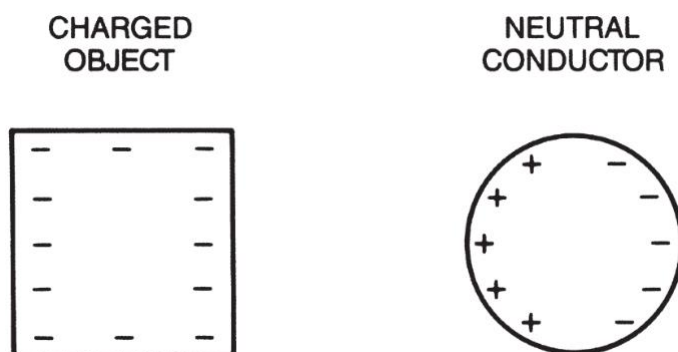
Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι συνήθως μια διαδικασία τριών σταδίων:

1. Μία φόρτιση δημιουργείται σε έναν μονωτή.
2. Αυτό το φορτίο μεταφέρεται σε έναν αγωγό μέσω επαφής ή επαγωγής.
3. Ο φορτισμένος αγωγός πλησιάζει ένα μεταλλικό αντικείμενο και εκφορτίζεται.

Ένας φορτισμένος μονωτής από μόνος του δεν αποτελεί άμεση απειλή για ESD. Δεδομένου ότι το φορτίο σε έναν μονωτή δεν είναι ελεύθερο να μετακινηθεί, ο μονωτής δεν μπορεί να εκφορτιστεί. Η απειλή από έναν φορτισμένο μονωτή προέρχεται από τη δυνατότητα του να προκαλεί φόρτιση, συνήθως με επαγωγή, σε έναν αγωγό, όπως ένας άνθρωπος, ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να εκφορτιστεί [2].

1.3.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

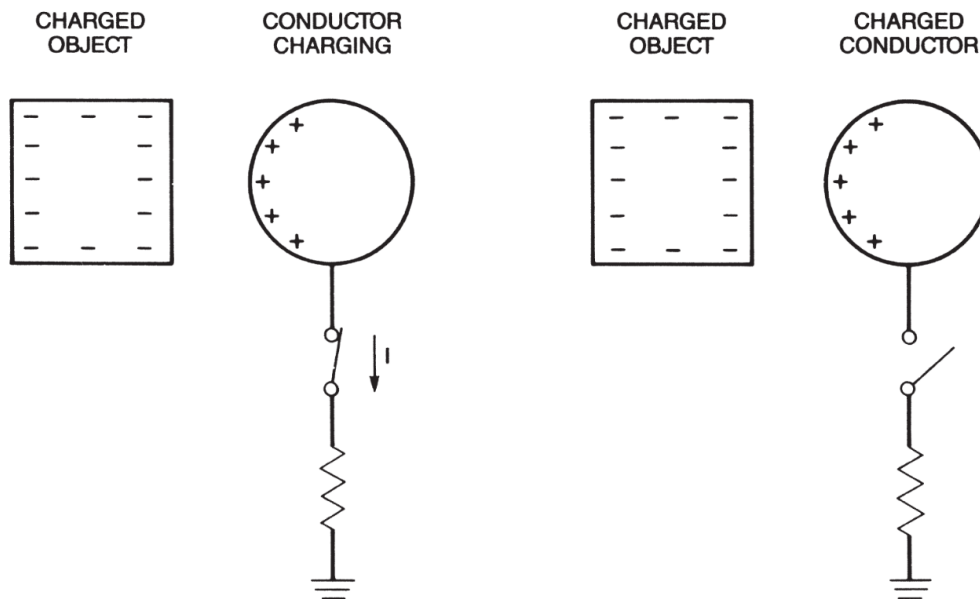
Εναλλακτικά, το άλλο είδος εκφόρτισης είναι η έμμεση εκφόρτιση. Αν ένα ηλεκτρικά φορτισμένο αντικείμενο (μονωτής ή αγωγός) περιβάλλεται από ένα ηλεκτροστατικό πεδίο και ένας ουδέτερος αγωγός τοποθετηθεί στην περιοχή γύρω από αυτό το φορτισμένο αντικείμενο, το ηλεκτροστατικό πεδίο θα προκαλέσει τον προσανατολισμό των φορτίων στον ουδέτερο αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8. Το φορτίο με πολικότητα αντίθετη με εκείνη του φορτισμένου σώματος θα βρίσκεται στην επιφάνεια του ουδέτερου αγωγού πλησιέστερα στο φορτισμένο σώμα, και το ομώνυμο πολικό φορτίο θα βρίσκεται στο πιο μακρινό σημείο της επιφάνειας. Ο αγωγός θα παραμείνει ουδέτερος, ωστόσο, με ίσα ποσά θετικού και αρνητικού φορτίου. Όταν το ουδέτερο αντικείμενο απομακρυνθεί από το φορτισμένο αντικείμενο, τα θετικά και αρνητικά φορτία θα ανασυνδυαστούν.



Σχήμα 1.8 Φορτισμένο αντικείμενο και ουδέτερος αγωγός [2]

Αν, όμως ο ουδέτερος αγωγός γειωθεί και βρεθεί στην περιοχή γύρω από το φορτισμένο αντικείμενο, το φορτίο της πλευράς του ουδέτερου αγωγού με το ίδιο πολικά φορτίο με το φορτισμένο αντικείμενο θα γειωθεί (σχήμα 1.9). Εάν, τότε, διακοπεί η σύνδεση του αγωγού

με το έδαφος, και συνεχίσει να βρίσκεται πλησίον του φορτισμένου αντικειμένου, ο αγωγός θα παραμείνει φορτισμένος [2].

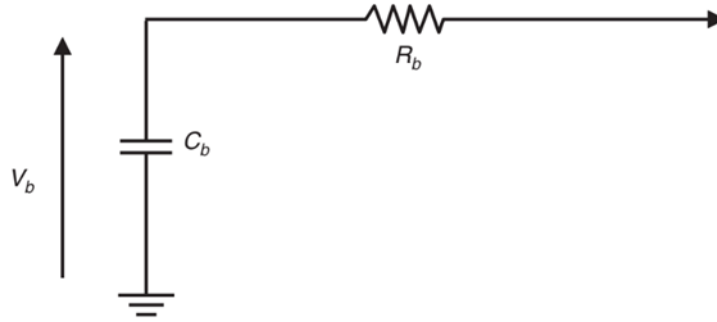


Σχήμα 1.9 Φορτισμένο αντικείμενο και γειωμένος ουδέτερος αγωγός [5]

1.3.3 Μοντέλο ανθρώπινου σώματος

Παρόλο που τα φορτία βρίσκονται στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, η ενέργεια αποθηκεύεται στην χωρητικότητα του σώματος. Όλα τα αντικείμενα έχουν μια χωρητικότητα. Η χωρητικότητα ακόμη και ενός αντικειμένου με ακανόνιστο σχήμα καθορίζεται κυρίως από την επιφάνεια του. Οι άνθρωποι αποτελούν μια κύρια πηγή εκφορτίσεων. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι εύκολο για έναν άνθρωπο να δημιουργήσει ένα στατικό φορτίο. Αυτό το φορτίο μπορεί στη συνέχεια να εκφορτιστεί από το άτομο σε κάποιο ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Για να μοντελοποιηθεί η εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος, πρέπει να προσδιορισθεί η χωρητικότητα του ανθρώπου. Η χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος κυμαίνεται μεταξύ 50 και 250 pF. Το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος όσο αφορά την ESD παρουσιάζεται στο σχήμα 1.10. Η χωρητικότητα του σώματος C_b φορτίζεται σε τάση V_b μέσω κάποιου τρόπου φόρτισης και το σώμα εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης σώματος R_b . Η αντίσταση του σώματος είναι σημαντική επειδή περιορίζει το ρεύμα εκφόρτισης. Η αντίσταση του σώματος μπορεί να ποικίλει από περίπου 500 έως 10.000 Ω , ανάλογα με το μέρος του σώματος από το οποίο γίνεται η εκφόρτιση. Έαν η εκφόρτιση γίνει μέσω του δαχτύλου, η αντίσταση θα είναι περίπου 10.000 Ω , ενώ μέσω της παλάμης γύρω στα 500 Ω [5].



RANGE OF VALUES

C_b	50 to 250 pF
R_b	500 to 10k Ω
V_b	0 to 20 kV

Σχήμα 1.10 Μοντέλο ανθρώπινου σώματος [2]

Μια εκφόρτιση από μια τάση μικρότερη από 3500 V δεν θα γίνει αισθητή από το εμπλεκόμενο άτομο. Επειδή πολλές ηλεκτρονικές συσκευές είναι ευαίσθητες σε ζημιές από εκφορτίσεις μόλις μερικώς εκατοντάδων βολτ, μπορεί να προκύψει βλάβη εξαρτημάτων και κυκλωμάτων από μια εκφόρτιση που κάποιος άνθρωπος ίσως να μην την δει, ακούσει ή νιώσει. Εκφορτίσεις από δυναμικά μεγαλύτερα των 25 kV είναι επώδυνες έως θανατηφόρες για το άτομο.

1.3.4 Στατική εκφόρτιση και χρόνος απόσβεσης

Ένα φορτισμένο αντικείμενο μπορεί να εκφορτιστεί με δύο τρόπους: μέσω διαρροής ή μέσω εκκένωσης. Διαρροή φορτίου από ένα αντικείμενο μπορεί να συμβεί μέσω του αέρα, λόγω της υγρασίας. Όσο υψηλότερη είναι η υγρασία, τόσο ταχύτερη θα είναι και η διαρροή του φορτίου. Ακόμη, εκφόρτιση ενός φορτισμένου σώματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κάποιου ιονιστή, ο οποίος θα προκαλέσει την διάσπαση του αέρα σε θετικά και αρνητικά ιόντα.

Μπορούμε να προκαλέσουμε, ακόμη, την διαρροή του φορτίου ενός φορτισμένου αγωγού εάν τον γειώσουμε. Επειδή το ανθρώπινο σώμα είναι αγωγίμο, εάν γειωθεί, για παράδειγμα μέσω ενός αντιστατικού μάντα καρπού, ο μάντας θα «απορροφήσει» το φορτίο. Ωστόσο, δε θα πραγματοποιηθεί η εκφόρτιση φορτισμένων αντικειμένων, όπως τα ρούχα του ατόμου. Για να αφαιρεθεί το φορτίο από αυτά τα αντικείμενα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ιονισμός ή υψηλή υγρασία (> 50%). Όταν γειώνεται ένας άνθρωπος, θα πρέπει να αποφεύγεται έδαφος με μεγάλη αντίσταση λόγω του κινδύνου που υπάρχει, εάν το άτομο έρθει σε επαφή με γραμμή παροχής ισχύος ή άλλη υψηλή τάση. Έτσι, η ελάχιστη αντίσταση που πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τη γείωση ενός ατόμου είναι 250 k Ω . Οι αντιστατικοί μάντες συνήθως έχουν αντοχή εδάφους ίση με 1M Ω . Όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση, τόσο περισσότερο χρόνο θα χρειαστεί το αντικείμενο για να εκφορτιστεί [2].

Επειδή η εκφόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να διαρκέσει κάποια χρονική περίοδο, μια σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος απόσβεσης, ο χρόνος που απαιτείται δηλαδή για να μειωθεί η φόρτιση στο 37% της αρχικής της τιμής [15]. Ο χρόνος απόσβεσης ισούται με [15]:

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad [1.3],$$

όπου ε είναι η διηλεκτρική σταθερά για το υλικό και σ είναι η αγωγιμότητα.

Ο χρόνος απόσβεσης μπορεί επίσης να εκφραστεί και σε εξάρτηση της επιφανειακής αντίστασης του υλικού [15]:

$$\tau = \varepsilon\rho \quad [1.4],$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι ο χρόνος απόσβεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί έμμεσα ως μία μέθοδος μέτρησης της αντοχής των υλικών. Επειδή ο στατικός ηλεκτρισμός είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο, τα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την επιφανειακή τους αντίσταση. Η αντίσταση επιφάνειας έχει τις διαστάσεις των Ωm ανά τετραγωνική μονάδα [Ω/m^2]. Η επιφανειακή αντίσταση μετριέται με ένα περίβλημα που έχει δύο ηλεκτρόδια που σχηματίζουν τις απέναντι πλευρές ενός τετραγώνου. Όσο το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι το ίδιο με το μήκος των ηλεκτροδίων, η αντίσταση θα είναι η ίδια ανεξαρτήτως του μήκους των ηλεκτροδίων. Δηλαδή, εάν τα δύο ηλεκτρόδια είναι 3 cm σε μήκος, πρέπει να τοποθετηθούν 3 cm μακριά [2].

Όπως αναφέρθηκε, τα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την επιφανειακή τους αντίσταση σε 4 κατηγορίες (Πίνακας 1.3) [14]:

Πίνακας 1.3. Ταξινόμηση υλικών με βάση την επιφανειακή τους αντίσταση [14]

Υλικό	Επιφανειακή Αντίσταση (Ω/τετραγωνική μονάδα)
Αγώγιμο	0 έως 10^5
Στατικό απορροφητικό	10^5 έως 10^9
Αντιστατικό	10^9 έως 10^{14}
Μονωτικό	$>10^{14}$

Τα υλικά με επιφανειακή αντίσταση 10^9 ανά τετραγωνική μονάδα ή λιγότερο μπορούν να εκφορτιστούν γρήγορα, εάν γειωθούν. Τα αγώγιμα (conductive) υλικά έχουν τον ταχύτερο χρόνο εκφόρτισης. Εάν μια φορτισμένη συσκευή έρθει σε επαφή με γειωμένο αγώγιμο υλικό, τότε θα εκφορτισθεί γρήγορα με μεγάλη ονομαστική τιμή ρεύματος, και έτσι υπάρχει η πιθανότητα καταστροφικών συνεπειών. Τα στατικά-απορροφητικά (static-dissipative) υλικά προτιμώνται έναντι των αγώγιμων υλικών, επειδή η εκφόρτιση συμβαίνει με βραδύτερο ρυθμό. Εάν γειωθούν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

πρόληψη της συσσώρευσης φορτίου και για την ασφαλή εκφόρτιση αντικειμένων που έχουν ήδη φορτιστεί. Τα αντιστατικά (antistatic) υλικά καταστέλλουν τα αρχικά φορτία, αποτρέπουν τη συσσώρευση στατικής ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχουν τον μικρότερο χρόνο εκφόρτωσης. Τα δύο τελευταία προαναφερθέντα είδη υλικών προτιμώνται σε περιβάλλοντα με ευαισθησία σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, σε αντίθεση με τα μονωτικά (insulative) τα οποία διατηρούν την φόρτιση που έχουν [16].

1.3.5 Προστασία έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στον σχεδιασμό του εξοπλισμού

Η βασική αρχή στην προστασία έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι ότι πρέπει να είναι μέρος του αρχικού σχεδιασμού του συστήματος και να μην προστίθενται στο τέλος, όταν κάποια δοκιμή δείξει ότι υπάρχει κάποιο πρόβλημα.

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός της ανοσίας ESD απαιτεί μια τριπλή προσέγγιση:

- Πρώτον, αποτροπή ή ελαχιστοποίηση των μεταβατικών ρευμάτων με:
 - Αποτελεσματικό σχεδιασμό του περιβλήματος
 - Προστασία καλωδίων
 - Παροδική Προστασία σε όλους τους αγωγούς των ακάλυπτων εξωτερικών καλωδίων
- Δεύτερον, μείωση της ευαισθησίας των ευαίσθητων κυκλωμάτων, όπως:
 - Επανεκκινήσεις
 - Διακοπές
 - Άλλες κρίσιμες εισοδοί ελέγχου
- Τρίτον, λογισμικό ικανό να ανιχνεύσει, και αν είναι δυνατόν να διορθώσει, σφάλματα στα ακόλουθα:
 - Ροή προγραμμάτων
 - Δεδομένα εισόδου/εξόδου (I/O)
 - Μνήμη

Για βέλτιστη προστασία από ESD, πρέπει να αντιμετωπιστούν και τα τρία παραπάνω.

Ένα κύκλωμα ή σύστημα μπορεί να προστατευτεί από μια στατική εκφόρτιση με οποιοδήποτε από τα ακόλουθα:

- Εξάλειψη της συσσώρευσης φορτίου στην πηγή

- Απομόνωση του προϊόντος για να αποφευχθεί μια εκφόρτιση
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση των κυκλωμάτων έναντι των ηλεκτρικών πεδίων που παράγονται από την εκφόρτιση
- Μείωση βρόγχων για την προστασία του κυκλώματος από τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από την εκφόρτιση

Τα τρία πρώτα σημεία της παραπάνω λίστας εστιάζουν στον άμεσο έλεγχο της εκφόρτισης, ενώ τα δύο τελευταία σημεία ασχολούνται με τον έλεγχο των παραγόμενων πεδίων [2], [13].

Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στους Φερρίτες

2.1 Ιστορική αναδρομή και χαρακτηριστικά των φερριτών

Στο πλαίσιο του εφαρμοσμένου μαγνητισμού, οι φερρίτες μπορούν να οριστούν ως μαγνητικά οξείδια διαμορφωμένα έτσι ώστε να μπορούν να αποκτήσουν συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες και να χρησιμοποιηθούν ως βασικά υλικά σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Πολύ πριν από την ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού, φυσικά εμφανιζόμενα μαγνητικά οξείδια όπως ο μαγνητίτης Fe_3O_4 , ήταν ουσιαστικά η μόνη πηγή μαγνήτη άμεσα προσβάσιμη στον άνθρωπο. Αρχικά, χρησιμοποιούταν σε μαγνητικές πυξίδες και αργότερα οι πρώτοι μαγνήτες σιδήρου άρχισαν να φορτίζονται μέσω επαγωγής από τον μαγνητίτη [17].

Αφού η ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού είχε θέσει τα θεμέλια της ηλεκτρικής βιομηχανίας, ο σίδηρος και τα μαγνητικά κράματα του κυριάρχησαν. Η ανάπτυξη των μαγνητικών υλικών επικεντρώθηκε στην παραγωγή κραμάτων με ιδιότητες ειδικά προσαρμοσμένες στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, η προοπτική για την επαναφορά των μαγνητικών οξειδίων στην αγορά των μαγνητικών υλικών δεν χάθηκε εντελώς. Υπήρξαν διάφορες προσπάθειες από το 1909 και μετά για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του μαγνητίτη και να παραχθούν άλλα μαγνητικά οξείδια.

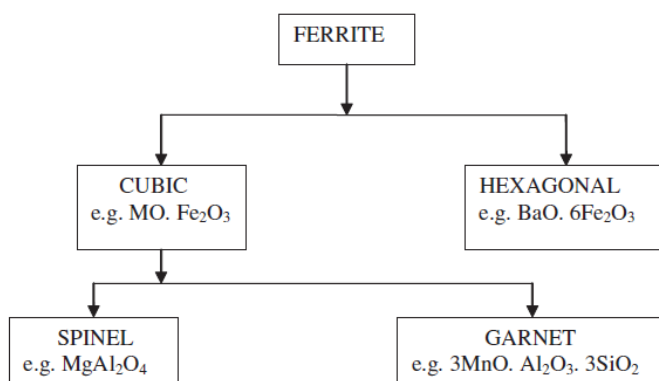
Το κύριο κίνητρο για τη μελέτη των μαγνητικών οξειδίων ήταν η ανάγκη να υπάρχουν μαγνητικά υλικά στα οποία θα μειωνόταν σημαντικά η εμφάνιση δινορρευμάτων. Τα ηλεκτρικά ρεύματα, που προκαλούνται στα κράματα από τα χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία που συναντώνται στις περισσότερες εφαρμογές, προκαλούν σημαντική απώλεια ισχύος και αυτό μπορεί να μειωθεί σε ανεκτά επίπεδα μόνο με την υποδιαίρεση του πυρήνα σε μορφή στρωμάτων, καλωδίων ή σωματιδίων. Τα μαγνητικά οξείδια, που έχουν ηλεκτρικές αντιστάσεις περίπου ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερες από εκείνες που έχουν τα κράματα, θα ικανοποιούσαν σαφώς αυτή την ανάγκη, υπό την προϋπόθεση ότι θα μπορούσαν να αναπτυχθούν επαρκώς οι μαγνητικές τους ιδιότητες [18], [19].

Οι φερρίτες είναι κεραμικά, ομοιογενή υλικά που αποτελούνται από διάφορα οξείδια με κύριο συστατικό το σιδηροξείδιο [20]. Είναι εύθραυστα, πολυκρυσταλλικά και γενικά έχουν γκρι ή μαύρο χρώμα. Χαρακτηρίζονται από:

- Διηλεκτρική αντοχή: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των φερριτών είναι πολύ μεγαλύτερη από άλλους μαγνήτες κραμάτων μετάλλου, όπως οι μαγνήτες νεοδυμίου και οι μαγνήτες κοβαλτίου.
- Αντοχή στη διάβρωση: Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να αντέχουν σε σκληρά χημικά περιβάλλοντα και υψηλή θερμοκρασία.
- Σκληρότητα και βάρος: Το οξείδιο του σιδήρου στους φερρίτες είναι υπεύθυνο για την υψηλή σκληρότητά τους, καθώς ο σίδηρος είναι ένα σχετικά σκληρό και πυκνό

μέταλλο. Το μεγάλο τους βάρος, από την άλλη πλευρά, οφείλεται σε έναν συνδυασμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίας σιδήρου και άλλων οξειδίων μετάλλων. Ως αποτέλεσμα, οι φερρίτες χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλες ποσότητες για εφαρμογές όπου απαιτείται κάποιο βαρύ υλικό, όπως σε μετασχηματιστές και σε πηνία.

Οι φερρίτες μπορούν να ταξινομηθούν σε τύπους με βάση τις ιδιότητες τους. Όσον αφορά τη απομαγνητότητα, μπορούν να χωριστούν σε μαλακούς φερρίτες και σκληρούς φερρίτες. Η απομαγνητότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ταξινόμηση των φερριτών, καθώς καθορίζει την ικανότητα του υλικού να αντιστέκεται στην απομαγνήτιση. Όταν συγκρίνουμε τις διαδικασίες παραγωγής τους, έχουμε τους πυροσυσσωματωμένους φερρίτες και τους συγκολλημένους φερρίτες. Οι φερρίτες μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σε ισότροπους μόνιμους μαγνήτες και σε ανισότροπους μόνιμους μαγνήτες. Οι πρώτοι έχουν ασθενείς μαγνητικές ιδιότητες αλλά μπορούν να μαγνητιστούν προς διαφορετικές κατευθύνσεις, ενώ οι δεύτεροι έχουν ισχυρή μαγνητική δύναμη. Με βάση την κρυσταλλική τους δομή, οι φερρίτες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους: i) κυβικοί (cubic) φερρίτες τύπου σπινελίου (spinel), ii) κυβικοί φερρίτες τύπου γρανάτη (garnet) και iii) εξαγωνικοί φερρίτες (hexagonal) [21], [22].



Σχήμα 2.1 Διαφορετικοί τύποι φερριτών [21]

2.2 Μαλακοί και σκληροί φερρίτες

Οι μαλακοί φερρίτες αποτελούνται συνήθως από οξείδιο του σιδήρου και άλλα οξείδια μετάλλων, όπως νικέλιο, ψευδάργυρο ή μαγγάνιο. Αυτοί οι φερρίτες έχουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή απομαγνητότητα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι επιρρεπείς σε απομαγνήτιση. Αυτή η ιδιότητα τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας, όπως μετασχηματιστές, πηνία και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Οι μαλακοί φερρίτες χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές μαγνητικής θωράκισης, όπου μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των μαγνητικών παρεμβολών.

Υπάρχουν διάφορα είδη μαλακών φερριτών. Οι φερρίτες μαγγανίου-ψευδαργύρου είναι ο πιο κοινός τύπος μαλακών φερριτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή

στοιχείων ισχύος, θωράκισης και γραμμικών επαγωγικών στοιχείων. Οι φερρίτες νικελίου-ψευδαργύρου έχουν υψηλή ειδική αντίσταση και εφαρμόζονται για την κατασκευή μετασχηματιστών .

Οι σκληροί φερρίτες, από την άλλη, γνωστοί και ως κεραμικοί μαγνήτες, αποτελούνται από τους φερρίτες βαρίου και στροντίου και έχουν υψηλή απομαγνητότητα και χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα. Αυτό τους καθιστά πολύ πιο δύσκολους στο να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν σε σύγκριση με τους μαλακούς φερρίτες. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, οι σκληροί φερρίτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν ισχυρό και σταθερό μαγνητικό πεδίο, όπως σε ηλεκτρικούς κινητήρες και ηχεία. Οι σκληροί φερρίτες μπορούν να ταξινομηθούν σε φερρίτες στροντίου, φερρίτες βαρίου κ.λπ. Οι φερρίτες στροντίου βρίσκουν εφαρμογές σε μικρούς ηλεκτροκινητήρες, στις τηλεπικοινωνίες, στις συσκευές μικροκυμάτων και στην ηλεκτρονική βιομηχανία, ενώ οι φερρίτες βαρίου χρησιμοποιούνται σε μαγνήτες ηχείων κ.λπ. λόγω της αντοχής στους στη διάβρωση [20].

2.3 Μαγνητισμός σε φερρίτες

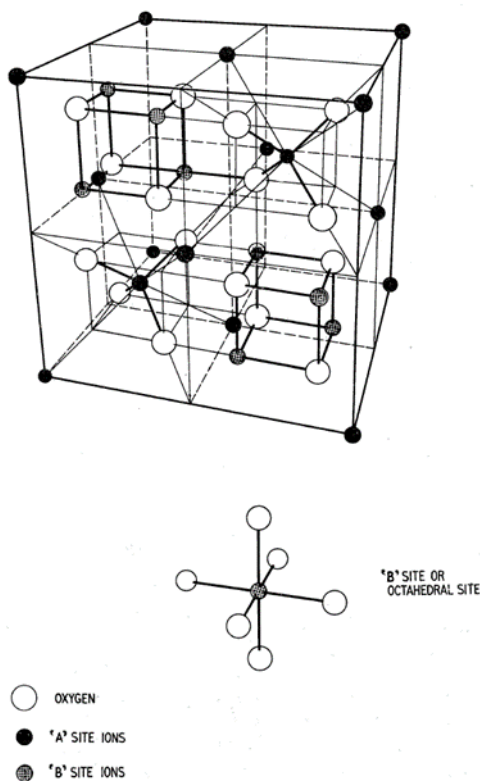
Ο μαγνητισμός είναι το αποτέλεσμα της κίνησης του ηλεκτρικού φορτίου. Ένα ηλεκτρικό φορτίο σε περιστροφική ή κυκλική κίνηση αποτελεί βρόχο ρεύματος και έχει μαγνητική ροπή, m , η οποία μακροσκοπικά είναι το γινόμενο του ρεύματος και του εμβαδού του βρόχου [19].

2.3.1 Φερρομαγνητισμός

Οι φερρίτες είναι οξειδία στα οποία τα ιόντα μετάλλων (κατιόντα) χωρίζονται από ιόντα οξυγόνου (ανιόντα). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι κρυσταλλικοί φερρίτες, οι οποίοι έχουν τη δομή του ορυκτού σπινελίου. Η δομή αυτή θα περιγραφεί παρακάτω και θα συζητηθεί η μορφή του μαγνητισμού που προκύπτει από αυτήν, δηλαδή ο σιδηρομαγνητισμός.

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μια μοναδιαία κυψελίδα του πλέγματος σπινελίου και οι θέσεις των διαφόρων ιόντων. Το μικρό κυβικό διάγραμμα δείχνει ότι η μοναδιαία κυψελίδα αποτελείται από οκτάδες εναλλασσόμενου είδους: στο μεγάλο διάγραμμα μόνο οι τέσσερις πλησιέστερες οκτάδες φαίνονται πλήρεις, ενώ οι υπόλοιπες έχουν τη συμμετρία που φαίνεται στο μικρότερο διάγραμμα. Όλες οι οκτάδες περιέχουν την ίδια τετραεδρική διάταξη των ιόντων οξυγόνου, ενώ οι θέσεις ορίζονται από τις τέσσερις γωνίες ενός μικρότερου κύβου, ο οποίος στην πράξη είναι συνήθως ελαφρώς παραμορφωμένος. Στις οκτάδες που αντιστοιχούν στα μη σκιασμένα τμήματα του μικρού διαγράμματος, οι υπόλοιπες γωνίες του μικρότερου κύβου καταλαμβάνονται από μεταλλικά ιόντα. Στα εναλλασσόμενα οκτάρια οι γωνίες αυτές δεν καταλαμβάνονται. αντ' αυτού υπάρχει μια θέση στο κέντρο του οκταριού. Η θέση αυτή, που περιβάλλεται από την τετραεδρική διάταξη ιόντων οξυγόνου, ονομάζεται τετραεδρική θέση ή θέση A. Όλες οι μαύρες σφαίρες

βρίσκονται σε τετραεδρικές θέσεις, αν και αυτό δεν είναι προφανές όταν εξετάζουμε μόνο μία απομονωμένη μοναδιαία κυψελίδα. Οι υπόλοιπες θέσεις μεταλλικών ιόντων περιβάλλονται από έξι ιόντα οξυγόνου σε μορφή οκταέδρου. Αυτές αναφέρονται ως οκταεδρικές θέσεις ή θέσεις B. Μια απομονωμένη οκταεδρική θέση φαίνεται στο κάτω μέρος του διαγράμματος [23].



Σχήμα 2.2 Μοναδιαία κυψελίδα πλέγματος σπινελίου [23]

Στη μοναδιαία κυψελίδα υπάρχουν 64 πιθανές τετραεδρικές θέσεις και 32 πιθανές οκταεδρικές θέσεις. Από αυτές μόνο 8 τετραεδρικές και 16 οκταεδρικές θέσεις καταλαμβάνονται σε μια πλήρη μοναδιαία κυψελίδα. Εάν η αναλογία ιόντων μετάλλων προς ιόντα οξυγόνου είναι πολύ μικρή, δηλαδή υπάρχει περίσσεια οξυγόνου, τότε ορισμένες από τις θέσεις ιόντων μετάλλων μπορεί να είναι μη κατειλημμένες. Οι θέσεις αυτές αναφέρονται τότε ως κενές θέσεις. Εάν η αναλογία είναι σωστή, τότε η μοναδιαία κυψελίδα περιέχει 24 ιόντα μετάλλου και 32 ιόντα οξυγόνου, δηλαδή υπάρχουν 3 ιόντα μετάλλου για κάθε 4 ιόντα οξυγόνου. Έτσι, η μοναδιαία κυψελίδα του σπινελίου μπορεί να θεωρηθεί από χημικής άποψης ότι αποτελείται από 8 μόρια με τον τύπο MeFe_2O_4 . Από τα τρία μεταλλικά ιόντα, το ένα βρίσκεται σε τετραεδρική θέση και τα δύο σε οκταεδρικές θέσεις. Εάν το σπινέλιο ήταν «κανονικό», το δισθενές ιόν Me θα καταλάμβανε τετραεδρική θέση (A), ενώ τα τρισθενή ιόντα Fe θα καταλάμβαναν οκταεδρικές θέσεις (B). Σε ένα «μη κανονικό» σπινέλιο το δισθενές ιόν Me καταλαμβάνει μία από τις θέσεις B, ενώ τα

τρισθενή ιόντα Fe καταλαμβάνουν την άλλη θέση B και τη θέση A. Στο σχήμα 2.3 μπορούμε να δούμε τον αριθμό ιόντων σε όρους μοναδιαίας κυψελίδας :

Number of ions	{	A site	Me	Fe ₂	O ₄
		B site	—	8	}
			8	8	32

Σχήμα 2.3 Αριθμός ιόντων στη μοναδιαία κυψελίδα σπινελίου [23]

Στην πράξη οι φερρίτες σπινελίου έχουν κατανομή ιόντων κάπου μεταξύ «κανονικότητας» και «μη κανονικότητας». Η δομή του σπινελίου αποτελείται από έναν αριθμό αλληλοδιαπλεκόμενων ενδοκεντρωμένων κυβικών πλεγμάτων. Οι υπόλοιπες θέσεις A (κέντρα οκτάδας) σχηματίζουν ένα άλλο ενδοκεντρωμένο κυβικό πλέγμα, μετατοπισμένο από το πρώτο, κατά μήκος της διαγωνίου του κύβου.

Οι θέσεις των ιόντων οξυγόνου ορίζονται επίσης από ένα σύνολο αλληλοδιαδοχικών ενδοκεντρωμένων κυβικών πλεγμάτων. Οποιοδήποτε ιόν οξυγόνου μπορεί να θεωρηθεί ότι καταλαμβάνει μια γωνία ενός ενδοκεντρωμένου κύβου που έχει τις ίδιες διαστάσεις με τη μοναδιαία κυψελίδα. Όλες οι άλλες θέσεις σε αυτόν τον ενδοκεντρωμένο κύβο καταλαμβάνονται επίσης από ιόντα οξυγόνου. Και πάλι, τα οκταεδρικά ιόντα (B) καταλαμβάνουν θέσεις σε τέσσερα ενδοκεντρωμένα κυβικά πλέγματα. Κάθε ένα από αυτά τα πλέγματα έχει τις ίδιες διαστάσεις με τη μοναδιαία κυψελίδα και είναι μετατοπισμένα το ένα από το άλλο κατά μήκος των ακμών του μικρού κύβου στα μη σκιασμένα οκτάγωνα.

Αυτά τα διαπλεκόμενα πλέγματα ονομάζονται υποπλέγματα και παίζουν σημαντικό ρόλο στον μαγνητισμό των φερριτών [19].

2.3.2 Μαγνήτιση

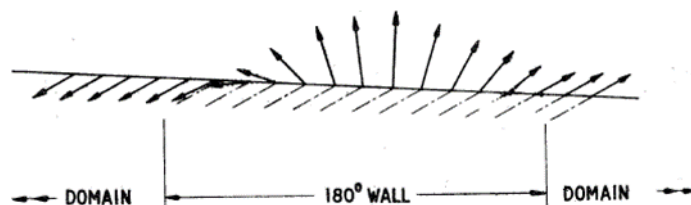
Τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα και, λόγω αυτής της περιστροφής και του ηλεκτροστατικού τους φορτίου, παρουσιάζουν μαγνητική ροπή. Κανονικά, σε ένα ιόν με άρτιο αριθμό ηλεκτρονίων, τα σπιν ή οι ροπές ακυρώνονται, ενώ όταν ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι περιττός, υπάρχει ένα μη αντισταθμισμένο σπιν. Για τα μέταλλα μετάπτωσης ο αριθμός των μη αντισταθμισμένων σπιν είναι μεγαλύτερος, π.χ. το τρισθενές ιόν Fe έχει ροπή που ισοδυναμεί με πέντε μη αντισταθμισμένα σπιν.

Όταν τα άτομα αυτών των μετάλλων μετάπτωσης συνδυάζονται σε μεταλλικούς κρυστάλλους, όπως συμβαίνει, για παράδειγμα, στον σίδηρο, οι ατομικές ροπές διατηρούνται αυθόρμητα σε παράλληλη ευθυγράμμιση στις περιοχές εντός κάθε κρυσταλλίτη. Ο πραγματικός αριθμός των μη αντισταθμισμένων σπιν θα είναι μικρότερος από ό,τι για το απομονωμένο ιόν λόγω του χαρακτήρα των ζωνών των ενεργειών των ηλεκτρονίων σε ένα μέταλλο. Οι περιοχές στις οποίες συμβαίνει η ευθυγράμμιση μπορεί να εκτείνονται σε πολλές χιλιάδες μοναδιαίες κυψέλες. Ο προσανατολισμός των σπιν κινείται κατά μήκος μιας κατεύθυνσης «ελάχιστης ενέργειας», δηλαδή απαιτείται εξωτερική ενέργεια για να εκτραπεί η μαγνήτιση από αυτή την κατεύθυνση και εάν ο

εξωτερικός παράγοντας αφαιρεθεί, η μαγνήτιση θα επιστρέψει σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτή η κατευθυντική ή ανισότροπη συμπεριφορά μπορεί να προκύψει από διάφορους παράγοντες. Η κρυσταλλική ανισοτροπία είναι εγγενής στη δομή του πλέγματος, καθώς η μαγνήτιση προτιμά πάντα τη διαγώνιο ή την άκρη του κύβου. Η μηχανική καταπόνηση μπορεί να προκαλέσει ανισοτροπία και το σχήμα της κυψελίδας δημιουργεί σχεδόν πάντα ανισοτροπία. Το αποτέλεσμα είναι ότι η μαγνήτιση συγκρατείται σε μια ορισμένη κατεύθυνση ή σε έναν αριθμό κατευθύνσεων, σαν ένα ελατήριο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανισοτροπία, τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το ελατήριο και τόσο πιο δύσκολο είναι να εκτραπεί η μαγνήτιση από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Η παράλληλη ευθυγράμμιση των σπιν δείχνει ότι το υλικό εντός της περιοχής είναι μαγνητικά κορεσμένο. Η μαγνήτιση ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου και επομένως είναι ανάλογη της πυκνότητας των μαγνητικών ιόντων και των μαγνητικών ροπών τους. Ο μαγνητισμός που προκύπτει από την παράλληλη ευθυγράμμιση ονομάζεται σιδηρομαγνητισμός.

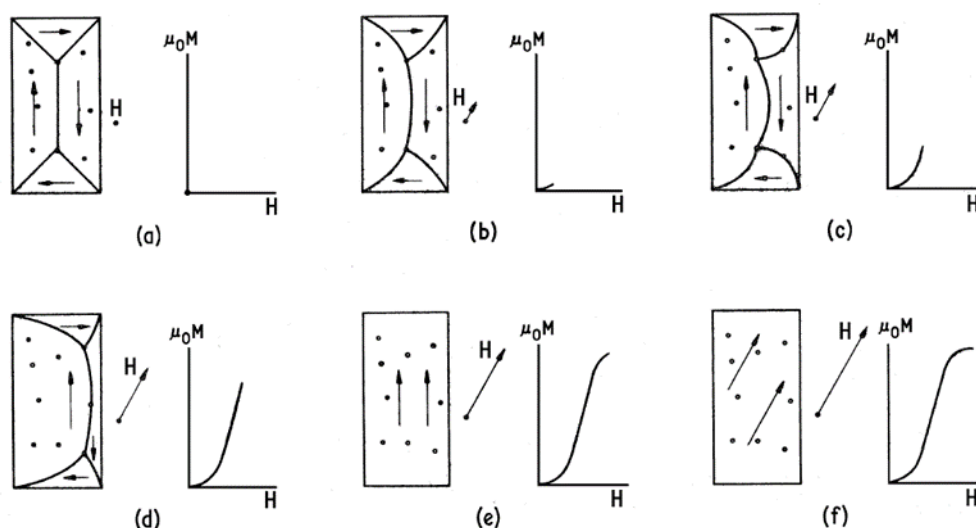
Σε ένα φερρίτη τα ιόντα μετάλλων διαχωρίζονται από τα ιόντα οξυγόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ιόντα στο υποπλέγμα A (τετραεδρικές θέσεις) να είναι προσανατολισμένα αντιπαράλληλα με εκείνα στο υποπλέγμα B (οκταεδρικές θέσεις). Εάν αυτά τα υποπλέγματα ήταν πανομοιότυπα, η μαγνήτιση θα ήταν μηδενική παρά την ευθυγράμμιση και ο φερρίτης θα χαρακτηριζόταν ως αντιφερρομαγνητικός. Στην πλειονότητα των φερριτών τα δύο υποπλέγματα διαφέρουν ως προς τον αριθμό και τον τύπο των ιόντων, έτσι ώστε να υπάρχει μια προκύπτουσα μαγνήτιση. Τέτοια υλικά ταξινομούνται ως σιδηρομαγνητικά. Για παράδειγμα, στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι στο γενικό μόριο σπινέλιου MeFe_2O_4 , ένα μεταλλικό ιόν καταλαμβάνει μια θέση A, ενώ δύο καταλαμβάνουν θέσεις B. Έτσι στην περίπτωση του MeFe_2O_4 όπου και τα δύο μεταλλικά ιόντα έχουν 5 μη αντισταθμισμένα σπιν η καθαρή μαγνήτιση είναι 5 σπιν ανά μόριο. Αυτό συγκρίνεται με μια καθαρή ροπή 2:2 σπιν ανά άτομο στην περίπτωση του μεταλλικού σιδήρου. Για το λόγο αυτό ένας φερρίτης έχει πολύ χαμηλότερη μαγνήτιση κορεσμού από έναν μεταλλικό σίδηρο. Ωστόσο, παρά τη μερική ακύρωση των ροπών σπιν, οι φερρίτες διαθέτουν επαρκή μαγνήτιση κορεσμού που τους καθιστά χρήσιμους σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών [23].



