

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Μελέτη της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου γείωσης κατά την δοκιμή ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Β. ΜΑΣΤΟΡΗ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Μελέτη της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου γείωσης κατά την δοκιμή ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Β. ΜΑΣΤΟΡΗ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Ιουνίου 2025.

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Χρήστος Α. Χριστοδούλου

Καθηγητής ΕΜΠ

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αντώνιος Αντωνόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής

ЕМП

3

Αθήνα, Ιούνιος, 2025

••••••

Ελένη Β. Μάστορη

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

Copyright © Ελένη Β. Μάστορη, 2025. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την επίδρασης του περιβάλλοντος μέτρησης (set up) και της διάταξης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος κατά τη διάρκεια δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής. Στόχος της ήταν να αξιολογηθεί πώς το μήκος, η διάταξη και η τοποθέτηση του καλωδίου επιστροφής επιδρούν στην κυματομορφή του ρεύματος και στο αντίστοιχο φάσμα συχνοτήτων, δεδομένου ότι το ισχύον Πρότυπο IEC 61000-4-2 δεν προσδιορίζει αυστηρά αυτές τις παραμέτρους κατά τη δοκιμή, σε αντίθεση με τη διαδικασία διακρίβωσης.

Το θεωρητικό μέρος της εργασίας καλύπτει βασικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ατρωσίας καθώς και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αναλύοντας έννοιες όπως οι αποσβεννυμένες ταλαντώσεις και η εμπέδηση των καλωδίων. Παρουσιάζονται επίσης τα κρίσιμα σημεία του Προτύπου IEC 61000-4-2, καθώς και οι αλλαγές μεταξύ της παλαιότερης και της νέας έκδοσης, ώστε να τεθούν τα απαραίτητα θεμέλια για την διερεύνηση τόσο μέσω πειραμάτων όσο και μέσω προσομοιώσεων.

Η μελέτη συνδυάζει πειραματική διερεύνηση με χρήση δύο διαφορετικών ESD γεννητριών (EMTEST / DITO και Schlöder / SESD 230), καθώς και προσομοιώσεις μέσω του λογισμικού CST Studio Suite 2024. Διαπιστώνεται ότι η περιοχή μεταξύ 40 MHz και 200 MHz αποτελεί την πιο ευαίσθητη σε εξωτερικές μεταβολές — όπως το μήκος, η γεωμετρία και η διάταξη του μονοπατιού επιστροφής — καθώς και σε παράγοντες όπως η επιλογή καλωδίου. Καθίσταται επίσης σαφές ότι, πέραν της επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζουν και τα χαρακτηριστικά του ίδιου του καλωδίου, όπως και της γεννήτριας που χρησιμοποιείται, με τις διαφορές στον εσωτερικό σχεδιασμό των γεννητριών να επηρεάζουν τα αποτελέσματα στις περιοχές κάτω των 40 MHz και άνω των 200 MHz.

Συνολικά, καταδεικνύεται ότι η διαδρομή επιστροφής του ρεύματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ακρίβεια και την αναπαραγωγιμότητα των ESD δοκιμών. Η εμβάθυνση στην κατανόηση των σχετικών παραμέτρων συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ηλεκτρονικών διατάξεων και στην καλύτερη προστασία τους απέναντι σε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα.

<u>Λέξεις-κλειδιά</u>: Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD), διαδρομή επιστροφής, εμπέδηση, καλώδιο επιστροφής, συντονισμός, CST Studio Suite, Πρότυπο IEC 61000-4-2, Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC), δοκιμή ESD.

Abstract

This thesis examines the influence of the measurement environment and the arrangement of the return current cable during Contact Discharge Electrostatic Discharge testing. Its aim was to evaluate how the length, arrangement, and placement of the return cable affect the current waveform and the corresponding frequency spectrum, given that the current IEC 61000-4-2 Standard does not strictly specify these parameters during testing, unlike the calibration procedure.

The theoretical part of the thesis covers fundamental principles of electromagnetic compatibility and immunity, as well as electrostatic discharge, analyzing concepts such as ringing and cable impedance. It also presents critical points of the IEC 61000-4-2 Standard, as well as the changes between the older and the new version, in order to establish the necessary foundation for the experimental and simulation investigation.

The study combines experimental investigation using two different ESD generators (EMTEST / DITO and Schlöder / SESD 230), as well as simulations through the CST Studio Suite 2024 software. It is found that the frequency range between 40 MHz and 200 MHz is the most sensitive to external variations — such as the length, geometry, and arrangement of the return path — as well as factors like cable selection. It also becomes clear that, beyond the effect of the return cable arrangement, critical roles are played by the characteristics of the cable itself and the generator used, with differences in the internal design of the generators affecting results in the frequency regions below 40 MHz and above 200 MHz.

Overall, it is demonstrated that the return current path is a critical factor for the accuracy and reproducibility of ESD tests. Deepening the understanding of the related parameters contributes to optimizing the design of electronic devices and better protecting them against electromagnetic phenomena.

Keywords: Electrostatic Discharge (ESD), return path, impedance, return cable, resonance, CST Studio Suite, IEC 61000-4-2 Standard, Electromagnetic Compatibility (EMC), ESD testing.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτείται και το πέρας των σπουδών μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όσους στάθηκαν δίπλα μου σε αυτή τη σημαντική διαδρομή.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου εκτίμηση στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στον κ. Παναγιώτη Κ. Παπασταμάτη, υποψήφιο διδάκτορα και άμεσο συνεργάτη στην παρούσα εργασία, για την πρόθυμη βοήθεια, την πολύτιμη υποστήριξη και την υπομονή με την οποία με καθοδήγησε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε ουσιώδης και ανεκτίμητη.

Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου, την μητέρα μου και τον αδερφό μου, για τις θυσίες και την διαρκή στήριξη τους, τόσο ψυχολογική όσο και οικονομική, τα τελευταία χρόνια. Στη μητέρα μου που ήταν πάντα στο πλάι μου και με την δύναμη της με βοήθησε να φτάσω ως εδώ. Στον πατέρα μου που μέχρι σήμερα παραμένει το πρότυπο μου ως μηχανικός και μου έμαθε τη σημασία του να παράγει κανείς μέσω του έργου του συνολικά για την κοινωνία. Η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσες και όσους συναντηθήκαμε στους διαδρόμους και τα αμφιθέατρα της σχολής, μοιραστήκαμε τις ίδιες ανησυχίες, δεν το βάλαμε κάτω και από κοινού πιστέψαμε ότι μπορεί να πάει κι αλλιώς!

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Πρόλογος1	5
Ευρετήριο Πινάκων1	7
Ευρετήριο Σχημάτων1	9
Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) και Ηλεκτροστατική Εκωόρτιση (ESD)	5
$11 \qquad H \lambda s \kappa \tau_{0} \alpha u \alpha v m \tau \kappa \kappa \tilde{\Sigma} \lambda u \beta \alpha \tau \delta \tau n \tau \alpha \qquad 2$	5
	5
1.1.1 Ορισμοτιματής Ηλεκτοομαννητικής Συμβατότητας	6
1.1.3 Ποότυπα και δοκιμές της FMC	7
1.2 Ηλεκτοοστατική Εκφόρτιση 2	8
1.2 Πακεροστατική Εκφορτιση	8
1.2.2 Τοιβοηλεκτοικό Φαινόμενο	9
1.2.3 Φόρτιση εξ' επαγωγής	1
 1.3 Ηλεκτροστατικής εκφόρτιση και ηλεκτροτεγγικός εξοπλισμισμός 3 	1
1.3.1 Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον ηλεκτροτεγνικό	
εξοπλισμό	1
1.3.2 Προστασία του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού	2
 1.4 Μοντέλα Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	3
1.4.1 Το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (HBM)	5
1.4.2 Το μοντέλο της μηχανής (MM)3	6
1.4.3 Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (CDM)	6
Κεφάλαιο 2: Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD) και επίδραση της διάταξης	7
2.1 Το Ποότυπο 61000-4-2	7
2.2 Φαινόμενο Αποσβεννυμένων Ταλαντώσεων (Ringing)	9
	9
2.2.2 Ringing στις Γεννήτοιες Ηλεκτοοστατικών Εκφορτίσεων	0
2.2.3 Καταστολή Ηλεκτρομαννητικών Διαταραγών και Φερρίτες	0
2.3 Νέα έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2	-1

2.4 Καλώδιο Επιστροφής της Γεννήτριας Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων 43
2.4.1 Καλωδίωση στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα
2.4.2 Εμπέδηση Καλωδίου
2.4.3 Καλώδιο Επιστροφής της Γεννήτριας Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων και Φαινόμενο Ringing45
2.5 Μελέτες της επίδρασης της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής στην κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής
2.5.1 Επίδραση της καταστολής του ringing στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής δύο διαφορετικών ESD γεννητριών με την χρήση φερριτών στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος
2.5.2 Επίδραση της διάταξης του καλωδίου επιστροφής ρεύματος στις ταλαντώσεις με απόσβεση τύπου ringing στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής της διακρίβωσης από γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης 53
Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας
3.1 Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων61
3.1.1 Γεννήτριες Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων
3.1.3. Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Συχνότητας61
3.1.4. Εξασθενητής62
3.1.5. Παλμογράφος
3.2 Η Πειραματική Διάταξη62
3.3 Στάδια Μετρήσεων64
3.4 Επεξεργασία Μετρήσεων68
3.4.2 Δεύτερη Φάση Επεξεργασίας
3.4.3 Τρίτη Φάση Επεξεργασίας73
3.5 Αποτελέσματα Μετρήσεων και Σχολιασμός Κυματομορφών
3.5.1 Πρώτη Φάση Αποτελεσμάτων – DITO και SESD 230 με χρήση του ίδιου καλωδίου για τις τρεις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής
3.5.2 Δεύτερη Φάση Αποτελεσμάτων – DITO κατά τη σύγκριση των τριών διαφορετικών διατάξεων καλωδίου επιστροφής
3.5.3 Τρίτη Φάση Αποτελεσμάτων – SESD 230 κατά τη σύγκριση των τριών διαφορετικών διατάξεων καλωδίου επιστροφής με χρήση του καλωδίου της DITO
3.5.4 Τέταρτη Φάση Αποτελεσμάτων – SESD 230 κατά τη σύγκριση των τριών διαφορετικών διατάξεων καλωδίου επιστροφής ως προς με και χωρίς τη χρήση του πλακέ καλωδίου της

