



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Πειραματική μελέτη της επίδρασης φερριτών στην
κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Γ. ΚΟΥΤΣΟΧΕΡΑΣ

Επιβλέπων : Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πειραματική μελέτη της επίδρασης φερριτών στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Γ. ΚΟΥΤΣΟΧΕΡΑΣ

Επιβλέπων : Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Σεπτεμβρίου 2024.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Α. Χριστοδούλου

Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

.....
Βασίλειος Γ. Κουτσοχέρας

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

Copyright © Βασίλειος Γ. Κουτσοχέρας, 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 ασχολείται με την μελέτη των παραμέτρων επίδρασης των αποσβεννυμένων ταλαντώσεων της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (electrostatic discharge, ESD) και κυρίως με την επίδραση της εφαρμογής πυρήνων φερρίτη επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Η πειραματική αυτή μελέτη διεξήχθη στο χώρο του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων με την χρήση εικοσιτεσσάρων (24) διαφορετικών φερριτών κατασκευασμένων από τέσσερα (4) διαφορετικά υλικά.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, και οι τρόποι με τους οποίους επηρεάζεται ο ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός. Γίνεται ειδική αναφορά στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση, η οποία ως φυσικό φαινόμενο υπάγεται στην ηλεκτρομαγνητική ατρωσία, στους μηχανισμούς φόρτισης και τις συνέπειες των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Έπειτα, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων κατηγοριών φερρίτη, οι μαγνητικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες και ο μηχανισμός λειτουργίας τους ως καταστολείς ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πείραμα.

Αναφέρονται το Πρότυπο IEC 61000-4-2, το οποίο ασχολείται αποκλειστικά με την τυποποίηση των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε εξοπλισμό, η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπως προσδιορίζεται εντός αυτού και οι απαιτήσεις που θέτει ως προς τέσσερις παραμέτρους για την κυματομορφή ρεύματος των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Επισημαίνεται το φαινόμενο των αποσβεννυμένων ταλαντώσεων (ringing) το οποίο επηρεάζει τις κυματομορφές ρεύματος των γεννητριών καθώς και η προσπάθεια που γίνεται μέσω της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου για την ρύθμιση του, με την αντικατάσταση μιας εκ των παραμέτρων. Παρατίθενται διάφορες μελέτες ερευνητών που έχουν αναδείξει πειραματικά κάποια από τα χαρακτηριστικά του φαινομένου και την επίδραση διαφόρων παραμέτρων.

Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός του εργαστηρίου περιγράφεται μαζί με την πειραματική διάταξη και τη μέθοδο συλλογής δεδομένων. Το πείραμα αναλύεται σε έξι στάδια, με το κάθε ένα να εξετάζει διαφορετική λογική αντιμετώπισης του φαινομένου. Τα αποτελέσματα του παρουσιάζονται αρχικά σε πίνακες και στην συνέχεια αναλύονται υπό την μορφή διαγραμμάτων, στα οποία οι διάφορες κυματομορφές ρεύματος που προέκυψαν κατά το πείραμα, συγκρίνονται και ελέγχονται ως προς τη συμμόρφωση τους με τις απαιτήσεις τόσο της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου, όσο και της ισχύουσας έκδοσης. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πείραμα.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτροστατική εκφόρτιση, Πρότυπο IEC 61000-4-2, φερρίτης, φαινόμενο ringing, αποσβεννυμένες ταλαντώσεις.

Abstract

The present thesis focuses on studying the parameters affecting the damped oscillations of the current waveform from electrostatic discharge (ESD) and primarily on the effect of applying ferrite cores on the return current cable. The study was conducted through experiments in the High Voltage and Electrical Measurements Laboratory, utilising twenty-four different ferrites made from various materials.

Initially, the basic concepts of electromagnetic compatibility (EMC) are presented, along with the ways in which electrical equipment is influenced. Special reference is made to electrostatic discharge, which as a natural phenomenon falls under electromagnetic compatibility, the charging mechanisms, and the consequences of discharges. Next, the characteristics of various ferrite categories are analysed, along with their magnetic and electrical properties and their functioning mechanism as suppressors of electromagnetic interference. The characteristics of the ferrites used in the experiment are also presented.

The IEC 61000-4-2 standard, which deals exclusively with the standardisation of electrostatic discharge tests on equipment, is mentioned, along with the ideal electrostatic discharge current waveform as defined in the standard and the requirements it sets for four parameters of the current waveform produced by electrostatic discharge generators. The phenomenon of ringing (damped oscillations), which affects the current waveforms of ESD generators, is highlighted, along with the effort made through the new, under-revision, version of the standard to regulate this by replacing one of the parameters with a new one. Various research studies that have experimentally demonstrated some characteristics of the phenomenon and the impact of various parameters, on the electrostatic discharge current of generators are presented.

The laboratory equipment is described, along with the experimental setup and the data collection method. The experiment is analysed in six stages, with each stage examining a different approach to addressing the phenomenon. The results are initially presented in tables and then analysed in the form of diagrams, in which the various current waveforms obtained during the experiment are compared and checked for compliance with the requirements of both the new, under-revision, version of the standard and the current version. Finally, the conclusions drawn from the experiment are presented.

Keywords: Electrostatic discharge, IEC 61000-4-2 standard, ferrite, ringing effect, damped oscillations.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για την συμπαράσταση και ανεκτίμητη βοήθεια τους, όλους όσους με στήριξαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ:

Τον κ. Παναγιώτη Κ. Παπασταμάτη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την συνεχή καθοδήγηση, υποστήριξη και εμπιστοσύνη του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας από την πρώτη μέρα, έως και σήμερα.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την άριστη συνεργασία του και διευκόλυνση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και την συμβολή του ως καθηγητής καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Το σύνολο του προσωπικού του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την συνεργασία και υποστήριξη τους.

Την οικογένεια και τους φίλους μου για την απεριόριστη στήριξη τους καθ' όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα.....	11
Ευρετήριο Σχημάτων.....	13
Ευρετήριο Πινάκων	17
Πρόλογος.....	19
Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και ηλεκτροστατική εκφόρτιση	21
1.1 Ιστορική αναδρομή	21
1.2 Βασικές έννοιες της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας	22
1.3 Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας	23
1.3.1 Μηχανισμοί σύζευξης.....	24
1.3.2 Παρεμβολή κοινού – διαφορικού τρόπου	26
1.4 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση	27
1.4.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο.....	27
1.4.2 Φόρτιση εξ επαγωγής.....	29
1.4.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	29
1.4.4 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	31
1.4.4.1 Μοντέλο ανθρώπινου σώματος.....	32
Κεφάλαιο 2: Φερρίτες	33
2.1 Ιστορική αναδρομή	33
2.2 Κατηγοριοποίηση φερριτών	34
2.2.1 Σκληροί και Μαλακοί φερρίτες	34
2.2.2 Κρυσταλλικές δομές φερριτών	34
2.2.2.1 Φερρίτες τύπου σπινελίου	35
2.2.2.2 Φερρίτες εξαγωνικής δομής.....	36
2.2.2.3 Φερρίτες τύπου γρανάτη	37
2.2.2.4 Φερρίτες τύπου περοβσκίτη	38
2.3 Μαγνήτιση.....	38
2.3.1 Διαδικασία αρχικής μαγνήτισης.....	40
2.3.2 Βρόχος υστέρησης.....	41
2.3.3 Απώλειες δινορρευμάτων	43
2.3.4 Διαπερατότητα	45
2.4 Φερρίτες και Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα.....	46

2.4.1	Οι φερρίτες ως καταστολείς Ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών	46
2.4.2	Σφιγκτήρες φερρίτη	48
2.4.3	Φίλτρα κοινού και διαφορικού τρόπου	49
2.4.4	Χαρακτηριστικές κυματομορφές φερριτών	50
Κεφάλαιο 3:	Ηλεκτροστατική εκφόρτιση και φαινόμενο ringing	53
3.1	Το πρότυπο IEC 61000-4-2:2008	53
3.1.1	Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	53
3.1.2	Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής	55
3.2	Φαινόμενο ringing	56
3.3	Νέα υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2.....	56
3.4	Έρευνες πάνω στο φαινόμενο ringing.....	58
3.4.1	Μελέτη της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής.....	58
3.4.2	Μελέτες μείωσης φαινομένου ringing με χρήση φερριτών	64
Κεφάλαιο 4:	Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	73
4.1	Εξοπλισμός εργαστηρίου υψηλών τάσεων	73
4.1.1	Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	73
4.1.1.1	Γεννήτρια NSG-433	73
4.1.1.2	Γεννήτρια NSG-438	73
4.1.1.3	Γεννήτρια DITO	74
4.1.1.4	Σύγκριση των γεννητριών και παρουσίαση χαρακτηριστικών	74
4.1.2	Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης	74
4.1.3	Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας	75
4.1.4	Εξασθενητής.....	75
4.1.5	Παλμογράφος.....	75
4.1.6	Πακέτο φερριτών	76
4.2	Η πειραματική διάταξη.....	77
4.3	Στάδια μετρήσεων	77
4.4	Αποτελέσματα μετρήσεων – ως προς παραμέτρους ελέγχου	80
4.4.1	Πρώτη φάση επεξεργασίας	80
4.4.2	Αποτελέσματα μετρήσεων μετά την πρώτη επεξεργασία	84
4.5	Αποτελέσματα μετρήσεων – σύγκριση κυματομορφών	90
4.5.1	Δεύτερη φάση επεξεργασίας.....	90
4.5.2	Αποτελέσματα μετρήσεων μετά την δεύτερη επεξεργασία	93
Κεφάλαιο 5:	Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	123
Βιβλιογραφία		125

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Θεμελιώδη στοιχεία του προβλήματος ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας	23
Σχήμα 1.2 Μηχανισμοί σύζευξης Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών	24
Σχήμα 1.3 Σχηματικό Διάγραμμα πιθανών τρόπων σύζευξης	26
Σχήμα 1.4 Θόρυβος κοινού και διαφορικού τρόπου	26
Σχήμα 1.5 Στάδια ηλεκτροστατικής φόρτισης εξ επαγωγής	29
Σχήμα 1.6 Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μμοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC	31
Σχήμα 2.1 Κατηγοριοποίηση των φερριτών	34
Σχήμα 2.2 Στοιχειώδης κυψελίδα της δομής σπινελίου και οι θέσεις των ιόντων	35
Σχήμα 2.3 Η δομή του εξαφερρίτη $BaFe_{12}O_{19}$	36
Σχήμα 2.4 Η δομή του γρανάτη	37
Σχήμα 2.5 Η γενική δομή του περοβσκίτη	38
Σχήμα 2.6 Μετάβαση της κατεύθυνσης των σπιν σε τοίχωμα Bloch 180°	39
Σχήμα 2.7 Απλοποιημένη αναπαράσταση της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά την αρχική μαγνήτιση συνοδευόμενα με την πορεία επί της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης για αυξανόμενη ένταση του εξωτερικού πεδίου	40
Σχήμα 2.8 Αρχική καμπύλη μαγνήτιση και βρόχος υστέρησης	41
Σχήμα 2.9 Καμπύλη μαγνήτισης και βρόχος υστέρησης	42
Σχήμα 2.10 Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του ρεύματος ημιτονοειδούς κύματος που οδηγεί τη μαγνήτιση επί του βρόχου υστέρησης ανά κύκλο ημιτονοειδούς κύματος.....	43
Σχήμα 2.11 Διάγραμμα του φάσματος διαπερατότητας φερρίτη νικελίου που δείχνει την πορεία της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας της μαγνήτισης.....	46
Σχήμα 2.12 Τυπική χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης Z, ωμικής αντίστασης R και αντίδρασης X ενός φερρίτη	47
Σχήμα 2.13 Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο θορύβου	48
Σχήμα 2.14 Κοινού και διαφορικού τρόπου ρεύματα σε ένα κύκλωμα καταστολής ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών	49
Σχήμα 2.15 Διαγράμματα σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτες διαμέτρου 4.90mm των υλικών 31 (πάνω αριστερά), 44 (πάνω δεξιά), 61 (κάτω αριστερά) και 75 (κάτω δεξιά) της εταιρείας Fair - Rite	51
Σχήμα 2.16 Διαγράμματα σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για διάφορες περιελίξεις του καλωδίου εντός φερριτών διαμέτρου 4.90mm των υλικών 31 (αριστερά) και 75 (δεξιά) της εταιρείας Fair - Rite	51
Σχήμα 3.1 Η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση με τάση φόρτισης τα +4kV σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008	55
Σχήμα 3.2 Η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση με τάση φόρτισης τα +4kV σύμφωνα με τη νέα, υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2	57
Σχήμα 3.3 Διάταξη μέτρησης της κυματομορφής ρεύματος εξ επαφής εκφόρτισης από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη μελέτη επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος μήκους 2m.....	58
Σχήμα 3.4 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με επίπεδο τάσης +4kV για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος	60

Σχήμα 3.5 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με επίπεδο τάσης , με επίπεδο τάσης +4kV για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος	61
Σχήμα 3.6 Σύγκριση φάσματος των κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με επίπεδο τάσης , με επίπεδο τάσης +4kV για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος	61
Σχήμα 3.7 Σύγκριση σύνθετων κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης Composite A και B, με μετρούμενες κυματομορφές ρεύματος και την ιδανική κυματομορφή που ορίζεται από το Πρότυπο [28]. (a) η οικογένεια Lc και IEC (b) η οικογένεια Ld1 και IEC	62
Σχήμα 3.8 Σύγκριση φάσματος σύνθετων κυματομορφών Composite A και B , με αυτό των μετρούμενων κυματομορφών ρεύματος και της ιδανικής κυματομορφής που ορίζεται από το Πρότυπο [28] (a) η οικογένεια Lc και IEC (b) η οικογένεια Ld1 και IEC	63
Σχήμα 3.9 Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης έντεκα εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση, με επίπεδο τάσης +8kV	64
Σχήμα 3.10 “Τριγωνική” και “πραγματική” διάταξη του καλωδίου επιστροφής ρεύματος	65
Σχήμα 3.11 Αποτελέσματα πρώτου γύρου μετρήσεων	66
Σχήμα 3.12 Αποτελέσματα δεύτερου γύρου μετρήσεων	67
Σχήμα 3.13 Διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και μέτρησης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση	69
Σχήμα 3.14 Φάσμα των αντιστάσεων καλωδίων επιστροφής ρεύματος, μήκους 2m από την πλευρά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με γειωμένο το άλλο άκρο	70
Σχήμα 3.15 Κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας για εξ επαφής εκφόρτιση, με επίπεδο τάσης +4kV, από την γεννήτρια D και η ιδανική κυματομορφή ρεύματος μαζί με (b) τα αντίστοιχα φάσματα των κυματομορφών	71
Σχήμα 3.16 (a) Κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας για εξ επαφής εκφόρτιση, με επίπεδο τάσης +4kV, από την γεννήτρια B και η ιδανική κυματομορφή ρεύματος μαζί με (b),(c) τα αντίστοιχα φάσματα των κυματομορφών για διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου φόρτισης	72
Σχήμα 4.1 Η πειραματική διάταξη	77
Σχήμα 4.2 Διαφορετικές θέσεις εφαρμογής φερρίτη επί του καλώδιου επιστροφής ρεύματος	80
Σχήμα 4.3 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 31 (4kV)	93
Σχήμα 4.4 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 44 (4kV)	94
Σχήμα 4.5 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 61 (4kV)	94
Σχήμα 4.6 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 75 (4kV)	95
Σχήμα 4.7 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431164181 με διαφορετικές σπείρες (4kV)	96
Σχήμα 4.8 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431164281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)	96
Σχήμα 4.9 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431167281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)	97
Σχήμα 4.10 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431176451 με διαφορετικές σπείρες (4kV)	97
Σχήμα 4.11 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431178281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)	98

[illegible]

Σχήμα 4.36 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 75 (8kV)	111
Σχήμα 4.37 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm διαφορετικών υλικών (8kV)	111
Σχήμα 4.38 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 6.30mm διαφορετικών υλικών (8kV)	112
Σχήμα 4.39 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους	113
Σχήμα 4.40 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους	113
Σχήμα 4.41 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους	114
Σχήμα 4.42 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους	114
Σχήμα 4.43 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους	115
Σχήμα 4.44 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους	116
Σχήμα 4.45 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους	116
Σχήμα 4.46 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους	117
Σχήμα 4.47 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164951 (4.90mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος	118
Σχήμα 4.48 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164951 (4.90mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος	118
Σχήμα 4.49 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος	119
Σχήμα 4.50 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164281 (6.30mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος	119
Σχήμα 4.51 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος των γεννητριών NSG-433, NSG-438 και DITO χωρίς εφαρμογή φερρίτη	120
Σχήμα 4.52 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος της γεννήτριας NSG-433 με την εφαρμογή φερρίτη 0431167281 (9.85mm & 6.30mm).....	121
Σχήμα 4.53 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος της γεννήτριας NSG-438 με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm)	121

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Τριβοηλεκτρική Σειρά	28
Πίνακας 1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και εκφόρτιση των υλικών	29
Πίνακας 3.1 Επίπεδα δοκιμών για ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008	54
Πίνακας 3.2 Παράμετροι της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για κάθε επίπεδο δοκιμών σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008	54
Πίνακας 3.3 Παράμετροι της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για κάθε επίπεδο δοκιμών σύμφωνα με την νέα, υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2	57
Πίνακας 4.1 Συγκριτικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	74
Πίνακας 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου TDS 7254B	75
Πίνακας 4.3 Πίνακας των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία	76
Πίνακας 4.4 Συνοπτικός πίνακας παρουσίασης των σταδίων του πειράματος.....	79
Πίνακας 4.5 Τιμές αναφοράς παραμέτρων πρώτου σταδίου πειράματος	84
Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα πρώτου σταδίου πειράματος	85
Πίνακας 4.7 Τιμές αναφοράς παραμέτρων δεύτερου σταδίου πειράματος.....	86
Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα δεύτερου σταδίου πειράματος.....	87
Πίνακας 4.9 Τιμές αναφοράς παραμέτρων τρίτου σταδίου πειράματος	87
Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα τρίτου σταδίου πειράματος	88
Πίνακας 4.11 Τιμές αναφοράς τέταρτου σταδίου πειράματος	88
Πίνακας 4.12 Αποτελέσματα τέταρτου σταδίου πειράματος	89
Πίνακας 4.13 Τιμές αναφοράς πέμπτου σταδίου πειράματος	89
Πίνακας 4.14 Αποτελέσματα πέμπτου σταδίου πειράματος.....	90
Πίνακας 4.15 Τιμές αναφοράς έκτου σταδίου πειράματος	90
Πίνακας 4.16 Αποτελέσματα έκτου σταδίου πειράματος	90

Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είναι η μελέτη της επίδρασης της εφαρμογής σφικτήρα φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Εξετάζονται οι μηχανισμοί λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και επισημαίνονται τα διάφορα μοντέλα ηλεκτροστατικής φόρτισης και εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στους φερρίτες. Αναλύονται οι διάφορες κατηγορίες φερριτών με βάση τις μαγνητικές τους ιδιότητες και την κρυσταλλική δομή τους. Έπειτα το ενδιαφέρον εστιάζεται σε κάποιες από τις μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των φερριτών καθώς και στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να λειτουργήσουν ως καταστολείς ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Τέλος παρουσιάζονται οι φερρίτες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα της παρούσας εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008 και η νέα, υπό αναθεώρηση έκδοση του 2023. Ακόμα αναφέρεται το φαινόμενο ringing που εμφανίζεται στις κυματομορφές ρεύματος διαφόρων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τέλος παρατίθενται πρόσφατες μελέτες που εξετάζουν και προτείνουν ποικίλους τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου ringing.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύεται λεπτομερώς το πείραμα και η επεξεργασία των μετρήσεων και κυματομορφών που ελήφθησαν κατά την διαδικασία. Περιγράφεται ο απαραίτητος εξοπλισμός του εργαστηρίου, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και αναλύεται το πείραμα ως προς τα διάφορα στάδια του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, σχολιάζονται και συγκρίνονται με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια σύνοψη της παρούσας εργασίας και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών.

Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility [EMC]) αποτελεί ένα διαρκώς εξελισσόμενο πεδίο της επιστήμης. Η ενασχόληση με αυτήν έγινε αναπόφευκτη καθώς είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων αιώνων και την ανάγκη για ομαλή λειτουργία των ολοένα και πιο περίπλοκων ηλεκτρονικών συστημάτων. Καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονταν και η αξιοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος γινόταν πιο εκτεταμένη, η διαχείριση των παρεμβολών και η διασφάλιση της συμβατότητας μεταξύ των συσκευών έγιναν κρίσιμες για την αποτροπή προβλημάτων στην καθημερινή ζωή και στις κρίσιμες εφαρμογές.

Η ιστορία της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αντικατοπτρίζει την ανάγκη της κοινωνίας να διαχειριστεί και να ελέγξει τις παρεμβολές που προκύπτουν από την ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών ηλεκτρονικών συστημάτων. Η αρχή αυτής της ανάγκης μπορεί να εντοπιστεί στα τέλη του 19ου και τις αρχές του 20ού αιώνα, όταν ο Guglielmo Marconi έθεσε τα θεμέλια για την ασύρματη επικοινωνία. Ωστόσο, η ραγδαία εξάπλωση της χρήσης των ραδιοκυμάτων έφερε στο προσκήνιο το πρόβλημα των παρεμβολών μεταξύ των διαφόρων συστημάτων, κάτι που οδήγησε στην πρώτη διεθνή προσπάθεια ρύθμισης των ραδιοσυχνοτήτων από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union [ITU])[1].

Κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, η ανάγκη για αξιόπιστες στρατιωτικές επικοινωνίες και η χρήση του ραντάρ ανέδειξαν τη σημασία της διαχείρισης των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Ο πόλεμος συντέλεσε στην εντατικοποίηση των ερευνών και στην ανάπτυξη τεχνολογιών που θα διασφάλιζαν την αξιόπιστη λειτουργία των κρίσιμων στρατιωτικών συστημάτων. Μετά τον πόλεμο, οι αρχές αυτές επεκτάθηκαν και σε εμπορικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα την καθιέρωση κανονισμών για την EMC[1].

Η μαζική παραγωγή ηλεκτρονικών καταναλωτικών προϊόντων κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960, όπως οι τηλεοράσεις και τα ραδιόφωνα, δημιούργησε νέες προκλήσεις για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Οι παρεμβολές μεταξύ των συσκευών αυτών οδήγησαν στην ανάγκη για πιο αυστηρούς κανονισμούς και πρότυπα, που καθιερώθηκαν από θεσμούς όπως η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission [FCC]) των ΗΠΑ και η Διεθνής Επιτροπή Ειδικών Ραδιοεπικοινωνιών (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques [CISPR]) [1].

Τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές έχουν κατακλύσει τις ζωές μας, ζούμε σε ένα περιβάλλον διάτρητο από δίκτυα και με διαρκή ανάγκη για επικοινωνία τόσο μεταξύ συσκευών όσο και μεταξύ ανθρώπων. Η ταχεία

εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών, σε συνδυασμό με την ευρεία διάδοση του ψηφιακού τρόπου ζωής, έχει φέρει στο προσκήνιο μεγαλύτερες απαιτήσεις για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα [1].

Οι συσκευές που βρίσκονται παντού γύρω μας – από τα κινητά τηλέφωνα και τους υπολογιστές μέχρι τα οικιακά συστήματα αυτοματισμού και τις βιομηχανικές εφαρμογές – πρέπει να λειτουργούν αρμονικά χωρίς να δημιουργούν «επιβλαβείς» παρεμβολές. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των συστημάτων και η αλληλεξάρτηση μεταξύ τους σημαίνει ότι ακόμη και μικρές διαταραχές μπορούν να έχουν σοβαρές συνέπειες, ιδίως σε κρίσιμες υποδομές όπως οι ιατρικές συσκευές, τα συστήματα ελέγχου αεροπλοΐας και οι μηχανισμοί ασφαλείας.

Η ανάγκη για αυστηρή ρύθμιση και εγγύηση του πλαισίου έχει γίνει πλέον επιτακτική, καθώς η πολυπλοκότητα των συστημάτων έχει αυξηθεί σημαντικά και πολλά από αυτά επιτελούν κρίσιμες λειτουργίες, δρώντας ως δικλείδες ασφαλείας σε διάφορους τομείς της καθημερινής ζωής και της βιομηχανίας. Αυτή η νέα πραγματικότητα έχει οδηγήσει στην αναθεώρηση και την ενίσχυση των προτύπων και των κανονισμών, με στόχο την εξασφάλιση της ασφαλούς, αξιόπιστης και αποτελεσματικής λειτουργίας των σύγχρονων τεχνολογιών σε ένα όλο και πιο περίπλοκο και διασυνδεδεμένο περιβάλλον.

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι η ομπρέλα κάτω από την οποία εμπίπτουν όλες οι έννοιες που σχετίζονται με τις παρεμβολές, τις εκπομπές, την ευαισθησία, των συσκευών και συστημάτων που χρησιμοποιούμε καθημερινά και λειτουργούν αδιάκοπα γύρω μας.

1.2 Βασικές έννοιες της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

Η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic interference [EMI]) αποτελεί μια από τις κεντρικές έννοιες του πεδίου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Πρόκειται για οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που διακόπτει, παρεμποδίζει ή υποβαθμίζει την αποτελεσματική λειτουργία και απόδοση ηλεκτρονικών στοιχείων και ηλεκτρικού εξοπλισμού. Αυτή η διαταραχή μπορεί να προκληθεί από διάφορες πηγές, όπως κινητά τηλέφωνα, ραδιοφωνικές εκπομπές ή ηλεκτρικούς κινητήρες. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα λειτουργίας ή μνήμης, με συνέπεια να παρεμποδίσουν ή και να αναστείλουν την λειτουργία ενός συστήματος ή μιας συσκευής [2].

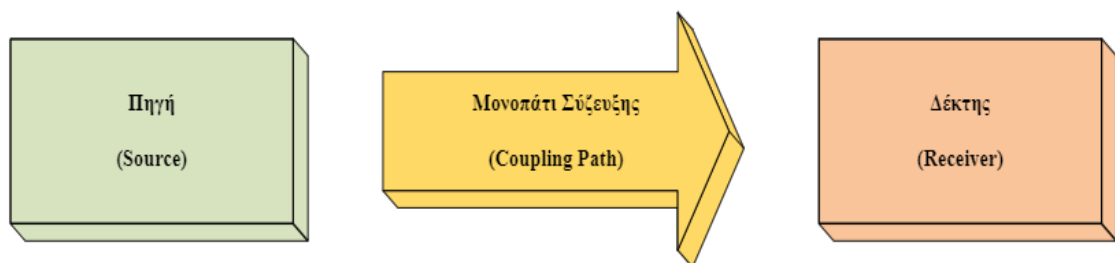
Η ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility [EMS]) ορίζεται ως η αδυναμία μιας συσκευής, εξοπλισμού ή συστήματος να αντιστέκεται στην υποβάθμιση της λειτουργίας της, υπό την εμφάνιση - παρουσία μια ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Μια συσκευή με υψηλή επιδεκτικότητα μπορεί να δυσλειτουργεί όταν εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Αντίθετη έννοια της επιδεκτικότητας είναι η ηλεκτρομαγνητική ατρωσία [2].

Η ηλεκτρομαγνητική ατρωσία μιας συσκευής ή ενός συστήματος ορίζεται ως η ικανότητα να λειτουργεί χωρίς υποβάθμιση της απόδοσης υπό την παρουσία ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Η στάθμη ατρωσίας αναφέρεται ουσιαστικά στον βαθμό επίτευξης της ατρωσίας. Ορίζεται ως η μέγιστη στάθμη μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής υπό την οποία ένα σύστημα μπορεί και εξακολουθεί να λειτουργεί με τον επιθυμητό βαθμό απόδοσης, καθορίζοντας ουσιαστικά το πόσο ανθεκτική είναι μια συσκευή από την σκοπιά της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [2].

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι απολύτως κρίσιμη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος και πρέπει πάντα να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Ορίζεται ως η ικανότητα ενός συστήματος, ή ακόμη και ενός επιμέρους τμήματος ενός κυκλώματος, να λειτουργεί ομαλά και ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον, χωρίς να εισάγει επιπρόσθετες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε άλλον εξοπλισμό εντός του ίδιου περιβάλλοντος. Για να επιτευχθεί αυτό, έχουν ενσωματωθεί βέλτιστες πρακτικές EMC από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τα πρότυπα και τις προδιαγραφές που διέπουν το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργεί το σύστημα [2].

1.3 Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Το πρόβλημα της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας αποτελείται από τρία θεμελιώδη στοιχεία. Η πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι το πρώτο στοιχείο. Από την πηγή - πομπό εκπέμπεται μια ηλεκτρομαγνητική ενέργεια ακούσια ή ηθελημένα, η οποία διοχετεύεται στον δέκτη. Ο δέκτης είναι το δεύτερο στοιχείο του προβλήματος και πρόκειται για ένα σύστημα ευαίσθητο στις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Τελευταίο στοιχείο του προβλήματος αποτελεί το μονοπάτι σύζευξης, το οποίο συνδέει με οποιονδήποτε τρόπο τον πομπό και τον δέκτη και μέσω του οποίου διοχετεύεται η διαταραχή από τον πρώτο στο δεύτερο. Δεν μπορεί να υπάρξει πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας χωρίς και τα τρία στοιχεία και παρά το γεγονός ότι η αναγνώριση τους δεν είναι πάντοτε εύκολη, είναι αναγκαία τουλάχιστον δύο εκ των τριών για την επίλυση του [3].



Σχήμα 1.1 Θεμελιώδη στοιχεία του προβλήματος ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι προστασίας από ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, ανάλογα με το θεμελιώδες στοιχείο του προβλήματος, στο οποίο έχει αποφασιστεί να πραγματοποιηθεί παρέμβαση [4].

1. Καταστολή του εκπεμπόμενου σήματος στην πηγή.
2. Μείωση της αποτελεσματικότητας του μονοπατιού σύζευξης.
3. Μείωση της επιδεκτικότητας του δέκτη.

Η διαταραχή προκαλεί ενδιαφέρον, όταν λαμβανόμενη από το δέκτη, επηρεάζει την απόδοση του. Η διαταραχή συνεπώς εξαρτάται σε πρώτη φάση από την επιδεκτικότητα του δέκτη. Η μείωση της επιδεκτικότητας του δέκτη είναι μια δύσκολη διαδικασία. Μια από τις τεχνικές, για την επίτευξη της, είναι η θωράκιση (Shielding) κατά την οποία ο δέκτης τοποθετείται εντός ενός μεταλλικού περιβλήματος, ούτως ώστε να απομονωθεί, προστατεύοντας τον από πιθανές εξωτερικές ανεπιθύμητες διαταραχές [4].

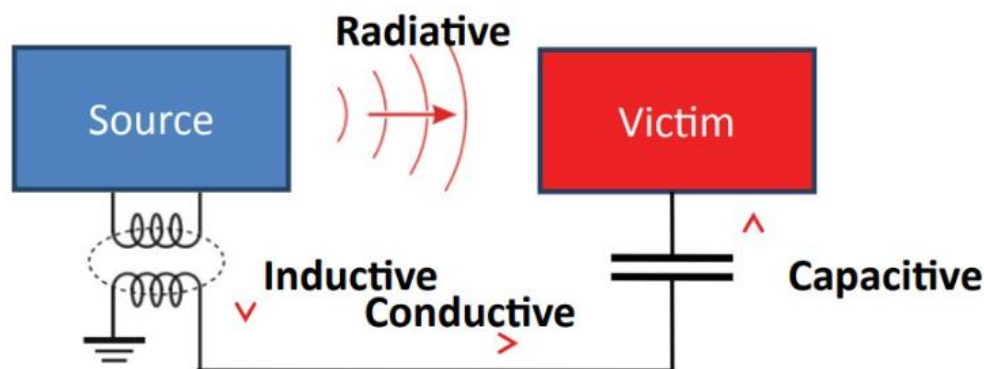
Η προφανής παρέμβαση στην συσκευή ή σύστημα το οποίο λειτουργεί ως πηγή διαταραχών είναι, η απόπειρα μείωσης των εκπομπών της. Αν η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή οφείλεται σε εκούσια λειτουργία του συστήματος του πομπού, καθίσταται δύσκολη η επίδραση σε αυτόν, χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία και απόδοση του [5].

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί επέμβαση στο μονοπάτι σύζευξης, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η διαδρομή μέσα από την οποία διοχετεύονται οι διαταραχές.

1.3.1 Μηχανισμοί σύζευξης

Το μονοπάτι σύζευξης μεταξύ πομπού και δέκτη δεν αποτελεί πάντα τμήμα κάποιας σχεδιασμένης διασύνδεσης τους. Ως επί το πλείστον είναι το σημείο παρέμβασης του μηχανικού, προκειμένου να επιλυθεί το ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί σύζευξης δυο συστημάτων ή συσκευών.

- Αγώγιμη σύνδεση (conductive)
- Χωρητική σύνδεση (capacitive)
- Επαγωγική σύνδεση (inductive)
- Ακτινοβολούμενη σύνδεση (radiative)



Σχήμα 1.2 Μηχανισμοί σύζευξης Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών [6]

Η αγώγιμη σύζευξη μπορεί να συμβεί όταν δύο ή περισσότερα κυκλώματα μοιράζονται μια κοινή διαδρομή ή κοινούς αγωγούς. Αυτή σύνδεση μπορεί να αφορά

είτε κοινή τροφοδοσία είτε κάποια διασύνδεση μεταξύ των συσκευών. Οι συσκευές συνήθως έχουν κοινή γείωση ή κάποιο άλλο κοινό επίπεδο αναφοράς. Ρεύματα σφάλματος από την πηγή, τα οποία έχουν προκληθεί από κάποια υπέρταση ή διαταραχή, μπορούν να αναπτύξουν μέσω των κοινών καλωδίων μη επιθυμητές τάσεις στον δέκτη υποβαθμίζοντας τη λειτουργία του κυκλώματος [7][8].

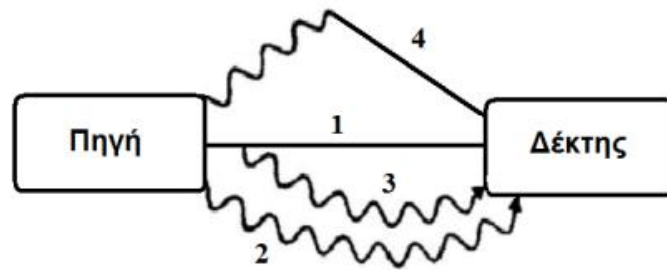
Η χωρητική σύζευξη εμφανίζεται μεταξύ δύο κυκλωμάτων ή συσκευών, της πηγής και του δέκτη, όταν παρουσιάζουν χωρητική συμπεριφορά λόγω κοντινής απόστασης και μεταβολών της τάσης. Στον δέκτη εμφανίζονται χωρητικά συζευγμένες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Κάποιες από τις παραμέτρους που επηρεάζουν είναι η μεταβολή της τάσης, η απόσταση, η συχνότητα, η αντίσταση εισόδου του δέκτη, η μόνωση του δέκτη και το ύψος από το έδαφος. Τρόποι αντιμετώπισης συνήθως είναι η προσπάθεια μείωσης της μεταβολής της τάσης – θορύβου, η μείωση της παρασιτικής χωρητικότητας μέσω της απομάκρυνσης του εξοπλισμού και το φιλτράρισμα των λαμβανόμενων σημάτων στο κύκλωμα του δέκτη [7][8].

Η επαγωγική σύζευξη δημιουργείται λόγω της ύπαρξης μιας αμοιβαίας επαγωγής M [Henry] μεταξύ δύο ή περισσότερων κυκλωμάτων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Υπεύθυνο για τη σύζευξη είναι το μαγνητικό H -πεδίο. Η επαγωγική σύζευξη αξιοποιεί την αρχή της αμοιβαίας επαγωγής για να δημιουργήσει επαγωγικά ρεύματα στον δέκτη εξαιτίας του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου μεταξύ πηγής και δέκτη. Το επίπεδο της διαταραχής εξαρτάται από τη μεταβολή του ρεύματος στην πηγή και την αμοιβαία επαγωγή. Το φαινόμενο της επαγωγικής σύζευξης αντιμετωπίζεται με τη μείωση των βρόχων του κυκλώματος του δέκτη, προκειμένου να μειωθεί η μαγνητική ροή, με την χωρική απομάκρυνση και θωράκιση του δέκτη καθώς και με την αντιστροφή του προσανατολισμού των βρόχων του ενός εκ των κυκλωμάτων [7][8].

Η ακτινοβολούμενη σύζευξη αποτελεί έναν τρόπο σύζευξης που δεν εξαρτάται τόσο έντονα από την χωρική εγγύτητα ή την ηλεκτρική διασύνδεση των δύο εμπλεκόμενων κυκλωμάτων. Σημαντική προϋπόθεση είναι η απόσταση μεταξύ τους να είναι σημαντικά μεγαλύτερη του μήκους κύματος του ακτινοβολούμενου σήματος θορύβου. Το πεδίο ενδιαφέροντος σε αυτή τη περίπτωση είναι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αποτελούμενο από το ηλεκτρικό E -πεδίο και το μαγνητικό H -πεδίο, κάθετα μεταξύ τους, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η σύζευξη. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να ταξιδέψει μέσω του αέρα και του κενού και οι εντάσεις των πεδίων μειώνονται με τον παράγοντα $1/d$, όπου d (m) είναι η απόσταση από την ακτινοβολούσα πηγή. Οι συχνότητες των ακτινοβολιών συνήθως βρίσκονται στο υψηλό τμήμα του πεδίου των ραδιοσυχνοτήτων. Για τον λόγο αυτό οι διαταραχές που προκαλούνται από ακτινοβολούμενη σύζευξη πολλές φορές αναφέρονται ως διαταραχές από ραδιοσυχνότητες [7][8].

Η χωρητική και η επαγωγική σύζευξη λόγω της χωρικής εξάρτησης τους και της χαμηλότερης ισχύος τους δεν αποτελούν σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, το οποίο εστιάζεται κυρίως στην αγωγή και στην ακτινοβολούμενη σύζευξη. Απαραίτητες

έννοιες για την ύπαρξη όλων των μηχανισμών σύζευξης είναι οι εκπομπές της πηγής και η επιδεκτικότητα του δέκτη.



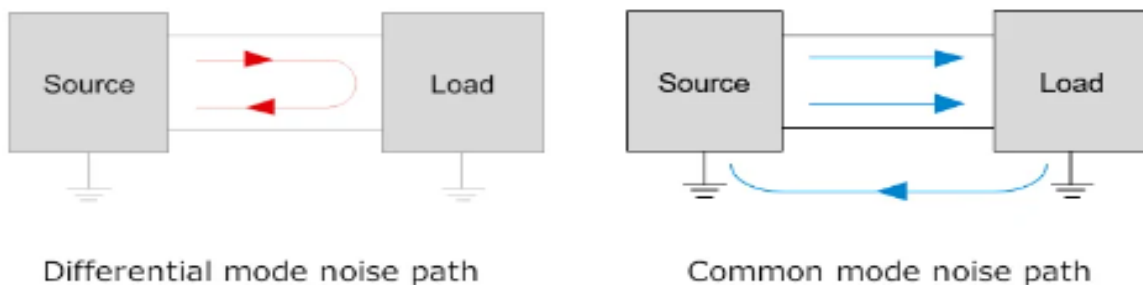
1. Σύζευξη μόνο δι'αγωγής
2. Σύζευξη μόνο δι'ακτινοβολίας
3. Σύζευξη μόνο δι'αγωγής ακολουθούμενος και με σύζευξη δι'ακτινοβολίας
4. Σύζευξη μόνο δι'ακτινοβολίας ακολουθούμενος και με σύζευξη δι'αγωγής

Σχήμα 1.3 Σχηματικό Διάγραμμα πιθανών τρόπων σύζευξης [9]

Τα μονοπάτια σύζευξης συχνά αξιοποιούν πολύπλοκους συνδυασμούς μηχανισμών καθιστώντας δύσκολο τον εντοπισμό και την κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας του μονοπατιού σύζευξης, ακόμα και όταν είναι γνωστά η πηγή και ο δέκτης. Μια κοινή παρανόηση είναι ότι το μονοπάτι σύζευξης μπορεί να λειτουργεί με μόνο έναν από τους προαναφερθέντες μηχανισμούς αλλά στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει. Η διαταραχή από την πηγή μπορεί να ακολουθήσει διάφορες επιμέρους διαδρομές και αξιοποιώντας διαφορετικούς μηχανισμούς σε κάθε φάση μέχρι να προσβάλλει τον δέκτη, ενώ η ρύθμιση του ενός μπορεί να απορρυθμίσει κάποιον άλλο [3][9].

1.3.2 Παρεμβολή κοινού – διαφορικού τρόπου

Οι ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές εμφανίζονται σε συζευγμένα κυκλώματα με δύο βασικούς τρόπους: τον θόρυβο κοινού-τρόπου (common-mode noise), όπου ο θόρυβος έχει ίδια κατεύθυνση και στους δύο αγωγούς, και τον θόρυβο διαφορικού-τρόπου (differential-mode noise), όπου ο θόρυβος εμφανίζεται μεταξύ δύο αγωγών με αντίθετες ροές ρεύματος. Αυτή η διάκριση βοηθά στην κατανόηση και αντιμετώπιση των διαφορετικών τύπων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.



Σχήμα 1.4 Θόρυβος κοινού και διαφορικού τρόπου [10]

Ο θόρυβος κοινού τρόπου (common mode noise) αναφέρεται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που εμφανίζονται ταυτόχρονα σε δύο ή περισσότερους αγωγούς, σε σχέση

με μια κοινή γείωση. Ο θόρυβος διαδίδεται στην ίδια κατεύθυνση στους αγωγούς, προκαλώντας προβλήματα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ή συσκευές.

Ο θόρυβος διαφορικής λειτουργίας (differential mode noise) αναφέρεται σε παρεμβολές που εμφανίζονται μεταξύ δύο αγωγών, με το σήμα θορύβου να διαδίδεται προς αντίθετες κατευθύνσεις στους δύο αγωγούς (π.χ. φάση και ουδέτερος σε γραμμή τροφοδοσίας). Αυτός ο θόρυβος εμφανίζεται στην ίδια διαδρομή που ακολουθεί και το επιθυμητό σήμα.

1.4 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic Discharge [ESD]) αποτελεί μία από τις πιο συχνές και σημαντικές αιτίες παρεμβολών στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Ως φυσικό φαινόμενο, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η αιφνίδια, στιγμιαία και παροδική ροή ρεύματος μεταξύ δύο φορτισμένων σωμάτων με διαφορετικό δυναμικό, προκειμένου να αντισταθμιστεί η ανισορροπία φορτίου μεταξύ τους. Το φαινόμενο πάρα τη σύντομη διάρκεια του μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συσκευή δέκτη και να υποβαθμίσει αρκετά τη λειτουργία ηλεκτρονικών συστημάτων. Παρόλο που η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αποτελεί φυσιολογικό μέρος της ηλεκτρομαγνητικής δραστηριότητας, όταν δεν ελέγχεται σωστά, μπορεί πέρα από το να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία ευαίσθητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, να βλάψει και ανθρώπους, καθιστώντας την βασικό αντικείμενο μελέτης στα πλαίσια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [9].

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί μέσω των οποίων δημιουργείται η ηλεκτροστατική φόρτιση, όπως η τριβοηλεκτρική φόρτιση (τριβή μεταξύ επιφανειών) και η επαγωγική φόρτιση. Η τριβοηλεκτρική φόρτιση συμβαίνει όταν δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή και τρίβονται μεταξύ τους, προκαλώντας τη μεταφορά φορτίων. Η επαγωγική φόρτιση συμβαίνει όταν ένα σώμα τοποθετείται σε ηλεκτρικό πεδίο, προκαλώντας φόρτιση με αντίθετες πολικότητες στις πλευρές του, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εκφόρτιση όταν υπάρξει αγωγή διαδρομή [2].

1.4.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια φυσική διαδικασία κατά την οποία ηλεκτρικά φορτία μεταφέρονται μεταξύ δύο επιφανειών όταν αυτές τρίβονται μεταξύ τους. Αυτή η μεταφορά φορτίων δημιουργεί ηλεκτροστατική φόρτιση, με το ένα υλικό να αποκτά θετικό και το άλλο αρνητικό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό εξηγεί γιατί κάποια υλικά φορτίζονται ηλεκτροστατικά μετά από τριβή και είναι υπεύθυνο για καθημερινά φαινόμενα, όπως ο στατικός ηλεκτρισμός σε ρούχα ή η εκφόρτιση όταν αγγίζουμε ένα μεταλλικό αντικείμενο. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη δυναμικών της τάξης των αρκετών kV με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ [8].

Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στην φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Στην πραγματικότητα όμως η τριβή δεν είναι απαραίτητη για να συμβεί η μεταφορά των ηλεκτρονίων και ο σχηματισμός των

φορτίων. Ο κρίσιμος παράγοντας εδώ είναι η ηλεκτραρνητικότητα των υλικών, δηλαδή η ικανότητα τους να προσελκύουν ή να χάνουν ηλεκτρόνια. Όταν δύο υλικά με διαφορετική ηλεκτραρνητικότητα έρχονται σε επαφή, το υλικό με τη χαμηλότερη ηλεκτραρνητικότητα τείνει να χάνει ηλεκτρόνια, ενώ το υλικό με υψηλότερη τα απορροφά. Αυτός ο διαχωρισμός φορτίων προκαλεί την εμφάνιση στατικού ηλεκτρισμού [9].

Η ηλεκτραρνητικότητα και το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο σχετίζονται στενά μέσω της ικανότητας των υλικών να χάνουν ή να κερδίζουν ηλεκτρόνια, αλλά εξίσου σημαντική είναι η επίδραση των μονωτών στη διαδικασία αυτή. Οι μονωτές είναι υλικά που δεν επιτρέπουν εύκολα την κίνηση των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα τα φορτία που συσσωρεύονται σε αυτούς κατά την τριβή να παραμένουν στην επιφάνεια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερες τιμές στατικού ηλεκτρισμού. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά ηλεκτραρνητικότητας μεταξύ δύο μονωτών ή και υλικών γενικότερα, τόσο πιο έντονη είναι η τριβοηλεκτρική φόρτιση. Για αυτό, υλικά όπως το πλαστικό και το γυαλί συχνά δημιουργούν ισχυρό στατικό φορτίο όταν τρίβονται [9].

Η ιδιότητα της ηλεκτραρνητικότητας συχνά εκφράζεται με την έννοια της τριβοηλεκτρικής σειράς, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.1. Όσο πιο υψηλά κατατάσσονται τα διάφορα υλικά στον πίνακα της τριβοηλεκτρικής σειράς τόσο ισχυρότερη είναι η φόρτιση που εμφανίζουν. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών εξ απαγωγής, είναι η επιφάνεια επαφής, ο συντελεστής τριβής, η υγρασία στις επιφάνειες [9].

Πίνακας 1.1 Τριβοηλεκτρική Σειρά [9]

Υλικά με θετική φόρτιση ++(ΠΟΛΥ ΘΕΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ) ++	Υλικά με αρνητική φόρτιση - (ΛΙΓΟ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ) -
Αέρας	
Ανθρώπινο δέρμα	Κερί γυαλίσματος
Γυαλί	Σκληρό λάστιχο
Ανθρώπινα μαλλιά	Κόλλα συγκόλλησης
Nylon	Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι
Μαλλί	Ανοξείδωτο ατσάλι
Γούνα	Συνθετικό λάστιχο
Μόλυβδος	Ακρυλικό
Μετάξι	Αφρός πολυουρεθάνης
Αλουμίνιο	Πολυεστέρας
Χαρτί	Πολυαιθυλένιο
Πολυουρεθάνη	PVC
Βαμβάκι	TEFLON
Ξύλο	Λάστιχο σιλικόνης
Ατσάλι	
+ (ΛΙΓΟ ΘΕΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ) +	(- - (ΠΟΛΥ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ)- -

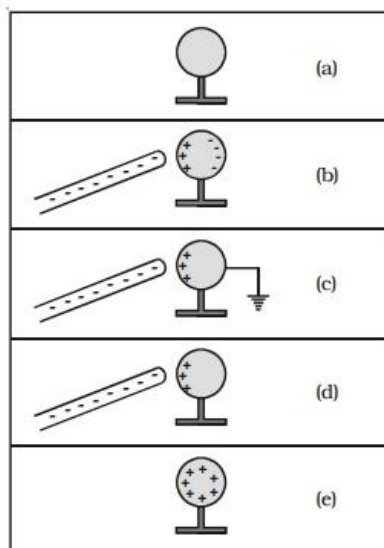
Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτροστατική φόρτιση και εκφόρτιση αναγράφονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και εκφόρτιση των υλικών [9]

Συντελεστές Φόρτισης	Συντελεστές Εκφόρτισης
Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική σειρά	Αγωγιμότητα των υλικών
Επιφάνεια επαφής	Σχετική υγρασία
Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών	Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών
Βαθμός διαχωρισμού	Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού

1.4.2 Φόρτιση εξ επαγωγής

Η φόρτιση εξ επαγωγής είναι η δεύτερη μέθοδος ηλεκτροστατικής φόρτισης και συχνά αναφέρεται ως έμμεση φόρτιση. Πρόκειται για την διαδικασία με την οποία ένα αντικείμενο φορτίζεται ηλεκτρικά εξαιτίας της παρουσίας ηλεκτρικού πεδίου. Όταν ένας αγωγός, εντός του οποίου τα ηλεκτρόνια κινούνται με ευκολία, τοποθετηθεί στην περιοχή ενός ηλεκτρικού E -πεδίου, θα υποστεί την ακόλουθη διαδικασία. Τα ηλεκτρόνια θα κατευθυνθούν όπως ορίζει το πεδίο, δημιουργώντας δυο περιοχές με διαφορετική φόρτιση εντός του συνολικά ηλεκτρικά ουδέτερου αγωγού. Αν κάποιο άκρο του αγωγού γειωθεί, το συγκεντρωμένο φορτίο στην υποπεριοχή μπορεί να διαφύγει στη γη. Διακόπτοντας στη συνέχεια την σύνδεση με τη γη και αφαιρώντας τον αγωγό από τη περιοχή του πεδίου, παρατηρούμε ότι ο αγωγός διατηρεί μόνιμη φόρτιση [11].



Σχήμα 1.5 Στάδια ηλεκτροστατικής φόρτισης εξ επαγωγής [11]

1.4.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων των συσκευών με αποτέλεσμα την καταστροφή τους [12]. Οι σπινθήρες κατά την εκφόρτιση σε εύφλεκτα υλικά μπορούν να οδηγήσουν

σε αναφλέξεις ή ακόμη και σε εκρήξεις. Ηλεκτρονικά εξαρτήματα μικροσκοπικού μεγέθους μπορούν να καταστραφούν ακαριαία από μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση μερικών δεκάδων Volt. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορούν να λάβουν χώρα:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές στο κέρδος του κυκλώματος ή στο εύρος ζώνης λειτουργίας, αλλοιώσεις στα παραγόμενα σήματα και στην λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματα τους είναι μια προσωρινή δυσλειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εγγεόμενο ηλεκτρικό ρεύμα [9].

Για την προστασία του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού έναντι των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων μπορούν να ληφθούν διάφορα προληπτικά μέτρα και να εφαρμοστούν τεχνικές προστασίας που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματα που επιφέρουν. Κάποια από αυτά τα μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου απαιτείται η επικάλυψη των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή με ένα αγωγίμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης τάσης φόρτισης. Το αναπτυσσόμενο φορτίο εξ επαγωγής στην επιφάνεια του υλικού πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [13], όπως οι γνωστές αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [14] ανέπτυξαν προτάσεις σχετικά με την σχεδίαση δαπέδων, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς τη γη μικρότερη των $10^7 \Omega$ και πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες [9].