Σχήμα 2.4 Μετάβαση της κατεύθυνσης του σπιν σε τοίχωμα Bloch 180° [19]

Ο κρυσταλλίτης χωρίζεται συνήθως σε έναν αριθμό περιοχών με διάφορους προσανατολισμούς σπιν π.χ. 180° και 90° , έτσι ώστε να έχει πολύ μικρό εξωτερικό πεδίο που προκύπτει από την εσωτερική μαγνήτιση. Τα όρια των περιοχών (τοιχώματα Bloch)

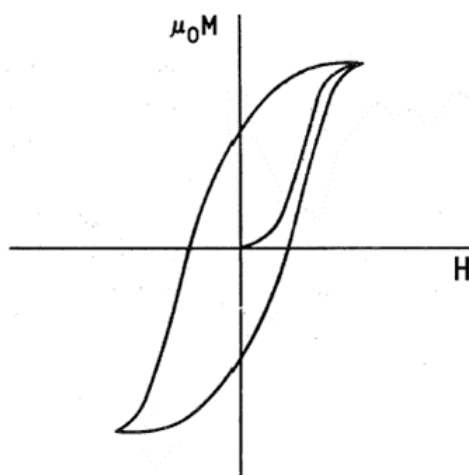
αποτελούνται από περιοχές πάχους πολλών μοναδιαίων κυψελίδων, στις οποίες υπάρχει σταδιακή μετάβαση του προσανατολισμού του σπιν (σχήμα 2.4). Αυτή η μετάβαση πρέπει να δρα ενάντια στις ανισοτροπικές δυνάμεις και στις δυνάμεις που τείνουν να συγκρατούν τα σπιν σε ευθυγράμμιση. Επομένως, αυτό συνεπάγεται αποθήκευση ενέργειας. Ο αριθμός και η διάταξη των περιοχών σε έναν κρυσταλλίτη είναι τέτοια ώστε το άθροισμα των ενεργειών, κυρίως της ενέργειας του τοιχώματος και της ενέργειας του απομαγνητιζόντος πεδίου, να είναι όσο το δυνατόν ελάχιστη.



Σχήμα 2.5 Απλουστευμένη αναπαράσταση του ρόλου που διαδραματίζουν τα τοιχώματα των περιοχών στη διαδικασία της μαγνήτισης [23]

Στην πράξη είναι ευνοϊκό, όσο αφορά την ενέργεια, για τα τοιχώματα του τομέα να περνούν μέσα από ορισμένες ατέλειες, όπως κενά, καταπονημένες περιοχές, μη μαγνητικά εγκλείσματα κλπ. (Σχήμα 2.5). Ελλείψει εφαρμοζόμενου πεδίου τα τοιχώματα είναι ευθύγραμμα και μπορεί να καταλαμβάνουν τις θέσεις που φαίνονται στο (a). Οι τελείες αντιπροσωπεύουν ατέλειες. Εάν εφαρμοστεί ένα μικρό πεδίο προς την κατεύθυνση που φαίνεται στο (b), τα τοιχώματα παραμένουν καθηλωμένα από τις ατέλειες αλλά διογκώνονται όπως θα έκανε μια μεμβράνη υπό πίεση. Οι κινήσεις αυτές είναι προς δύο αντίθετες κατευθύνσεις. Η μεταβολή της μαγνήτισης περιορίζεται από την ακαμψία των τοιχωμάτων. Υπό αυτές τις συνθήκες διαγράφεται το κάτω μέρος της καμπύλης μαγνήτισης. Καθώς το πεδίο αυξάνεται τα τοιχώματα κινούνται με μια σειρά από άλματα (c, d, e). Οι κινήσεις αυτές είναι μη αναστρέψιμες, δηλαδή αν απαιτείται μια ορισμένη αλλαγή του πεδίου για να παραχθεί ένα άλμα, η αντιστροφή αυτής της αλλαγής, δηλαδή η αποκατάσταση του πεδίου, δεν θα προκαλέσει γενικά το άλμα του τοιχώματος προς τα πίσω. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας η καμπύλη μαγνήτισης ανεβαίνει απότομα. Τέλος, όταν όλα τα τοιχώματα έχουν εξασθενήσει, περαιτέρω αυξήσεις της έντασης του πεδίου προκαλούν την αντιστρεπτή περιστροφή του διανύσματος μαγνήτισης προς τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, έως ότου προσεγγιστεί η πλήρης ευθυγράμμιση (f). Τότε δεν είναι δυνατή η περαιτέρω αύξηση της μαγνήτισης και το υλικό λέγεται κορεσμένο [19].

Εάν το μαγνητικό πεδίο, αφού φθάσει στη μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο Σχήμα 2.5(f), εναλλάσσεται κυκλικά γύρω από το μηδέν με το ίδιο μέγιστο πλάτος, η αρχική καμπύλη μαγνήτισης δεν επαναλαμβάνεται. Λόγω των μη αναστρέψιμων μετακινήσεων των τοιχωμάτων η μαγνήτιση θα υστερεί πάντοτε έναντι του πεδίου και θα διαγράφεται ένας ανοικτός βρόχος. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μαγνητική υστέρηση και ο βρόχος ονομάζεται βρόχος υστέρησης (Σχήμα 2.6) [23].



Σχήμα 2.6 Βρόχος υστέρησης [23]

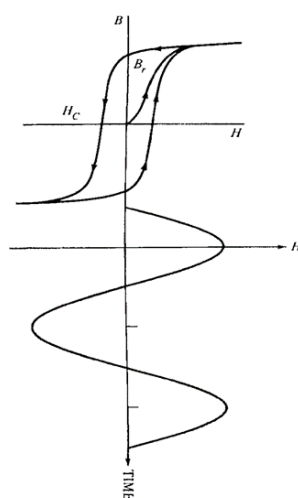
Η ευκολία με την οποία μπορεί να μεταβληθεί η μαγνήτιση από ένα δεδομένο μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από την ανισοτροπία, δηλαδή τη μαγνητική δυσκαμψία και από το εάν η μεταβολή οφείλεται σε αντιστρεπτές ή μη αντιστρεπτές κινήσεις ή περιστροφές των τοιχωμάτων. Μια χαμηλή ανισοτροπία οδηγεί σε μεγάλη επαγόμενη μαγνήτιση για δεδομένο μαγνητικό πεδίο και επομένως σε μεγάλη τιμή της ευαισθησίας και της διαπερατότητας [19].

2.4 Ηλεκτρικές ιδιότητες φερριτών

Βρόχος υστέρησης μπορεί να παραχθεί εφαρμόζοντας ένα πεδίο συνεχούς ρεύματος (DC) προς μία κατεύθυνση, έως ότου το υλικό φτάσει σε κορεσμό, έπειτα μειώνοντας αργά το πεδίο στο μηδέν, αντιστρέφοντας το πεδίο και επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία. Ο βρόχος που λαμβάνουμε ονομάζεται βρόχος υστέρησης συνεχούς ρεύματος. Οι βρόχοι συνεχούς ρεύματος είναι σημαντικοί για τη μελέτη των βασικών ιδιοτήτων ενός υλικού και χρησιμοποιούνται επίσης στο σχεδιασμό υλικών μόνιμου μαγνήτη, καθώς η λειτουργία του είναι ισοδύναμη με ένα πεδίο συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, η χρήση των μαγνητικών υλικών γίνεται κυρίως υπό συνθήκες εναλλασσόμενου ρεύματος, δηλαδή όταν το πεδίο μαγνήτισης παράγεται από ρεύμα που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς ή σύμφωνα με κάποια άλλη κυματομορφή (τετραγωνική, τριγωνική κλπ.).

Καθώς το ρεύμα διανύει έναν ημιτονοειδή κύκλο, η μαγνήτιση θα διανύσει έναν κύκλο βρόχου υστέρησης. Αυτό φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.7. Αυτός ο τύπος βρόχου

ονομάζεται βρόχος εναλλασσόμενου ρεύματος και σε χαμηλές συχνότητες προσεγγίζει τον βρόχο συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, ορισμένες διαφορές παρατηρούνται, καθώς αυξάνεται η συχνότητα του ρεύματος διέγερσης και επομένως οι συχνότητες διέλευσης του βρόχου. Οι απώλειες αυξάνουν το πλάτος του βρόχου. Στην πραγματικότητα, το εμβαδόν που περιέχεται στον βρόχο υστέρησης είναι ενδεικτικό των απωλειών του υλικού κατά τη διαδικασία της κυκλικής μαγνήτισης. Οι απώλειες που οφείλονται στις μη αναστρέψιμες αλλαγές του τομέα παράγουν τη μαγνητική υστέρηση που απελευθερώνεται ως θερμότητα και είναι γνωστή ως απώλεια υστέρησης. Αυτός ο τύπος απωλειών αφορά και τους βρόχους εναλλασσόμενου ρεύματος, αλλά και τους βρόχους συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, οι εσωτερικοί βρόχοι ρεύματος που ονομάζονται δινορρεύματα παράγουν απώλειες που διευρύνουν τους βρόχους υστέρησης. Τα δινορρεύματα και οι απώλειες τους λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν για την επιλογή ενός μαγνητικού υλικού.



Σχήμα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του ρεύματος ημιτονοειδούς κύματος που οδηγεί τη μαγνήτιση μέσω ενός βρόχου υστέρησης ανά κύκλο ημιτονοειδούς κύματος [20].

2.4.1 Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν ένα υλικό μαγνητίζεται κυκλικά, για παράδειγμα με ημιτονοειδές ρεύμα, θα επάγεται στο υλικό μια τάση που έχει αντίθετη κατεύθυνση από την τάση που παράγει το ρεύμα μαγνήτισης και το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη τάση θα δημιουργήσει κυκλικά ρεύματα στο υλικό, τα οποία παράγουν μαγνητικά πεδία αντίθετα από το αρχικό μαγνητικό πεδίο. Εάν ένα κυλινδρικό δείγμα μαγνητιστεί από ένα σωληνοειδές τύλιγμα, θα δημιουργηθούν δινορρεύματα ως ομόκεντροι κύκλοι γύρω από τον κεντρικό άξονα του κυλίνδρου. Δεδομένου ότι κάθε ένας από αυτούς τους βρόχους ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, τα πεδία δινορρευμάτων θα είναι μεγαλύτερα στο κέντρο της κυκλικής διατομής, όπου βρίσκεται ο μεγαλύτερος αριθμός των βρόχων ρεύματος που παράγουν πεδία και περιβάλλουν την περιοχή αυτή. Τα πεδία δινορρευμάτων στο εξωτερικό του κυλίνδρου θα είναι χαμηλότερα έχοντας τους λιγότερους βρόχους ρεύματος που τον περιβάλλουν [20].

Η επαγόμενη τάση είναι συνάρτηση του dB/dt, ή του ρυθμού μεταβολής της επαγωγής, B, με το χρόνο. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα f, τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγόμενη τάση και τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες δινορρευμάτων. Οι απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται σε όλους τους τύπους υλικών, αλλά είναι μεγαλύτερες στα μαγνητικά υλικά λόγω της υψηλότερης διαπερατότητάς τους και επομένως της μεγαλύτερης μεταβολής της επαγωγής. Ένα παράδειγμα απωλειών δινορρευμάτων σε μη μαγνητικό υλικό εμφανίζεται στο χάλκινο τύλιγμα μαγνητικών συσκευών. Το φαινόμενο του δινορρευματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ειδική αντίσταση του υλικού που επηρεάζει το βρόχο δινορρευματος. Δεδομένου ότι $I = E/R$, για την ίδια επαγόμενη τάση, μια υψηλή ειδική αντίσταση θα μειώσει τα δινορρεύματα και συνεπώς το αντίθετο πεδίο. Δεδομένου ότι οι φερρίτες έχουν υψηλές αντιστάσεις, τα δινορρεύματα δεν αποτελούν πρόβλημα έως ότου εμφανιστούν υψηλότερες συχνότητες [20].

Σε χαμηλές ή μεσαίες συχνότητες, η μείωση του πεδίου μαγνήτισης μέσω δινορρευμάτων είναι χαμηλή εάν το μέγεθος του δείγματος δεν είναι πολύ μεγάλο. Στο βάθος διείσδυσης εισέρχεται κι ο παράγοντας χρόνου και έτσι σε χαμηλές συχνότητες υπάρχει επαρκής χρόνος για να διαλυθούν τα δινορρεύματα και να φτάσει το εφαρμοζόμενο πεδίο στο κέντρο του δείγματος. Σε υψηλότερες συχνότητες, δεν υπάρχει επαρκής χρόνος για την αποσύνθεση των δινορρευμάτων και έτσι τα αντίστροφα πεδία θα γίνουν αισθητά σε αποστάσεις μακριά από το κέντρο ή πιο κοντά στην επιφάνεια. Τελικά, με περαιτέρω αύξηση της συχνότητας, το εφαρμοζόμενο πεδίο διεισδύει μόνο σε μικρό βάθος. Τα δινορρεύματα θωρακίζουν το εσωτερικό του δείγματος από το εφαρμοζόμενο πεδίο. Στα μέταλλα όπου η ειδική αντίσταση είναι χαμηλή, για να μειωθεί η επίδραση των δινορρευμάτων, η λωρίδα από την οποία κατασκευάζεται το εξάρτημα είναι λεπτόρρευση και μονωμένη από τα γειτονικά στρώματα [24].

Το βάθος διείσδυσης του εφαρμοζόμενου πεδίου μπορεί να εκφραστεί με βάση τη συχνότητα και άλλες παραμέτρους. Ένας όρος που χρησιμοποιείται συχνά ονομάζεται «επιδερμικό βάθος» (skin depth) και ορίζεται ως το σημείο στο οποίο το εφαρμοζόμενο πεδίο μειώνεται στο $1/e$ του αντίστοιχου στην επιφάνεια [25]:

$$s = 1/2\pi\sqrt{\mu f/\rho} \quad [2.1],$$

όπου s = επιδερμικό βάθος(εκατοστά), ρ = ειδική αντίσταση (Ω / εκατοστά), μ = διαπερατότητα, f = συχνότητα (Hz).

Σε περίπου τρία «βάθη δέρματος» και κάτω, το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι τόσο μικρό που καθιστά το υλικό μη χρήσιμο. Η ενέργεια για τη δημιουργία των δινορρευμάτων σε αυτή την περιοχή χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του δείγματος. Αυτή είναι η βάση της επαγωγικής θέρμανσης και της τήξης. Επιπλέον, εμφανίζεται μια καθυστέρηση φάσης μεταξύ της ροής της επιφάνειας και αυτής στο κέντρο. Είναι πιθανό η μαγνήτιση να έχει μια κατεύθυνση στην επιφάνεια και την αντίθετη κατεύθυνση στο εσωτερικό. Η γωνία

υστέρησης, ε , μεταξύ της μαγνήτισης στην επιφάνεια και αυτής σε ένα βάθος, x , υπολογίζεται ως [25]:

$$\varepsilon = 1/2\pi\sqrt{\mu f/\rho} x \quad [2.2],$$

όπου x = βάθος(εκατοστά).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση. Η ειδική αντίσταση ενός υλικού ορίζεται ως εξής [9]:

$$R = \rho l/A \quad [2.3]$$

όπου: R = Αντίσταση σε Ω , l μήκος του δείγματος (εκατοστά), A = εμβαδόν του δείγματος (τετραγωνικά εκατοστά), ρ = ειδική αντίσταση (Ω / εκατοστά).

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές ειδικής αντίστασης διαφόρων φερριτών μαζί με εκείνες ορισμένων μεταλλικών σιδηρομαγνητικών υλικών [24]

Υλικό	Ειδική Αντίσταση (Ω / εκατοστά)
Zn Φερρίτης	10^2
Cu Φερρίτης	10^5
Fe Φερρίτης	4×10^3
Mn Φερρίτης	10^4
NiZn Φερρίτης	10^6
Mg Φερρίτης	10^7
Co Φερρίτης	10^2 - 10^3
MnZn Φερρίτης	10^2 - 10^3
Σίδηρος	9.6×10^{-6}
Σιδηροπυρίτης	50×10^{-6}
Σιδηρονικέλιο	45×10^{-6}

Τώρα, η σχέση μεταξύ των απωλειών δινορρευμάτων και της ειδικής αντίστασης δίνεται από [25]:

$$P_e = (\text{σταθερά}) \cdot B_m^2 f^2 d^2 / \rho \quad [2.4]$$

όπου: (σταθερά) = ένας παράγοντας εξαρτώμενος από την γεωμετρία του σχήματος, B_m = μέγιστη επαγωγή (Gauss), f = συχνότητα (Hz), d = μικρότερη διάσταση εγκάρσια στη ροή

Έτσι, για να διατηρηθούν σταθερές οι απώλειες δινορρευμάτων καθώς αυξάνεται η συχνότητα, η ειδική αντίσταση του υλικού που επιλέγεται πρέπει να αυξάνεται με το τετράγωνο της συχνότητας. Αυτή η σχέση ενισχύει την εξίσωση που παρουσιάσαμε προηγουμένως σχετικά με την εξάρτηση του βάθους δέρματος από τη συχνότητα [24].

2.4.2 Αρχική διαπερατότητα

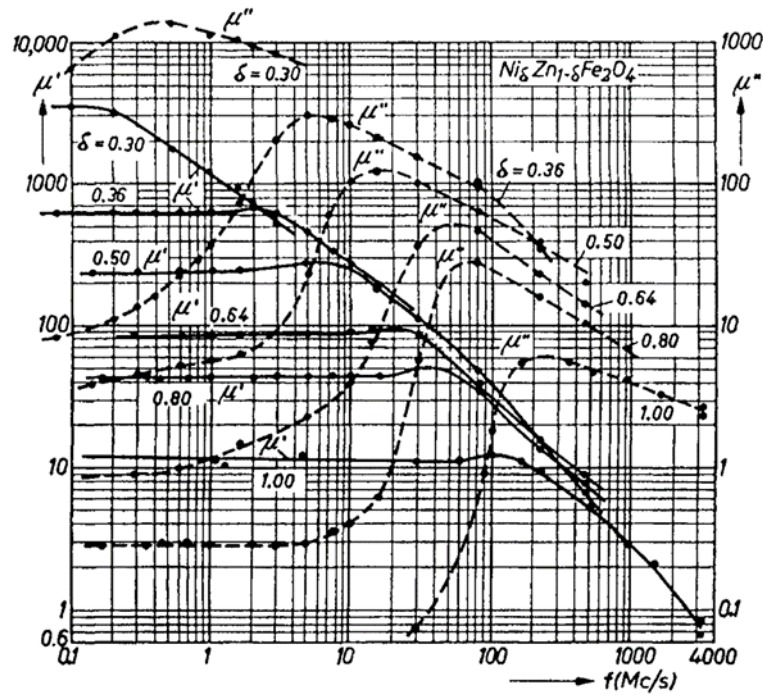
Μια ειδική περίπτωση μικρού βρόχου, στον οποίο το υλικό δεν είναι μαγνητικά κορεσμένο, είναι αυτός στον οποίο το πεδίο H είναι εξαιρετικά μικρό. Αυτός είναι ο τύπος βρόχου που συναντάται στις τηλεπικοινωνίες, όπως η τηλεφωνική ή η ραδιοφωνική μετάδοση. Υπό αυτές τις συνθήκες, το σύστημα λέγεται ότι βρίσκεται στην περιοχή Rayleigh και η διαπερατότητα υπό αυτές τις συνθήκες ονομάζεται αρχική διαπερατότητα [26].

$$\mu_0 = \lim_{B \rightarrow 0} \left(\frac{B}{H} \right) \quad [2.5]$$

Στο μετρικό σύστημα, ο όρος μ_0 χρησιμοποιείται ως σταθερά και ορίζεται ως η διαπερατότητα του κενού. Στην περίπτωση αυτή, ο όρος μ_i , χρησιμοποιείται συχνά για την αρχική διαπερατότητα. Σε υψηλές συχνότητες, η διαπερατότητα διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες μ' και μ'' . Η πρώτη μ' αντιπροσωπεύει τη διαπερατότητα, κατά την οποία η μαγνήτιση είναι σε φάση με το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και η δεύτερη μ'' τη φανταστική διαπερατότητα, κατά την οποία η μαγνήτιση είναι εκτός φάσης με το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Με τον όρο «σε φάση», εννοούμε ότι τα μέγιστα και τα ελάχιστα του μαγνητικού πεδίου, H , και εκείνο της επαγωγής, B , συμπίπτουν και με τον όρο «εκτός φάσης», εννοούμε ότι τα μέγιστα και τα ελάχιστα είναι μετατοπισμένα κατά 90° . Συνεπώς [25]:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad [2.6]$$

Οι δύο διαπερατότητες συχνά απεικονίζονται στο ίδιο γράφημα ως συνάρτηση της συχνότητας. Το γράφημα αυτό, είναι γνωστό ως διασπορά διαπερατότητας ή φάσμα διαπερατότητας (Σχήμα 2.8). Παρατηρείται ότι η πραγματική συνιστώσα της διαπερατότητας, μ' , είναι αρκετά σταθερή με τη συχνότητα και αυξάνεται αργά, ενώ στη συνέχεια μειώνεται με πιο γρήγορο ρυθμό. Η φανταστική συνιστώσα, μ'' από την άλλη πλευρά, αρχικά αυξάνεται αργά και στη συνέχεια αυξάνεται αρκετά απότομα, όπου η πραγματική συνιστώσα, μ' πέφτει απότομα. Φαίνεται να φτάνει στο μέγιστο περίπου εκεί όπου η πραγματική διαπερατότητα έχει πέσει στο μισό περίπου της αρχικής της τιμής. Όπως υποδηλώνει ο ορισμός της μιγαδικής διαπερατότητας, οι καμπύλες αυτές σχετίζονται υπό την έννοια ότι οι αυξημένες απώλειες λόγω της αύξησης της συχνότητας έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας. Νωρίτερα, συσχετίστηκε το γεγονός αυτό με τις αυξημένες απώλειες δινορρευμάτων [24].



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα φάσματος διαπερατότητας ενός φερρίτη νικελίου που δείχνει την πορεία συχνότητας της πραγματικής και της φανταστικής διαπερατότητας [25].

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 2.9, υπάρχει ένας άλλος τύπος απωλειών που είναι σημαντικός και μπορεί να εμφανιστεί σε ορισμένες συχνότητες. Η απώλεια αυτή αποδίδεται σε ένα μαγνητικό φαινόμενο που ονομάζεται σιδηρομαγνητικός συντονισμός ή, μιλώντας για φερρίτες, φερρομαγνητικός συντονισμός. Αυτός ο παράγοντας περιορίζει τη συχνότητα στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μαγνητικό υλικό. Παρατηρείται, επίσης, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα του υλικού, τόσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα εμφάνισης του φερρομαγνητικού συντονισμού.

Ο λόγος του φανταστικού μέρους που αντιπροσωπεύει τις απώλειες στο υλικό προς το πραγματικό μέρος της διαπερατότητας αποτελεί μέτρο σύγκρισης για την αποτελεσματικότητα του μαγνητικού συστήματος. Ονομάζεται συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών [25]:

$$\tan\delta = \mu''/\mu' \quad [2.7]$$

Ακόμη, με την κανονικοποίηση του συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών ανά μονάδα διαπερατότητας, μπορούμε να εξάγουμε μια υλική ιδιότητα που περιγράφει τα χαρακτηριστικά απωλειών ανά μονάδα διαπερατότητας. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται συντελεστής απωλειών [25]:

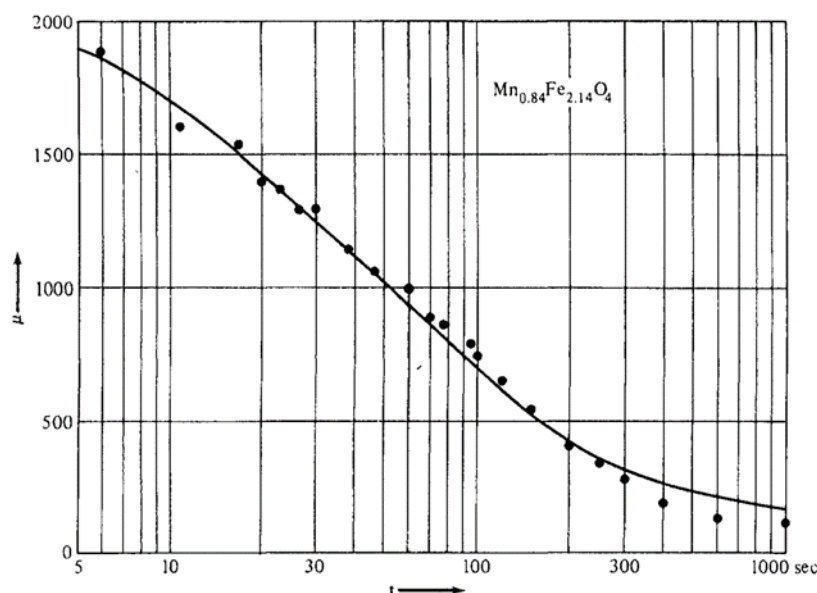
$$LF = \tan\delta/\mu \quad [2.8]$$

2.4.3 Αποσυντονισμός

Ένα μοναδικό μαγνητικό χαρακτηριστικό των φερριτών είναι το φαινόμενο που ονομάζεται «αποσυντονισμός» (disaccommodation). Σε αυτόν τον τύπο αστάθειας, η διαπερατότητα μειώνεται με το χρόνο αμέσως μετά την απομαγνήτιση. Αυτή η απομαγνήτιση μπορεί να επιτευχθεί με θέρμανση πάνω από το σημείο Curie ή μπορεί να γίνει με την εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος μειούμενου πλάτους. Ένας παράγοντας χαρακτηριστικός του υλικού που ονομάζεται παράγοντας αποσυντονισμού (DF) υπολογίζεται ως [27]:

$$DF = (\mu_1 - \mu_2) / (\mu_1^2 \log \frac{t_2}{t_1}) \quad [2.9]$$

Συνεπώς, αυτός ο παράγοντας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της πτώσης της διαπερατότητας σε μία χρονική περίοδο.

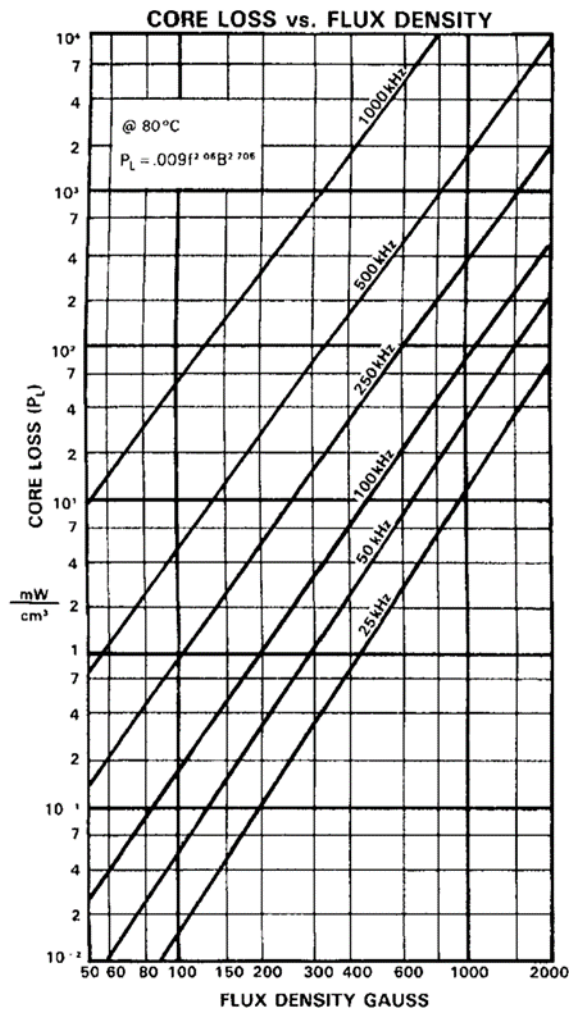


Σχήμα 2.9 Αποσυντονισμός ή χρονική μείωση της διαπερατότητας σε φερρίτη μαγγανίου [28].

2.4.4 Απώλειες πυρήνα

Παρόλο που η χρήση μαγνητικών υλικών στην περιοχή Rayleigh ήταν η κύρια χρήση των φερριτών σε παλαιότερες περιόδους, σήμερα ένα πλήθος φερριτών χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Υπό αυτές τις συνθήκες των εφαρμογών ισχύος, που περιλαμβάνουν υψηλά επίπεδα κίνησης, ιδιότητες όπως ο συντελεστής απωλειών και η αρχική διαπερατότητα δεν είναι πολύ χρήσιμα κριτήρια για την ορθή επιλογή φερριτών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αυτό που απαιτείται είναι χαμηλές απώλειες στον πυρήνα σε υψηλά επίπεδα επαγωγής. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες πυρήνα. Για τα μέταλλα, οι μονάδες για αυτές τις απώλειες είναι τα βατ ανά κιλά (W/Kg). Για τους φερρίτες, οι μονάδες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι mW/cm³ και συχνά μετρώνται σε

θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία δωματίου (συνήθως στη θερμοκρασία της προβλεπόμενης χρήσης) [24]. Παραδείγματα καμπυλών απωλειών πυρήνα για ορισμένους φερρίτες δίνονται στο Σχήμα 2.10:

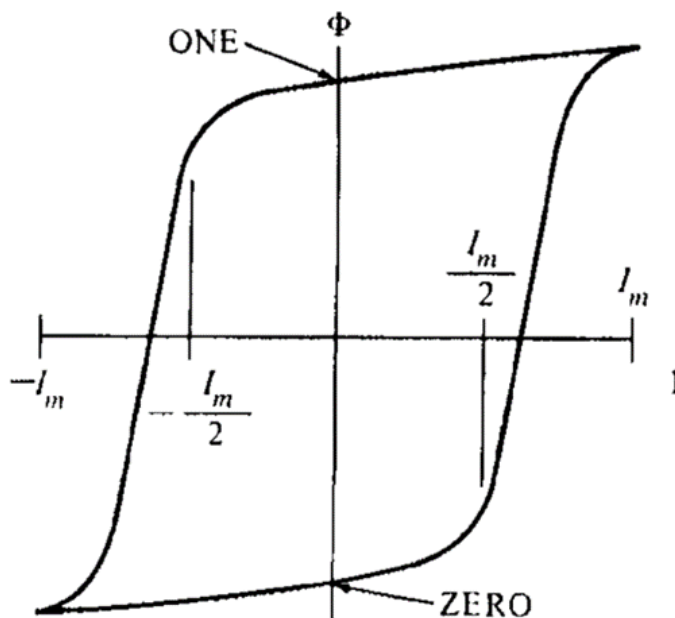


Σχήμα 2.10 Καμπύλες απώλειας πυρήνα ενός φερρίτη ισχύος ψευδαργύρου MnZn ως συνάρτηση της συχνότητας [29].

2.4.5 Λογικές και αποθηκευτικές ιδιότητες

Αν και η χρήση τους στην αποθήκευση δεδομένων έχει σχεδόν εξαφανιστεί λόγω των ημιαγωγών, τα πρώτα στοιχεία των ψηφιακών μνημών μεγάλης κλίμακας ήταν πυρήνες φερρίτη και συγκρικριμένα ενός ειδικού τύπου φερρίτη που ονομαζόταν φερρίτης τετραγωνικού βρόχου. Ο βρόχος υστέρησης ενός τέτοιου φερρίτη φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Αυτός ο τύπος φερρίτη εμφανίζει δύο καταστάσεις μαγνητισμού, η μία στην οποία ο πυρήνας μαγνητίζεται στο ανώτερο επίπεδο κορεσμού και η άλλη στο κατώτερο. Μπορεί να διατυπωθεί η χρήση αυτών των καταστάσεων ως I και O στην ψηφιακή λογική. Ο πυρήνας διεγείρεται σε οποιαδήποτε από τις δύο καταστάσεις με κατάλληλο παλμό. Στη συνέχεια, επιλεγμένοι πυρήνες μπορούν να παλμοδοτηθούν προς την αντίστροφη

κατεύθυνση για να «ρυθμιστούν» στη συνέχεια στο I. Οι επιλεγμένοι πυρήνες μπορούν να διαβαστούν με επαναφορά όλων τους πίσω στο 0. Οι πυρήνες που έχουν ρυθμιστεί εμφανίζουν έτσι μια αλλαγή ροής, η οποία δημιουργεί τάση. Με αυτόν τον τρόπο, οι πυρήνες λειτουργούν ως «πυρήνες μνήμης» [24].



Σχήμα 2.11 Βρόχος υστέρησης ενός φερρίτη τετραγωνικού βρόχου. Το ανώτερο σημείο επαναφοράς αντιπροσωπεύει ένα λογικό «1» σε δυαδικό συμβολισμό, ενώ το κατώτερο σημείο επαναφοράς ένα «0». [30]

Ακόμη, η αποθήκευση πληροφορίας μπορεί να επιτευχθεί πέραν από τον συγκριμένο τύπο φερρίτη, με την κατάλληλη χρήση μικρών περιοχών συμβατικών τύπου φερρίτη τοποθετημένες σε μια λεπτή πλαστική ταινία. Με την επιλογή του κατάλληλου υλικού και σχήματος τα σωματίδια μπορούν να αποθηκεύσουν λογικά bits πληροφορίας. Το υλικό πρέπει να μπορεί να μαγνητιστεί σε μια προσωρινά σταθερή μαγνητική κατάσταση (0 ή 1), οπότε πρέπει να είναι σχετικά σκληρό ή υλικό μόνιμου μαγνήτη, αλλά όχι τόσο ώστε να απαιτούνται πολύ υψηλά πεδία για την απομαγνήτιση ή την ανάγνωσή του. Λαμβάνεται υπόψιν, επίσης, η ανισοτροπία του σχήματος για την αποτροπή της απομαγνήτισης και την αύξηση της καταναγκαστικής δύναμης. Όσο μακρύτερο είναι το σωματίδιο σε σχέση με τη διατομή, τόσο περισσότερο το σωματίδιο προσεγγίζει τοροειδές.

2.5 Γενικές κατηγορίες εφαρμογών φερριτών

Οι εφαρμογές, στις οποίες χρησιμοποιούνται οι φερρίτες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Πρώτον, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την αγορά, στην οποία προορίζονται:

- Καταναλωτές - ψυχαγωγία

- Ηλεκτρικές συσκευές
- Αυτοκίνητο
- Τηλεπικοινωνίες - εξαρτήματα κυκλωμάτων, τροφοδοτικά
- Αεροσκάφη, συσκευές μικροκυμάτων, κεφαλές εγγραφής

Το κόστος είναι χαμηλότερο για την πρώτη κατηγορία και διαδοχικά υψηλότερο για τις υπόλοιπες. Μια άλλη μορφή κατηγοριοποίησης είναι η κατηγοριοποίηση με βάση τη λειτουργία:

- Πολλαπλασιαστές τάσης και ρεύματος-Μετασχηματιστές
- Προσαρμογή σύνθετης αντίστασης
- Πηνίο σε κύκλωμα LC
- Φίλτρο για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συχνοτήτων - Μετασχηματιστής ευρείας ζώνης, φίλτρο καναλιού
- Πηνίο εξόδου, απομάκρυνση της συνιστώσας AC από το DC
- Μαγνητική κεφαλή, εγγραφή ή ανάγνωση δεδομένων σε ταινία ή δίσκο
- Συσκευές μικροκυμάτων
- Γραμμές καθυστέρησης

Ακόμη ένα άλλο κριτήριο ταξινόμησης των εφαρμογών φερριτών είναι και η συχνότητα:

- Μόνιμοι μαγνήτες συνεχούς ρεύματος και κινητήρες συνεχούς ρεύματος, γεννήτριες και άλλες συσκευές συνεχούς ρεύματος
- Συχνότητες γραμμών με 50-60 Hz.
- Συχνότητες αεροσκαφών-400 Hz.
- Συχνότητες ήχου έως 20.000 Hz.
- Ισχύς υψηλών συχνοτήτων- 25000-100000 Hz.
- Τηλεπικοινωνίες υψηλών συχνοτήτων-100.000 Hz. Μέχρι 100 MHz.
- Μικροκύματα και ραντάρ-1 GHz και πάνω

Γενικά, η συχνότητα που χρησιμοποιείται αποτελεί επίσης ένδειξη του μεγέθους του υλικού. Όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος, ενώ αντίθετα, τα στοιχεία υψηλής συχνότητας τείνουν να είναι μικρότερα [20].

2.6 Φερρίτες και EMI

Οι φερρίτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για την καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και τη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Οι φερρίτες έχουν μοναδικές ιδιότητες που τους καθιστούν ιδανική επιλογή για λύσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, όπως:

- Σύνθετη αντίσταση που εξαρτάται από τη συχνότητα και προκαλεί εξασθένηση (υλικά βελτιστοποιημένα για ζώνες συχνοτήτων)
- Οι φερρίτες απορροφούν την ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, η οποία διαχέεται στο περιβάλλον με την μορφή θερμότητας
- Ποικίλα σχήματα
- Υψηλή διαπερατότητα, η οποία συγκεντρώνει το μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα δημιουργώντας έτσι ένα πυκνό υλικό
- Μεγάλη ειδική αντίσταση, η οποία παρέχει ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των γραμμών και ελαχιστοποιεί τις απώλειες δινορρευσμάτων [31]

2.5.1 Μηχανισμός καταστολής ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών

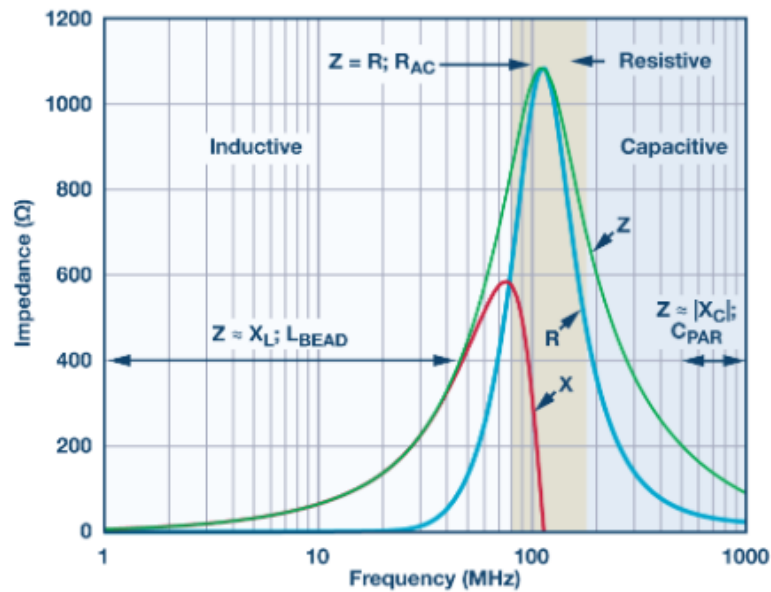
Η πιο σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της καταστολής ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από ένα υλικό είναι η σύνθετη αντίσταση του, Z , η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση του στη ροή ρεύματος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Η σύνθετη αντίσταση ορίζεται ως εξής [24]:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad [2.10],$$

όπου R είναι η ισοδύναμη αντίσταση και X_L είναι η ισοδύναμη αυτεπαγωγή.

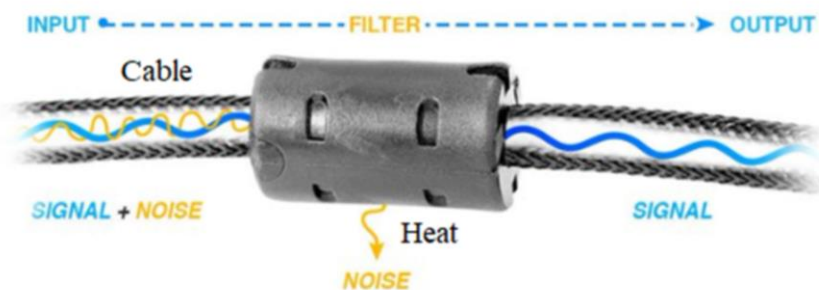
Στις χαμηλές συχνότητες, η αυτεπαγωγή κυριαρχεί στην τιμή της σύνθετης αντίστασης, καθώς η αντίσταση R είναι σχετικά χαμηλή. Σε αυτές τις συχνότητες, παρατηρείται κάποια καταστολή της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής μέσω της επαγωγικής αντίδρασης. Ωστόσο, στη συχνότητα όπου η διαπερατότητα πέφτει απότομα, η αυτεπαγωγή θα μειωθεί επίσης καθώς αυξάνεται η αντίσταση R . Έτσι, η καταστολή στις υψηλότερες συχνότητες επιτυγχάνεται μέσω της «απορρόφησης» των συχνοτήτων αυτών και την εκπομπή θερμότητας. Το ιδανικότερο υλικό για καταστολή σε μια συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων μπορεί να επιλεγεί λαμβάνοντας υπόψιν την χαρακτηριστική κυματομορφή σύνθετης αντίστασης του [8].