3.5.5 Συμπεράσματα Συγκρίσεων93
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης97
4.1 Το περιβάλλον προσομοιώσεων στο Λογισμικό CST Studio Suite 202497
4.2 Μοντελοποίηση και Παράμετροι Προσομοίωσης97
4.3 Στάδια Προσομοίωσης98
4.4 Λήψη και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων
4.5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός Κυματομορφών
4.5.1 Πρώτη Φάση Αποτελεσμάτων – Διαφορετικά Μήκη Καλωδίου του EUT
4.5.2 Δεύτερη Φάση Αποτελεσμάτων – Διαφορετικές Γεωμετρίες της Τριγωνικής Διάταξης του Καλωδίου Επιστροφής της ESD Γεννήτριας. 112
4.5.3 Τρίτη Φάση Αποτελεσμάτων – Σχετική Απόσταση μεταξύ των δύο Καλωδίων Επιστροφής μέσω Διαφορετικών Διατάξεων
4.5.4 Τέταρτη Φάση Αποτελεσμάτων – Σύγκριση της Ελεύθερης Διάταξης με τις Διαφορετικές Τριγωνικές Διατάξεις του Καλωδίου Επιστροφής της Γεννήτριας
4.6 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων120
Κεφάλαιο 5: Σύνοψη – Συμπεράσματα και Επόμενη Ημέρα
Βιβλιογραφία

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 των διάφορων παραμέτρων του καλωδίου γείωσης κατά την δοκιμή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας / ατρωσίας καθώς και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και των διάφορων μηχανισμών που την προκαλούν. Επίσης, αναλύονται οι επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και παρουσιάζονται τα μοντέλα που προσομοιώνουν το φαινόμενο.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται τόσο το Πρότυπο IEC 61000-4-2 2008 όσο και η νέα, ισχύουσα έκδοση του 2025. Ακόμα αναφέρεται το φαινόμενο ringing που εμφανίζεται στις κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαφόρων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και η συσχέτιση των χαρακτηριστικών του καλωδίου επιστροφής με το εν λόγω φαινόμενο εστιάζοντας στην έννοια της εμπέδησης. Τέλος, παρατίθενται πρόσφατες μελέτες που εξετάζουν διάφορους τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου ringing, καθώς και την επίδραση της διάταξης του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας στο εν λόγω φαινόμενο.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία και η επεξεργασία των μετρήσεων και των κυματομορφών που συλλέχθηκαν. Γίνεται αναφορά στον εργαστηριακό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, περιγράφεται αναλυτικά η διάταξη της δοκιμής και αναπτύσσονται τα επιμέρους στάδια του πειράματος. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε πίνακες και διαγράμματα, συνοδευόμενα από σχολιασμό και συγκριτική ανάλυση.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύονται λεπτομερώς τόσο η διαδικασία προσομοιωσεων όσο και η λήψη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν. Παρουσιάζεται το περιβάλλον προσομοιώσεων του λογισμικού CST Studio Suite 2024 που χρησιμοποιήθηκε, μαζί με τους διάφορους παραμέτρους που ορίστηκαν. Επιπλέον, παρατίθενται οι κυματομορφές ρεύματος και φάσματος που προέκυψαν για μελέτη και σύγκριση αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσομοιωτική και πειραματική διαδικασία, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται προτάσεις για τη μελλοντική εξέλιξη της έρευνας, με αφετηρία τα ευρήματα της παρούσας μελέτης.

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Ενδεικτικές Ηλεκτροστατικές Τάσεις [14]	30
Πίνακας 2.1 Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής	
εκφόρτισης επαφής σύμφωνα με το Πρότυπο [30]	42
Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά των ESD γεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν για τι	5
μετρήσεις	46
Πίνακας 3.1 Συνοπτική Παρουσίαση των Σταδίων των Μετρήσεων	66
Πίνακας 3.2 Συνοπτική Παρουσίαση των Διαφορετικών Σεναρίων Μέτρησης	68
Πίνακας 3.3 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την	
περίπτωση DITO AND SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE και	
μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	75
Πίνακας 3.4 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την	
περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE	και
μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	77
Πίνακας 3.5 Παράμετορι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την	
π_{Eo} ίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE	
LINE EDGE FARADAY και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	
Πίνακας 3.6 Παράμετορι των Κυματομορωών του Ρεύματος στα +4 kV νια την	
$\pi_{\rm E0}(\pi_{\rm H})$ maps and $\pi_{\rm H}$ is the participation of the participation of the theory of theory of theory of theory of theory of theory of theory	
μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	81
μόναξο τους ποσοστιατά μοταρολή	
$\pi_{\rm E0}(\pi_{\rm T})$ mapuncipol two requires of the required of the requirement of the re	
μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	82
Πίνακας 3.8 Παράμετροι των Κυματομοριών του Ρεύματος στα +4 kV για την	
$\pi_{sol}\pi_{tors}$ DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE	
EDGE FAR ADAV AND GROUNDING POINT CENTRE rat ustation touc	
ποσοστισία μεταβολή	84
Πίνακας 3.9 Παράμετροι των Κυματομοριών του Ρεύματος στα +4 kV για την	0-
$\pi_{\rm SO}(\pi_{\rm TO})$ SESD 230 TRIANGLE AND EREF GROUNDING POINT CENTRE	i rai
μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	86 xui
Πίνακας 3.10 Παράμετροι των Κριματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την	
$\pi \sin(\pi \pi \cos \pi)$ SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE I P	NF
EDGE EARADAV AND GROUNDING POINT CENTRE FOR USTREY TONG	NL.
ποποστισία μεταβολή	88
Πίνακας 3.11 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την	00
$\pi coint = 0$	
WITHOUT FLAT CAPIE is an ustation round round contraction $radial hard round $	00
Π	
$\pi coint r control = 0.0000000000000000000000000000000000$	E
FARADAV WITH AND WITHOUT ELAT CADI E ser unge to gove go go go	ت
$r_{A}r_{A}r_{A}r_{A}r_{A}r_{A}r_{A}r_{A}$	02
μεταρολη Πίνακας 2.12 Παράμετροι των Κρυατομορφών του Ρούματος στα ± 0.13 και στο	92
The second set 220 TDIANCI E CDOINDING DON'T CENTRE I NE EDOU	C
REPURIED I SEST 250 I MANULE OROUNDING POINT CENTRE LINE EDG	L'

FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE και μεταξύ τους ποσοστιαία	
μεταβολή	93
Πίνακας 3.14 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND	
WITHOUT FLAT CABLE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή	94
Πίνακας 4.1 Μήκη Καλωδίου Επιστροφής του EUT (mm)	99
Πίνακας 4.2 Συντεταγμένες (Χ, Υ, Ζ) που επιλέχθηκαν προς την διαδρομή των τριώ	ν
διατάξεων1	03
Πίνακας 4.3 Θέσεις γειωμένου άκρου του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας στο γώρο	v 03
Πίνακας 4.4 Διατάξεις Καλωδίου Επιστροφής της Γεννήτριας και Καλωδίου	
Επιστροφής του EUT1	05

Ευρετήριο Σχημάτων

Σγήμα 1.1 Τα 3 βασικά στοιχεία ενός ΕΜC προβλήματος [6]	27
Σχήμα 1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την φόρτιση και την εκφόρτιση των υλ	ικών
[5]	29
Σγήμα 1.3 Τοιβοηλεκτοική Σειοά [15]	
Σγήμα 1. 4 Φαινόμενο ESD που προέκυψε από τριβοηλεκτρισμό [16]	
Σγήμα 1. 5 Φόρτιση εξ' επαγωγής [17]	
Σγήμα 1. 6 Παραδείνματα εκφορτίσεων (a.b.c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (H	BM.
MM και CDM αντίστοιγα) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώμα	ατα
RLC [20]	
Σχήμα 1. 7 RLC – Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης των τριών μοντέλων (Η	HBM.
MM_CDM) για τυπικά κυκλώματα σε σύγκοιση με τετοαγωνικό παλμό TLP [2	01
	35
Σνήμα 1. 8 Μοντέλα FSD (HBM_MM_CDM) και οι τυπικές τους παράμετοοι [201
[22]	_20], 35
[23]	
Σνήμα 2.1 Απλοποιημένο κύκλωμα της γενινήτοιας ηλεκτορστστικών εκφορτίσε	CON
2χημα 2.1 Αποιοτημένο κυκλωμα της γεννητρίας ηπέκτρουτοτικών εκφορτίου σύμφωνα με το Πρότυπο 61000 4.2 [20]	38
Som φωνα με το προτοπο 01000-4-2 [29]	
2χ (μα 2.2 Ισανίκη κοματομορφή του ρεσματός εκφορτισης επαφής στα 4 KV [2	40
Σχήμα 2.5 Παρασείγμα Πημης [51]	40
Σχημα 2.4 Φερριτες [4] Σχήμα 2.5 Ιδανική Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV	
	40
Source (0, 2) Source (0, 2023 [30]	
2χ ημα 2.0 Περιραλλον μετρησης για διακριρωση ESD γεννητρίας σύμφωνα με Ποότυπο IEC 61000-4-2 [30]	το 15
Σ μήμα 2.7 (a) Επίπεδος αρορίτης πορπαρτημένος στο καλ έδιο D (b) Κυλινδους	+J
$2\chi_{1}$ μμα 2.7 (a) Επιπευος φερριτης προσαρτημένος στο καλώσιο D (b) Κοπινορικ α_{2} μοτομάτοι για το καλώδιο P σε αντιπαραβολή με το καλώδι	$\sim D 47$
φερριτής που χρησιμοποιειται για το καλώσιο Β σε αντιπαραρολή με το καλώσι Σνήμα 2.8 Διάταξη μότοη σης διαμοίβωση ESD καιμήτριας και διάταξη για	UD4/
2χ (μα 2.8 Διαταζή μετρήσης για σιακριρωση ESD γεννήτριας και σιαταζή για	0 4 2
κυματομορφη ρευματος εκφορτισης επαφης συμφωνα και με το Προτυπο 61000	0-4-2
$\sum_{i=1}^{n} (1 - i) \sum_{i=1}^{n} (1 - i) \sum_{i$	
2χημα 2.9 Εμπεοηση καλωοιού που "ρλεπεί" η γεννητρία για καλωδία 2 m ρευ	ματος
επιστροφης γειωμενων απο το ενα ακρο	
Σχημα 2.10 (a) Κυματομορφες ρευματων εκφορτισης επαφης στα 4 kV από την	' ESD
γεννήτρια D και ιδανική κυματομορφή IEC μαζί με (b) τα φάσματα του ρεύματ	ος και
το ιδανικό φάσμα ΙΕC	50
Σχήμα 2.11 (a) Κυματομορφές ρευμάτων εκφόρτισης επαφής στα 4 kV από την	ESD
γεννήτρια Β και η ιδανική κυματομορφή ΙΕC μαζί με (b) και (c) τα φάσματα το	ວບ
ρεύματος για τυπική και ελεύθερη διάταξη του καλωδίου φόρτισης αντίστοιχα	
Σχήμα 2.12 Το περιβάλλον διακρίβωσης της ESD γεννήτριας και η διάταξη της	
μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής	54
Σχήμα 2.13 Περινάλλον Μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης	;
επαφής από ESD γεννήτρια για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής	
ρεύματος μήκους 2 m. (a) Διάταξη La, (b) Διάταξη Lb, (c) Διάταξη Lc, (d) Διάτ	αξη
Ld	
Σνήμα 2.14 Σύγκοιση κηματομορφόν οριμάτων εκαρόστισης επαφής που μετρή	American