Η ελαχιστοποίηση των δυσμενών αποτελεσμάτων των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή των ακόλουθων τεχνικών:

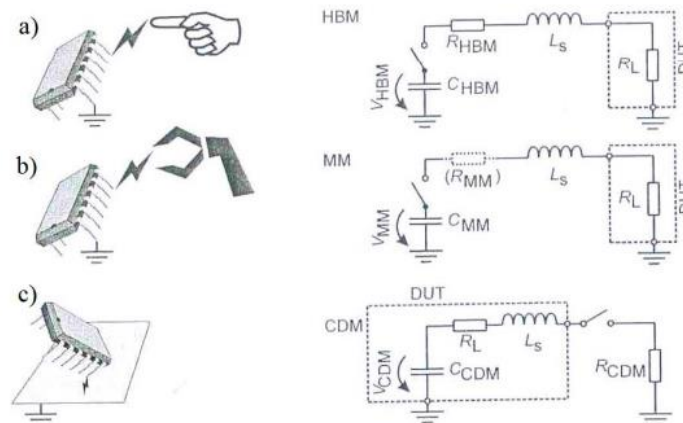
- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή των δευτερευουσών εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, η οποία θα εξασφαλίζει μια εναλλακτική διαδρομή για τη ροή του ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον πεδίων εξ επαγωγής.

- Εγκατάσταση συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό [12].

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο κέλυφος (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες εκφορτίσεις. Προκειμένου τα κελύφη να είναι αποτελεσματικά πρέπει να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα, μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα ή έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μπουτόν, τα οποία διαπερνούν το κέλυφος [12].

1.4.4 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Καθημερινά συμβαίνουν διάφορα είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα οποία εμπλέκονται ποικίλα είδη σωμάτων. Αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων είναι η ομαδοποίηση των συμβάντων αυτών έτσι ώστε να μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model – HBM), που προσομοιώνει τις εκκενώσεις που συμβαίνουν μεταξύ ενός ανθρώπου, χέρι ή δάχτυλο, και αγωγού, το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM), που προσομοιώνει εκκενώσεις από κάποιο μηχάνημα μέσω μιας συσκευής στο έδαφος (δοκιμή σύμφωνα με αυτό το μοντέλο διακόπτεται γρήγορα σε ολόκληρο τον κλάδο) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM), που προσομοιώνει τις εκφορτίσεις όταν η συσκευή υπό δοκιμή φορτίζεται και εκκενώνεται σε γειωμένο αγωγό [13]. Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 1.6:



Σχήμα 1.6 Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [13]

Τα μοντέλα περιγράφονται επίσης από τις δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα και συγκεκριμένα έχουμε:

$$L_s \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{esd} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{esd}} i = 0 \quad [1.1]$$

Όπου R_{esd} η συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης R_L της υπό εξέτασης συσκευής (Device Under Test), C_{esd} η χωρητικότητα πυκνωτή ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_C και L_S η αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης [12].

1.4.4.1 Μοντέλο ανθρώπινου σώματος

Το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος προσομοιώνει την εκφόρτιση που λαμβάνει χώρα από ένα άτομο προς μια γειωμένη συσκευή. Οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος διαφέρουν ανάλογα με τα πρότυπα, αλλά ποιοτικά τα στοιχεία παραμένουν ίδια. Η χωρητικότητα του κυκλώματος συνήθως βρίσκεται μεταξύ 50 και 250pF καθώς σε αυτές τις τιμές κυμαίνεται η χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος. Η αντίσταση του κυκλώματος αναπαριστά την αντίσταση του ανθρώπινου σώματος, η οποία εξαρτώμενη από διάφορες παραμέτρους μπορεί να κινηθεί μεταξύ 100 και 10kΩ, ανάλογα με το μέρος του σώματος μέσω του οποίου γίνεται η εκφόρτιση. Οι συνηθέστερες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1000 και 1500Ω [9].

Ένας άνθρωπος δεν μπορεί να αντιληφθεί μια εκφόρτιση τάσης μικρότερης των 3500V. Καθώς όμως πολλές συσκευές είναι ευαίσθητες σε ζημιές που προκύπτουν από εκφορτίσεις των μόλις μερικών εκατοντάδων βολτ, ενδέχεται να προκύψει κάποια βλάβη στα κυκλώματα κάποιας συσκευής από εκφόρτιση που το άτομο δεν θα αισθανθεί. Οι εκφορτίσεις άνω των 25kV μπορούν να αποβούν ως και θανατηφόρες για τον άνθρωπο.

Κεφάλαιο 2: Φερρίτες

2.1 Ιστορική αναδρομή

Οι φερρίτες είναι κεραμικά μαγνητικά οξείδια, αποτελούμενα από οξείδια μετάλλων, κυρίως οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3), και άλλα μεταλλικά οξείδια, όπως του νικελίου, του ψευδαργύρου ή του μαγγανίου. Ένα από τα πρώτα μαγνητικά οξείδια με το οποίο ήρθε σε επαφή ο άνθρωπος, πολύ πριν την ανακάλυψη και κατανόηση του ηλεκτρομαγνητισμού ήταν ο μαγνητίτης [15].

Ο μαγνητίτης είναι ένα φυσικό μαγνητικό ορυκτό γνωστό για τις ιδιότητες του, το οποίο πήρε το όνομα του από την αρχαία ελληνική πόλη της Μαγνησίας, όπου πραγματοποιούνταν η εξόρυξη του. Αποτελείται από οξείδιο του σιδήρου και ήταν γνωστό από την αρχαιότητα για τις ισχυρές μαγνητικές του ιδιότητες. Λόγω των ιδιοτήτων αυτών χρησιμοποιήθηκε στις μαγνητικές πυξίδες, ενώ αποτέλεσε και το πρώτο υλικό, που επέτρεψε στους ανθρώπους, να μελετήσουν και να εκμεταλλευτούν το μαγνητισμό .

Τον 19^ο αιώνα με την ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού από τον Δανό φυσικό Hans Christian Oersted η έρευνα για τα μαγνητικά υλικά πέρασε σε μια νέα εποχή. Ο ηλεκτρομαγνητισμός άνοιξε το δρόμο στην ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητών, βασισμένων στο σίδηρο και στα κράματα αυτού. Τα κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα, όπως το νικέλιο και ο κοβάλτιο, ήταν οι πρώτες επιλογές για τη δημιουργία μαγνητικών υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Ωστόσο, ενώ τα μεταλλικά κράματα πρόσφεραν ικανοποιητική μαγνητική διαπερατότητα και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις πρώτες βιομηχανικές και ηλεκτρικές εφαρμογές, είχαν ως σημαντικό μειονέκτημα τις απώλειες ισχύος λόγω των δινορρευμάτων [15].

Τα δινορρεύματα προκαλούνται όταν ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί επαγόμενα ρεύματα μέσα σε ένα μεταλλικό υλικό, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν σε απώλειες ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Αυτά τα ρεύματα αποτελούσαν ένα σημαντικό πρόβλημα για εφαρμογές σε υψηλές συχνότητες, όπου οι μαγνητικές μεταβολές ήταν ταχύτερες και τα δινορρεύματα πιο έντονα. Οι τεχνικές για την ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών, όπως η υποδιαίρεση του πυρήνα των μετασχηματιστών σε λεπτά φύλλα για τη μείωση των δινορρευμάτων, προσέφεραν μερικές λύσεις, αλλά η ανάγκη για νέα υλικά με υψηλότερη ηλεκτρική αντίσταση ήταν πλέον εμφανής [15].

Τα μαγνητικά οξείδια (φερρίτες) άρχισαν να αναδεικνύονται ως ιδανικά υποψήφια υλικά, λόγω των ιδιαίτερων φυσικών και χημικών τους χαρακτηριστικών. Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα οξείδια αυτά παρουσίαζαν πολύ υψηλότερη ηλεκτρική αντίσταση, γεγονός που σήμαινε ότι τα δινορρεύματα μπορούσαν να μειωθούν δραματικά, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων χωρίς μεγάλες απώλειες ισχύος. Η δομή τους επιτρέπει στους φερρίτες να διαθέτουν μαγνητικές ιδιότητες, ενώ η κεραμική τους φύση προσδίδει το σημαντικό πλεονέκτημα της υψηλής

ηλεκτρικής αντίστασης, διαφοροποιώντας τους από τα παραδοσιακά μεταλλικά μαγνητικά υλικά. Η ικανότητα των φερριτών να μειώνουν τις απώλειες δινορρευσμάτων τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε συστήματα υψηλών συχνοτήτων και ισχύος, όπως μεγάλα πηνία και μετασχηματιστές [15].

2.2 Κατηγοριοποίηση φερριτών

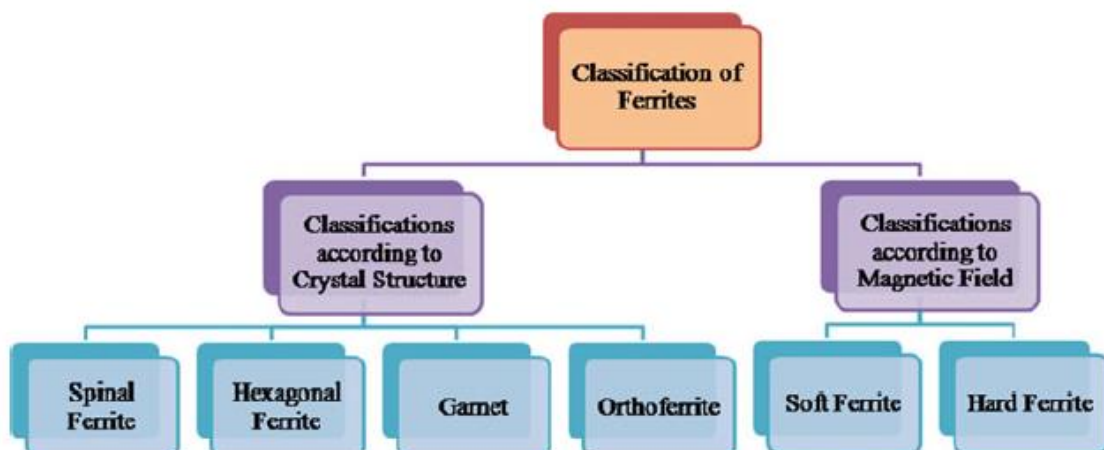
2.2.1 Σκληροί και Μαλακοί φερρίτες

Οι φερρίτες χωρίζονται αρχικά σε δύο κατηγορίες, τους σκληρούς και τους μαλακούς φερρίτες. Οι μαλακοί φερρίτες διαθέτουν χαμηλή απομαγνητότητα και υψηλή μαγνητική διαπερατότητα. Η χαμηλή απομαγνητότητα μεταφράζεται σε ευκολία για την απομαγνήτιση τους χωρίς να χρειάζεται σημαντική εξωτερική μαγνητική δύναμη. Αυτή η ιδιότητα τους καθιστά εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές υψηλής συχνότητας όπου απαιτείται γρήγορη εναλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Οι μαλακοί φερρίτες χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές μαγνητικής θωράκισης. Στους μαλακούς φερρίτες εντάσσονται οι φερρίτες μαγγανίου – ψευδαργύρου και οι φερρίτες νικελίου – ψευδαργύρου [15].

Οι σκληροί φερρίτες είναι υλικά με υψηλή απομαγνητότητα και χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα. Είναι πολύ δύσκολο να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν σε σχέση με τους μαλακούς φερρίτες και μπορούν να διατηρήσουν τη μαγνήτιση τους χωρίς εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων οι σκληροί φερρίτες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως ηχεία, αισθητήρες και κινητήρες. Στους σκληρούς φερρίτες συγκαταλέγονται οι φερρίτες βαρίου και στροντίου [16].

2.2.2 Κρυσταλλικές δομές φερριτών

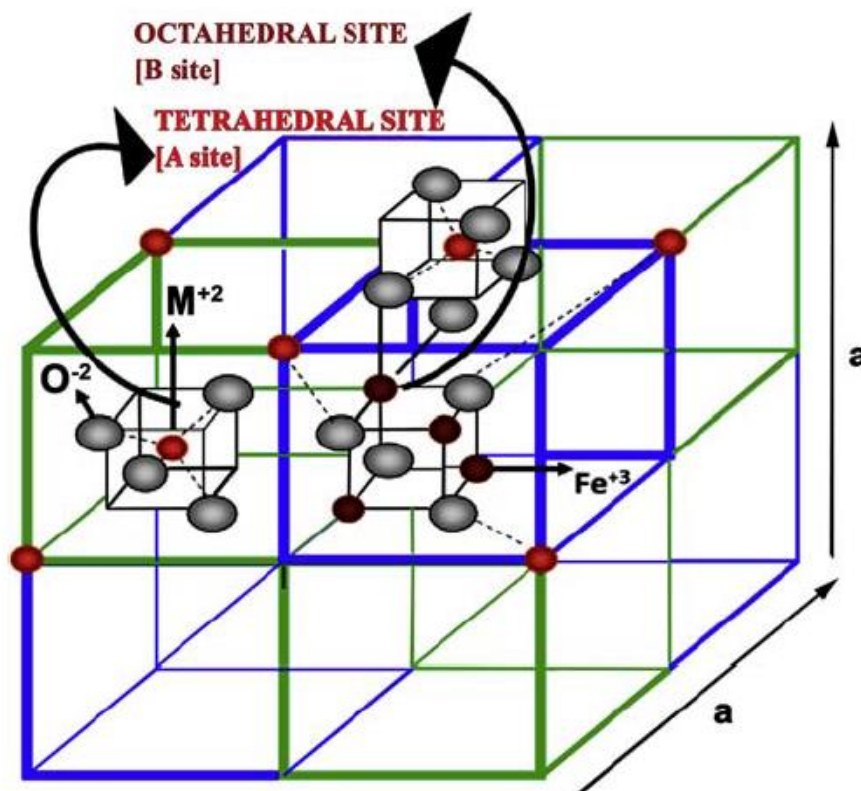
Με βάση την κρυσταλλική δομή οι φερρίτες χωρίζονται σε φερρίτες τύπου σπινελίου, φερρίτες τύπου γρανάτη, φερρίτες με εξαγωνική δομή και ορθοφερρίτες (ή αλλιώς φερρίτες τύπου περβσκίτη) [15].



Σχήμα 2.1 Κατηγοριοποίηση των φερριτών [15]

2.2.2.1 Φερρίτες τύπου σπινελίου

Οι φερρίτες τύπου σπινελίου είναι οι πιο άμεσα αναγνωρίσιμοι φερρίτες. Το πιο γνωστό μέλος αυτής της ομάδας είναι ο μαγνητίτης. Γενικά περιγράφονται από τον τύπο MFe_2O_4 , όπου M είναι συνήθως ένα δισθενές κατιόν όπως το κοβάλτιο ή ο ψευδάργυρος. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν τη δομική διαμόρφωση του σπινελίου $MgAl_2O_4$ και εξ αυτού πήρε το όνομα της η ομάδα.



Σχήμα 2.2 Στοιχειώδης κυψελίδα της δομής σπινελίου και οι θέσεις των ιόντων [16]

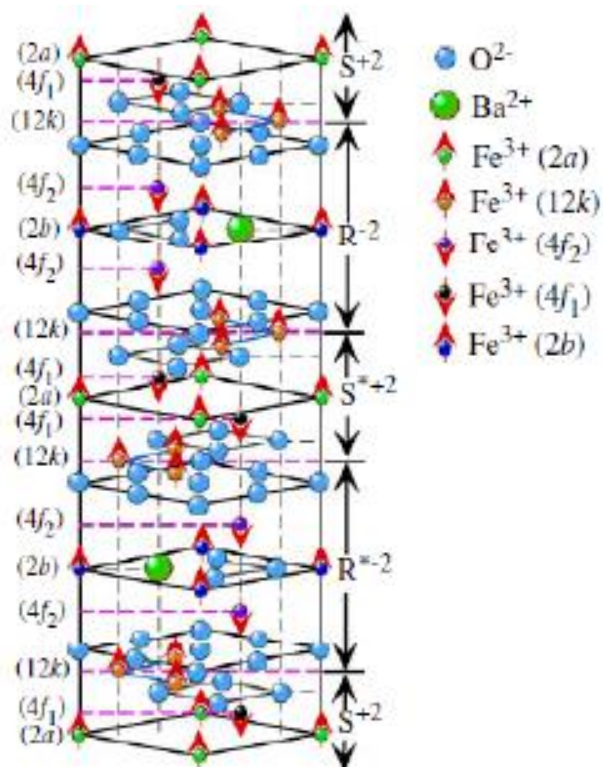
Στην ατομική διάταξη του σπινελίου με γενικό τύπο AB_2O_4 , το εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα των ιόντων O^{2-} γεμίζεται μερικώς από τα μεταλλικά κατιόντα. Πιο συγκεκριμένα δισθενή κατιόντα καταλαμβάνουν 8 – από τις 64 συνολικές πιθανές - τετραεδρικές θέσεις του πλέγματος, ενώ σε 16 – από τις 32 συνολικές πιθανές - οκταεδρικές θέσεις εδράζονται τα τρισθενή μέταλλα. Η θεμελιώδης κυψελίδα χωρίζεται σε όγδοα τα οποία ανά 4 φέρουν διαφορετική δομή και εξ αυτού χωρίζονται σε τύπου A και τύπου B [17].

Σε όλα τα όγδοα εμπεριέχονται τα ιόντα οξυγόνων στις ίδιες τετραεδρικές θέσεις. Το όγδοο με τύπο A αφορά τετραεδρικές θέσεις ενώ ο τύπος B οκταεδρικές θέσεις. Συνεπώς η θεμελιώδης κυψελίδα των φερριτών σπινελίου φαίνεται να αποτελείται από 8 μόρια που φέρουν το γενικό τύπο AB_2O_4 . Το κάθε μόριο έχει 3 ιόντα μετάλλου εκ των οποίων τα δυο ιόντα βρίσκονται σε οκταεδρικές θέσεις (B) ενώ το άλλο σε τετραεδρική θέση (A) [17].

Σε μια κανονική δομή σπινελίου το δισθενές ιόν θα καταλάμβανε τις τετραεδρικές θέσεις (A) ενώ τα τρισθενή μεταλλικά ιόντα τις οκταεδρικές θέσεις (B). Σε μια «αντίστροφη» δομή σπινελίου οι οκταεδρικές θέσεις θα καταλαμβάνονταν εξ ημισείας από τα δισθενή και τα τρισθενή μεταλλικά ιόντα, ενώ τα υπόλοιπα τρισθενή μεταλλικά ιόντα θα εδράζονταν στις τετραεδρικές θέσεις [17].

2.2.2.2 Φερρίτες εξαγωνικής δομής

Οι φερρίτες εξαγωνικής δομής χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη κατιόντων μετάλλων, όπως το βάριο (Ba), το στροντίο (Sr), ή το μόλυβδο (Pb), των οποίων η ακτίνα είναι παραπλήσια με αυτή των ιόντων οξυγόνου. Λόγω του παραπλήσιου μεγέθους αυτά τα κατιόντα μετάλλων καταλαμβάνουν ενδοπλεγματικές θέσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα και βοηθούν στη δημιουργία μιας πυκνής διάταξης των ιόντων οξυγόνου [18].

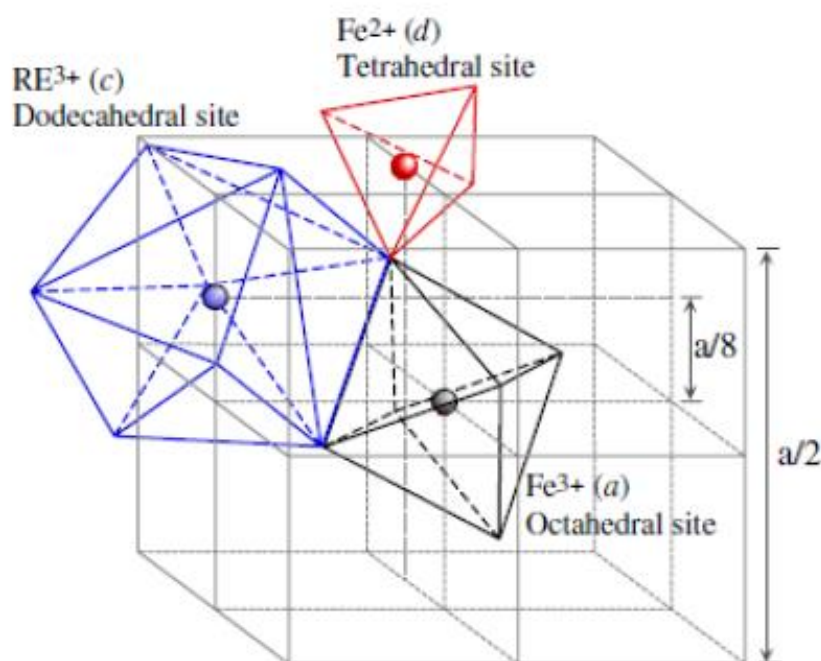


Σχήμα 2.3 Η δομή του εξαφερρίτη $BaFe_{12}O_{19}$ [19].

Οι δομές των εξαγωνικών φερριτών σχηματίζονται από εναλλασσόμενα τμήματα που έχουν είτε πυκνή εξαγωνική διάταξη (HCP), είτε κυβική εδροκεντρομένη διάταξη (FCC) με τα μεταλλοκατιόντα να αντικαθιστούν τα ιόντα οξυγόνου σε κάποια τμήματα. Από αυτή την περίπλοκη διάταξη προκύπτουν διάφορες κρυσταλλικές δομές εξαγωνικών φερριτών, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τη σύνθεση και τη δομή τους. Αυτές οι δομές συμβολίζονται με τα γράμματα M, U, W, X, Y, Z, όπου κάθε δομή έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και εφαρμογές [18].

2.2.2.3 Φερρίτες τύπου γρανάτη

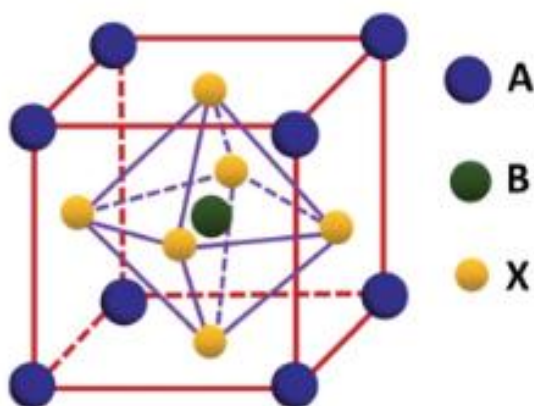
Οι φερρίτες τύπου γρανάτη είναι μικτά οξείδια του σιδήρου και ενός άλλου τρισθενούς μετάλλου το οποίο έχει ιοντική ακτίνα μεγαλύτερη από του σιδήρου. Το τρισθενές αυτό μέταλλο μπορεί να είναι μια σπάνια γαία όπως το ύτριο ή οποιοδήποτε άλλο μέταλλο από το λανθάνιο μέχρι το υττέρβιο. Έχουν γενικό τύπο $\text{Me}_3\text{Fe}_2 (\text{FeO}_4)_3$ [18].



Σχήμα 2.4 Η δομή του γρανάτη [19]

Η θεμελιώδης κυψελίδα των φερριτών τύπου γρανάτη είναι ένας κύβος που περιλαμβάνει 8 φορές τα άτομα του χημικού τους τύπου. Αντίστοιχα με τους φερρίτες σπινελίου μπορεί να χωριστεί σε όγδοα με τη δομή του κάθε ογδού να είναι διαφορετική. Η διαφορετική δομή των όγδων οφείλεται στις διαφορετικές θέσεις που είναι κατειλημμένες σε κάθε ένα από αυτά. Η στοιχειώδης κυψελίδα περιλαμβάνει 96 ανιόντα οξυγόνου και 64 κατιόντα μετάλλου. Τα κατιόντα σιδήρου καταλαμβάνουν 24 τετραεδρικές θέσεις και 16 οκταεδρικές θέσεις ενώ τα μεταλλοκατιόντα M^{3+} καταλαμβάνουν 24 δωδεκαεδρικές θέσεις [18]. Αυτό συμβαίνει καθώς μόνο οι δωδεκαεδρικές θέσεις είναι αρκετά μεγάλες για να εδράζουν τα κατιόντα των σπάνιων γαιών και κατά συνέπεια έχουν πολύ λιγότερες δομικές διαφοροποιήσεις από τους φερρίτες τύπου σπινελίου [20]. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται ένα ιόν τρισθενούς σιδήρου που περιβάλλεται από έξι ιόντα οξυγόνου σε οκταεδρική συμμετρία, ένα ιόν δισθενούς σιδήρου που περιβάλλεται από τέσσερα ιόντα οξυγόνου σε τετραεδρική συμμετρία και ένα ιόν σπάνιας γαίας που περιβάλλεται από οκτώ ιόντα οξυγόνου [18].

2.2.2.4 Φερρίτες τύπου περοβσκίτη



Σχήμα 2.5 Η γενική δομή του περοβσκίτη [21]

Οι ορθοφερρίτες ή φερρίτες τύπου περοβσκίτη έχουν γενικό χημικό τύπο $MFeO_3$, όπου το M αντιπροσωπεύει ένα κατιόν σπάνιας γαίας, όπως το ιόν υτρίου. Η τυπική κρυσταλλική δομή του ορθοφερρίτη γαδολινίου είναι χαρακτηριστική για αυτή την κατηγορία. Παρά το γεγονός ότι είναι λιγότερο ποικιλόμορφοι, ορισμένοι περοβσκιτικοί φερρίτες, όπως ο φερρίτης βισμούθιου έχουν μελετηθεί εκτενώς λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους [20].

2.3 Μαγνήτιση

Η πιο ενδιαφέρουσα ιδιότητα των φερριτών είναι η μαγνήτιση τους. Η περιστροφή των ηλεκτρονίων και το ηλεκτρικό τους φορτίο προκαλούν την παρουσία μαγνητικής ροπής. Κανονικά σε ένα ιόν με άρτιο πλήθος ηλεκτρονίων τα σπιν αλληλοακυρώνονται, ενώ σε ιόντα με περιττό πλήθος ηλεκτρονίων προκύπτει ένα μη αντισταθμισμένο σπιν. Στα μέταλλα μετάπτωσης το πλήθος των μη αντισταθμισμένων σπιν είναι μεγαλύτερο. Για παράδειγμα ο τρισθενής σίδηρος έχει ροπή που ισοδυναμεί με πέντε μη αντισταθμισμένα σπιν [17].

Όταν τα άτομα των μετάλλων μετάπτωσης δημιουργούν μεταλλικούς κρυστάλλους, οι ατομικές μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται παράλληλα εντός κάθε κρυσταλλικής περιοχής, η οποία μπορεί να εκτείνεται πάνω από αρκετές θεμελιώδεις κυψελίδες. Ο προσανατολισμός των σπιν θα έχει μια κατεύθυνση ελάχιστης ενέργειας, με αποτέλεσμα να χρειάζεται εξωτερική παρέμβαση για να εκτραπεί η μαγνήτιση από αυτή την κατεύθυνση και εν τη απουσία της παρέμβασης η μαγνήτιση θα επιστρέψει στην πρότερη και προτιμότερη κατάσταση χαμηλής ενέργειας [17].

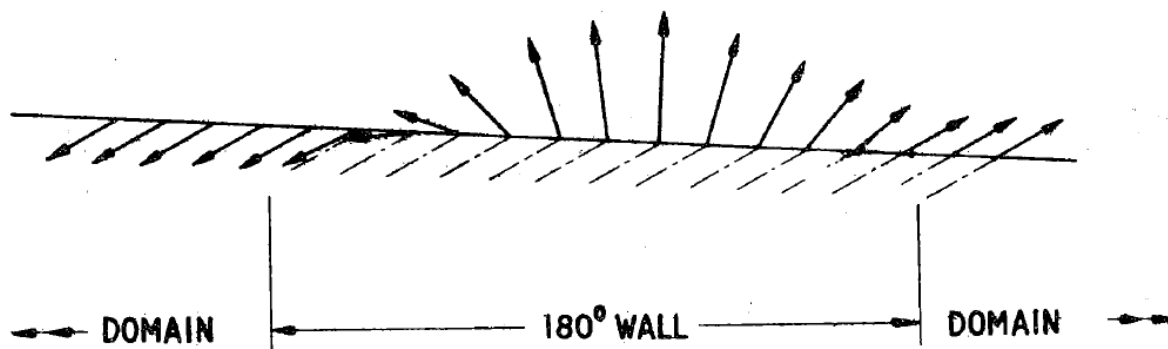
Αυτή η κρυσταλλική ανισοτροπία είναι εγγενής στη πλεγματική δομή δεδομένου το ότι η μαγνήτιση προτιμά συχνά τη διαγώνια διεύθυνση του κύβου ή τη διεύθυνση της άκρης αυτού. Διάφοροι παράγοντες όμως συντελούν στην εμφάνιση μαγνητικής ανισοτροπίας, όπως για παράδειγμα η μηχανική καταπόνηση ή το σχήμα του κρυστάλλου. Αποτέλεσμα αυτών των ανισοτροπιών είναι η μαγνήτιση να συγκρατείται

σε συγκεκριμένη προκαθορισμένη κατεύθυνση. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανισοτροπία τόσο δυσκολότερη είναι η μαγνήτιση του υλικού [17].

Ο παράλληλος προσανατολισμός των σπιν σηματοδοτεί το μαγνητικό κορεσμό εντός της περιοχής. Η μαγνήτιση ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου και συνεπώς είναι ανάλογη της πυκνότητας των ιόντων και των μαγνητικών ροπών τους. Η μαγνήτιση που προκύπτει από το παράλληλο προσανατολισμό των σπιν ονομάζεται σιδηρομαγνητισμός ή φερρομαγνητισμός [17].

Στους φερρίτες τύπου σπινελίου τα ιόντα μετάλλων διαχωρίζονται από αυτά του οξυγόνου, με αποτέλεσμα τα ιόντα του A – υποπλέγματος (τετραεδρικές θέσεις) να προσανατολίζονται αντιπαράλληλα με αυτά του υποπλέγματος B (οκταεδρικές θέσεις). Αν τα δυο πλέγματα ήταν πανομοιότυπα η συνολική καθαρή μαγνητική ροπή θα προέκυπτε μηδενική και το υλικό θα χαρακτηριζόταν αντισιδηρομαγνητικό ή αντιφερρομαγνητικό [17].

Τα δύο υποπλέγματα, A και B, διαφέρουν ως προς τον αριθμό αλλά και των τύπο των ιόντων στους περισσότερους φερρίτες, δημιουργώντας έτσι προκύπτουσα μαγνήτιση. Τέτοια υλικά χαρακτηρίζονται σιδηριμαγνητικά ή φερριμαγνητικά. Για παράδειγμα σε φερρίτες τύπου σπινελίου, στο κάθε μόριο έχουμε τρία ιόντα μετάλλων εκ των οποίων το ένα καταλαμβάνει τετραεδρική A θέση, ενώ τα άλλα δυο καταλαμβάνουν οκταεδρικές B θέσεις. Συνεπώς η ροπή του ενός ιόντος να παραμένει και όπως έχει αναφερθεί, σε μέταλλα όπως ο τρισθενής σίδηρος, αυτό συνεπάγεται με μαγνητική ροπή της τάξης των πέντε μη αντισταθμισμένων σπιν. Κατά συνέπεια έχουμε πέντε μη αντισταθμισμένα σπιν ανά μόριο, σε φερρίτες τύπου σπινελίου [17].

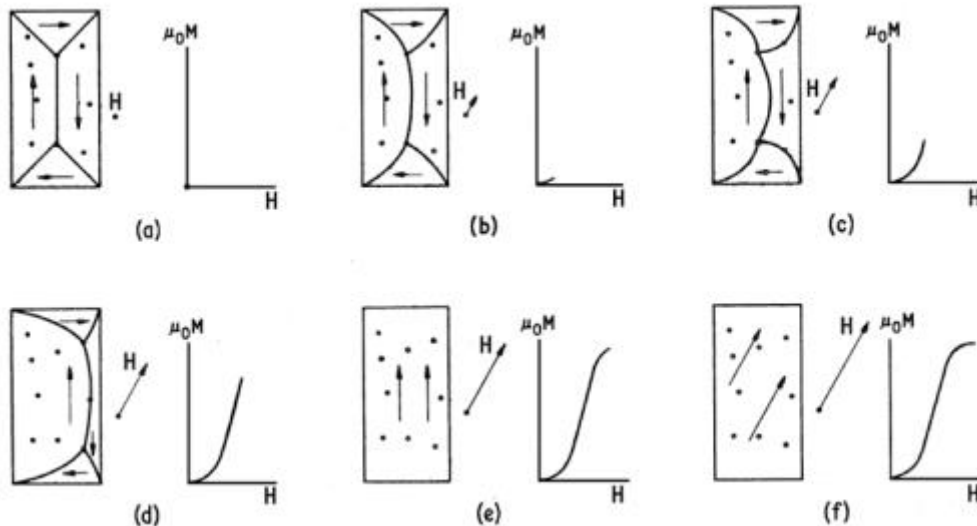


Σχήμα 2.6 Μετάβαση της κατεύθυνσης των σπιν σε τοίχωμα Bloch 180° [17]

Ο κάθε κρύσταλλος χωρίζεται σε έναν αριθμό μαγνητικών περιοχών με διάφορους προσανατολισμούς σπιν, έτσι ώστε το προκύπτον πεδίο από την εσωτερική μαγνήτιση να είναι σχετικά μικρό. Τα όρια των μαγνητικών περιοχών, γνωστά και ως τοιχώματα Bloch έχουν πάχος αρκετών θεμελιωδών κυψελίδων, εντός των οποίων πραγματοποιείται μια σταδιακή αλλαγή προσανατολισμού των σπιν μεταξύ των περιοχών. Η μετάβαση αυτή λειτουργεί ενάντια στις ανισοτροπικές δυνάμεις, οι οποίες συγκρατούν τα σπιν προσανατολισμένα σε συγκεκριμένη διεύθυνση, με αποτέλεσμα την αποθήκευση ενέργειας. Ο αριθμός και η διάταξη των μαγνητικών περιοχών εντός

του κρυστάλλου είναι τέτοιος ούτως ώστε το άθροισμα των ενεργειών αποθηκευμένων στα τοιχώματα και του πεδίου απομαγνήτισης να είναι το ελάχιστο δυνατό. Αν εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τα τοιχώματα υφίστανται πίεση, μετατοπίζοντας τα έτσι ώστε να ευνοηθεί η αύξηση του εμβαδού της περιοχής η οποία έχει ίδια κατεύθυνση μαγνητικού πεδίου με αυτή του επιβαλλόμενου [17].

2.3.1 Διαδικασία αρχικής μαγνήτισης



Σχήμα 2.7 Απλοποιημένη αναπαράσταση της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά την αρχική μαγνήτιση συνοδευόμενη με την πορεία επί της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης για αυξανόμενη ένταση του εξωτερικού πεδίου [17]

Στην πράξη είναι ενεργειακά ευνοϊκό για τα κρυσταλλικά τοιχώματα να περάσουν από διάφορες ατέλειες όπως κενά και καταπονημένες περιοχές. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται μια απλουστευμένη αναπαράσταση της διαδικασίας. Ξεκινώντας από την κατάσταση α με απουσία εξωτερικού πεδίου τα τοιχώματα είναι ευθεία, ενώ οι κουκκίδες αναπαριστούν διάφορες πιθανές ατέλειες. Στις επόμενες καταστάσεις παρατηρείται η εφαρμογή ενός μαγνητικού H -πεδίου σταθερής διεύθυνσης, όπως φαίνεται στο σχήμα, αλλά αυξανόμενης έντασης σε κάθε στάδιο. Υπό την παρουσία ενός H – πεδίου μικρής εντάσεως (b) τα τοιχώματα διατηρούν τη θέση τους λόγω των ατελειών, αλλά διογκώνονται όπως μια μεμβράνη υπό πίεση. Η μεταβολή της μαγνήτισης περιορίζεται από τη δυσκαμψία των τοιχωμάτων. Σε αυτό το σημείο ξεκινά να χαράζεται το κάτω μέρος της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης. Καθώς η ένταση του πεδίου αυξάνεται (c,d), τα τοιχώματα υποχωρούν επηρεάζοντας την έκταση των μαγνητικών περιοχών. Αυτές οι αλλαγές είναι μη αναστρέψιμες, δηλαδή η απομάκρυνση από το πεδίο δεν θα επαναφέρει τα τοιχώματα στις αρχικές τους θέσεις (α). Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας η χαρακτηριστική μαγνήτισης παρουσιάζει έντονα ανοδική πορεία. Αφού τα μαγνητικά τοιχώματα έχουν μετατοπιστεί και όλο το υλικό αποτελείται από μια μαγνητική περιοχή (e), μια επιπλέον αύξηση του πεδίου θα προσανατολίσει το διάνυσμα της μαγνήτισης προς την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου (f). Η χαρακτηριστική της μαγνήτισης οριζοντιοποιείται και το υλικό είναι πλέον μαγνητικά

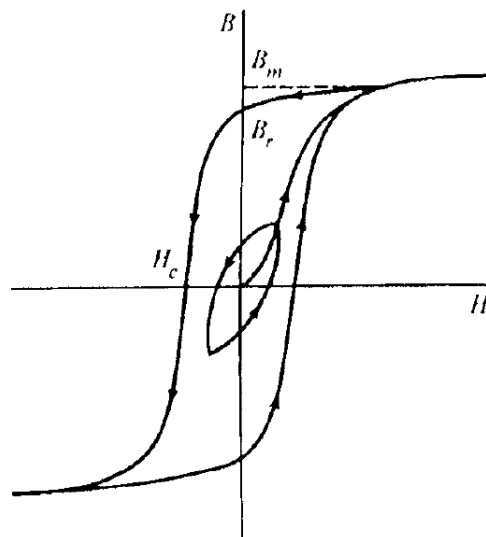
κορεσμένο. Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου δεν θα έχει καμία επιπλέον επίδραση στη μαγνήτιση του υλικού από τη στιγμή που έχει κορεστεί [17].

Έχοντας ένα αρχικά μαγνητισμένο υλικό η εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου γύρω από το μηδέν τότε δεν θα αναστρέψει τη διαδικασία, πραγματοποιώντας την διαγραφή της αντίθετης πορείας πάνω στην καμπύλη αρχικής μαγνήτισης. Λόγω των μη αναστρέψιμων αλλαγών των τοιχωμάτων η μαγνήτιση θα υστερεί σε σχέση με το πεδίο και θα διαγράφεται ένας κλειστός βρόχος. Το φαινόμενο αυτό λέγεται μαγνητική υστέρηση και ο βρόχος ονομάζεται βρόχος υστέρησης [17].

2.3.2 Βρόχος υστέρησης

Στις μαγνητικές εφαρμογές ο βρόχος υστέρησης είναι εξέχουσας σημασίας, καθώς περιγράφει τη σχέση μαγνητικής επαγωγής και έντασης πεδίου. Αυτή η σχέση αποτυπώνεται στον βρόχο υστέρησης. Ο βρόχος υστέρησης δημιουργείται κατά την αρχική μαγνήτιση του υλικού έπειτα από την πλήρη απομαγνήτιση του [22].

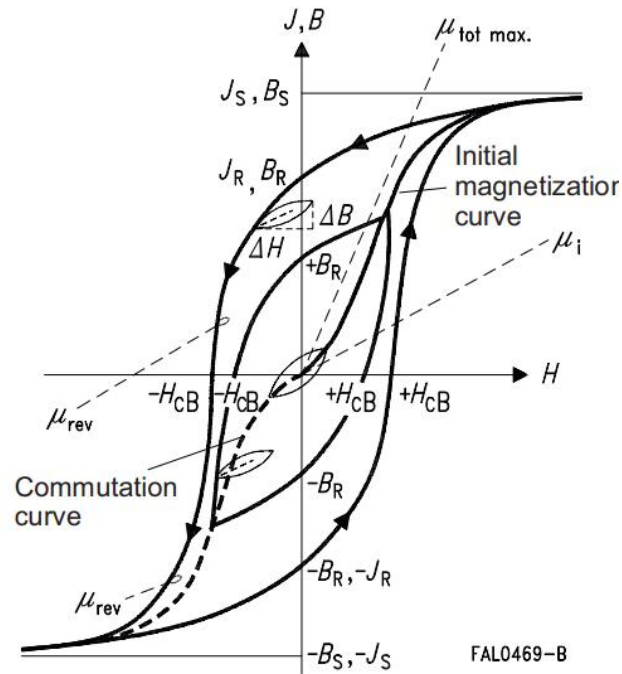
Η διαδικασία, όπως έχει περιγραφεί, προϋποθέτει την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σταθερής κατεύθυνσης με αυξανόμενη ένταση. Αυτή η σταδιακή αύξηση της έντασης προκαλεί μεταβολές εντός του φερρίτη έτσι ώστε τα μαγνητικά τοιχώματα της περιοχής, ομόρροπης στο πεδίο, να μετακινηθούν επεκτείνοντας την. Με την εξάπλωση της μαγνητικής περιοχής στο σύνολο του υλικού και την ελαφριά ρύθμιση της διεύθυνσης της συνολικής μαγνητικής ροπής ολοκληρώνεται η διαδικασία και έχει παραχθεί ο τελικός βρόχος υστέρησης [22].



Σχήμα 2.8 Αρχική καμπύλη μαγνήτιση και βρόχος υστέρησης [22]

Στην περίπτωση που το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αποσυρθεί πριν την πλήρη μαγνήτιση του υλικού, δηλαδή πριν η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης φτάσει στην περιοχή του κορεσμού, το υλικό θα είναι μερικώς μαγνητισμένο. Τοποθετώντας το υλικό αυτό εντός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου θα παρατηρηθεί η χάραξη ενός

μικρότερου βρόχου υστέρησης. Ένας τέτοιος βρόχος θεωρείται υποβρόχος υστέρησης και το σχήμα του διαφέρει από τον κορεσμένο βρόχο υστέρησης, ο οποίος θα προέκυπτε από ένα μαγνητικό πεδίο ίδιας κατεύθυνσης, το οποίο όμως δεν αποσύρθηκε πρόωρα [22].



Σχήμα 2.9 Καμπύλη μαγνήτισης και βρόχος υστέρησης [23]

Η αρχική καμπύλη μαγνήτισης για την πρώτη μαγνήτιση ενός υλικού έπειτα από μια πλήρη απομαγνήτιση του περιγράφεται από τη σχέση

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad [2.1]$$

Ενώνοντας τις «άκρες» των υποβρόχων που σχηματίζονται για διαφορετικά H από $H = 0$ μέχρι $H = H_{max}$, λαμβάνουμε την μεταβατική καμπύλη της αρχικής μαγνήτισης [23].

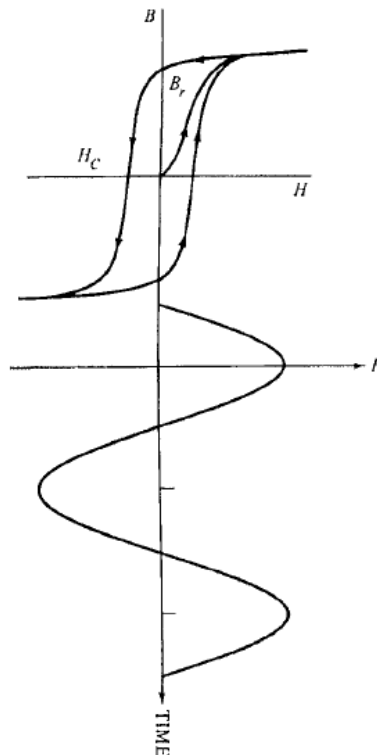
Μαγνήτιση κόρου ορίζεται ως η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής που μπορεί να αποκτήσει ένα υλικό σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Πάνω από αυτή την τιμή B_S δεν μπορεί να αυξηθεί η μαγνητική επαγωγή αυξάνοντας την ένταση του πεδίου [23].

Η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_R είναι ένα μέτρο του βαθμού της παραμένουσας μαγνήτισης. Αν το εξωτερικό πεδίο αποσυρθεί παρατηρείται ότι $B_R \neq 0$ [23].

Η απομαγνητότητα H_C είναι η τιμή του αντίστροφου πεδίου που απαιτείται για το μηδενισμό της μαγνητικής επαγωγής [23].

Με την εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, η μαγνήτιση θα διανύσει ένα «κύκλο» του βρόχου υστέρησης. Αυτός ο βρόχος ονομάζεται βρόχος εναλλασσόμενου ρεύματος και για χαμηλές συχνότητες προσεγγίζει τον βρόχο

συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, ορισμένες διαφορές παρατηρούνται, με την αύξηση της συχνότητας του πεδίου διέγερσης και επομένως της συχνότητας 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 [22].



Σχήμα 2.10 Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του ρεύματος ημιτονοειδούς κύματος που οδηγεί τη μαγνήτιση επί του βρόχου υστέρησης ανά κύκλο ημιτονοειδούς κύματος [22]

2.3.3 Απώλειες δινορρευμάτων

Όταν ένα υλικό μαγνητίζεται από εναλλασσόμενο πεδίο θα εμφανιστεί στο υλικό μια επαγόμενη τάση αντίθετη ως προς την τάση του εξωτερικού κυκλώματος που προκαλεί το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη τάση θα δημιουργήσει κυκλικά ρεύματα στο υλικό τα οποία δημιουργούν μαγνητικά πεδία, τα οποία εναντιώνονται στο αρχικό μαγνητικό πεδίο [22].

Η επαγόμενη τάση είναι μια συνάρτηση της χρονικής μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη η

επαγόμενη τάση και τόσο σημαντικότερες η απώλειες δινορρευμάτων. Οι απώλειες δινορρευμάτων είναι παρούσες σε όλα τα υλικά, αλλά είναι αρκετά μεγαλύτερες στα μαγνητικά υλικά. Αυτό οφείλεται στις υψηλές τιμές διαπερατοτήτων που διέπουν τα μαγνητικά υλικά, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερες μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής και κατά συνέπεια στα δινορρεύματα. Τα δινορρεύματα εξαρτώνται άμεσα από την ειδική αντίσταση του υλικού καθώς προκύπτουν από το λόγο της επαγόμενης τάσης προς την αντίσταση. Συνεπώς η υψηλή ειδική αντίσταση των φερριτών οδηγεί σε χαμηλότερη τιμή δινορρευμάτων [22].

Τα δινορρεύματα επηρεάζονται άμεσα και από το βάθος διείσδυσης στο υλικό. Όσο πιο βαθιά στο υλικό, συναντάται μεγαλύτερο πλήθος βρόχων και συνεπώς τα δινορρεύματα είναι εντονότερα. Σε χαμηλές ή μεσαίες συχνότητες η μείωση του πεδίου λόγω των δινορρευμάτων είναι μικρή αν το μέγεθος του δείγματος δεν είναι μεγάλο. Υπάρχει όμως και ένας παράγοντας χρόνου, που σε συνδυασμό με το βάθος διείσδυσης επηρεάζει τα δινορρεύματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις χαμηλές συχνότητες να υπάρχει επαρκής χρόνος για το διασκορπισμό των δινορρευμάτων, πράγμα που δεν συμβαίνει στις υψηλότερες συχνότητες. Ειδικότερα στις υψηλότερες συχνότητες τα δινορρεύματα γίνονται αντιληπτά ολόένα και πιο κοντά στην επιφάνεια του δείγματος, περιορίζοντας έτσι τη διείσδυση του εφαρμοζόμενου πεδίου στο υλικό [22].

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το βάθος διείσδυσης του εφαρμοζόμενου πεδίου ορίζεται το επιδερμικό βάθος. Πρόκειται για το βάθος εκείνο στο οποίο το εφαρμοζόμενο πεδίο μειώνεται στο $1/e$ -στό αυτού στην επιφάνεια του δείγματος [22].

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

όπου ‘ s ’ το επιδερμικό βάθος (cm), ‘ ρ ’ η ειδική αντίσταση (Ω/cm), ‘ μ ’ η διαπερατότητα και ‘ f ’ η συχνότητα (Hz).

Οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση. Η σχέση μεταξύ των απωλειών δινορρευμάτων και της ειδικής αντίστασης δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$Pe = C \cdot B_m^2 f^2 d^2 / \rho \quad [2.3]$$

όπου: ‘ C ’ ένας σταθερός παράγοντας που εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος, ‘ B_m ’ ή μέγιστη επαγωγή (Gauss), ‘ f ’ η συχνότητα (Hz) και ‘ d ’ η μικρότερη διάσταση εγκάρσια στη ροή [22].

Η σταθεροποίηση των απωλειών δινορρευμάτων με την αύξηση της συχνότητας προϋποθέτει την επιλογή ενός υλικού του οποίου η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της συχνότητας, έτσι ώστε ο λόγος f^2/ρ να παραμένει σταθερός [22].

2.3.4 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα ενός υλικού ορίζεται στους DC βρόχους υστέρησης ως η ποσότητα που εκφράζει το βαθμό της μαγνήτισης που προκαλείται από μια μονάδα εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου. Στους AC βρόχους οι απώλειες δινορρευσμάτων, μεταβάλλουν τον βρόχο, το οποίο προκαλεί αλλαγή και στη διαπερατότητα. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα δινορρεύματα αντιστέκονται στη διείσδυση του επιβαλλόμενου πεδίου και συνεπώς επεμβαίνουν στη σχέση μεταξύ μαγνητικής επαγωγής και έντασης του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτή ακριβώς τη συσχέτιση εκφράζει η διαπερατότητα [22].

Η αρχική διαπερατότητα είναι η διαπερατότητα που επιδεικνύει ένα υλικό κατά την αρχική μαγνήτιση του από ένα ασθενέστατο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Προκύπτει από τον τύπο

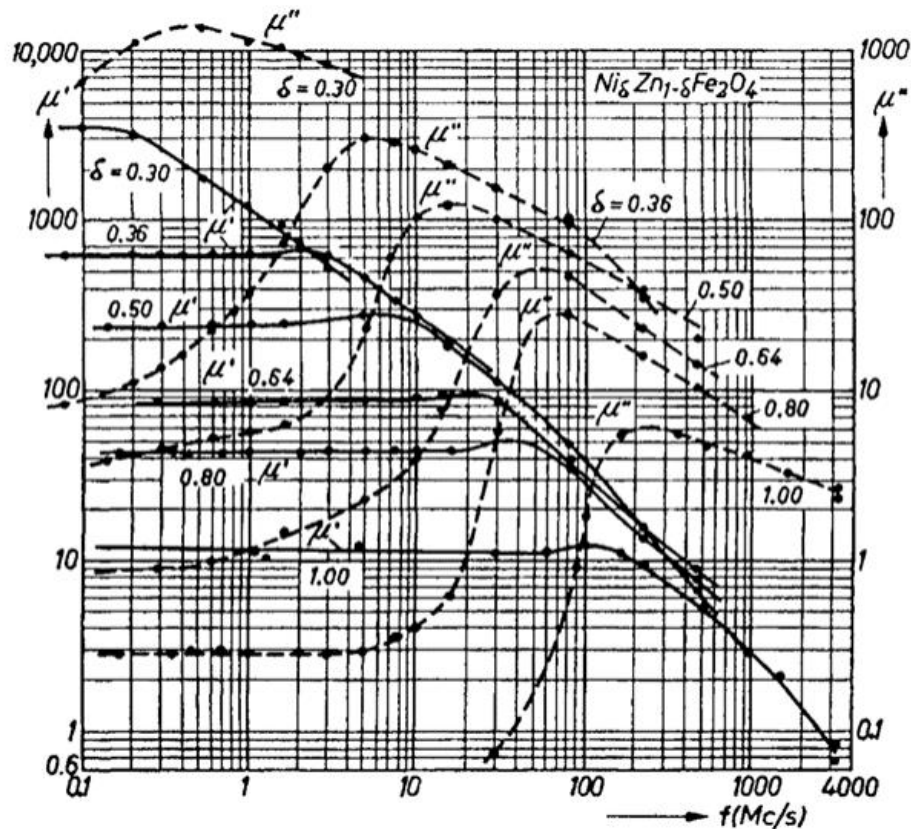
$$\mu_0 = \lim_{B \rightarrow 0} B/H \quad [2.4]$$

και ουσιαστικά περιγράφει την αρχική κλίση της καμπύλης μαγνήτισης. Όταν το μ_0 χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη διαπερατότητα του κενού η αρχική διαπερατότητα εκφράζεται με τον όρο μ_i [22].