Πιο απλά, συσκευές όπως σφικτήρες φερρίτη παρουσιάζουν το χαρακτηριστικό ότι η σύνθετη αντίστασή τους μεταβάλλεται μαζί με τη συχνότητα. Γίνονται ιδιαίτερα ανθεκτικοί στο σχεδιασμένο εύρος συχνοτήτων και εκπέμπουν θορύβους υψηλής συχνότητας με τη μορφή θερμότητας. Κάτω από το σχεδιασμένο εύρος συχνοτήτων, ο σφικτήρας φερρίτη παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά. Πάνω από το σχεδιασμένο εύρος συχνοτήτων, παρουσιάζει χωρητική συμπεριφορά (σχήμα 2.12) [32]. Ο σφικτήρας φερρίτη λειτουργεί σαν ένα χαμηλοπερατό φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση μόνο των επιθυμητών σημάτων χαμηλής συχνότητας από τη γραμμή ισχύος ή το καλώδιο και εξαλείφει τους θορύβους υψηλής συχνότητας στη γραμμή ισχύος ή το καλώδιο.



Σχήμα 2.12: Τυπική χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης συναρτήσει της συχνότητας του σφικτήρα φερρίτη [33]

Οι σφικτήρες φερρίτη τοποθετούνται γύρω από μια γραμμή τροφοδοσίας ή ένα καλώδιο για την καταστολή της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Όταν ρεύματα θορύβου υψηλής συχνότητας εντός του εύρους συχνοτήτων ρέουν μέσω της γραμμής τροφοδοσίας ή του καλωδίου, δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το καλώδιο. Το μαγνητικό πεδίο μαγνητίζει τον πυρήνα φερρίτη. Λόγω της υψηλής διαπερατότητας του φερριτικού υλικού, η ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται μαγνητικά στο σφικτήρα φερρίτη είναι πολύ υψηλή. Συνεπώς, οι φερρίτες διακρίνονται ως προς τρεις περιοχές απόκρισης: επαγωγικοί, ωμικοί και χωρητικοί. Αυτές οι περιοχές μπορούν να προσδιοριστούν εξετάζοντας το διάγραμμα Z, R, X (Σχήμα 2.12), όπου Z είναι η σύνθετη αντίσταση, R είναι η αντίσταση και X είναι η χωρητική αντίδραση. Για να μειωθεί ο θόρυβος υψηλής συχνότητας, ο σφικτήρας πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή που λειτουργεί ως αντίσταση. Όταν δρα ως αντίσταση εμποδίζει τον θόρυβο υψηλής συχνότητας και τον διαχέει ως θερμότητα. Η περιοχή που δρα ως αντίσταση εμφανίζεται μετά τη συχνότητα όπου $X = R$ και μέχρι το σημείο όπου ο φερρίτης δρα ως χωρητικότητα. Αυτό το σημείο εμφανίζεται στη συχνότητα όπου η απόλυτη τιμή της χωρητικής αντίδρασης ($-X$) είναι ισοδύναμη με R [33].



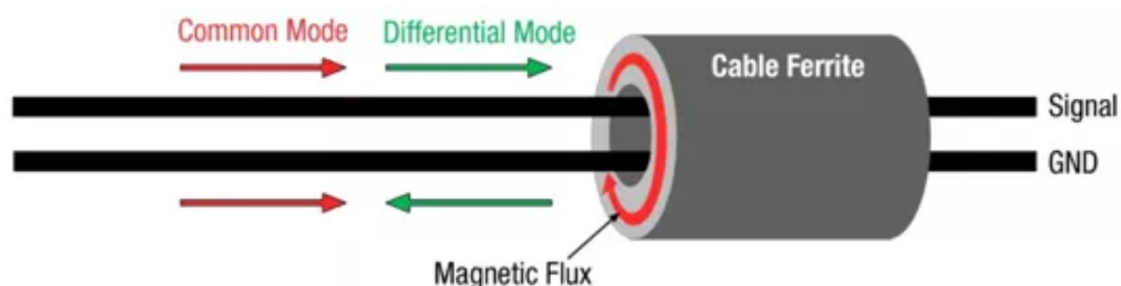
Σχήμα 2.13: Αρχή λειτουργίας σφικτήρα φερρίτη [32]

Επιπλέον, ο σφικτήρας φερρίτη δεν επηρεάζει τα σήματα συνεχούς ρεύματος ή τα σήματα χαμηλής συχνότητας, πράγμα που σημαίνει ότι εμποδίζει τα σήματα θορύβου υψηλής συχνότητας χωρίς να επηρεάζει τα επιθυμητά στοιχεία χαμηλότερης συχνότητας της γραμμής ή του καλωδίου τροφοδοσίας. Αυτή η λειτουργία προστατεύει τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και εξασφαλίζει την αξιόπιστη λειτουργία των προϊόντων [32].

2.5.2 Φίλτρα κοινού και διαφορικού τρόπου

Δεδομένου ότι υπάρχουν δύο τύποι ρευμάτων που προκύπτουν από τις ηλεκτομαγνητικές διαταραχές, υπάρχουν δύο τύποι φίλτρων για την αντιμετώπισή τους. Το φίλτρο κοινού τρόπου χρησιμοποιεί έναν ενιαίο πυρήνα φερρίτη που περικλείει και τους δύο αγωγούς (Σχήμα 2.14). Το επιθυμητό σήμα θα «περάσει» με την ακύρωση των δύο αντίθετων ρευμάτων. Τα ρεύματα ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής παράγουν μαγνητική ροή στον πυρήνα, η οποία λόγω της υψηλότερης συχνότητας εξασθενεί. Το φίλτρο κοινού τρόπου σύζευξης, επιτρέπει την διέλευση ρευμάτων διαφορικού τρόπου και εξασθενεί τα ρεύματα κοινού τρόπου. Μια απλή μέθοδος για να προσδιοριστεί αν ο θόρυβος οφείλεται σε ρεύματα κοινού τρόπου ή διαφορικού τρόπου είναι η τοποθέτηση ενός πυρήνα φερρίτη πάνω από τους δύο αγωγούς. Εάν η παρεμβολή μειωθεί, ο θόρυβος ήταν αποτέλεσμα ρευμάτων κοινού τρόπου. Εάν δεν υπάρχει βελτίωση, η αιτία ήταν ρεύμα διαφορικού τρόπου. Εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται φίλτρο κοινού τρόπου είναι:

- Φιλτράρισμα συνεχών ρευμάτων ισχύος
- Μείωση του θορύβου σε διαφορικές γραμμές υψηλής ταχύτητας



Σχήμα 2.14: Φίλτρα κοινού και διαφορικού τρόπου σύζευξης [34]

Στην περίπτωση του φίλτρου διαφορικού τρόπου, τα ρεύματα που οφείλονται σε διαταραχές δεν εξουδετερώνονται και συνεπώς, κάθε γραμμή πρέπει να προστατεύεται ξεχωριστά. Δεδομένου ότι το ρεύμα όλου του κυκλώματος θα περάσει από αυτό το φίλτρο, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα φίλτρα κοινού τρόπου δεν θα ήταν κατάλληλα, καθώς τα υλικά υψηλότερης διαπερατότητας θα προκαλούσαν κορεσμό του πυρήνα. Αντ' αυτού πρέπει να χρησιμοποιηθεί πυρήνας με χαμηλή αποτελεσματική διαπερατότητα. Τα φίλτρα διαφορικού τρόπου σύζευξης χρησιμοποιούνται σε:

- Φιλτράρισμα ασθενών AC και DC ρευμάτων

- Αφαίρεση θορύβου από σήματα χαμηλής ταχύτητας
- Διαμόρφωση των χρόνων ανόδου των σημάτων υψηλής ταχύτητας [24].

2.6 Χαρακτηριστικά φερριτών της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω κατηγορίες φερριτών, των οποίων η χρήση προορίζεται για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών:

- 75 Material: MnZn φερρίτης υψηλής διαπερατότητας που προορίζεται για μια σειρά ευρυζωνικών εφαρμογών και παλμικών μετασχηματιστών
- 31 Material: MnZn φερρίτης σχεδιασμένος ειδικά για εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από 1 MHz έως 500 MHz
- 44 Material: NiZn φερρίτης που αναπτύχθηκε για να συνδυάζει υψηλή απόδοση καταστολής, από 30 MHz έως 500 MHz, με πολύ υψηλή ειδική αντίσταση συνεχούς ρεύματος
- 61 Material: NiZn φερρίτης υψηλής συχνότητας που αναπτύχθηκε για μια σειρά επαγωγικών εφαρμογών έως 25 MHz. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται επίσης σε εφαρμογές για την καταστολή συχνοτήτων θορύβου άνω των 200 MHz [35]

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες των προαναφερθέντων υλικών [35]

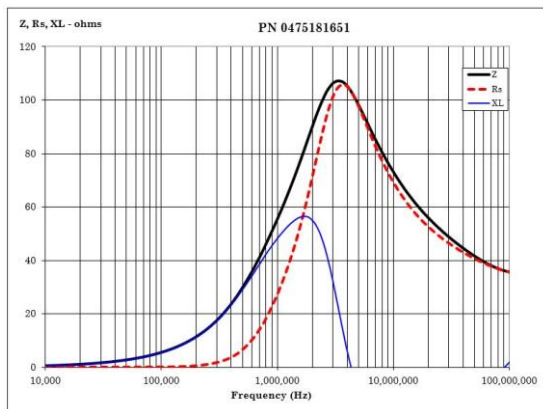
Ιδιότητα	Μονάδα μέτρησης	Σύμβολο	75	31	44	61
Αρχική διαπερατότητα (B < 10 gauss)	-	μ_i	5000	1500	500	125
Πυκνότητα ροής - Ένταση πεδίου	Gauss	B	4800	3600	3000	2500
	Oersted	H	5	5	10	15
Παραμένουσα μαγνήτιση	Gauss	B_r	1000	2600	1100	1000
Απομαγνητότητα	Oersted	H_c	0.11	0.34	0.45	1.2
Συντελεστής απωλειών @ Συχνότητα	10^{-6}	$\text{Tan } \delta / \mu_i$	15	20	150	90
	MHz		0.1	0.1	1.0	10
Ειδική αντίσταση	Ω/cm	ρ	300	3000	1×10^9	1×10^8

Το χαρακτηριστικό που προσδιορίζεται από τους περισσότερους κατασκευαστές φερριτών για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην καταστολή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η σύνθετη αντίσταση. Η σύνθετη αντίσταση μετριέται εύκολα με άμεσα διαθέσιμους

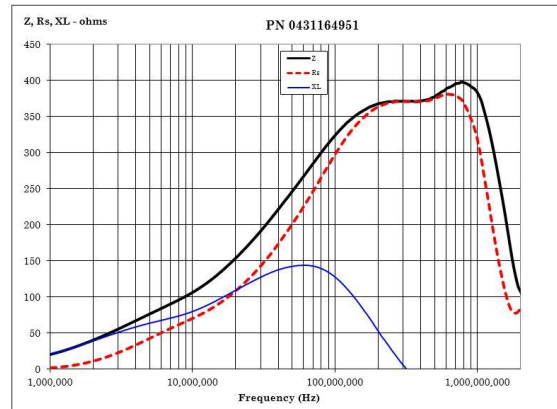
εμπορικούς αναλυτές και άμεσες ψηφιακές ενδείξεις. Ορίζεται ως η κλιμακωτή ποσότητα που αντιπροσωπεύει το μέγεθος του μιγαδικού διανύσματος σύνθετης αντίστασης. Συχνά δεν είναι επαρκής, ιδίως όταν μοντελοποιείται η απόδοση του κυκλώματος του φερρίτη. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές της σύνθετης αντίστασης και η γωνία φάσης για τα στοιχεία ή η διαπερατότητα για το συγκεκριμένο υλικό. Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης δίνεται από τη σχέση [36]:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} \quad [2.11],$$

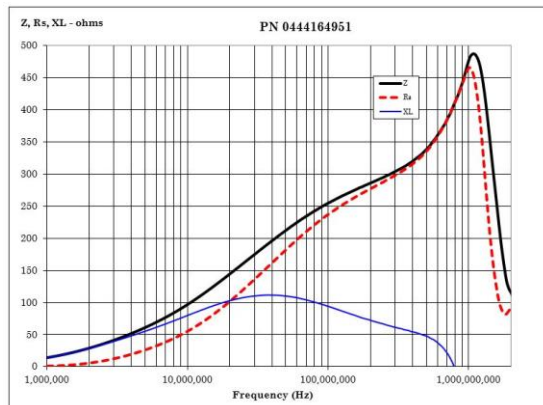
όπου R είναι η ισοδύναμη αντίσταση και L είναι η ισοδύναμη αυτεπαγωγή. Οι δύο τιμές μεταβάλλονται με τη συχνότητα. Ορισμένοι κατασκευαστές, ωστόσο, προσδιορίζουν τη σύνθετη αντίσταση μόνο σε μία συχνότητα, συνήθως 100 MHz, ή σε λίγες συχνότητες [6]. Τα Σχήματα 2.15α-2.15δ [20] παρουσιάζουν τα διαγράμματα σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για τους προαναφερθέντες φερρίτες [37].



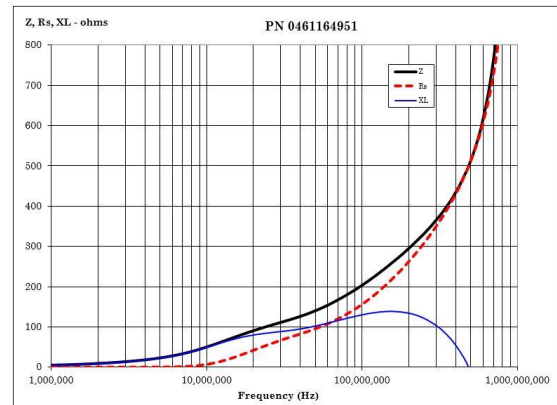
Σχήμα 2.15α: Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 75 Material με πάχος 4.90mm



Σχήμα 2.15β: Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 31 Material με πάχος 4.90mm



Σχήμα 2.15γ: Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 44 Material με πάχος 4.90mm

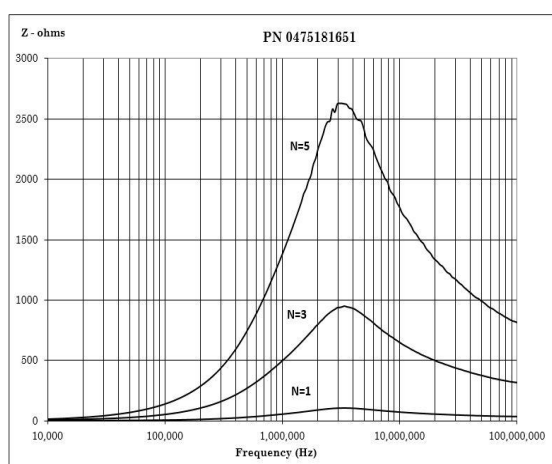


Σχήμα 2.15δ: Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτη τύπου 61 Material με πάχος 4.90mm

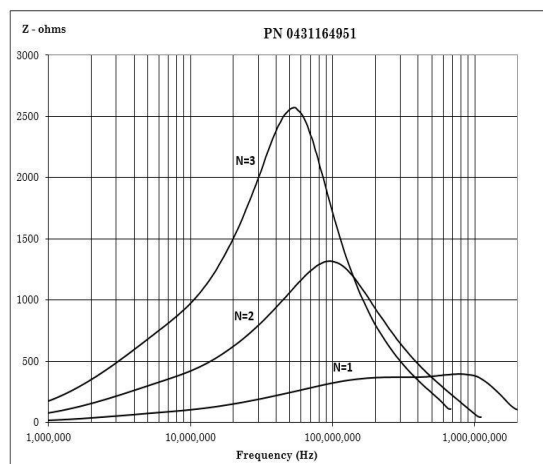
Η σύνθετη αντίσταση επηρεάζεται από:

- Συχνότητα
- DC Bias
- Θερμοκρασία
- Πυκνότητα ροής
- Περιστροφές του καλωδίου

Τοποθετώντας το καλώδιο με ορισμένες σπείρες στο εσωτερικό του φερριτή, η σύνθετη αντίσταση κάποιων φερριτών μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τον αριθμό των σπειρών στο τετράγωνο (Σχήματα 2.16α και 2.16β). Ωστόσο, αυτό αυξάνει τη χωρητικότητα μεταξύ των σπειρών και υποβαθμίζει την εμπέδηση υψηλής συχνότητας του φερριτή. Εάν απαιτείται βελτίωση της σύνθετης αντίστασης του φερριτή κοντά στην περιοχή εφαρμογής των χαμηλότερων συχνοτήτων του, δεν θα πρέπει να παραβλέπεται η δυνατότητα περιστροφής του καλωδίου. Από πρακτική άποψη, σπάνια χρησιμοποιούνται περισσότερες από δύο ή τρεις σπείρες του καλωδίου [36].

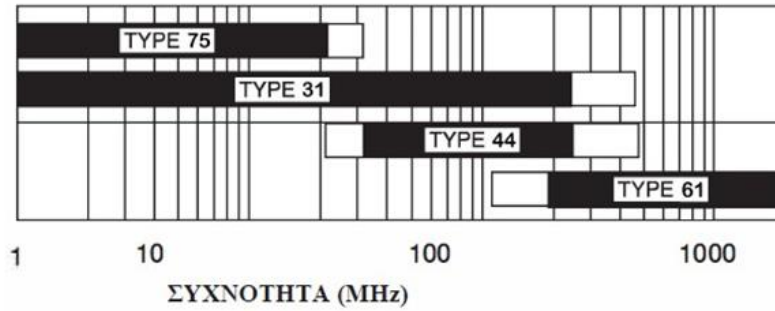


Σχήμα 2.16.α: Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης για διάφορες περιστροφές N του καλωδίου – συχνότητας για φερριτή τύπου 75 Material με πάχος 4.90mm



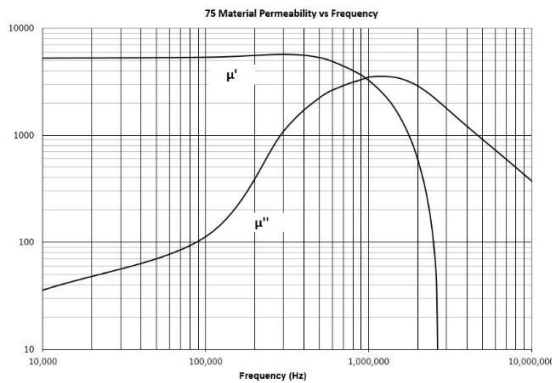
Σχήμα 2.16β: Διάγραμμα Σύνθετης αντίστασης για διάφορες περιστροφές N του καλωδίου – συχνότητας για φερριτή τύπου 31 Material με πάχος 4.90mm

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν χρησιμοποιούνται για καταστολή θορύβου, οι φερριτές χρησιμοποιούνται συνήθως στην περιοχή συχνοτήτων όπου η σύνθετη αντίστασή τους είναι κυρίως ωμική. Το συνιστώμενο εύρος συχνοτήτων για τα διάφορα φερριτικά υλικά όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές καταστολής θορύβου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17 [2]. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι φερριτές διατίθενται για χρήση στο εύρος συχνοτήτων από 1 MHz έως 2 GHz.

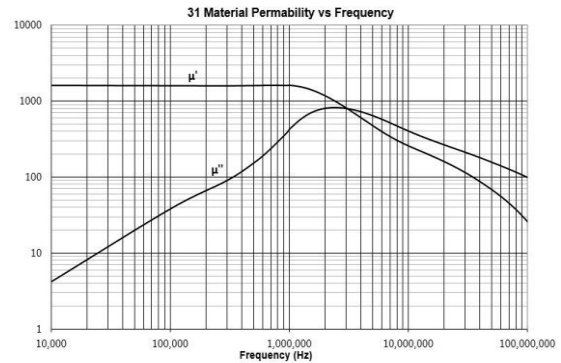


Σχήμα 2.17 Συνιστώμενο εύρος συχνοτήτων διαφόρων υλικών φερριτή όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές καταστολής θορύβου [2].

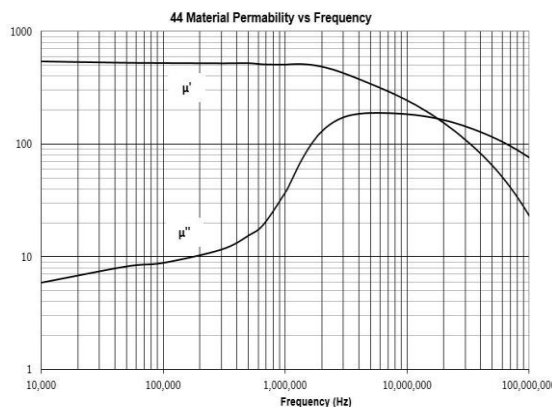
Η συχνότητα του θορύβου είναι ο κύριος παράγοντας για την επιλογή του υλικού. Ορισμένα υλικά, όπως το 75, είναι καταλληλότερα για διαταραχές χαμηλής συχνότητας, ενώ άλλα, όπως το 61, εξυπηρετούν καλύτερα την περιοχή VHF. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαπερατότητα του υλικού που αντιπροσωπεύει τις επαγωγικές (μ') και τις αντιστατικές (μ'') επιδράσεις του φερριτή στις διάφορες συχνότητες (Σχήματα 2.18α-2.18δ) [31].



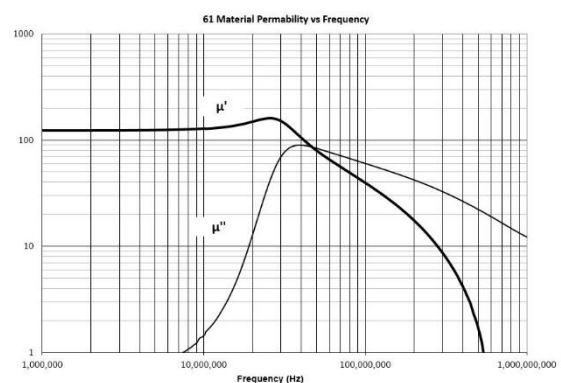
Σχήμα 2.18α: Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερριτή τύπου 75 Material



Σχήμα 2.18β: Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερριτή τύπου 31 Material



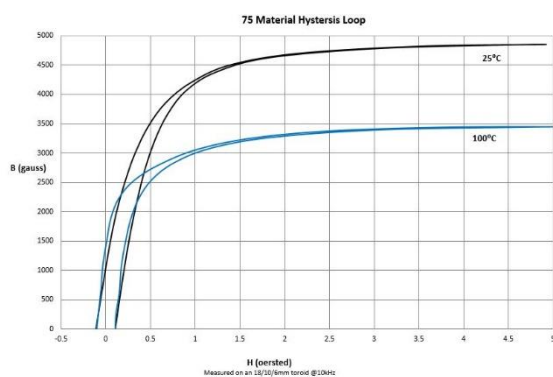
Σχήμα 2.18γ: Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερριτή τύπου 44 Material



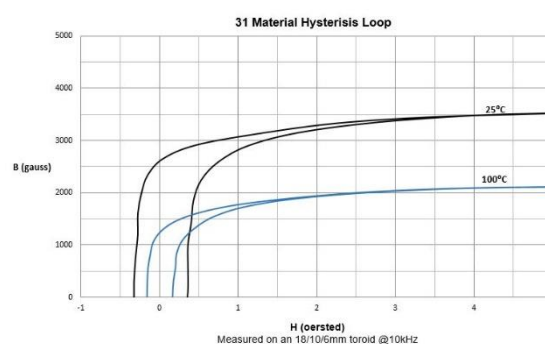
Σχήμα 2.18δ: Διάγραμμα διαπερατότητας – συχνότητας για φερριτή τύπου 61 Material

Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 2.18α-2.18δ, στις χαμηλές συχνότητες εύρους τους, το μ' είναι κυρίαρχο - πράγμα που σημαίνει ότι ο πυρήνας είναι κυρίως επαγωγικός και συνεπώς εμποδίζει τον θόρυβο. Στις υψηλότερες συχνότητες, το μ'' είναι ο κύριος οδηγός της αντίστασης του πυρήνα και γίνεται πιο ανθεκτικός, πράγμα που σημαίνει ότι απορροφά τον θόρυβο [31].

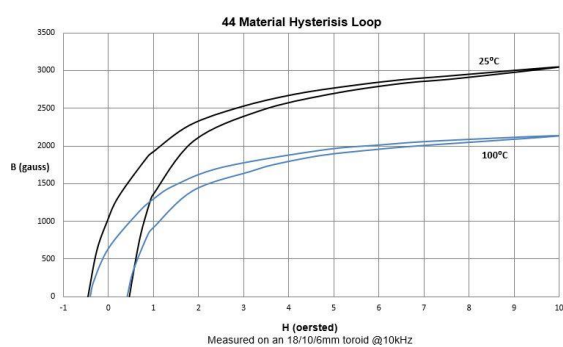
Στα Σχήματα 2.19α-2.19δ, ακόμη, παρουσιάζονται οι βρόγχοι υστέρησης του κάθε τύπου φερρίτη:



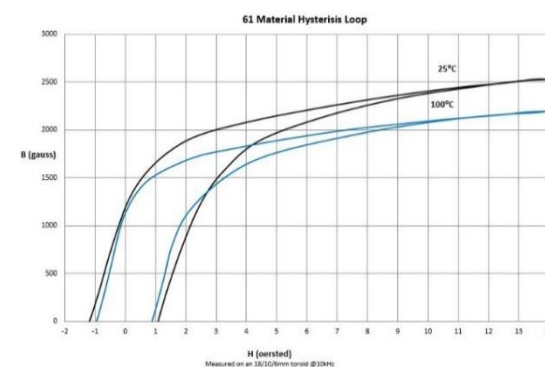
Σχήμα 2.19α: Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 75 Material



Σχήμα 2.19β: Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 31 Material

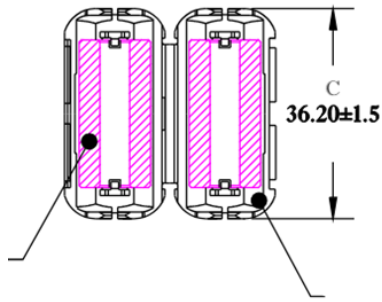


Σχήμα 2.19γ: Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 44 Material

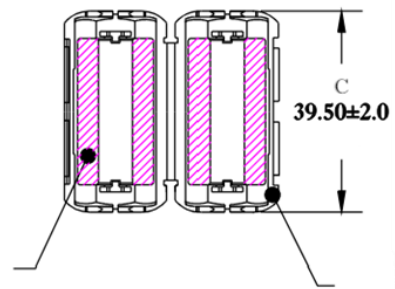


Σχήμα 2.19δ: Βρόγχος υστέρησης φερρίτη τύπου 61 Material

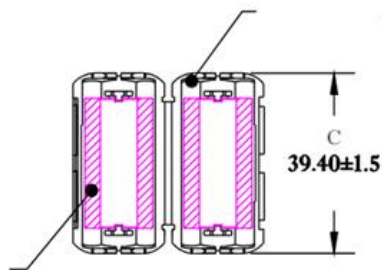
Το πιο κοινό σχήμα φερρίτη που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι ο κύλινδρος. Ο κυλινδρικός αυτός φερρίτης αποτελείται από φερρομαγνητικό υλικό, περιβεβλημένο από μια θήκη πολυπροπυλενίου η οποία ανταποκρίνεται στους περιορισμούς RoHS για τις επικίνδυνες ουσίες και έχει βαθμό ευφλεκτότητας UL 94 V-0 [29]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται κυλινδρικοί φερρίτες με πάχος 4.90mm, 6.30 mm, 8.70mm και 9.85mm. Στα Σχήματα 2.20α-2.20δ παρουσιάζονται τα σχέδια και οι τυπικές διαστάσεις των φερριτών αυτών. Όλες οι αναφερθέντες διαστάσεις είναι σε χιλιοστά.



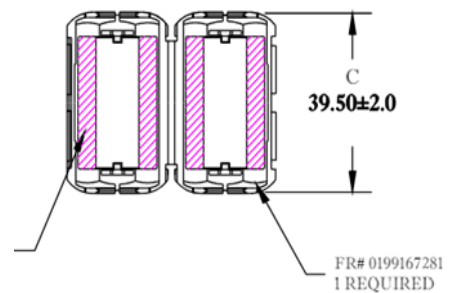
Σχήμα 2.20α: Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 4.90mm



Σχήμα 2.20β: Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 6.30mm



Σχήμα 2.20γ: Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 8.70mm

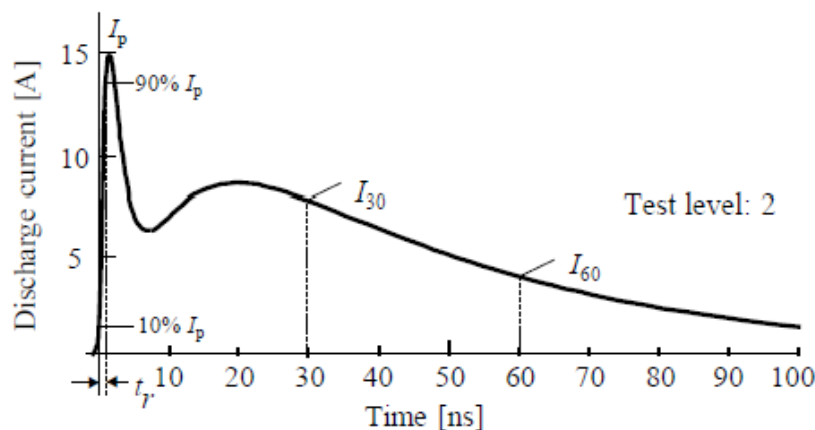


Σχήμα 2.20δ: Διαστάσεις φερρίτη διαμέτρου 9.85mm

Κεφάλαιο 3: Φερρίτες και ESD

3.1 Φαινόμενο ringing

Οι μέθοδοι δοκιμής για την ανοχή του ηλεκτρονικού εξοπλισμού στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD) καθορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [38] της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC). Το Πρότυπο αυτό ήταν αρχικά μια μέθοδος δοκιμής εκφόρτισης μέσω αέρα με την χρήση μιας γεννήτριας για την προσομοίωση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από φορτισμένο ανθρώπινο σώμα, αλλά λόγω της μεγάλης διακύμανσης των αποτελεσμάτων, υιοθετήθηκε το 1989 η μέθοδος δοκιμής εκφόρτισης εξ επαφής [39] για τη σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, όπου μόνο τέσσερα σημεία καθορίστηκαν για τη βαθμονόμηση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: ο χρόνος ανόδου της πρώτης κορυφής του ρεύματος, η μέγιστη τιμή του, καθώς και οι τιμές του 30ns και 60ns αργότερα από τη στιγμή που έλαβε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του και έτσι σχεδιάστηκε σχηματικά μια τυπική κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης. Στην έκδοση του 2008 του Προτύπου [38], δόθηκε μια ιδανική κυματομορφή ρεύματος για εκφόρτιση εξ επαφής (Σχήμα 3.1) και ένας τύπος με τις παραμέτρους για τον υπολογισμό της κυματομορφής που πληροί τις απαιτήσεις IEC για την τάση δοκιμής.



Σχήμα 3.1. Ιδανική κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής +4kV με βάση το IEC 61000-4-2 2008 [38].

Ωστόσο, ακόμη και αν επιβεβαιωθεί η βαθμονόμηση της κυματομορφής των τεσσάρων σημείων μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τα αποτελέσματα των δοκιμών δεν είναι πάντα τα ίδια για διαφορετικές γεννήτριες. Σε αυτό το πλαίσιο, η ομάδα εργασίας του IEC SC77B, της Εθνικής Επιτροπής που είναι υπεύθυνη για τη σύνταξη και επικαιροποίηση του Προτύπου IEC 61000-4-2, πρότεινε μια πρόσθετη διάταξη με μια νέα απαίτηση σύμφωνα με την οποία, το εύρος χρόνου που μετράται στο 60 % της πρώτης κορυφής της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής πρέπει να είναι 1,5 ns έως 3,5 ns [40]. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η βελτίωση δεν ήταν αξιοσημείωτη. Για το λόγο αυτό, η προτεινόμενη πρόσθετη διάταξη δεν υιοθετήθηκε στο Πρότυπο του 2008

[38]. Από την άλλη πλευρά, μία άλλη έρευνα [41], [42] διεξήγαγε δοκιμές σε οκτώ μοντέλα γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και 14 τύπους εξοπλισμού υπό δοκιμή (EUT). Τα αποτελέσματα των δοκιμών διέφεραν μεταξύ των γεννητριών λόγω των διαφορών στο πλάτος και τις συχνότητες της αποσβενυμένης ταλάντωσης (ringing) που εμφανίζεται μετά την πρώτη κορυφή του ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής, η οποία δεν καθορίζεται στο πρότυπο IEC. Επιπλέον, με βάση την υπόθεση ότι οι δυσλειτουργίες του εξοπλισμού μπορεί να οφείλονται στον συντονισμό στενής ζώνης κατά τη διάρκεια της δοκιμής, διευκρινίστηκε ότι το επίπεδο δυσλειτουργίας σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη φασματική συνιστώσα των μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και ότι η αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών από διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα βελτιωνόταν εάν αυτό ρυθμιζόταν. Σε άλλη μελέτη [43], μετρήθηκαν κυματομορφές εκφόρτισης επαφής από οκτώ διαφορετικές εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [38] και συγκρίθηκαν με τις καθορισμένες από το IEC κυματομορφές, προκειμένου να διερευνηθούν οι συγκεκριμένες για κάθε μοντέλο διακυμάνσεις στις κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης επαφής στη φάση της βαθμονόμησης της γεννήτριας. Ως αποτέλεσμα, αν και όλες οι γεννήτριες πλην μίας από τις επτά πληρούσαν τις απαιτήσεις του ισχύοντος Προτύπου IEC, παρατηρήθηκε ringing διαφορετικού πλάτους και συχνότητας μετά την πρώτη κορυφή της κυματομορφής. Επιπλέον, το χρονικό πλάτος της πρώτης αιχμής (60% rise – 60% fall) ήταν μικρότερο και η τιμή ρεύματος της δεύτερης κορυφής ήταν μεγαλύτερη σε σύγκριση με την καθορισμένη από το IEC κυματομορφή.

Πίνακας 3.1. Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) εξ επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2008 [38]

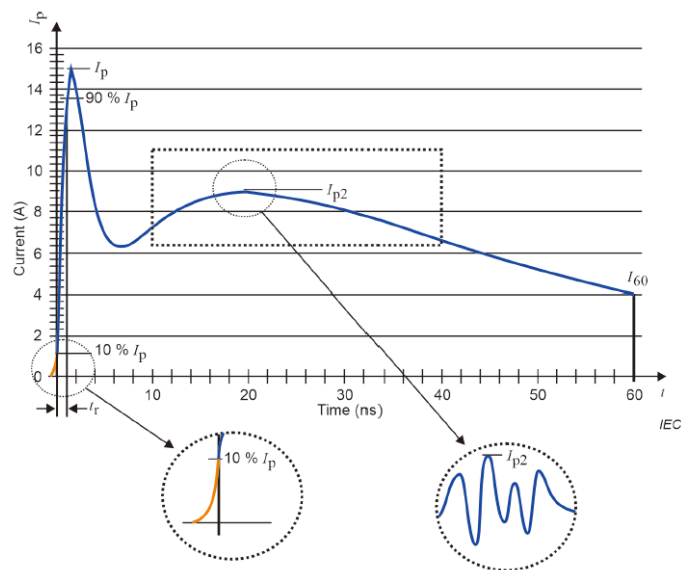
Επίπεδο	Τάση φόρτισης	I_{max}	T_{rise}	I_{30}	I_{60}
	[kV]	[A]	[ns]	[A]	[A]
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

I_{max} είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος της κυματομορφής εκφόρτισης
 T_{rise} είναι ο χρόνος που παρεμβάλλεται μεταξύ του 10% και του 90% της τιμής του I_{max}
 I_{30} είναι τιμή ρεύματος της κυματομορφής εκφόρτισης για $t=30ns$ αφού το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του
 I_{60} είναι τιμή ρεύματος της κυματομορφής εκφόρτισης για $t=60ns$ αφού το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του

Στην έρευνα που περιγράφεται παρακάτω, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης επαφής από μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τάση δοκιμής 4 kV σε διαφορετικά περιβάλλοντα μέτρησης και διατάξεις

καλωδίων ρεύματος επιστροφής. Αναλύονται επίσης τα φάσματα συχνότητας που προκαλούνται από το ringing για να διερευνηθούν τα φασματικά χαρακτηριστικά τους [44]. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις που προβλέπονται στο IEC 61000-4-2 της έκδοσης του 2008 [38] και στο Σχήμα 3.1 η καθορισμένη από το IEC κυματομορφή για τη βαθμονόμηση της εκφόρτισης επαφής από μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [44].

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις που προβλέπονται στη νέα, προτεινόμενη, έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 (Edition 3:2023) [45], στις οποίες προστίθεται η τιμή του ρεύματος I_{p2} , το οποίο ορίζεται ως η μέγιστη τιμή του ρεύματος μεταξύ των χρονικών στιγμών 10ns και 40ns αφού το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η καθορισμένη από το IEC κυματομορφή για τη διακρίβωση της κυματομορφής μιας εκφόρτισης επαφής από μια γεννήτρια αφού το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του .



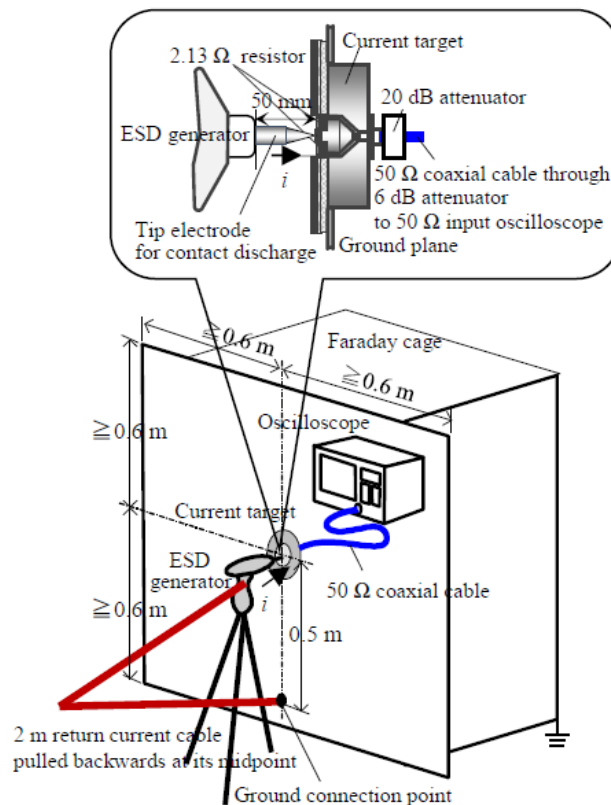
Σχήμα 3.2. Καθορισμένη κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής με βάση την προτεινόμενη έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [45].