Σχήμα 2.14 Σύγκριση κυματομορφών ρευμάτων εκφόρτισης επαφής που μετρήθηκαν από γεννήτρια ESD στα 4 kV με διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής

ρεύματος, σύμφωνα με το Πρότυπο διακρίβωσης του ΙΕC, μαζί με την ιδανική
κυματομορφή του IEC
Σχήμα 2.15 Σύγκριση κυματομορφών ρευμάτων εκφόρτισης επαφής που μετρήθηκαν
από γεννήτρια ESD στα 4 kV με διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής
ρεύματος, που δεν συμμορφώνονται με το Πρότυπο διακρίβωσης του ΙΕC, μαζί με
την ιδανική κυματομορφή του ΙΕС56
Σχήμα 2.16 Φασματική σύγκριση των ρευμάτων εκφόρτισης επαφής από γεννήτρια
ESD 4 kV με διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος, μαζί με το
φάσμα της ιδανικής κυματομορφής του ΙΕC57
Σχήμα 2.17 Σύνθετες κυματομορφές που προέκυψαν από τον συνδυασμό των
μετρηθεισών κυματομορφών εκφόρτισης επαφής και της ιδανικής κυματομορφής του
ΙΕC από ESD γεννήτρια στα 4 kV58
Σχήμα 2.18 Φασματική σύγκριση (στον αριστερό άξονα) των σύνθετων
κυματομορφών που προκύπτουν από τον συνδυασμό της ιδανικής κυματομορφής του
IEC και του ρεύματος εκφόρτισης επαφής από ESD γεννήτρια στα 4 kV. Τα
χαρακτηριστικά συχνότητας των μετρημένων εμπεδήσεων του καλωδίου με γείωση
στο ένα άκρο παρουσιάζονται στον δεξιό άξονα
Σχήμα 3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Παλμογράφου62
Σχήμα 3.2 Τοποθέτηση Γεννήτριας SESD 230 κατά τις μετρήσεις
Σχήμα 3.3 Τοποθέτηση Γεννήτριας DITO κατά τις μετρήσεις
Σχήμα 3.4 Στήριξη Καλωδίου Γεννήτριας σε Τρίποδο64
Σχήμα 3.5 Καλώδιο επιστροφής σε τριγωνική διάταξη με σημείο γείωσης κεντρικά
και πλησίον του κλωβού Faraday
Σχήμα 3.6 Καλώδιο επιστροφής σε τριγωνική διάταξη με σημείο γείωσης στο κέντρο
Σχήμα 3.7 Καλώδιο επιστροφής σε ελεύθερη διάταξη με σημείο γείωσης στο κέντρο
Σχήμα 3.8 Γεννήτρια SESD 230 με το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε για την
γεννήτρια DITO
Σχήμα 3.9 Γεννήτρια SESD 230 με το δικό της πλακέ καλώδιο
Σχήμα 3.10 Διάταξη Διακρίβωσης για τις μετρήσεις της γεννήτριας EM TEST Dito
ESD μέσω του ανιχνευτή ρεύματος F-65 και του στόχου Pellegrini69
Σχήμα 3.11 Κυματομορφή ESD που προέκυψε από τον στόχο Pellegrini (πορτοκαλί)
και η αρχική προκύπτουσα κυματομορφή με τον τρέχοντα ανιχνευτή χωρίς την
εφαρμογή μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας (πράσινο)
Σχήμα 3.12 Ισοδύναμο Κύκλωμα του ανιχνευτή ρεύματος F-65 κατά την διάταξη
διακρίβωσης
Σχήμα 3.13 Σύγκριση των τιμών ρεύματος της μη διορθωμένης (χωρίς detrend)
κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς για τα τελευταία 80 σημεία μέτρησης
Σχήμα 3.14 Σύγκριση της κυματομορφής του στόχου Pellegrini (κυματομορφή
αναφοράς), της αρχικής κυματομορφής που αποκτήθηκε με τον ανιχνευτή ρεύματος,
και της τελικής κυματομορφής χωρίς DC τάση (ανακατασκευασμένη) για παλμό +4
kV με τη γεννήτρια EM Test Dito72

Σχήμα 3.15 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης στα +4 kV για την περίπτωση
DITO AND SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE
2χημα 3.16 Φασμα Κυματομορφών Ρευματός στα +4 KV για την περιπτώση DITO
AND SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.17 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE /6
Σχήμα 3.18 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO
AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.19 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE
LINE EDGE FARADAY77
Σχήμα 3.20 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO
AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE
FARADAY
Σχήμα 3.21 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.22 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO
TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE80
Σχήμα 3.23 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +8 kV για την
περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE80
Σχήμα 3.24 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +8 kV για την περίπτωση DITO
TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.25 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE
EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE83
Σχήμα 3.26 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO
TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY
AND GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.27 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση SESD 230 TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE85
Σχήμα 3.28 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD
230 TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.29 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE
EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.30 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD
230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY
AND GROUNDING POINT CENTRE
Σχήμα 3.31 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
περίπτωση SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND
WITHOUT FLAT CABLE
Σχήμα 3.32 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD
230 FREE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE

Σχήμα 3.33 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την
EAD AD AY WITH AND WITHOUT ELAT CADLE
FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE
2χ ημα 3.34 Ψασμα Κυματομορφων Ρευματος στα +4 KV για την περιπτωση SESD
230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH
AND WITHOUT FLAT CABLE
Σχήμα 3.35 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +8 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE
FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE91
Σχήμα 3.36 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +8 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH
AND WITHOUT FLAT CABLE
Σχήμα 3.37 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND
WITHOUT FLAT CABLE
220 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT
CABLE
Σχήμα 4.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης Διαδικασίας Δοκιμής Ηλεκτροστατικής
Εκφόρτισης Επαφής στο CST Studio Suite 202497
Σχήμα 4.2 Παράμετροι Προσομοίωσης του Καλωδίου Επιστροφής της Συσκευής υπό
Δοκιμή (EUT)
Σχήμα 4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης του Καλωδίου Επιστροφής της ESD γεννήτριας
Σγήμα 4.4 Μήκος Καλωδίου Επιστροφής EUT: 1116.22 mm
Σγήμα 4.5 Μήκος Καλωδίου Επιστροφής EUT: 1887.09 mm
Σχήμα 4.6 Καλώδιο Επιστροφής EUT 1.4 m με άκοο γείωσης το σημείο που
επιλένθηκε αργικά κατά το πρώτο στάδιο για τα διάφορα μήκη του καλωδίου –
$\frac{100}{100}$
Στήμα 4.7 Καλώδιο Επιστορφής ΕΠΤ 1.4 m με άκοο τείωσης στο κέντοο
$\frac{2}{101}$
$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n$
$\Sigma_{\rm right}$ 4.0 bending point A too katoloo ento though the verticity of Γ
$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{i$
2χ ημα 4.10 bending point C του καλωσιου επιστροφης της γεννητριας102
Σχημα 4.11 Καλωδιου Επιστροφης Ι εννητριας με ακρο στο κεντρο και μετακινημενο και bending point B
Σχήμα 4.12 Καλωδίου Επιστροφής Γεννήτριας με άκρο απομακρυσμένο και bending noint A
γνήμα 4.13 Γείωση Καλωδίου Γευνήτομας στο κέντοο · Γείωση Καλωδίου ΕΠΤ
Δ_{A} μμα τ. 15 1 είωση και πορε τα πίσω όπως ορίζει η πλευρά του - Arrangement A 105
$\sum r h \mu a A = A = A + a h h h h h h h h h h h h h h h h h h$
Δ_{λ} ημα τ. 1 τ τ είωση Καλωσίου τ εννητριας πλησιον του ακρου της πλακας γειωσης
υπώς σριζει η πλευρά του: Γείωση Καλωσίου ΕUI πλησιον του ακρού της πλακάς
$\gamma \epsilon = 0 + 15 From Kelles for Events and the set of the set o$
2χ ημα 4.15 Ι είωση Καλωσίου Ι εννητρίας στο κέντρο : Ι είωση Καλωσίου EUI στο
κεντρο – Arrangement C106

Σχήμα 4.16 Γείωση Καλωδίου Γεννήτριας προς την πλευρά που ορίζει το καλώδιο
του EUT : Γείωση Καλωδίου EUT προς την πλευρά που ορίζει το καλώδιο της
γεννήτριας – Arrangement D
Σχήμα 4.17 Γείωση Ελεύθερου Καλωδίου Γεννήτριας στο κέντρο : Γείωση Καλωδίου
EUT στο κέντρο – Arrangement C107
Σχήμα 4.18 Γείωση Ελεύθερου Καλωδίου Γεννήτριας πλησίον του άκρου της πλάκας
γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του : Γείωση Καλωδίου ΕUΤ στο κέντρο –
Arrangement A
Σγήμα 4.19 Γείωση Ελεύθερου Καλωδίου Γεννήτριας πλησίον του άκρου της πλάκας
$\gamma_{\rm E}$ ίωσης όπως ορίζει η πλευρά του : Γείωση Καλωδίου ΕUT πλησίον του άκρου της
πλάκας νείωσης όπως ορίζει η πλευρά του – Arrangement B
Σνήμα 4.20 Διαδικασία εκκίνησης της κάθε ποοσοιμοίωσης με την επιλονή της
2 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 / 1 /
Σ γήμα 4.21 Κατάλληλες Επιλογές Λογισμικού για την παρατήρηση των (πτούμενων
ματομοσφών
Σνήμα 4.22 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για
διαφορετικά μήκη καλωδίου επιστροφής του ΕΠΤ
Στήμα 4.23 Φάσιμα Κυματομορικών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά μήκη
22/μμα 1.25 φαθμα Κοματομορφων Γουματός στα + κ.ν. για σταφοροτικα μηκη καλωδίου επιστορωής του FUT
Σνήμα 4.24 Κυματομορικές Ρεύματος Εκιρόστιστις Επαιρής στα +4 kV για
$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{i$
Σγήμα 4.25 Φάσιμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικές θέσεις
$2\chi_{1}$ μ_{12} χ_{2} $\chi_$
yειωσης του καλωσιου ελιοτροφής του ΕΟΤ
$2\chi_{1}$ μ_{1} 4.20 Kuputopopos respective Example of the second structure of the second structur
δ_{1}
Σγήμα 4 27 Φάσιμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία
2/ μμα 1.27 φαθμα Κθματομορφων Γεθματος στα 7 κ. 7 για σταφορετικά σημεία νείωσης του καλωδίου επιστορωής της Γεννήτριας σε τοινωνική διάταξη και bending
noint: A
Σνήμα 4.28 Κυματομορωές Ρεύματος Εκωόρτισης Επαφής στα +4 kV για
διαφορετικά σημεία νείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τρινωνική
$δ_1$ άταξη και bending point: B 114
Στήμα 4 29 Φάσιμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία
$2 \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_$
noint: B
Σνήμα 4 30 Κυματομορωές Ρεύματος Εκωόρτισης Επαφής στα +4 kV για
διαφορετικά σημεία νείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τρινωνική
$δ_1$ άταξη και bending point: C 115
Στήμα 4 31 Φάσιμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία
$2 \lambda_{1}$ μμα 1.51 φ αθμα Γερματομόρφων Γερματος στα γ Γ κ. γ μα σταφορετικά σημεία νείωσης του καλωδίου επιστοροφής της Γερνήτοιας σε τοινωνική διάταξη και bending
point: C
Σγήμα 4.32 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για
διαφορετικές διατάξεις μεταξύ του καλωδίου επιστορούς του ΕUT και του
τεντωμένου καλωδίου επιστοροφής της Γεννήτοιας
110 ביי ביי באיראין איי ביי באיראין איי ביי באיראיי ביי באיראיי ביי באיראיי ביי באיראיי ביי באיראיי ביי באיראי