Η διαπερατότητα αναλύεται σε δύο συνιστώσες στις υψηλές συχνότητες. Η πρώτη συνιστώσα αναφέρεται στο πραγματικό μέρος της διαπερατότητας. Ορίζεται ως μ' και αντιπροσωπεύει την διαπερατότητα κατά την οποία η μαγνήτιση είναι συμφασική με το εξωτερικό εναλλασσόμενο πεδίο. Η δεύτερη συνιστώσα, μ'' περιγράφει το φανταστικό μέρος της διαπερατότητας, αντιπροσωπεύει την διαπερατότητα κατά την οποία η μαγνήτιση είναι εκτός φάσης με το εξωτερικό εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Η συνδυασμένη διαπερατότητα δίνεται από την σχέση [22]:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad [2.5]$$

Οι συνιστώσες της διαπερατότητας σχεδιάζονται συχνά στο ίδιο διάγραμμα ως συναρτήσεις της συχνότητας. Αυτό ονομάζεται φάσμα διαπερατότητας. Παρατηρείται ότι η μ' συνιστώσα είναι αρχικά σταθερή με την αύξηση της συχνότητας έως ότου ξεκινάει να ακολουθεί πτωτική πορεία. Η φανταστική συνιστώσα μ'' αρχικά αυξάνεται αργά και στην συνέχεια εντονότερα, στις συχνότητες για τις οποίες η μ' πέφτει απότομα. Φαίνεται να μεγιστοποιείται στη συχνότητα για την οποία η μ' έχει υποδιπλασιαστεί σε σχέση με την αρχική τιμή της. Με την περαιτέρω αύξηση της συχνότητας η μ'' ακολουθεί ελαφρά πτωτική πορεία [22].



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα του φάσματος διαπερατότητας φερρίτη νικελίου που δείχνει την πορεία της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας της μαγνήτισης [22]

Ο λόγος της φανταστικής προς την πραγματική συνιστώσα, αποτελεί μέτρο της αναποτελεσματικότητας του μαγνητικού συστήματος. Περιγράφεται από τον τύπο [22]:

$$\tan\delta = \mu''/\mu'. \quad [2.6]$$

Αν κανονικοποιήσουμε την εφαπτομένη απωλειών ανά μονάδα διαπερατότητας έχουμε το συντελεστή απωλειών [22]:

$$LF = \tan\delta/\mu. \quad [2.7]$$

2.4 Φερρίτες και Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Οι φερρίτες χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, ιδιαίτερα στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Μέσω μαγνητικών κυκλωμάτων αυξάνουν τη σύνθετη αντίσταση ενός κυκλώματος είτε με τη μορφή της ωμικής αντίστασης είτε με την μορφή της επαγωγικής αντίδρασης. Κάθε διαφορετικός τύπος φερρίτη έχει διαφορετικά αποτελέσματα, αφού οι ιδιότητες τους έχουν άμεση σχέση με την δομή του υλικού. Ως επί το πλείστον για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών χρησιμοποιούνται μαλακοί φερρίτες.

2.4.1 Οι φερρίτες ως καταστολείς Ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών

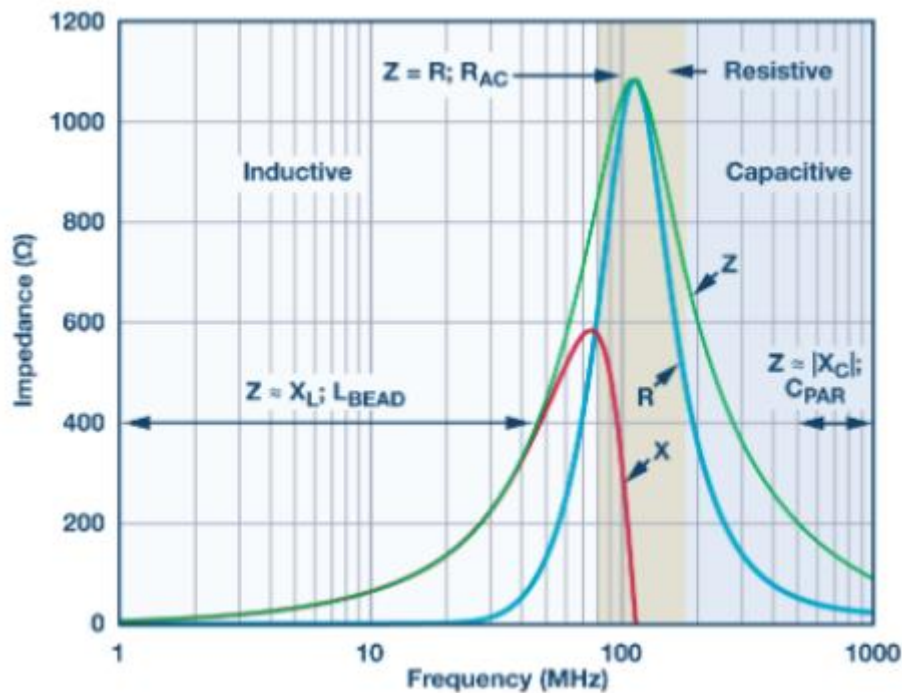
Μέχρι στιγμής έχουμε αναλύσει τις ιδιότητες των φερριτών ως υλικά και έχουμε ασχοληθεί με τους βρόχους υστέρησης και την διαπερατότητα. Για να αναλύσουμε την

λειτουργία των φερριτών ως καταστολείς των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών επιβάλλεται να συνδέσουμε τις ιδιότητες των υλικών αυτών με ηλεκτρικά μεγέθη. Τέτοια μεγέθη είναι η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση.

Η πιο σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της ικανότητας καταστολής των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι η σύνθετη αντίσταση Z , η οποία εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα. Η σύνθετη αντίσταση ορίζεται ως

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad [2.8]$$

όπου R είναι η ισοδύναμη αντίσταση και X_L η ισοδύναμη αυτεπαγωγή [25].

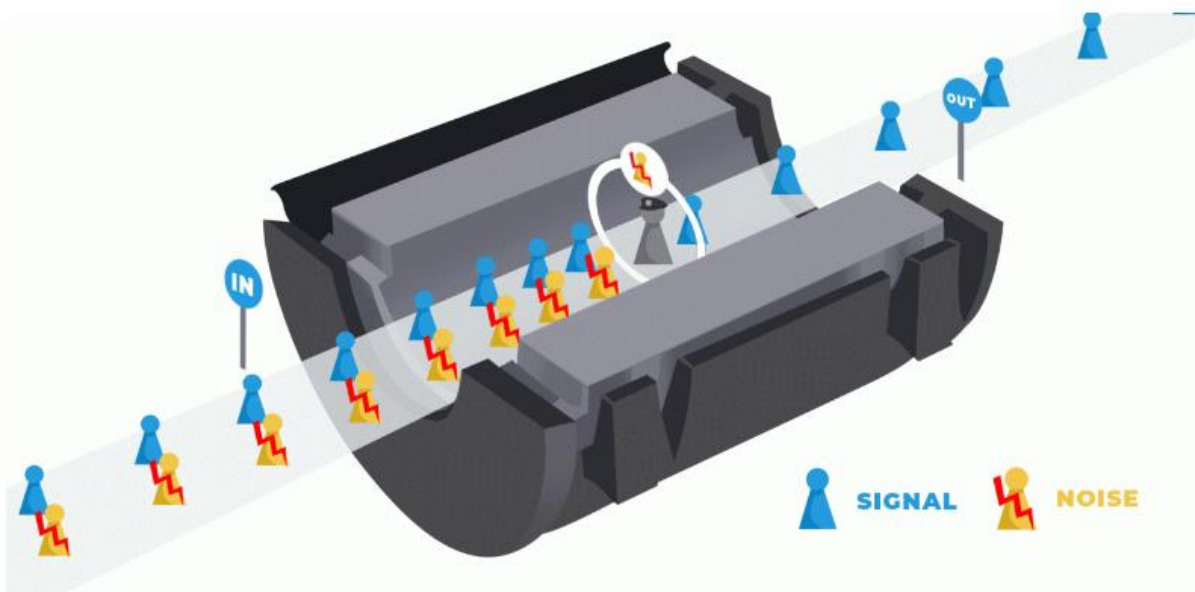


Σχήμα 2.12 Τυπική χαρακτηριστική της σύνθετης αντίστασης Z , ωμικής αντίστασης R και αντίδρασης X ενός φερρίτη [25]

Στις χαμηλές συχνότητες η αντίσταση R είναι μικρή σε σχέση με την αυτεπαγωγή X_L η οποία εν τέλει καθορίζει την τιμή της σύνθετης αντίστασης. Σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες συμβαίνει κάποια καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών εξαιτίας της επαγωγικής αντίδρασης. Όμως στη συχνότητα για την οποία η διαπερατότητα μειώνεται απότομα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12, η αυτεπαγωγή μειώνεται καθώς η αντίσταση R αυξάνεται. Αυτό συνεπάγεται ότι η κύρια πηγή καταστολής στις υψηλές συχνότητες επιτυγχάνεται χάρη στην απορρόφηση των διαταραχών και την εκτόνωση τους μέσω θερμότητας. Η επιλογή του κατάλληλου φερρίτη γίνεται με βάση την κυματομορφή της σύνθετης αντίστασης του, πιο συγκεκριμένα βάση της περιοχής κατά την οποία μεγιστοποιείται. Η ταυτότητα αυτής της περιοχής συχνοτήτων με το εύρος συχνοτήτων της διαταραχής – θορύβου προς καταστολή, είναι βασική παράμετρος κατά την επιλογή του τύπου φερρίτη [22].

2.4.2 Σφικκτήρες φερρίτη

Οι σφικκτήρες φερρίτη είναι ένα παθητικό ηλεκτρονικό στοιχείο, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την καταστολή των διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών υψηλής συχνότητας. Συνήθως πρόκειται για μαλακούς φερρίτες τύπου μαγγανίου - ψευδαργύρου MnZn και νικελίου – ψευδαργύρου NiZn. Έχουν σχήμα μικρού βαρελιού και στη καθημερινή ζωή εντοπίζονται συνήθως στα καλώδια τροφοδοσίας των φορητών μας υπολογιστών αλλά και άλλων ηλεκτρικών συσκευών. Εφαρμόζονται σε αγωγούς με σκοπό το φιλτράρισμα υψίσυχνων σημάτων θορύβου, εμποδίζοντας τη διέλευση τους από τους προστατευόμενους αγωγούς. Στην ουσία απορροφούν τον θόρυβο και τον αποβάλλουν υπό τη μορφή θερμότητας, εμποδίζοντας τις αγωγίμες αλλά και τις ακτινοβολούμενες παρεμβολές [26].



Σχήμα 2.13 Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο θορύβου [26]

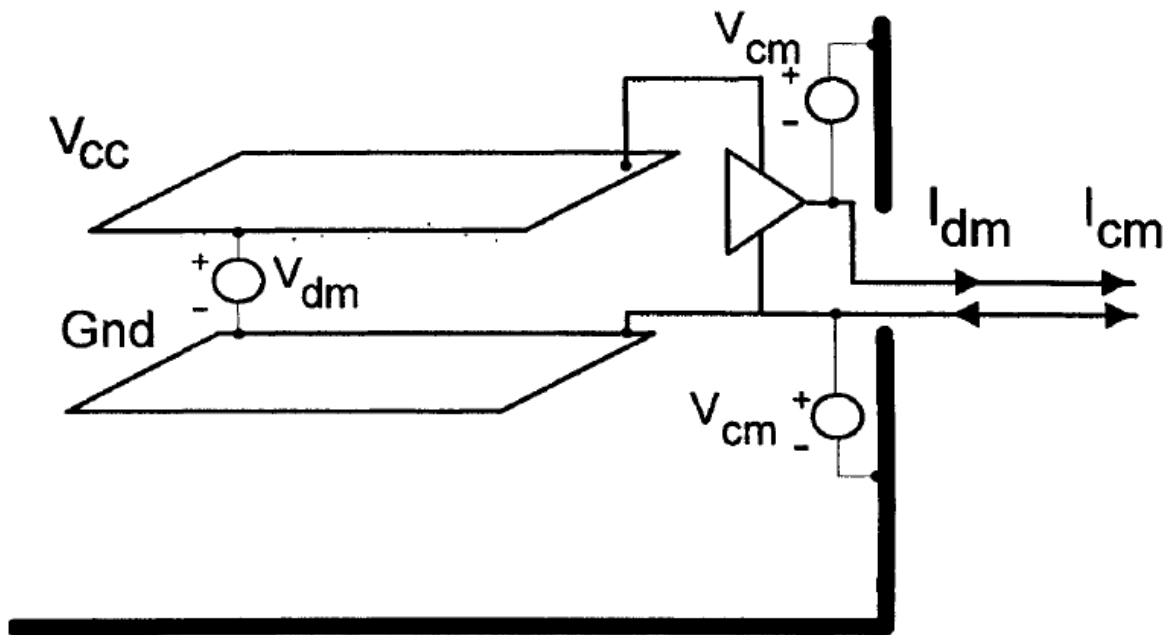
Κάθε σφικκτήρας φερρίτη, ανάλογα με το υλικό του, έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη που ορίζει τη σχέση της αντίστασης, της αυτεπαγωγής και της σύνθετης αντίστασης του συναρτήσει της συχνότητας. Αυτή η χαρακτηριστική μας υποδεικνύει το εύρος συχνοτήτων κατά το οποίο η σύνθετη αντίσταση αποκτά μια σημαντική τιμή, καθιστώντας το στοιχείο ικανό να λειτουργεί ως φίλτρο σημάτων θορύβου για τις συγκεκριμένες συχνότητες [26].

Οι σφικκτήρες φερρίτη χαρακτηρίζονται από τρεις περιοχές απόκρισης, την επαγωγική, την αντιστατική και τη χωρητική, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 2.12. Αυτές οι περιοχές μπορούν να αναγνωριστούν από την χαρακτηριστική καμπύλη των Z , R και X συναρτήσει της συχνότητας. Για τη μείωση του θορύβου υψηλής συχνότητας, ο σφικκτήρας φερρίτη πρέπει να λειτουργεί εντός της αντιστατικής περιοχής. Στην περιοχή αυτή το στοιχείο λειτουργεί ως αντίσταση, εμποδίζοντας το θόρυβο υψηλής συχνότητας και μετατρέποντας τον σε θερμότητα. Η αντιστατική περιοχή από τη συχνότητα στην οποία $X = R$, μέχρι την χωρητική περιοχή. Η χωρητική περιοχή ξεκινά [48]

από την συχνότητα για τη οποία $-X = R$ (αρνητική τιμή αντίδρασης). Επαγωγική χαρακτηρίζεται η περιοχή πριν την αντιστατική [25].

2.4.3 Φίλτρα κοινού και διαφορικού τρόπου

Πριν αναφερθούμε στα φίλτρα θορύβου είναι χρήσιμο να εξετάσουμε ένα ισοδύναμο κύκλωμα που εξηγεί την προέλευση των ρευμάτων θορύβου κοινού και διαφορικού τρόπου σε αγωγούς. Τα ρεύματα κοινού και διαφορικού θορύβου ρέουν εντός δύο αγωγών που συνδέουν δύο συσκευές - συστήματα. Τα ρεύματα διαφορικού θορύβου ρέουν κυκλικά μεταξύ των δύο συσκευών.



Σχήμα 2.14 Κοινού και διαφορικού τρόπου ρεύματα σε ένα κύκλωμα καταστολής ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών [22]

Αν τοποθετήσουμε μια τσιμπίδα πάνω και από τους δύο αγωγούς δεν θα μετρήσουμε ροή ρεύματος καθώς το ρεύμα έχει ίδια ένταση και αντίθετη κατεύθυνση στους αγωγούς. Στην περίπτωση που ο θόρυβος ήταν ένα σήμα ρεύματος κοινού τρόπου τότε με τη μέθοδο αυτή θα ανιχνεύαμε τη παρεμβολή κοινού τρόπου. Τα επιθυμητά, εκούσια ρεύματα του κυκλώματος θα αλληλοακυρωνόντουσαν καθώς θα είχαν ίδιο μέτρο και αντίθετη κατεύθυνση, αλλά τα ρεύματα που αφορούν την παρεμβολή κοινού τρόπου θα ήταν ανιχνεύσιμα [22].

Το κάθε είδος θορύβου έχει διαφορετικό τρόπο αντιμετώπισης. Το φίλτρο κοινού τρόπου χρησιμοποιεί ένα πυρήνα στον οποίο περικλείονται και οι δύο αγωγοί. Το επιθυμητό ρεύμα θα περάσει, ενώ τα ρεύματα κοινού θορύβου θα ακυρωθούν. Τα ρεύματα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, παράγουν μαγνητική ροή στον πυρήνα του φερρίτη, η οποία εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων θα εξασθενίσει. Ουσιαστικά το φίλτρο κοινού τρόπου αγνοεί τα διαφορικά σήματα και ακυρώνει τα κοινά [22].

Ένας απλός και πρακτικός τρόπος να αποφανθούμε αν ο θόρυβος οφείλεται σε ρεύματα κοινού ή διαφορικού τρόπου είναι το να τοποθετήσουμε ένα φίλτρο κοινού τρόπου στους δύο αγωγούς. Αν ο θόρυβος μειωθεί ήταν κοινού τρόπου, ενώ αν παραμείνει προκαλούνταν από ρεύματα διαφορικού τρόπου. Τα φίλτρα κοινού τρόπου χρησιμοποιούνται κυρίως στο φιλτράρισμα υψηλών συνεχών DC ρευμάτων και για τη μείωση θορύβου σε διαφορικές γραμμές υψηλής ταχύτητας.

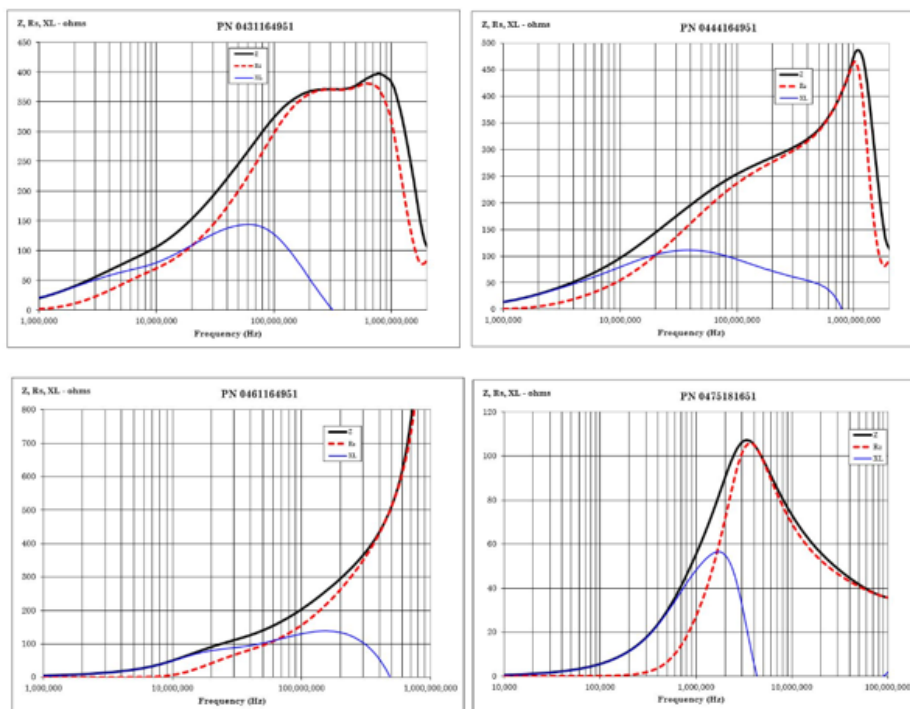
Στην περίπτωση θορύβου που προέρχεται από ρεύματα διαφορικού τρόπου ο κάθε αγωγός πρέπει να προστατεύεται ξεχωριστά. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα φίλτρα κοινού τρόπου είναι ακατάλληλα και αντί αυτών γίνεται χρήση φερριτών με χαμηλή διαπερατότητα. Τα φίλτρα διαφορικού τρόπου χρησιμοποιούνται για το φιλτράρισμα ασθενών συνεχών και εναλλασσόμενων ρευμάτων, την αφαίρεση θορύβου από χαμηλόσυχα σήματα και τη διαμόρφωση των χρόνων ανόδου σημάτων υψηλής ταχύτητας [22].

2.4.4 Χαρακτηριστικές κυματομορφές φερριτών

Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθούν φερρίτες τεσσάρων διαφορετικών υλικών της εταιρείας Fair Rite. Τα υλικά αυτά προορίζονται για τη καταστολή ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών και είναι τα εξής [27]:

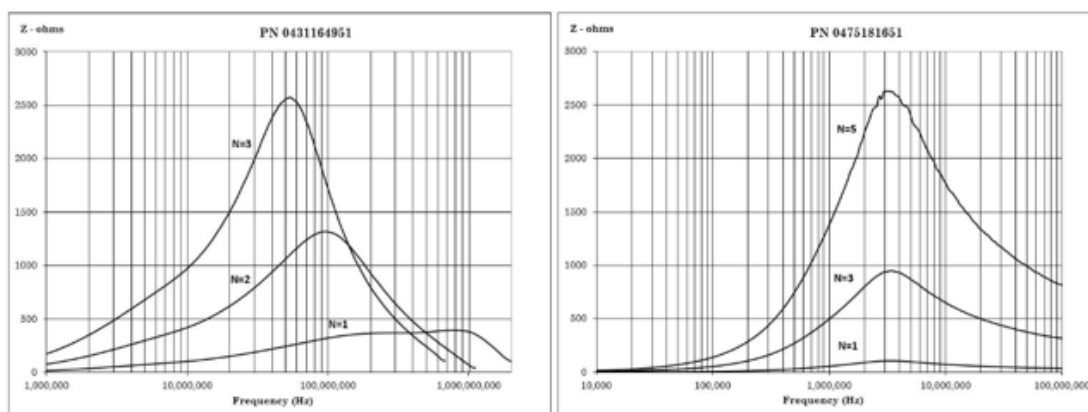
- 31 Material: MnZn φερρίτης σχεδιασμένος ειδικά για εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από 1 MHz έως 300 MHz.
- 44 Material: NiZn φερρίτης που αναπτύχθηκε για να συνδυάζει υψηλή απόδοση καταστολής, από 25 MHz έως 300 MHz.
- 61 Material: NiZn φερρίτης υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές για την καταστολή συχνοτήτων θορύβου άνω των 200 MHz έως 1 GHz.
- 75 Material: MnZn φερρίτης υψηλής διαπερατότητας που προορίζεται για εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από 150kHz έως 10 MHz.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό κάθε φερρίτη είναι η χαρακτηριστική καμπύλη της σύνθετης αντίστασης του ως προς τη συχνότητα λειτουργίας. Η σύνθετη αντίσταση μετριέται με εξειδικευμένους αναλυτές και η χαρακτηριστική της ως προς τη συχνότητα συμπεριλαμβάνεται στο φύλλο δεδομένων από τους κατασκευαστές των υλικών – προϊόντων φερριτών. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές σύνθετης αντίστασης για σφικτήρα φερρίτη ίδιας εσωτερικής διαμέτρου για κάθε ένα από τα τέσσερα υλικά που αναφέρθηκαν [27].



Σχήμα 2.15 Διαγράμματα σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για φερρίτες διαμέτρου 4.90mm των υλικών 31 (πάνω αριστερά), 44 (πάνω δεξιά), 61 (κάτω αριστερά) και 75 (κάτω δεξιά) της εταιρείας Fair - Rite

Η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται και από το πλήθος των σπειρών του καλωδίου εντός το πυρήνα φερρίτη. Η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται ποικιλοτρόπως με πρώτη την μετατόπιση των περιοχών λειτουργίας. Ακόμα παρατηρείται συχνά πολύ υψηλότερη μέγιστη τιμή της σύνθετης αντίστασης στην αντιστατική περιοχή λειτουργίας. Συχνά οι κατασκευαστές παρέχουν διαγράμματα σύνθετης αντίστασης και για πολλαπλές σπείρες.



Σχήμα 2.16 Διαγράμματα σύνθετης αντίστασης – συχνότητας για διάφορες περιελίξεις του καλωδίου εντός φερριτών διαμέτρου 4.90mm των υλικών 31 (αριστερά) και 75 (δεξιά) της εταιρείας Fair – Rite

Κεφάλαιο 3: Ηλεκτροστατική εκφόρτιση και φαινόμενο ringing

3.1 Το πρότυπο IEC 61000-4-2:2008

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission [IEC]) [28] σχετίζεται με τις απαιτήσεις ανοχής και τις μεθόδους δοκιμών για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό που υπόκειται σε εκκενώσεις στατικού ηλεκτρισμού, τόσο από τους χειριστές απευθείας όσο και από το προσωπικό προς γειτονικά αντικείμενα. Επίσης, καθορίζει τα επίπεδα δοκιμών που σχετίζονται με διαφορετικές περιβαλλοντικές και εγκαταστασιακές συνθήκες και καθορίζει τις διαδικασίες δοκιμών. Ως στόχο έχει να καθιερωθεί μια κοινή και αναπαραγωγίσιμη βάση για την αξιολόγηση της απόδοσης ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού όταν υπόκειται σε εκκενώσεις ηλεκτροστατικού φορτίου.

Στο Πρότυπο [28] ορίζονται:

- Η χαρακτηριστική κυματομορφή του ρεύματος εκκένωσης
- Το εύρος των δοκιμών
- Ο εξοπλισμός των δοκιμών
- Η δομή και μορφή των δοκιμών
- Η διαδικασία των δοκιμών
- Η διαδικασία της διακρίβωσης (calibration procedure)
- Η αβεβαιότητα των μετρήσεων

Υπάρχουν δύο είδη εκφορτίσεων, η εκφόρτιση μέσω αέρα και η εκφόρτιση επαφής. Για τις δύο δοκιμές οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φέρουν διαφορετικό ηλεκτρόδιο - «μύτη» η οποία καθορίζεται αυστηρά στο Πρότυπο [28] ως προς τις διαστάσεις και τη γεωμετρία της. Η εκφόρτιση επαφής είναι η προτιμώμενη μέθοδος δοκιμής, ενώ οι εκφορτίσεις αέρα χρησιμοποιούνται όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί η εκφόρτιση επαφής.

3.1.1 Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Το Πρότυπο [28] ορίζει τα επίπεδα δοκιμών για τις δύο περιπτώσεις και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Για τη δοκιμή εκφόρτισης επαφής, η δοκιμή εφαρμόζεται μόνο στο καθορισμένο επίπεδο δοκιμής, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά από τις επιτροπές προϊόντων. Αντιθέτως για τη δοκιμή εκφόρτισης αέρα η δοκιμή θα πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα επίπεδα δοκιμής μέχρι και το καθορισμένο επίπεδο.

Πίνακας 3.1 Επίπεδα δοκιμών για ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008 [28]

Εκφόρτιση εξ επαφής		Εκφόρτιση μέσω αέρα	
Επίπεδο	Τάση δοκιμής [kV]	Επίπεδο	Τάση δοκιμής [kV]
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
X	Ειδικό	X	Ειδικό
X μπορεί να είναι οποιοδήποτε επίπεδο παραπάνω, παρακάτω είναι ενδιάμεσα των άλλων. Αυτό το επίπεδο προσδιορίζεται από εξειδικευμένη αναφορά του εξοπλισμού.			

Το Πρότυπο [28] παρουσιάζει συγκεκριμένες αυστηρές προδιαγραφές για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες. Αυτές οι απαιτήσεις αφορούν διάφορα μεγέθη αλλά αυτό στο οποίο δίνεται ιδιαίτερη έμφαση είναι απαιτήσεις για την παραγόμενη κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η κυματομορφή αυτή οφείλει σε κάθε είδος και επίπεδο δοκιμής να βρίσκεται εντός των ορίων τεσσάρων βασικών παραμέτρων.

Όπως βλέπουμε στον Πίνακα 3.2 οι τέσσερις παράμετροι ενδιαφέροντος που αφορούν τις εκφορτίσεις εξ επαφής με τις οποίες και ασχολούμαστε καθώς είναι η προτιμώμενες. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- Το ρεύμα πρώτης κορυφής
- Ο χρόνος ανόδου
- Το ρεύμα στα 30 ns
- Το ρεύμα στα 60 ns

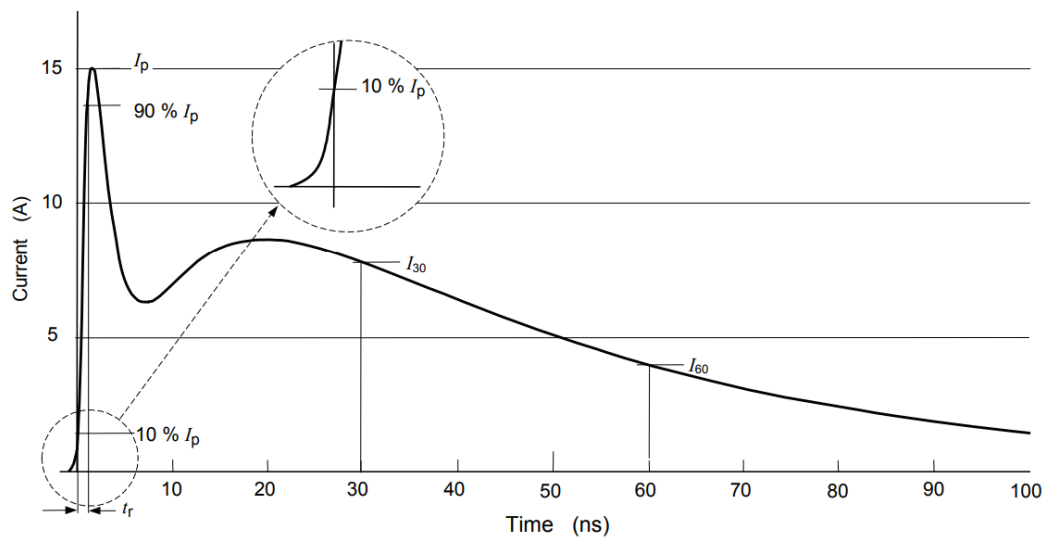
Πίνακας 3.2 Παράμετροι της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για κάθε επίπεδο δοκιμών σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008 [28]

Επίπεδο	Τάση φόρτισης [kV]	I_{max}	T_{rise}	I_{30}	I_{60}
		[A]	[ns]	[A]	[A]
		±15%	±25%	±30%	±30%
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
Το σημείο αναφοράς της μέτρησης του χρόνου σχετικά με το ρεύμα στα 30ns και 60ns είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία το ρεύμα αποκτά για πρώτη τιμή ίση με το 10% της μέγιστης τιμής του (ρεύμα πρώτης κορυφής)					

Ο χρόνος ανόδου είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ των στιγμών στις οποίες η στιγμιαία τιμή ενός παλμού φτάνει για πρώτη φορά στα καθορισμένα κατώτερα και ανώτερα όρια.

Το κατώτερο όριο είναι η στιγμή για την οποία ο παλμός κατά την ανοδική του πορεία πριν το πρώτο μέγιστο, έχει ένταση ίση με το 10% της έντασης που παρουσιάζει κατά την πρώτη κορυφή. Το ανώτερο όριο είναι η στιγμή για την οποία ο παλμός κατά την ανοδική του πορεία πριν το πρώτο μέγιστο, έχει ένταση ίση με το 90% της έντασης που εμφανίζει κατά την πρώτη κορυφή.

Η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπως ορίζεται στο Πρότυπο [28] παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, μαζί με τα χαρακτηριστικά της μεγέθη.



Σχήμα 3.1 Η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση με τάση φόρτισης τα $+4kV$ σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008 [28]

Πέραν του χρόνου ανόδου οι υπόλοιπες τρεις σημαντικές παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος είναι οι ακόλουθες:

- I_{max} ή I_{peak} : Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης, η οποία λαμβάνεται κατά την πρώτη κορυφή.
- I_{30} : Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 30ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή $I_{peak} * 10\%$.
- I_{60} : Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 60ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή $I_{peak} * 10\%$.

3.1.2 Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής

Η διάταξη και η διαδικασία διακρίβωσης μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ορίζονται στο Πρότυπο [28]. Κατά την διάταξη διακρίβωσης το ηλεκτρόδιο της γεννήτριας έρχεται σε επαφή με το κεντρικό ηλεκτρόδιο ενός ομοαξονικού μετατροπέα ρεύματος, ο οποίος είναι τοποθετημένος στα τοιχώματα ενός κλωβού

Faraday. Ο ομοαξονικός μετατροπέας πρέπει να απέχει τουλάχιστον 60 εκατοστά από την άκρη των τοιχωμάτων στα οποία έχει τοποθετηθεί. Ο ομοαξονικός μετατροπέας συνδέεται μέσω ομοαξονικών καλωδίων υψηλής συχνότητας και εξασθενητή στον παλμογράφο όπου καταγράφονται οι παραγόμενες κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος, σύμφωνα με το Πρότυπο [28] πρέπει να έχει μήκος μεταξύ δύο και τριών μέτρων. Η σύνδεση του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος με τη γείωση γίνεται στο τοίχωμα του κλωβού 50 εκατοστά κάτω από το ομοαξονικό μετατροπέα, γνωστό και ως στόχο Pellegrini. Το καλώδιο το ίδιο τραβιέται προς τα πίσω από το μέσο του έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα ισοσκελές τρίγωνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13.

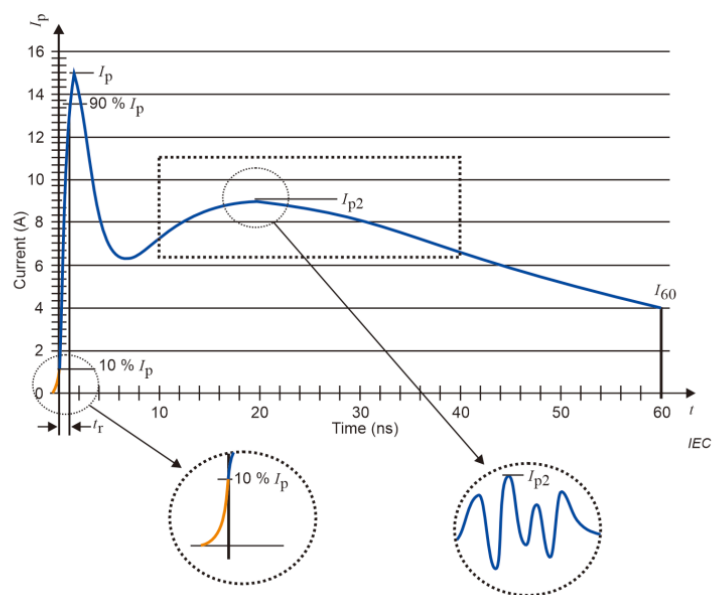
3.2 Φαινόμενο ringing

Το φαινόμενο ringing έχει να κάνει με τις αποσβεννύμενες ταλαντώσεις που εμφανίζονται μετά την πρώτη κορυφή του ρεύματος εκ φόρτισης εξ επαφής, στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το φαινόμενο έχει συσχετιστεί με το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το Πρότυπο [28] δεν όριζε κάποια παράμετρο που να σχετιζόταν με το φαινόμενο, αλλά το ίδιο το φαινόμενο απασχολούσε και απασχολεί τους επιστήμονες που καταπιάνονται με την έρευνα γύρω από το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

3.3 Νέα υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2

Στη νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου [29] παρατηρούνται διάφορες αλλαγές και προσθήκες σε όλα τα επίπεδα. Αυτό καταδεικνύει μια προσπάθεια περεταίρω συγκεκριμενοποίησης των απαιτήσεων και διαδικασιών τις οποίες ορίζει και προσδιορίζει η ισχύουσα έκδοση του Προτύπου [28], με στόχο την βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των διαδικασιών.

Μια σημαντική αλλαγή έχει να κάνει με τις παραμέτρους που οφείλουν να διέπουν την κυματομορφή του ρεύματος, που παράγεται από μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά τη διαδικασία των δοκιμών. Στη νέα υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου [29] καταργείται ως παράμετρος η I_{30} . Αντ' αυτής εισάγεται μια νέα παράμετρος, η I_{peak2} . Η νέα παράμετρος ορίζεται ως η μέγιστη τιμή του ρεύματος μεταξύ των χρονικών στιγμών 10ns και 40ns, με αφετηρία χρόνου τη στιγμή για την οποία το ρεύμα έλαβα για πρώτη φορά τιμή ίση με το 10% της μέγιστης τιμής του. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος για εκφόρτιση εξ επαφής στα 4kV, σύμφωνα με την νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου [29].



Σχήμα 3.2 Η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση με τάση φόρτισης τα $+4\text{kV}$ σύμφωνα με τη νέα, υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 [29]

Στον Πίνακα 3.3 βλέπουμε τις απαιτήσεις για τις παραμέτρους που διέπουν την κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με τη νέα, υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου [29], για τα διάφορα επίπεδα των εκφορτίσεων μέσω αέρα και εξ επαφής.

Πίνακας 3.3 Παράμετροι της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για κάθε επίπεδο δοκιμών σύμφωνα με την νέα, υπό αναθεώρηση έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 [29]

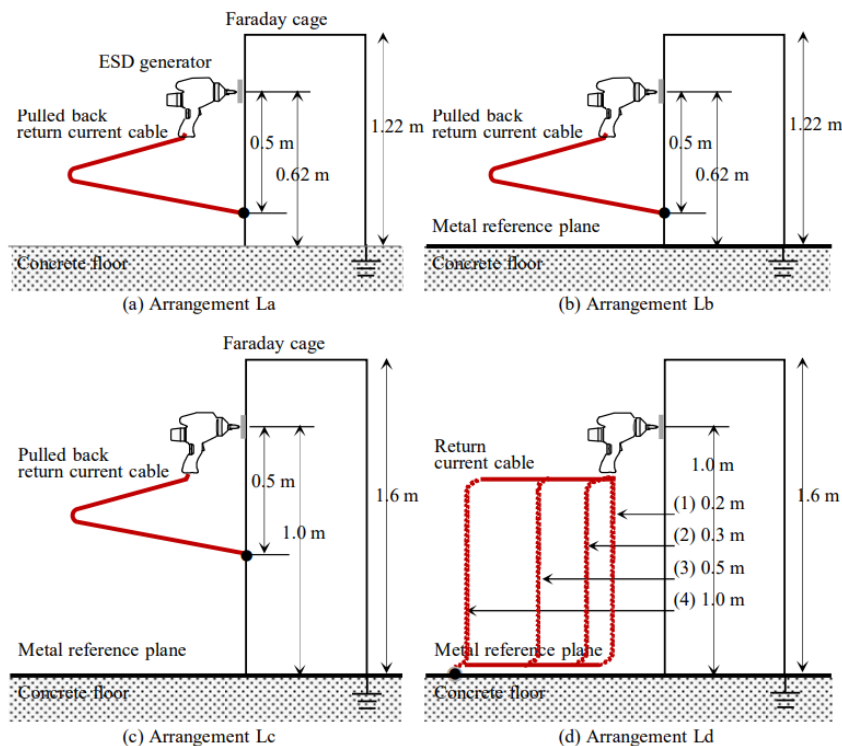
Επίπεδο		Τάση εκφόρτισης	I_{max}	T_{rise}	I_{peak2}	I_{60}
Εκφόρτιση εξ επαφής	Εκφόρτιση μέσω αέρα	[kV]	[A]	[ns]	[A]	[A]
			$\pm 15\%$	$\pm 25\%$	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$
1	1	2	7.5	0.8	4.5	2
2	2	4	15	0.8	9	4
3	---	6	22.5	0.8	13.5	6
4	3	8	30	0.8	18	8
---	4	15	56.3	0.8	33.8	15
Οι τρόποι μέτρησης - υπολογισμού των T_{rise} , I_{peak2} , I_{60} έχουν προσδιοριστεί.						

Μια ακόμα σημαντική αλλαγή που θα μας απασχολήσει είναι η μνεία που γίνεται στη νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου [29] ως προς το ύψος του σημείου γείωσης και την κατάσταση της επιφάνειας του δαπέδου στην δοκιμή διακρίβωσης εξ επαφής της γεννήτριας. Στη νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου αναφέρεται ότι το σημείο γείωσης πρέπει να απέχει από το δάπεδο $0.5 \pm 0.05\text{m}$ [29].

3.4 Έρευνες πάνω στο φαινόμενο ringing

3.4.1 Μελέτη της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής

Οι Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jiaqing Wang, Osamu Fujiwara σε μελέτη [30] τους εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο η διάταξη του καλωδίου επιστροφής και τα διαφορετικά περιβάλλοντα επηρεάζουν την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης κατά τη μελέτη διακρίβωσης εξ επαφής της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διακρίβωσης επαφής από μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τάση δοκιμής 4 kV σε διαφορετικά περιβάλλοντα μέτρησης και για διαφορετικές διατάξεις καλωδίων ρεύματος επιστροφής. Μέσω των δοκιμών λήφθηκαν και εξετάστηκαν οι κυματομορφές του ρεύματος, ενώ αναλύθηκαν τα φάσματα συχνότητας των κυματομορφών προκειμένου να διερευνηθούν τα φασματικά χαρακτηριστικά τους. Το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές είχε μήκος 2 μέτρων [30].

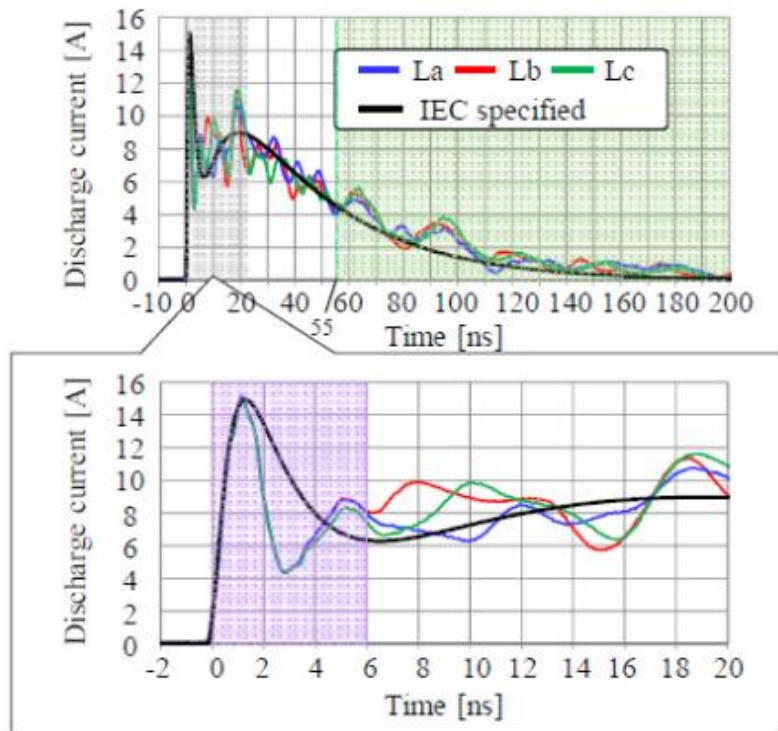


Σχήμα 3.3 Διάταξη μέτρησης της κυματομορφής ρεύματος εξ επαφής εκφόρτισης από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη μελέτη επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος μήκους 2m [30]

Στο Σχήμα 3.3 εμφανίζονται οι διατάξεις διακρίβωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Οι διαφορές τους έχουν να κάνουν με τη διάταξη του καλωδίου, τη θέση του σημείου γείωσης καθώς και το ύψος αυτού (και του στόχου) αναφορικά με το πάτωμα, όποτε αυτό βρίσκεται σε κάθετη επιφάνεια, την παρουσία μεταλλικού οριζώντιου επιπέδου αναφοράς, το ύψος του ομοαξονικού μετατροπέα – στόχου [30].

Παρατηρούμε ότι οι διατάξεις La, Lb και Lc είναι συμμορφωμένες ως προς την 2^η έκδοση (ισχύουσα) του Προτύπου [28], ενώ στη διάταξη Ld το σημείο γείωσης βρίσκεται εκτός προδιαγραφών του Προτύπου[28]. Η διαφορά μεταξύ των La και Lb είναι ότι στην Lb έχει τοποθετηθεί ένα μεταλλικό επίπεδο (πάχους ορισμένου στο Πρότυπο [28]) πάνω από το δάπεδο. Το ίδιο μεταλλικό επίπεδο έχει χρησιμοποιηθεί και στις διατάξεις Lc και Ld. Η διαφορά των La, Lb με την Lc διάταξη εντοπίζεται στο ύψος του στόχου αλλά και του σημείου γείωσης. Στη διάταξη Lc ο στόχος βρίσκεται στο 1 μέτρο από το πάτωμα σε αντίθεση με τις La και Lb στις οποίες ο στόχος βρίσκεται 62 εκατοστά από το πάτωμα. Στις τρεις πρώτες διατάξεις το σημείο γείωσης απέχει από τον στόχο κατακόρυφα 50 εκατοστά, όπως προϋποθέτει το Πρότυπο [28]. Αξιοσημείωτη είναι όμως και η διαφορά στο ύψος του ίδιου του κλωβού μεταξύ των πρώτων δύο διατάξεων, La και Lb, και των δύο τελευταίων Lc και Ld. Στις πρώτες το ύψος του κλωβού είναι 1.22 μέτρα ενώ στις τελευταίες είναι 1.60 μέτρα. Η μεταβολή έχει γίνει λόγω της «ανύψωσης» της θέσης του στόχου, η οποία για να παραμείνει εντός Προτύπου [28] πρέπει να απέχει 60 εκατοστά από τα όρια της επιφάνειας πάνω στην οποία έχει τοποθετηθεί, εν προκειμένω τα τοιχώματα του κλωβού Faraday. Στη διάταξη Ld χρησιμοποιούνται 4 διαφορετικές υποδιατάξεις και οι διαφορές μεταξύ τους έχουν να κάνουν αποκλειστικά με την διάταξη του καλωδίου. Το καλώδιο σε όλες τις υποδιατάξεις της διάταξης Ld είναι εκτός προδιαγραφών Προτύπου [28][29] ως προς την διάταξη του, αφού δεν σχηματίζει ισοσκελές τρίγωνο. Η ορθή διάταξη κατά το Πρότυπο [28][29] είναι το καλώδιο να σχηματίζει ισοσκελές τρίγωνο μεταξύ τριών σημείων, το σημείου εξόδου από τη γεννήτρια, του σημείου σύνδεσης με τη γείωση και του μέσου του καλωδίου. Στις υποδιατάξεις εδώ το καλώδιο εκτείνεται, αιωρούμενο, για διαφορετική απόσταση από τα τοιχώματα του κλωβού σε κάθε υποδιάταξη. Εν συνεχεία ακολουθεί μια κατακόρυφη πορεία μέχρι το δάπεδο και τέλος κείται επί του πατώματος μέχρι το σημείο σύνδεσης του με τη γείωση. Οι διαφορές μεταξύ των υποδιατάξεων μπορούν να γίνουν κατανοητές από το Σχήμα 3.3 [30].

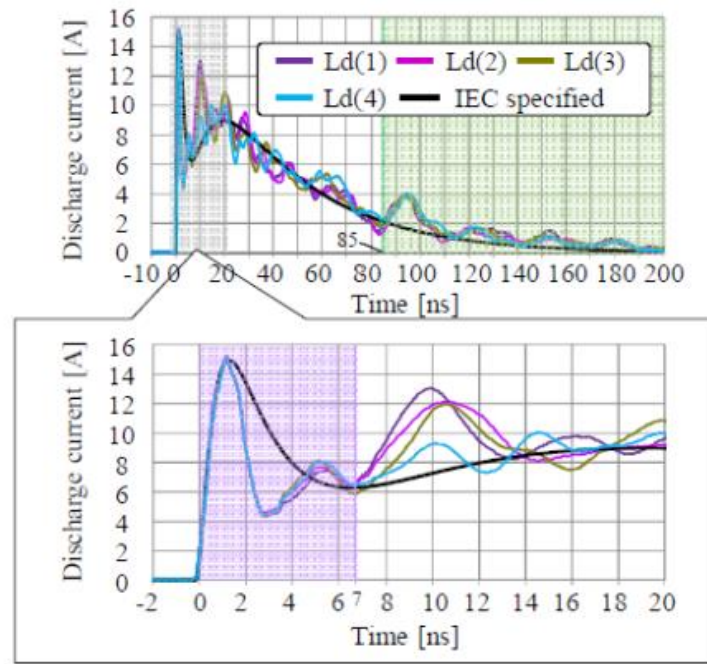
Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής με επίπεδο τάσης 4kV έτσι όπως μετρήθηκαν στις δοκιμές διακρίβωσης των τριών πρώτων διατάξεων, συγκριτικά με την ιδανική κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης 4kV, έτσι όπως αυτή ορίζεται στο Πρότυπο [28]. Οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής μετρήθηκαν από την άνοδο έως 450ns, αλλά στο σχήμα απεικονίζεται η κυματομορφή ρεύματος έως 200ns, ενώ παρουσιάζεται και μια διευρυμένη προβολή των κυματομορφών στη γκρίζα περιοχή έως 20ns. Παρά το γεγονός ότι οι κυματομορφές που λήφθηκαν από τις διατάξεις βρίσκονται εντός ορίων σύμφωνα με το Πρότυπο [28], είναι ευδιάκριτη η παρουσία του φαινομένου ringing, μετά την πρώτη κορυφή [30].



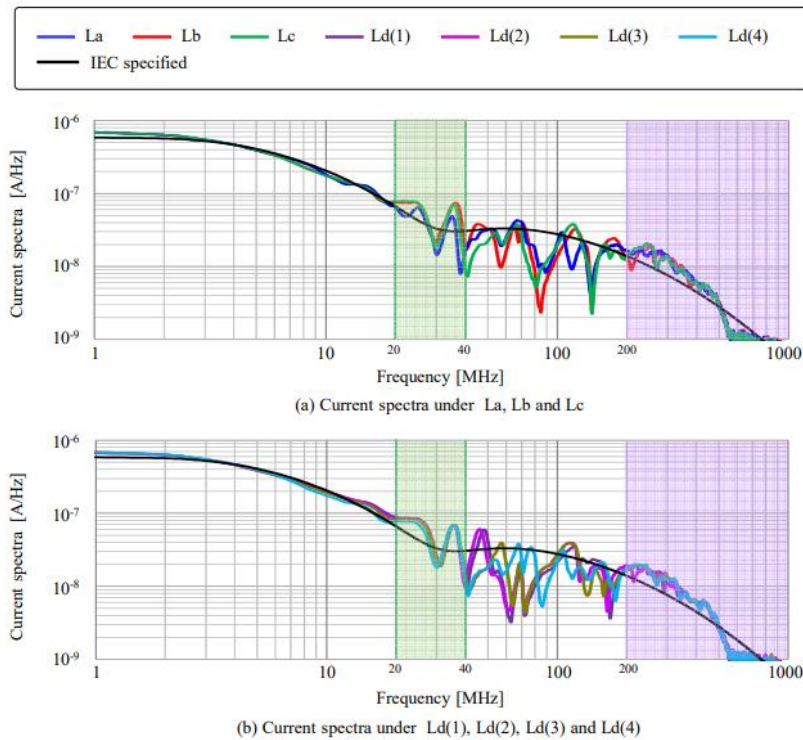
Σχήμα 3.4 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με επίπεδο τάσης +4kV για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος [30]

Οι κυματομορφές των τριών διατάξεων παρουσιάζουν σχετικά κοινή συμπεριφορά για χρόνους μικρότερους των 6ns και για χρόνους μεγαλύτερους των 55ns. Μεταξύ των δύο χρόνων η διαφοροποίηση των κυματομορφών των διατάξεων είναι εμφανής, ενώ εμφανής είναι και η διαφορά τους με την κυματομορφή που ορίζεται στο Πρότυπο [28], μετά την πρώτη κορυφή του ρεύματος [30].