Πίνακας 3.2. Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) εξ επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2023 [45]

Επίπεδο	Τάση φόρτισης	I_{max}	T_{rise}	I_{p2}	I_{60}
	[kV]				
1	2	7.5	0.8	4.5	2
2	4	15	0.8	9	4
3	6	22.5	0.8	13.5	6
4	8	30	0.8	18	8

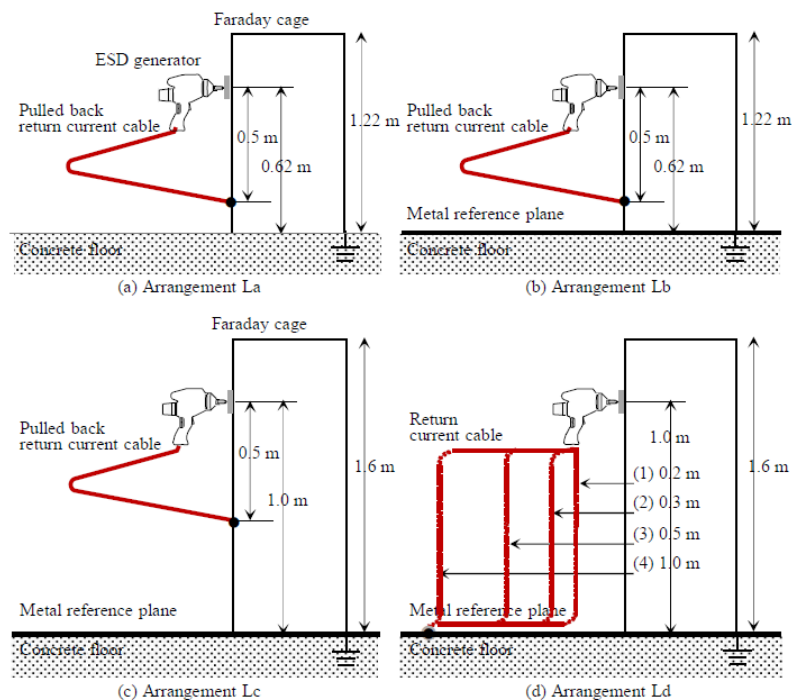
I_{p2} είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος στο χρονικό πλαίσιο από τα 10ns έως τα 40ns αφού το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η διάταξη διακρίβωσης μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που καθορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 [38] και μια διάταξη μέτρησης για το ρεύμα εκφόρτισης εξ επαφής από τη γεννήτρια. Το ηλεκτρόδιο της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων βρίσκεται σε επαφή με το κεντρικό ηλεκτρόδιο ενός ομοαξονικού μετατροπέα ανίχνευσης ρεύματος, εφεξής αναφερόμενος ως στόχος ρεύματος, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κέντρο ενός γειωμένου κλωβού Faraday. Το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος που συνδέεται με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων έχει μήκος, σύμφωνα με το Πρότυπο από 2 έως 3 μέτρα, αλλά ο τρόπος καλωδίωσης του επηρεάζει την πτωτική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης μετά την πρώτη κορυφή. Ως εκ τούτου το πρότυπο IEC ορίζει μια διάταξη καλωδίου του οποίου το μέσο δημιουργεί ισοσκελές τρίγωνο με την αρχή και το τέλος του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, και είναι γειωμένο σε θέση 50 cm κάτω από τον στόχο ρεύματος. Στην Έκδοση 2 του Προτύπου του 2008 δεν υπήρχε πρόβλεψη για την απόσταση από την επιφάνεια του δαπέδου έως το σημείο γείωσης του καλωδίου και για την κατάσταση της επιφάνειας του δαπέδου, γεγονός που μπορούσε να επηρεάσει την κυματομορφή βαθμονόμησης εκφόρτισης εξ επαφής από τη γεννήτρια ESD [44]. Παρόλα αυτά στην προτεινόμενη νέα draft έκδοσης 2023 [45] υπάρχει πρόβλεψη για απόσταση του σημείου γείωσης του καλωδίου από το δάπεδο ίση με 0.5 ± 0.05 m.



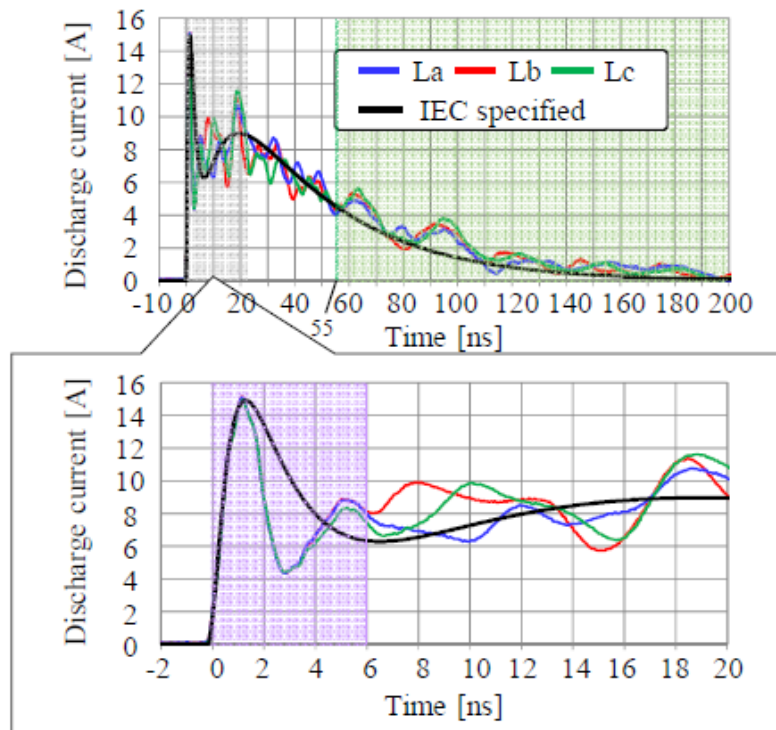
Σχήμα 3.3. Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και μέτρησης της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής [44]

Το Σχήμα. 3.4 παρουσιάζει διατάξεις διακρίβωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και διατάξεις για τη διερεύνηση της επίδρασης των διατάξεων των καλωδίων επιστροφής του ρεύματος στις κυματομορφές εκφόρτισης επαφής. Όλα τα καλώδια επιστροφής του ρεύματος έχουν το ίδιο μήκος 2m. Τα Σχήματα 3.4(α)(διάταξη La), 3.4(β) (διάταξη Lb), και 3.4(γ) (διάταξη Lc), είναι συμμορφωμένα με τα πρότυπα βαθμονόμησης IEC. Η διάταξη των καλωδίων στα Σχήματα 3.4(α) και 3.4(β) είναι η ίδια με εκείνη του Σχήματος 3.3, με τη διαφορά ότι στο πρώτο υπάρχει δάπεδο από σκυρόδεμα και στο δεύτερο ένα μεταλλικό επίπεδο τοποθετημένο στην επιφάνεια του δαπέδου ως αναφορά γείωσης, το οποίο είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με τον κλωβό Faraday. Οι αποστάσεις από την επιφάνεια του δαπέδου έως τον στόχο ρεύματος και τη θέση γείωσης του καλωδίου είναι 0,62 m και 0,12 m, αντίστοιχα, οι οποίες είναι ίδιες με εκείνες των Σχημάτων 3.4(α) και 3.4(β). Στο Σχήμα 3.4(γ) η διάταξη καλωδίων είναι όπως στο Σχήμα 3.4(β), αλλά η απόσταση από το δάπεδο έως τον τρέχοντα στόχο και τη θέση γείωσης του καλωδίου είναι 1,0 m και 0,5 m, αντίστοιχα, οι οποίες είναι διαφορετικές από εκείνες των Σχημάτων 3.4(α) και 3.4(β). Η διάταξη μέτρησης του Σχήματος 3.4(δ) (διάταξη Ld), δε συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του Προτύπου, αλλά προσομοιώνει ικανοποιητικά τη δοκιμή ατρωσίας εξοπλισμού σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις [45]. Στη Ld, χρησιμοποιούνται 4 διαφορετικές διατάξεις καλωδίων. Στην (1) η απόσταση του πιστολιού από τον κλωβό είναι 0.2m, στη (2) 0.3m, στην (3) 0.5m και στην (4) 1m αντίστοιχα.



Σχήμα. 3.4. Διάταξη μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και τη μελέτη της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος μήκους 2m. Οι διατάξεις (α), (β) και (γ) συμμορφώνονται με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, ενώ η διάταξη (δ) δεν είναι αποδεκτή για τη συγκεκριμένη διαδικασία διακρίβωσης [44]

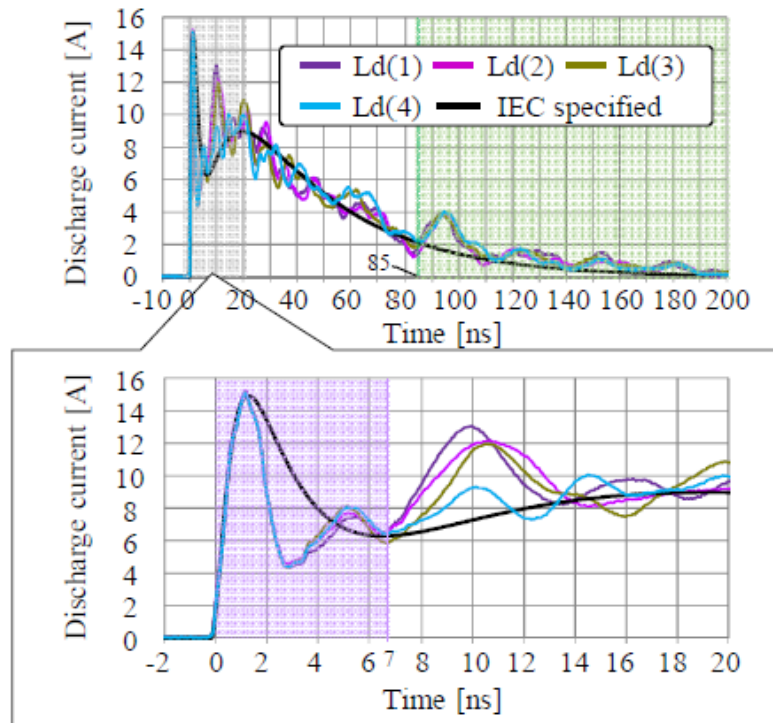
Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής 4 kV που μετρήθηκαν στις διατάξεις διακρίβωσης που απεικονίζονται στα Σχήματα 3.4(α), 3.4(β) και 3.4(γ) σε σύγκριση με την προδιαγεγραμμένη από το IEC κυματομορφή. Οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής μετρήθηκαν από την άνοδο έως 450 ns, αλλά στο σχήμα απεικονίζεται η κυματομορφή ρεύματος έως 200ns, ενώ παρουσιάζεται και μια διευρυμένη προβολή των κυματομορφών στη γκρίζα περιοχή έως 20ns. Παρόλο που οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής στο Σχήμα 3.5 πληρούν τις απαιτήσεις του προτύπου IEC, παρατηρείται ότι αποσβενύμενες ταλαντώσεις λόγω του φαινομένου ringing μπορούν να εμφανιστούν μετά την πρώτη κορυφή και να κυμανθούν γύρω από την καθορισμένη από το IEC κυματομορφή. Μπορεί επίσης να διαπιστωθεί ότι οι κυματομορφές μετά τα 6 ns διαφέρουν ανάλογα με τη διάταξη μέτρησης, ενώ οι κυματομορφές μέχρι τα 6 ns (μωβ περιοχή) και μετά τα 55 ns (ανοιχτή πράσινη περιοχή στο παραπάνω σχήμα) δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου [44].



Σχήμα. 3.5. Σύγκριση κυματομορφής των ρευμάτων εκφόρτισης εξεπαφής που μετρήθηκαν από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε τάση +4 kV σε διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος [44].

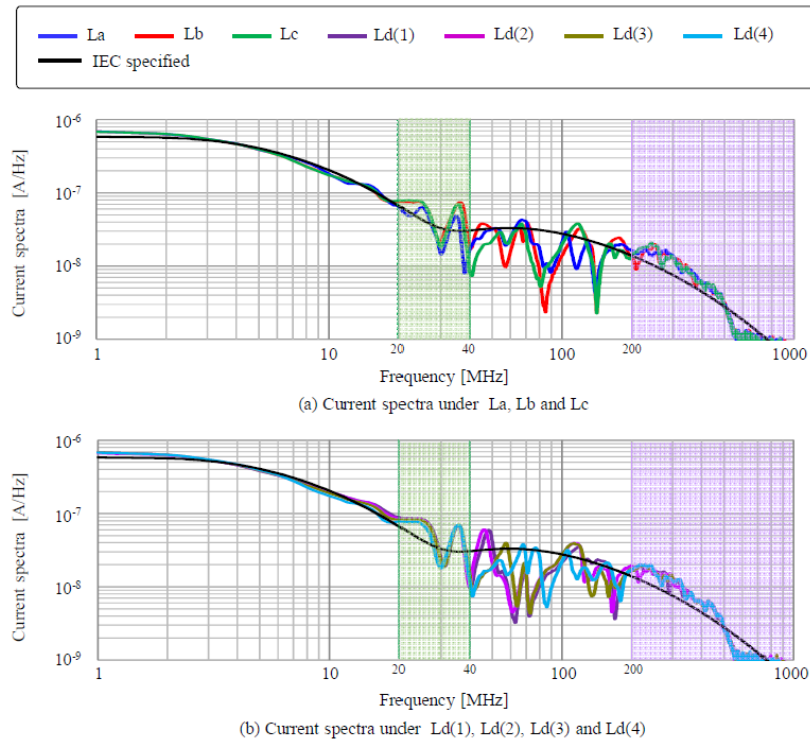
Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στη διάταξη διακρίβωσης και τις διατάξεις καλωδίων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4(δ) σε σύγκριση με την προδιαγεγραμμένη κυματομορφή IEC. Παρατηρείται ότι οι τιμές ρεύματος στα 60 ns υπερβαίνουν το ανώτερο όριο των απαιτήσεων του προτύπου IEC μόνο στις διατάξεις Ld(3) και Ld(4), αλλά και ότι οι άλλες παράμετροι της κυματομορφής πληρούν τις απαιτήσεις του προτύπου. Το ringing στις

κυματομορφές μετά τα 7ns στο παρακάτω σχήμα, όπως και στο Σχήμα 3.5, ποικίλλει ανάλογα με τις ρυθμίσεις του καλωδίου, ενώ οι κυματομορφές μέχρι τα 7ns (μωβ περιοχή) και μετά τα 85ns (ανοιχτό πράσινο χρώμα στο παραπάνω σχήμα) δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από τις διατάξεις του καλωδίου [44].



Σχήμα 3.6. Σύγκριση κυματομορφής των ρευμάτων εκφόρτισης εξ επαφής που μετρήθηκαν από τη γεννήτρια ESD 4 kV με διαφορετική διάταξη του καλωδίου ρεύματος επιστροφής που δεν συμμορφώνεται με το πρότυπο βαθμονόμησης IEC, μαζί με την καθορισμένη κυματομορφή IEC [44].

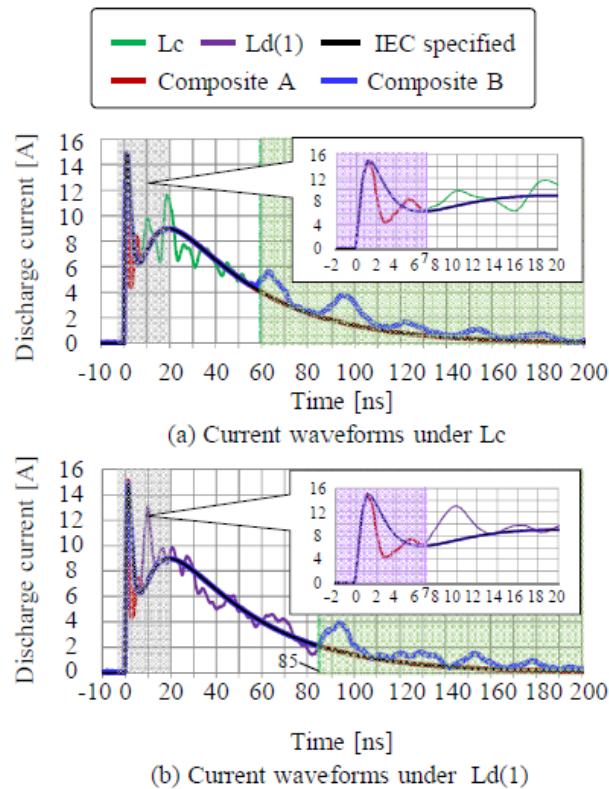
Στο Σχήμα 3.7 συγκρίνονται τα φάσματα συχνότητας των κυματομορφών εκφόρτισης εξ επαφής των Σχημάτων 3.5 και 3.6 με το φάσμα της κυματομορφής που καθορίζεται από το IEC. Στα Σχήματα 3.7(α) και 3.7(β) παρουσιάζονται τα φάσματα των Σχημάτων 3.5 και 3.6, αντίστοιχα. Τα σχήματα αυτά δείχνουν ότι τα φάσματα συχνότητας από 40MHz έως 200MHz επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη διάταξη του καλωδίου και το περιβάλλον μέτρησης, ενώ τα φάσματα στην ανοιχτοπράσινη περιοχή (20MHz έως 40MHz) και στη μωβ περιοχή (200MHz και άνω) δεν μεταβάλλονται.



Σχήμα 3.7. Φασματική σύγκριση των ρευμάτων εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ESD 4 kV με διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου ρεύματος επιστροφής μαζί με το φάσμα κυματομορφής που καθορίζεται από το IEC [44].

Τα χαρακτηριστικά του φάσματος που προκύπτουν από το Σχήμα 3.7 διερευνώνται με τη σύγκριση των φασμάτων των σύνθετων κυματομορφών της καθορισμένης από το IEC κυματομορφής για τις μετρούμενες κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής υπό τις διατάξεις διακρίβωσης Lc και Ld(1) που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.4(c) και 3.4(d), αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο ίδιο περιβάλλον με το μεταλλικό επίπεδο αναφοράς στο δάπεδο, ο βαθμός δημιουργίας του ringing στο Lc βρίσκεται στο ενδιάμεσο μεταξύ του βαθμού στο La και του βαθμού στο Lb, ενώ το ringing στο Ld(1) είναι το πιο έντονο μεταξύ των Ld.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι μετρούμενες κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής υπό τις διατάξεις διακρίβωσης Lc και Ld(1) καθώς και οι σύνθετες κυματομορφές σε συνδυασμό με τις μετρούμενες κυματομορφές και την καθορισμένη κυματομορφή IEC. Τα Σχήματα 3.8(α) και 3.8(β) είναι οι κυματομορφές εκφόρτισης επαφής Lc και Ld(1), αντίστοιχα. Η σύνθετη κυματομορφή A (κόκκινη γραμμή) στο Σχήμα 3.8(α) αποτελείται από την κυματομορφή που μετρήθηκε από την άνοδο έως τα 7ns (μωβ περιοχή) και την προδιαγεγραμμένη από το IEC κυματομορφή μετά τα 7ns. Η σύνθετη κυματομορφή B (μπλε γραμμή) αποτελείται από τις καθορισμένες από το IEC κυματομορφές στα Σχήματα 3.8(αα) και 3.8(β) από την άνοδο έως 60ns και 85ns, αντίστοιχα, και τις μετρημένες κυματομορφές στα Σχήματα 3.8(α) και 3.8(β) μετά από 60ns και 85ns, αντίστοιχα (ανοιχτή πράσινη περιοχή).



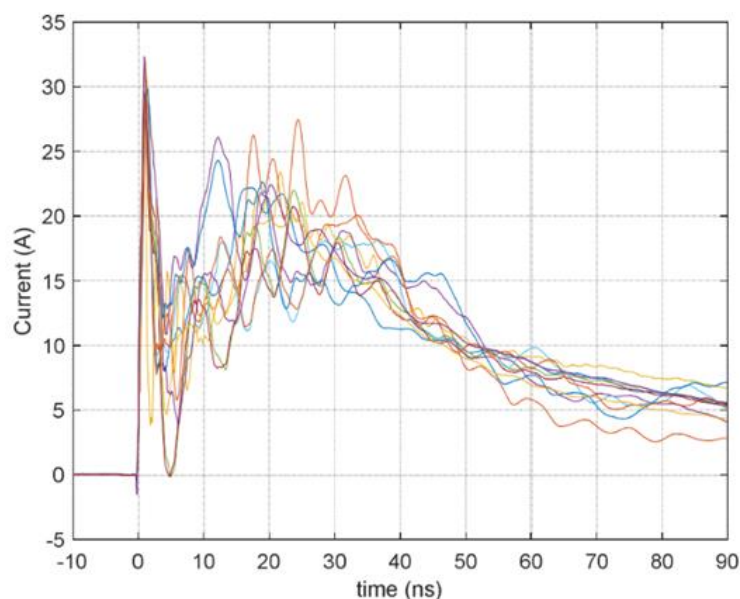
Σχήμα 3.8. Σύνθετες κυματομορφές A και B με τις μετρημένες κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής και την κυματομορφή που καθορίζεται από το IEC από γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων 4 kV [44].

Η σύγκριση των φασμάτων των μετρούμενων κυματομορφών και των σύνθετων κυματομορφών δείχνει ότι το φάσμα στην ανοιχτοπράσινη περιοχή από τα 20MHz έως τα 40MHz της μετρούμενης κυματομορφής αντιστοιχεί στο φάσμα της σύνθετης κυματομορφής B και το φάσμα στην μωβ περιοχή μετά τα 200MHz αντιστοιχεί στο φάσμα της σύνθετης κυματομορφής A. Η διαπίστωση αυτή επικυρώνει το συμπέρασμα ότι τα φάσματα και στις δύο περιοχές δεν επηρεάζονται από τις διατάξεις διακρίβωσης, όπως τις διατάξεις των καλωδίων, την παρουσία μεταλλικού επιπέδου στο δάπεδο και την απόσταση του στόχου ρεύματος από την επιφάνεια του δαπέδου. Με άλλα λόγια, οφείλονται στις διακυμάνσεις που παρατηρούνται μετά από 60ns όσο αφορά την Lc και μετά από 85ns όσο αφορά την Ld(1), ενώ εκείνα στην μωβ περιοχή μπορούν να προκληθούν από την κορυφή της κυματομορφής περίπου 7ns από την άνοδο της κυματομορφής. Και τα δύο φάσματα μπορεί να οφείλονται σε χαρακτηριστικά που αφορούν τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και εξαρτώνται από την εσωτερική δομή του κυκλώματος.

Από την άλλη πλευρά, οι μεταβολές στα φάσματα από τα 40MHz έως τα 200MHz των μετρούμενων κυματομορφών αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στις μεταβολές των μετρούμενων αντιστάσεων εισόδου του καλωδίου. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο ringing δημιουργείται κυρίως από τους συντονισμούς του καλωδίου επιστροφής ρεύματος [44].

3.2 Χρήση φερριτών για την μείωση του φαινομένου ringing

Στο πλαίσιο των εργασιών αναθέωσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 [1] πραγματοποιήθηκε το 2019 έρευνα για την σύγκριση της κυματομορφής ρεύματος από εμπορικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [46], [47]. Στην έρευνα αυτή συμμετείχαν έντεκα γεννήτριες διαφορετικών κατασκευαστών και μοντέλων και τρία εργαστήρια (δύο από αυτά διαπιστευμένα κατά ISO/IEC 17025). Αποτέλεσμα της εν λόγω έρευνας ήταν η επιβεβαίωση της ύπαρξης του φαινομένου ringing, το οποίο επηρεάζει την κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την πλειονότητα των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ιδίως στο χρονικό διάστημα μεταξύ 10ns και 40ns (σχήμα 3.9). Ειδικότερα, όλες οι γεννήτριες πληρούσαν τις τυποποιημένες προδιαγραφές του Προτύπου [46].



Σχήμα 3.9. Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης έντεκα εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (εκφόρτιση επαφής, επίπεδο 8 kV) [46].

Έχουν γίνει έρευνες για να εξακριβωθεί, εάν η κατάλληλη διάταξη και η εισαγωγή ενός φερριτή στο καλώδιο επιστροφής θα μπορούσε να μειώσει το ringing. Η χρήση φερριτών υιοθετείται πράγματι για τη μείωση του, καθώς και τη βελτίωση των δοκιμών εκπομπής και ατρωσίας [48]. Επιπλέον, η διάταξη καλώδιου επιστροφής ρεύματος επηρεάζει σημαντικά την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που εκπέμπει η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και του πλέγματος που σχηματίζεται από το καλώδιο επιστροφής ρεύματος και το επίπεδο γείωσης αναφοράς [46].

Οι μετρήσεις, σε μία από αυτές τις έρευνες, πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με μια παραλλαγή της τυποποιημένης διάταξης [38] για τη διακρίβωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, η οποία περιλαμβάνει ένα οριζόντιο επίπεδο γείωσης συνδεδεμένο με το κατακόρυφο επίπεδο γείωσης. Το πρόσθετο οριζόντιο επίπεδο γείωσης εισήχθη για να βελτιωθεί η αναπαραγωγιμότητα της διαδικασίας διακρίβωσης. Η απόδειξη

της εν λόγω ανάγκης προέκυψε από μια διεργαστηριακή σύγκριση που ολοκληρώθηκε το 2017 και συντονίστηκε από το METAS (Ελβετία) [46].

Στην έρευνα αυτή, για την μείωση του φαινομένου ringing χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί φερρίτες του οίκου Fair Rite: ένας κυλινδρικός φερρίτης τύπου material 43 διαμέτρου 7.90mm και ένας ένας κυλινδρικός φερρίτης τύπου material 43 25.44mm [35]. Διερευνήθηκαν δύο θέσεις των φερριτών: στην μία το καλώδιο επιστροφής ρεύματος είναι συνδεδεμένο με το επίπεδο γείωσης (κατακόρυφο ή οριζόντιο) και στην άλλη το καλώδιο επιστροφής είναι συνδεδεμένο με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Δοκιμάστηκαν επίσης 1 και 2 σπείρες του καλωδίου επιστροφής γύρω από τον φερρίτη.

Τρεις διατάξεις του καλωδίου επιστροφής δοκιμάστηκαν («τριγωνική», «πραγματική» και «πραγματική απομονωμένη»), δύο εκ των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 3.10. Στη «πραγματική απομονωμένη» διάταξη το τμήμα του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που εκτείνεται παράλληλα προς το οριζόντιο επίπεδο γείωσης ανυψώθηκε μέσω μονωτικού υλικού πάχους 10cm. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα, παρουσιάζει μεγαλύτερο ringing στο χρονικό διάστημα γύρω από τη δεύτερη κορυφή της κυματομορφής της εκφόρτισης (10ns έως 40ns). Η γεννήτρια ρυθμίστηκε σε επίπεδο 8 kV, θετικής πολικότητας, σε λειτουργία εκφόρτισης εξ επαφής [46].



(a)

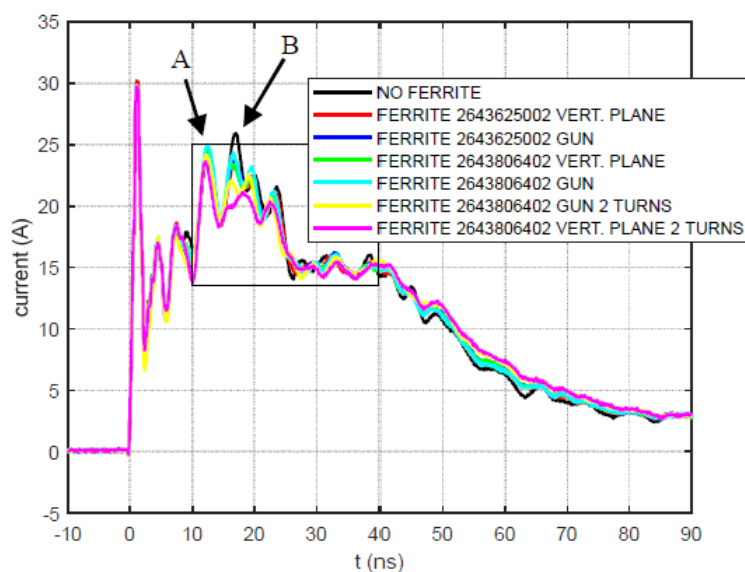


(b)

Σχήμα 3.10 Τριγωνική (α) και πραγματική (β) διάταξη καλωδίου επιστροφής ρεύματος [46]

Στον πρώτο γύρο μετρήσεων, η οποία αφορούσε τη διερεύνηση της τριγωνικής διάταξης του καλώδιου επιστροφής ρεύματος των δύο εξεταζόμενων φερριτών, της θέσης του φερρίτη (κοντά στο κατακόρυφο επίπεδο, κοντά στο σώμα της γεννήτριας) και των 1 ή 2 σπειρών, προέκυψε ότι:

- Η τοποθέτηση ενός φερρίτη στο καλώδιου επιστροφής ρεύματος μπορεί να μειώσει το ringing και να καταστήσει τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων συμβατή με τις νέες προδιαγραφές που εισήχθησαν στην νέα προτεινόμενη έκδοση του Προτύπου [45] σχετικά με το I_{p2} (που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11 και οριοθετεί την επιτρεπόμενη περιοχή για τη δεύτερη κορυφή της κυματομορφής),
- Ο φερρίτης είναι κυρίως αποτελεσματικός στην καταστολή των συντονισμών στο χρονικό διάστημα γύρω από τα 20ns,
- Ο χρόνος ανόδου, το πλάτος παλμού και το ρεύμα για $t=60\text{ns}$ επηρεάζονται ελάχιστα από την εισαγωγή του φερρίτη,
- Η θέση του φερρίτη κοντά στο κατακόρυφο επίπεδο γείωσης είναι η πιο αποτελεσματική
- Παρόλο που πληρούνται οι προδιαγραφές της νέας προτεινόμενη έκδοσης [45], εξακολουθεί να υπάρχει πολύ μικρό περιθώριο μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των προδιαγραφών [46].



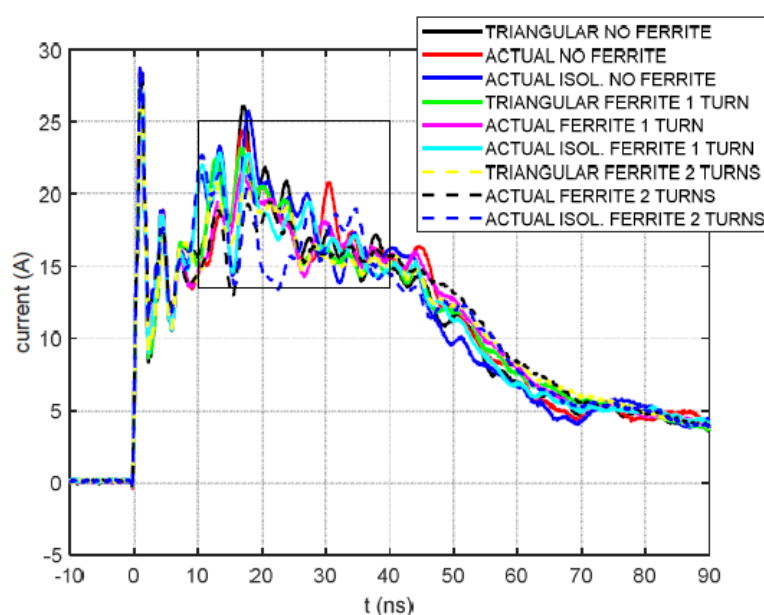
Σχήμα 3.11 Αποτελέσματα του πρώτου γύρου μετρήσεων [46]

Παρατηρείται, πράγματι, ότι η κορυφή της κυματομορφής που ταυτίζεται με το A στο Σχήμα 3.11 μειώνεται ελάχιστα με την εισαγωγή του φερρίτη, ενώ η κορυφή B εξασθενεί σημαντικά. Χωρίς την εισαγωγή των φερριτών η κυματομορφή είναι εκτός των ανοχών που ορίζονται στο προς αναθεώρηση Πρότυπο [45] για το χρονικό διάστημα μεταξύ 10ns και 40ns [46].

Στο δεύτερο γύρο μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας φερρίτης (φερρίτης τύπου material 43 διαμέτρου 16.25mm) με 1 και 2 σπείρες. Διερευνήθηκαν τριγωνικές, πραγματικές και πραγματικά απομονωμένες διατάξεις καλωδίων. Στον δεύτερο γύρο παρατηρήθηκε ότι:

- Η κορυφή A στο χρονικό διάστημα 10ns έως 40ns μειώνεται μόνο εάν υιοθετηθεί η πραγματική διάταξη
- Εάν υιοθετηθεί η πραγματική διάταξη, η κορυφή B μειώνεται έντονα με την εισαγωγή του φερρίτη
- Η κορυφή A δεν επηρεάζεται από την εισαγωγή του φερρίτη.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου γύρου μετρήσεων συνοψίζονται στο Σχήμα 3.12 [46].



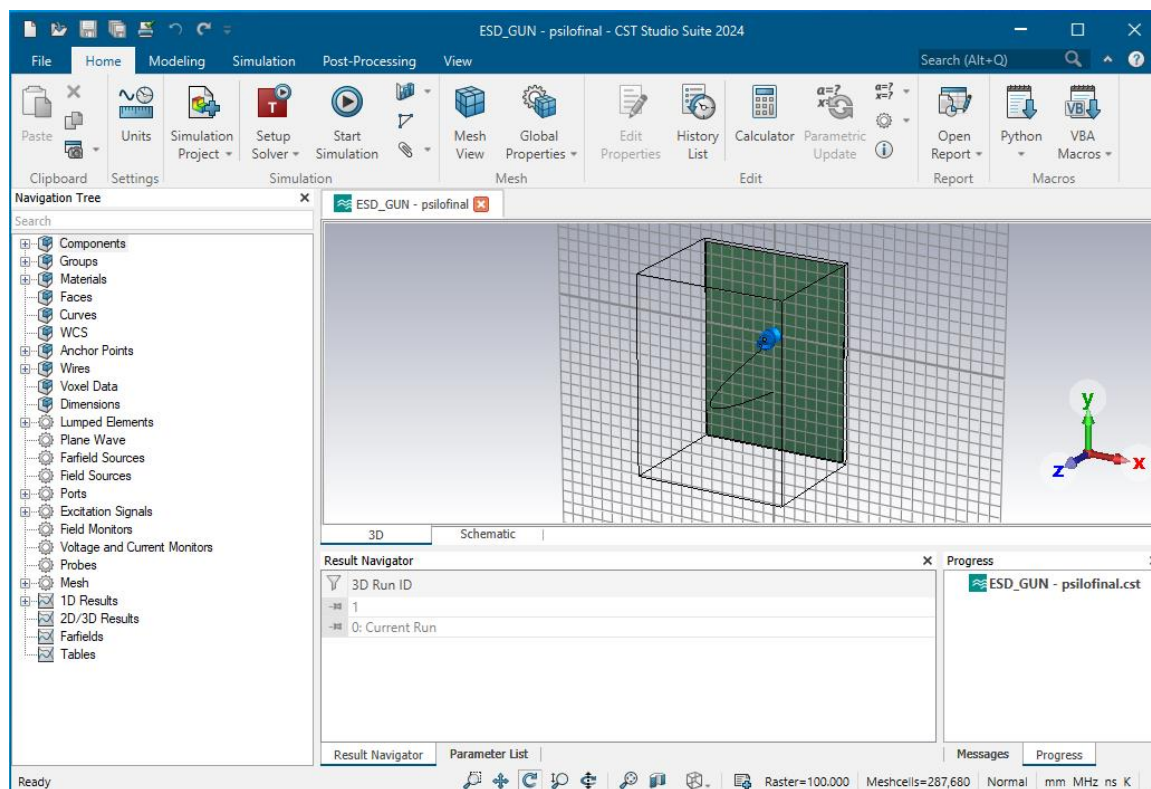
Σχήμα 3.12 Επισκόπηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του δεύτερου γύρου [46].

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

4.1 Το περιβάλλον προσομοιώσεων στο πρόγραμμα CST

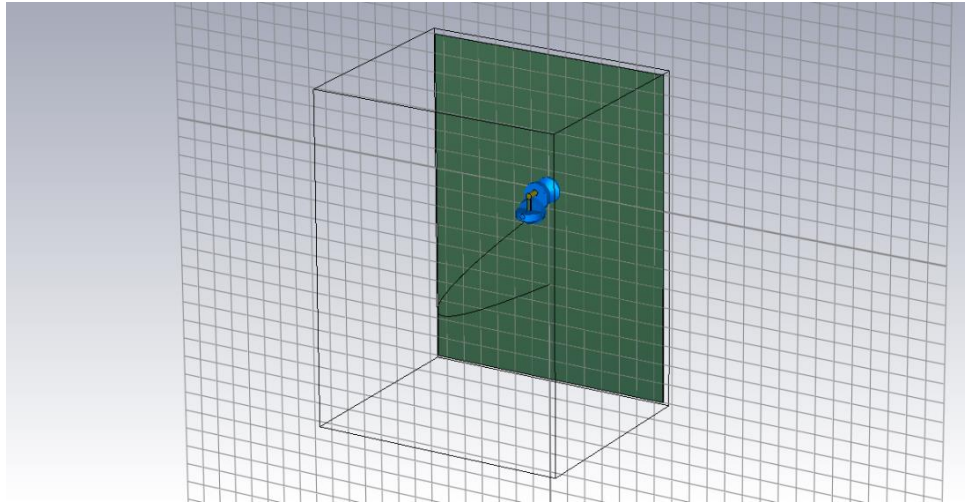
Οι προσομοιώσεις της εκφόρτισης ESD έγιναν μέσω του προγράμματος CST Studio Suite, το οποίο είναι ένα διαδραστικό περιβάλλον προσομοίωσης και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και επίλυση προβλημάτων από διάφορους κλάδους επιστημών.

Το περιβάλλον των προσομοιώσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1:

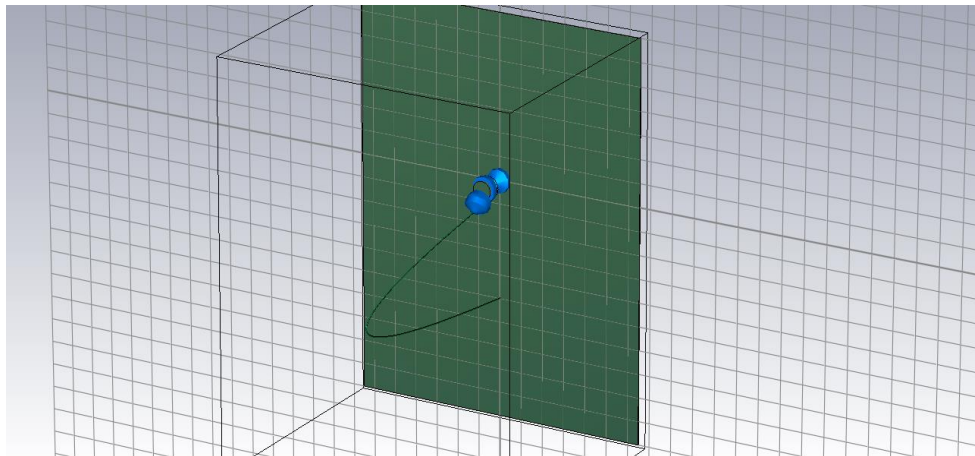


Σχήμα 4.1 Περιβάλλον προσομοιώσεων στο πρόγραμμα CST Microwave Studio

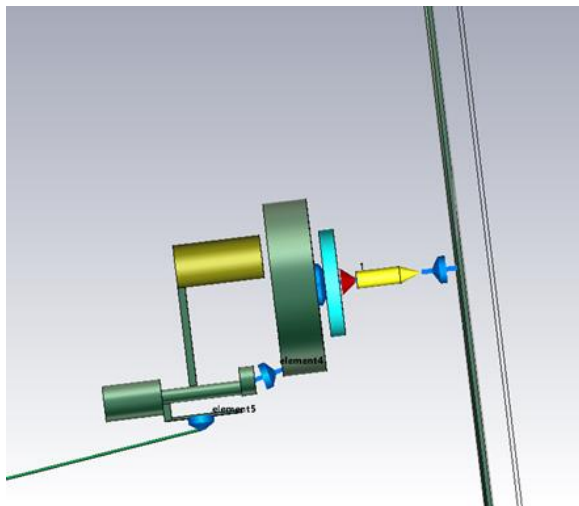
Τα δύο μοντέλα προσομοίωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων +4 kV που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις μας απεικονίζονται στα Σχήματα 4.2 και 4.3. Αποτελούνται από έναν κλωβό Faraday, το καλώδιο και το στόχο ρεύματος, ο οποίος φαίνεται σε πλάγιο όψη στα Σχήματα 4.4 και 4.5. Το μοντέλο αυτό είναι αποτέλεσμα έρευνας και μελέτης των Yousaf et al [49].