Σχήμα 4.33 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικές διατάξεις
μεταξύ του καλωδίου επιστροφής του ΕUT και του τεντωμένου καλωδίου επιστροφής
της Γεννήτριας
Σχήμα 4.34 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για
διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε ελεύθερη
διάταξη
Σχήμα 4.35 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία
γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε ελεύθερη διάταξη118
Σχήμα 4.36 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για
διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας με σταθερό σημείο
γείωσης και καλώδιο επιστροφής του ΕUT
Σχήμα 4.37 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικές διατάξεις
του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας με σταθερό σημείο γείωσης και καλώδιο
επιστροφής του EUT

Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) και Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD)

1.1 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

1.1.1 Ορισμοί

Η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility - EMC) αναφέρεται στην ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σ' αυτό το περιβάλλον [1], [2].

Η απαρχή της επανάστασης των τηλεπικοινωνιών συντελέστηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα (1902), οπότε πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικού σήματος από τον Marconi πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Έκτοτε οι εφαρμογές που βρήκαν οι τηλεπικοινωνίες είναι ανεξάντλητες και απαιτούν ολοένα και μεγαλύτερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Παράλληλα δε με την ανάπτυξη και εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, οι επιστήμονες παγκοσμίως άρχισαν να παρατηρούν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής μεταξύ των συσκευών και των συστημάτων. Συνοπτικά, ως ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ορίζουμε οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να μειώσει την επίδραση μιας συσκευής ή ενός συστήματος. Ειδικά στις μέρες μας με την εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής εμφανίζονται μεταξύ άλλων στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, στα κινητά τηλέφωνα, στις οικιακές συσκευές και στα ιατρικά μηχανήματα [3].

Ταυτόχρονα, η τεχνολογική πρόοδος και η ανάγκη για μικρότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα έχουν οδηγήσει σε πιο περίπλοκες συσκευές με πολλά κυκλώματα, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Η εξασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των συσκευών αυτών και είναι ζωτικής σημασίας σε τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες, η ιατρική τεχνολογία, η αεροπορία και άλλες βιομηχανίες που εξαρτώνται από ακριβείς και αξιόπιστες συσκευές [4].

Κατά το Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) δίνονται οι εξής ορισμοί όσον αφορά το γνωστικό πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [2][5]:

- Ηλεκτρομαγνητική Διαταραχή (Electromagnetic Interference EMI) είναι κάποιο ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί είτε να προκαλέσει μείωση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, είτε να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωτική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης.
- Ηλεκτρομαγνητική Ευαισθησία (Electromagnetic Susceptibility) είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί χωρίς

αλλοίωση της ποιότητάς της σε συνθήκες παρουσίας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής, δηλαδή η έλλειψη ατρωσίας.

- Ατρωσία (Immunity) είναι η ικανότητα μιας συσκευής να λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τα κριτήρια επίδοσης που προδιαγράφονται για τη συσκευή, παρά την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.
- Ηλεκτρομαγνητικό Επίπεδο Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level) είναι το διευκρινισμένο μέγιστο επίπεδο διαταραχής στο οποίο ενδέχεται να υποβληθεί μια συσκευή, ένας εξοπλισμός ή ένα σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες. Στην πράξη, το ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο συμβατότητας δεν προσεγγίζει τις μέγιστες δυνατές τιμές, αλλά τείνει να το ξεπεράσει κατά μία μικρή πιθανότητα.
- Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin) είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μιας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.
- Επίπεδο Ατρωσίας (Immunity level) είναι το ανώτατο επίπεδο μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.
- Όριο Ατρωσίας (Immunity Limit) είναι το καθορισμένο επίπεδο ατρωσίας.
- Περιθώριο Ατρωσίας (Immunity Margin) είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μιας διάταξης ή ενός συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.
- Επίπεδο διαταραχής (Interference Level) είναι το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μιας δοσμένης μορφής, μετρημένο σε συγκεκριμένες συνθήκες.
- Όριο διαταραχής (Interference Limit) είναι το μέγιστο επιτρεπτό ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο διαταραχής, μετρημένο σε συγκεκριμένες συνθήκες.

1.1.2 Το πρόβλημα της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

Η εφαρμογή της βασικής φυσικής στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας γίνεται με στόχο τα συστήματα να εκτελούν τις λειτουργίες για τις οποίες είναι προορισμένα με ικανοποιητικό τρόπο. Αρχικά, για οποιοδήποτε πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας θα υπάρχει πιθανόν μια περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σ' αυτήν την περίπτωση θα υπάρχει επίσης μια αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων εντός της οποίας θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών.