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής με επίπεδο τάσης 4kV έτσι όπως μετρήθηκαν στις δοκιμές διακρίβωσης όλων των υποδιατάξεων της τελευταίας διάταξης (Ld), συγκριτικά με την ιδανική κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης 4kV, έτσι όπως αυτή ορίζεται στο Πρότυπο [28]. Οι ερευνητές παρατήρησαν πως οι τιμές του I_{60} για τις υποδιατάξεις Ld(3) και Ld(4) υπερβαίνουν το ανώτατο όριο που θέτει το Πρότυπο[28] για αυτή την παράμετρο. Οι κυματομορφές των υποδιατάξεων παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά για χρόνους μικρότερους των 7ns και για χρόνους μεγαλύτερους των 85ns. Μεταξύ των δύο χρόνων η διαφοροποίηση των κυματομορφών είναι εμφανής [30].



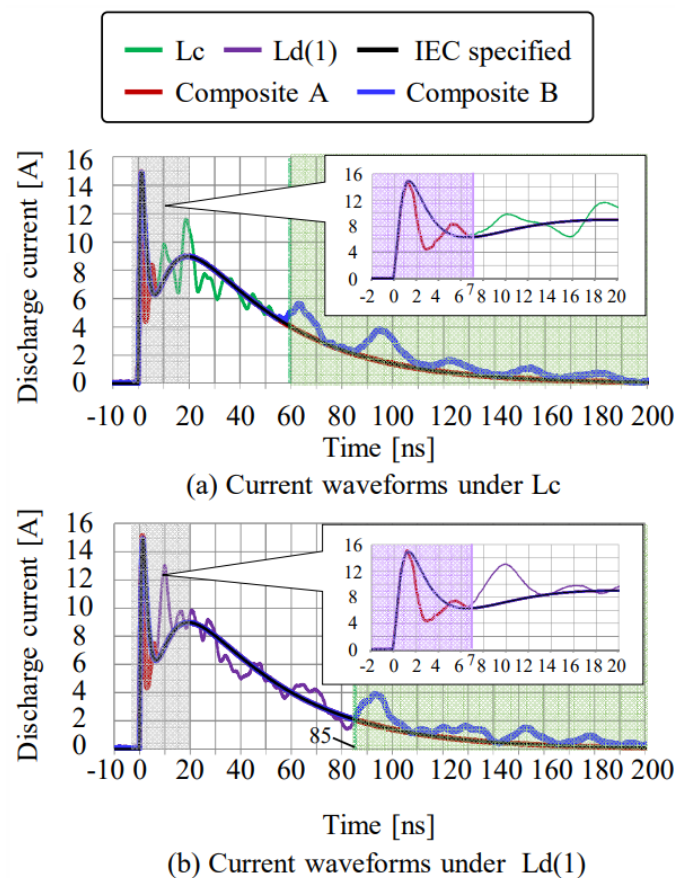
Σχήμα 3.5 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με επίπεδο τάσης , με επίπεδο τάσης $+4kV$ για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος [30]



Σχήμα 3.6 Σύγκριση φάσματος των κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής από γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με επίπεδο τάσης , με επίπεδο τάσης $+4kV$ για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος [30]

Στο Σχήμα 3.6 παρατίθενται τα φασματικά περιεχόμενα των κυματομορφών που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 3.4 και 3.5 και συγκρίνονται με το φάσμα της ιδανικής κυματομορφής ρεύματος όπως ορίζεται από το Πρότυπο [28]. Οι μεγάλες αποκλίσεις εντοπίζονται στην περιοχή μεταξύ 40MHz και 200MHz και φανερώνει την επίδραση του περιβάλλοντος μέτρησης και της διάταξης του καλωδίου στην προκύπτουσα κυματομορφή ρεύματος. Τα φάσματα μεταξύ 20MHz και 40MHz (πράσινη περιοχή) και άνω 200MHz (μωβ περιοχή) δεν παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους, συνεπώς δεν εξαρτώνται από την διάταξη του καλωδίου ή το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η δοκιμή [30].

Στην συνέχεια ερευνήθηκαν οι φασματικές ιδιότητες των κυματομορφών κατασκευάζοντας σύνθετες κυματομορφές. Χρησιμοποιήθηκαν οι κυματομορφές Lc και Ld1 καθώς και η ιδανική καμπύλη όπως ορίζεται στο πρότυπο.

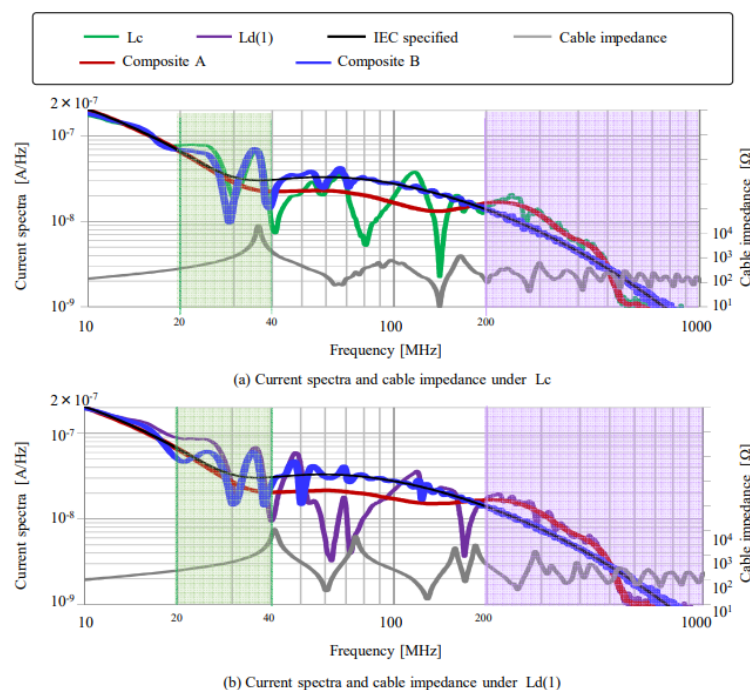


Σχήμα 3.7 Σύγκριση σύνθετων κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης Composite A και B, με μετρούμενες κυματομορφές ρεύματος και την ιδανική κυματομορφή που ορίζεται από το Πρότυπο [28]. (a) η οικογένεια Lc και IEC (b) η οικογένεια Ld1 και IEC [30]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7 οι ερευνητές κατασκεύασαν δυο οικογένειες κυματομορφών. Η πρώτη προκύπτει από τον συνδυασμό της κυματομορφής του ρεύματος που προέκυψε από την διάταξη Lc και από την ιδανική κυματομορφή του Προτύπου [28] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 (α). Η δεύτερη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7 (β) και προέκυψε συνδυάζοντας την κυματομορφή του ρεύματος που

προέκυψε από την διάταξη Ld1 και την ιδανική κυματομορφή ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο.

Και στις δύο οικογένειες συντίθεται μια κυματομορφή που ονομάζεται Composite A και μια που ονομάζεται Composite B. Η Composite A είναι μια σύνθετη κυματομορφή που έχει προκύψει ως ακολούθως. Για χρόνους μικρότερους των 7ns η Composite A καμπύλη ταυτίζεται με τις Lc ή Ld1 (ανάλογα την οικογένεια στην οποία ανήκει) ενώ για χρόνους μεγαλύτερους των 7ns συμπίπτει με την ιδανική κυματομορφή ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο [28]. Αντίστοιχα η Composite B συμπίπτει με την ιδανική κυματομορφή ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο [28] μέχρι μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή εκτροπής, η οποία όμως δεν ταυτίζεται για τις δύο οικογένειες. Στην περίπτωση της Composite B που προκύπτει από την Lc, ο χρόνος στον οποίο η Composite B εκτρέπεται από την ιδανική κυματομορφή του ρεύματος είναι τα 60ns. Στην περίπτωση της Composite B που προκύπτει από την Ld1, ο χρόνος στον οποίο η Composite B εκτρέπεται από την ιδανική κυματομορφή του ρεύματος είναι τα 85ns. Μετά την χρονική στιγμή εκτροπής η Composite B κυματομορφή συμπίπτει με τις Lc και Ld1, ανάλογα με την οικογένεια στην οποία ανήκει [30].



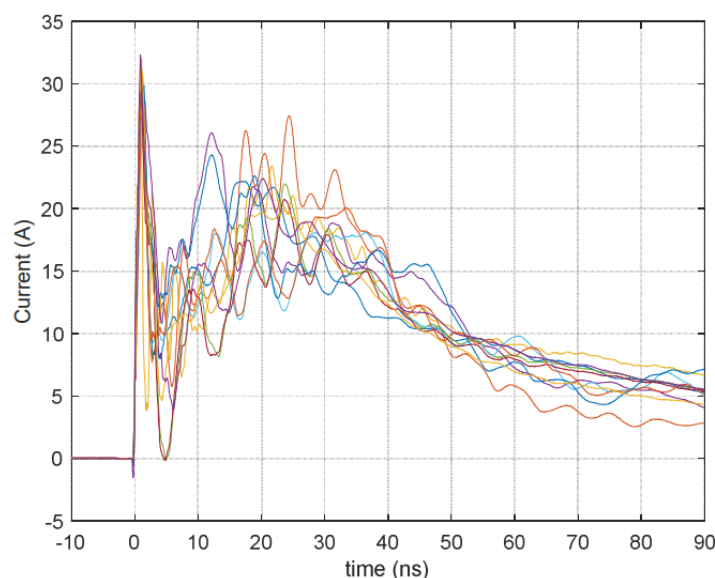
Σχήμα 3.8 Σύγκριση φάσματος σύνθετων κυματομορφών Composite A και B , με αυτό των μετρούμενων κυματομορφών ρεύματος και της ιδανικής κυματομορφής που ορίζεται από το Πρότυπο [28] (a) η οικογένεια Lc και IEC (b) η οικογένεια Ld1 και IEC [30]

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το φασματικό περιεχόμενο των κυματομορφών των δύο οικογενειών. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ των φασματικών περιεχομένων των μετρημένων κυματομορφών και των σύνθετων κυματομορφών Composite A και B εντός της κάθε οικογένειας. Παρατηρείται η ταύτιση των φασματικών περιεχομένων στην πράσινη περιοχή από τα 20MHz έως τα 40MHz μεταξύ των μετρούμενων

κυματομορφών Lc, Ld1 και των σύνθετων κυματομορφών Composite B. Ακόμη παρατηρήθηκε η ταύτιση των φασματικών περιεχομένων στην μωβ περιοχή άνω των 200MHz μεταξύ των μετρούμενων κυματομορφών Lc, Ld1 και των σύνθετων κυματομορφών Composite A. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι τα φάσματα και στις δύο αυτές περιοχές δεν επηρεάζονται από τις διατάξεις διακρίβωσης, δηλαδή από τη διάταξη του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος της γεννήτριας, ή από την παρουσία μεταλλικού επίπεδου στο δάπεδο. Με άλλα λόγια, το φάσμα στην πράσινη περιοχή αφορά τις διακυμάνσεις που εμφανίζονται μετά τα 60ns για την κυματομορφή Lc και μετρά τα 85ns για την κυματομορφή Ld1, ενώ το φάσμα στη μωβ περιοχή αφορά τις διακυμάνσεις μέχρι τα 7ns. Το φασματικό περιεχόμενο στις δύο περιοχές αποδίδεται σε χαρακτηριστικά που αφορούν την εσωτερική δομή του κυκλώματος της ίδιας της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [30].

3.4.2 Μελέτες μείωσης φαινομένου ringing με χρήση φερριτών

Οι Carlo Carobbi, Alain Burger, Spartaco Caniggia στην έρευνα τους [31] επιχειρούν να μειώσουν την επίδραση του φαινομένου ringing που επηρεάζει την κυματομορφή του ρεύματος της εξ επαφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στο πλαίσιο εργασιών συντήρησης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2[28] πραγματοποιήθηκε σύγκριση των κυματομορφών ρεύματος από εμπορικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην έρευνα συμμετείχαν έντεκα γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαφορετικών κατασκευαστών και μοντέλων και τρία εργαστήρια. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας ήταν η επιβεβαίωση του σημαντικού βαθμού στον οποίο το φαινόμενο ringing επηρεάζει τις κυματομορφές του ρεύματος που παράγεται από την πλειοψηφία των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και ειδικότερα μεταξύ 10ns και 40ns [31].



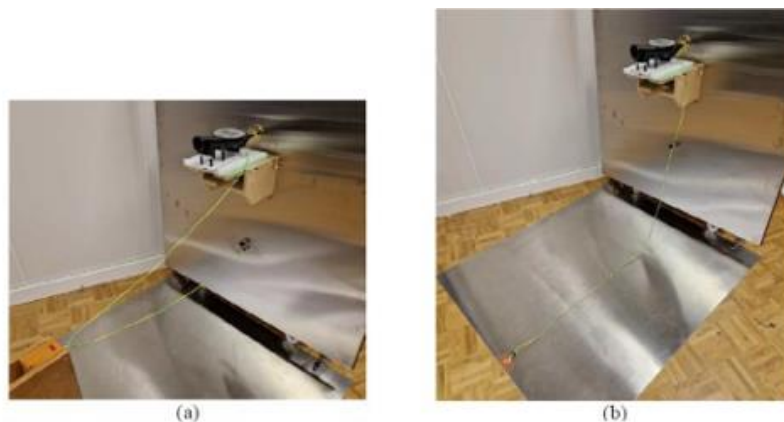
Σχήμα 3.9 Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης έντεκα εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση, με επίπεδο τάσης +8kV [31]

Στο Σχήμα 3.9 βλέπουμε τις κυματομορφές που παρήγαγαν οι έντεκα γεννήτριες, που βρίσκονταν εντός των ορίων που όριζε το Πρότυπο [28], σχετικά με τις τέσσερις παραμέτρους ελέγχου. Προκειμένου να μειωθεί η ένταση εμφάνισης του φαινομένου προέβησαν στην χρήση φερριτών για να μελετήσουν την επίδραση τους στην εξάλειψη του φαινομένου, καθώς η χρήση φερριτών έχει υιοθετηθεί για την βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας σε δοκιμές εκπομπών και ατρωσίας [32], [31].

Οι μετρήσεις λήφθηκαν σύμφωνα με μια παραλλαγή της τυποποιημένης διάταξης [28] για την διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η οποία περιλαμβάνει ένα οριζόντιο επίπεδο γείωσης συνδεδεμένο με το κάθετο επίπεδο με το κατακόρυφο επίπεδο γείωσης [29]. Η εισαγωγή του οριζόντιου επιπέδου γείωσης είχε ως σκοπό την βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας της διαδικασίας διακρίβωσης [31].

Για τον περιορισμό του ringing χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί φερρίτες της εταιρείας Fair Rite με αριθμούς προϊόντος 2643625002 και 2643806402. Ο ένας φερρίτης είναι υλικού 43 και διαμέτρου 7.9mm, ενώ ο δεύτερος είναι ένας φερρίτης από το υλικό 43 διαμέτρου 25.44mm [33]. Διερευνήθηκαν δύο θέσεις των φερριτών επί του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος, η πρώτη ήταν στην άκρη του καλωδίου προς τη σημείο σύνδεσης με τη γείωση και η δεύτερη ήταν στην άκρη του καλωδίου προς την γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Επιπλέον δοκιμάστηκε να περικλυθούν εντός του φερρίτη 1 και 2 σπείρες του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος [31].

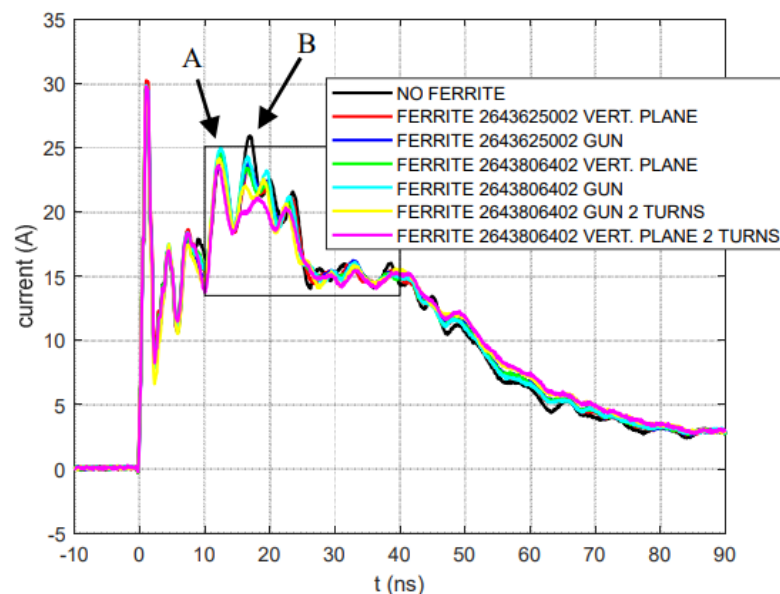
Τρεις διατάξεις του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος που δοκιμάστηκαν ήταν η «τριγωνική», η «πραγματική» και η «απομονωμένη πραγματική» με τις δύο πρώτες φαίνονται στο Σχήμα 3.10. Στην «απομονωμένη πραγματική» διάταξη, το μέρος του καλωδίου επιστροφής που εκτείνεται παράλληλα στο έδαφος ανυψώθηκε με τη βοήθεια μονωτικού υλικού, πάχους 10cm. Η γεννήτρια των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που χρησιμοποιήθηκε, εμφανίζει εκτεταμένο φαινόμενο ringing στο χρονικό διάστημα γύρω από την δεύτερη κορυφή της κυματομορφής (10ns έως 40ns). Η γεννήτρια είχε ρυθμιστεί σε επίπεδο τάσης 8kV, θετικής πολικότητας σε λειτουργία εκφόρτισης εξ επαφής [31].



Σχήμα 3.10 “Τριγωνική” και “πραγματική” διάταξη του καλωδίου επιστροφής ρεύματος [31]

Στον πρώτο γύρο των μετρήσεων διερευνήθηκε η τριγωνική διάταξη του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Μελετήθηκαν και οι δύο φερρίτες στις δύο διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικό αριθμό σπειρών. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Η εισαγωγή – εφαρμογή φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής μπορεί να μειώσει το φαινόμενο ringing και να βοηθήσει μια γεννήτρια ηλεκτροστατική εκφόρτιση να βρεθεί εντός των προδιαγραφών της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου [29], αναφορικά με την δεύτερη κορυφή.
- Οι φερρίτες είναι αποτελεσματικοί στην καταστολή των συντονισμών γύρω από το χρονικό διάστημα γύρω από τα 20ns.
- Ο χρόνος ανόδου, το πλάτος του παλμού και το I_{60} σπάνια επηρεάζονται από την εισαγωγή – εφαρμογή φερριτών.
- Η τοποθέτηση του φερρίτη στο άκρο κοντά στο κατακόρυφο επίπεδο γείωσης είναι πιο αποτελεσματική.
- Πάρα το γεγονός ότι πληρούνται οι προδιαγραφές της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου [29], εξακολουθεί να υπάρχει ένα μικρό περιθώριο μεταξύ των μετρήσεων και των προδιαγραφών [31].



Σχήμα 3.11 Αποτελέσματα πρώτου γύρου μετρήσεων [31]

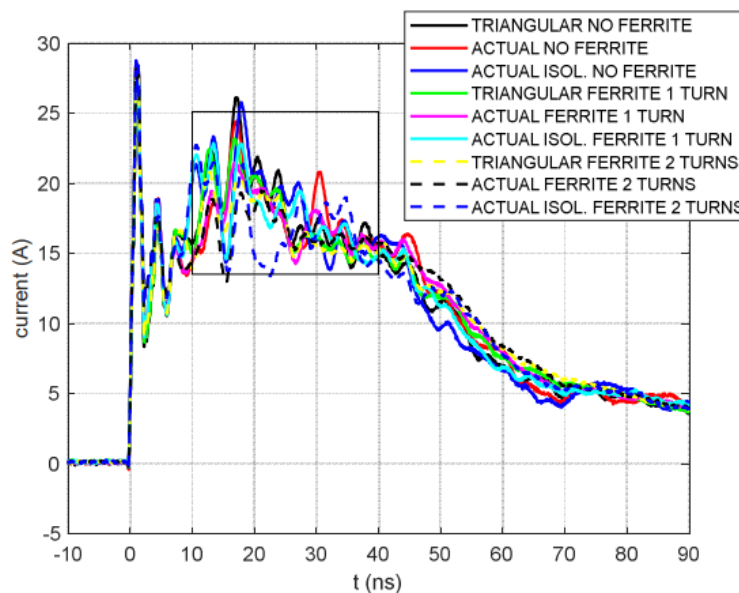
Στο Σχήμα 3.11 ευδιάκριτη είναι η μικρή μείωση της κορυφής της A με την εισαγωγή του φερρίτη, ενώ η κορυφή B παρουσιάζει έντονη εξασθένηση. Η κυματομορφή B χωρίς φερρίτη βρίσκεται εκτός προδιαγραφών της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου [29], για χρόνους μεταξύ των 10ns και 40ns [31]. Τα όρια των προδιαγραφών απεικονίζονται με το παραλληλόγραμμο μεταξύ 10ns και 40ns.

Στο δεύτερο γύρο των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μόνος ένας φερρίτης (αριθμός προϊόντος 2643625002: material 43 διαμέτρου 16.25mm) με 1 και 2 σπείρες του

καλωδίου επιστροφής, σε όλες τις διατάξεις επιστροφής του καλωδίου. Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

- Η κορυφή Α στο χρονικό παράθυρο μεταξύ 10ns και 40ns μειώνεται μόνο με την «πραγματική» διάταξη.
- Εφαρμόζοντας την «πραγματική» διάταξη, η κορυφή Β μειώνεται αρκετά με την εισαγωγή – εφαρμογή φερρίτη.
- Η κορυφή Α δεν επηρεάζεται από την εφαρμογή φερριτών [31].

Τα σχετικά αποτελέσματα του δεύτερου γύρου μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Αποτελέσματα δεύτερου γύρου μετρήσεων [31]

Η συγκεκριμένη έρευνα κατέληξε σε αρκετά συμπεράσματα. Ένας σωστά επιλεγμένος φερρίτης μπορεί να εφαρμοστεί στο καλώδιο και μειώνοντας το φαινόμενο ringing να θέσει εντός προδιαγραφών της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου [29] μια γεννήτρια που διαφορετικά μπορεί και να είχε τεθεί εκτός. Ακόμη συμπεραίνεται ότι εφαρμογή φερρίτη και η διάταξη του καλωδίου δεν επηρεάζουν την πρώτη κορυφή (πλάτος παλμού) και το χρόνο ανόδου, καθώς και ότι ο φερρίτης πρέπει να εφαρμόζεται – τοποθετείται επί του καλωδίου επιστροφής κοντά στο άκρο στο οποίο πραγματοποιείται η σύνδεση με τη γείωση. Προτείνεται η χρήση της «πραγματικής» διάταξης του καλωδίου επιστροφής κατά τη διαδικασία διακρίβωσης της γεννήτριας καθώς αυτή είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών σε εξοπλισμό [31].

Την εισαγωγή φερριτών στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος για την καταπολέμηση του φαινομένου ringing στις εξ επαφής εκφορτίσεις επέλεξαν να ερευνήσουν και άλλες ομάδες.

Οι Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jiaqing Wang, Osamu Fujiwara σε πρόσφατη έρευνα τους [34] εξετάζουν την επίδραση της εφαρμογής φερρίτη στο μέσο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος κατά την διαδικασία διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο τάσης εκφόρτισης 4kV. Στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι γεννητριών, ένας μπαταρίας και ένας AC παροχής [34].

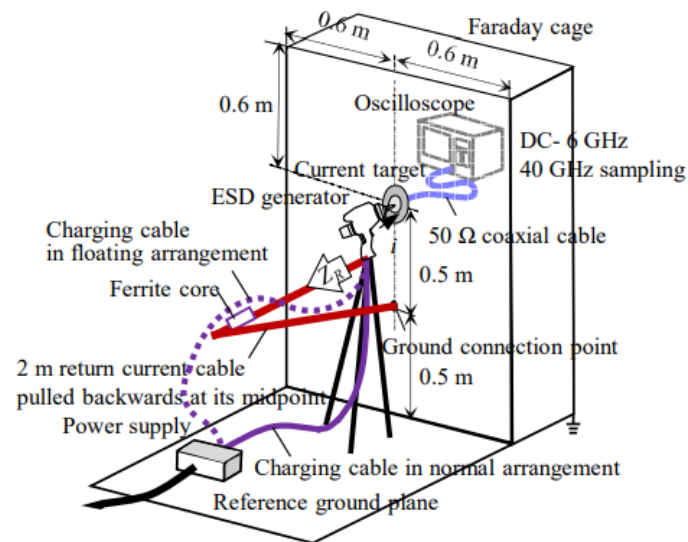
Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες τους [35][36][37] έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο ringing οφείλεται σε συντονισμούς του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα οι φασματικές διακυμάνσεις εμφανίζεται μεταξύ των συχνοτήτων 20MHz και 200MHz, εκ των οποίων οι διακυμάνσεις από 20MHz έως 40MHz και πάνω από τα 200MHz αποδίδονται στα εσωτερικά κυκλώματα των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και δεν επηρεάζονται από το περιβάλλον της διάταξης διακρίβωσης ή τη διάταξη του καλωδίου επιστροφής. Το φάσμα συχνοτήτων που επηρεάζεται από τους συντονισμούς αυτούς θεωρείται ότι περιορίζεται μεταξύ 40MHz και 200MHz, αλλά οι φασματικές διακυμάνσεις δεν συμπίπτουν με τις χαρακτηριστικές συντονισμού συχνότητας της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου επιστροφής [34].

Σε έρευνες τους [38][39] που έχουν εστιάσει στη διάταξη του καλωδίου φόρτισης που χρησιμοποιείται για την φόρτιση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, επιβεβαίωσαν τα φασματικά χαρακτηριστικά που οφείλονται στο ringing για τέσσερα μοντέλα γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αποκαλύπτοντας ότι η διάταξη κατά την οποία το καλώδιο φόρτισης αιωρείται πάνω από ένα μεταλλικό επίπεδο τείνει να καταστείλει το ringing περισσότερο από ότι η διάταξη κατά την οποία το καλώδιο φόρτισης κείτεται επί της μεταλλικής επιφάνειας [34].

Η μετρούμενη κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής που παρουσιάζεται σε προηγούμενη έρευνα τους [38] από μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπαταρίας, χωρίς καλώδιο φόρτισης, αλλά με ενσωματωμένο φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής της, το οποίο φαινόταν να είχε δοθεί κατ' αυτόν τον τρόπο (με ενσωματωμένο τον φερρίτη) από τον κατασκευαστή για την καταστολή του ringing, φαίνεται να παρουσιάζει ringing. Αυτό καθιστά αβέβαιη την επίδραση της εφαρμογής φερρίτη για την καταστολή του ringing [34].

Τα παραπάνω οδήγησαν τους ερευνητές να εξετάσουν τη μείωση του φαινομένου ringing με την εφαρμογή φερριτών αλλά λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά συντονισμού των καλωδίων επιστροφής. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το περιβάλλον της διάταξης διακρίβωσης όπως ορίζεται στο Πρότυπο [28] και η διάταξη μετρήσεων των κυματομορφών ρεύματος κατά τη διαδικασία διακρίβωσης εξ επαφής των γεννητριών. Το ηλεκτρόδιο της γεννήτριας έρχεται σε επαφή με το κέντρο του ομοαξονικού μετατροπέα, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο μέσο του τοιχώματος ενός γειωμένου κλωβού Faraday. Η διάταξη του καλωδίου επιστροφής ρεύματος επηρεάζει το ringing που εμφανίζεται μετά την πρώτη κορυφή της εξ επαφής κυματομορφής του

ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [40][41][42] και για αυτό το λόγο το Πρότυπο [28][29] ορίζει την διάταξη ισοσκελούς τριγώνου ως αποδεκτή. Ως Z_R ορίζεται η αντίσταση εισόδου του καλωδίου επιστροφής, γειωμένο από την μια πλευρά, όπως αυτή μετριέται από την πλευρά της γεννήτριας ESD. Αναφέρεται ότι για το καλώδιο φόρτισης δεν υπάρχει κάποια προδιαγραφή στο Πρότυπο [28] αναφορικά με το μήκος ή την διάταξη του. Εν προκειμένω το καλώδιο κινείται κάθετα προς τα κάτω από την γεννήτρια παράλληλα με το κατακόρυφο μεταλλικό επίπεδο και στην συνέχεια κείτεται πάνω στο οριζόντιο μεταλλικό επίπεδο, και εκτείνεται έως ότου συνδεθεί με το τροφοδοτικό της γεννήτριας [34].



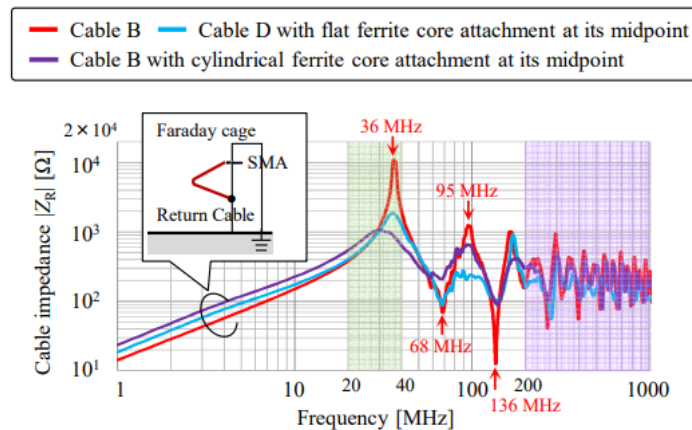
Σχήμα 3.13 Διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και μέτρησης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για εξ επαφής εκφόρτιση [34]

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν ονομάστηκαν Β και D. Η γεννήτρια D έχει τροφοδοσία από μπαταρία και συνεπώς δεν έχει καλώδιο φόρτισης. Το καλώδιο επιστροφής που χρησιμοποιείται για την γεννήτρια Β, αναφέρεται ως καλώδιο Β. Το καλώδιο επιστροφής που χρησιμοποιείται για την γεννήτρια D, αναφέρεται ως καλώδιο D και έχει εφαρμοσμένο από τον κατασκευαστή της ένα flat type φερρίτη στο μέσο του. Ένας κυλινδρικός εμπορικός φερρίτης που χρησιμοποιείται για την καταστολή θορύβου (ZCAT3035- 1330 – εσωτερικής διαμέτρου 13mm [43]) εφαρμόζεται στο μέσο του καλωδίου Β, προκειμένου να μελετηθεί η καταστολή του ringing από την εφαρμογή του φερρίτη στη γεννήτρια Β συγκριτικά με την γεννήτρια D [34].

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές συχνότητες της αντίστασης $|Z_R|$ των καλωδίων επιστροφής με γειωμένη τη μια άκρη τους, οι οποίες αντιστοιχούν με τις αντιστάσεις που «βλέπει» η γεννήτρια. Οι χαρακτηριστικές συχνότητες της αντίστασης του καλωδίου επιστροφής για συχνότητες άνω των 200MHz δεν επηρεάζουν το φάσμα της κυματομορφής ρεύματος εξ επαφής εκφόρτισης [35][36][39].

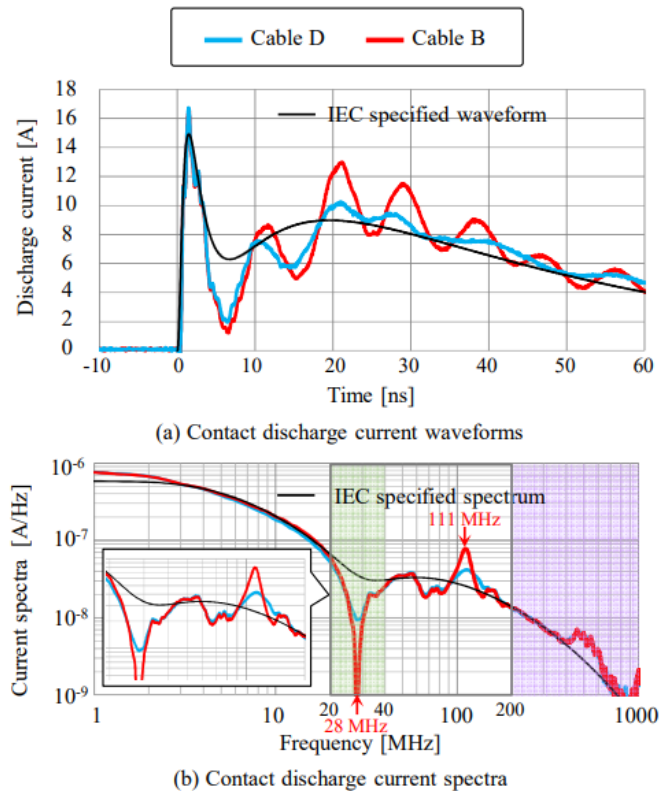
Η κόκκινη γραμμή αφορά το καλώδιο Β χωρίς φερρίτη, η μπλε αφορά το καλώδιο D, ενώ η μωβ γραμμή αφορά το καλώδιο Β με εφαρμοσμένο τον κυλινδρικό φερρίτη.

Παρά το ότι οι συντονισμοί των καλωδίων ξεκινούν να εμφανίζονται σε συχνότητες 30MHz με 40MHz, σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρείται ότι οι δύο πρώτες κορυφές συντονισμού στα 40MHz και 100MHz περιορίζονται και κατά συνέπεια οι τιμές του Q (quality factor) μειώνονται με την χρήση των καλωδίων B και D στα οποία είναι εφαρμοσμένοι φερρίτες, σε σχέση με το καλώδιο B χωρίς εφαρμοσμένο φερρίτη. Συγκρίνοντας τα καλώδια D και B με εφαρμοσμένο φερρίτη παρατηρείται ότι το πρώτο μέγιστο και ελάχιστο είναι «μικρότερα» αντίστοιχα για το καλώδιο B' (με εφαρμοσμένο φερρίτη), ενώ το δεύτερο μέγιστο είναι μεγαλύτερο για το B' και το δεύτερο ελάχιστο είναι ίδιο και για τα δύο καλώδια, B' και D [34].



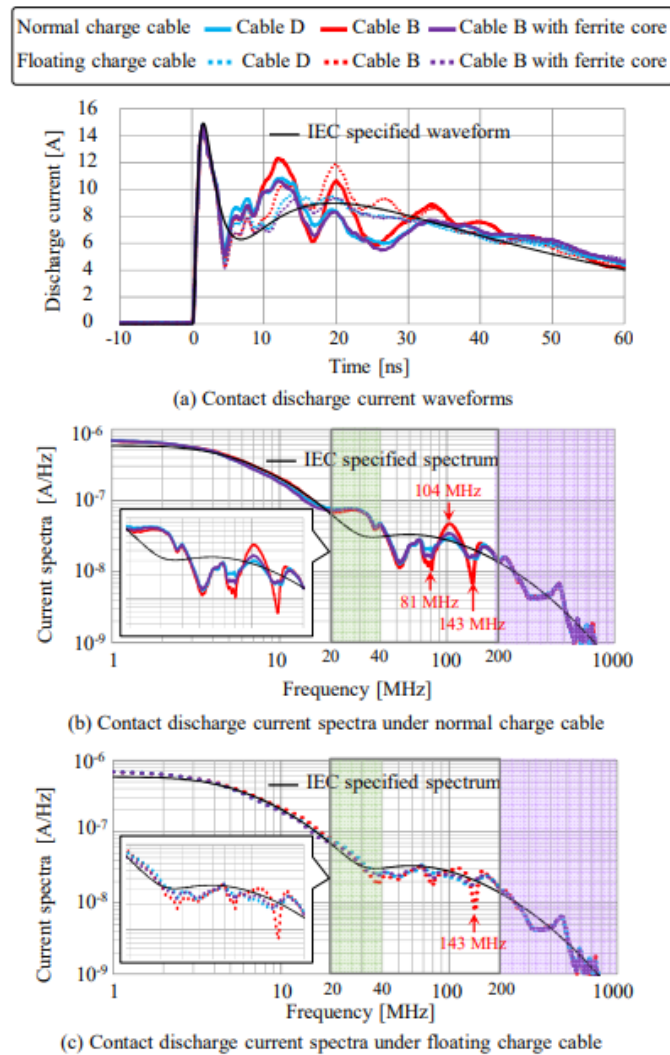
Σχήμα 3.14 Φάσμα των αντιστάσεων καλωδίων επιστροφής ρεύματος, μήκους 2m από την πλευρά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με γειωμένο το άλλο άκρο [34]

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής της γεννήτριας D , με διαφορετικά καλώδια επιστροφής, σε επίπεδο φόρτισης 4kV και συγκρίνονται με την ιδανική κυματομορφή ρεύματος για το αντίστοιχο επίπεδο τάσης όπως ορίζεται από το Πρότυπο [28]. Ακόμα παρουσιάζεται και το φασματικό περιεχόμενο αυτών των κυματομορφών. Είναι ευδιάκριτη η διαφορά στην επίδραση του φαινομένου ringing μεταξύ των κυματομορφών που προέκυψαν από τα διαφορετικά καλώδια επιστροφής. Η μπλε κυματομορφή αφορά την γεννήτρια D με χρήση του καλωδίου D (καλώδιο της γεννήτριας D), ενώ η κόκκινη αφορά την γεννήτρια D με χρήση του καλωδίου B (καλώδιο της γεννήτριας B). Το φαινόμενο ringing είναι περισσότερο εξασθενημένο από το καλώδιο D σε σχέση με το B. Το καλώδιο D έχει κοινό φάσμα με το καλώδιο B, με τη διαφορά ότι έχει μικρότερη πτώση στα 28MHz και μικρότερη άνοδο στα 111MHz, από το καλώδιο B. Αυτό συμπίπτει με τη μικρότερη κορυφή στα 36MHz και τη μικρότερη πτώση στα 136MHz που εμφανίζονται στα φάσματα των αντιστάσεων Z_R του καλωδίου D σε σχέση με το B. Αυτό καταδεικνύει ότι η επίδραση του φερρίτη σχετίζεται με την Q-τιμή συντονισμού του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος [34].



Σχήμα 3.15 Κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας για εξ επαφής εκφόρτιση, με επίπεδο τάσης $+4kV$, από την γεννήτρια D και η ιδανική κυματομορφή ρεύματος μαζί με (b) τα αντίστοιχα φάσματα των κυματομορφών [34]

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της εξ επαφής εκφόρτισης σε επίπεδο τάσης $4kV$ της γεννήτριας B, καθώς και η ιδανική κυματομορφή ρεύματος για το αντίστοιχο επίπεδο τάσης όπως ορίζεται από το Πρότυπο [28]. Παρουσιάζονται ακόμα τα φάσματα συχνότητας των κυματομορφών ξεχωριστά για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου φόρτισης. Από τις κυματομορφές του ρεύματος φαίνεται ότι η εφαρμογή φερρίτη καταστέλλει το ringing και στα δύο καλώδια. Το ringing φαίνεται περισσότερο μειωμένο στις κυματομορφές που αφορούν την αιωρούμενη διάταξη του καλωδίου φόρτισης. Στο Σχήμα 3.16 (b) φαίνεται ότι τα καλώδια με εφαρμοσμένους φερρίτες εμφανίζουν περιορισμένες διακυμάνσεις στα 81MHz, 104MHz και 143MHz. Αυτές οι συχνότητες δεν συμπίπτουν με τις συχνότητες που παρουσιάζονται οι μεγάλες διακυμάνσεις για την Z_R . Στο Σχήμα 3.16 (c) είναι ευδιάκριτη η μείωση της επίδρασης του φαινομένου ringing όταν η διάταξη του καλωδίου φόρτισης είναι αιωρούμενη, ακόμα και για το καλώδιο B χωρίς την εφαρμογή φερρίτη. Αυτή η μείωση γίνεται σημαντικότερη με την εφαρμογή φερρίτη και το φασματικό περιεχόμενο αυτών των κυματομορφών είναι πολύ κοντά σε αυτό της ιδανικής κυματομορφής ρεύματος [34].



Σχήμα 3.16 (α) Κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας για εξ επαφής εκφόρτιση, με επίπεδο τάσης $+4kV$, από την γεννήτρια B και η ιδανική κυματομορφή ρεύματος μαζί με (β),(γ) τα αντίστοιχα φάσματα των κυματομορφών για διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου φόρτισης [34]

Σημαντικό συμπέρασμα αυτής της έρευνας είναι ότι και για τους δύο τύπους γεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν επιβεβαιώνεται ότι οι φασματικές διακυμάνσεις των κυματομορφών του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε συχνότητες γύρω από τα 100MHz, οι οποίες συμπίπτουν με τις συχνότητες συντονισμού των καλωδίων, περιορίζονται με την εφαρμογή φερρίτη στο μέσο του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος, εξαιτίας των χαμηλότερων Q τιμών συντονισμού των χαρακτηριστικών συχνότητας της μετρούμενης αντίστασης του καλωδίου [34]. Ακόμη για την γεννήτρια AC παροχής το ringing ήταν ιδιαίτερα εξασθενημένο για αιωρούμενη διάταξη του καλωδίου φόρτισης στις συχνότητες μεταξύ 20MHz και 200MHz.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Πειραμάτων

4.1 Εξοπλισμός εργαστηρίου υψηλών τάσεων

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται εξοπλισμός παραγωγής και καταγραφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή των δοκιμών, ήταν διαθέσιμος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ και είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων
- Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης (Pellegrini target)
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας
- Εξασθενητής
- Παλμογράφος
- Κλωβός Faraday
- Φερρίτες

4.1.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που είναι διαθέσιμες στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων είναι οι εξής:

- NSG-433 της εταιρείας Schaffner
- NSG-438 της εταιρείας Schaffner
- DITO της εταιρείας EM TEST

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν κυρίως με τη γεννήτρια DITO, αλλά χρησιμοποιήθηκαν και οι τρεις γεννήτριες. Η γεννήτρια DITO προτιμήθηκε περισσότερο από τις τρεις γιατί είναι η μόνη που λειτουργεί με μπαταρία συνεπώς δεν εμπλέκονται στις μετρήσεις τα καλώδια φόρτισης, τροφοδοτικά και τα καλώδια τροφοδοσίας.

4.1.1.1 Γεννήτρια NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ -18kV και +18kV, με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1ns. Στο «πιστόλι» είναι ενσωματωμένο ψηφιακό βολτόμετρο, στο οποίο εμφανίζεται η τάση φόρτισης, και ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας. Η συγκεκριμένη γεννήτρια λειτουργεί με τροφοδοτικό. Διαθέτει προσαρμοστή εκφόρτισης επαφής ο οποίος απαλλάσσει τον παλμό από ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος όπως πίεση, θερμοκρασία και υγρασία.

4.1.1.2 Γεννήτρια NSG-438

Η γεννήτρια NSG-438 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ -30kV και +30kV και διαθέτει οθόνη αφής για τη πραγματοποίηση των αναγκαίων χειρισμών. Αποτελείται από τρία τμήματα. Η βασική μονάδα περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και το ρυθμιστή υψηλής τάσης. Το πιστόλι στο οποίο βρίσκονται οι ακίδες εκφόρτισης (αέρα και επαφής), στη λαβή του οποίου βρίσκεται το

μπουτόν – σκανδάλη, το οποίο χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των εκφορτίσεων. Το τροφοδοτικό μηχάνημα της γεννήτριας με είσοδο 100-250 V_{ac}, 50-60Hz, 1 A που δίνει στη βασική μονάδα 24V_{dc} και 2.3A.

4.1.1.3 Γεννήτρια DITO

Η γεννήτρια DITO παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ -16.5kV και +16.5kV. Παρουσιάζει εξαιρετική εργονομία σε σχέση με τα άλλα μοντέλα καθώς πρόκειται για μια συσκευή που δεν απαιτεί περιφερειακά. Η μόνη απαίτηση για την λειτουργία της είναι μια σταθερή γείωση, ενώ για την τροφοδοσία της χρησιμοποιεί επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Όλες οι ενδείξεις βρίσκονται στην οθόνη της και μπορούμε να δούμε τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι εκφορτίσεις, το επίπεδο της τάσης και τον αριθμό των επαναλήψεων μέσω αυτής.

4.1.1.4 Σύγκριση των γεννητριών και παρουσίαση χαρακτηριστικών

Πίνακας 4.1 Συγκριτικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Γεννήτρια ESD		NSG-433	NSG-438	DITO
Πυκνωτής εκκένωσης C_s		150 pF ± 10%		
Αντίσταση εκκένωσης R_d		330 Ω ± 10%		
Αντίστασης φόρτισης R_c		100 MΩ	50 MΩ	-
Τάση εξόδου V_o	Εκφορτίσεις μέσω αέρα	2 – 18 kV	200 V – 30 kV	500 V – 16.5 kV
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	2 – 9 kV		500 V – 10 kV
Πολικότητα τάσης εξόδου		Θετική / Αρνητική		
Χρόνος διατήρησης του 90% της τάσης φόρτισης (90% V_o)		> 5 ns		
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης t_{rise}	Εκφορτίσεις μέσω αέρα	< 1 ns (για τάσεις ≤ 8 kV)		0.7 – 1 ns
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	0.7 – 1 ns		
Μέγιστο ρεύμα (I_{peak})		2kV: 7.5 A ± 10% 4kV: 15 A ± 10% 6kV: 22.5 A ± 10% 8kV: 30 A ± 10%		
Τάση τροφοδοσίας		100/120/220/240 V_{ac} , 50 – 60 Hz		Battery NiCd 12 V
Κατανάλωση		25 VA		-
Θερμοκρασία λειτουργίας		5 – 40 °C		10 – 35 °C
Υγρασία λειτουργίας		20% - 80% rH		

4.1.2 Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης είναι ένας μετατροπέας με την βοήθεια του οποίου μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Είναι γνωστός και

ως στόχος Pellegrini. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο MD 103 της TESEQ.

4.1.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Τα ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του ρεύματος υψηλής συχνότητας. Η λειτουργία τους είναι σημαντική καθώς το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns και συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Χρησιμοποιήθηκε το ομοαξονικό καλώδιο τύπου SUCOFLEX 106 λόγω της καλής απόκρισης συχνότητας του.

4.1.4 Εξασθενητής

Ο ομοαξονικός προσαρμογέας έχει ενσωματωμένο εξασθενητή με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 6 GHz. Το καλώδιο τύπου SUCOFLEX, και ο ομοαξονικός προσαρμογέας MD103 έχουν κατασκευασθεί και διακριβωθεί ως ενιαίο σύστημα, κατάλληλο για τη μέτρηση του ρεύματος των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [44].

4.1.5 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος TDS 7254B της εταιρείας Tektronix λειτουργεί στα 2.5GHz και συνεπώς πληροί τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61000-4-2 [28] στο οποίο αναφέρεται η απαίτηση ο παλμογράφος να έχει οριακή συχνότητα άνω του 1GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, λειτουργικό σύστημα Windows 2000 και η αποθήκευση των δεδομένων έγινε μέσω φορητής αποθηκευτικής μονάδας USB. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου TDS 7254B

Κανάλια εισόδου	4
Εύρος ζώνης	2.5 GHz
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	130 ps
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	83 ps
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 2\% + (2\% * \text{offset})$
Σύζευξη εισόδου	DC, GND
Αντίσταση εισόδου	$50 \Omega \pm 2.5\%$
Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω	2 mV/div – 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bits
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	$<1 V_{\text{RMS}}$ για $r < 100 \text{ mV/div}$, $<5 V_{\text{RMS}}$ για $r \geq 100 \text{ mV/div}$
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας CH1	20 GS/s
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας CH2	10 GS/s
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας CH3	5 GS/s
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας CH4	1 GS/s

4.1.6 Πακέτο φερριτών

Οι φερρίτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία περιέχονταν στο πακέτο Greatest Hits Kit της εταιρείας Fair Rite. Στο συγκεκριμένο πακέτο περιλαμβάνονταν φερρίτες από 4 διαφορετικά υλικά:

- Material 31
- Material 44
- Material 61
- Material 75

Η κασετίνα κάθε υλικού περιείχε 6 διαφορετικούς σφιγκτήρες φερρίτη. Παρατίθεται συνοπτικός πίνακας με όλους τους φερρίτες που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.3 Πίνακας των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία

Υλικό	Part Number	Μέγιστη εσωτερική διάμετρος καλωδίου
Material 31 (1MHz – 300MHz)	0431164951	4.90 mm
	0431164281	6.30 mm
	0431178281	6.30 mm
	0431167281	9.85 mm
	0431164181	12.75 mm
	0431176451	18.0 mm
Material 44 (25MHz – 300MHz)	0444164951	4.90 mm
	0444164281	6.30 mm
	0444178281	6.30 mm
	0444167281	6.30 mm
	0444164181	12.75 mm
	0444176451	18.0 mm
Material 61 (200MHz – 1GHz)	0461164951	4.90 mm
	0461164281	6.30 mm
	0461178281	9.85 mm
	0461167281	9.85 mm
	0461164181	12.75 mm
	0461176451	18.0 mm
Material 75 (150kHz – 10MHz)	0475181651	4.90 mm
	0475164281	6.30 mm
	0475178281	8.70 mm
	0475167281	9.85 mm
	0475164181	12.75 mm
	0475176451	18.0 mm

4.2 Η πειραματική διάταξη

Η κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης τοποθετούνταν πάνω σε μια ξύλινη βάση και δενόταν σε αυτή έτσι ώστε να είναι σταθερή. Πραγματοποιήθηκαν μόνο εκφορτίσεις «επαφής» και κατά συνέπεια χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο – ακίδα για ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξ επαφής. Το καλώδιο επιστροφής πάντα συνέδεε τη γεννήτρια με το σταθερό σημείο γείωσης στο τοίχωμα του κλωβού Faraday, ενώ η διάταξη του στο χώρο ήταν πάντοτε τριγωνική, δηλαδή τραβώντας το καλώδιο από το μέσο του προς τα πίσω, όπως ακριβώς προβλέπει το Πρότυπο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ισοσκελές τρίγωνο. Η ακίδα του «πιστολιού» ερχόταν σε επαφή με τον ομοαξονικό μετατροπέα, ο οποίος ήταν τοποθετημένος στα τοιχώματα του κλωβού πάνω από το σταθερό σημείο γείωσης. Ο ομοαξονικός μετατροπέας μέσω του ομοαξονικού καλωδίου υψηλής συχνότητας συνδεόταν στον παλμογράφο, όπου και απεικονίζονταν οι κυματομορφές. Εσωτερικά του κλωβού με τη βοήθεια του παλμογράφου αποθηκεύονταν οι παραγόμενες κυματομορφές σε δύο τύπους αρχείων η κάθε μια. Ο ένας τύπος αρχείου ήταν φιλικός προς το λειτουργικό περιβάλλον MATLAB και είχε την κατάληξη .dat, ενώ ο δεύτερος τύπος αρχείου είχε την κατάληξη .csv.