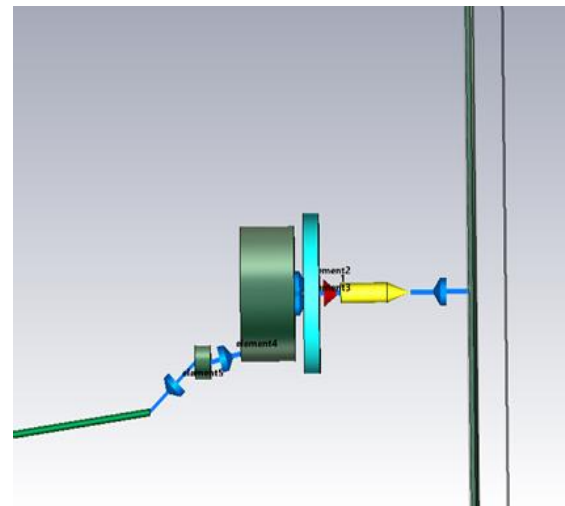
Σχήμα 4.2 Πρώτο μοντέλο προσομοίωσης



Σχήμα 4.3 Δεύτερο μοντέλο προσομοίωσης



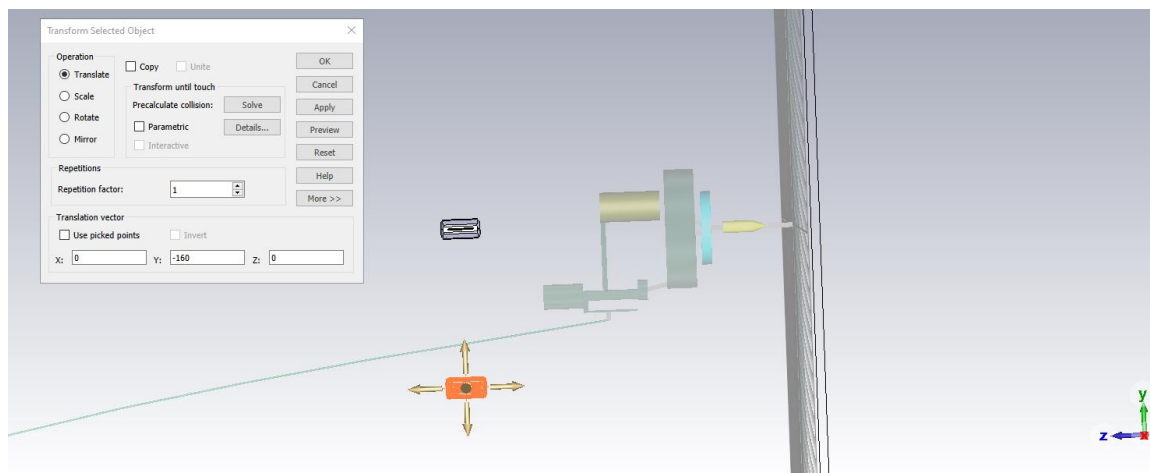
Σχήμα 4.4 Στόχος ρεύματος πρώτου μοντέλου σε πλάγια όψη



Σχήμα 4.5 Στόχος ρεύματος δεύτερου μοντέλου σε πλάγια όψη

4.1.1 Εισαγωγή του μοντέλου του φερρίτη

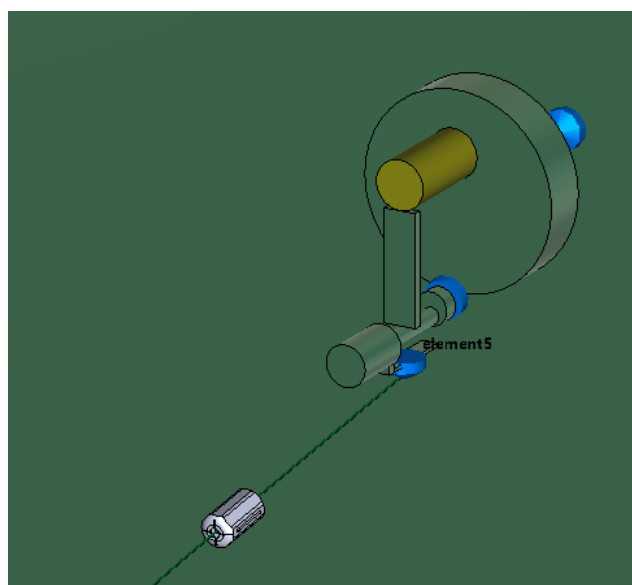
Για την εισαγωγή του φερρίτη στο μοντέλο, απαιτείται η εισαγωγή του CAD αρχείου του στο περιβάλλον της προσομοίωσης. Αρχικά κάνουμε λήψη του κατάλληλου μοντέλου από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή [50]. Έπειτα ακολουθώντας τις εντολές “Modeling” → “Import/Export” → “3D Files” και επιλέγοντας το αρχείο του 3D σχεδίου του φερρίτη εισάγουμε το μοντέλο του φερρίτη στο περιβάλλον της προσομοίωσης.



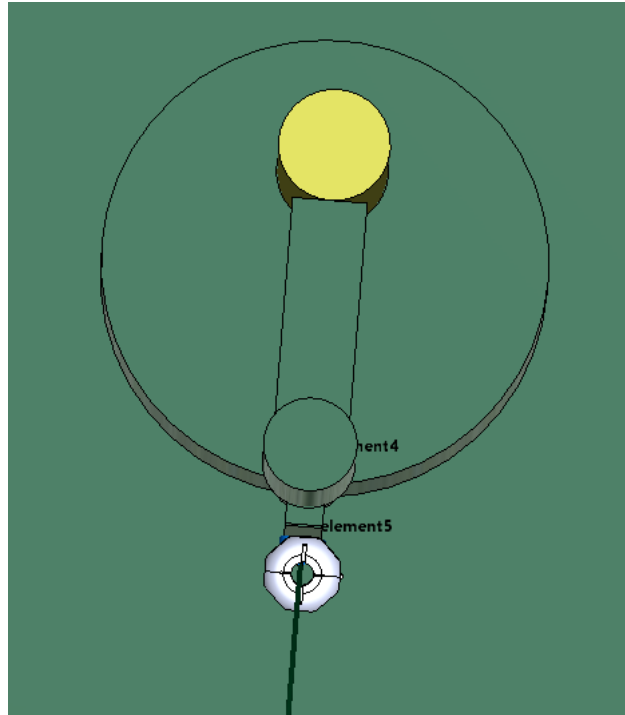
Σχήμα 4.6 Εισαγωγή του μοντέλου του φερρίτη στο περιβάλλον της προσομοίωσης.

Επιλέγοντας τον φερρίτη και με τις εντολές Translate και Rotate του μενού Transform, μπορούμε να μετακινήσουμε και να περιστρέψουμε το μοντέλο κατά τους άξονες x,y,z (Σχήμα 4.6).

Μετακινώντας το και περιστρέφοντάς το κατάλληλα μπορούμε να τοποθετήσουμε τον φερρίτη γύρω από το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος. (Σχήμα 4.7, Σχήμα 4.8).

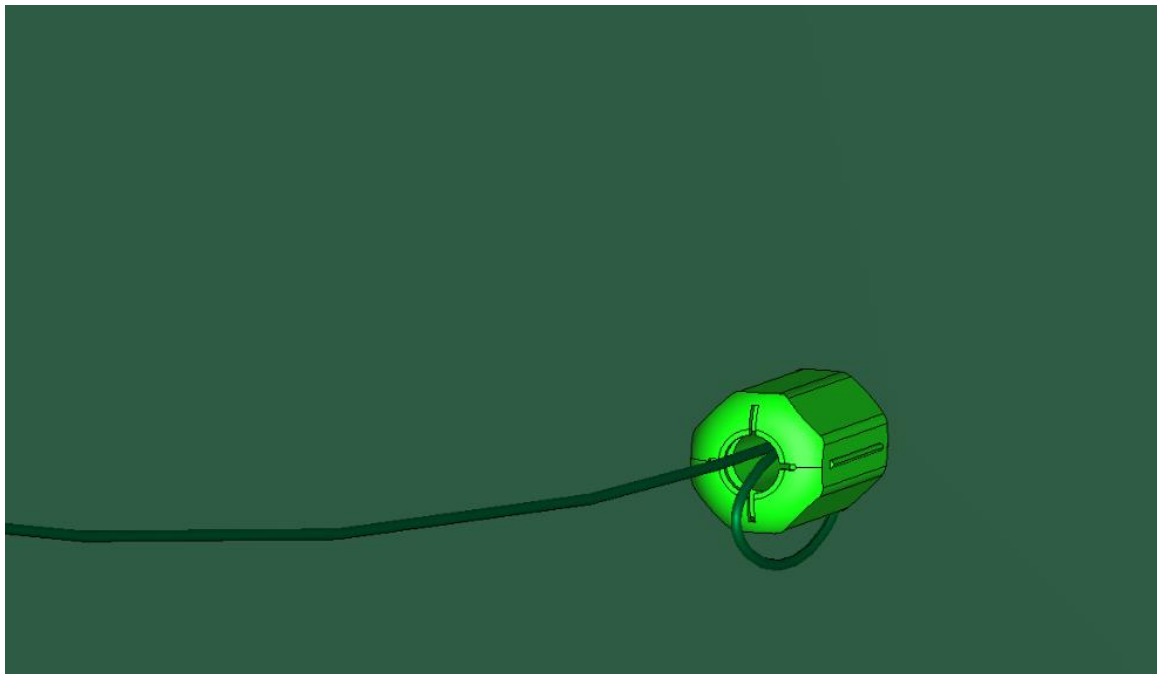


Σχήμα 4.7 Τοποθέτηση του φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος (1 σπείρα)



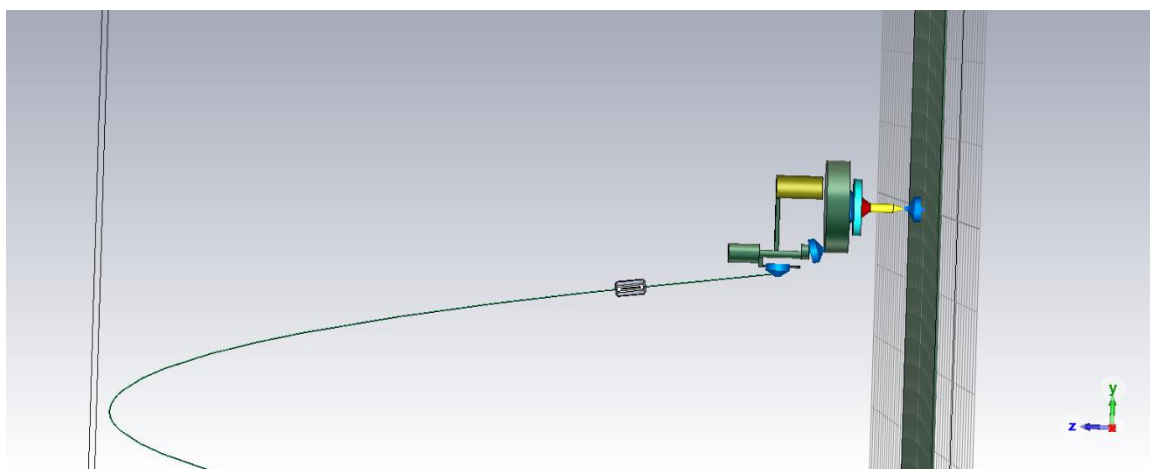
Σχήμα 4.8 Πρόσοψη του στόχου ρεύματος με το καλώδιο περασμένο μέσα από τον φερρίτη σε διάταξη μίας σπείρας

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, εξετάστηκαν δύο σενάρια για την τοποθέτηση του φερρίτη γύρω από το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος: 1)μία σπείρα – 1 Turn (Σχήμα 4.7, Σχήμα 4.8) και 2) δύο σπείρες - 2 Turns (Σχήμα 4.9).



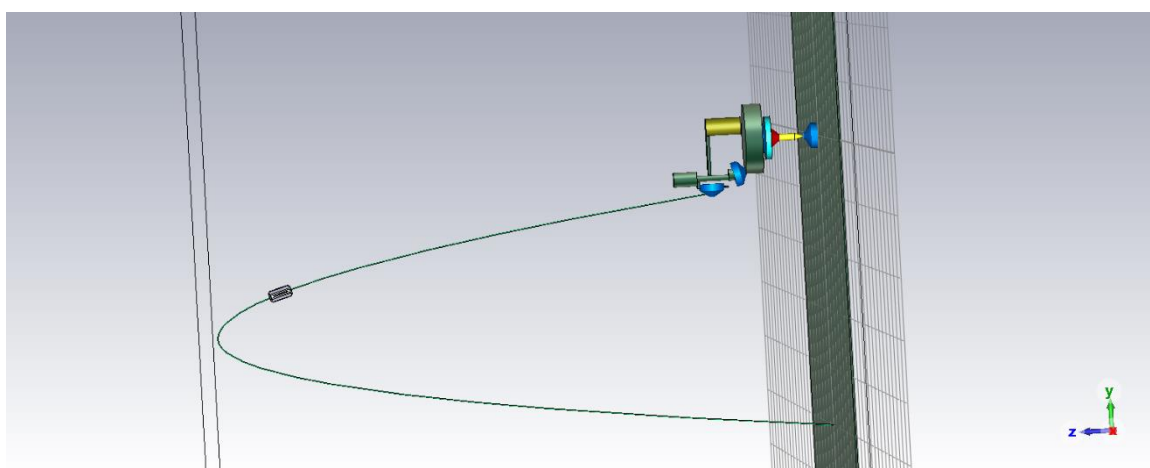
Σχήμα 4.9 Τοποθέτηση του φερρίτη, ώστε το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος να δημιουργεί δύο σπείρες εντός του φερρίτη

Στην παρούσα εργασία οι προσομοιώσεις διεξάχθηκαν τοποθετώντας τον φερρίτη σε τρεις θέσεις. Η θέση 1 (Position 1) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10 και αντιστοιχεί στην τοποθέτηση του φερρίτη στην αρχή του καλωδίου (πλησίον του σώματος της γεννήτριας).



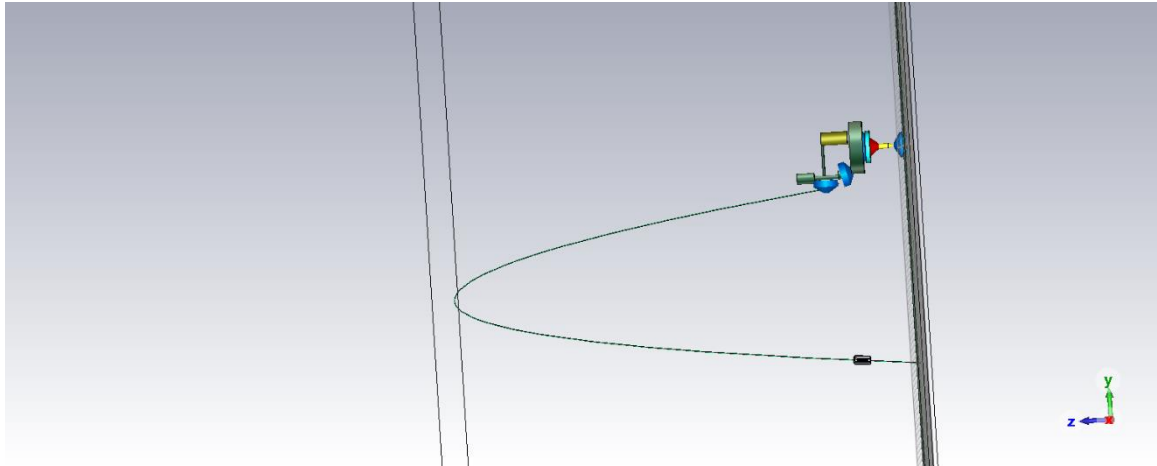
Σχήμα 4.10 Τοποθέτηση του φερρίτη στη θέση 1 – αρχή του καλωδίου

Η θέση 2 (Position 2) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11 και αντιστοιχεί στην τοποθέτηση του φερρίτη στο μέσο του μήκους του καλωδίου.



Σχήμα 4.11 Τοποθέτηση του φερρίτη στη θέση 2 – μέσο του καλωδίου

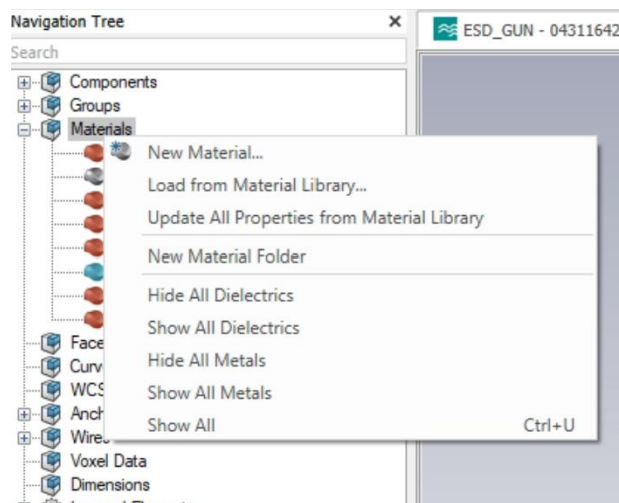
Η θέση 3 (Position 3) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12 και αντιστοιχεί στην τοποθέτηση του φερρίτη στο τέλος του καλωδίου (πλησίον του κάθετου επίπεδου γείωσης).



Σχήμα 4.12 Τοποθέτηση του φερρίτη στη θέση 3 – τέλος του καλωδίου

4.1.2 Ορισμός των υλικών

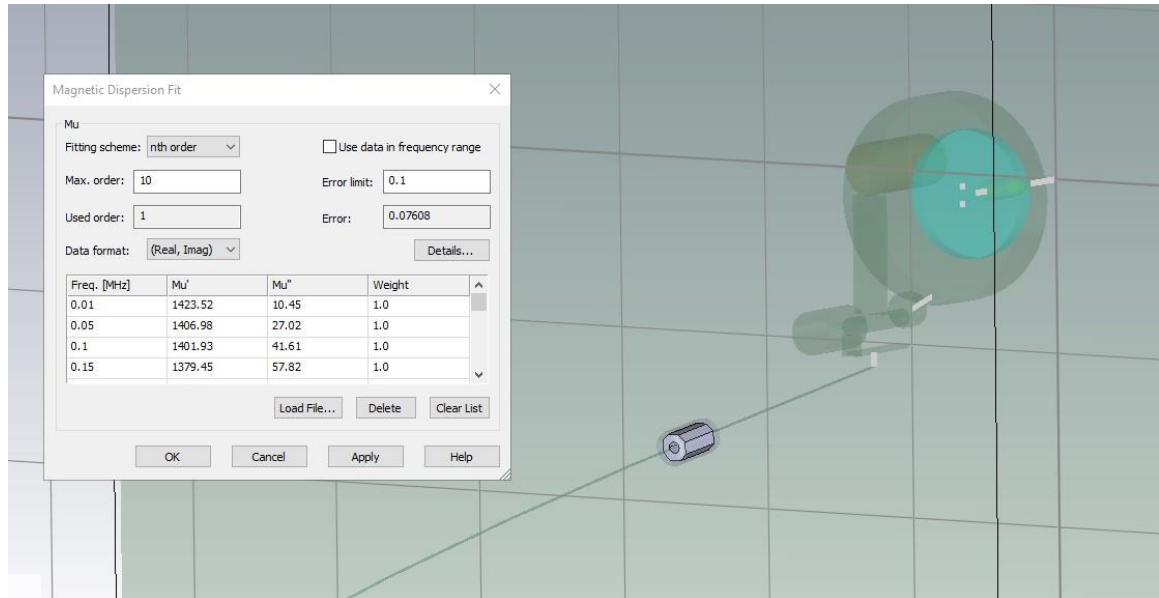
Στον κλάδο Materials του Component ορίζονται από τον χρήστη τα υλικά που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα του μοντέλου και οι ιδιότητές τους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαλέξει κάποιο έτοιμο υλικό από τη βιβλιοθήκη υλικών που διαθέτει το λογισμικό. Η προσθήκη υλικών μπορεί να γίνει κάνοντας «δεξί κλικ» στον υποκλάδο “Materials” του “Navigation Tree” (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13 Προσθήκη υλικών στο μοντέλο

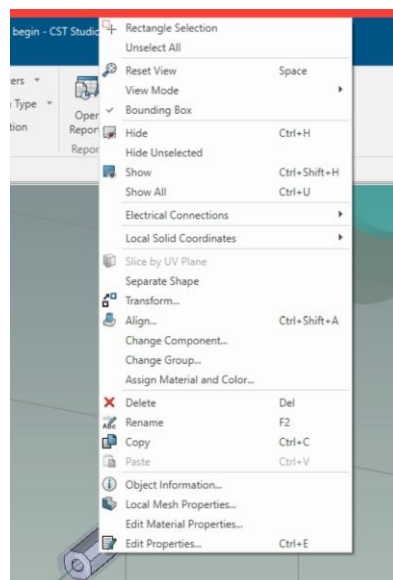
Στην περίπτωση προσθήκης New Material πρέπει να οριστούν υποχρεωτικά κάποιες ιδιότητες. Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών που ενδιαφέρουν τη συγκεκριμένη εργασία πρέπει απαραίτητα να οριστεί η σύνθετη μαγνητική διαπερατότητα. Για την προσθήκη των υλικών Material 31, 44, 61 και 75, από το οποίο αποτελείται το εσωτερικό των φερριτών αρχικά κατεβάζουμε από την ιστοσελίδα του κατασκευαστή [50], το CSV αρχείο με τα στοιχεία σύνθετης μαγνητικής διαπερατότητας-συχνότητας του συγκεκριμένου υλικού και το μετατρέπουμε σε αρχείο txt, για να μπορεί να αναγνωσθεί από το πρόγραμμα.

Έπειτα αφού δώσουμε την ονομασία στο καινούριο υλικό που θέλουμε να προσθέσουμε, κάνουμε «δεξί κλικ» στο υλικό αυτό, και επιλέγοντας “Material Properties” → “Dispersion” → “User” → “Dispersion Link” → “Load File”, επιλέγουμε το txt αρχείο του υλικού αυτού και έτσι «φορτώνουμε» τις ιδιότητες του υλικού (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14 Φόρτωση ιδιοτήτων του υλικού

Έπειτα κάνοντας «δεξί κλικ» στο εσωτερικό του μοντέλου του φερριτή και επιλέγοντας την εντολή “Assign Material & Color”, μπορούμε να ενσωματώσουμε το υλικό στο μοντέλο που επιθυμούμε (Σχήμα 4.15). Στη θήκη που περιβάλλει εξωτερικά το εσωτερικό του φερριτή, ενσωματώνουμε το υλικό Polypropylene το οποίο υπάρχει στην προεπιλεγμένη λίστα υλικών.



Σχήμα 4.15 Ενσωμάτωση του επιθυμητού υλικού στον φερριτή

4.1.3 Παράμετροι Προσομοίωσης

Ανοίγοντας το παράθυρο “Parameter List”, μπορούμε να ελέγξουμε και να αλλάξουμε τις παραμέτρους που αφορούν τις διαστάσεις του μοντέλου (Σχήμα 4.16, Σχήμα 4.17). Η πιο σημαντική παράμετρος, η οποία θα μας απασχολήσει στις προσομοιώσεις είναι η ακτίνα του καλωδίου. Η ακτίνα ίση με 0.7 αντιστοιχεί σε καλώδιο διατομής 1.5mm^2 και η ακτίνα ίση με 0.9 αντιστοιχεί σε καλώδιο διατομής 2.5mm^2 .

Name	Expression	Value	Description
cable_radius	= 0.9	0.9	
Celement2	= 1e-12	1e-12	
Celement3	= 1.e-12	1.e-12	
Celement4	= 8.999999999999999e-11	8.999999999999999e-11	
Cone_Length	= 15	15	Length of tip cone
Disk1_Diameter	= 74	74	Diameter of Disk 1
Disk1_Length	= 10	10	Length of disk 1
Disk2_Diameter	= 120	120	Thickness of Disk 2
Disk2_Distance	= 6	6	Distance of Disk 2 from Disk 1
Disk2_Length	= 30	30	Length of Disk 2
Disk3_Diameter	= 20	20	Diameter of Disk 3
Disk3_Distance	= 20	20	Distance of Disk 3 from Disk 2
Disk3_Length	= 10	10	Length of Disk 3
DP_Length	= 12	12	Length of Discrete port
Element5_Length	= 8	8	
Handle_Height	= 2	2	Height of Handle
Handle_Length	= 49	49	Length of Handle
height	= 960	960	
Insu_Cylinder_Y_Center	= Disk2_Diameter/5	24	
Lelement5	= 1e-09	1e-09	
Load_Length	= 25	25	Length of load port
Plate	= 1300	1300	Plate side length
Plate_Thickness	= 3	3	Thickness of discharging plate
Relay_Diameter	= 30	30	Diameter of Relay
Relay_Distance	= 5	5	Distance of Relay from Disk 2
Relay_Length	= 60	60	Length of Relay
Relement2	= 100	100	
Relement3	= 200	200	
Relement4	= 20	20	150e12
Relement5	= 2	2	
Rise	= 0.86	0.86	
Strap1_Length	= 680	680	Length of Strap 1
Strap2_Length	= 500	500	Length of Strap2
Strap_Diameter	= 8	8	Diameter of Strap

Σχήμα 4.16 Παράθυρο Parameter List με τις παραμέτρους του πρώτου μοντέλου

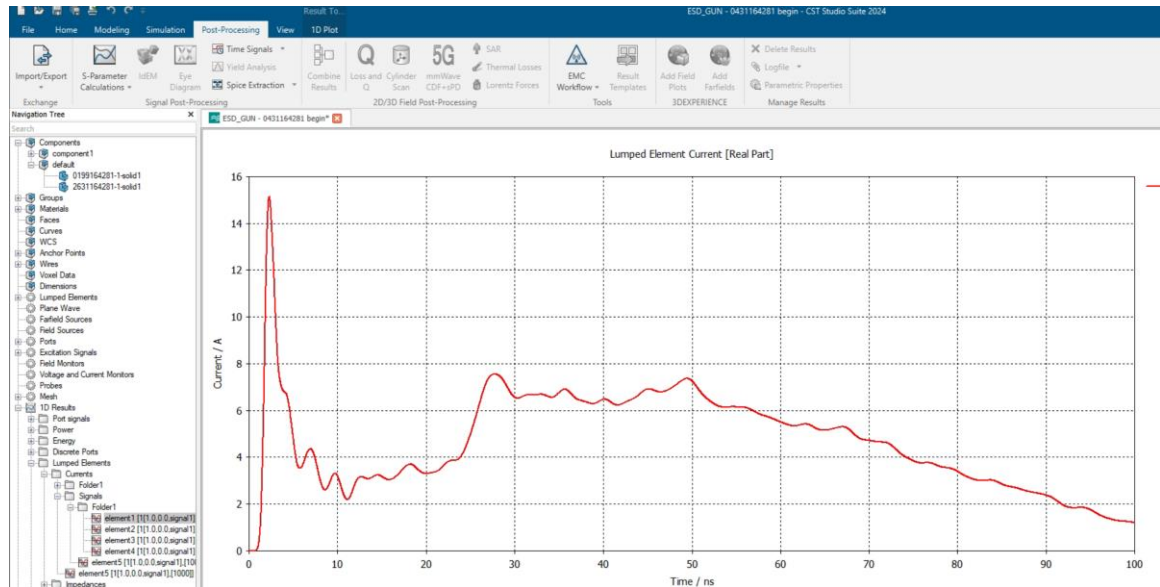
Name	Expression	Value	Description
cable_radius	= 2.1000000000000001	2.1000000000000001	
Celement2	= 1e-12	1e-12	
Celement3	= 5e-12	5e-12	
Celement4	= 1.4000000000000001e-10	1.4000000000000001e-10	
Cone_Length	= 15	15	Length of tip cone
Disk1_Diameter	= 95	95	Diameter of Disk 1
Disk1_Length	= 10	10	Length of disk 1
Disk2_Diameter	= 80	80	Thickness of Disk 2
Disk2_Distance	= 6	6	Distance of Disk 2 from Disk 1
Disk2_Length	= 35	35	Length of Disk 2
Disk3_Diameter	= 20	20	Diameter of Disk 3
Disk3_Distance	= 20	20	Distance of Disk 3 from Disk 2
Disk3_Length	= 10	10	Length of Disk 3
DP_Length	= 14	14	Length of Discrete port
Element5_Length	= 8	8	
Handle_Height	= 2	2	Height of Handle
Handle_Length	= 49	49	Length of Handle
height	= 960	960	
Insu_Cylinder_Y_Center	= Disk2_Diameter/2+8	48	
Lelement2	= 0	0	
Lelement3	= 0	0	
Lelement5	= 1e-09	1e-09	
Load_Length	= 39	39	Length of load port
Plate	= 1300	1300	Plate side length
Plate_Thickness	= 3	3	Thickness of discharging plate
Relay_Diameter	= 30	30	Diameter of Relay
Relay_Distance	= 5	5	Distance of Relay from Disk 2
Relay_Length	= 60	60	Length of Relay
Relement2	= 100	100	
Relement3	= 200	200	
Relement4	= 50	50	150e12
Relement5	= 50	50	
Rise	= 1	1	

Σχήμα 4.17 Παράθυρο Parameter List με τις παραμέτρους του δεύτερου μοντέλου

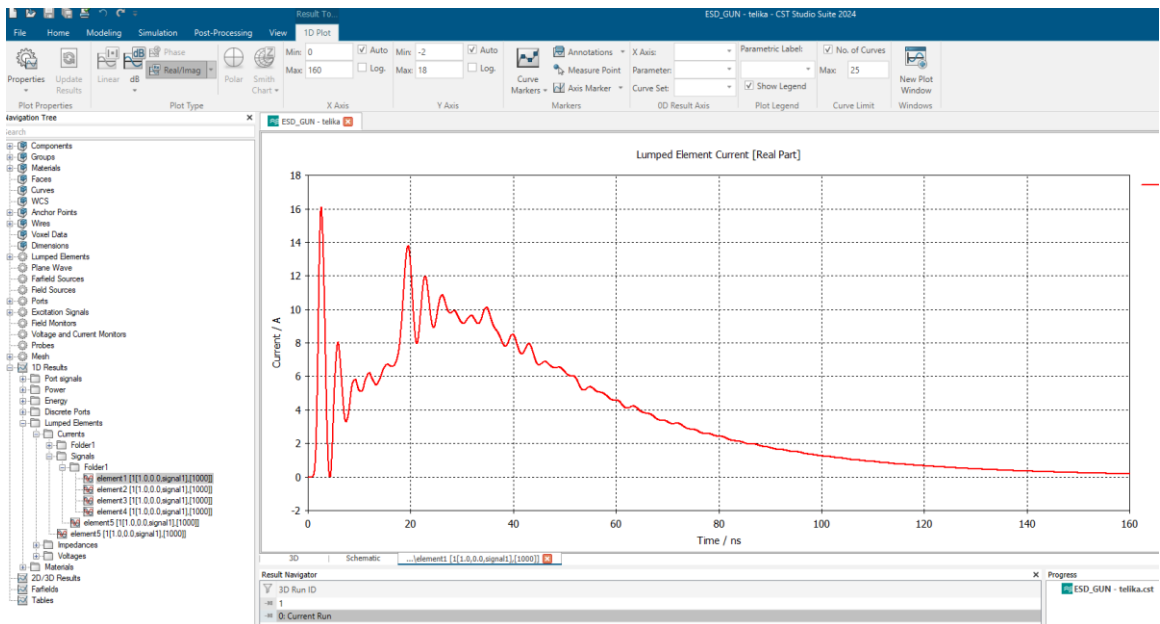
Αλλάζοντας τις διαστασιολογικές παραμέτρους του μοντέλου, μπορούμε να επηρεάσουμε το ρεύμα εκφόρτισης της προσομοιούμενης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, συνεπώς και την εξεταζόμενη κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης.

4.2 Λήψη και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Επιλέγοντας την εντολή “Start Simulation” του Home Menu η προσομοίωση «τρέχει». Αφού «ολοκληρωθεί» η προσομοίωση στο CST, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξαγάγει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν και θα επεξεργαστούμε είναι αυτά που ανιχνεύτηκαν από την «μύτη» του στόχου ρεύματος.



Σχήμα 4.18 Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης πρώτου μοντέλου χωρίς την παρουσία φερριτή που καταγράφηκε από τον στόχο ρεύματος.



Σχήμα 4.19 Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης δεύτερου μοντέλου χωρίς την παρουσία φερριτή που καταγράφηκε από τον στόχο ρεύματος.

Επιλέγοντας από τους κλάδους “1D Results” → “Lumped Elements” → “Currents” → “Folder 1” → “Signals” → “Folder 1” και την εικόνα του “element 1”, μπορούμε να δούμε την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης που κατέγραψε ο στόχος ρεύματος (Σχήμα 4.18, Σχήμα 4.19).

Έπειτα με την επιλογή του “Import/Export” μπορούμε να εξάγουμε την κυματομορφή αυτή σε αρχείο txt.

4.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων από τις κυματομορφές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αναπτύχθηκε πρόγραμμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB για την άμεση και αυτοματοποιημένη μέθοδο επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων αυτών. Με το πρόγραμμα έχουμε τη δυνατότητα να ανακατασκευάσουμε την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης της κάθε προσομοίωσης καθώς και το φασματικό της περιεχόμενο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το πρόγραμμα σε MATLAB.

Αρχικά το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει τον τίτλο του γραφήματος.

```
prompt = 'Enter the title for the plot: ';  
userInput = input(prompt, 's');
```

Στη συνέχεια εισάγει τα αρχεία δεδομένων που βρίσκονται στον ίδιο φάκελο με το πρόγραμμα.

```
P=cd;  
S = dir(fullfile(P, '*.txt'));  
Numberoffiles=numel(S);  
  
for u = 1:numel(S);  
    [first second third]=fileparts(S(u).name);  
    LL(u).name=second;  
  
end  
  
for u = 1:numel(S);  
    PS(S(u).name)  
  
End
```

Έπειτα, ακολουθεί ο ορισμός των λεζάντων των δύο γραφικών παραστάσεων.

```
figure (1)  
title(userInput);  
xscale log;  
yscale log;  
grid on;
```

```

set(gcf, 'Position',[20 100 900 600]);
set(gca, 'fontsize',14);
xlim([1e7 1e9]);
xlabel("Frequency (Hz)")
ylabel("Current spectrum (A)")
legend(LL.name);
print(gcf, '-dtiff', 'Spectrum.tiff');

```

```

figure (2)
title(userInput);
%yscale log;
grid on;
set(gcf, 'Position',[1000 100 900 600]);
set(gca, 'fontsize',14);
%xlim([1e7 1e9]);
xlabel("Time (ns)")
ylabel("Current (A)")
legend(LL.name);
print(gcf, '-dtiff', 'Current.tiff');

```

Ο μετασχηματισμός Fourier για το ρεύμα πραγματοποιείται με τις ακόλουθες εντολές:

```

function [] = PS(x)

atten=10;
Init=readtable(x);
Ain1=Init.Var2;
time=1e-9*Init.Var1;

L=length(time);
K=time(L)-time(1);
Fs=L/K;

n = 2^nextpow2(L);
Adft = fft(Ain1,n);
Adft = Adft(1:n/2+1);
psdx = (1/(Fs*n)) * abs(Adft).^2;
psdx(2:end-1) = 2*psdx(2:end-1);
f = 0:Fs/n:Fs/2;

```

Τέλος, εμφανίζει τις κυματομορφές φάσματος και ρεύματος:

```

figure (1)
plot(f,psdx, 'LineWidth', 1.5);

hold on;

figure (2)
plot(1e9*time,Ain1, 'LineWidth', 1.5);

hold on
end

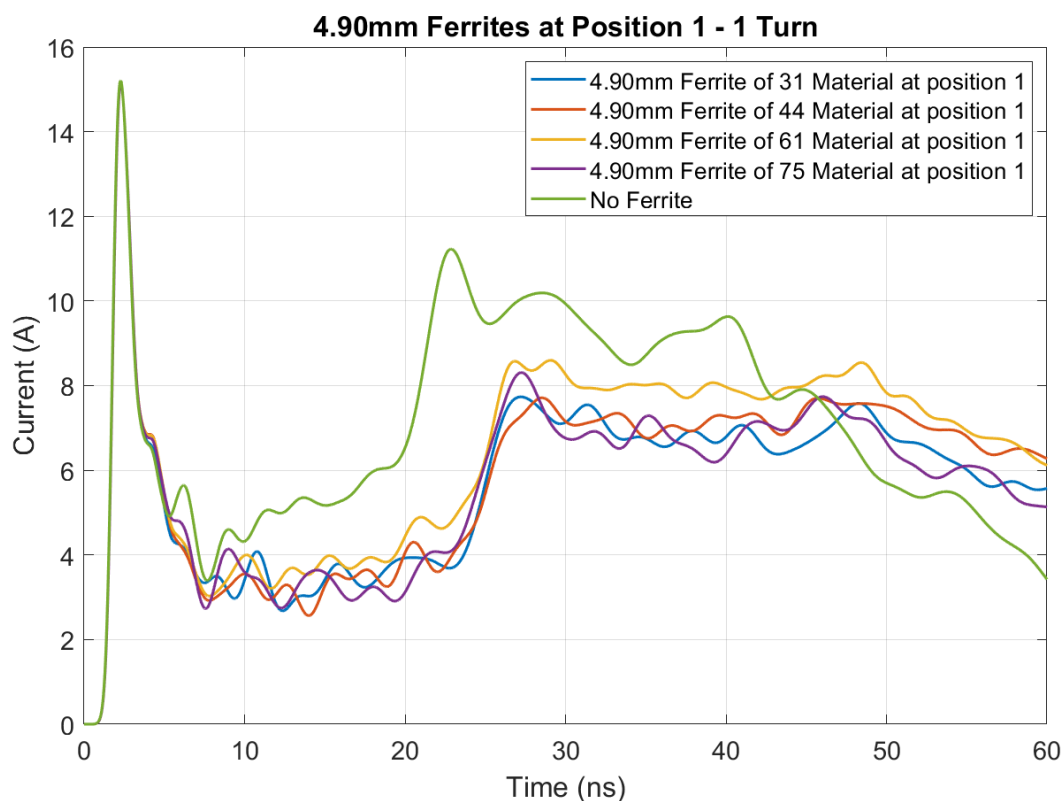
```

4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

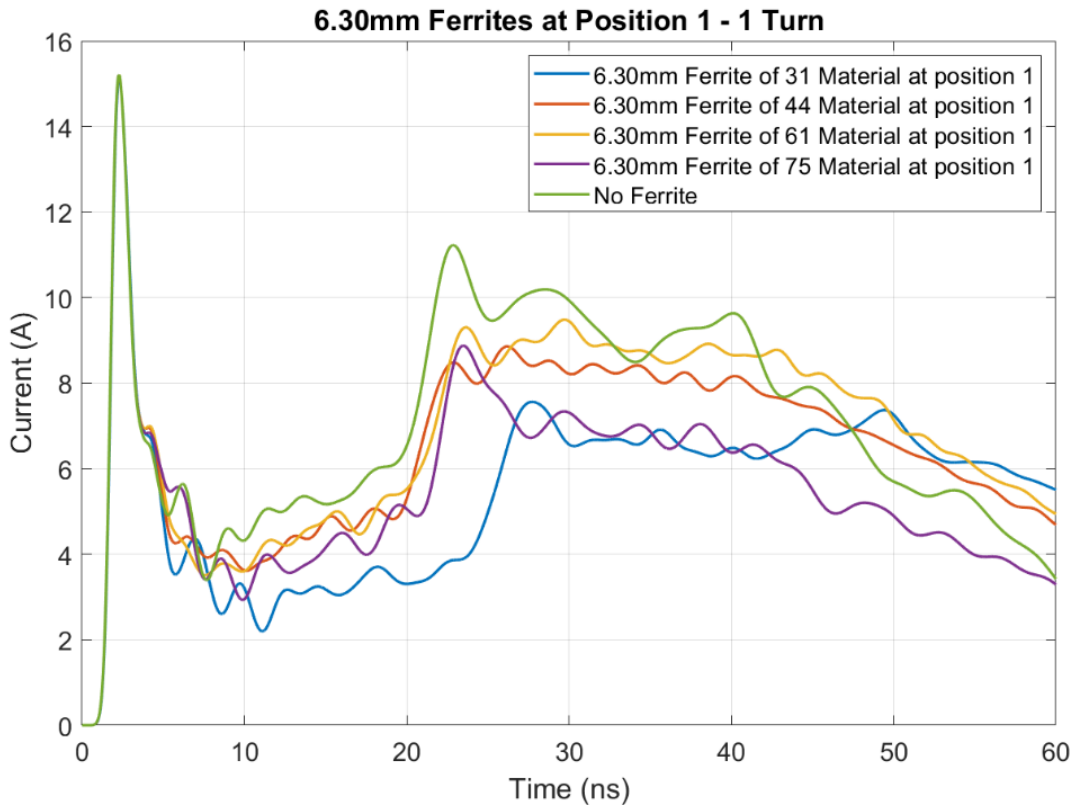
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν, σε μορφή γραφημάτων, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Προσομοιώθηκε η επίδραση της χρήσης φερριτών στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος, σε δύο μοντέλα γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στο επίπεδο +4kV. Οι προσομοιώσεις του πρώτου μοντέλου ήταν ιδιαίτερα περίπλοκες και χρονοβόρες, οπότε περιορίστηκαν μέχρι τα 60ns, διάστημα που είναι και το κύριο σημείο ενδιαφέροντος. Αφού εξάγαμε κάποια συμπεράσματα, πραγματοποιήσαμε και κάποιες προσομοιώσεις του δεύτερου μοντέλου έως τα 160ns με την χρήση 4 φερριτών διαμέτρου 4.90mm.

4.3.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων πρώτου μοντέλου

Αρχικά, παρουσιάζονται τα γραφήματα ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1 (Position 1). Στις προσομοιώσεις αυτές το καλώδιο έχει διατομή 2.5mm^2 και είναι περασμένο μέσα από τον φερρίτη σε διάταξη μίας σπείρας (1Turn).



Σχήμα 4.20 Γράφημα ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1



Σχήμα 4.21 Γράφημα ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 6.30mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1

Παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις εισαγωγής φερρίτη, μετατόπιση της δεύτερης κορυφής σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπάρχει φερρίτης. Η μετατόπιση της δεύτερης κορυφής είναι αναμενόμενη λόγω της αύξησης της αυτεπαγωγής του καλωδίου με την προσθήκη του φερρίτη. Αναμενόμενη, ακόμη, αλλά και επιθυμητή είναι η μηδενική επίδραση στην πρώτη κορυφή. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους: 1) Το φασματικό περιεχόμενο της πρώτης κορυφής, λόγω του μικρού χρόνου ανόδου, περιλαμβάνει συχνότητες αρκετά υψηλότερες από τις συχνότητες επίδρασης του φερρίτη και 2) Το ρεύμα της πρώτης κορυφής δεν διαρρέει το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος και ρέει μέσω της «μύτης» της γεννήτριας προς τη γη.

Παρόμοιος είναι ο λόγος, για τον οποίο ο φερριτής τύπου material 61 δείχνει να έχει την λιγότερη εξασθένηση σε σχέση με τους υπόλοιπους, Το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του είναι υψηλότερο από τις συχνότητες ενδιαφέροντος, οι οποίες όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο περιορίζονται στο εύρος 40MHz-200MHz.

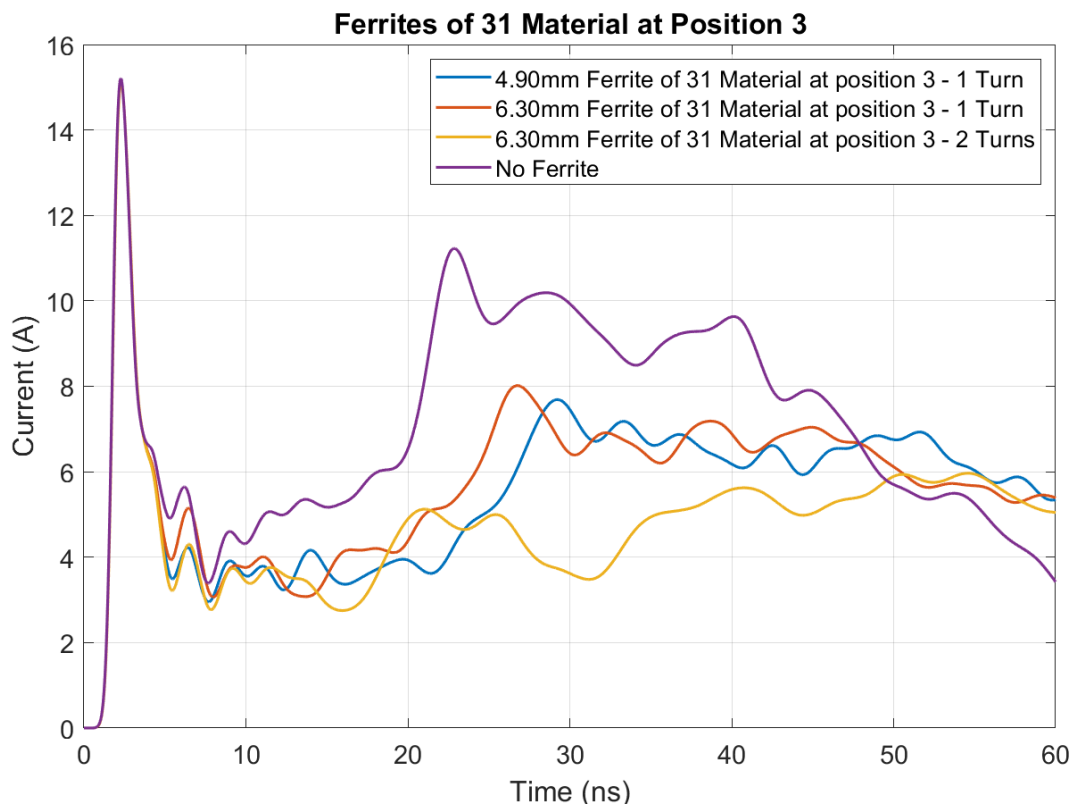
Από την άλλη πλευρά, η αύξηση της τιμής του ρεύματος κατά την εισαγωγή φερρίτη τη χρονική στιγμή $t=60\text{ns}$ οφείλεται, εν μέρει στην μετατόπιση της κυματομορφής λόγω της αύξησης της επαγωγής του καλωδίου. Οφείλεται, επιπροσθέτως, στο γεγονός ότι η παρουσία φερρίτη δημιουργεί παρασιτικές χωρητικότητες στο σύστημα που εξετάζεται, οι

οποίες επηρεάζουν πτωτικά την κυματομορφή κατά το χρονικό διάστημα 10ns έως 40ns και την επηρεάζουν ανοδικά κατά το χρονικό διάστημα 40ns έως 60ns.

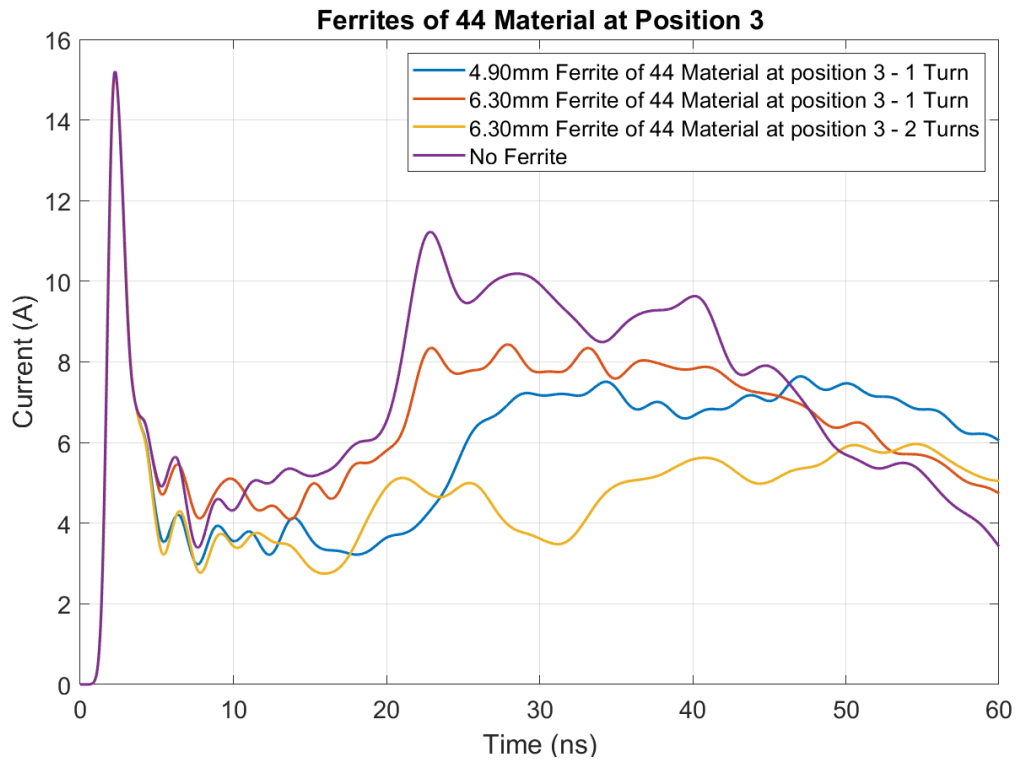
Ήδη από τα πρώτα αποτελέσματα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η χρήση των φερριτών επηρεάζει αισθητά τη μορφή της κυματομορφής μετά τα 10ns, επιδρώντας διαφορετικά στο εύρος 10ns~45ns και στο τμήμα >45ns.

Οι διαφορετικοί τύποι υλικού, καθώς και η ποσότητα του υλικού σε κάθε φερρίτη (διαφορετικής διαμέτρου φερρίτες), οδηγούν σε διαφορετικές τιμές αυτεπαγωγής και παρασιτικών χωρητικότητων. Αυτός είναι και ο λόγος, για τον οποίο παρατηρούνται αποκλίσεις στα αποτελέσματα μεταξύ των κυματομορφών διαφορετικών φερριτών και ειδικότερα στη μετατόπιση της δεύτερης κορυφής σε σχέση με την αρχική (χωρίς φερρίτη).

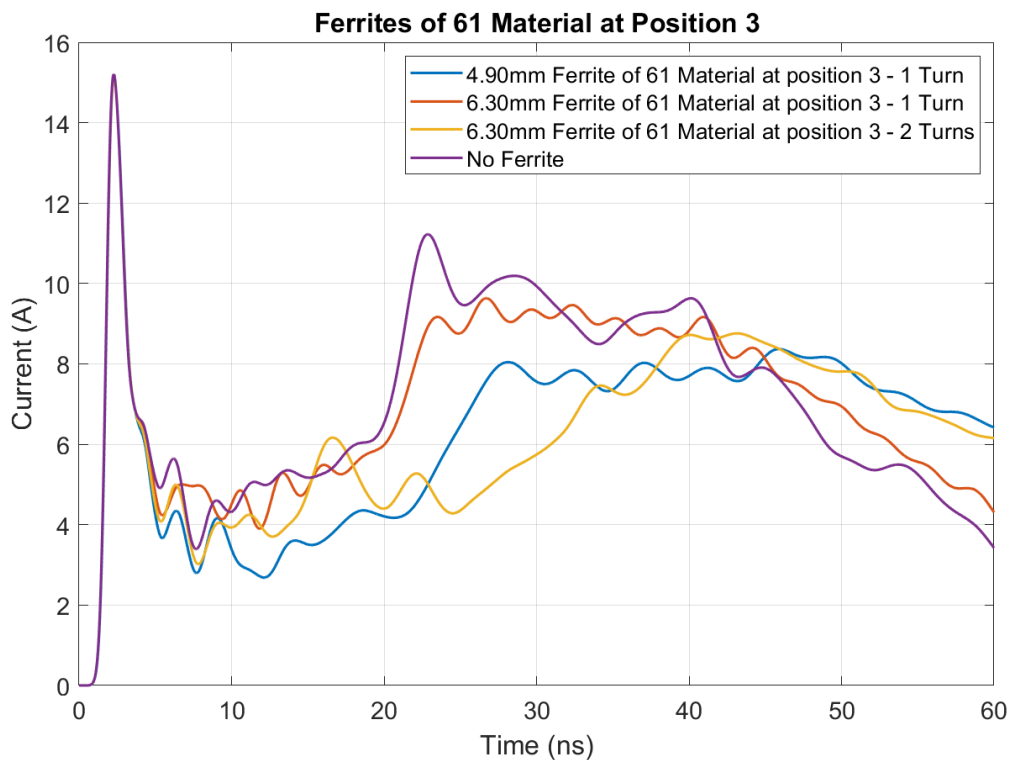
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γραφήματα ρεύματος με τη χρήση κάθε είδους φερρίτη διαμέτρου 4.90mm με μία σπείρα του καλωδίου (1 Turn) και 6.30mm με μία και δύο σπείρες του καλωδίου (2 Turns) στη θέση 3. Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το καλώδιο έχει προσομοιωθεί με διατομή 2.5mm^2 .



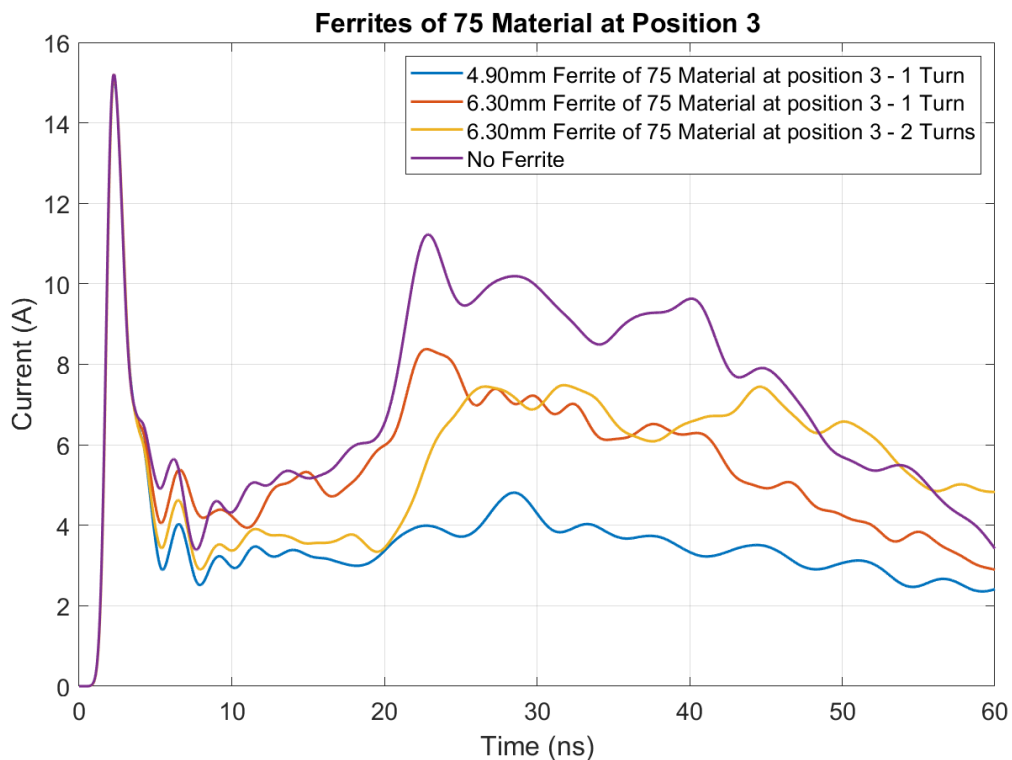
Σχήμα 4.22 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερριτών 31 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(με 1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3



Σχήμα 4.23 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 44 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(με 1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3



Σχήμα 4.24 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 61 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm(1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3

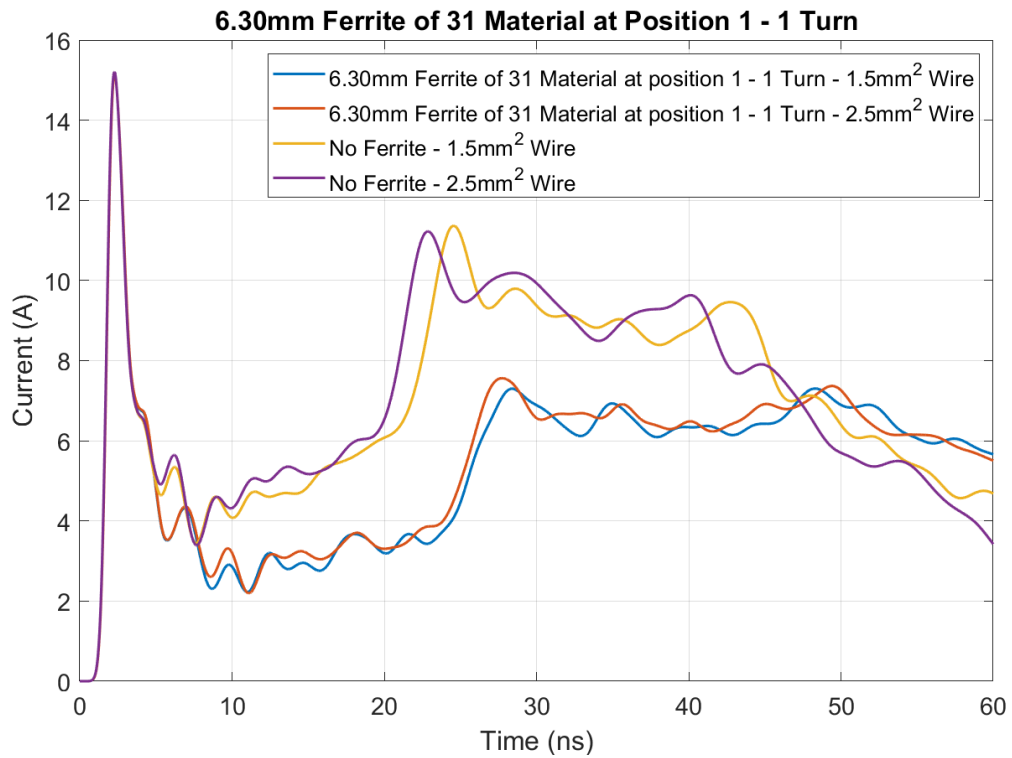


Σχήμα 4.25 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτών 75 Material διαμέτρου 4.90mm και 6.30mm (με 1 και 2 σπείρες του καλωδίου) στη θέση 3

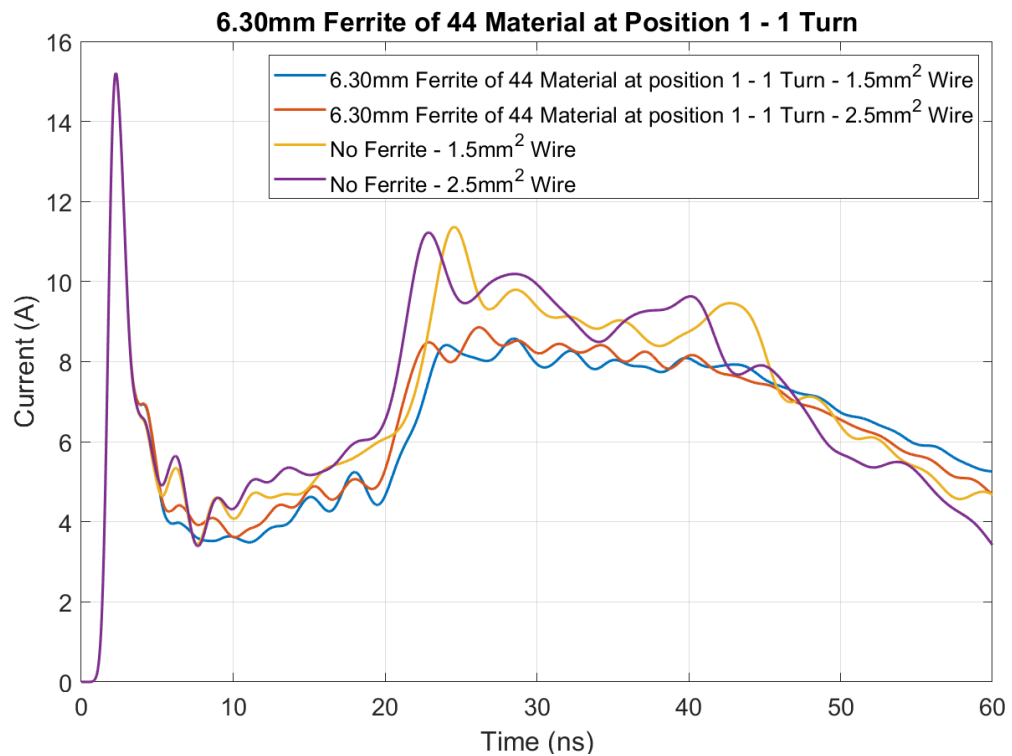
Επιβεβαιώνεται με την απόκλιση των αποτελεσμάτων από φερριτές ίδιου υλικού αλλά διαφορετικού πάχους, ότι διαφορετικό πάχος φερριτή, το οποίο συνεπάγεται διαφορετική ποσότητα υλικού οπότε και διαφορετικές τιμές αυτεπαγωγής, προκαλεί και διαφορετική μετατόπιση της κυματομορφής. Παρατηρείται, επίσης, η μειωμένη μετατόπιση της κυματομορφής του φερριτή υλικού 44 σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί η σημαντική επίδραση στην εξασθένιση του ρεύματος στο εύρος 10ns-40ns του αριθμού των σπειρών, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί για την περιέλιξη του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος εντός του φερριτή. Για όλα τα υλικά η αύξηση των σπειρών οδηγεί σε αισθητή μείωση του ρεύματος, αποτέλεσμα αναμενόμενο με βάση τα Σχήματα 2.16, στα οποία παρουσιάζεται η γεωμετρική αύξηση της εμπέδησης, και κατά συνέπεια της αντίστασης του φερριτή, για χρήση παραπάνω των 1 σπειρών. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η χρήση τέτοιων διατάξεων (αριθμός σπειρών >1) θα οδηγήσουν σε μη επιθυμητή εξασθένιση της κυματομορφής και πιθανώς μη συμμόρφωσή της με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2.

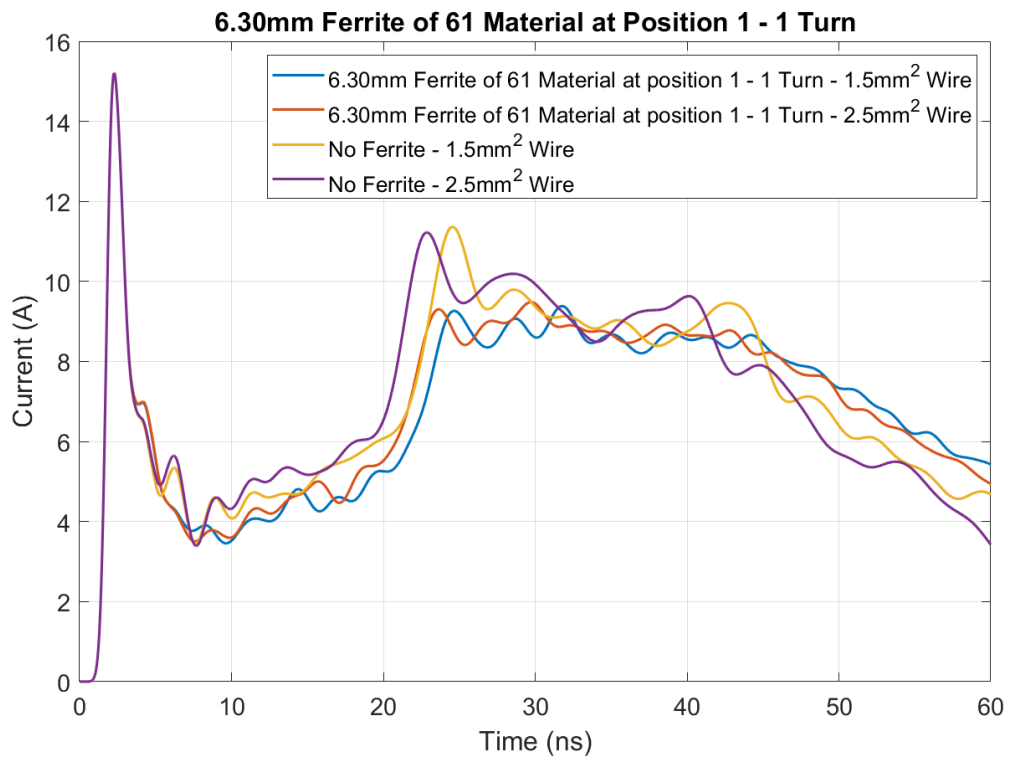
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα γραφήματα ρεύματος εκφόρτισης χωρίς την παρουσία φερριτή και με τη χρήση κάθε είδους φερριτή διαμέτρου 6.30mm στη θέση 1. Ακόμη, στις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιείται καλώδιο διατομής 1.5mm² και καλώδιο διατομής 2.5mm² και μία σπείρα του καλωδίου (1 Turn).



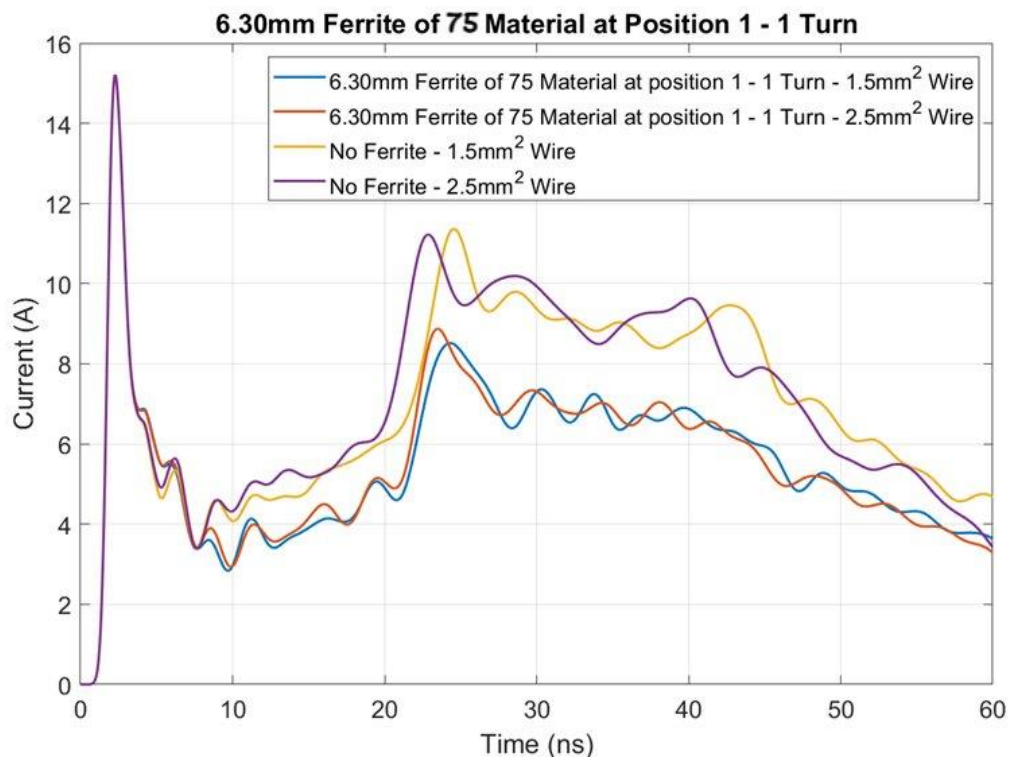
Σχήμα 4.26 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm² και 2.5mm² στη θέση 1



Σχήμα 4.27 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm² και 2.5mm² στη θέση 1



Σχήμα 4.28 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm² και 2.5mm² στη θέση 1



Σχήμα 4.29 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 6.30mm και καλώδιο 1.5mm² και 2.5mm² στη θέση 1

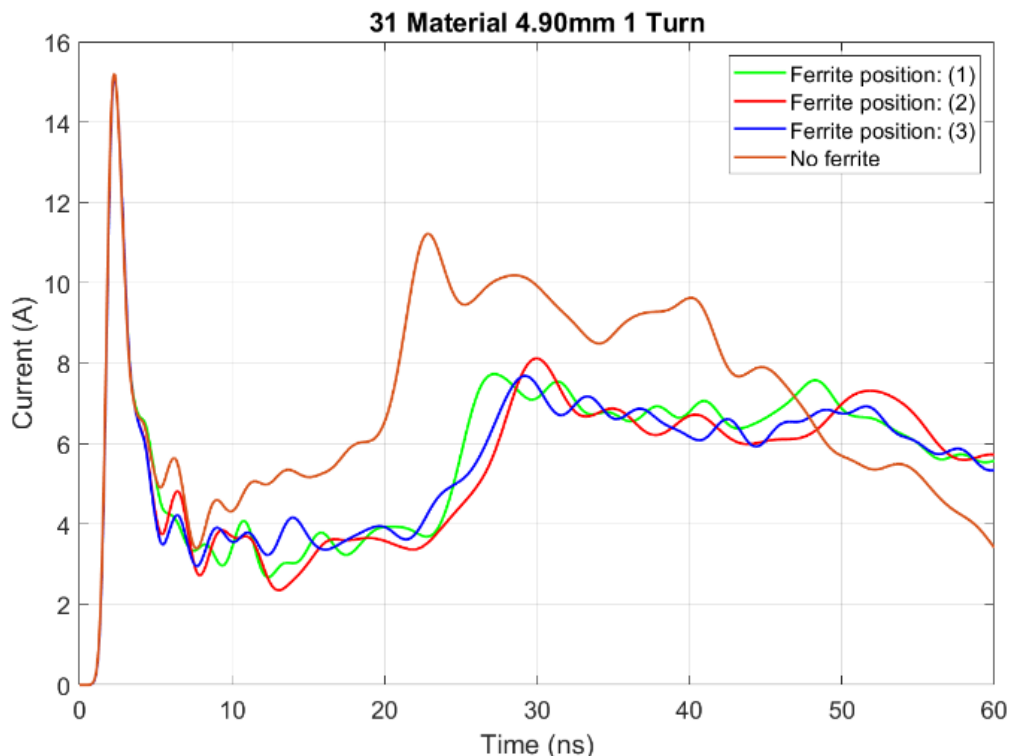
Παρατηρείται η επίδραση της διατομής του καλωδίου στα αποτελέσματα. Όσο αυξάνεται η διατομή του καλωδίου, μειώνονται οι τιμές αυτεπαγωγής, με συνέπεια να μειώνεται και η μετατόπιση της κυματομορφής (Εξίσωση 4.1 [51] για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής αγωγού πάνω από επίπεδο). Συνεπώς, αναμενόμενη είναι η μετατόπιση της κυματομορφής καλωδίου διατομής 1.5mm^2 σε σχέση με την αντίστοιχη καλωδίου 2.5mm^2 .

$$L_{\text{αγωγού}} \approx \frac{\mu_0 \mu_r L}{2\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{H}{R} \right) \quad [4.1]$$

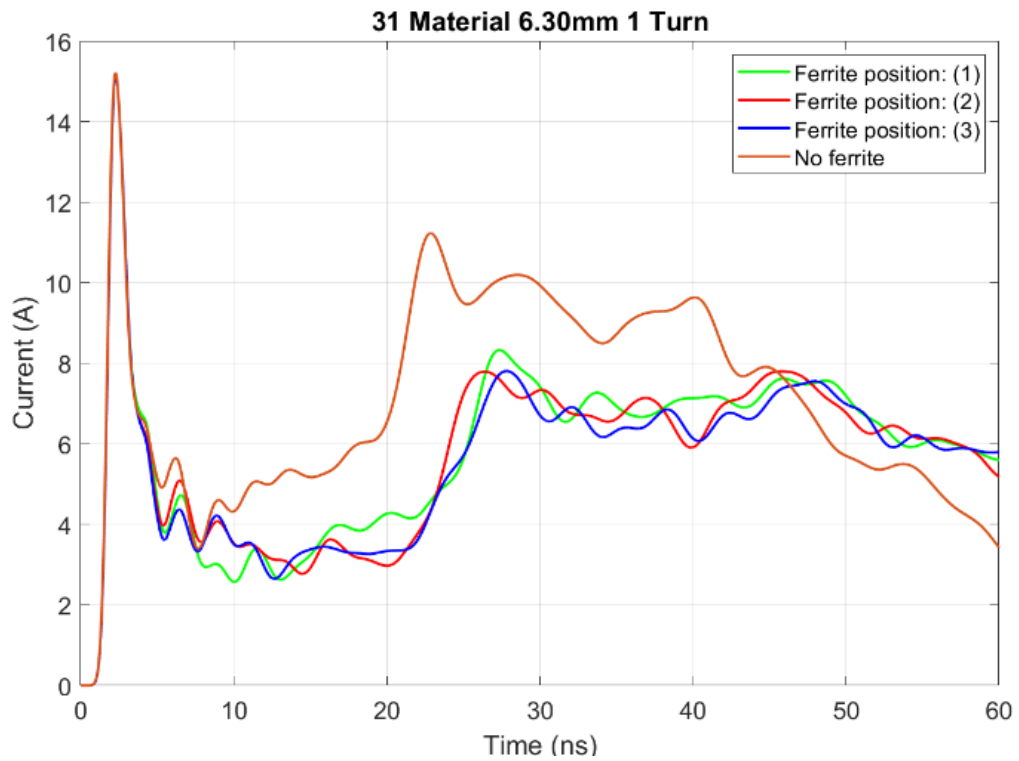
όπου μ_0 η διαπερατότητα του κενού, μ_r η σχετική διαπερατότητα, R η ακτίνα του αγωγού, H η απόσταση του κέντρου του αγωγού από το επίπεδο και L το μήκος του αγωγού.

Με την προσθήκη του φερρίτη, η μετατόπιση των κυματομορφών των δύο διαφορετικών καλωδίων μειώνεται σε σχέση με την μετατόπιση που παρατηρείται στα δύο διαφορετικά καλώδια χωρίς φερρίτη. Αυτό συμβαίνει, καθώς η αυτεπαγωγή του φερρίτη είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την αυτεπαγωγή του καλωδίου, οπότε υπερισχύει. Παρατηρούμε, ακόμη, ότι η εξασθένηση του ρεύματος με τη χρήση φερρίτη δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της διατομής του καλωδίου.

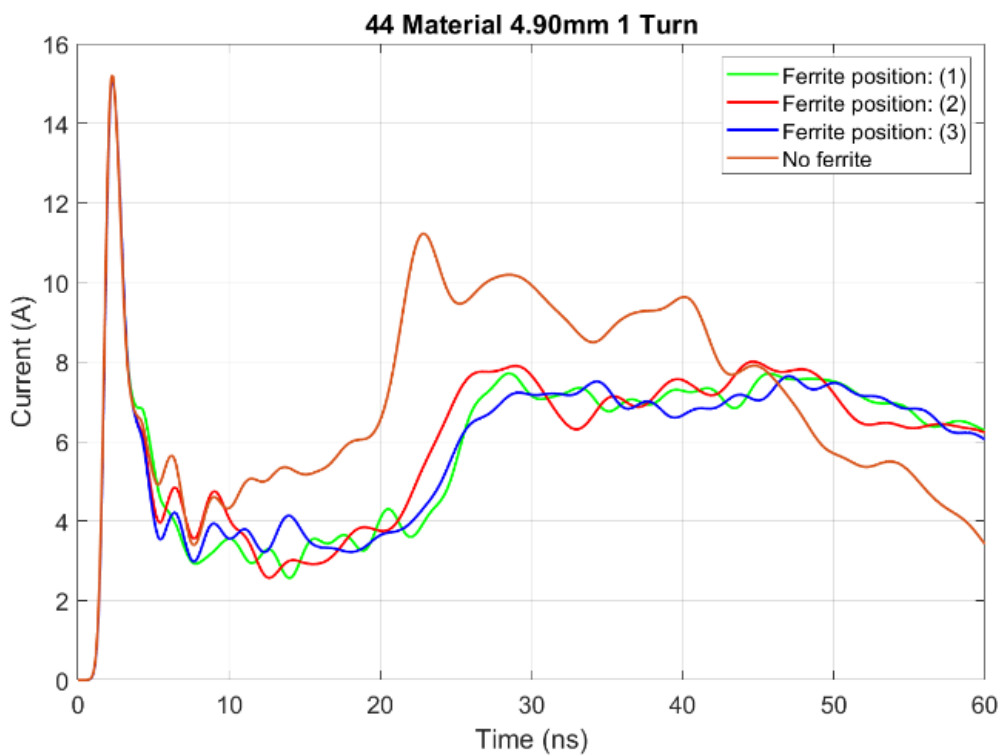
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα γραφήματα ρεύματος εκφόρτισης χωρίς την παρουσία φερρίτη και με τη χρήση κάθε είδους φερρίτη διαφορετικής διαμέτρου στις 3 θέσεις. στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το καλώδιο έχει διατομή 2.5mm^2 και διέρχεται χωρίς επιπλέον σπείρες από τον φερρίτη (1Turn).