Σχήμα 4.1 Η πειραματική διάταξη

4.3 Στάδια μετρήσεων

Στο πρώτο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια DITO ρυθμισμένη σε εξ επαφής εκφόρτιση με επίπεδο τάσης τα +4kV. Το καλώδιο επιστροφής ήταν αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας. Αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις χωρίς την εφαρμογή ferrite clamp και στην συνέχεια

τοποθετήθηκαν φερρίτες στο άκρο του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος που συνδέεται με το σταθερό σημείο γείωσης. Για κάθε σφικκτήρα φερρίτη πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για μία έως τρεις σπείρες, όπου αυτό ήταν εφικτό. Στους σφικκτῆρες μικρῆς εσωτερικῆς διαμέτρου το καλώδιο επιστροφῆς χωρούσε μόνο μια φορά και ως εκ τούτου ελήφθησαν μετρήσεις με μόνο μια σπείρα περιέλιξης. Σε φερρίτες μεσαίας εσωτερικῆς διαμέτρου λάβαμε μετρήσεις για μια και για δύο περιελίξεις του καλωδίου, ενώ σε φερρίτες μεγάλης εσωτερικῆς διαμέτρου λάβαμε μετρήσεις για έως και τρεις περιελίξεις – σπείρες του καλωδίου επιστροφῆς.

Στο δεύτερο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια DITO ρυθμισμένη σε εξ επαφῆς εκφόρτιση με επίπεδο τάσης τα +8kV. Το καλώδιο επιστροφῆς ἦταν αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας. Αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις χωρίς την εφαρμογή ferrite clamp και στην συνέχεια τοποθετήθηκαν φερρίτες στο άκρο του καλωδίου επιστροφῆς του ρεύματος που συνδέεται με το σταθερό σημείο γείωσης. Για κάθε σφικκτῆρα φερρίτη πήραμε μετρήσεις για μια μόνο περιέλιξη του καλωδίου.

Στο τρίτο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια DITO ρυθμισμένη σε εξ επαφῆς εκφόρτιση με επίπεδο τάσης τα +4kV. Το καλώδιο επιστροφῆς που επιλέχθηκε σε αυτό το στάδιο δεν ἦταν αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας. Επιλέξαμε καλώδια παρόμοιας διατομῆς 2.5mm^2 με αυτό του καλωδίου επιστροφῆς ρεύματος από τον κατασκευαστή, αλλά με μήκη 2.5m και 3m. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χωρίς φερρίτες και με τα δύο καλώδια. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν δύο φερρίτες από κάθε υλικό, οι οποίοι εφαρμόστηκαν στο άκρο του καλωδίου που συνδέεται με το σταθερό σημείο γείωσης. Ελήφθησαν μετρήσεις για μια μόνο περιέλιξη του καλωδίου σε κάθε φερρίτη.

Στο τέταρτο στάδιο μετρήσεων πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια DITO ρυθμισμένη σε εξ επαφῆς εκφόρτιση με επίπεδο τάσης τα +4kV. Το καλώδιο επιστροφῆς που επιλέχθηκε σε αυτό το στάδιο δεν ἦταν αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας. Επιλέξαμε καλώδια παρόμοιου μήκους αλλά διαφορετικῆς πάχους. Το πρώτο είχε επιφάνεια διατομῆς 1.5mm^2 και το δεύτερο είχε επιφάνεια διατομῆς 4mm^2 . Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χωρίς φερρίτες και με τα δύο καλώδια. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν δύο φερρίτες από κάθε υλικό οι οποίοι εφαρμόστηκαν στο άκρο του καλωδίου που συνδέεται με το σταθερό σημείο γείωσης. Ελήφθησαν μετρήσεις για μια μόνο περιέλιξη του καλωδίου σε κάθε φερρίτη.

Στο πέμπτο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια DITO ρυθμισμένη σε εξ επαφῆς εκφόρτιση με επίπεδο τάσης τα +4kV. Το καλώδιο επιστροφῆς ἦταν αυτό που δίνεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας. Οι μετρήσεις χωρίς φερρίτη είχαν ληφθεί από το πρώτο στάδιο του πειράματος, ὁπότε πραγματοποιήσαμε δοκιμές με δύο φερρίτες από κάθε υλικό. Αυτοί οι φερρίτες τοποθετήθηκαν στο πρώτο σετ μετρήσεων στο άκρο του καλωδίου επιστροφῆς του ρεύματος που συνδέεται με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικῶν εκφορτίσεων, ενώ στο

δεύτερο σετ μετρήσεων οι φερρίτες εφαρμόστηκαν στο μέσο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Ελήφθησαν μετρήσεις για μια μόνο περιέλιξη του καλωδίου σε κάθε φερρίτη.

Στο έκτο και τελευταίο στάδιο του πειράματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438, ρυθμισμένες σε εξ επαφής εκφόρτιση με επίπεδο τάσης +4kV. Τα καλώδια επιστροφής που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε ήταν που δίνονται από τον κατασκευαστή για το αντίστοιχο μοντέλο. Αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις χωρίς την εφαρμογή φερριτών. Στην συνέχεια επιλέχθηκε ένας φερρίτης από κάθε υλικό, οποίος τοποθετήθηκε στο άκρο του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος που συνδέεται με το σταθερό σημείο γείωσης και πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές. Ελήφθησαν μετρήσεις για μια μόνο περιέλιξη του καλωδίου σε κάθε φερρίτη.

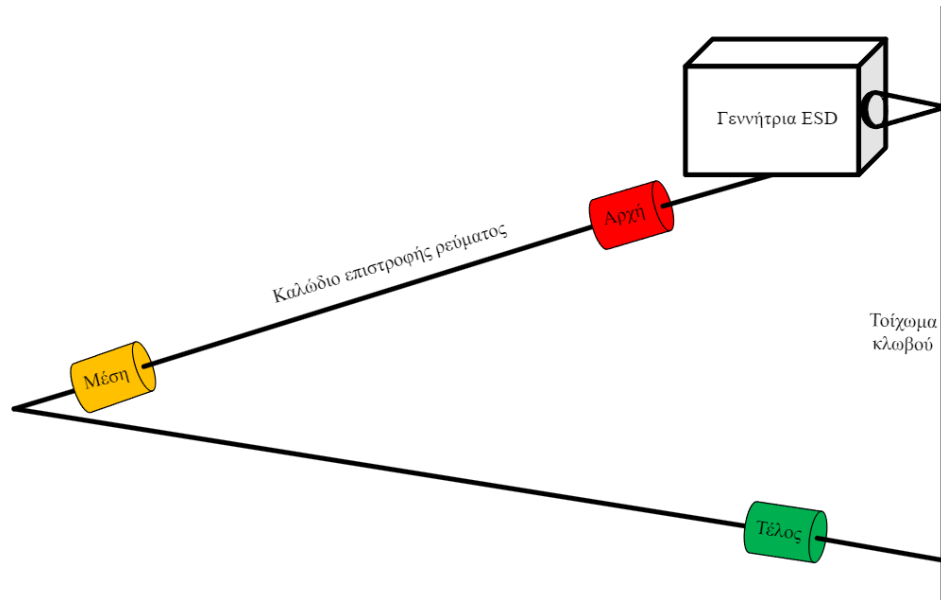
Σε κάθε στάδιο μεταβαλλόταν μια παράμετρος ελέγχου ενώ οι υπόλοιπες διατηρούνταν σταθερές. Στο τελευταίο στάδιο με την αλλαγή της γεννήτριας επιλέξαμε να διατηρήσουμε και το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος που συνοδεύει την κάθε γεννήτρια από τον κατασκευαστή της.

Πίνακας 4.4 Συνοπτικός πίνακας παρουσίασης των σταδίων του πειράματος

Στάδιο	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ
Γεννήτρια	DITO	DITO	DITO	DITO	DITO	NSG-433 NSG-438
Επίπεδο τάσης (kV)	+4	+8	+4	+4	+4	+4
Καλώδιο κατασκευαστή	NAI	NAI	OXI	OXI	NAI	NAI
Μήκος καλωδίου (m)	2.13	2.13	2.13	2.5, 3	2.13	-
Διατομής καλωδίου (mm ²)	2.5	2.5	1.5, 4	2.5	2.5	-
Θέση εφαρμογής φερρίτη	ΤΕΛΟΣ	ΤΕΛΟΣ	ΤΕΛΟΣ	ΤΕΛΟΣ	ΑΡΧΗ , ΜΕΣΗ	ΤΕΛΟΣ
Αριθμός φερριτών ανά υλικό (N)	6	6	2	2	2	1
Πολλαπλότητα Σπειρών (N)	Μέγιστη δυνατή 1 - 3	1	1	1	1	1

Σημειώνεται ότι ως «αρχή» αναφέρεται στον Πίνακα 4.4 η τοποθέτηση – εφαρμογή του φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που είναι συνδεδεμένο με την γεννήτρια. Ως «μέσο»

αναφέρεται η εφαρμογή του φερρίτη στο μέσο του καλωδίου, ενώ ως «τέλος» θεωρείται η τοποθέτηση του φερρίτη στο άκρο του καλωδίου που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης, κάτω από τον στόχο και επί των τοιχωμάτων του κλωβού Faraday όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.2 Διαφορετικές θέσεις εφαρμογής φερρίτη επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος

Για κάθε διαφορετικό συνδυασμό ελήφθησαν 10 – 15 ξεχωριστές μετρήσεις (εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν οι δέκα).

4.4 Αποτελέσματα μετρήσεων – ως προς παραμέτρους ελέγχου

4.4.1 Πρώτη φάση επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των μετρήσεων από τις κυματομορφές που προέκυψαν από τις δοκιμές και αποθηκεύτηκαν μέσω του παλμογράφου, 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 συγκεντρώσουμε πέντε παραμέτρους ενδιαφέροντος – ελέγχου από την κάθε κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης.

Οι πέντε παράμετροι πηγάζουν από την ισχύουσα έκδοση του Προτύπου αλλά και από τη νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του που έχει προταθεί [28][29] και είναι οι εξής:

1. I_{peak} ή I_{max}
2. T_{rise}
3. I_{peak2}
4. I_{30}
5. I_{60}

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το πρόγραμμα σε MATLAB:

```
clc;
close all;
clear all;
str00=['*****'];
str000=['*****'];
disp(str00);
disp(str000);
T1=-4;
T2=160;
rep=0;
FACTOR=10.0000;
Vector=[];
```

Εισάγουμε το επίπεδο τάσης στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή και το πλήθος των κυματομορφών που θα επεξεργαστούμε.

```
for gg = [4]
qq1='P0';
qq2=gg;
qq4=int2str(qq2);
qq3='_';
qq5='10';
NAME_OF_LAST=[qq5];
PRE_NAME=NAME_OF_LAST(1:length(NAME_OF_LAST)-2);
CROWD_OF_MEASUREMENTS=str2num(qq5);
HOW_MANY=str2num(qq5);
for i=1:HOW_MANY
    string1='D:\FAIR RITE\MONO DAT\ref__438\';
    string2=PRE_NAME;
    string3=int2str(i);
    string4='.dat';
    str=[string1 string2 string3 string4];
    TEMPORARY=load (str, 'v1');
    timens=(-79:3120)*50e-3;
    amplitude=TEMPORARY(:,1);
    amplitude10=amplitude*FACTOR;
```

Εύρεση του ρεύματος πρώτης κορυφής:

```
Ip=max(amplitude10);
Ipdiv10=Ip/10;
Ip09=Ip*0.9;
```

Έλεγχος ορθότητας δεδομένων

```

n1=length(amplitude10);
n2=length(timens);
if (n1~=n2)
    str1=['Anantistixia dedomenwn'];
    disp(str1);
else

```

Στην περίπτωση που τα δεδομένα είναι σωστά προχωράει στην εύρεση του χρόνου για τον οποίο το ρεύμα είναι για πρώτη φορά ίσο με το 10% της μέγιστης τιμής του. Συγκεκριμένα βρίσκει τον χρόνο για τον οποίο το ρεύμα ξεπερνάει σε τιμή το 10% του ρεύματος κορυφής και τον αμέσως προηγούμενο χρόνο από αυτόν και εφαρμόζει γραμμική παρεμβολή για την εύρεση του σωστού χρόνου.

```

n=n1;
k=1;
while (amplitude10(k)<Ipdiv10)
    k = k+1;
end
k10plus=k;
k10minus=k-1;
klisi1=(amplitude10(k10plus) - amplitude10(k10minus)) / (timens(k10plus) -
timens(k10minus));
time10amp=timens(k10minus) + ( Ipdiv10-amplitude10(k10minus))/klisi1;

```

Εύρεση των υπόλοιπων χρονικών στιγμών ενδιαφέροντος με βάση τον χρόνο για τον οποίο $I = 10\% I_{peak}$

```

time30ns= time10amp + 30;
time60ns= time10amp + 60;
time10ns= time10amp + 10;
time40ns= time10amp + 40;
[r10ns]=find(timens>time10ns,1);
[r40ns]=find(timens>time40ns,1);
PEAK2=max(amplitude10(r10ns:r40ns));

```

Εύρεση του I_{30}

```

i=1;
while (timens(i)<time30ns)
    i=i+1;
end
i_30nsplus=i;
i_30nsminus=i-1;

```

Εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής για την εύρεση της τιμής I_{30}

```
klisi2=(amplitude10(i_30nsplus) - amplitude10(i_30nsminus)) /  
(timens(i_30nsplus) - timens(i_30nsminus));  
amplitude10_30ns= klisi2 * (time30ns-timens(i_30nsminus))+  
amplitude10(i_30nsminus);
```

Εύρεση του I_{60}

```
i=1;  
while (timens(i)<time60ns)  
    i=i+1;  
end  
i_60nsplus=i;  
i_60nsminus=i-1;
```

Εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής για την εύρεση της τιμής I_{60}

```
klisi3=(amplitude10(i_60nsplus) - amplitude10(i_60nsminus)) /  
(timens(i_60nsplus) - timens(i_60nsminus));  
amplitude10_60ns= klisi3 * (time60ns-timens(i_60nsminus))+  
amplitude10(i_60nsminus);
```

Ομοίως βρίσκει τον χρόνο για τον οποίο το ρεύμα ξεπερνάει σε τιμή το 90% του ρεύματος κορυφής και τον αμέσως προηγούμενο χρόνο από αυτόν και εφαρμόζει γραμμική παρεμβολή για την εύρεση του σωστού χρόνου.

```
k=1;  
while (amplitude10(k)<Ip09)  
    k = k+1;  
end  
k90plus=k;  
k90minus=k-1;  
klisi4=(amplitude10(k90plus) - amplitude10(k90minus)) / (timens(k90plus) -  
timens(k90minus));  
time90amp=timens(k90minus) + ( Ip09 - amplitude10(k90minus))/klisi4;
```

Υπολογισμός του χρόνου ανόδου.

```
rise_time= time90amp - time10amp;  
end  
Vector=[Vector' [Ip PEAK2 rise_time amplitude10_30ns amplitude10_60ns]]' ;  
end
```

Παρουσίαση όλων παραμέτρων ενδιαφέροντος για όλες τις κυματομορφές που δόθηκαν ως δεδομένα

```
string_disp=['These are the measurements of Imax, Ip2, Rise Time, I30 and I60, for  
CHARGING VOLTAGE ' NAME_OF_LAST() ' kV'];  
disp(string_disp)  
disp(' ')  
disp(Vector(1+rep:10+rep,1:5))  
rep=rep+10;  
end
```

4.4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων μετά την πρώτη επεξεργασία

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν σε μορφή πινάκων τα αποτελέσματα του πειράματος σε στάδια. Θα δοθούν σε κάθε στάδιο οι τιμές αναφοράς και το αποτελέσματα για κάθε φερρίτη ως προς τις παραμέτρους ελέγχου.

Το πρόγραμμα της *Matlab* όπως έχει εξηγηθεί είχε ως είσοδο δέκα αρχεία. Το κάθε ένα από αυτά τα αρχεία εμπεριείχε μια κυματομορφή που προέκυπτε από μια μεμονωμένη εκφόρτιση. Κάθε δεκάδα περιείχε κυματομορφές που ελήφθησαν για την ίδια διάταξη δηλαδή, ίδια γεννήτρια, ίδιο επίπεδο τάσης εκφόρτισης, ίδιο καλώδιο επιστροφής ρεύματος, ίδιο φερρίτη αν υπήρχε τοποθετημένος, σε ίδια θέση και με ίδιο αριθμό περιελίξεων του καλωδίου. Στην αρχή λαμβάνονταν πάντα μετρήσεις αναφοράς, δηλαδή χωρίς κανέναν φερρίτη τοποθετημένο στο καλώδιο. Στην έξοδο του μας παρείχε τις πέντε παραμέτρους ενδιαφέροντος που έχουν αναφερθεί για κάθε μια κυματομορφή. Με αυτές τις δέκα πεντάδες παραμέτρων υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε παράμετρο.

Στο πρώτο στάδιο μετρήσεων κάθε μέρα πραγματοποιούσαμε δέκα μετρήσεις για την διάταξη χωρίς να τοποθετήσουμε φερρίτη επί του καλωδίου. Το πρώτο στάδιο διήρκεσε τρεις ημέρες. Συνεπώς οι τρεις διαφορετικές πεντάδες παραμέτρων οι οποίες προέκυψαν από τριάντα διαφορετικές μετρήσεις, χωρισμένες ανά δέκα για κάθε μέρα δοκιμών. Η κάθε παράμετρος των πεντάδων αυτών αποτελεί τη τιμή αναφοράς για τις δοκιμές της ίδιας διάταξης που έγιναν εκείνη την ημέρα. Στον Πίνακα 4.5 δίνονται οι τιμές αναφορές για το πρώτο στάδιο του πειράματος.

Πίνακας 4.5 Τιμές αναφοράς παραμέτρων πρώτου σταδίου πειράματος

	I _{max}	I _{p2}	Rise Time	I ₃₀	I ₆₀
ημέρα 1	14.32	13.70	0.87	8.26	2.99
ημέρα 2	14.10	13.28	0.87	8.25	3.01
ημέρα 3	14.26	13.65	0.87	8.60	3.12

Παρατηρούμε ότι και τις τρεις ημέρες η παράμετρος, I_{peak2} , που εισάγεται από τη νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου είναι εκτός προδιαγραφών. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται με έντονα κόκκινα γράμματα. Από εδώ και στο εξής σε όλους τους

Πίνακες που ακολουθούν με έντονα κόκκινα γράμματα θα εμφανίζονται οι παράμετροι που βγαίνουν εκτός προδιαγραφών και για τις δύο εκδόσεις του Προτύπου. Ακόμη θα εμφανίζεται με έντονα κόκκινα γράμματα ο αριθμός προϊόντος του φερρίτη, αν στα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του, μια τουλάχιστον παράμετρος δεν βρίσκεται εντός των ορίων του Προτύπου. Στις περιπτώσεις όπου μόνο το I_{30} βρίσκεται εκτός ορίων, όπου τότε ο αριθμός προϊόντος απλά θα υπογραμμίζεται. Στο πρώτο στάδιο αυτές οι μορφοποιήσεις κειμένου θα γίνονται στον αριθμό των σπειρών.

Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα πρώτου σταδίου πειράματος

			lmax		lp2		t Rise		I ₃₀		I ₆₀	
			value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%
31	0431164181	n=1	14.20	-0.84	9.02	-34.11	0.87	0.25	7.21	-12.67	4.06	36.15
		n=2	14.06	-1.79	5.74	-58.12	0.87	0.38	4.74	-42.59	4.62	54.76
		n=3	14.06	-1.84	5.30	-61.33	0.87	0.12	3.52	-57.35	3.57	19.64
	0431164281	n=1	14.30	-0.17	8.78	-35.92	0.87	0.33	7.01	-15.08	4.34	45.47
		n=2	14.34	0.17	11.22	-18.11	0.87	0.34	8.79	6.41	3.82	28.02
	0431164951	n=1	14.09	-1.62	8.77	-35.98	0.87	0.56	7.03	-14.87	4.06	35.99
	0431167281	n=1	14.22	-0.67	9.28	-32.24	0.87	0.08	7.20	-12.81	3.99	33.74
		n=2	14.07	-1.73	5.86	-57.24	0.87	0.55	4.67	-43.45	4.94	65.49
	0431176451	n=1	14.42	0.67	8.31	-39.31	0.87	0.22	6.97	-15.59	4.44	48.80
		n=2	14.43	0.78	5.87	-57.13	0.87	0.34	4.49	-45.67	4.35	45.56
		n=3	14.52	1.40	5.31	-61.21	0.87	0.51	3.34	-59.57	3.05	2.15
	0431178281	n=1	14.14	-1.28	9.41	-31.31	0.87	-0.11	7.23	-12.46	4.01	34.15
		n=2	14.16	-1.12	7.46	-45.50	0.87	0.43	6.30	-23.72	5.47	83.21
44	0444164181	n=1	13.97	-0.91	9.23	-30.48	0.86	-0.74	7.42	-10.10	4.11	36.61
		n=2	14.07	-0.17	6.41	-51.75	0.87	-0.18	5.24	-36.49	4.83	60.57
		n=3	14.50	2.84	5.31	-60.00	0.86	-0.74	3.77	-54.31	4.35	44.65
	0444164281	n=1	14.12	-1.40	8.66	-36.80	0.87	0.35	6.98	-15.48	4.25	42.39
		n=2	14.10	-1.51	10.82	-21.03	0.86	-0.34	8.58	3.91	3.78	26.61
	0444164951	n=1	14.23	-0.61	9.37	-31.60	0.87	0.73	7.47	-9.54	4.14	38.58
	0444167281	n=1	14.58	1.84	9.81	-28.39	0.87	0.65	7.66	-7.24	4.10	37.41
		n=2	14.36	0.28	6.48	-52.69	0.87	0.47	5.48	-33.69	5.37	79.72
	0444176451	n=1	14.47	2.67	8.60	-35.24	0.87	-0.54	7.16	-13.25	4.60	53.00
		n=2	14.41	2.21	5.49	-58.67	0.86	-1.00	4.40	-46.64	4.54	51.13
		n=3	14.51	2.95	5.17	-61.08	0.87	-0.23	3.22	-60.98	3.17	5.45
	0444178281	n=1	14.41	0.61	9.65	-29.56	0.87	0.54	7.52	-8.95	4.12	38.01
		n=2	13.98	-2.35	6.18	-54.91	0.86	-0.31	5.10	-38.27	5.29	77.17
61	0461164181	n=1	14.25	1.08	10.82	-18.49	0.87	-0.22	8.14	-1.29	3.72	23.77
		n=2	14.36	1.87	7.86	-40.84	0.87	-0.02	6.48	-21.49	5.26	74.89
		n=3	14.45	2.50	6.15	-53.67	0.87	-0.07	5.25	-36.33	5.43	80.62
	0461164281	n=1	14.40	2.16	10.74	-19.10	0.87	-0.03	8.16	-1.02	3.81	26.71
		n=2	14.38	1.99	11.57	-12.89	0.87	-0.52	8.91	8.05	3.13	4.07
	0461164951	n=1	14.38	2.04	10.80	-18.67	0.87	-0.04	8.12	-1.54	3.70	23.07
	0461167281	n=1	14.42	2.27	11.05	-16.81	0.87	-0.08	8.40	1.81	3.65	21.38
		n=2	14.42	2.33	8.11	-38.92	0.87	-0.10	6.80	-17.57	5.20	72.90
	0461176451	n=1	14.41	2.21	10.86	-18.19	0.87	-0.06	8.93	8.26	3.64	21.19
		n=2	14.26	1.14	8.30	-37.53	0.87	-0.56	7.26	-12.01	6.22	106.91
		n=3	14.38	2.04	10.70	-19.46	0.87	0.44	8.82	6.96	3.77	25.44
	0461178281	n=1	14.32	1.59	11.01	-17.11	0.87	-0.18	8.26	0.12	3.71	23.29
		n=2	14.26	1.19	8.22	-38.07	0.87	-0.40	6.71	-18.71	4.99	65.85
75	0475164181	n=1	14.26	-0.06	11.91	-12.72	0.87	0.24	7.42	-13.74	3.20	2.66
		n=2	14.40	0.95	8.84	-35.23	0.87	0.59	5.51	-35.98	3.10	-0.70
		n=3	14.34	0.56	6.42	-52.99	0.87	0.22	4.02	-53.23	2.79	-10.66
	0475164281	n=1	14.45	1.29	10.90	-20.11	0.87	0.07	6.69	-22.16	3.40	9.09
		n=2	14.44	1.23	7.34	-46.19	0.87	0.02	5.61	-34.78	4.86	55.97
	0475181651	n=1	14.39	0.90	11.43	-16.24	0.87	0.37	7.16	-16.76	3.81	22.19
	0475167281	n=1	14.35	0.62	11.37	-16.71	0.87	0.51	7.17	-16.62	3.21	3.10
		n=2	14.42	1.12	8.10	-40.68	0.87	0.10	4.94	-42.53	3.13	0.47
	0475176451	n=1	14.22	-0.34	11.44	-16.18	0.87	0.49	7.12	-17.23	3.09	-0.99
		n=2	14.14	-0.84	8.06	-40.91	0.87	0.29	4.89	-43.18	2.93	-6.02
		n=3	14.30	0.22	6.25	-54.22	0.87	0.24	3.25	-62.18	2.41	-22.67
	0475178281	n=1	14.22	-0.28	11.50	-15.77	0.87	-0.15	7.09	-17.50	3.37	8.20
		n=2	14.46	1.35	7.90	-42.15	0.87	0.78	4.96	-42.35	3.29	5.47

Στο σχήμα δίνονται οι παράμετροι ελέγχου για ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξ επαφής με την γεννήτρια DITO, σε επίπεδο τάσης +4kV, με καλώδιο επιστροφής αυτό του κατασκευαστή, φερρίτες τοποθετημένους στο άκρο που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης. Φαίνεται το υλικό – Material του κάθε φερρίτη, ο αριθμός προϊόντος του και ο αριθμός των σπειρών του καλωδίου επιστροφής εντός του πυρήνα (n). Για κάθε μεταβλητή δίνεται η τιμή της (value) καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με την τιμή αναφοράς (DIFF%). Η προαναφερθείσα λογική απεικόνισης εφαρμόζεται σε όλα τα παρόμοια σχήματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Παρατηρούμε τα εξής:

- Για αριθμό σπειρών $n=1$ μόνο ο φερρίτης 0475164181 βγαίνει εκτός προδιαγραφών στην πλέον σημαντική παράμετρο το I_{peak2} .
- Η εφαρμογή φερρίτη επηρεάζει τις τιμές του I_{peak2} πτωτικά σε όλες τις περιπτώσεις, τις τιμές του I_{60} ανοδικά στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, ενώ το I_{30} πτωτικά στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων.
- Για αριθμό σπειρών μεγαλύτερο της μιας $N>1$ αρκετοί φερρίτες περιορίζουν υπερβολικά τις παραμέτρους I_{peak2} και I_{30} με αποτέλεσμα η γεννήτρια DITO να τίθεται εκτός ορίων προδιαγραφών.
- Η τιμή της πρώτης κορυφής μένει σχεδόν ανεπηρέαστη από την εφαρμογή φερρίτη, η μεταβολή της οποίας είναι μικρότερη του $\pm 3\%$ από την τιμή αναφοράς.
- Ανεπηρέαστος από την εφαρμογή φερρίτη σε όλες τις περιπτώσεις είναι ο χρόνος ανόδου.

Στο δεύτερο στάδιο μετρήσεων κάθε μέρα πραγματοποιούσαμε δέκα μετρήσεις για την διάταξη χωρίς να τοποθετήσουμε φερρίτη επί του καλωδίου. Το δεύτερο στάδιο διήρκησε δύο ημέρες. Συνεπώς διαμορφώθηκαν δύο διαφορετικές πεντάδες αναφοράς παραμέτρων, οι οποίες προέκυψαν από είκοσι διαφορετικές μετρήσεις, χωρισμένες ανά δέκα για κάθε μέρα δοκιμών. Η κάθε παράμετρος των πεντάδων αυτών αποτελεί τη τιμή αναφοράς για τις δοκιμές των διαφορετικών διατάξεων που έγιναν την αντίστοιχη ημέρα. Στο Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές αναφοράς για το δεύτερο στάδιο του πειράματος.

Πίνακας 4.7 Τιμές αναφοράς παραμέτρων δεύτερου σταδίου πειράματος

	I_{max}	I_{p2}	Rise Time	I_{30}	I_{60}
ημέρα 1	28.76	27.98	0.88	18.37	5.81
ημέρα 2	28.66	28.24	0.88	17.62	5.43

Παρατηρούμε ότι η γεννήτρια βρίσκεται εκτός προδιαγραφών την πρώτη μέρα λόγω της παραμέτρου I_{peak2} , ενώ την δεύτερη μέρα εκτός τίθεται εξαιτίας και της I_{60} . Όπως έχει αναφερθεί στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκαν εξ επαφής εκφορτίσεις με

χρήση της γεννήτριας DITO, σε επίπεδο τάσης +8kV, με καλώδιο επιστροφής αυτό του κατασκευαστή, φερρίτες τοποθετημένους στο άκρο που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης, με όλους τους φερρίτες κάθε υλικού, αλλά για μία μόνο σπείρα. Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου σταδίου. Παρατηρούμε σχεδόν όλοι οι φερρίτες του Material 75 δεν καταστέλλουν αρκετά το I_{peak2} με αποτέλεσμα η γεννήτρια να τίθεται εκτός των προδιαγραφών της νέας, υπό αναθεώρησης, έκδοσης του Προτύπου [29].

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα δεύτερου σταδίου πειράματος

		I _{max}		I _{p2}		t Rise		I ₃₀		I ₆₀	
		value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%
31	0431164181	28.56	-0.70	19.40	-30.66	0.89	0.50	15.34	-16.46	8.31	43.04
	0431164281	28.52	-0.83	20.16	-27.95	0.89	0.51	16.75	-8.80	8.14	40.13
	0431164951	28.56	-0.70	20.88	-25.38	0.89	0.58	17.38	-5.38	7.84	34.85
	0431167281	28.82	0.21	19.90	-28.88	0.89	0.40	16.07	-12.51	8.24	41.88
	0431176451	28.52	-0.83	17.80	-36.38	0.88	0.35	14.54	-20.83	8.83	51.96
	0431178281	28.60	-0.56	20.54	-26.59	0.88	0.03	16.53	-10.01	7.95	36.89
44	0431164181	28.48	-0.97	19.92	-28.81	0.88	-0.01	15.80	-13.97	8.21	41.29
	0431164281	28.50	-0.90	19.74	-29.45	0.89	0.43	16.66	-9.32	8.23	41.72
	0431164951	28.56	-0.70	21.80	-22.09	0.88	0.24	17.42	-5.18	7.55	29.99
	0431167281	28.50	-0.90	21.12	-24.52	0.88	-0.12	16.53	-10.00	7.81	34.48
	0431176451	28.62	-0.49	18.74	-33.02	0.88	-0.42	15.47	-15.77	9.45	62.65
	0431178281	28.32	-1.53	21.62	-22.73	0.88	-0.13	17.00	-7.44	7.50	29.12
61	0431164181	28.54	-0.42	22.66	-19.76	0.88	0.04	17.12	-2.81	7.27	33.86
	0431164281	28.70	0.14	23.16	-17.99	0.88	0.08	17.54	-0.46	6.86	26.14
	0431164951	28.50	-0.56	23.54	-16.64	0.88	-0.70	17.72	0.55	6.64	22.21
	0431167281	28.94	0.98	23.20	-17.85	0.88	-0.60	17.52	-0.57	7.27	33.72
	0431176451	28.54	-0.42	22.72	-19.55	0.88	0.12	18.38	4.29	7.83	44.12
	0431178281	28.76	0.35	23.40	-17.14	0.88	-0.08	17.37	-1.42	6.79	24.99
75	0431164181	28.42	-0.84	24.92	-11.76	0.89	0.63	15.45	-12.30	5.93	9.14
	0431164281	28.54	-0.42	23.36	-17.28	0.89	0.19	14.49	-17.75	6.31	16.09
	0431181651	28.50	-0.56	24.58	-12.96	0.88	-0.11	15.48	-12.12	7.15	31.53
	0431167281	28.62	-0.14	24.46	-13.39	0.89	0.31	15.07	-14.47	6.06	11.52
	0431176451	28.14	-1.81	23.70	-16.08	0.88	-0.22	14.98	-14.99	5.85	7.57
	0431178281	28.60	-0.21	24.42	-13.53	0.88	-0.63	14.94	-15.21	6.16	13.33

Στο τρίτο στάδιο του πειράματος δεν χρησιμοποιήθηκε το καλώδιο που συνοδεύει την γεννήτρια DITO από τον κατασκευαστή. Αντ' αυτού χρησιμοποιήσαμε καλώδιο ίδιου ακριβώς μήκους, αλλά διαφορετικής διαμέτρου. Για κάθε καλώδιο πραγματοποιήσαμε δέκα εκφορτίσεις χωρίς να τοποθετήσουμε φερρίτη επί του καλωδίου. Ο μέσος όρος κάθε παραμέτρου δίνεται στον Πίνακα 4.9 και αποτελεί την τιμή αναφοράς της παραμέτρου για την συγκεκριμένη διάταξη.

Πίνακας 4.9 Τιμές αναφοράς παραμέτρων τρίτου σταδίου πειράματος

	I _{max}	I _{p2}	Rise Time	I ₃₀	I ₆₀
Πάχος καλωδίου 1.5mm ²	14.18	13.40	0.87	8.72	3.09
Πάχος καλωδίου 4mm ²	13.92	13.24	0.87	8.47	2.65

Παρατηρούμε ότι με την χρήση του καλωδίου πάχους 1.5mm^2 η γεννήτρια τίθεται εκτός προδιαγραφών εξαιτίας της παραμέτρου $I_{\text{peak}2}$. Η γεννήτρια τίθεται εκτός προδιαγραφών εξαιτίας δύο παραμέτρων όταν κάνουμε χρήση του καλωδίου πάχους 4mm^2 .

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του τρίτου σταδίου και βλέπουμε πως για τους δύο φερρίτες που επιλέχθηκαν από κάθε υλικό και για μια μόνο σπείρα του καλωδίου η γεννήτρια είναι εντός προδιαγραφών σε όλες τις περιπτώσεις μετά την εφαρμογή των φερριτών.

Πίνακας 4.10 Αποτελέσματα τρίτου σταδίου πειράματος

			I _{max}		I _{p2}		t _{Rise}		I ₃₀		I ₆₀	
			value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%
Πάχος καλωδίου 1.5mm^2	31	0431164281	14.10	-0.56	8.81	-34.27	0.87	-0.29	7.35	-15.73	4.45	44.08
		0431164951	14.15	-0.17	8.82	-34.15	0.87	-0.10	7.52	-13.77	4.48	44.98
	44	0444164281	14.18	0.06	8.50	-36.60	0.87	0.42	7.15	-17.98	4.60	48.76
		0444164951	14.18	0.06	9.34	-30.33	0.87	-0.38	7.77	-10.85	4.42	42.93
	61	0461164281	14.14	-0.28	10.50	-21.61	0.87	-0.07	8.31	-4.73	3.95	27.93
		0461164951	14.27	0.68	10.52	-21.49	0.88	0.45	8.34	-4.29	3.88	25.65
	75	0475164281	14.11	-0.45	10.77	-19.64	0.87	-0.12	6.79	-22.14	3.31	7.15
		0475181651	14.09	-0.62	11.35	-15.28	0.87	0.07	7.27	-16.58	3.67	18.77
Πάχος καλωδίου 4mm^2	31	0431164281	14.27	2.53	8.90	-32.75	0.87	-0.27	7.50	-11.43	4.39	65.93
		0431164951	14.33	2.93	8.96	-32.33	0.87	-0.17	7.53	-11.03	4.29	61.91
	44	0444164281	14.19	1.95	8.66	-34.56	0.87	-0.47	7.31	-13.67	4.52	70.62
		0444164951	14.37	3.22	9.48	-28.40	0.87	-0.17	7.92	-6.53	4.24	60.28
	61	0461164281	14.26	2.47	10.69	-19.27	0.87	-0.16	8.54	0.83	3.76	42.18
		0461164951	14.36	3.16	10.76	-18.73	0.87	-0.20	8.51	0.46	3.66	38.30
	75	0475164281	14.39	3.39	11.02	-16.80	0.87	-0.57	6.73	-20.52	3.15	18.95
		0475181651	14.22	2.13	11.46	-13.47	0.87	-0.30	7.32	-13.54	3.51	32.56

Στο τέταρτο στάδιο του πειράματος χρησιμοποιήσαμε καλώδια παρόμοιας διατομής και διαφορετικού μήκους. Τα μήκη τα οποία επιλέχθηκαν βρίσκονται εντός των προδιαγραφών του προτύπου, αλλά χρησιμοποιούνται όταν ελέγχουμε εξοπλισμό ο οποίος είναι εγκατεστημένος και λόγω του όγκου του επιβάλλει τη χρήση καλωδίου μεγαλύτερου μήκους. Όπως βλέπουμε στον Πίνακα 4.11 η νέα παράμετρος ελέγχου θέτει τη γεννήτρια μας εκτός των προδιαγραφών της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου. Σημειώνεται ότι το επίπεδο τάσης είναι τα $+4\text{kV}$.

Πίνακας 4.11 Τιμές αναφοράς τέταρτου σταδίου πειράματος

	I _{max}	I _{p2}	Rise Time	I ₃₀	I ₆₀
Μήκος καλωδίου 2.5m	14.07	12.49	0.87	9.71	3.49
Μήκος καλωδίου 3m	14.65	13.20	0.87	10.19	3.05

Εφαρμόζοντας φερρίτες στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που βρίσκεται συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης, λάβαμε τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12. Παρατηρούμε ότι με την επιλογή και εφαρμογή των συγκεκριμένων φερριτών από κάθε υλικό, η γεννήτρια βρίσκεται από πλευράς κάθε παραμέτρου εντός προδιαγραφών για οποιαδήποτε από τις δύο εκδόσεις του Προτύπου.

Πίνακας 4.12 Αποτελέσματα τέταρτου σταδίου πειράματος

			I _{max}		I _{p2}		t Rise		I ₃₀		I ₆₀	
			value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%
Μήκος καλωδίου 2.5m	31	0431164281	14.02	-0.34	8.58	-31.26	0.87	0.21	7.47	-23.04	4.71	34.97
		0431164951	13.93	-1.02	9.05	-27.55	0.87	-0.35	7.80	-19.65	4.65	33.21
	44	0444164281	13.89	-1.31	8.34	-33.25	0.87	0.08	7.24	-25.41	4.78	36.89
		0444164951	13.98	-0.68	9.06	-27.48	0.87	-0.07	7.91	-18.52	4.67	33.68
	61	0461164281	14.06	-0.11	10.18	-18.51	0.87	0.24	8.75	-9.84	4.41	26.19
		0461164951	13.95	-0.85	10.18	-18.51	0.87	0.10	8.71	-10.29	4.38	25.38
	75	0475164281	14.28	1.48	10.35	-17.10	0.87	0.06	7.63	-21.37	3.62	3.58
		0475181651	14.30	1.59	10.97	-12.17	0.87	0.24	8.21	-15.40	4.02	14.96
Μήκος καλωδίου 3m	31	0431164281	14.12	-3.60	8.38	-36.55	0.87	0.00	7.80	-23.52	4.89	60.22
		0431164951	14.29	-2.46	8.62	-34.67	0.87	0.25	7.86	-22.86	4.89	60.26
	44	0444164281	13.92	-4.97	8.30	-37.15	0.87	0.04	7.66	-24.90	4.87	59.64
		0444164951	13.99	-4.48	8.63	-34.61	0.87	-0.44	8.05	-21.06	5.00	63.82
	61	0461164281	14.44	-1.42	10.02	-24.06	0.87	0.08	9.25	-9.29	4.62	51.37
		0461164951	14.32	-2.24	9.97	-24.48	0.87	-0.25	9.18	-9.93	4.51	47.81
	75	0475164281	14.37	-1.91	10.99	-16.73	0.88	0.55	8.99	-11.76	3.38	10.93
		0475181651	14.50	-0.98	11.34	-14.06	0.87	0.24	9.55	-6.37	3.80	24.58

Στο πέμπτο στάδιο μετρήσεων οι τιμές των παραμέτρων αναφοράς προέκυψαν με διαφορετικό τρόπο. Το στάδιο ένα και το στάδιο πέντε του πειράματος διαφέρουν μόνο ως προς τη θέση εφαρμογής του φερρίτη και στον αριθμό των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν (και στον αριθμό περιελίξεων τους). Ο μέσος όρος των τριάντα συνολικών τιμών κάθε παραμέτρου του πρώτου σταδίου χρησιμοποιήθηκε και θεωρήθηκε ως η τιμή αναφοράς της παραμέτρου για το πέμπτο στάδιο. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.13 η παράμετρος I_{peak2} βρίσκεται εκτός προδιαγραφών της νέας, υπό αναθεώρησης, έκδοσης του Προτύπου.

Πίνακας 4.13 Τιμές αναφοράς πέμπτου σταδίου πειράματος

	I _{max}	I _{p2}	Rise Time	I ₃₀	I ₆₀
Μέσος όρος απο 3 μέρες μετρήσεων σταδίου 1	14.23	13.54	0.87	8.37	3.04

Στον Πίνακα 4.14 βλέπουμε τα αποτελέσματα του πέμπτου σταδίου του πειράματος και παρατηρούμε ότι μόνο για ένα φερρίτη τοποθετημένο στο άκρο του καλωδίου επιστροφής που είναι συνδεδεμένο με τη γεννήτρια η γεννήτρια τίθεται εκτός προδιαγραφών. Σημειώνουμε ότι το ίδιο προϊόν (0475181651) όταν είχε τοποθετηθεί είτε στη μέση του καλωδίου επιστροφής είτε στο άκρο του καλωδίου που ήταν συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης είχε καταστείλει λίγο πιο ικανοποιητικά το I_{peak2} . Τα υλικά 61 και 75 μειώνουν την τιμή του I_{peak2} αλλά η επίδραση των φερριτών των συγκεκριμένων υλικών φαίνεται πως είναι οριακή. Αντιθέτως τα υλικά 31 και 44 αποδίδουν αρκετά καλύτερα. Σημαντική είναι ακόμα και η χαμηλότερη μείωση της παραμέτρου όταν ο φερρίτης εφαρμόζεται στο άκρο του καλωδίου επιστροφής που είναι συνδεδεμένο με την γεννήτρια, σε σχέση με αυτή που εμφανίζεται όταν ο φερρίτης είναι τοποθετημένος στο μέσο της γραμμής. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά των αντίστοιχων φερριτών του πρώτου σταδίου διαπιστώνουμε πως η θέση εφαρμογής που επιφέρει την μεγαλύτερη μείωση στο I_{peak2} είναι αυτή κοντά στο σημείο γείωσης.

Πίνακας 4.14 Αποτελέσματα πέμπτου σταδίου πειράματος

			I _{max}		I _{p2}		t Rise		I ₃₀		I ₆₀	
			value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%
Θέση φερρίτη στο άκρο που συνδέεται με την γεννήτρια ESD	31	0431164281	14.38	1.05	10.14	-25.15	0.87	0.31	7.88	-5.90	4.40	44.80
		0431164951	14.31	0.60	10.58	-21.90	0.88	0.82	7.99	-4.51	4.16	36.96
	44	0444164281	14.38	1.05	9.97	-26.39	0.87	0.29	7.74	-7.52	4.53	49.13
		0444164951	14.28	0.37	10.52	-22.31	0.87	0.80	8.21	-1.95	4.35	43.08
	61	0461164281	14.34	0.77	11.43	-15.58	0.88	0.86	8.67	3.61	3.89	28.07
		0461164951	14.25	0.15	11.38	-15.93	0.87	0.36	8.55	2.10	3.89	28.14
	75	0475164281	14.33	0.71	11.43	-15.58	0.87	0.70	7.13	-14.81	3.39	11.57
		0475181651	14.42	1.33	11.94	-11.80	0.87	0.57	7.48	-10.66	3.77	24.24
Θέση φερρίτη στο μέσο του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος	31	0431164281	13.77	-3.22	8.57	-36.73	0.87	0.46	7.17	-14.37	4.14	36.30
		0431164951	14.20	-0.19	8.93	-34.07	0.87	0.76	7.37	-11.93	4.18	37.52
	44	0444164281	13.98	-1.76	8.50	-37.20	0.87	0.69	7.13	-14.83	4.16	36.92
		0444164951	13.83	-2.77	8.91	-34.19	0.88	0.89	7.46	-10.89	4.10	34.96
	61	0461164281	14.30	0.54	10.25	-24.32	0.88	0.82	8.37	0.07	3.74	23.01
		0461164951	14.14	-0.64	9.94	-26.57	0.87	0.37	8.10	-3.26	3.63	19.50
	75	0475164281	14.32	0.66	10.96	-19.06	0.87	0.57	6.66	-20.39	3.31	9.08
		0475181651	14.28	0.37	11.51	-14.99	0.87	0.56	7.19	-14.05	3.70	21.96

Στον Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων αναφοράς της κάθε γεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε στο έκτο στάδιο. Παρατηρούμε ότι οι δύο γεννήτριες έχουν διαφορετικό χρόνο ανόδου από την DITO που είχε χρησιμοποιηθεί και στα πέντε προηγούμενα στάδια. Η τιμή της νέας παραμέτρου ελέγχου I_{peak2} θέτει την μια από τις δύο γεννήτριες εκτός προδιαγραφών, συγκεκριμένα την NSG-433. Η NSG-438 παρουσιάζει εξ αρχής εξαιρετική απόκριση ως προς όλες τις παραμέτρους.

Πίνακας 4.15 Τιμές αναφοράς έκτου σταδίου πειράματος

	I _{max}	I _{p2}	Rise Time	I ₃₀	I ₆₀
NSG - 433	14.83	12.28	0.73	8.95	4.29
NSG - 438	14.10	8.88	0.85	7.09	3.98

Μετά την εφαρμογή των φερριτών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.16 οι γεννήτριες βρίσκονται εντός ορίων σε όλους τις παραμέτρους ελέγχου.

Πίνακας 4.16 Αποτελέσματα έκτου σταδίου πειράματος

			I _{max}		I _{p2}		t Rise		I ₃₀		I ₆₀	
			value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%	value	DIFF%
NSG - 433	31	0431167281	14.86	0.16	10.48	-14.66	0.74	0.79	8.46	-5.48	4.58	6.66
	44	0444167281	14.93	0.65	10.81	-11.99	0.73	0.06	8.68	-3.09	4.52	5.18
	61	0461167281	14.92	0.59	11.42	-7.04	0.74	0.85	8.98	0.32	4.41	2.73
	75	0475167281	14.86	0.16	11.20	-8.79	0.73	0.75	8.06	-10.00	4.34	1.18
NSG - 438	31	0431164281	14.15	0.34	6.96	-21.62	0.86	1.19	6.35	-10.35	4.56	14.44
	44	0444164281	14.06	-0.34	7.50	-15.50	0.86	1.45	6.83	-3.57	4.66	16.84
	61	0461164281	14.10	0.00	7.88	-11.26	0.88	3.31	7.07	-0.21	4.47	12.16
	75	0475164281	14.01	-0.68	7.43	-16.31	0.86	1.47	5.85	-17.48	3.83	-3.89

4.5 Αποτελέσματα μετρήσεων – σύγκριση κυματομορφών

4.5.1 Δεύτερη φάση επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των μετρήσεων από τις κυματομορφές που προέκυψαν από τις δοκιμές και αποθηκεύτηκαν μέσω του παλμογράφου, 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 δοκιμής καθώς και το φασματικό της περιεχόμενο. Όπως έχει αναφερθεί για κάθε διάταξη πραγματοποιήθηκαν δέκα μετρήσεις και συλλέχθηκαν δέκα ξεχωριστές κυματομορφές. Αποφασίσαμε να εισάγουμε την κυματομορφή της πέμπτης δοκιμής από κάθε ξεχωριστή διάταξη.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το πρόγραμμα σε *Matlab* [45].