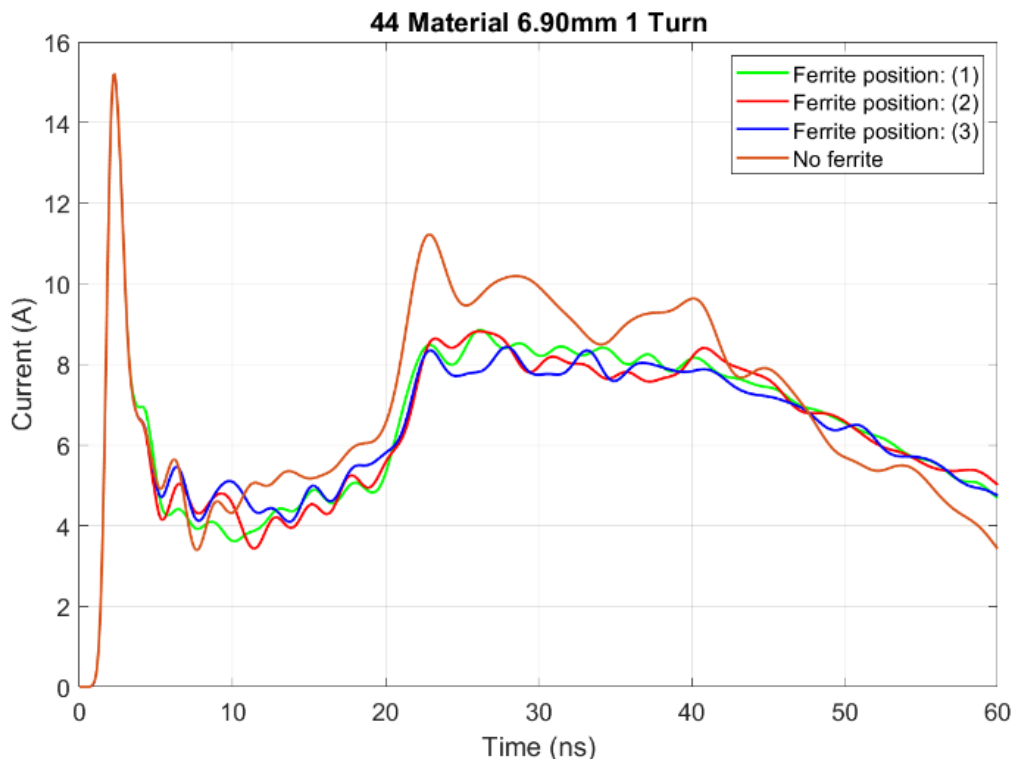
Σχήμα 4.30 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 31 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3



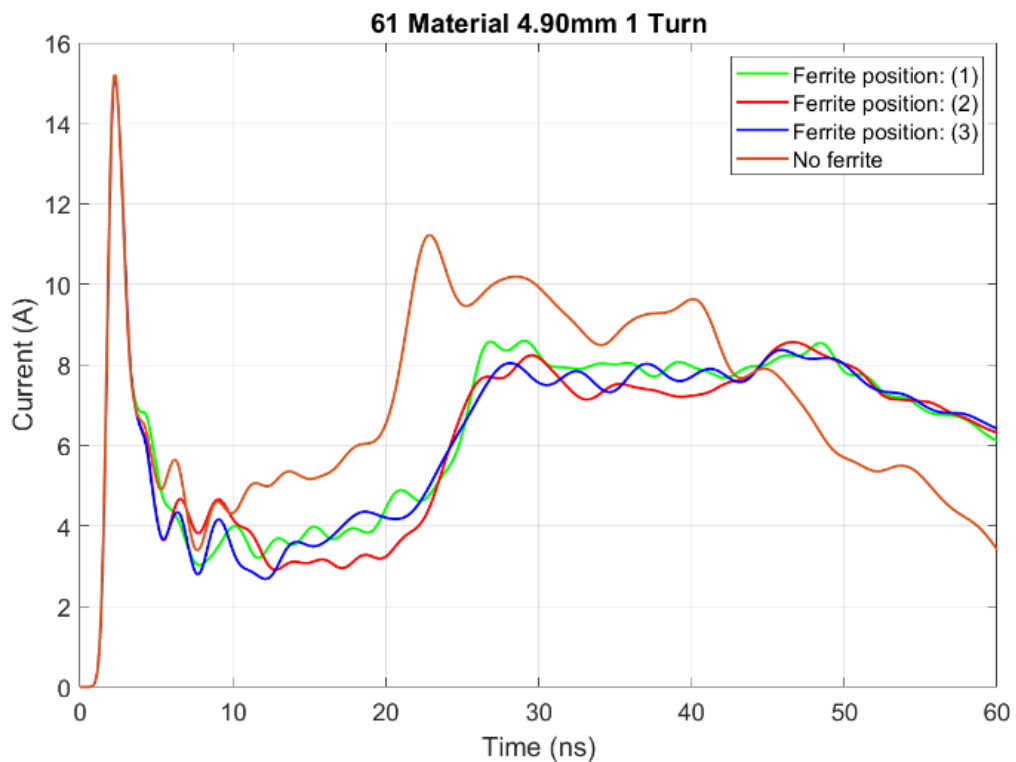
Σχήμα 4.31 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 31 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3



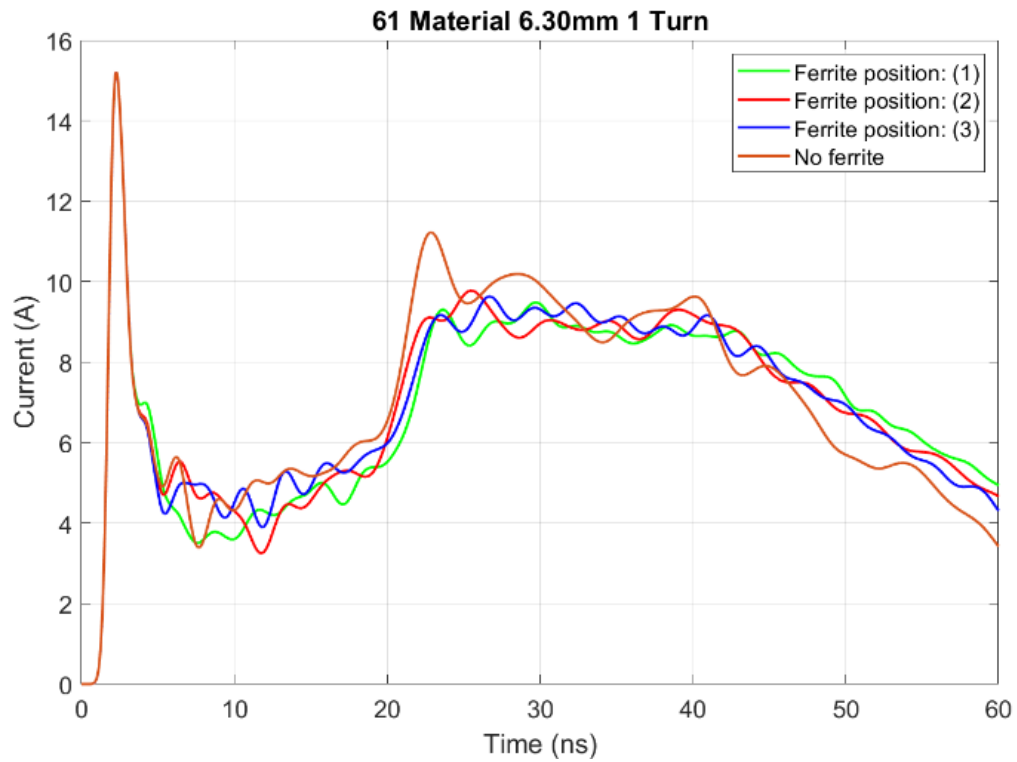
Σχήμα 4.32 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 44 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3



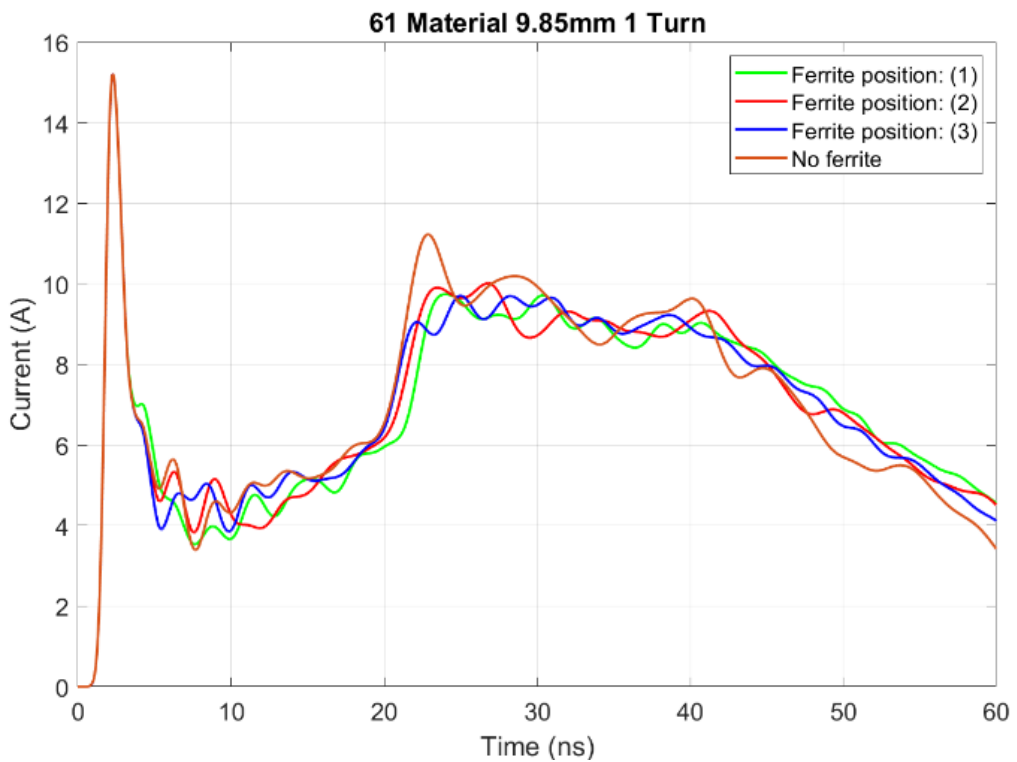
Σχήμα 4.33 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3



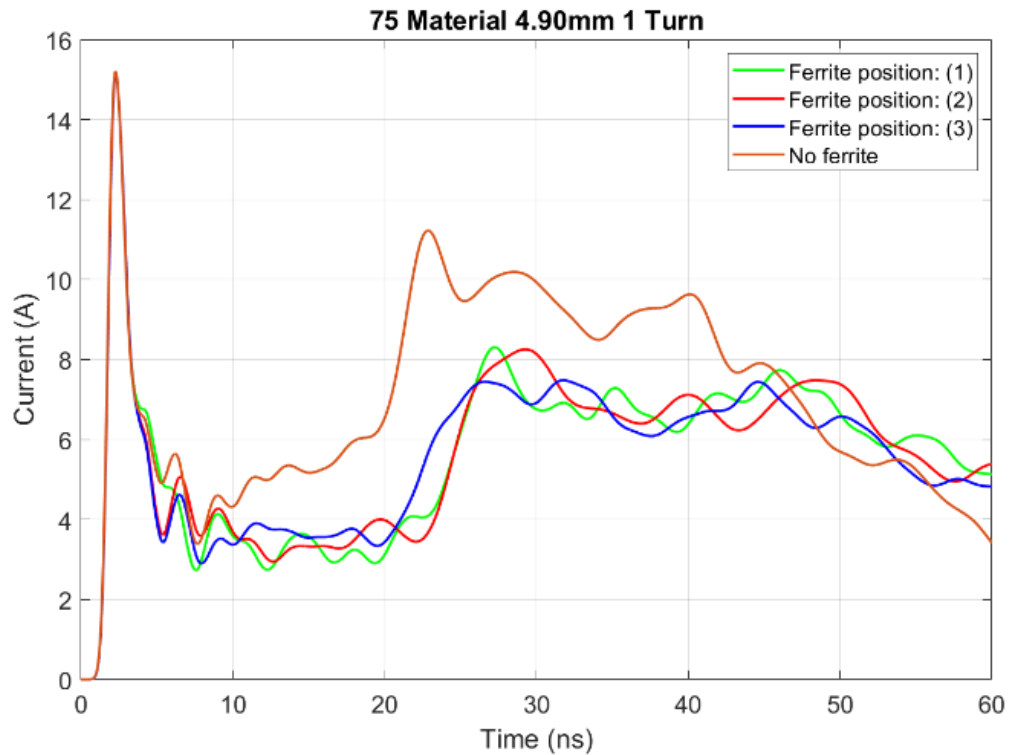
Σχήμα 4.34 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3



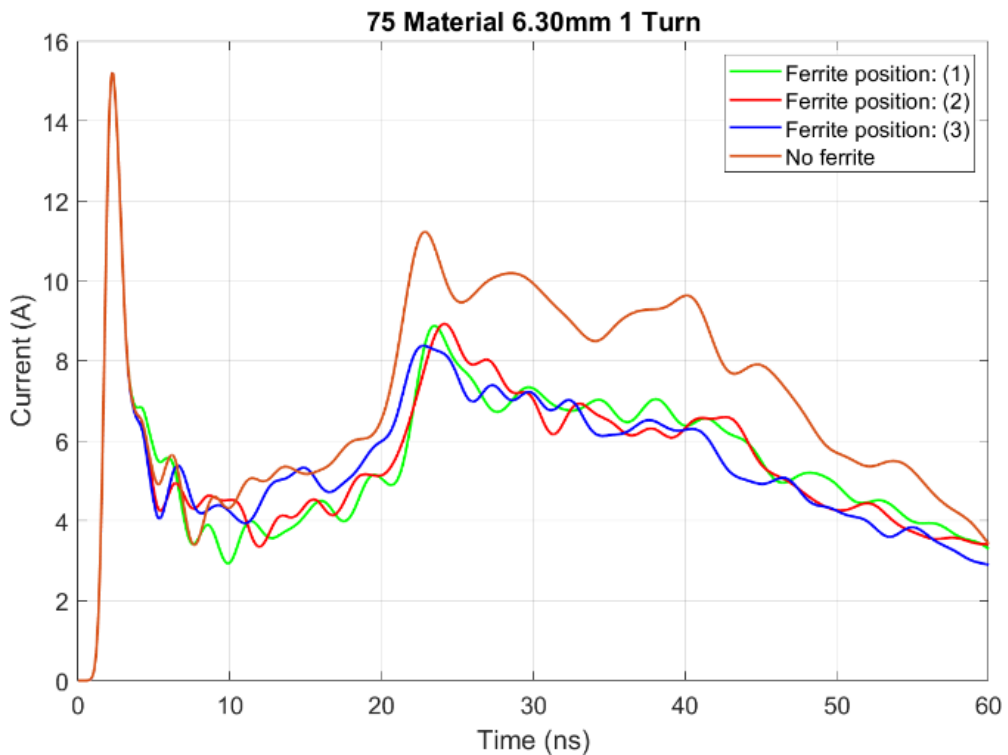
Σχήμα 4.35 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 61 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3



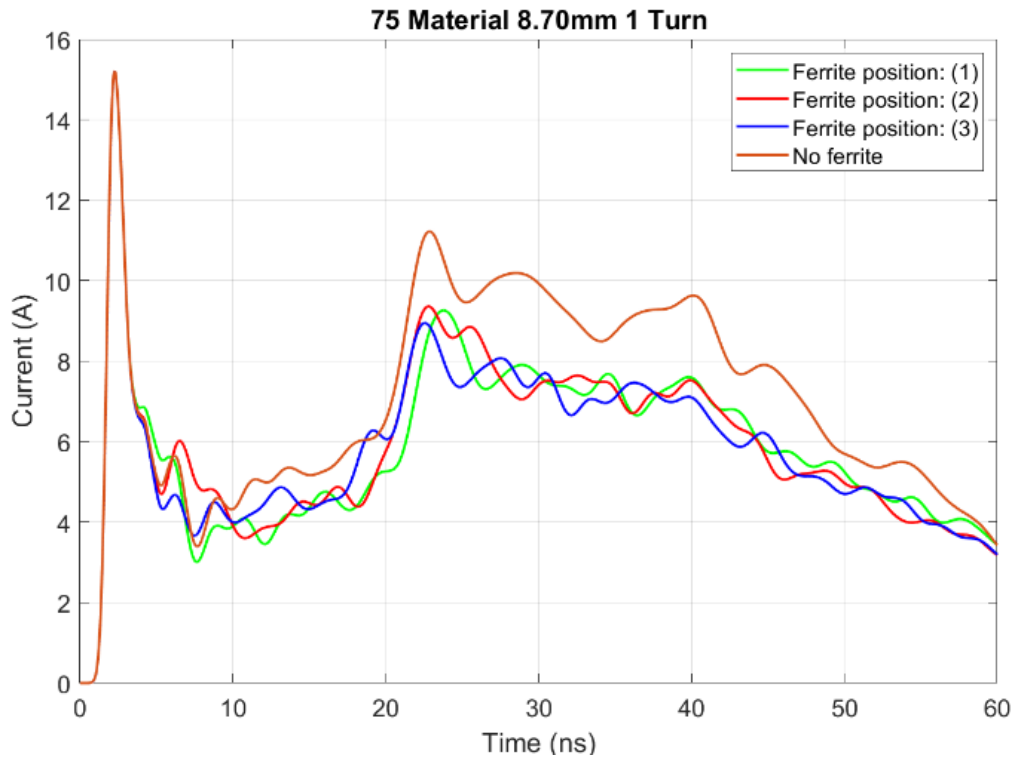
Σχήμα 4.36 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 61 Material διαμέτρου 9.85mm στις θέσεις 1,2,3



Σχήμα 4.37 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1,2,3



Σχήμα 4.38 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 6.30mm στις θέσεις 1,2,3

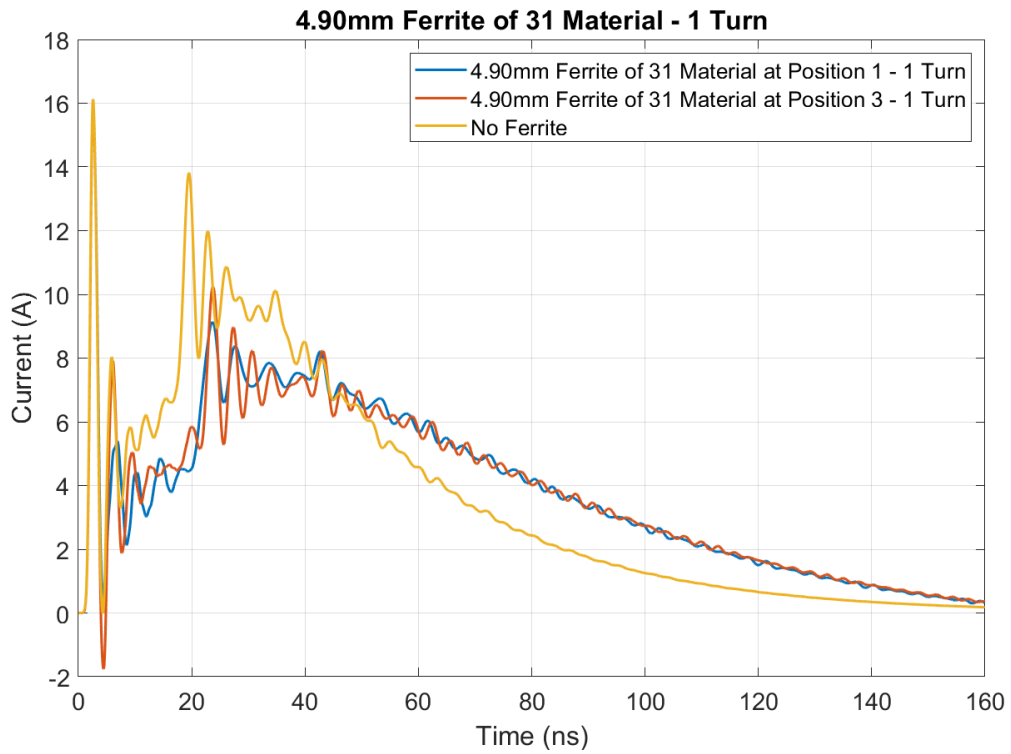


Σχήμα 4.39 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 75 Material διαμέτρου 8.70mm στις θέσεις 1,2,3

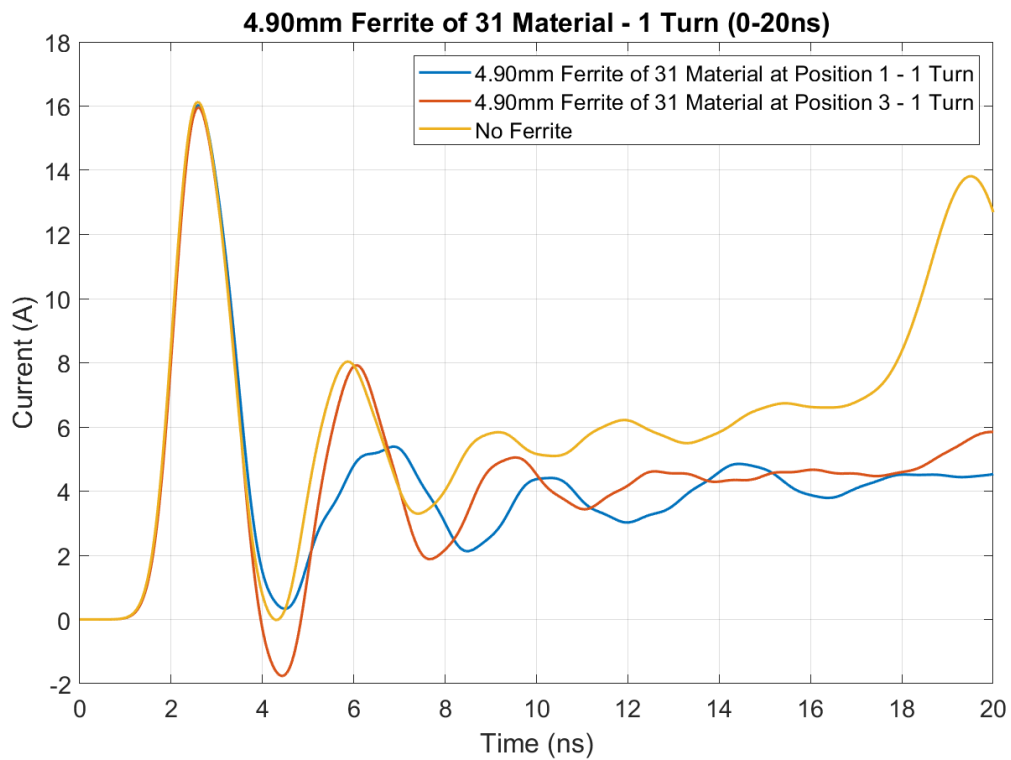
Παρατηρείται, ότι δεν προκύπτει σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων με την αλλαγή του σημείου τοποθέτησης του φερρίτη.

4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων δεύτερου μοντέλου

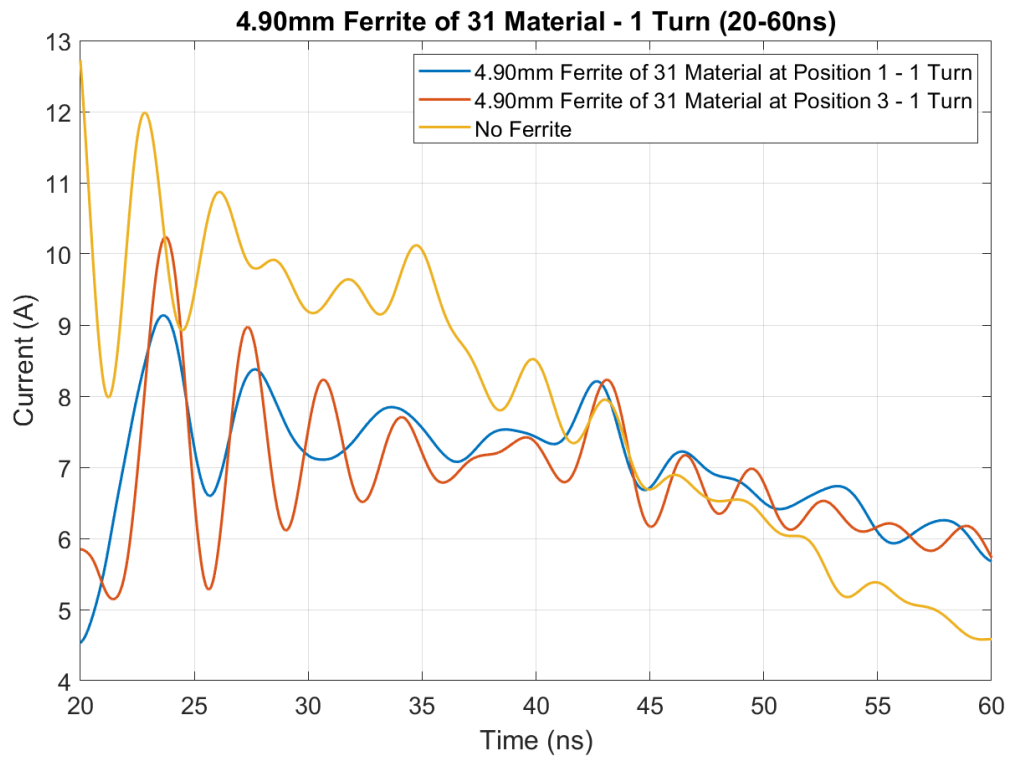
Το δεύτερο μοντέλο που μελετήθηκε έχει διαμορφωθεί με βάση τις πραγματικές κυματομορφές εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO της εταιρίας EMTEST [52]. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm χωρίς παρουσία φερρίτη από 0 έως 160ns. Παρατίθενται, επιπλέον, σε μεγέθυνση οι κυματομορφές ρεύματος στο εύρος 0-20ns και στο εύρος 20ns-60ns, με στόχο την ενδελεχότερη μελέτη των χρονικών περιοχών ενδιαφέροντος. στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις το καλώδιο (συμπεριλαμβανομένης της μόνωσής του) έχει διάμετρο ίση με 4mm και διέρχεται χωρίς επιπρόσθετη συσπείρωση (1Turn) μέσω του φερρίτη. Η επιλογή της διαμέτρου του φερρίτη έγινε με κριτήριο την πιο πρακτική εφαρμογή του φερρίτη στο καλώδιο έτσι να εφαρμόζει χωρίς δυνατότητα εύκολης και ακούσιας μετακίνησης του. Λόγω της διαμέτρου του καλωδίου και της καμπύλης του στο μέσο του μήκους του ήταν δύσκολη η τοποθέτηση του φερρίτη στο σημείο αυτό, οπότε εξετάζεται η επίδραση του φερρίτη μόνο στις θέσεις 1 και 3. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας 4.3.1 δεν αναμένονται διαφορετικά αποτελέσματα για τη θέση 2.



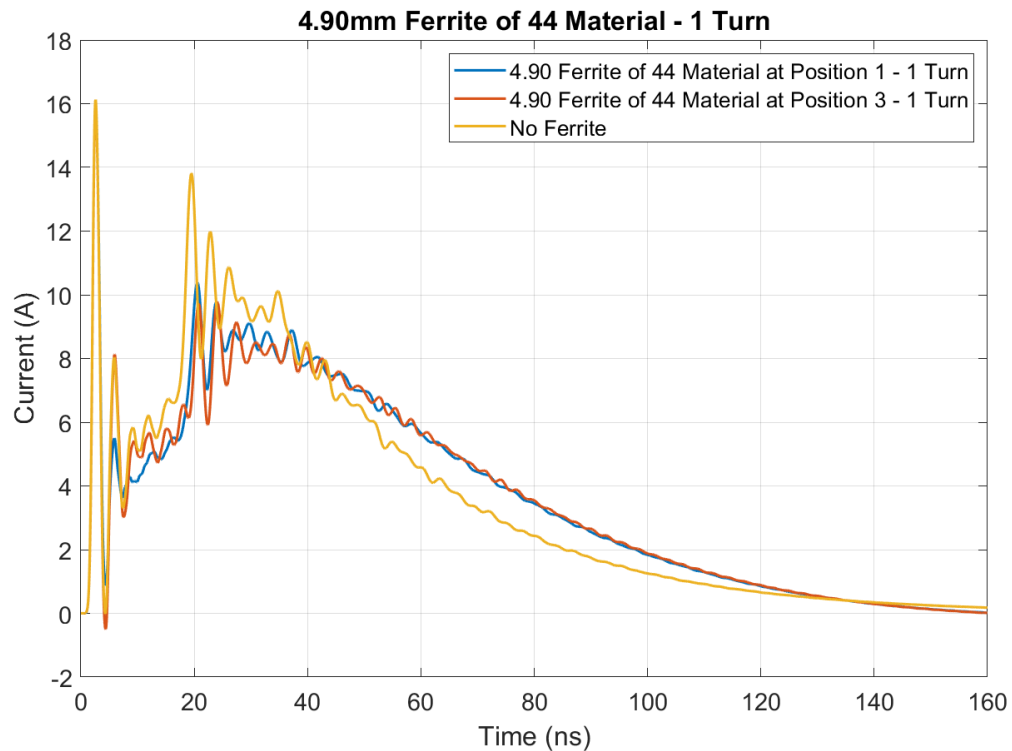
Σχήμα 4.40 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση 31 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns



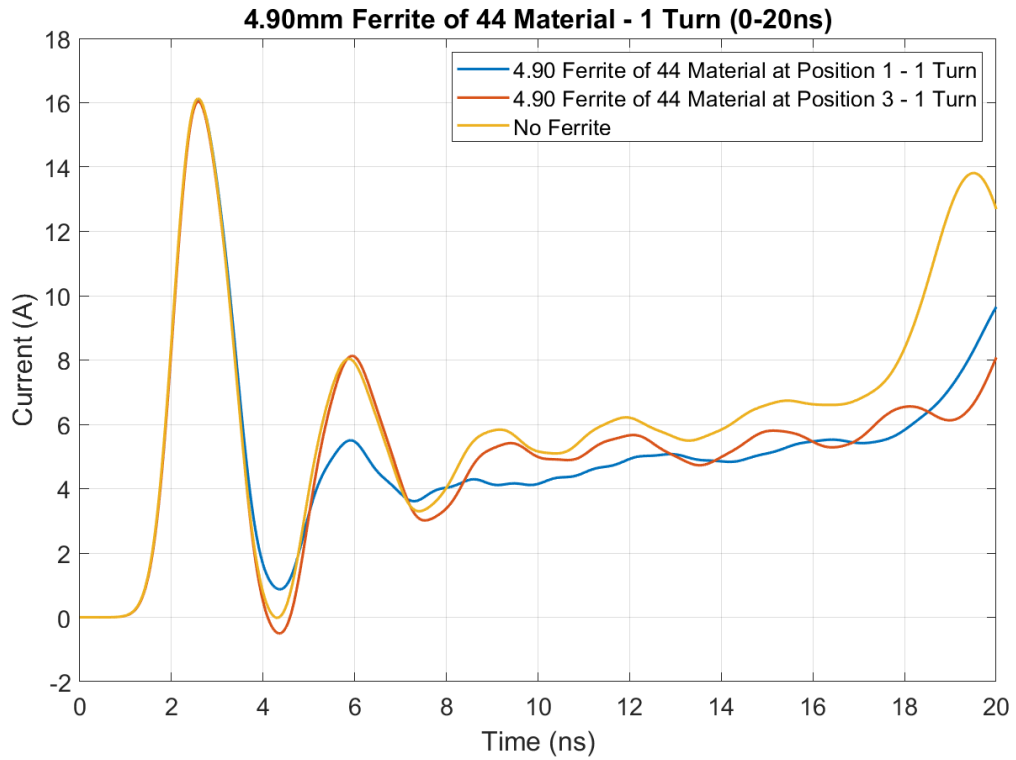
Σχήμα 4.41 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 31 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns



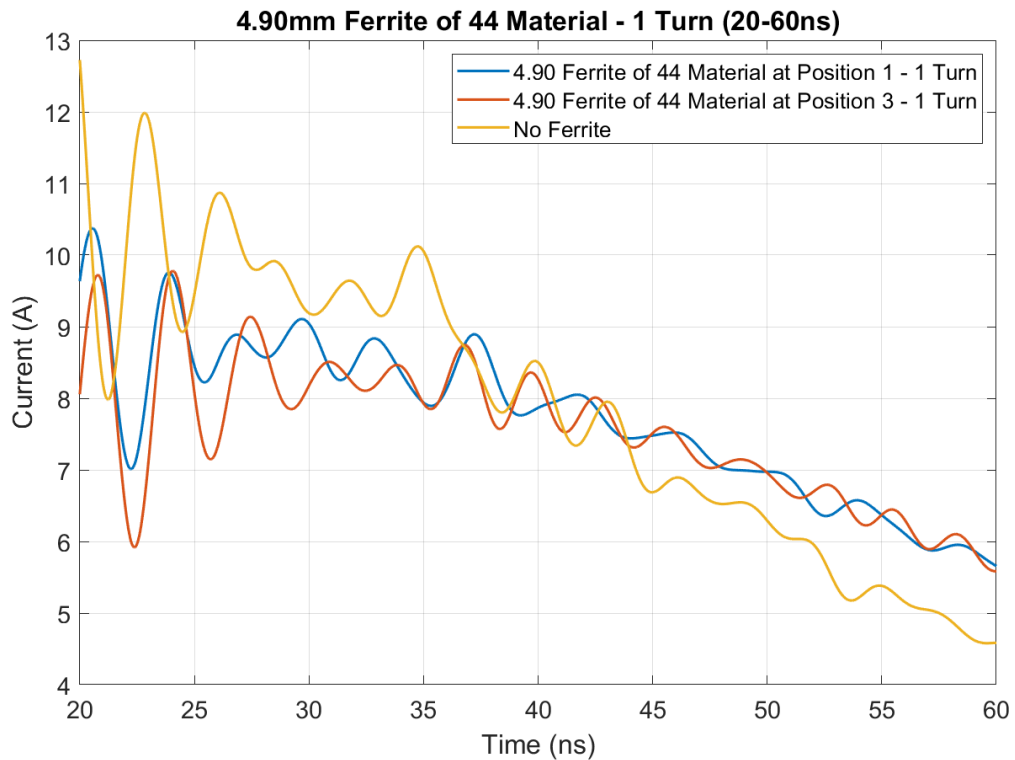
Σχήμα 4.42 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 31 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns



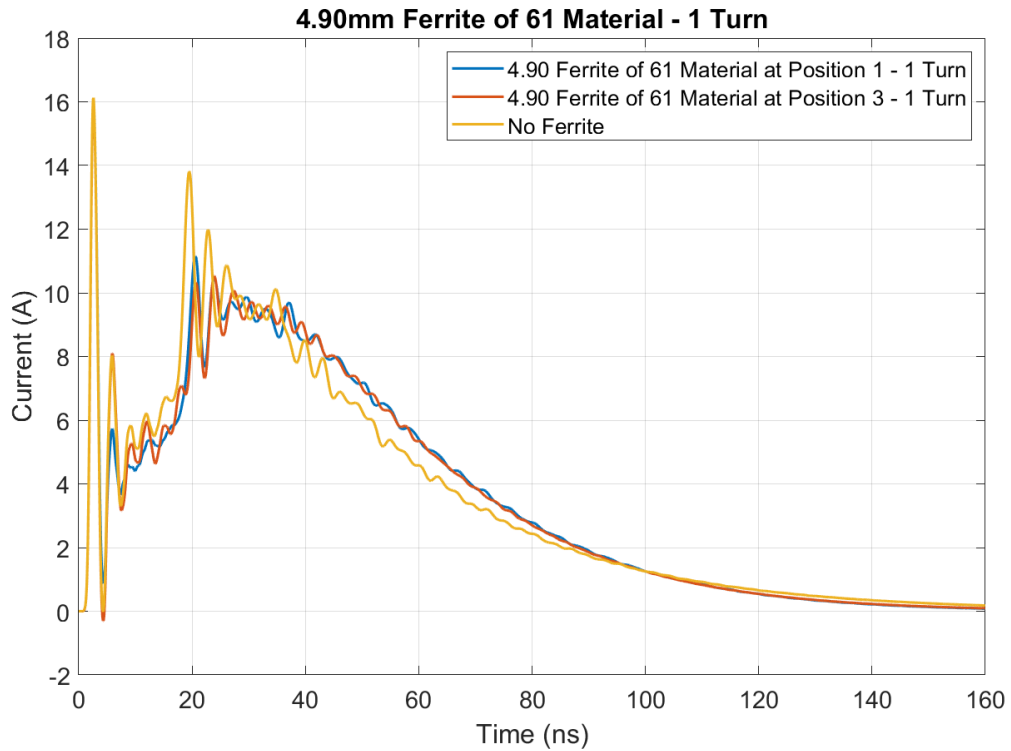
Σχήμα 4.43 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 44 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns



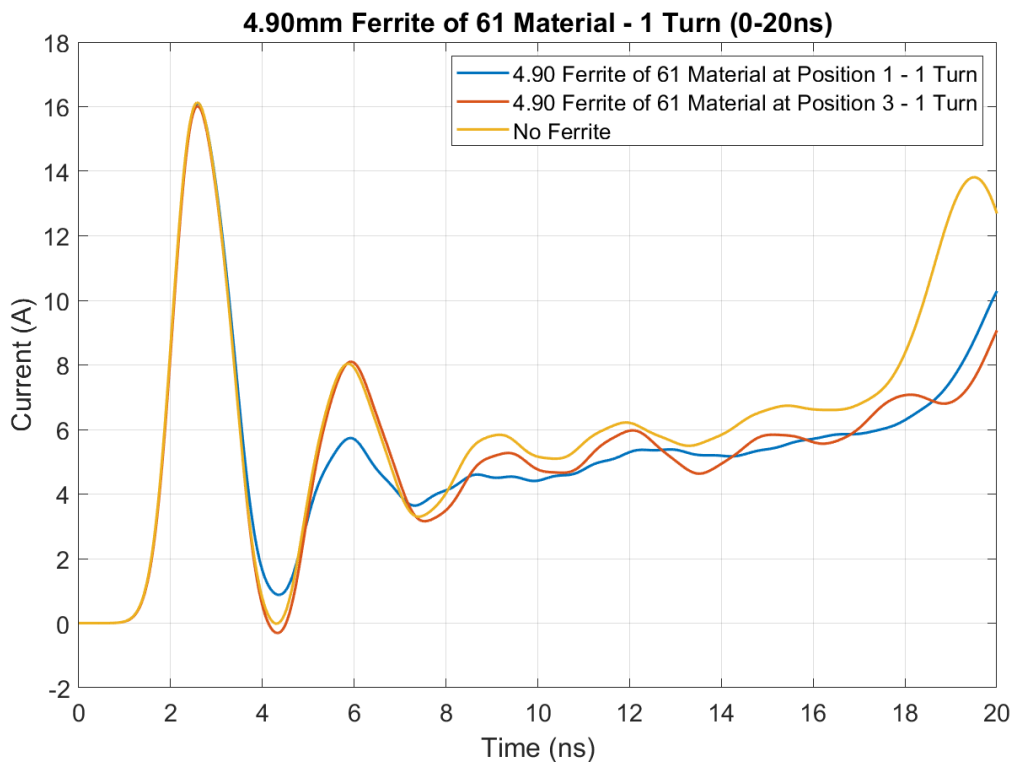
Σχήμα 4.44 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns



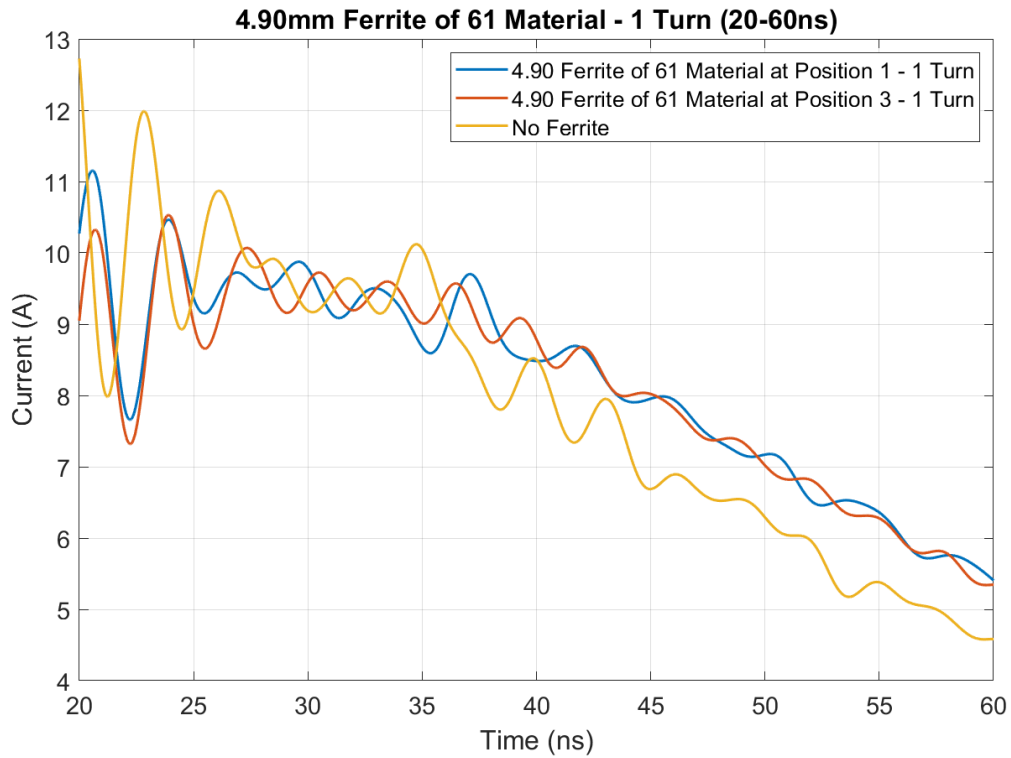
Σχήμα 4.45 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 44 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns



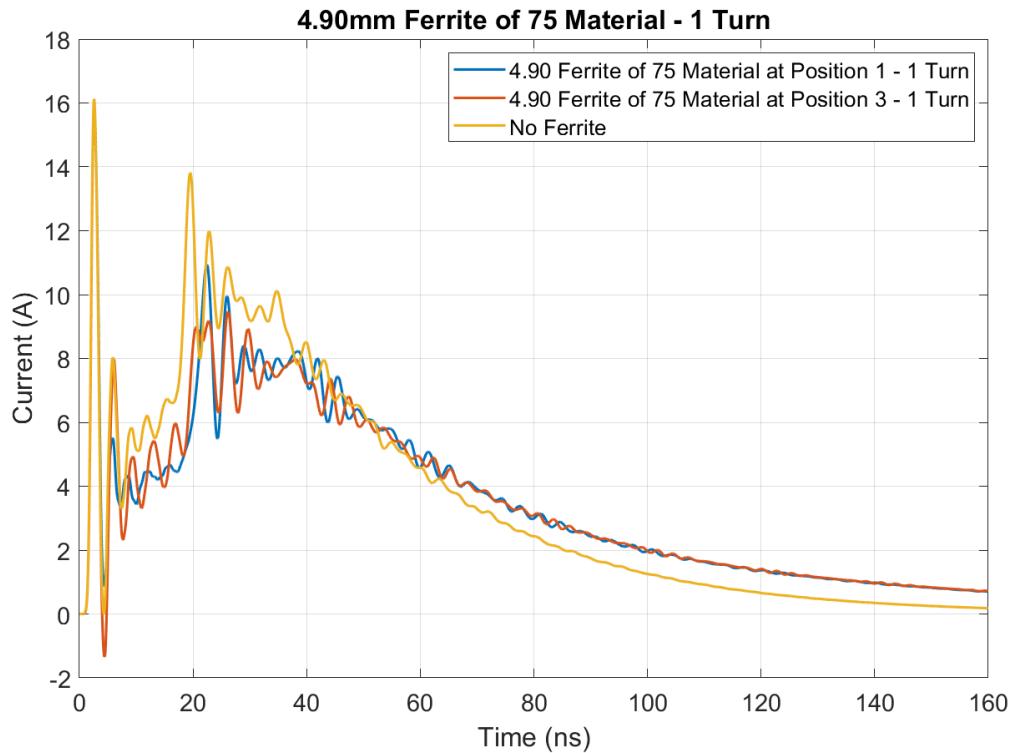
Σχήμα 4.46 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 61 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns



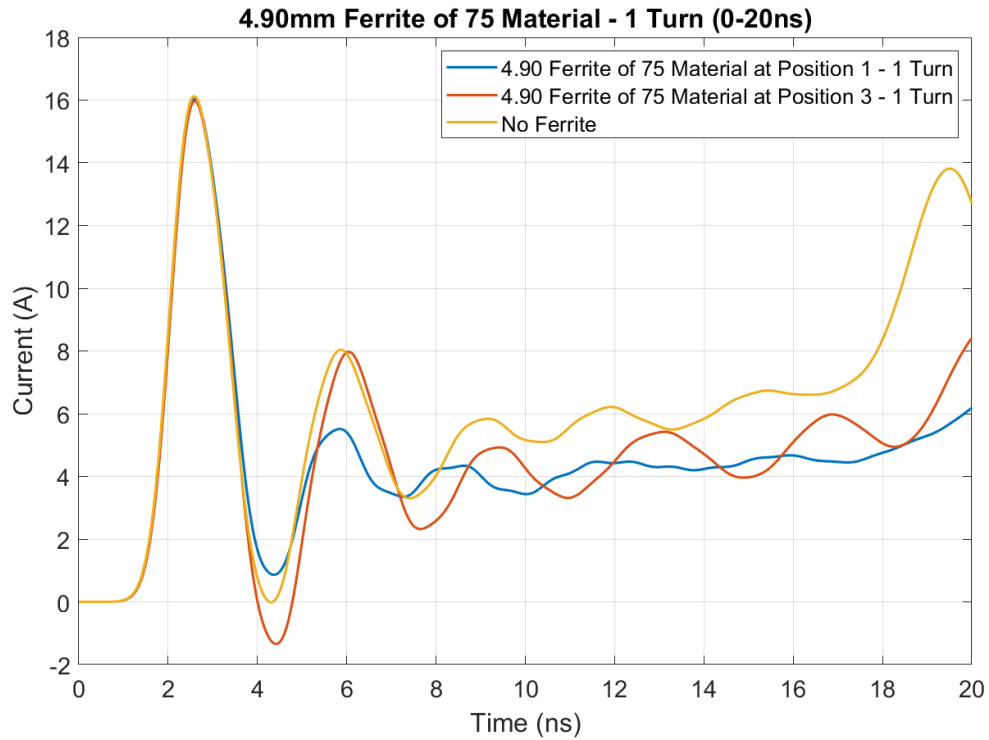
Σχήμα 4.47 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερρίτη και με χρήση φερρίτη 61 Material διαμέτρου 4.90mm στη στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns



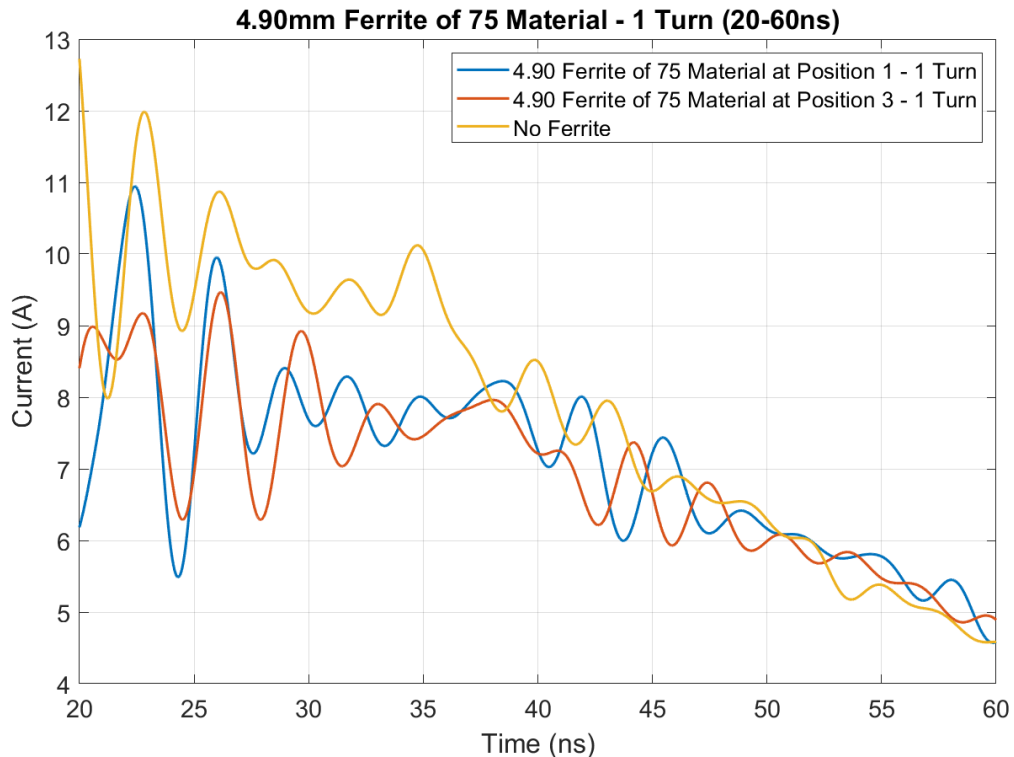
Σχήμα 4.48 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 61 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns



Σχήμα 4.49 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 160ns



Σχήμα 4.50 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 4.90mm στη τις θέσεις 1 και 3 από 0 έως 20ns



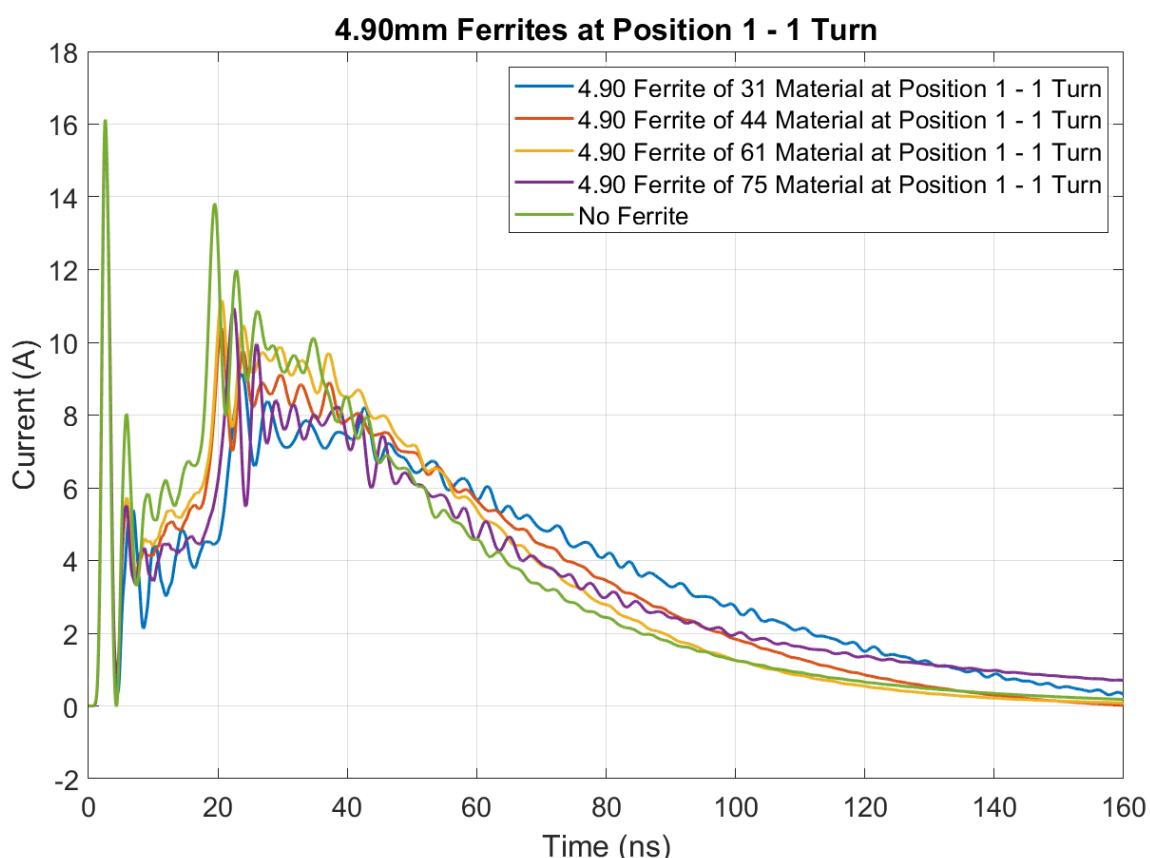
Σχήμα 4.51 Ρεύμα εκφόρτισης χωρίς παρουσία φερριτή και με χρήση φερριτή 75 Material διαμέτρου 4.90mm στις θέσεις 1 και 3 από 20 έως 60ns

Παρατηρείται και στο μοντέλο αυτό, ότι δεν υπάρχουν αποκλίσεις των αποτελεσμάτων ως προς τις θέσεις του φερρίτη. Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, η παρατήρηση που έγινε από τις προσομοιώσεις του πρώτου μοντέλου.

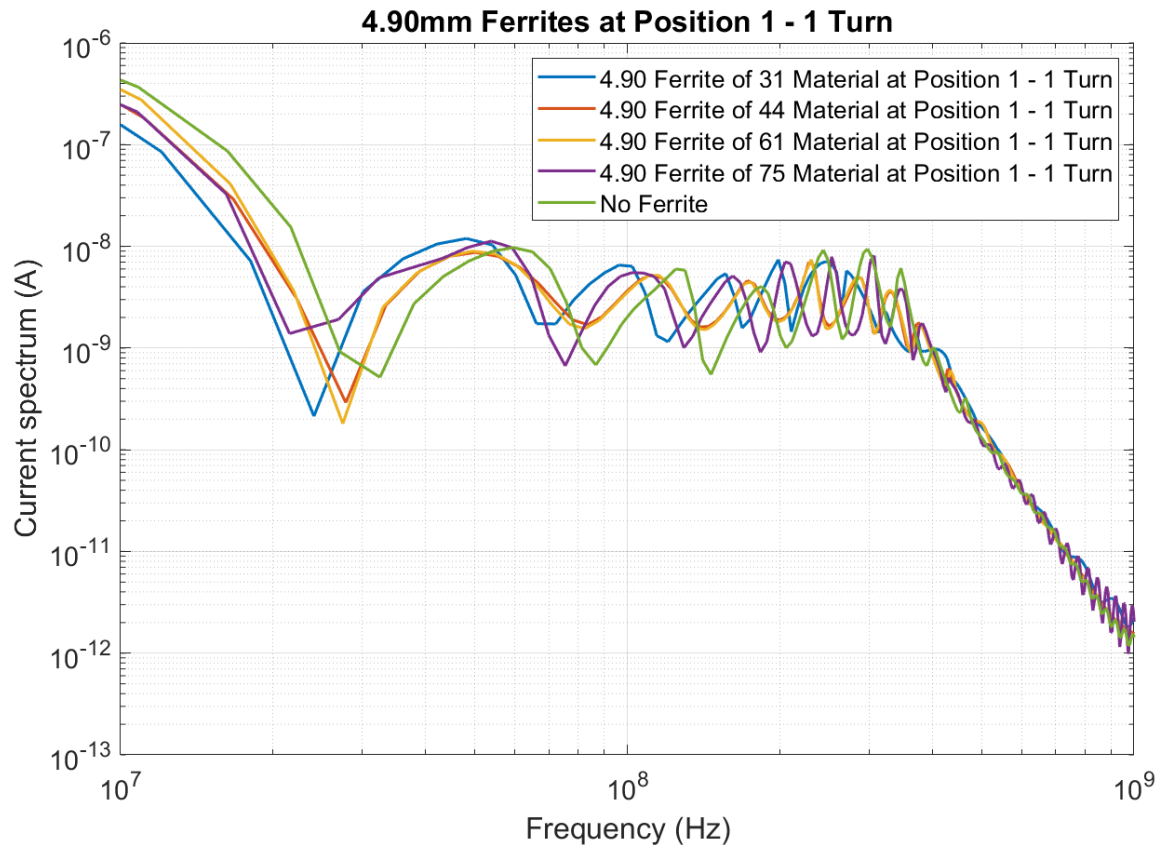
Αποκλίσεις στη συμπεριφορά των φερριτών μεταξύ των μοντέλων αποδίδονται στις διαφοροποιήσεις των δύο μοντέλων, οι οποίες ήταν απαραίτητες για την προσαρμογή της τελικής κυματομορφής στην πραγματική (πειραματική μέτρηση). Στα δύο μοντέλα οι συνολικές τιμές αυτεπαγωγής και παρασιτικών χωρητικοτήτων διαφέρουν αισθητά, γεγονός που οδηγεί σε διαφορετική επίδρασης της επιπρόσθετης αυτεπαγωγής και παρασιτικής χωρητικότητας του φερρίτη.

Ιδιαίτερα για τη θέση 1, λόγω της εγγύτητας του φερρίτη στο μοντέλο (διαφοροποίηση της παρασιτικής χωρητικότητας) αναμένεται εντονότερη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης και του φασματικού του περιεχόμενου με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1 (Position 1). Για αυτές τις προσομοιώσεις αυτές η τιμή της διατομής του καλωδίου επιλέχθηκε 2.5mm^2 ενώ, λόγω της διαμέτρου του φερρίτη, μελετήθηκε μόνο το σενάριο της μίας σπείρας του καλωδίου εντός του φερρίτη.



Σχήμα 4.52 Ρεύμα εκφόρτισης με χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1



Σχήμα 4.53 Φασματικό περιεχόμενο ρεύματος εκφόρτισης με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερριτή στη θέση 1

Παρατηρείται και στο δεύτερο μοντέλο, η μετατόπιση των κυματομορφών με τη χρήση φερριτή σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς φερριτή. Η χρήση του φερριτή υλικού 31 δείχνει να έχει την μεγαλύτερη μετατόπιση κυματομορφής, ενώ η χρήση του φερριτή υλικού 44 την μικρότερη.

Παρατηρώντας το φάσμα, διακρίνουμε μια μεγάλη απόκλιση στα 100 MHz, των κυματομορφών με την εισαγωγή φερριτή σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς φερριτή. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στην χρονική περίοδο 10ns έως 40ns. Συνεπώς, αναμενόμενη είναι και η παρατηρούμενη σχετική απόκλιση στην κυματομορφή ρεύματος-χρόνου των φερριτών σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς την εισαγωγή φερριτή κατά το χρονικό διάστημα αυτό.

Επιβεβαιώνονται και στη συγκεκριμένη περίπτωση τα αποτελέσματα του πρώτου μοντέλου.

Τέλος, παρατίθεται πίνακας με τις απαιτήσεις που προβλέπονται στη νέα, προτεινόμενη, έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 (Edition 3:2023) [45]] και με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2008 [38] όσο αφορά την απαίτηση του I_{30} , για γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο επίπεδο +4kV και πίνακας με τα αριθμητικά αποτελέσματα και τις ποσοστιαίες μεταβολές των προσομοιώσεων του δεύτερου μοντέλου

σε μορφή πινάκων. Επισημαίνονται με κόκκινο χρωματισμό, όσα αποτελέσματα χωρίς την παρουσία φερρίτη βρίσκονται εκτός ορίων.

Πίνακας 4.1 Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) εξ επαφής με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2023 [45] και με βάση το IEC 61000-4-2 της έκδοσης 2008 [38] όσο αφορά την απαίτηση του I₃₀

Τάση φόρτισης	I _{max}	T _{rise}	I _{p2}	I ₃₀	I ₆₀
[kV]	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
+4	12.75 - 17.25	0.6 - 1	6.3 - 11.7	5.6 - 10.4	2.8 - 5.2

Πίνακας 4.2: Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Edition 2.0 και 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 1 (κοντά στο σώμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων)

Υλικό	I _{max}	T _{rise}	I _{p2}	I ₃₀	I ₆₀
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
Απουσία φερρίτη	16.12	0.79	13.81	9.61	4.18
31	16.03	0.79	9.13	7.23	6.03
44	16.09	0.79	10.37	8.27	5.38
61	16.09	0.79	11.15	9.1	5.08
75	16.04	0.79	10.94	8.27	5.06

Πίνακας 4.3: Ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2.0 και Edition 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 1 (κοντά στο σώμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων)

Υλικό	I _{max}	T _{rise}	I _{p2}	I ₃₀	I ₆₀
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
31	-0.56	0.00	-33.89	-24.77	44.26
44	-0.19	0.00	-24.91	-13.94	28.71
61	-0.19	0.00	-19.26	-5.31	21.53
75	-0.50	0.00	-20.78	-13.94	21.05

Πίνακας 4.4: Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2.0 και Edition 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 3 (κοντά στο σημείο σύνδεσης με το κάθετο επίπεδο γείωσης)

Υλικό	I_{max}	T_{rise}	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
Απουσία φερρίτη	16.12	0.79	13.81	9.61	4.18
31	15.95	0.79	10.23	7.28	5.70
44	16.03	0.79	9.77	8.35	5.62
61	16.01	0.79	10.52	9.28	5.06
75	15.97	0.79	9.46	7.04	4.69

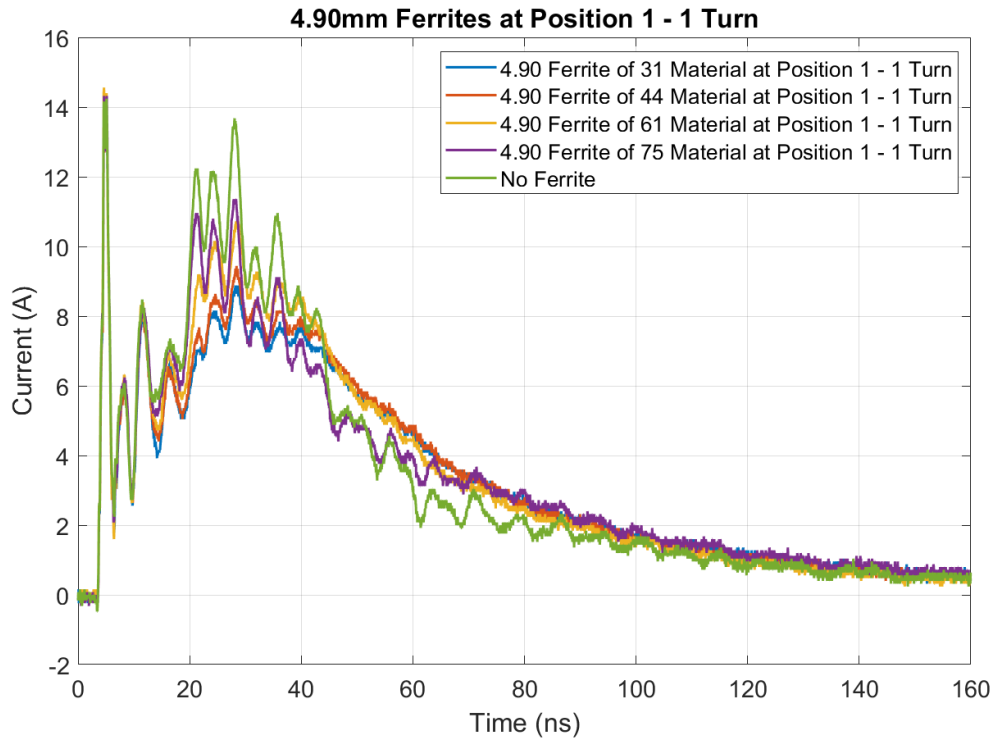
Πίνακας 4.5: Ποσοστιαία μεταβολή των παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2.0 και Edition 3.0 (Draft) για φερρίτες διαμέτρου 4.9mm τοποθετημένοι στη θέση 3 (κοντά στο σώμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων)

Υλικό	I_{max}	T_{rise}	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
31	-1.05	0.00	-25.92	-24.25	36.36
44	-0.56	0.00	-29.25	-13.11	34.45
61	-0.68	0.00	-23.82	-3.43	21.05
75	-0.93	0.00	-31.50	-26.74	12.20

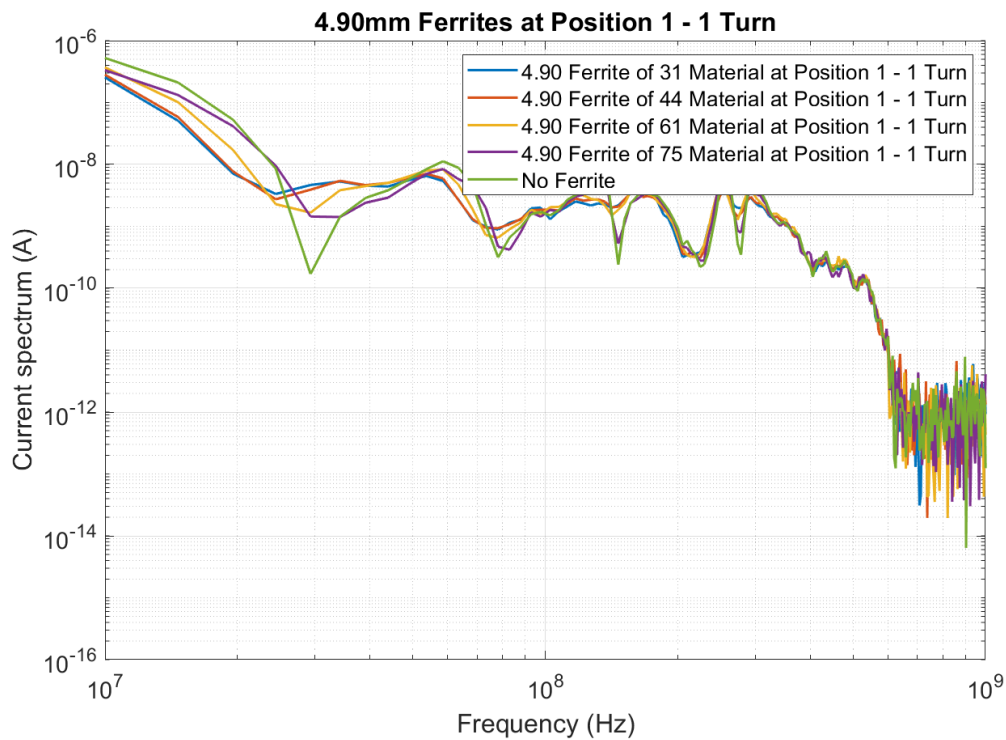
Παρατηρείται και αριθμητικά, η μεγάλη μείωση της τιμής του I_{p2} με τη χρήση όλων των φερριτών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η πρώτη κορυφή μένει σχεδόν ανεπηρέαστη και η τιμή του ρεύματος I_{60} δείχνει να έχει σημαντική αύξηση, λόγω της αύξησης παράσιτων χωρητικοτήτων στο σύστημα με την εισαγωγή των φερριτών.

4.4 Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Προς επαλήθευση του μοντέλου, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων (κυματομορφές ρεύματος και φασματικό περιεχόμενο) για ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις της γεννήτριας DITO με τη χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1 (Position 1). Στα πειράματα που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκε καλώδιο διατομής 2.5mm², ενώ δεν υπήρξε επιπλέον συσπείρωση του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος στο εσωτερικό του φερρίτη.



Σχήμα 4.54 Πειραματική μέτρηση ρεύματος εκφόρτισης με χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1



Σχήμα 4.55 Φασματικό περιεχόμενο του μετρούμενου ρεύματος εκφόρτισης με χρήση ενός εκ των 4 ειδών φερριτών διαμέτρου 4.90mm και χωρίς παρουσία φερρίτη στη θέση 1

Από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και τις πειραματικές μετρήσεις, επιβεβαιώνονται πολλές από τις παρατηρήσεις που κάναμε για το μοντέλο. Η πρώτη κορυφή μένει ανεπηρέαστη, ενώ είναι σημαντική η μείωση του I_{p2} και στις δύο περιπτώσεις.

Σχετικά με την συμπεριφορά των φερριτών:

- Και τα 4 είδη δεν επηρεάζουν την πρώτη κορυφή. Παρουσιάζεται μείωση κάτω του 1% για τη μέγιστη τιμή του ρεύματος, ενώ δεν παρουσιάζεται καμία επίδραση στον χρόνο ανόδου (0%).
- Και τα 4 είδη μειώνουν αισθητά την τιμή του μέγιστου ρεύματος στο χρονικό εύρος 10ns-40ns, με εντονότερη τη μείωση στην περίπτωση του υλικού 31 με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, 1MHz-300MHz.
- Σημαντική αύξηση στο ρεύμα στα 60ns από την πρώτη στιγμή που ρεύμα έλαβε την τιμή του 10% της μέγιστης παρατηρείται και για τα 4 είδη, με σημαντικότερη και εδώ την αύξηση του υλικού 31.
- Με βάση τα αποτελέσματα των Σχημάτων 4.52 και 4.54 συμπεραίνουμε ότι τα υλικά 31 και 44 παρουσιάζουν έντονη μετατόπιση της δεύτερης κορυφής, γεγονός που προφανώς επηρεάζει και την τιμή του ρεύματος στα 60ns.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.5 καταδεικνύουν την ευελιξία που προσφέρουν τα διαφορετικά είδη φερρίτη στην προσπάθεια τροποποίησης της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ανάλογα με την ανάγκες τροποποίησης (μείωση του I_{p2} ή μείωση του I_{60}) και τα περιθώρια της αρχικής κυματομορφής (χωρίς φερρίτη) μπορεί το εκάστοτε εργαστήριο δοκιμών/διακριβώσεων να χρησιμοποιήσει τον κατάλληλο

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη – Συμπεράσματα – Επόμενη μέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε εκτενώς μέσω προσομοιώσεων η επίδραση στο ρεύμα εκφόρτισης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (electrostatic discharges, ESD) της εισαγωγή σφικτήρα φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος. Εφαλτήριο της συγκεκριμένης μελέτης αποτέλεσε η προτεινόμενη αναθεώρηση του Προτύπου IEC 61000-4-2, στην οποία προστέθηκε απαίτηση για τη μέγιστη τιμή του ρεύματος στο χρονικό εύρος 10ns-40ns. Λόγω της απουσίας της συγκεκριμένης απαίτησης στις προηγούμενες εκδόσεις, κάποιες από τις εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παρουσίασαν αδυναμία συμμόρφωσης με τη συγκεκριμένη απαίτηση. Στόχος της χρήσης φερριτών για την τροποποίηση της κυματομορφής ρεύματος είναι η παρουσίαση μίας οικονομικής και μη παρεμβατικής λύσης στα εργαστήρια δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για τη συμμόρφωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου.

Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής παρουσίαση του θεωρητικού μέρους των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και των εφαρμογών τους, αναλύθηκαν και περιεγράφηκαν οι μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των φερριτών γενικότερα, αλλά και αυτών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Επίσης, έγινε αναφορά του φαινομένου ringing (αποσβενυμένες ταλαντώσεις), η εμφάνιση του οποίου μπορεί να επηρεάσει την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης και την συμμόρφωση της με τις απαιτήσεις που θέτει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 για την κυματομορφή ρεύματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Τέλος, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις εισαγωγής φερριτών τεσσάρων διαφορετικών υλικών και διαφορετικού διαμέτρου υπό διάφορες συνθήκες, όπως η τοποθέτηση τους στην αρχή, το μέσο και το τέλος του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος, η χρήση μια ή δύο σπειρών του καλωδίου και η αλλαγή διατομής του καλωδίου.

Με το πέρας της εκτέλεσης όλων των προσομοιώσεων, την ανάλυση των αποτελεσμάτων τους και την σύγκριση τους με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, καταλήγουμε σε ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των φερριτών στο ρεύμα εκφόρτισης γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Από την παρατήρηση, αρχικά, των γραφημάτων είναι δυνατό να αποφανθούμε ότι η εισαγωγή οποιουδήποτε υλικού φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος επηρεάζει την κυματομορφή ρεύματος μειώνοντας την μέγιστη τιμή ρεύματος στο χρονικό πλαίσιο από τα 10ns έως τα 40ns αφού το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του. Έτσι, επιτυγχάνεται η συμμόρφωση ως προς την απαίτηση για την τιμή ρεύματος I_{p2} του Προτύπου, αφού αρχικά οι κυματομορφές χωρίς την παρουσία φερρίτη δεν κάλυπταν την απαίτηση αυτή. Αναμενόμενη αλλά και επιθυμητή είναι η παρατηρούμενη ανεπαίσθητη επίδραση στην πρώτη κορυφή. Οι φερρίτες υλικού 31 και 44 δείχνουν να λειτουργούν πιο επιθυμητά, παρουσιάζουν όμως μια ανοδική κλίση στο αργό σκέλος της κυματομορφής και αύξηση της τιμής ρεύματος τη χρονική στιγμή $t=60ns$. Ο φερρίτης υλικού 75 φαίνεται να επιδρά στην κυματομορφή ρεύματος πτωτικά, μειώνοντας την τιμή ρεύματος I_{p2} και κρατώντας της τιμής ρεύματος τη χρονική στιγμή $t=60ns$ σε χαμηλά επίπεδα, το οποίο δεν

αναμενόταν λαμβάνοντας υπόψιν το χαμηλό εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του. Ο φερρίτης υλικού 61 παρουσιάζει την μικρότερη επίδραση.

Επιπροσθέτως, παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις εισαγωγής φερρίτη, μετατόπιση της κορυφής σε σχέση με την περίπτωση απουσίας φερρίτη. Φαίνεται, ακόμη, πως η εξασθένηση του ρεύματος με τη χρήση φερρίτη δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της διατομής του καλωδίου. Επιπλέον, το πέρασμα του καλωδίου με δύο σπείρες μέσα από τον φερρίτη δεν ενδείκνυται, λόγω της μεγάλης σβέσης που προκαλεί στην κυματομορφή ρεύματος. Τέλος, δεν προκύπτει σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων με την αλλαγή θέσης του φερρίτη.

Η πλειοψηφία των συμπερασμάτων που προέκυψαν επιβεβαιώνεται από τις πειραματικές μετρήσεις. Η κύρια διαφορά που παρατηρείται ανάμεσα στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραματικών μετρήσεων, αφορά την μετατόπιση της κορυφής, η οποία δεν είναι τόσο έντονη στα γραφήματα των πειραματικών μετρήσεων.

Τα πορίσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε συμβάλλουν στη συνεχή εξέλιξη της έρευνας που λαμβάνει μέρος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ειδικότερα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Συνεπώς, εάν κάποιο εργαστήριο ή οποιοσδήποτε διαθέτει μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και επιθυμεί να χρησιμοποιήσει κάποιον φερρίτη για την ικανοποίηση διαφορών απαιτήσεων όπως η εξασθένηση της τιμής ρεύματος I_{p2} ή της τιμής ρεύματος τη χρονική στιγμή $t=60ns$, μπορεί να ελέγξει την συμβατότητα του φερρίτη με τις απαιτήσεις που έχει χωρίς να χρειαστεί να προβεί στην αγορά του. Με την μοντελοποίηση της γεννήτριας και αντίστοιχες προσομοιώσεις, μπορεί να αποφανθεί ποιος φερρίτης ενδείκνυται για την καλύτερη ικανοποίηση των αναγκών και των απαιτήσεων του. Αυτό συνεπάγεται την άμεση μείωση χρόνου αλλά και κόστους, καθώς η διαδικασία τροποποίησης του ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας είναι χρονοβόρα.

Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα από την παρούσα εργασία ενθαρρύνουν ακόμη περαιτέρω έρευνα, σχετικά με τη χρήση και άλλων τύπου φερρίτη και μοντέλων γεννήτριας και την πραγματοποίηση περισσότερων πειραματικών μετρήσεων. Τέτοιες έρευνες θα προσφέρουν απαντήσεις σχετικά με την επαναληψιμότητα των μετρήσεων και θα ενισχύσουν τα συμπεράσματα της έρευνας.

Βιβλιογραφία

- [1] ANSI C63.14 – 1998, “Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)”.
- [2] H. W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [3] ANSI C63.14 – 1998, “Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)”
- [4] Ευάγγελος Ηρακλής, Α. Παλιάτσος, “ Διακρίβωση εξοπλισμού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ατρωσίας”, Διπλωματική εργασία, Οκτώβριος 2019, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [5] Clayton R. Paul, “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, John Wiley & Sons Inc. Publication, Second Edition, 2009.
- [6] Cadence System Analysis. EMI Types and Coupling Methods.2022. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-emi-types-and-coupling-methods>
- [7] Δεληπαλαδάκη Β. Φανή, “Διακρίβωση εξοπλισμού για δοκιμές ατρωσίας σε βυθίσεις, σύντομες διακοπές και διακυμάνσεις τάσης”, Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος 2017, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [8] RS DESIGNSPARK. EMC It can't hurt you, can it. Οκτώβρης 2014. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.rs-online.com/designspark/emc-it-can-t-hurt-you-can-it>
- [9] Reto B. Keller, Design for electromagnetic compatibility - In a nutshell, Springer, 1st Edition, 2023
- [10] Academy of EMC. 10 Noise Coupling. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.academyofemc.com/noise-coupling>
- [11] LearnEMC. Introduction to Imbalance Difference Modeling. July 24, 2021. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://learnemc.com/introduction-to-imbalance-difference-modeling>
- [12] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003
- [13] Θεοδόσιος Κ. Λαμπρινός, “ Καταγραφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για διαφορετικά σημεία έγχυσης κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και επίδραση σε SpaceWire Link”, Διπλωματική εργασία, Μάρτιος 2022, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [14] [DOD-HDBK-263, MILITARY HANDBOOK: ELECTROSTATIC DISCHARGE CONTROL HANDBOOK FOR PROTECTION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC PARTS, ASSEMBLIES, AND EQUIPMENT \(EXCLUDING](#)

[ELECTRICALLY INITIATED EXPLOSIVE DEVICES\) \(02 MAY 1980\) \[S/S BY MIL-HDBK-263A\]](#)

- [15] Moore, A. D. *Electrostatics and its Applications*. New York, Wiley, 1973.
- [16] Reading Plastic. What It Means: Antistatic vs. Static Dissipative Plastic. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://readingplastic.com/antistatic-vs-static-dissipative-plastic/>
- [17] Gilbert, W. *De Magnete* , (1600), translated by P. Fleury Mottelay, (1892). Dover Publications Inc., New York, (1958)H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [18] Kato, V. and Takei, T. Permanent oxide magnet and its characteristics. *J. Instn. Elect. Engrs Japan*
- [19] Snelling, E.C. and Giles, A.D. (1983) *Ferrites for inductors and Transformers*. England: Research Studies Press Ltd.
- [20] Stanford Magnets. Soft Ferrites vs Hard Ferrites .2024. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.stanfordmagnets.com/soft-ferrites-vs-hard-ferrites.html>
- [21] Zahid, Muhammad & Khan, Hasan & Manzoor, Muhammad Zeewaqaar & Ahmed, Hafiz & Akhter, Tahira & Alshahrani, Thamraa & Imran, Muhammad & Assiri, Mohammed. (2023). Optimization of structural, dielectric, and magnetic properties of nanocrystalline copper doped spinel ferrites
- [22] A. Goldman, A. Goldman, *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*, Kluwer Acad. Pub, Boston, U.S.A, 1999.
- [23] Snelling, E.C. (2005) *Soft Ferrites: Properties and applications*. Mendham, NJ: PSMA.
- [24] A. Goldman, *Modern Ferrite Technology*. (2006). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-29413-1>
- [25] Smit, J., & Wijn, H. P. J. (1954). Physical Properties of Ferrites. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 6(C). [https://doi.org/10.1016/S0065-2539\(08\)60132-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2539(08)60132-8)
- [26] Bozorth, R. M. (1993). *Ferromagnetism*.
- [27] Harris, V. G. (2022). *Modern Ferrites, Volume 2: Emerging Technologies and Applications*. Wiley. Moore, A. D. *Electrostatics and its Applications*. New York, Wiley, 1973.
- [28] Enz, V. (1958), *Physica* 24, 60,624
- [29] Fan, J., & Sale, F. R. (1996). Analysis of power loss on Mn-Zn ferrites prepared by different processing routes. *IEEE Transactions on Magnetism*, 32(5 PART 2). <https://doi.org/10.1109/20.539174>
- [30] E. Albers-Schoenberg, "Ferrites for Microwave Circuits and Digital Computers," *J. Appl. Phys.*, 25 [2] 152–54 (1954).

- [31] Rachael Parker, 75-material for Low-Frequency EMI Suppression Demystified, Fair-Rite Products. Kato, V. and Takei, T. Permanent oxide magnet and its characteristics. J. Instn. Elect. Engrs Japan
- [32] EMC Directory. What is a Ferrite Clamp? .2024. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.emc-directory.com/community/what-is-the-ferrite-clamp>
- [33] Jefferson Eco & Aldrick Limjoco, Ferrite Beads Demystified. Analog Dialogue 50-02, February 2016
- [34] Holland Shielding Systems BV. EMC FERRITE CABLE CLAMPS. 2024. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://hollandshielding.com/en/emc-ferrite-cable-clamps>
- [35] Fair-Rite Products Corp. Fair-Rite Products Catalog, 15th ed. 2007
- [36] H. W. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009
- [37] Datasheet of the ferrite cores Fair Rite. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://fair-rite.com/kits/greatest-hits-kit/>
- [38] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test,” Edition 2.0, December 2008.
- [39] IEC Publication 801-2: “Electromagnetic compatibility for industrial process measurement and control equipment, part 2: Electrostatic discharge requirements,” Second Edition (1989).
- [40] M. Hirata, T. Takahashi, and N. Shibuya, “Evaluation of Falling Time Restriction of ESD Immunity Test Current Waveform: The result of IEC 61000-4-2 Round Robin Test in Japan,” Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, July 2007.
- [41] J. Koo, Q. Cai, D. Pommerenke, K. Wang, J. Maas, M. Hirata, A. Martwick: “The Repeatability of System Level ESD Test and Relevant ESD Generator Parameters,” Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2008.
- [42] J. Koo, Q. Cai, K. Wang, J. Maas, T. Takahashi, A. Martwick, and D. Pommerenke: “Correlation between EUT failure levels and ESD generator parameters,” IEEE Trans. EMC, Vol.50, No.4, pp.794-801 (2008).
- [43] Y. Tozawa, Y. Kobayashi, T. Ishida, O. Fujiwara: “Waveform Comparison of Discharge Currents for Contact Discharges from Different Eight Models of Electrostatic Discharge Generators,” IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 140, No.2, pp.86-91 (2020-02).
- [44] Tozawa, Y., Ishida, T., Wang, J., & Fujiwara, O. (2023). Influence of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations in Contact Discharge Calibration Waveform from ESD Generator. *IEEE International Symposium on Electromagnetic*

Compatibility, 2023-September.

<https://doi.org/10.1109/EMCEurope57790.2023.10274328>

- [45] 77B/864/CD, Project number:IEC 61000-4-2 ED.3, Date of circulation:2023-03-21, Closing date for comments:2023-06-23, International Electrotechnical Commission, 2023.
- [46] C. Carobbi, A. Burger and S. Caniggia, "Effect of the Insertion of a Ferrite Along Return Cable and of Return Cable Layout on ESD Contact Discharge," 2023 XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Sapporo, Japan, 2023, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS57860.2023.10265511.
- [47] S. Caniggia and F. Maradei, "Circuitual and numerical modeling of electrostatic discharge generators," Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005., Hong Kong, China, 2005, pp. 1119-1123 Vol. 2, doi: 10.1109/IAS.2005.1518497
- [48] S. Caniggia and C. F. M. Carobbi, "Improving the Reproducibility of Radiated Emission and Immunity Tests Through the Use of the CMAD," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.61, no. 4, pp. 1370-1376, Aug. 2019, doi:10.1109/TEMC.2019.2922454. Snelling, E.C. (2005) *Soft Ferrites: Properties and applications*. Mendham, NJ: PSMA.
- [49] Yousaf, J., Park, M., Lee, H., Youn, J., Lee, D., Hwang, C., & Nah, W. (2018). Efficient Circuit and an em Model of an Electrostatic Discharge Generator. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 60(4). <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2787189>
- [50] Fair-rite 3D Drawing. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://fair-rite.com/kits/greatest-hits-kit/>
- [51] C.R. Paul, "Inductance Loop and Partial", Wiley, 2010.
- [52] AMETEK CTS, DITO ESD SIMULATOR DATASHEET. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.ametekcts.com//media/ametekcts/importdata/documents/datasheets/emtest/dito.pdf?la=en&revision=431694fb-9c1b-46d1-8f64-33c2f9a0243c>