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');  
clc;  
close all;  
clear all;
```

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

```
P=cd;  
S = dir(fullfile(P, '*.dat'));  
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;
Ain1=atten*load(x);
time=transpose((0:3199)*50e-12);

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', 1.25);
hold on;
figure (2)
plot(1e9*time,Ain1,'LineWidth', 1.25);
hold on
end

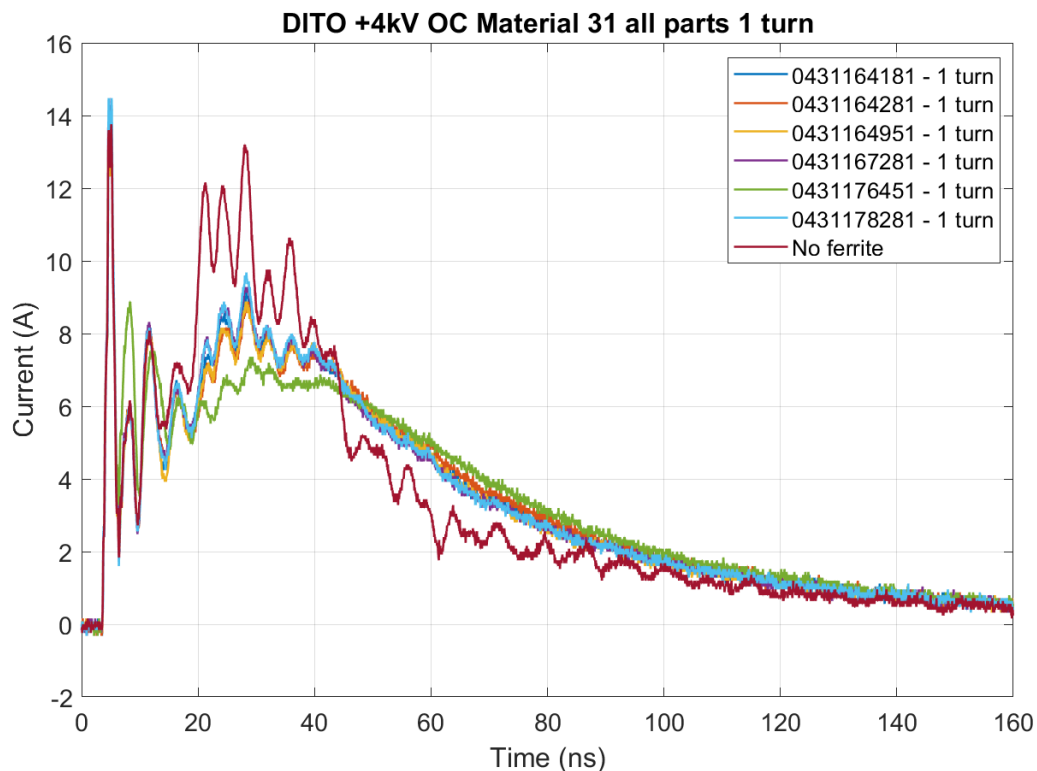
```

4.5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων μετά την δεύτερη επεξεργασία

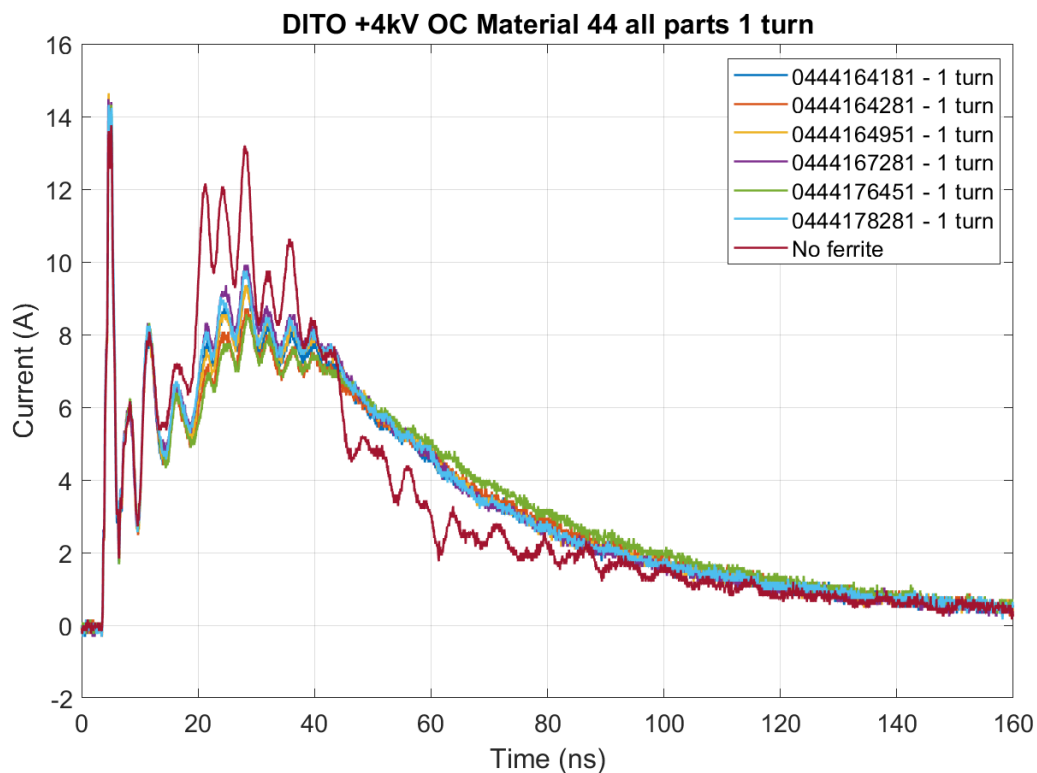
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν, με τη μορφή γραφημάτων, τα αποτελέσματα των διαφόρων σταδίων του πειράματος. Οι κυματομορφές, παρουσιασμένες σε γραφήματα έχουν ομαδοποιηθεί με διάφορους τρόπους ανά στάδιο, έτσι ώστε να μπορέσουμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα.

Στα υπομνήματα των γραφημάτων όποιες κυματομορφές είναι σηματοδοτημένες με «X» (κεφαλαίο) σημαίνει πως έχουν κριθεί ακατάλληλες μετά την πρώτη επεξεργασία, δηλαδή ο φερρίτης που χρησιμοποιήθηκε δεν κατάφερε να ρυθμίσει όλες τις παραμέτρους που αναφέρονται στη νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου. Στην περίπτωση που είναι σηματοδοτημένες με «x» (πεζό) σημαίνει πως ο φερρίτης που χρησιμοποιήθηκε δεν κατάφερε να ρυθμίσει σωστά αποκλειστικά το I_{30} το οποίο όμως δεν αναφέρεται στην νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου.

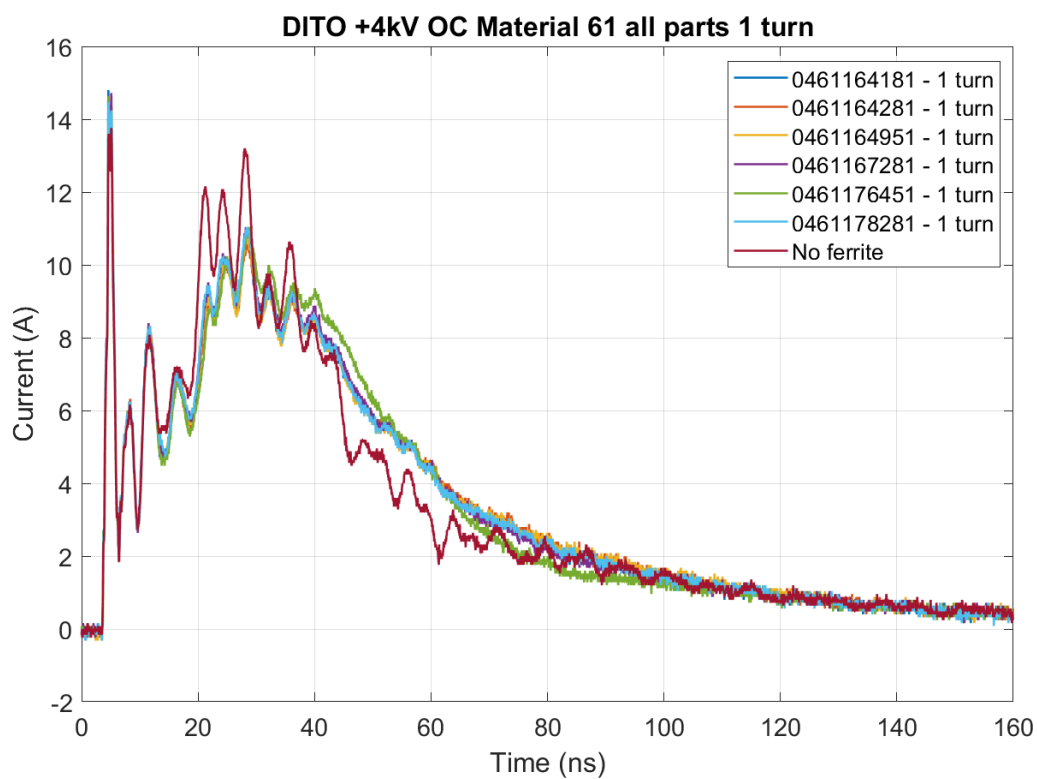
Στάδιο πρώτο: DITO, +4kV, καλώδιο κατασκευαστή, όλοι οι φερρίτες κάθε υλικού, με περιελίξεις καλωδίου από μια έως τρεις (όπου ήταν εφικτό), τοποθέτηση φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης.



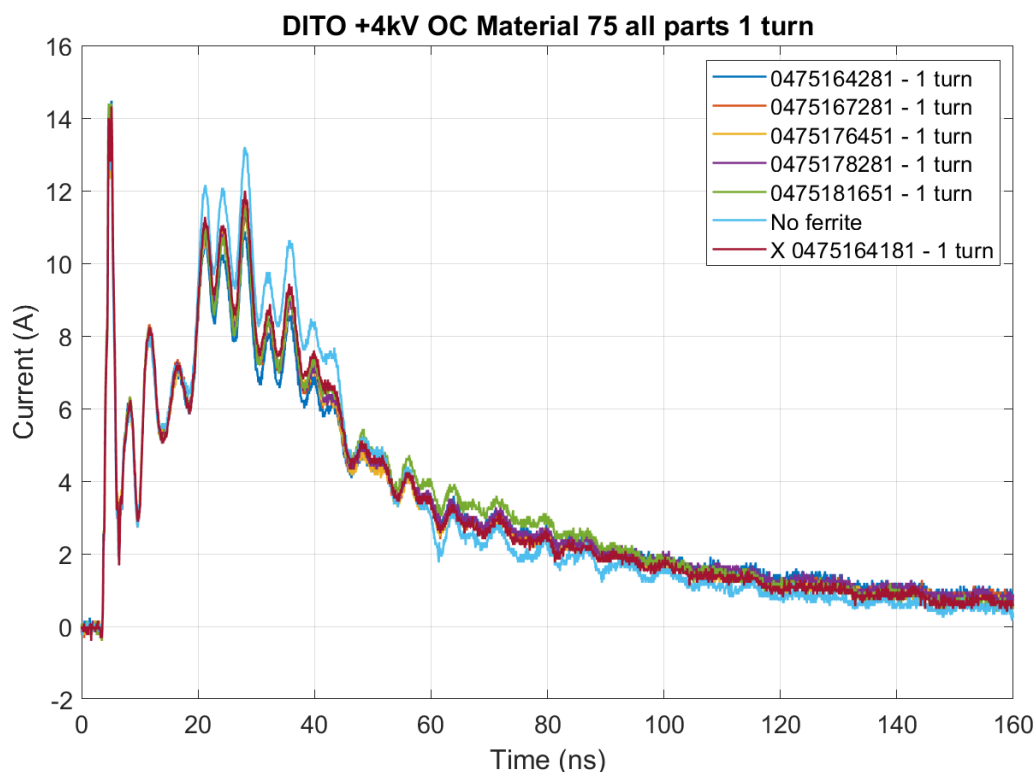
Σχήμα 4.3 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 31 (4kV)



Σχήμα 4.4 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 44 (4kV)



Σχήμα 4.5 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 61 (4kV)

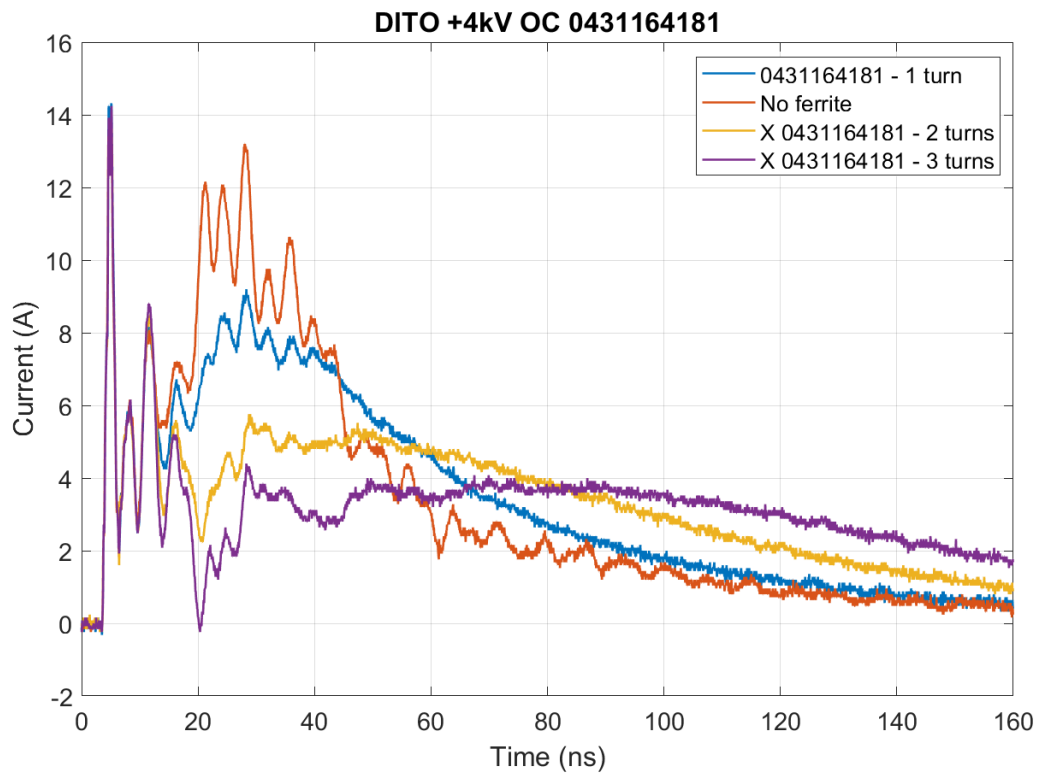


Σχήμα 4.6 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 75 (4kV)

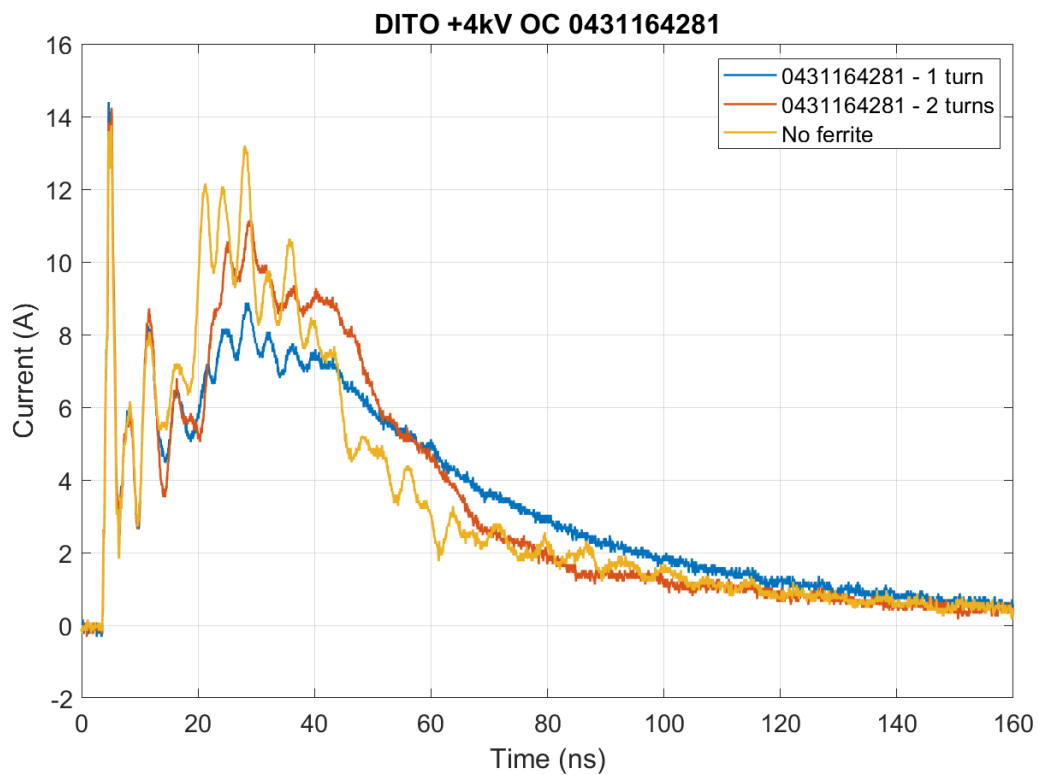
Παρατηρήθηκαν σε πρώτη φάση οι αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών που προκύπτουν από την εφαρμογή φερριτών διαφορετικής διαμέτρου και ίδιου υλικού, όσον αφορά τα υλικά 31 και 44, στην περιοχή της δεύτερης κορυφής. Αυτές οι διακυμάνσεις δεν γίνονται τόσο αισθητές στις κυματομορφές που έχουν προκύψει από την εφαρμογή φερριτών διαφορετικών διαμέτρων από το ίδιο υλικό, για τα υλικά 61 και 75. Αυτό αποδίδεται στο διαφορετικό εύρος συχνοτήτων λειτουργίας των υλικών σε συνδυασμό με τις συχνότητες ενδιαφέροντος. Οι συχνότητες ενδιαφέροντος περιορίζονται μεταξύ 40-200MHz, ενώ οι συχνότητες λειτουργίας των υλικών 61 και 75 είναι αντίστοιχα 200MHz–1 GHz και 150kHz-10MHz. Εν αντιθέσει οι συχνότητες λειτουργίας των υλικών 31 και 44 είναι αντίστοιχα 1MHz-300MHz και 25MHz-300MHz. Συνεπάγεται ότι τα υλικά 31 και 44 είναι καταλληλότερα για να καταστείλουν τις «προβληματικές» συχνότητες.

Τα υλικά 31, 44 φαίνεται να καταστέλλουν αρκετά ικανοποιητικά το φαινόμενο ringing. Για χρόνους από περίπου τα 15ns μέχρι τα 45ns, οι διάφοροι φερρίτες λειτουργούν κατασταλτικά περιορίζοντας το φαινόμενο ringing και κατά συνέπεια ρυθμίζοντας το επίπεδο της δεύτερης κορυφής. Για χρόνους μεγαλύτερους των 45ns παρατηρείται μια αύξηση των τιμών του ρεύματος. Αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στην αυξημένη αυτεπαγωγή του καλωδίου με την εισαγωγή των φερριτών.

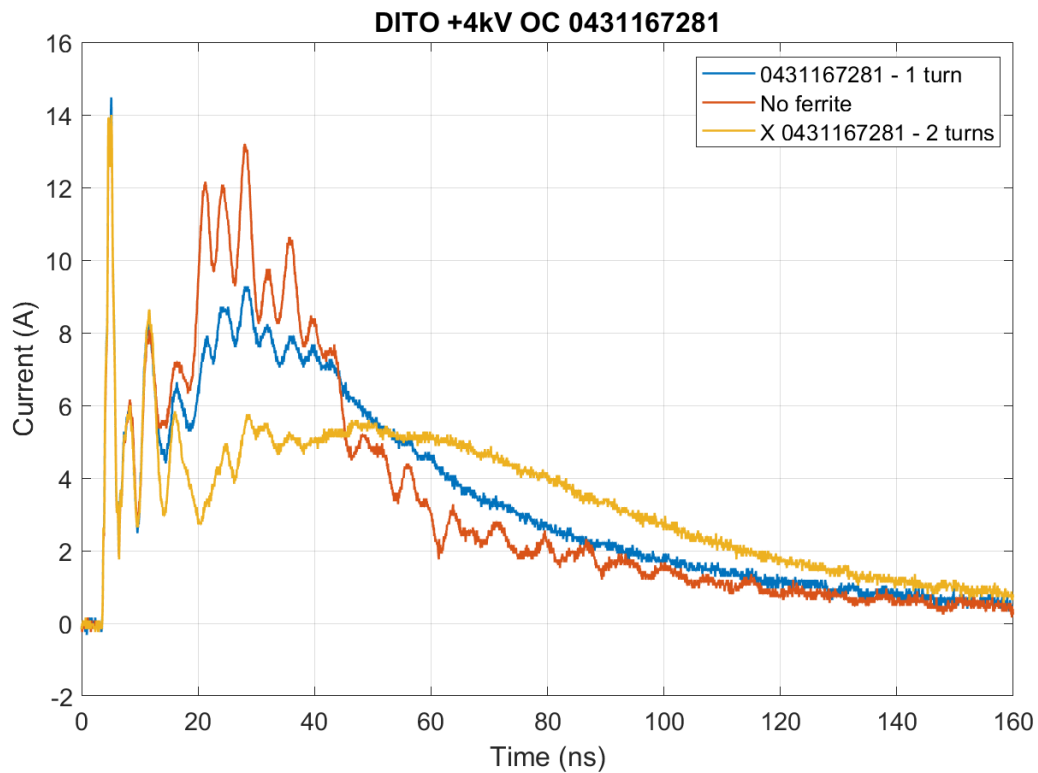
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των κυματομορφών του ρεύματος για εφαρμογή φερριτών με διαφορετικές σπείρες.



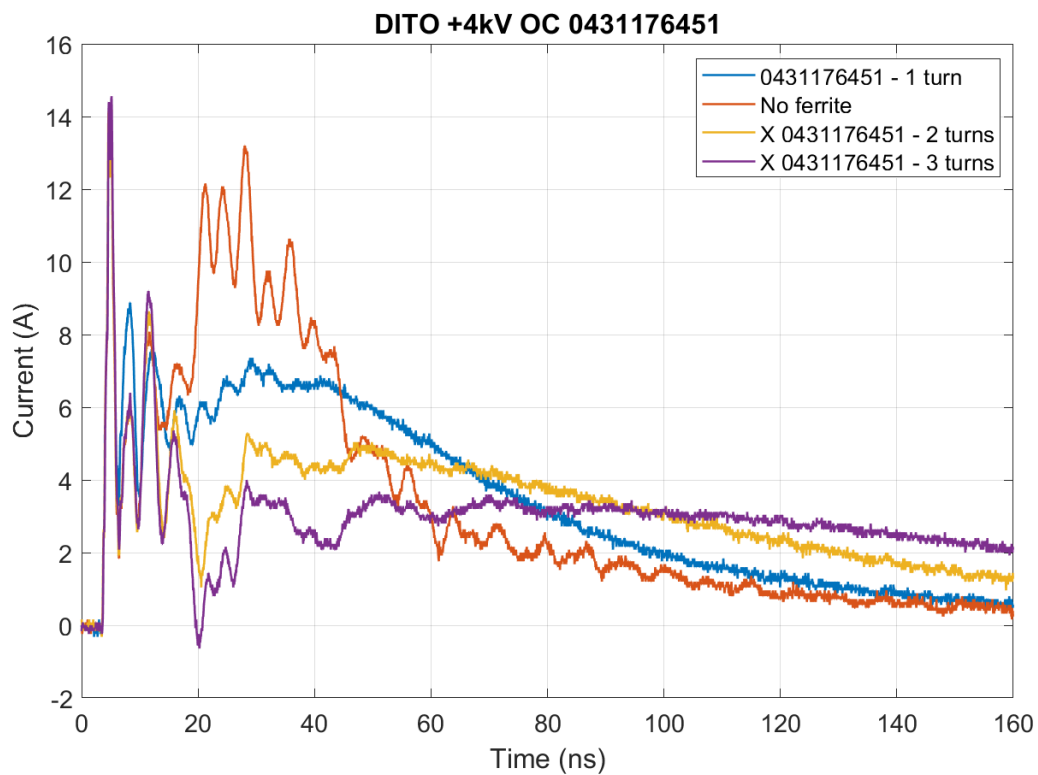
Σχήμα 4.7 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431164181 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



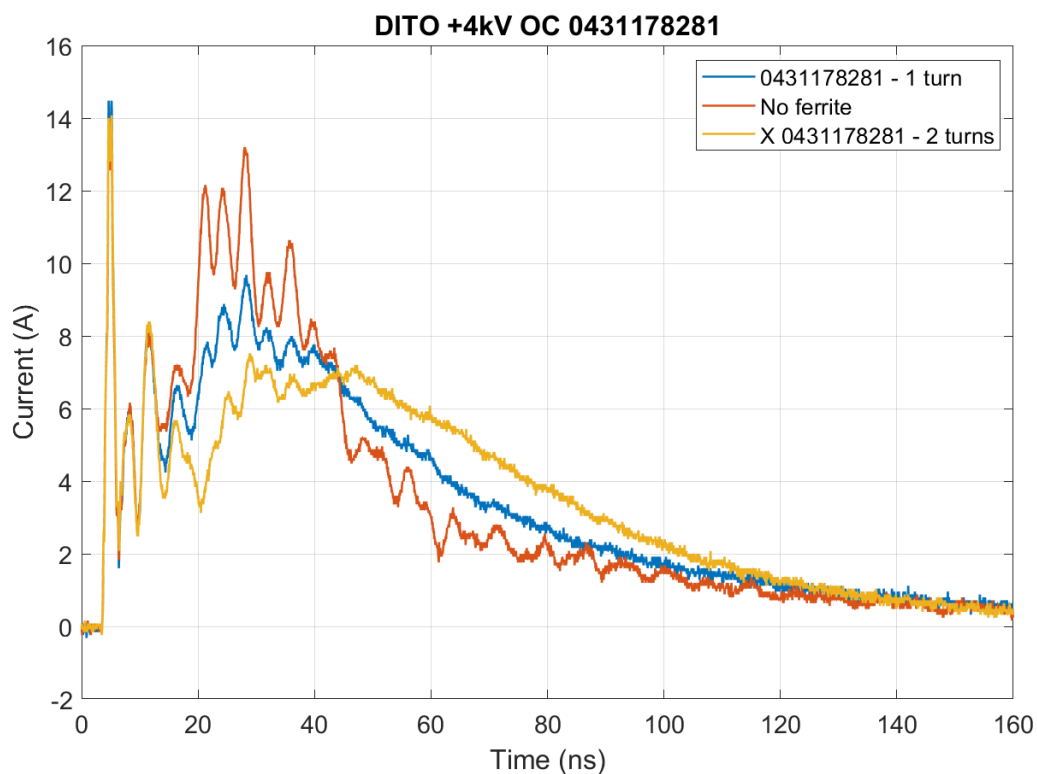
Σχήμα 4.8 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431164281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



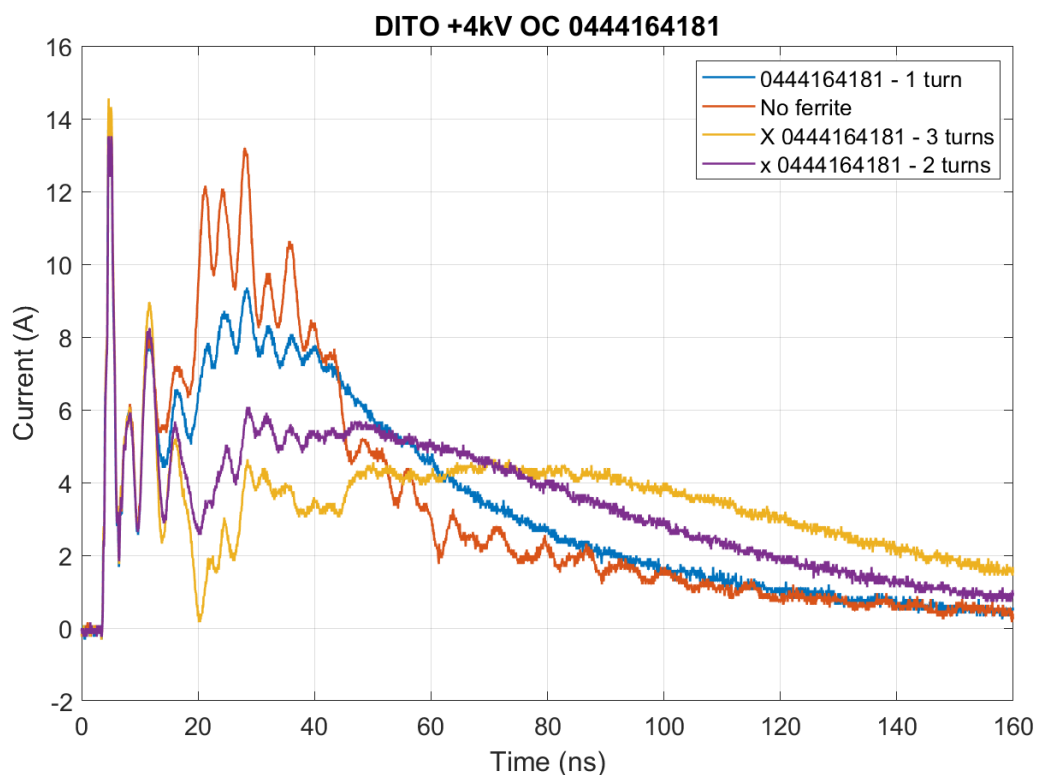
Σχήμα 4.9 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431167281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



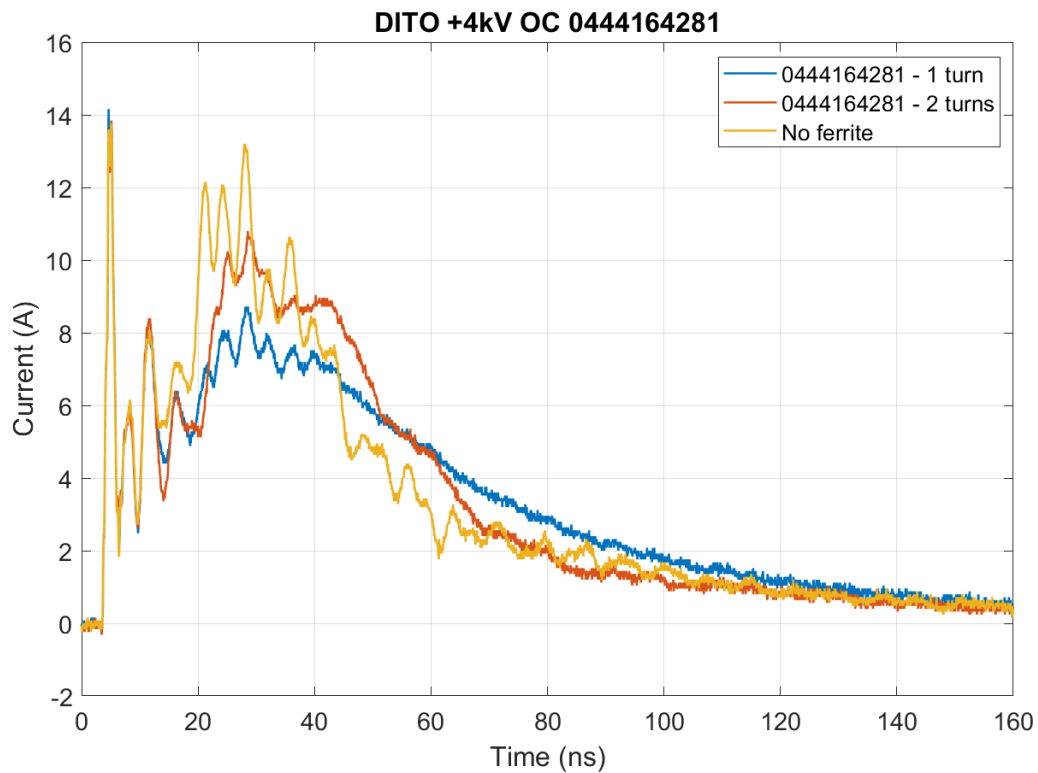
Σχήμα 4.10 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431176451 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



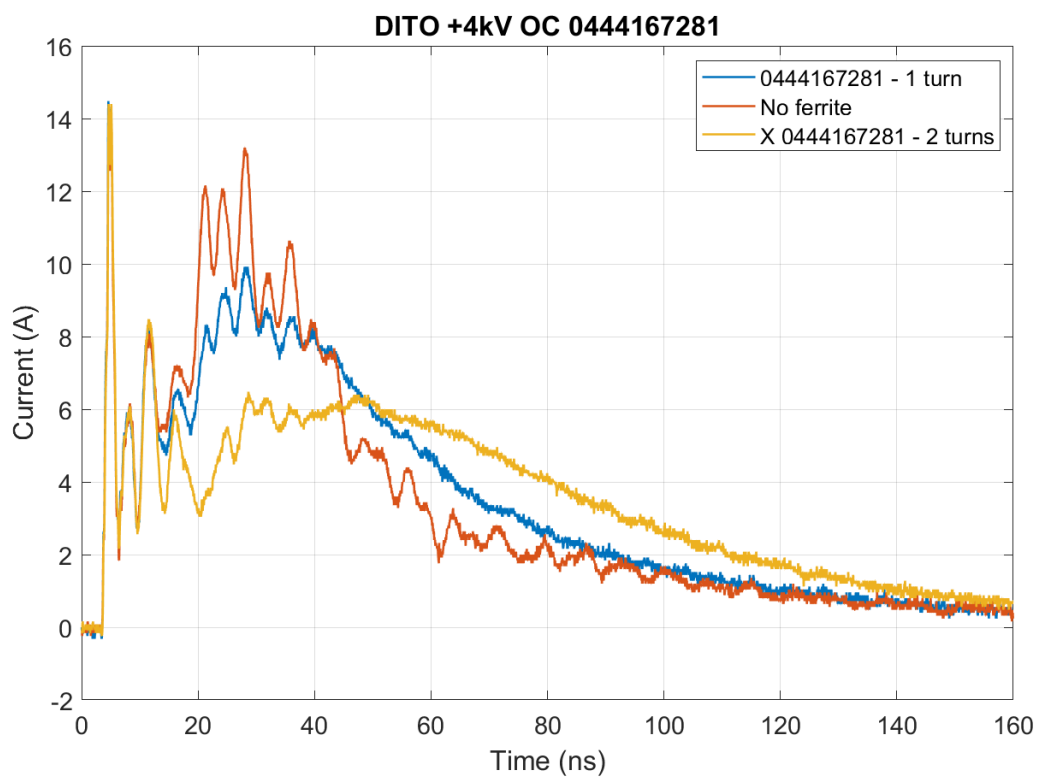
Σχήμα 4.11 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0431178281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



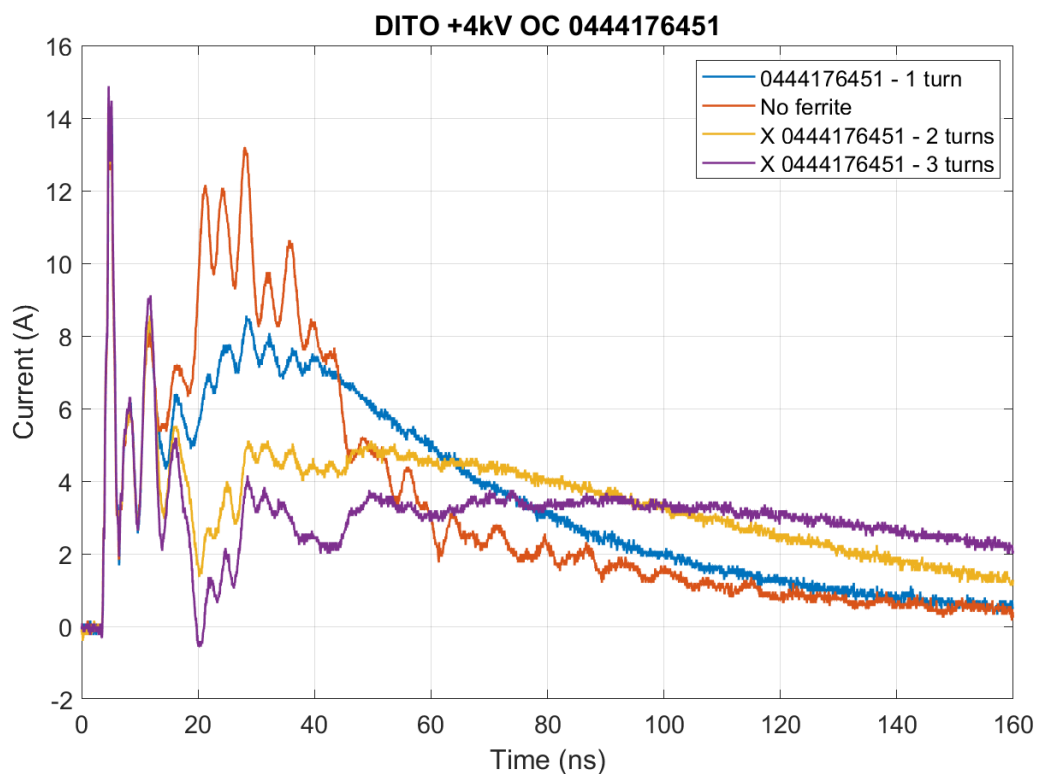
Σχήμα 4.12 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0444164181 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



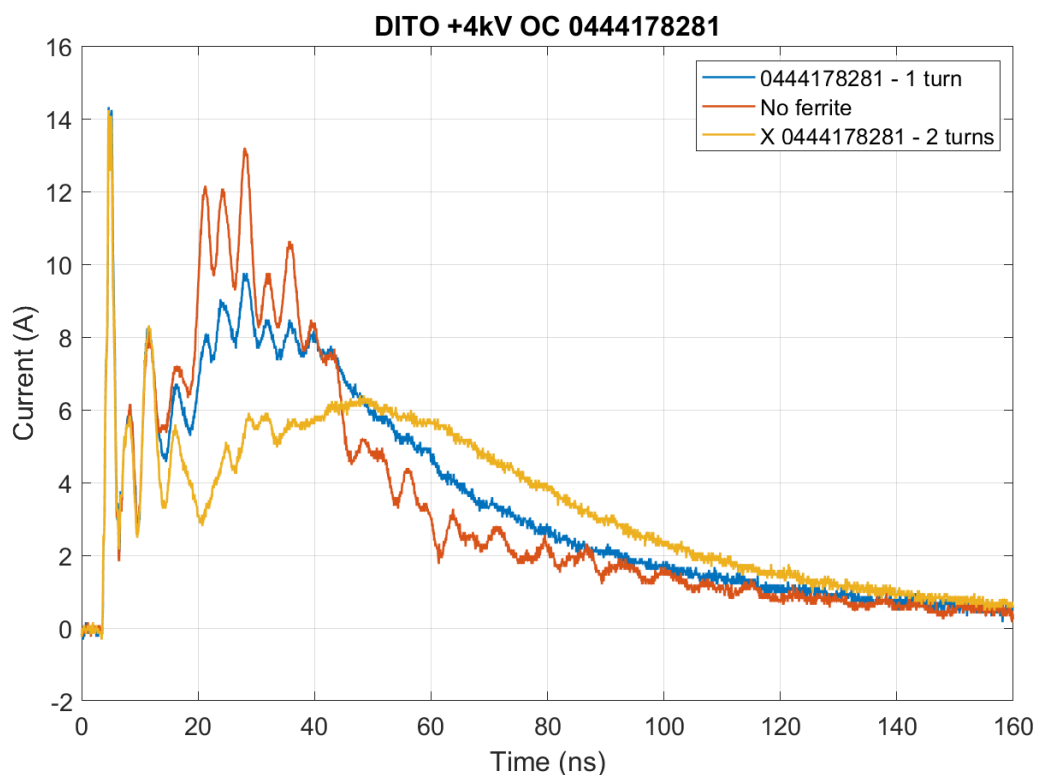
Σχήμα 4.13 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0444164281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



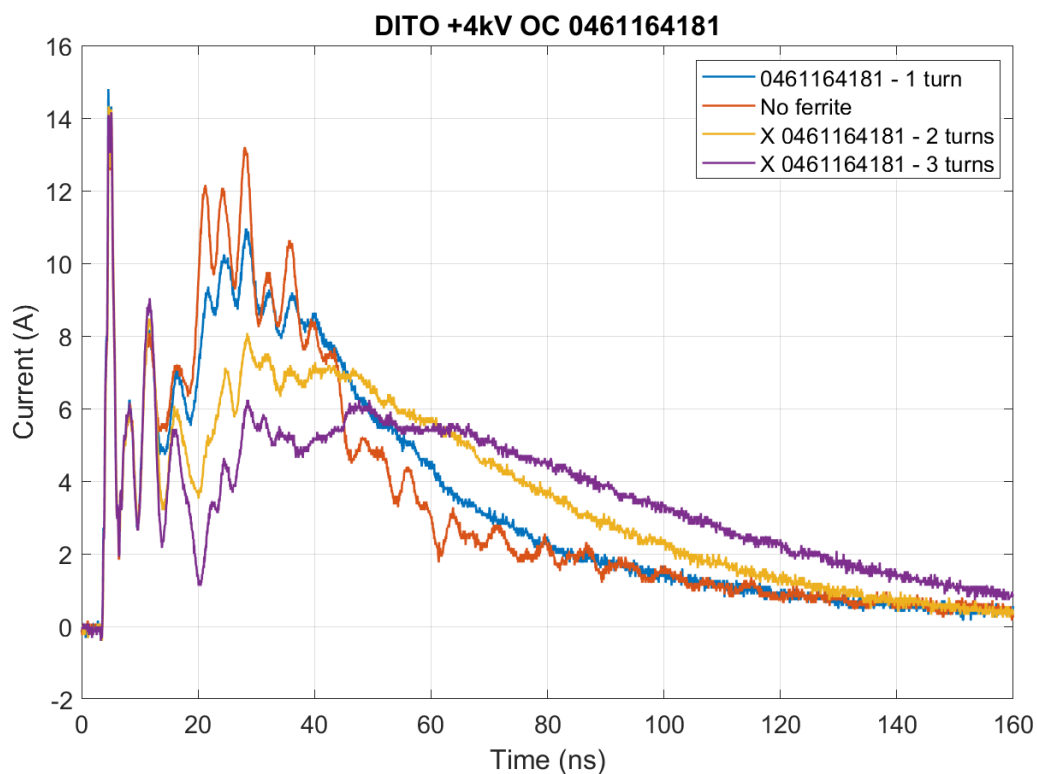
Σχήμα 4.14 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0444167281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



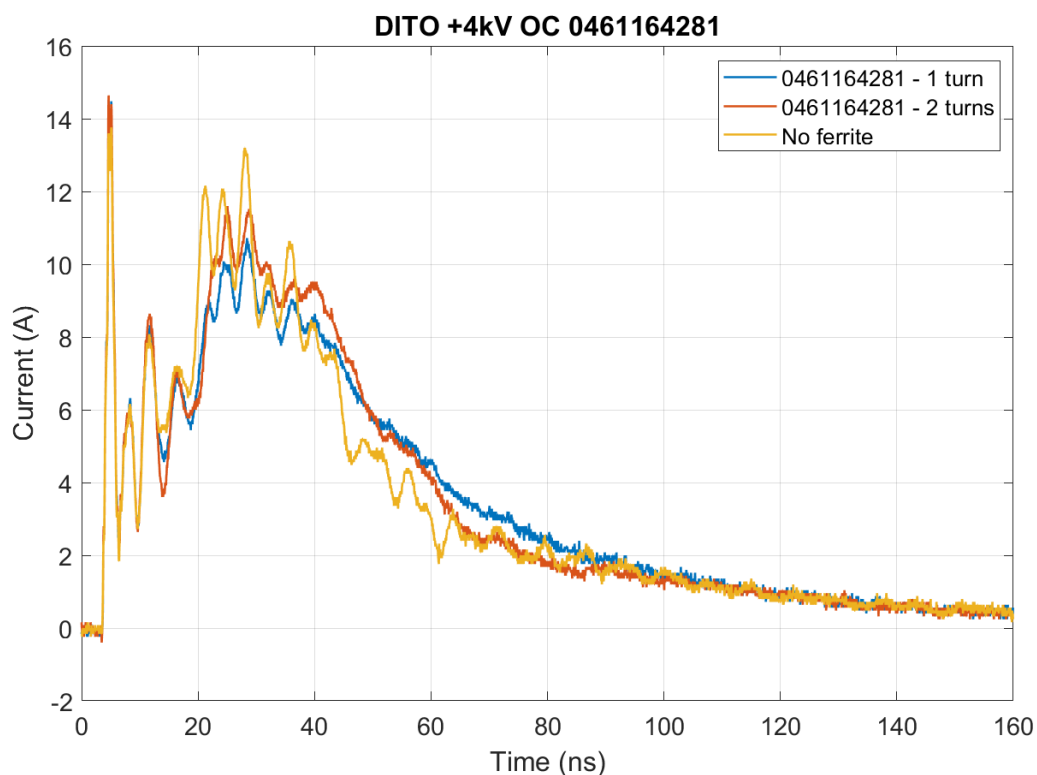
Σχήμα 4.15 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0444176451 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



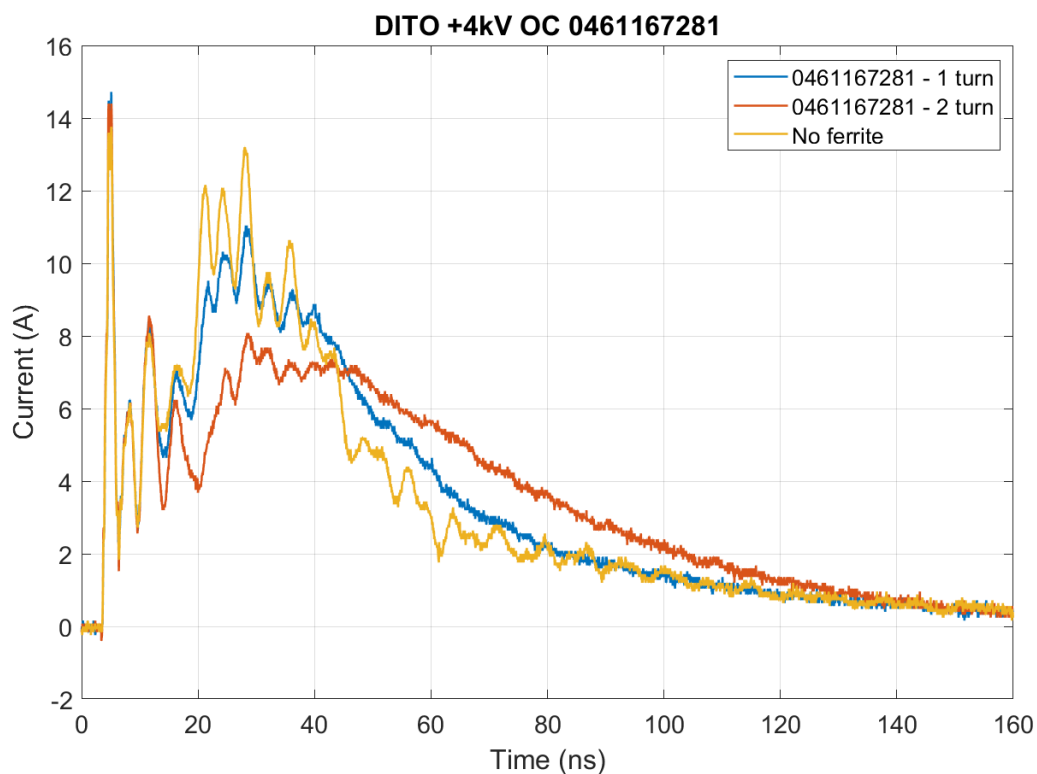
Σχήμα 4.16 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0444178281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



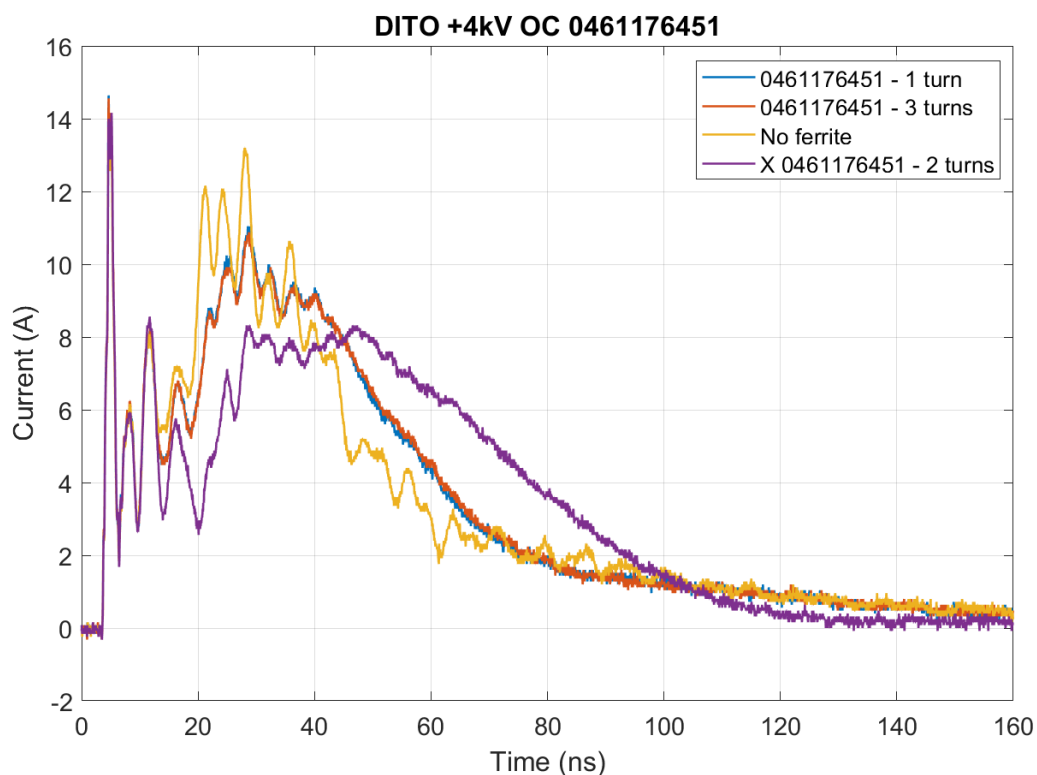
Σχήμα 4.17 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0461164181 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



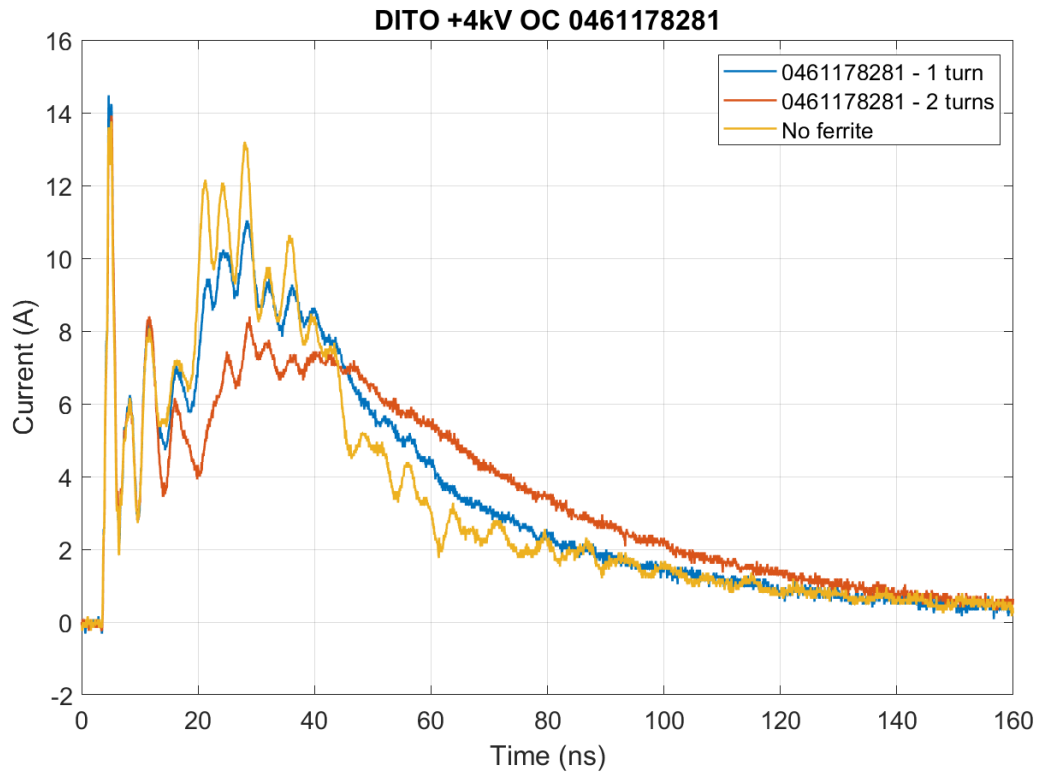
Σχήμα 4.18 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0461164281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



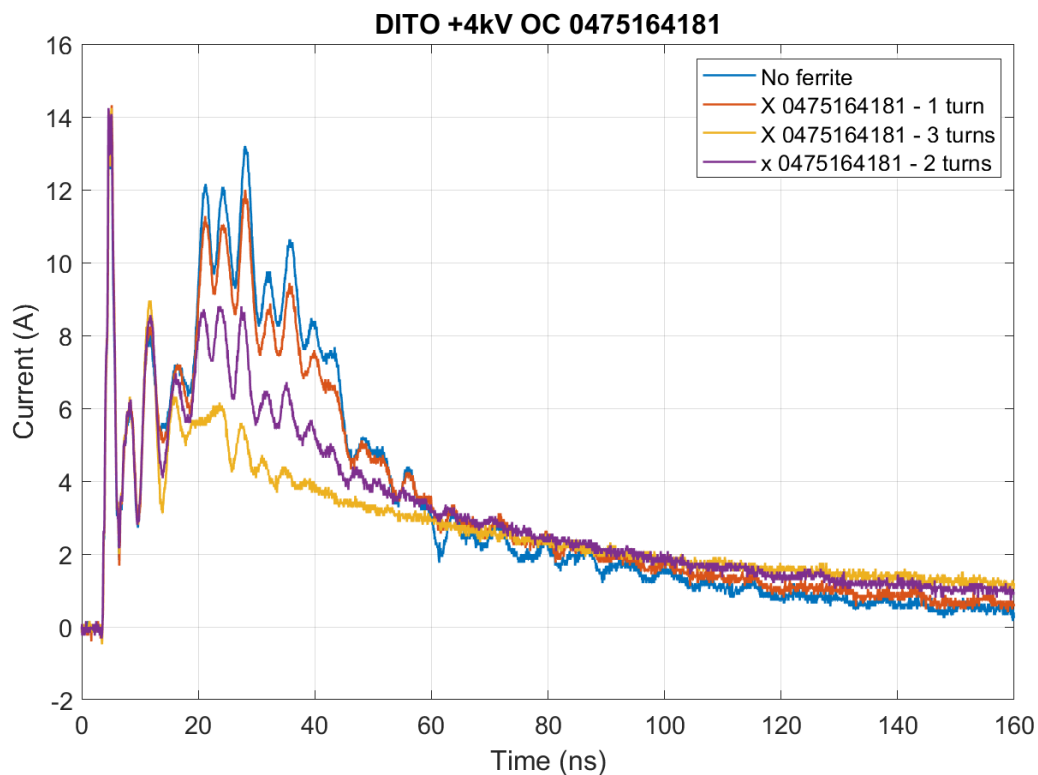
Σχήμα 4.19 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0461167281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



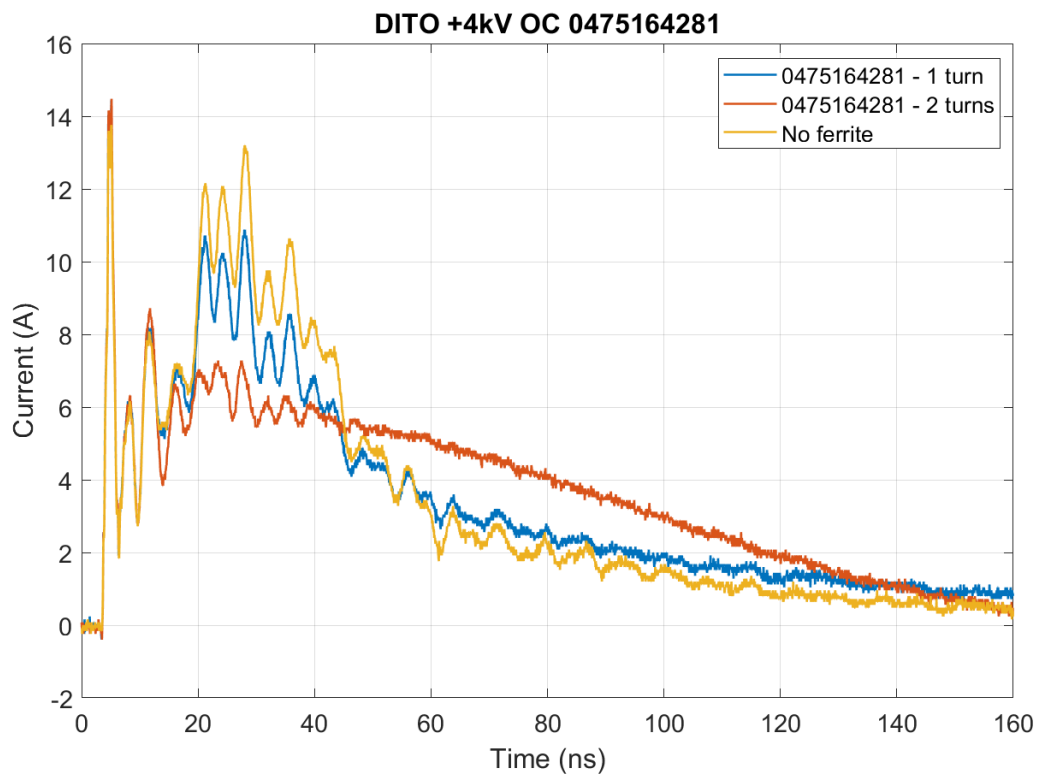
Σχήμα 4.20 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0461176451 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



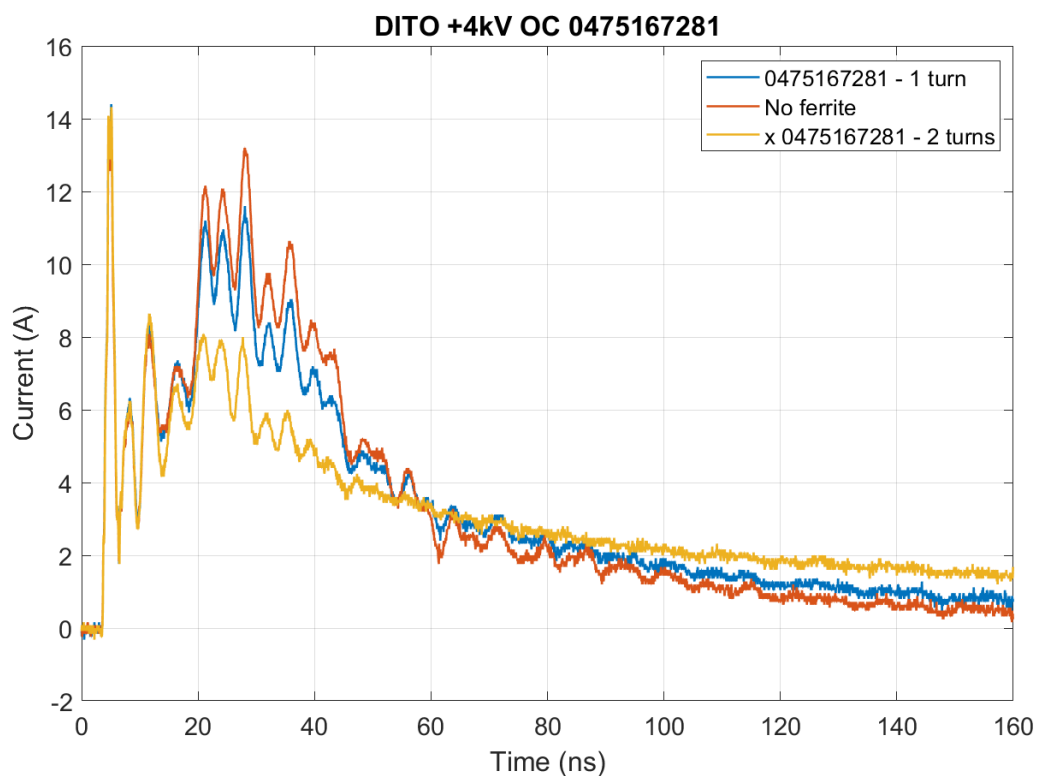
Σχήμα 4.21 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0461178281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



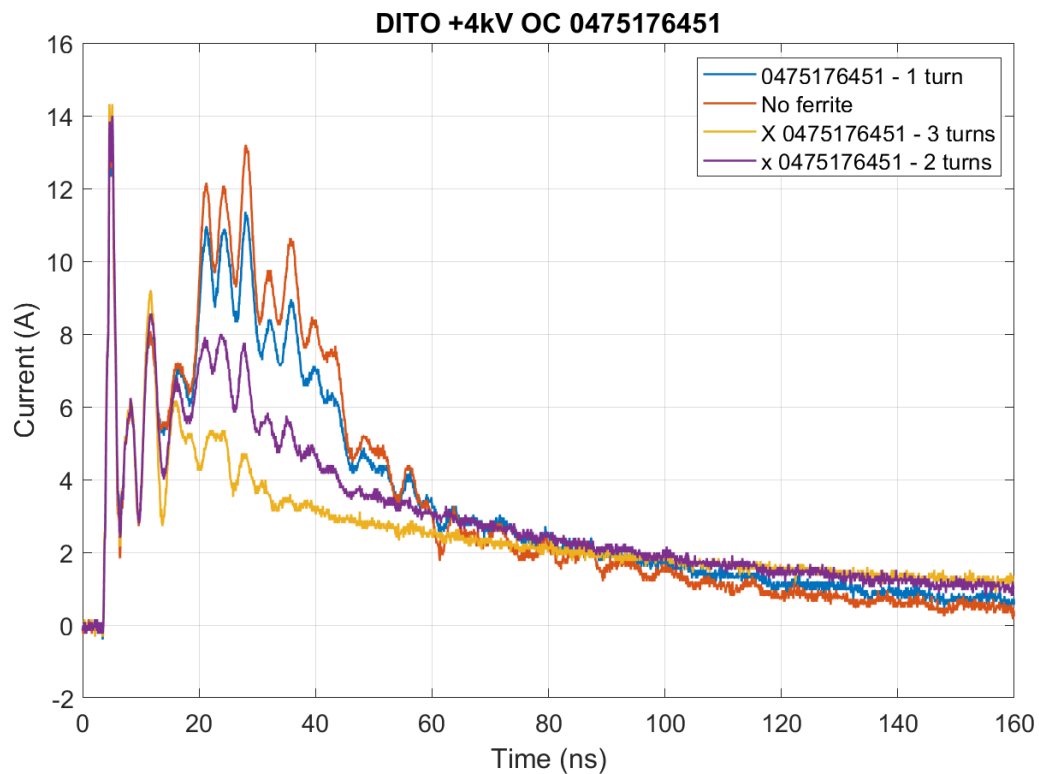
Σχήμα 4.22 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0475164181 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



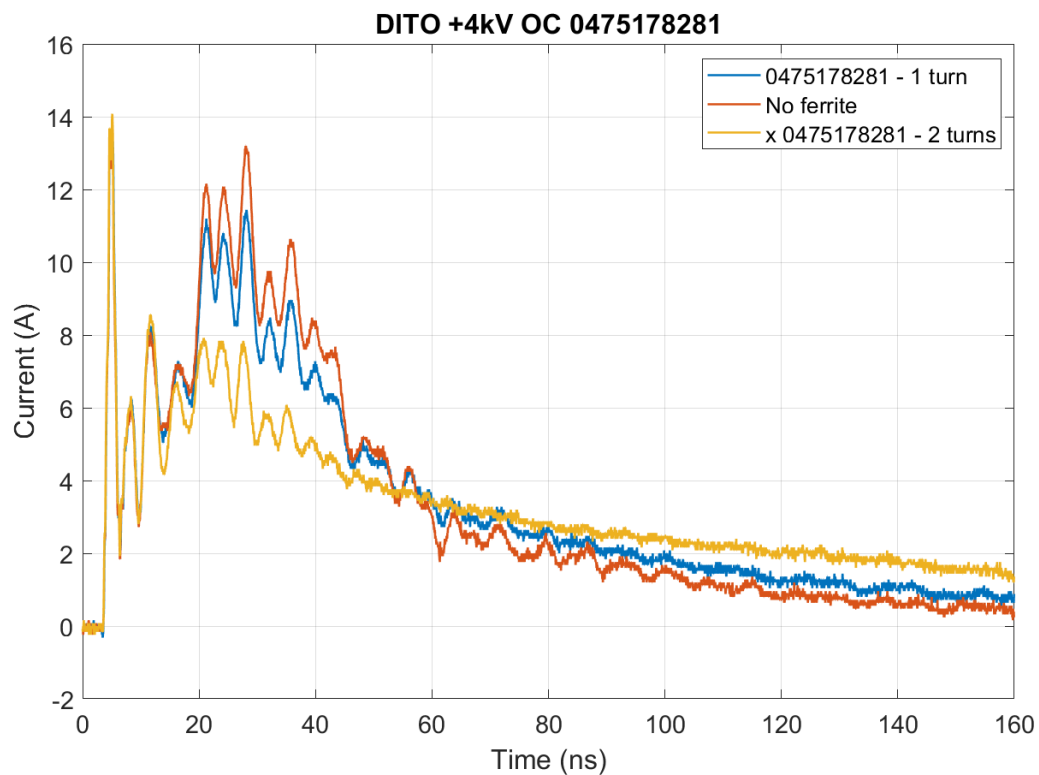
Σχήμα 4.23 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0475164281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



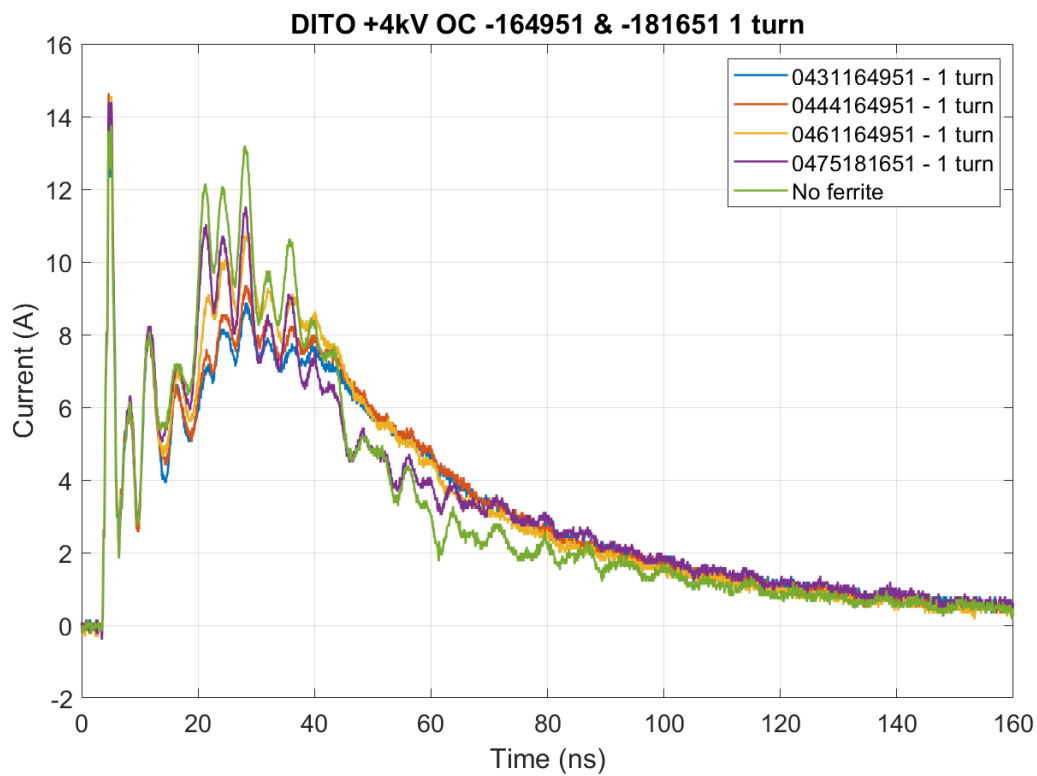
Σχήμα 4.24 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0475167281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



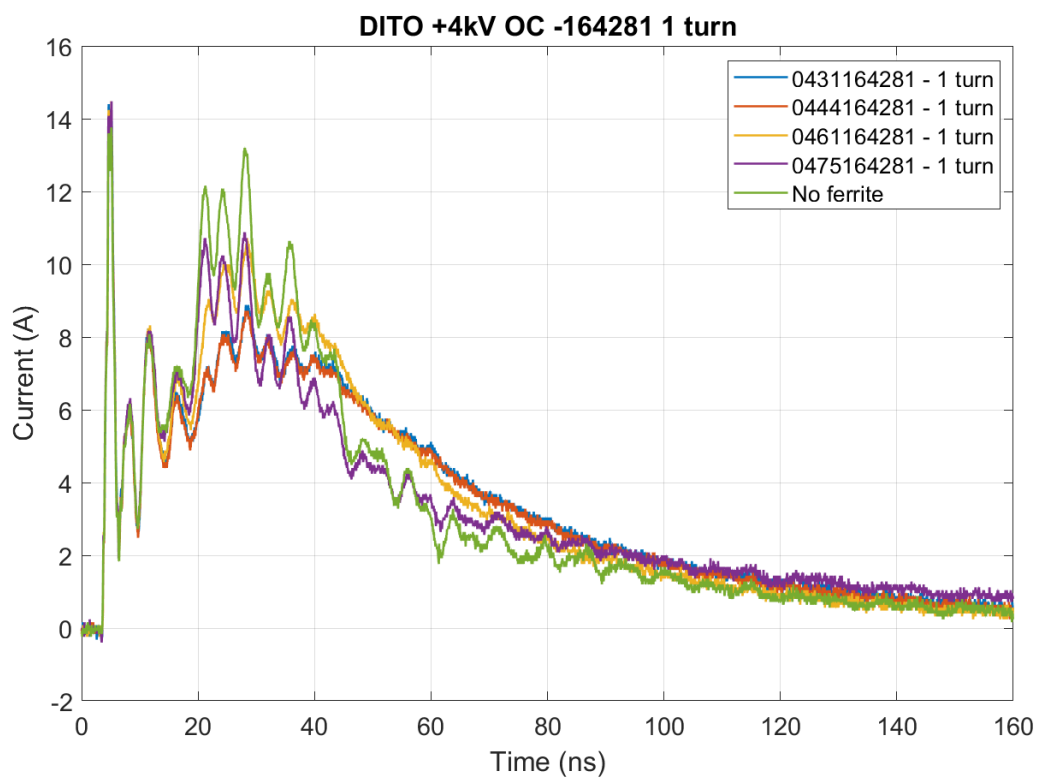
Σχήμα 4.25 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0475176451 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



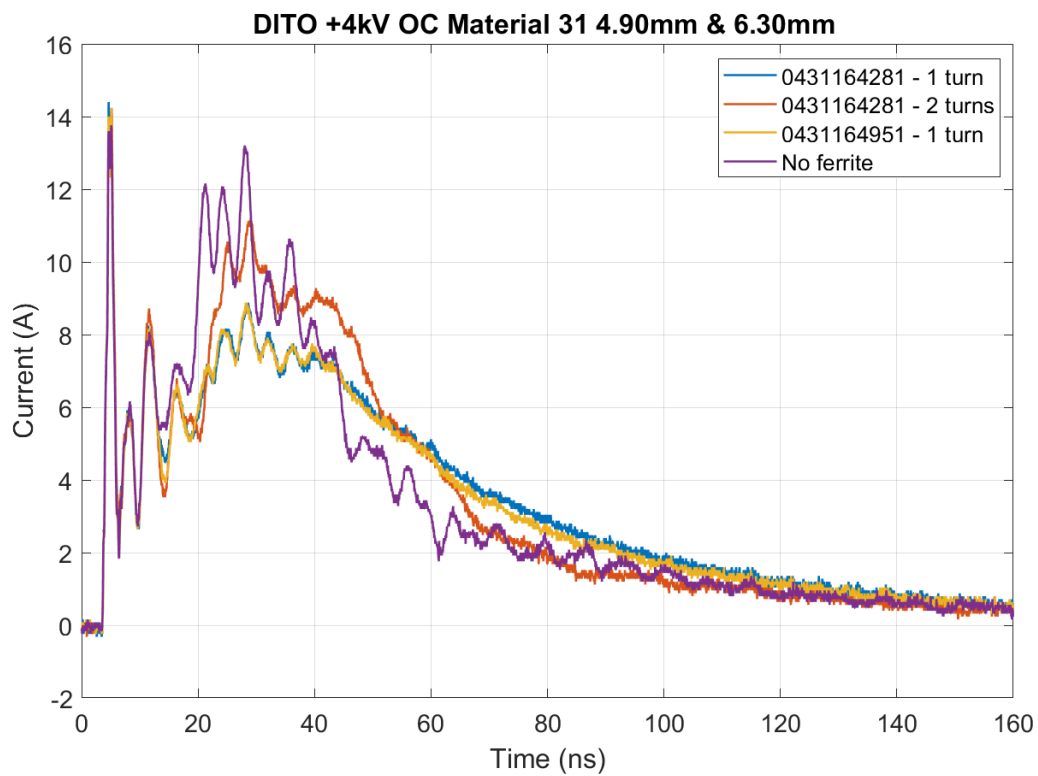
Σχήμα 4.26 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή του 0475178281 με διαφορετικές σπείρες (4kV)



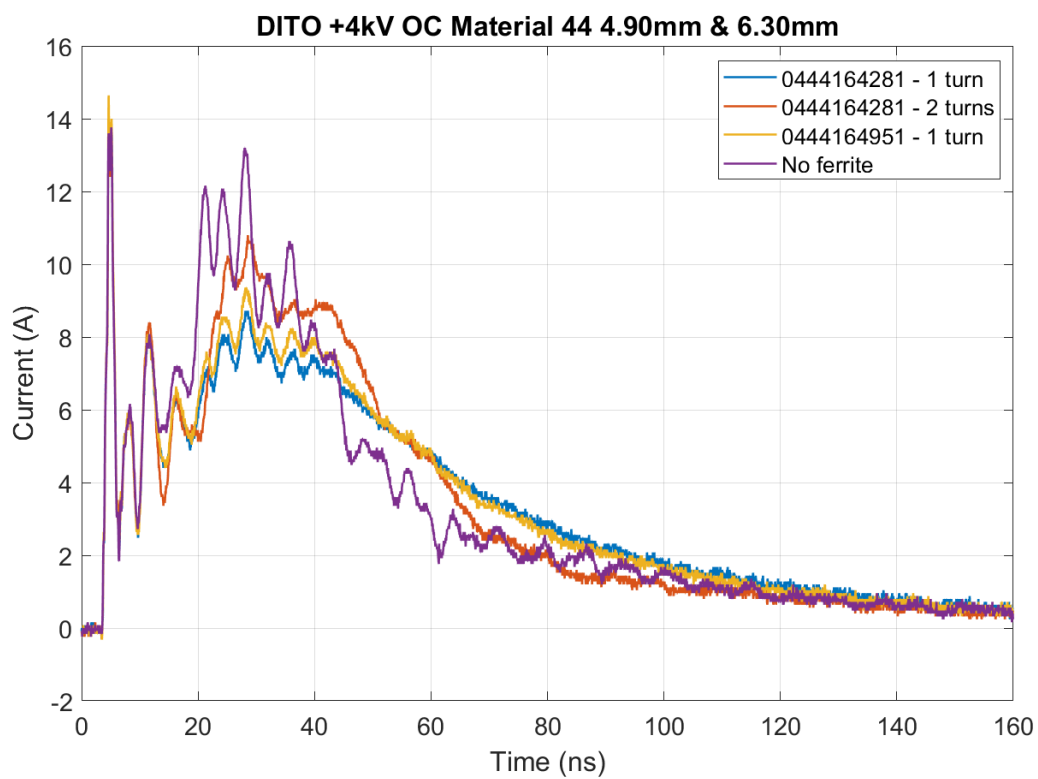
Σχήμα 4.27 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm διαφορετικών υλικών (4kV)



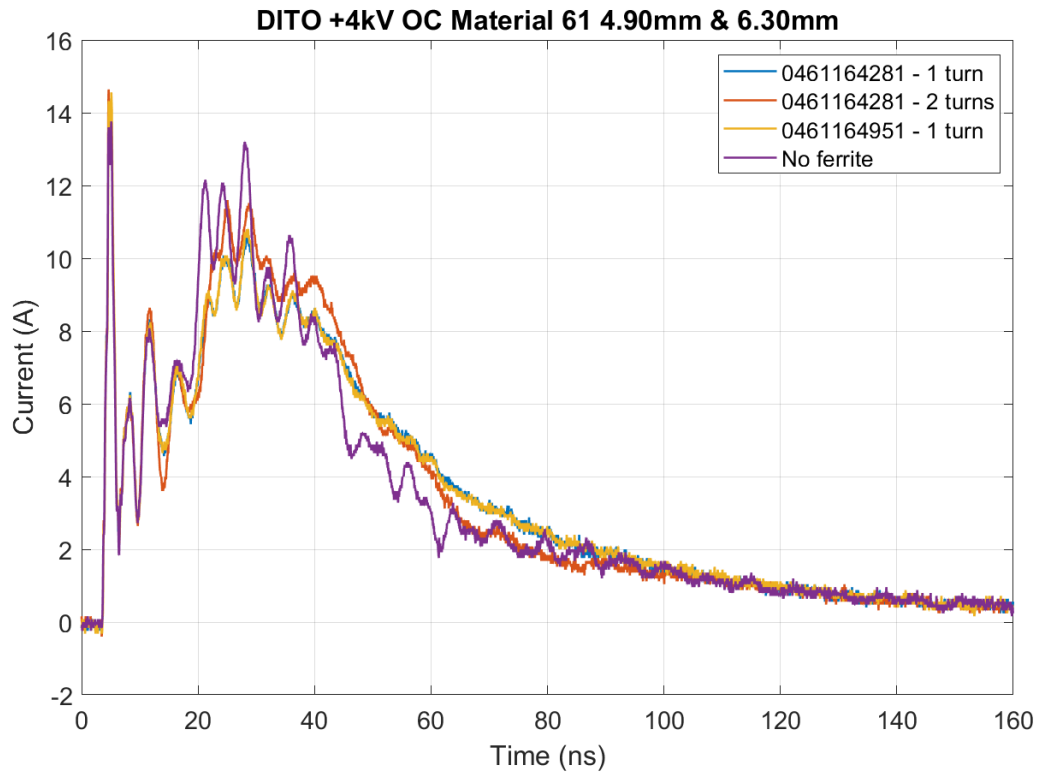
Σχήμα 4.28 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm διαφορετικών υλικών (4kV)



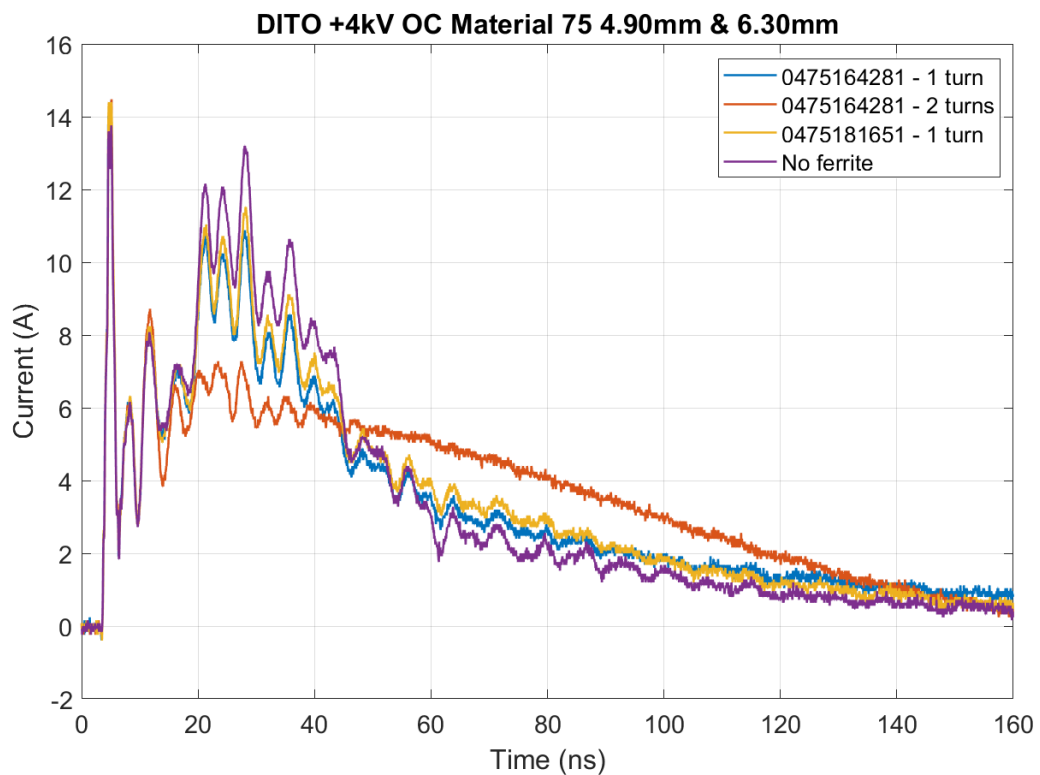
Σχήμα 4.29 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm και 6.30 (1 και 2 σπείρες) του υλικού 31 (4kV)



Σχήμα 4.30 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm και 6.30 (1 και 2 σπείρες) του υλικού 44 (4kV)



Σχήμα 4.31 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm και 6.30 (1 και 2 σπείρες) του υλικού 61 (4kV)

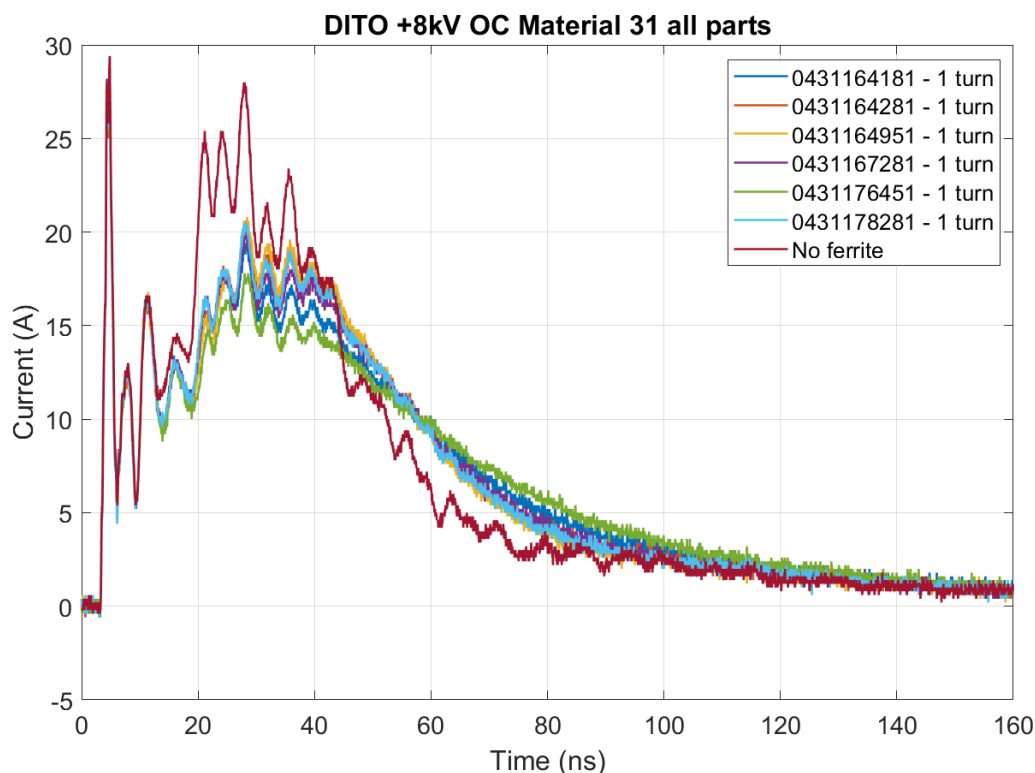


Σχήμα 4.32 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm και 6.30 (1 και 2 σπείρες) του υλικού 75 (4kV)

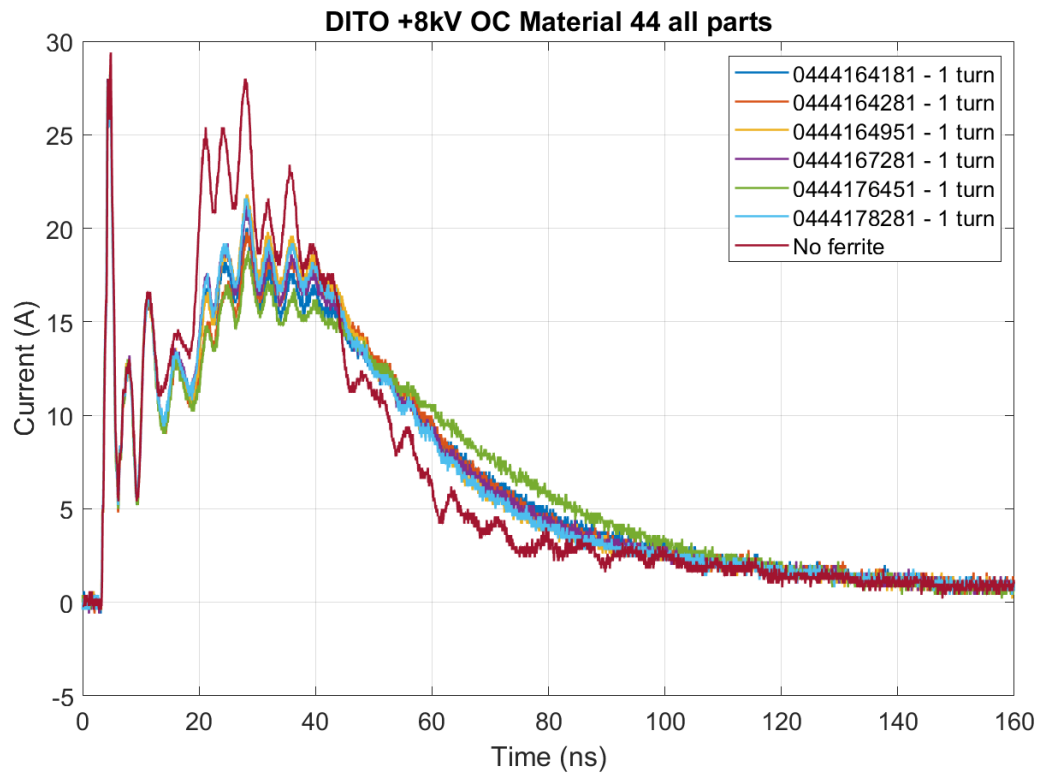
Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αύξηση του πλήθους των περιελίξεων εντός του πυρήνα επιφέρει μεγαλύτερη καταστολή του φαινομένου ringing. Με την αύξηση του αριθμού του περιελίξεων αυξάνεται στο τετράγωνο η μέγιστη τιμή της σύνθετης αντίστασης, ενώ σε πολλές περιπτώσεις μετακινείται και το εύρος λειτουργίας του φερρίτη. Όπου η καταστολή του φαινομένου είναι πολύ έντονη, η παράμετρος ελέγχου I_{peak2} περιορίζεται σημαντικά, με αποτέλεσμα να βρίσκεται εκτός ορίων.

Στάδιο δεύτερο: DITO, +8kV, καλώδιο κατασκευαστή, όλοι οι φερρίτες κάθε υλικού, με μια περιέλιξη του καλωδίου, τοποθέτηση φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης.

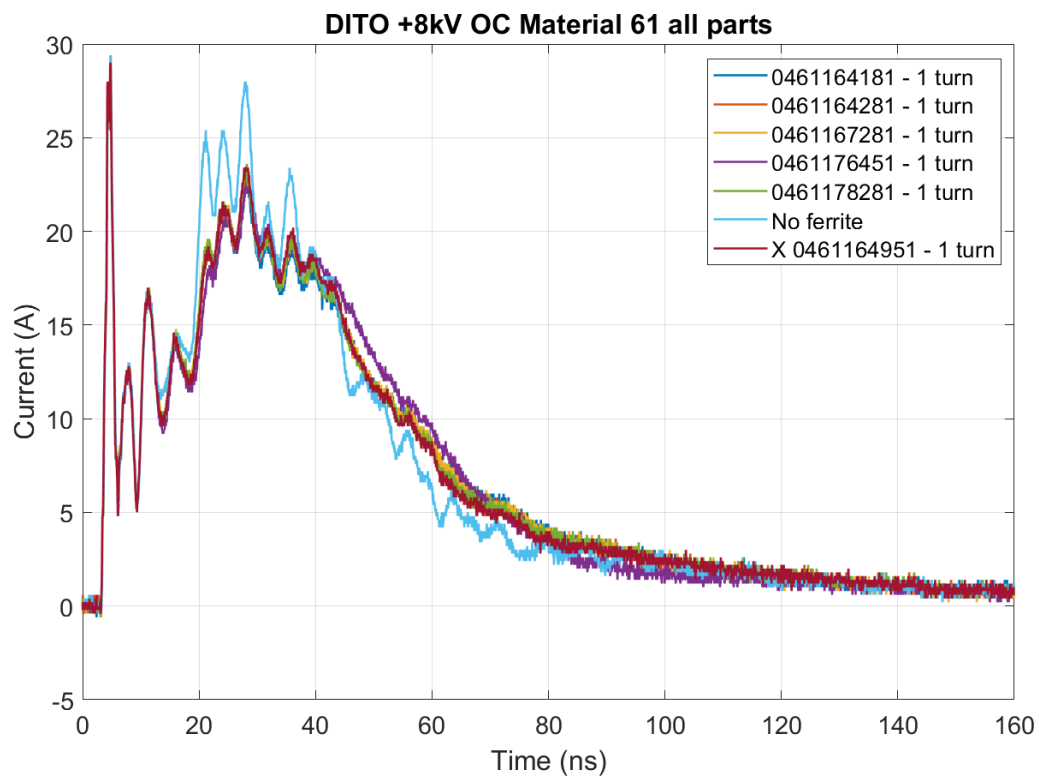
Σε αυτό το στάδιο ουσιαστικά γίνεται αντιληπτή η γραμμικότητα του φαινομένου καθώς βλέπουμε πως η εφαρμογή των διαφορετικών πυρήνων φερρίτη από κάθε υλικό επιδρά όπως και στο πρώτο στάδιο του πειράματος στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Σε αυτό το επίπεδο τάσης γίνεται ακόμα πιο ευδιάκριτη η ταύτιση των κυματομορφών που προκύπτουν από την εφαρμογή φερριτών του ίδιου υλικού για τα υλικά 61 και 75.



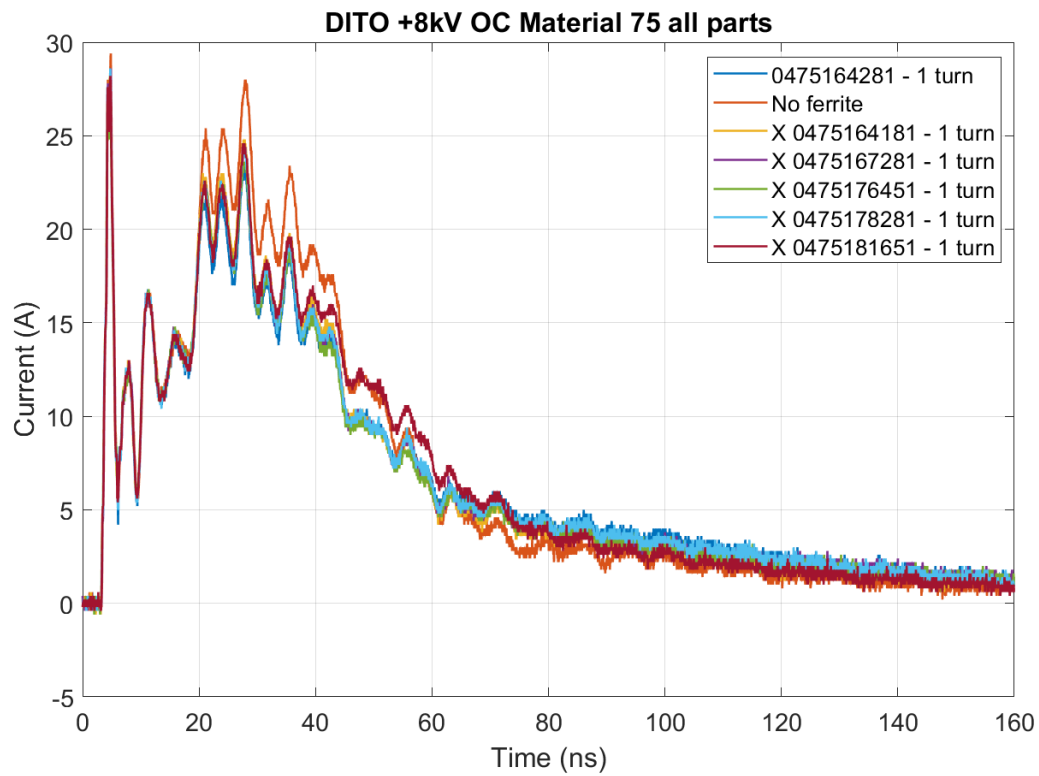
Σχήμα 4.33 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 31 (8kV)



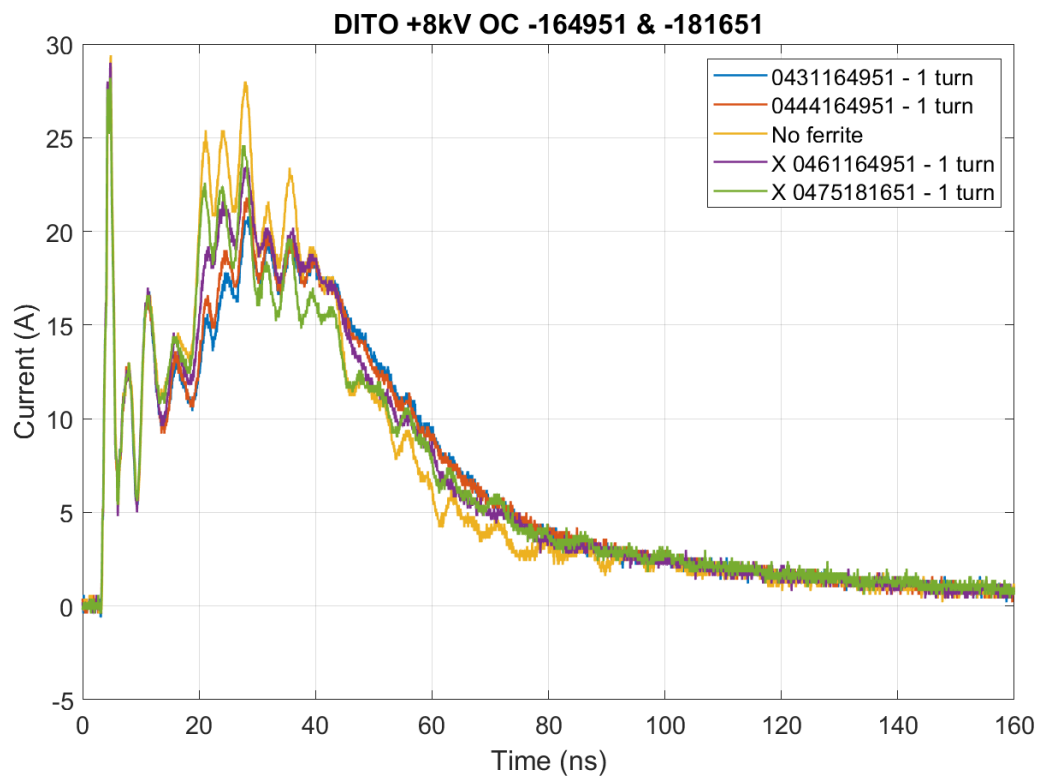
Σχήμα 4.34 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 44 (8kV)



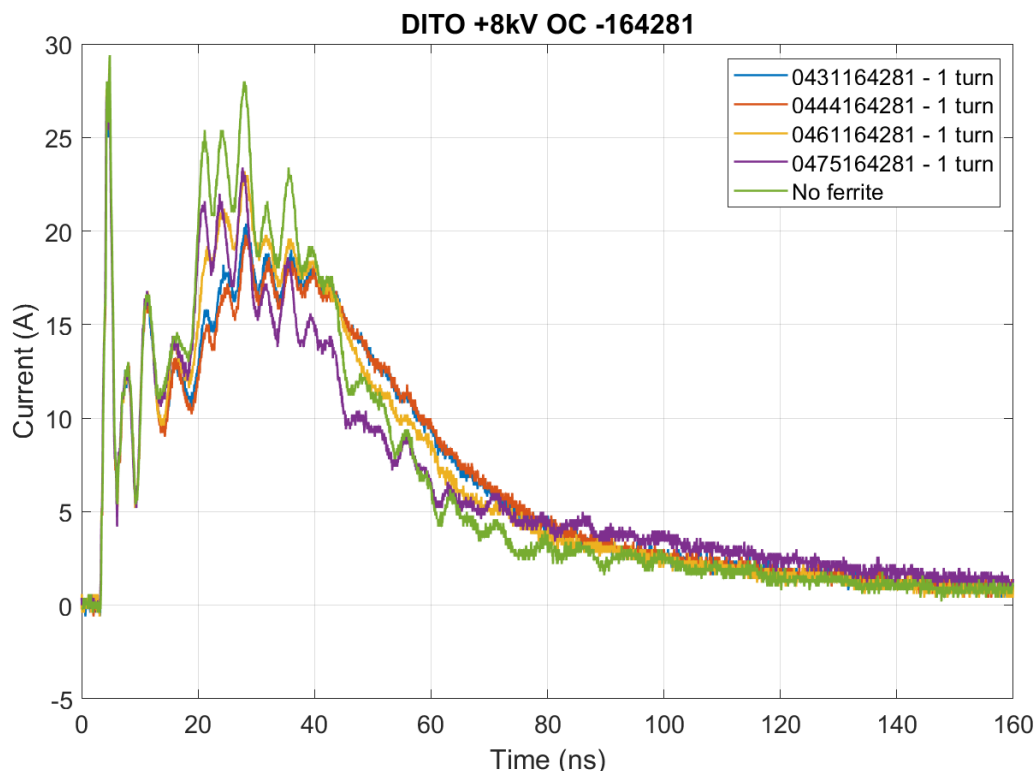
Σχήμα 4.35 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 61 (8kV)



Σχήμα 4.36 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης με εφαρμογή φερριτών του υλικού 75 (8kV)



Σχήμα 4.37 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 4.90mm διαφορετικών υλικών (8kV)



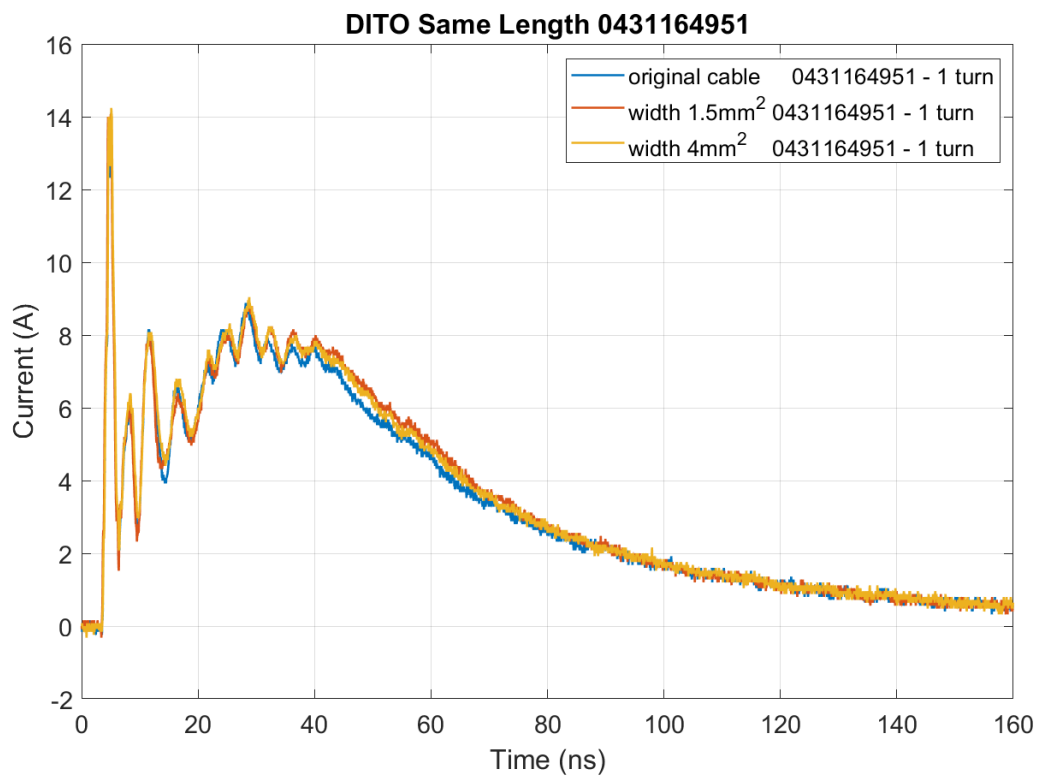
Σχήμα 4.38 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερριτών εσωτερικής διαμέτρου 6.30mm διαφορετικών υλικών (8kV)

Από τα συγκριτικά διαγράμματα των κυματομορφών του δεύτερου σταδίου παρατηρούμε παρόμοια επίδραση της εφαρμογής των φερριτών με αυτή στο πρώτο στάδιο. Ενδεικτικά αναφέρονται:

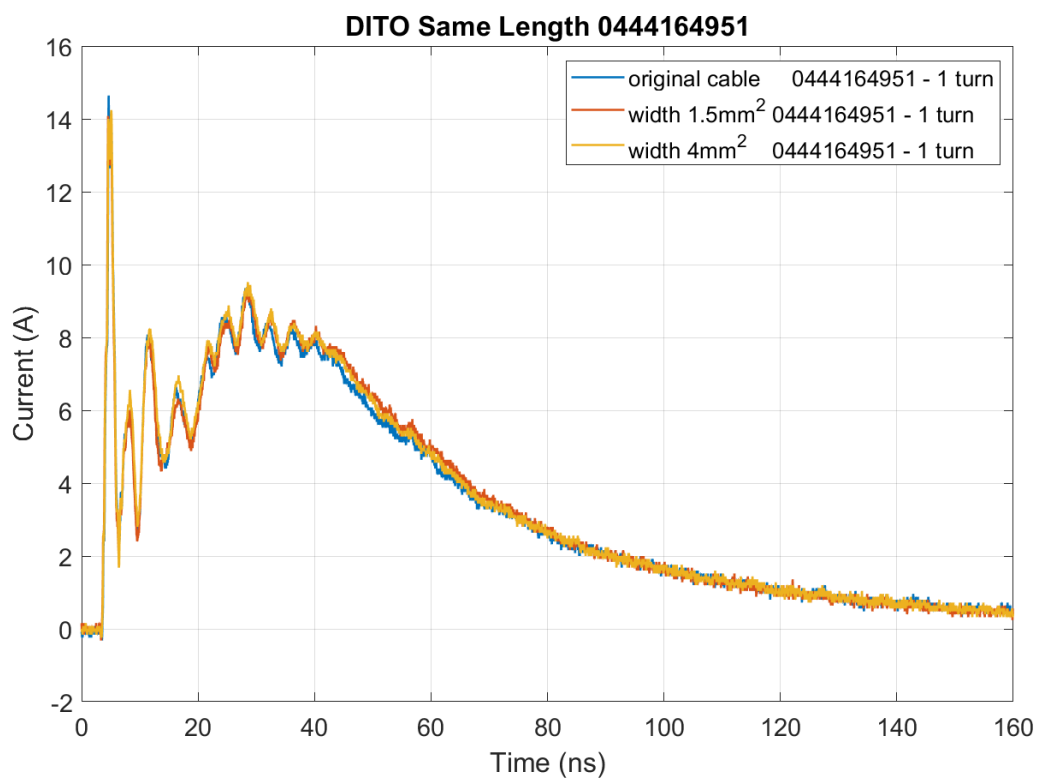
- Η καλύτερη ρύθμιση του ringing από τους φερρίτες των υλικών 31 και 44.
- Η εξασθένιση του φαινομένου ringing οδηγεί στον περιορισμό του I_{peak2} , αλλά στην αύξηση του I_{60} .
- Η επίδραση της εφαρμογής φερρίτη εντοπίζεται μετά τα 10ns αφήνοντας ανεπηρέαστες τις τιμές του μέγιστου ρεύματος και χρόνου ανόδου.

Στάδιο τρίτο: DITO, +4kV, καλώδια ίδιου μήκους με αυτό του κατασκευαστή αλλά διαφορετικών διαμέτρων, δύο φερρίτες από κάθε υλικό (διάμετροι 4.90mm και 6.30mm), με μια περιέλιξη του καλωδίου, τοποθέτηση φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης.

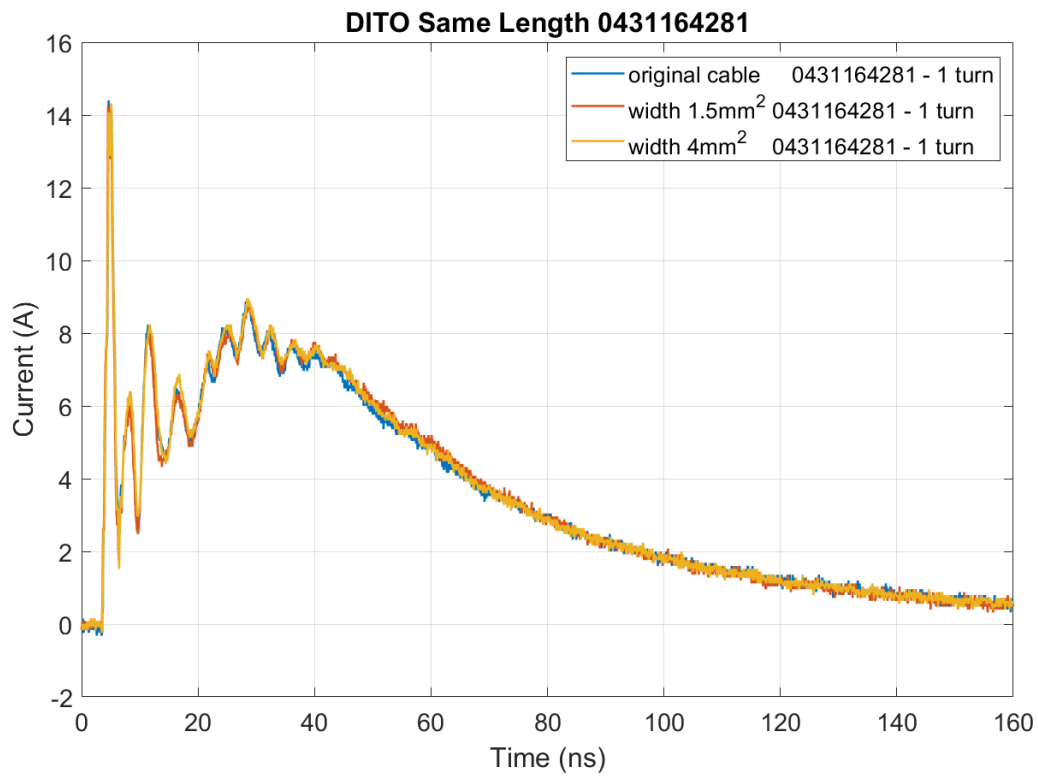
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μεταξύ καλωδίων ίδιου μήκους. Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του ίδιου προϊόντος οι κυματομορφές σχεδόν ταυτίζονται.



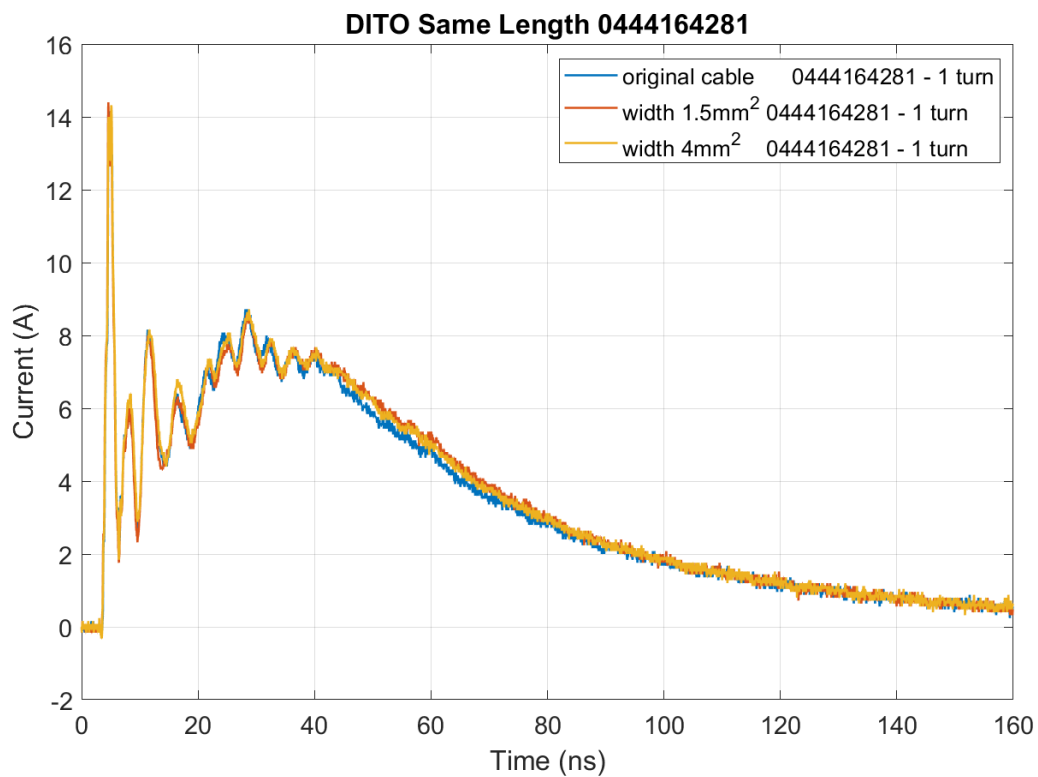
Σχήμα 4.39 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους



Σχήμα 4.40 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους



Σχήμα 4.41 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους

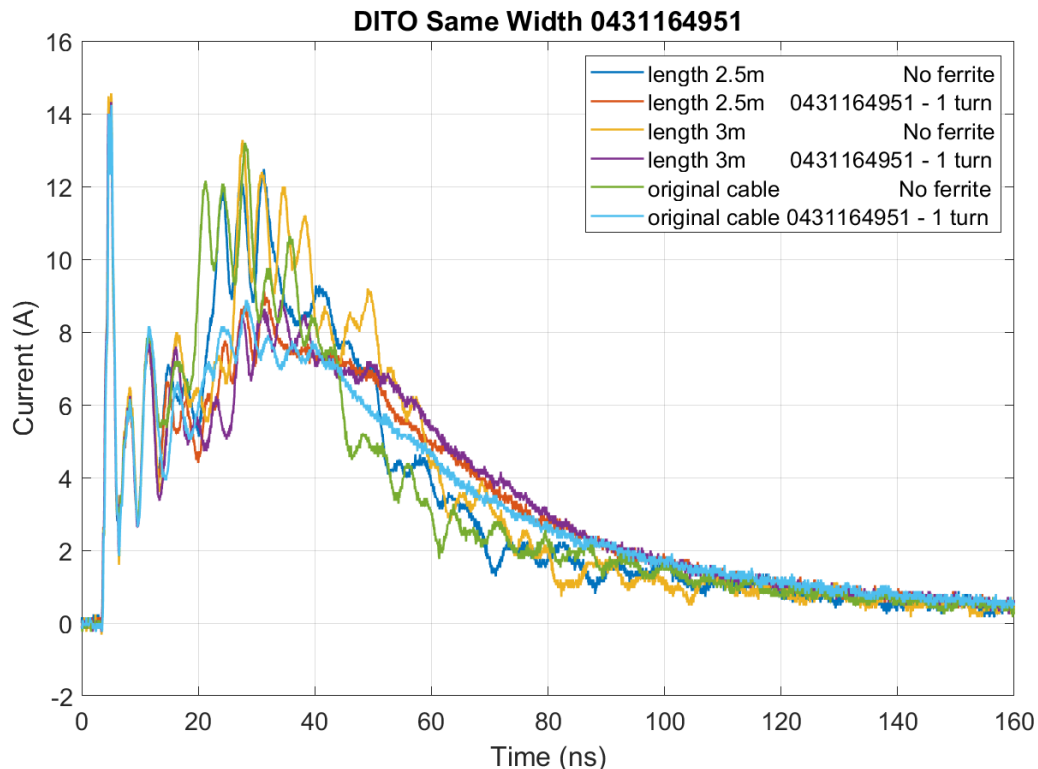


Σχήμα 4.42 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους, διαφορετικού πάχους

Παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του ίδιου προϊόντος οι κυματομορφές σχεδόν ταυτίζονται. Οι όποιες διαφορές των κυματομορφών του ρεύματος για καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου μήκους και διαφορετικού πάχους εντοπίζονται μεταξύ 40ns και 65ns.

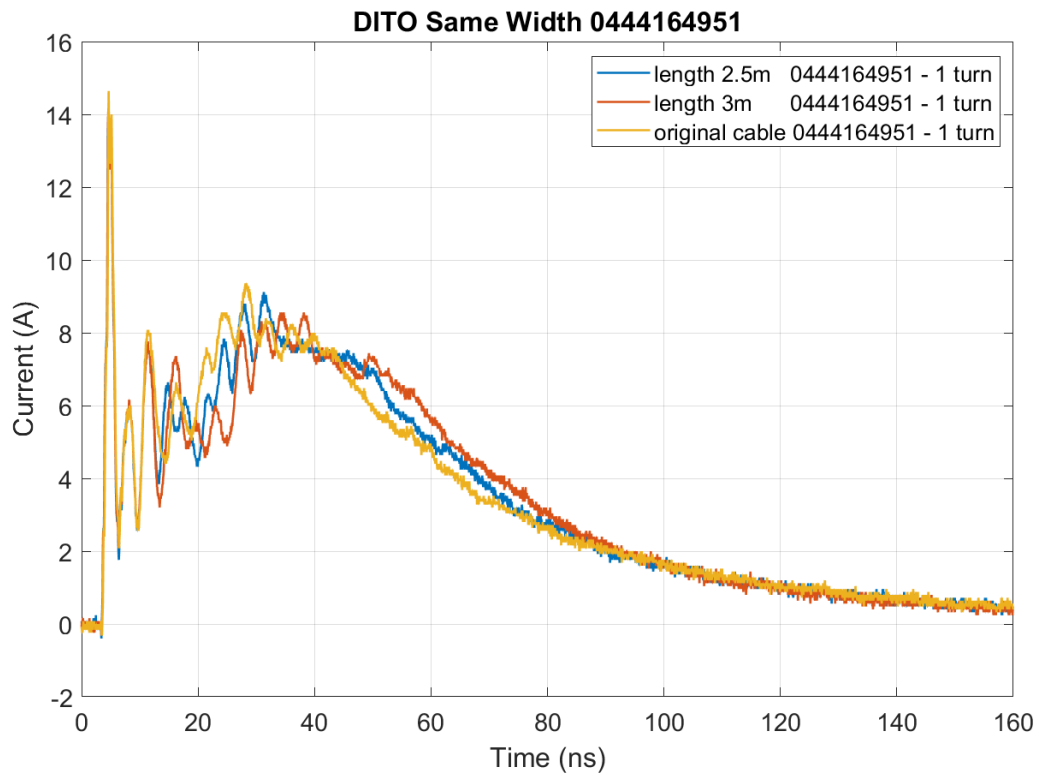
Στάδιο τέταρτο: DITO, +4kV, καλώδια ίδιου πάχους με αυτό του κατασκευαστή αλλά διαφορετικών μηκών, δύο φερρίτες από κάθε υλικό (διάμετροι 4.90mm και 6.30mm) , με μια περιέλιξη του καλωδίου, τοποθέτηση φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μεταξύ καλωδίων ίδιου πάχους, αλλά διαφορετικού μήκους. Παρατηρείται η μετατόπιση των κυματομορφών του ρεύματος των διαφορετικών καλωδίων χωρίς εφαρμογή φερριτών (κυματομορφές αναφοράς). Η συμπεριφορά των φερριτών και στις τρεις περιπτώσεις είναι όμοια. Εξαιτίας της εφαρμογής τους περιορίζεται το φαινόμενο ringing ρυθμίζοντας το I_{peak2} .

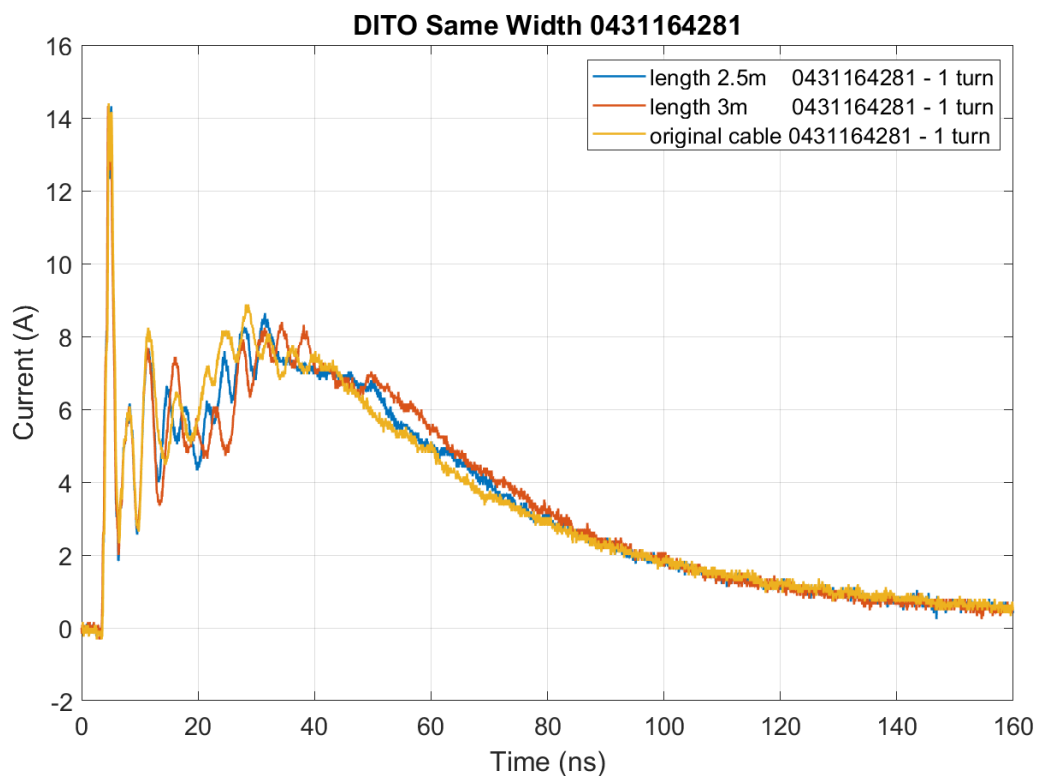


Σχήμα 4.43 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους

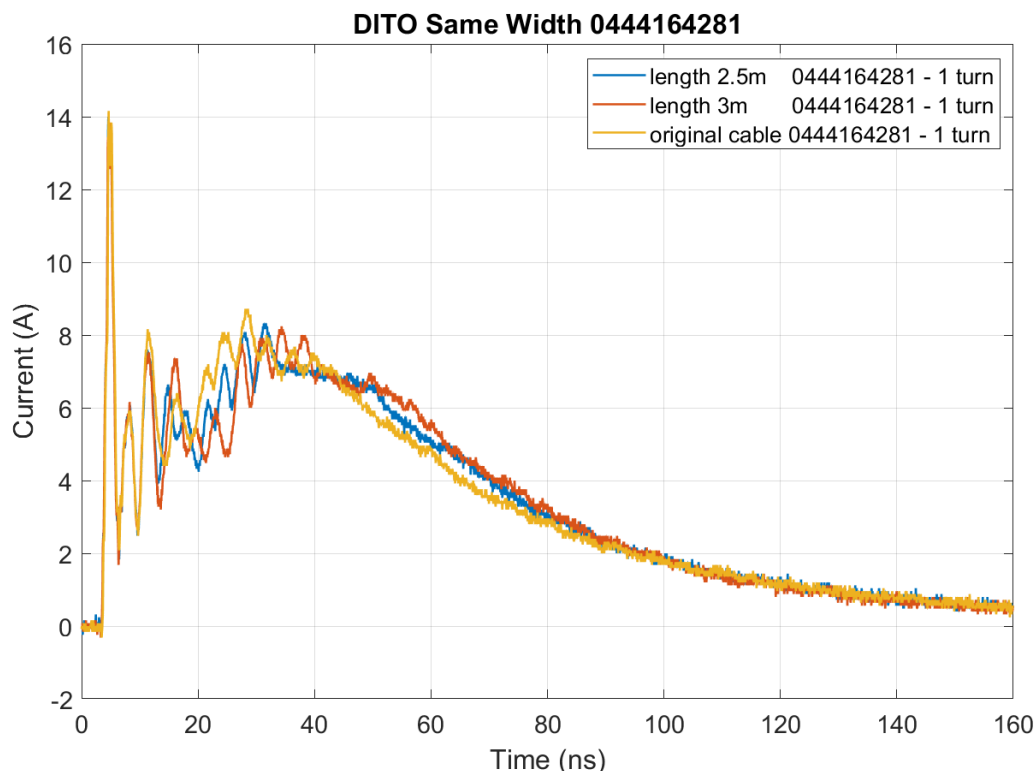
Στα επόμενα διαγράμματα δεν παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τριών καλωδίων χωρίς φερρίτη.



Σχήμα 4.44 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164951 (4.90mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους



Σχήμα 4.45 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους

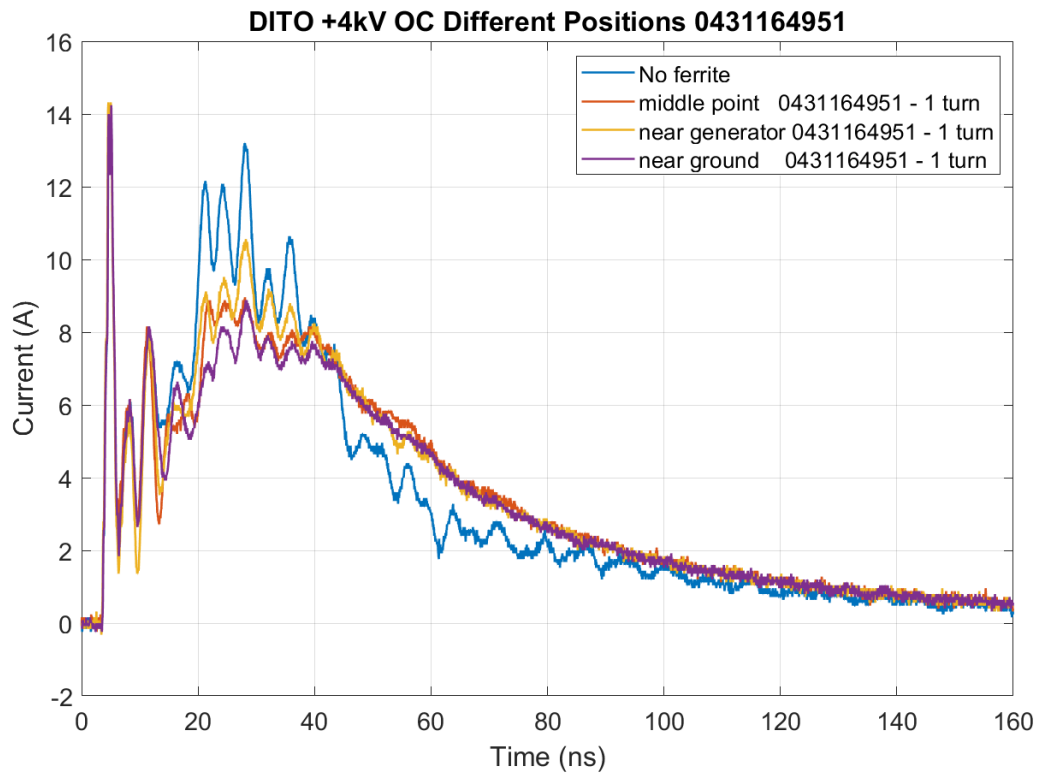


Σχήμα 4.46 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε καλώδια επιστροφής ρεύματος ίδιου πάχους, διαφορετικού μήκους

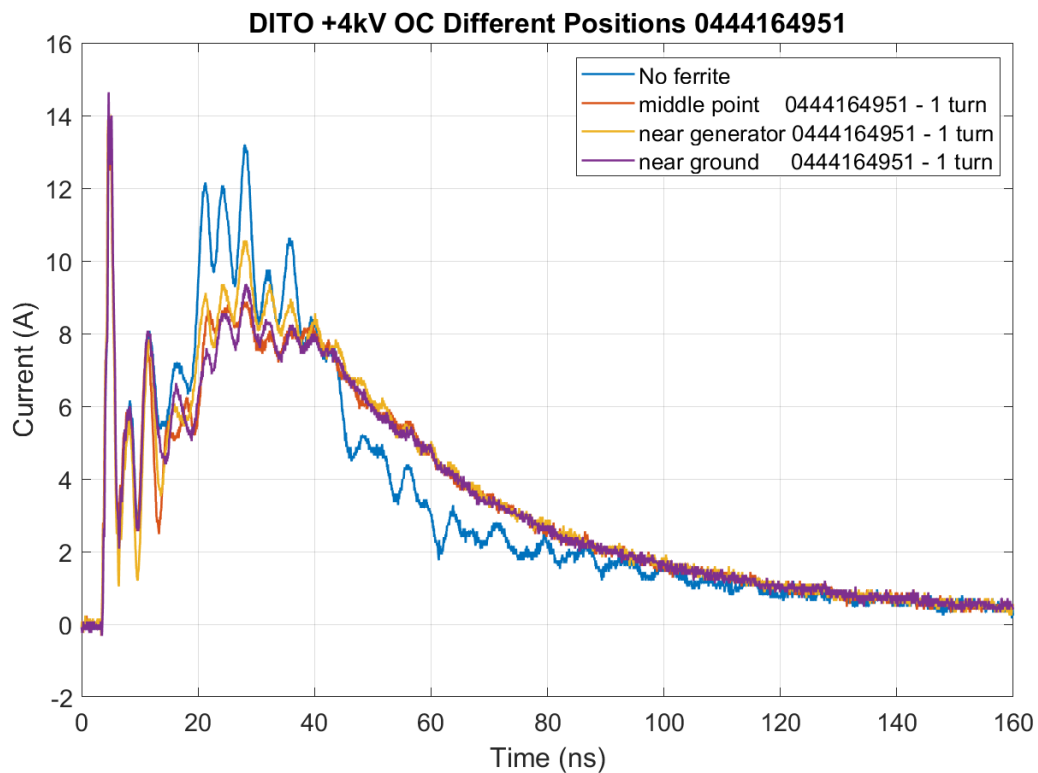
Στάδιο πέμπτο: DITO, +4kV, καλώδιο κατασκευαστή, δύο φερρίτες από κάθε υλικό (διάμετροι 4.90mm και 6.30mm) , με μια περιέλιξη του καλωδίου, τοποθέτηση φερρίτη σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, για εφαρμογή του ίδιου φερρίτη σε διαφορετικές θέσεις. Η σύγκριση των κυματομορφών για όλους τους διαφορετικούς φερρίτες που χρησιμοποιήθηκαν μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η καταστολή του φαινομένου γίνεται εντονότερη, με την τοποθέτηση του φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος που συνδέεται με το σταθερό σημείο γείωσης. Η εφαρμογή του φερρίτη στην μεσαία θέση παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ η τοποθέτηση του στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος φαίνεται να οδηγεί στην πιο ήπια καταστολή του φαινομένου.

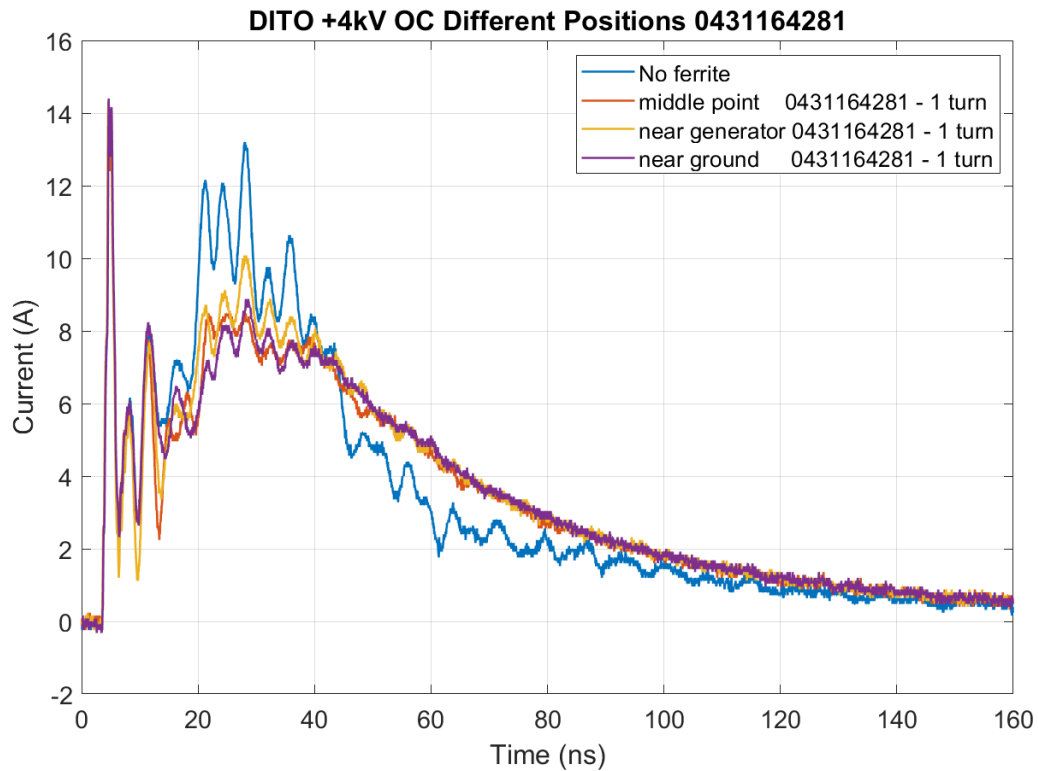
Παρατηρείται ακόμα η ανύψωση της τιμής του ρεύματος μετά τα 45ns και γύρω από την περιοχή των 60ns. Αυτή η συμπεριφορά έχει αποδοθεί στην εφαρμογή φερρίτη. Στις παρακάτω κυματομορφές δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές που να αφορούν τη συμπεριφορά αυτή και συνεπώς μπορούμε με αρκετή ασφάλεια να συμπεράνουμε ότι η θέση εφαρμογής του φερρίτη δεν επηρεάζει αυτήν την άνοδο. Αυτή η παρατήρηση διασταυρώνεται και από τους Πίνακες 4.6 και 4.14.



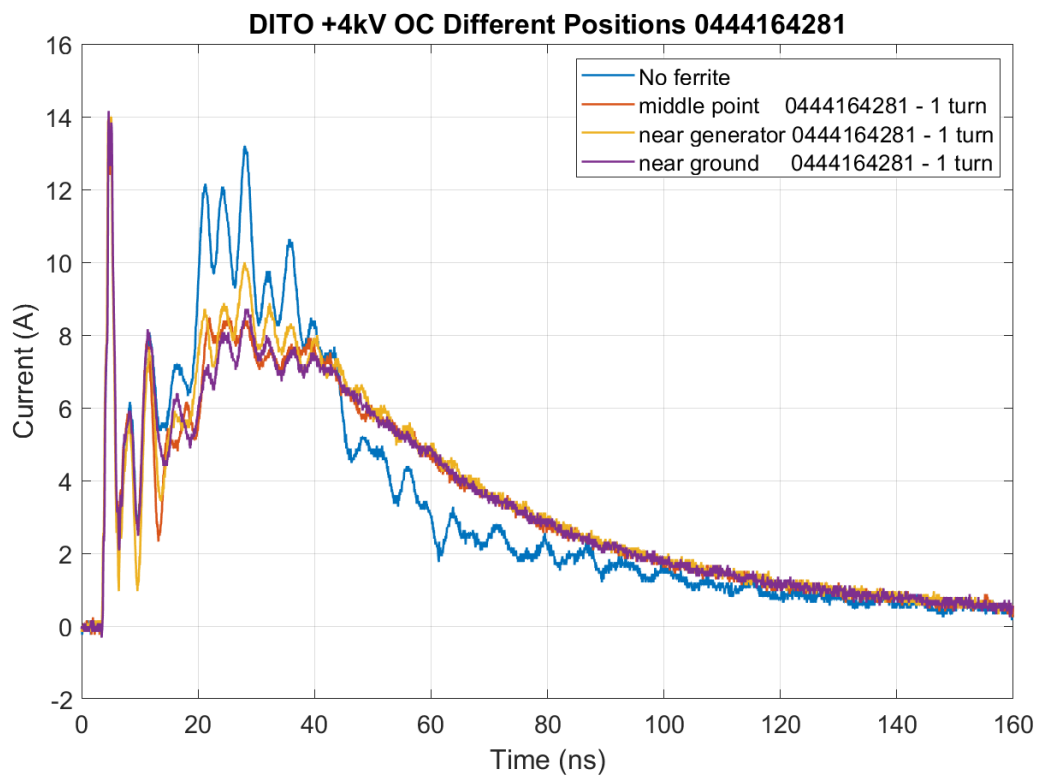
Σχήμα 4.47 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164951 (4.90mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος



Σχήμα 4.48 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164951 (4.90mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος



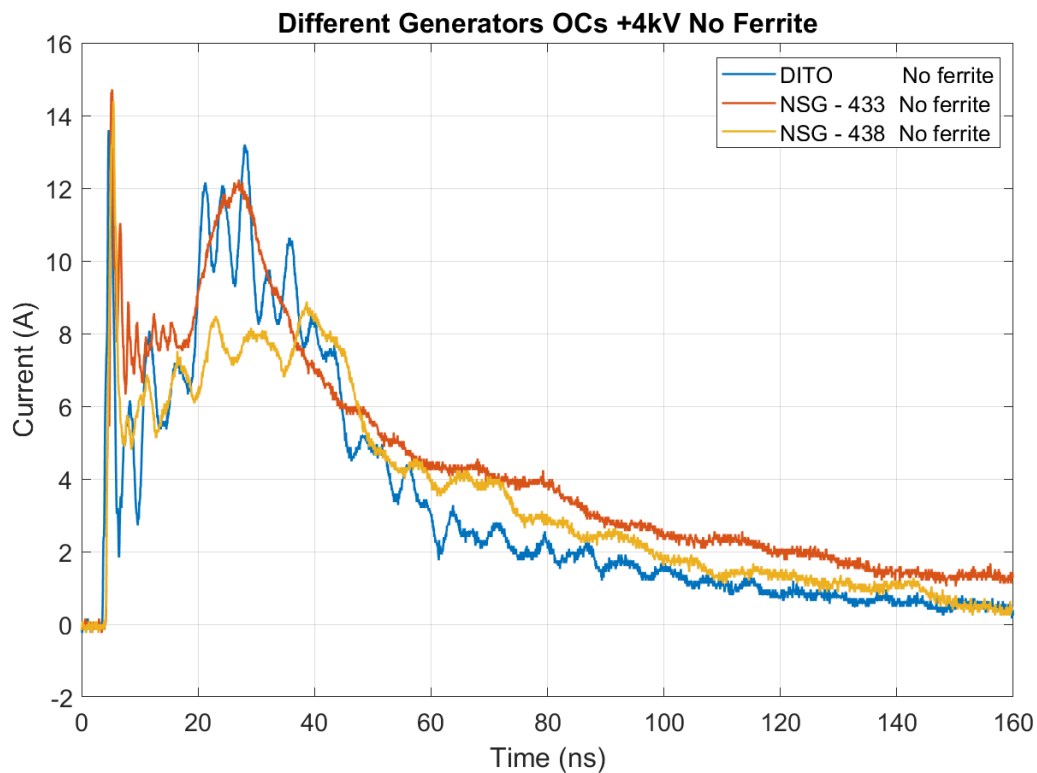
Σχήμα 4.49 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0431164281 (6.30mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος



Σχήμα 4.50 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος με την εφαρμογή φερρίτη 0444164281 (6.30mm) σε διαφορετικές θέσεις επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος

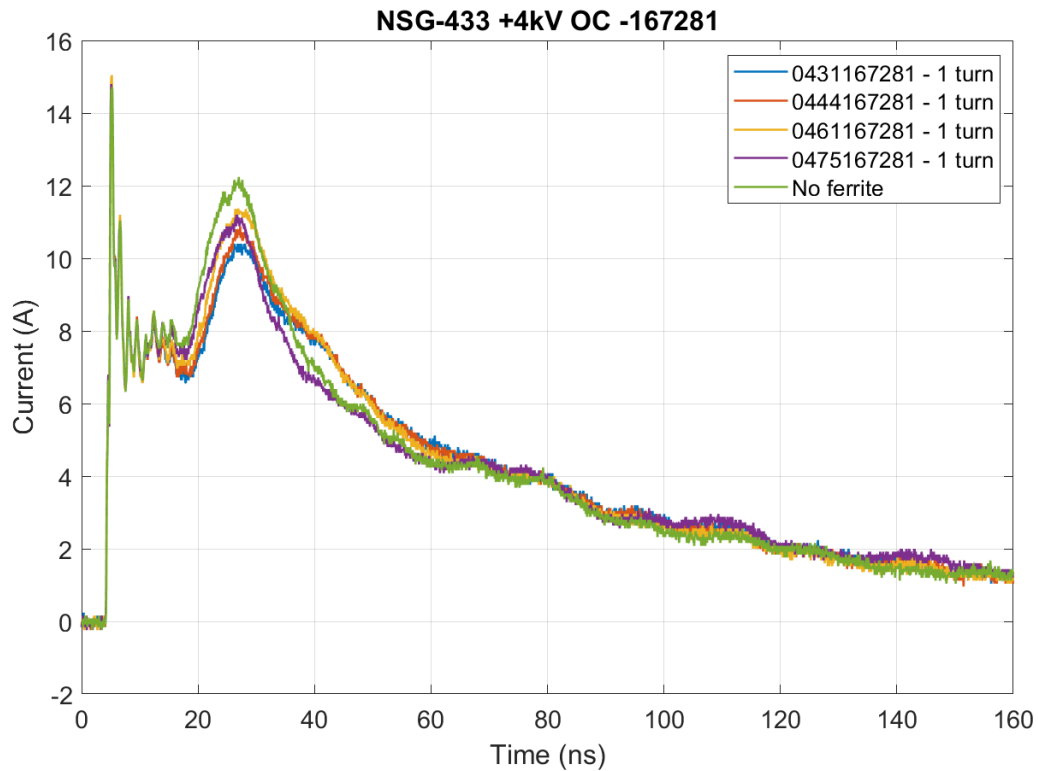
Στάδιο έκτο: NSG-433 & NSG-438, +4kV, καλώδια κατασκευαστή, ένας φερρίτης από κάθε υλικό, με μια περιέλιξη του καλωδίου, τοποθέτηση φερρίτη στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης.

Αρχικά παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα των κυματομορφών των τριών γεννητριών χωρίς την εφαρμογή φερρίτη. Συγκριτικά οι τρεις γεννήτριες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς την παραγόμενη κυματομορφή του ρεύματος. Συγκεκριμένα γύρω από την δεύτερη κορυφή εντοπίζονται σημαντικές διαφορές, η οποίες προφανώς οφείλονται στα διαφορετικά εσωτερικά κυκλώματα, με την DITO να επιδεικνύει τις περισσότερες και σημαντικότερες διακυμάνσεις. Η γεννήτρια NSG-433 παρότι τίθεται εκτός προδιαγραφών ως προς την παράμετρο I_{peak2} επηρεάζεται ελάχιστα από το φαινόμενο ringing σε αντίθεση με την NSG-438 η οποία βρίσκεται μεν εντός προδιαγραφών για όλες τις παραμέτρους αλλά επηρεάζεται εμφανώς από το φαινόμενο.

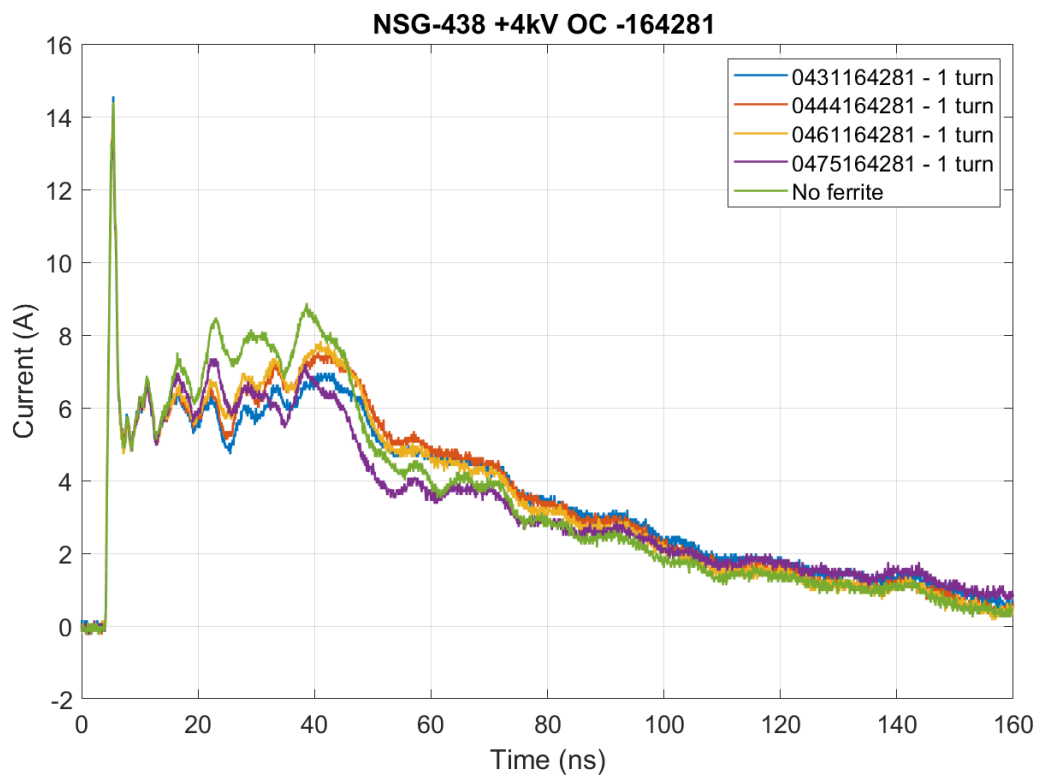


Σχήμα 4.51 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος των γεννητριών NSG-433, NSG-438 και DITO χωρίς εφαρμογή φερρίτη

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των κυματομορφών ρεύματος κάθε γεννήτριας χωρίς και με την εφαρμογή φερρίτη. Παρατηρείται πως αντίστοιχα με την DITO τη σημαντικότερη ρύθμιση του φαινομένου ringing επιφέρει η εφαρμογή φερριτών των υλικών 31 και 44.



Σχήμα 4.52 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος της γεννήτριας NSG-433 με την εφαρμογή ferrite 0431167281 (9.85mm & 6.30mm)



Σχήμα 4.53 Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος της γεννήτριας NSG-438 με την εφαρμογή ferrite 0431164281 (6.30mm)

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη και Συμπεράσματα

Η επίδραση της εφαρμογής σφικτήρα φερρίτη στην κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μελετήθηκε εκτενώς μέσω πειραμάτων. Αφορμή για την συγκεκριμένη έρευνα αποτέλεσε η νέα, υπό αναθεώρηση, έκδοση του Προτύπου 61000-4-2 [29], το οποίο σχετίζεται με τις απαιτήσεις ατρωσίας και τις μεθόδους δοκιμών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που υπόκεινται σε εκφορτίσεις στατικού ηλεκτρισμού. Στην προτεινόμενη έκδοση [29] αντικαταστάθηκε η παράμετρος που προσδιορίζει την απαίτηση για την τιμή του ρεύματος στα 30ns (με αφετηρία χρόνου την χρονική στιγμή κατά την οποία το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά τιμή ίση με το 10% της μέγιστης τιμής του) με μια νέα παράμετρο – απαίτηση που εστιάζει στην μέγιστη τιμή του ρεύματος μεταξύ 10ns – 40ns (ίδια αφετηρία χρόνου με προηγούμενως). Πολλές από τις εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες, έχοντας κατασκευαστεί κατά την ισχύ της έκδοσης του 2008 [28], δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της νέας, υπό αναθεώρηση, έκδοσης του Προτύπου. Βασικό κίνητρο της μελέτης αποτέλεσε η εύρεση μια οικονομικής και πρακτικής λύσης, την οποία, τα διάφορα εργαστήρια που ασχολούνται με δοκιμές ατρωσίας και των οποίων οι γεννήτριες αδυνατούν να συμμορφωθούν στις νέες απαιτήσεις, θα μπορέσουν να εφαρμόσουν έτσι ώστε αυτές να τεθούν εντός των πιθανών, νέων προδιαγραφών του Προτύπου.

Πραγματοποιήθηκε σειρά πειραματικών δοκιμών, αξιοποιώντας σφικτήρες φερρίτη, προκειμένου να ρυθμιστεί κατάλληλα η παραγόμενη κυματομορφή ρεύματος από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Έχοντας παρουσιάσει και σχολιάσει τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα του πειράματος.

- Η εφαρμογή φερρίτη επί του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης καταστέλλει ικανοποιητικά το φαινόμενο ringing (αποσβεννύμενες ταλαντώσεις) όταν λαμβάνονται υπόψιν οι συχνότητες λειτουργίας των φερριτών. Οι φερρίτες των υλικών 31 και 44 οδήγησαν στην καλύτερη καταστολή του φαινομένου, ενώ φερρίτες των υλικών 61 και 75 όταν εφαρμόστηκαν έφεραν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Η εφαρμογή φερρίτη όποτε οδηγεί σε εξασθένηση του φαινόμενο ringing φαίνεται να προκαλεί αύξηση στις τιμές του ρεύματος γύρω από τα 60ns.
- Η περιέλιξη του καλωδίου επιστροφής εντός του φερρίτη για παραπάνω από μια σπείρα προκαλεί συχνά ανεπιθύμητα αποτελέσματα, λόγω της μεγάλης σβέσης της κυματομορφής του ρεύματος. Ενδείκνυται μόνο όταν η εφαρμογή του φερρίτη με μία μόνο περιέλιξη δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.
- Η τιμή του ρεύματος πρώτης κορυφής καθώς και ο χρόνος ανόδου δεν επηρεάζονται στο ελάχιστο από την εφαρμογή σφικτήρα φερρίτη. Γενικά οι επιπτώσεις της εφαρμογής φερριτών παρατηρούνται μετά τα 10ns στην κυματομορφή του ρεύματος.

- Η εφαρμογή φερρίτη επιδρά με ανάλογο τρόπο σε διαφορετικά επίπεδα τάσης, γεγονός που δεν εκπλήσσει καθώς η γραμμικότητα του φαινομένου είναι γνωστή.
- Η επίδραση της εφαρμογής φερρίτη δεν επηρεάζεται από την διατομή του καλωδίου επιστροφής ρεύματος.
- Η εφαρμογή του ίδιου πυρήνα φερρίτη προκαλεί αντίστοιχες μεταβολές στις κυματομορφές του ρεύματος για καλώδια διαφορετικού μήκους.
- Η ιδανικότερη θέση εφαρμογής των πυρήνων φερρίτη είναι αυτή στο άκρο του καλωδίου επιστροφής ρεύματος που είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης, ενώ η τοποθέτηση του «κοντά» στη γεννήτρια μειώνει την αποδοτικότητα του.
- Η ίδια η εφαρμογή του φερρίτη ευθύνεται για την άνοδο των τιμών του ρεύματος μετά τα 45ns και γύρω από τα 60ns, ενώ η θέση εφαρμογής του δεν επηρεάζει αυτήν την άνοδο
- Η εφαρμογή σφικτήρων φερρίτη έχει παρόμοια, ως προς τη μορφή της κυματομορφής, επίδραση σε διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας είναι διαφωτιστικά ως προς την επίδραση που επιφέρει η εφαρμογή φερριτών επί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στην κυματομορφή του ρεύματος. Σημαντικό είναι να διερευνηθεί περεταίρω η επίδραση της ίδιας εφαρμογής με χρήση γεννητριών που τροφοδοτούνται από το δίκτυο, εφόσον βεβαίως αυτές παρουσιάζουν αδυναμία συμμόρφωσης ως προς τις νέες απαιτήσεις της νέας, υπό αναθεώρησης έκδοσης του Προτύπου. Εν κατακλείδι θα συνέβαλε στην εξέλιξη της έρευνας γύρω από τη χρήση φερριτών μια μελέτη στην οποία εξετάζεται η επίδραση εφαρμογής φερριτών, για επιλεγμένους φερρίτες, ιδανικά των υλικών 31 και 44, στην σύνθετη αντίσταση του καλωδίου επιστροφής ρεύματος της γεννήτριας DITO όταν αυτό είναι συνδεδεμένο με το σταθερό σημείο γείωσης επί των τοιχωμάτων του κλωβού Faraday. Μια τέτοια έρευνα θα ήταν αρκετά διαφωτιστική και θα συνέβαλε στην περεταίρω κατανόηση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας.

Βιβλιογραφία

- [1] Henry W.OTT,” Electromagnetic Compatibility Engineering”, John Wiley & Sons Inc. Publication, August 2009.
- [2] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [3] LearnEMC. “Introduction to EMC”. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://learnemc.com/introduction-to-emc>
- [4] Clayton R. Paul, “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, John Wiley & Sons Inc. Publication, Second Edition, 2009.
- [5] Δελημπαλταδάκη Β. Φανή, “Διακρίβωση εξοπλισμού για δοκιμές απρωσίας σε βυθίσεις, σύντομες διακοπές και διακυμάνσεις τάσης”, Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος 2017, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [6] Power Electronic Tips. “EMC/EMI design and the use of board-mount dc/dc converters”. Jeff Shepard, 14 January 2021. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.powerelectronicstips.com/emc-emi-design-and-the-use-of-board-mount-dc-dc-converters-faq/>
- [7] Cadence System Analysis. EMI Types and Coupling Methods.2022. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-emi-types-andcoupling-methods>
- [8] Reto B. Keller, Design for electromagnetic compatibility - In a nutshell, Springer, 1st Edition, 2023
- [9] Πάυλος Σ. Κατσιβέλης, “Συμβολή Στη Μελέτη Της Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης”, Διδακτορική Διατριβή, Νοέμβριος 2011, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [10] All About Circuits. EMC Basics: Common Mode vs. Differential Mode Noise, April 2022. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.allaboutcircuits.com/industry-white-papers/emc-basics-common-mode-vs-differential-noise/>
- [11] BrainKart. Electrostatic Induction. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.brainkart.com/article/Electrostatic-induction_529/
- [12] Χρύσανθος Ν. Πουλιάσης, “Μέθοδοι ανάκτησης Συνάρτησης Μεταφοράς Κυκλώματος – Σχεδίαση γεννήτριας παραγωγής ρεύματος ESD”, Διπλωματική εργασία, Σεπτέμβριος 2006, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [13] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “ Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.

- [14] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems”
διαθέσιμο στη διεύθυνση:
<http://www.esdjournal.com/techpapr/sfowler/esd97/esd97.html>
- [15] Pankaj Sharma, Gagan Kumar Bhargava, Sumit Bhardwaj, Indu Sharma, “Engineered Ferrites and Their Applications”, Springer, 2023
<https://doi.org/10.1007/978-981-99-2583-4>
- [16] Ali Ghasemi, “Magnetic Ferrites and Related Nanocomposites”, Elsevier, 2022
- [17] E. C. Snelling, “Soft Ferrites: Properties and Applications”, Pliffe Books, 1969
- [18] Ηλίας Α. Τσιαχρήστος, “Προσδιορισμός της Επιτρεπτότητας και Διαπερατότητας Μαγνητοηλεκτρικών Υλικών με τη χρήση Παραμέτρων Σκέδασης”, Διπλωματική Εργασία, Οκτώβριος 2014, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [19] Ü. Özgür, Y. Alivon, and H. Morkoç (2009). Microwave ferrites, part 1: fundamental properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 20(9), 789-834. Διαθέσιμο στη διεύθυνση:
<https://doi.org/10.1007/s10854-009-9923-2>
- [20] Sabrina Arcaro, Janio Venturini, “Modern Ferrites in Engineering: Synthesis, Processing and Cutting Edge Applications”, Springer, 2021
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-78988-6>
- [21] Aftab S, Nawaz T, Bilal Tahir M. Recent development in shape memory-based perovskite materials for energy conversion and storage applications. *Int J Energy Res.* 2021; 45(15): 20545-20558. Διαθέσιμο στη διεύθυνση:
<https://doi.org/10.1002/er.7151>
- [22] Alex Goldman, “Modern Ferrite Technology”, 2nd Edition, Springer, 2006 .
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-29413-1>
- [23] EPCOS Data Book “Ferrites and Accessories” 2013
- [24] Fair-Rite Products Corp. Fair-Rite Products Catalog, 15th ed. 2007
- [25] Aldrick Limjoco, Jefferson Eco, Ferrite Beads Demystified. *Analog Dialogue* 50-02, February 2016. Διαθέσιμο στη διεύθυνση:
<https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/ferrite-beads-demystified.html>
- [26] EMC Directory. What is a Ferrite Clamp? .2024. διαθέσιμο στη διεύθυνση:
<https://www.emc-directory.com/community/what-is-the-ferrite-clamp>
- [27] Datasheet of the ferrite cores Fair Rite. διαθέσιμο στη διεύθυνση:
<https://fairrite.com/kits/greatest-hits-kit/>
- [28] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test,” Edition 2.0, December 2008

- [29] 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.
- [30] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang and O. Fujiwara, "Influence of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations in Contact Discharge Calibration Waveform from ESD Generator," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 2023, September. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope57790.2023.10274328>
- [31] 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, Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://doi.org/10.23919/URSIGASS57860.2023.10265511>
- [32] 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
- [33] Datasheet of the ferrite cores Fair Rite, part number 2643625002 and 2643806402:
https://www.fairrite.com/product_datasheet/PN2643625002.html,
https://www.fairrite.com/product_datasheet/PN2643806402.html
- [34] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang and O. Fujiwara, "Suppression Effect of Ringing in Contact Discharge Waveform from Two Different ESD Generators via Ferrite Core Attached Return Current Cable," 2024 IEEE Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity: EMC Japan / Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Japan/APEMC Okinawa), Ginowan, Okinawa, Japan, 2024, pp. 357-360, doi: 10.23919/EMCJapan/APEMCOkinaw58965.2024.10584971.
- [35] Y. Tozawa, T. Ishida, O. Fujiwara, "Effects and Spectrum Factors of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations of Contact Discharge Current Waveform in Calibration Measurement of ESD Generator," The Papers of Technical Meeting on Electromagnetic Compatibility, IEE Japan, EMC-23-003, February 2023 (in Japanese).
- [36] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, O. Fujiwara: "Influence of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations in Contact Discharge Calibration Waveform from ESD Generator," Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe 2023, Kraków, Poland, September 2023.

- [37] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, O. Fujiwara: “Effect of Return Current Cable in Three Different Calibration Environments on Ringing Damped Oscillations of Contact Discharge Current Waveform from ESD Generator,” IEICE Transaction
- [38] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, O. Fujiwara: “Reduction Effect on Charging Cable Arrangement of Ringing Damped Oscillations in Calibration Waveform of Discharge Current from ESD Generator,” IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 143, No.9, pp.292- 300 (2023-09) (in Japanese).
- [39] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, O. Fujiwara, “Consideration and Cause Validation of Cable Resonance on Ringing Damped Oscillations of Contact Discharge Calibration Current Waveform from ESD Generator,” The Papers of Technical Meeting on Electromagnetic Compatibility, IEE Japan, EMC-23-049, October 2023 (in Japanese).
- [40] T. Adachi, N. Yamamoto, Y. Taka and O. Fujiwara, “Dependence of Discharge Current Waveform on Arrangement of ESD-Gun,” IEICE Transactions on Communications, Vol. J92-B, No.6, pp.959-962, 2009 (in Japanese).
- [41] Y. Taka and O. Fujiwara, “Variations in Discharge Current Waveforms and its Power Spectra Injected from Contact Discharges of ESD-Gun with Different Arrangements,” IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 131, No.5, pp.384-388, 2011 (in Japanese).
- [42] J. Yousaf, J. Shin, R. Leqian, W. Nah, J. Youn, D. Lee, C. Hwang, “Effect of ESD generator ground strap configuration on ESD waveform,” Proc . 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), June 2017.
- [43] https://product.tdk.com/ja/search/emc/emc/clamp/info?part_no=ZCAT3 035-1330 (accessed September 21 2023).
- [44] MD 103 ESD target set, user manual. Διαθέσιμο στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνίου.
- [45] Άνδρεας Κ. Κοτσλάρι “Μελέτη της επίδρασης φερριτών στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση μοντέλων προσομοίωσης”, Διπλωματική εργασία, Ιούλιος 2024, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.