Σε πρώτη προσέγγιση θεωρούμε ότι όλα τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών έχουν:

- μια πηγή,
- 2) έναν αριθμό διαδρομών ή τρόπων σύζευξης και
- 3) έναν δέκτη.

Δεν μπορεί να υπάρξει πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας χωρίς και τα τρία αυτά στοιχεία και παρά το γεγονός ότι η αναγνώριση τους δεν είναι πάντοτε εύκολη, είναι αναγκαία η αναγνώριση τουλάχιστον δύο εκ των τριών για την επίλυση του [2], [6].



Σχήμα 1.1 Τα 3 βασικά στοιχεία ενός ΕΜC προβλήματος [6]

Οι τρόποι σύζευξης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από μια πηγή σε έναν δέκτη εμπίπτουν σε μία από τις τέσσερις κατηγορίες:

- 1) δι' αγωγής
- 2) επαγωγικής σύζευξης
- 3) χωρητικής σύζευξης και
- 4) δι' ακτινοβολίας.

Οι τρόποι σύζευξης συχνά χρησιμοποιούν έναν πολύπλοκο συνδυασμό αυτών, καθιστώντας δύσκολη την αναγνώριση της διαδρομής ακόμη και όταν η πηγή και ο δέκτης είναι γνωστοί, ενώ μπορεί να υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές σύζευξης [6].

Μέσα σε ένα σύστημα, όλες οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνιστώσες πρέπει να συνυπάρχουν αρμονικά. Κάθε σύστημα που λειτουργεί ως δέκτης θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά, όταν εκτίθεται σε καθορισμένες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (προδιαγραφές στάθμης εισόδων). Την ίδια ώρα το ίδιο σύστημα θα πρέπει να μην είναι πηγή ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, πάνω από κάποια καθορισμένα όρια (προδιαγραφές στάθμης εξόδων) [2].

1.1.3 Πρότυπα και δοκιμές της ΕΜC

Κανονισμοί ή οδηγίες της EMC υπάρχουν στις περισσότερες προηγμένες χώρες με τον κατάλογο των συσκευών και συστημάτων που καλύπτουν να αυξάνεται συνεχώς. Μάλιστα, η έλλειψη ειδικής οδηγίας για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή δεν αφήνει απαραίτητα ελεύθερο τον σχεδιαστή, επιτρέποντας του να θέτει τους δικούς του κανονισμούς [2].

Για την Ευρωπαϊκή Ένωση, ο φορέας θέσπισης προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι η CELENEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), ενώ για τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό είναι το ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Αντίστοιχα, στην Ελλάδα ο φορέας που

συμμετέχει, ελέγχει και προτείνει στη CELENEC είναι ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης).

Συνεπώς, με κύριο σκοπό την προστασία του καταναλωτικού κοινού, του περιβάλλοντος και του υγιούς ανταγωνισμού μεταξύ των εταιρειών οι κυβερνήσεις των προηγμένων χωρών θέσπισαν Πρότυπα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας. Η διάκριση των προτύπων γίνεται με βάση τις εξής κατηγορίες [3], [7]:

- 1) Βασικά Πρότυπα
- 2) Γενικά Πρότυπα
- 3) Πρότυπα Οικογενείας Προϊόντων και
- 4) Πρότυπα Προϊόντων.

Τέλος, προκειμένου να ελεγχθεί η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές κάθε προτεινόμενη δοκιμή ανήκει εν συντομία σε μία από τις εξής τέσσερις κατηγορίες [2]:

- CE Δοκιμές εκπομπής δι' αγωγής
- CS Δοκιμές ευαισθησίας σε αγωγή
- RE Δοκιμές εκπομπής δι' ακτινοβολίας
- RS Δοκιμές ευαισθησίας σε ακτινοβολία

1.2 Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση

1.2.1 Ορισμός

Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση [9], [10], [12].

Η Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (Electrostatic Discharge - ESD) αποτελεί ένα από τα πιο συχνά ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα που μπορεί να επηρεάσουν τον ηλεκτρολογικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Συγκεκριμένα, κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται σε επαφή συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10 – 25 kV, με αποθηκευμένες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει απότομους παλμούς ρεύματος οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψουν ηλεκτρικές συσκευές. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από τα μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος (έμμεση εκφόρτιση).

Για την αντίληψη της σημασίας της παρατίθενται μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση:

1) εκρήξεις σε υπερ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους

- 2) ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησης τους
- 3) εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμο των αεροσκάφων
- 4) βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων [2].

1.2.2 Τριβοηλεκτρικό Φαινόμενο

Ορισμένα υλικά τείνουν να αποχωρίζονται ηλεκτρόνια, ενώ άλλα τείνουν να συσσωρεύουν. Ένα σώμα με περίσσεια ηλεκτρονίων φορτίζεται αρνητικά, ενώ ένα σώμα με έλλειμα ηλεκτρονίων φορτίζεται θετικά. Κατά την τριβή μεταξύ δύο επιφανειών από διαφορετικά υλικά, το ένα υλικό αποκτά ηλεκτρόνια και το άλλο χάνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την φόρτιση του κάθε υλικού. Όταν τα δύο αυτά αντικείμενα διαχωριστούν, μπορούμε να μετρήσουμε το καθαρό θετικό ή αρνητικό φορτίο του καθενός, με τα φορτία αυτά να είναι ίσα και αντίθετης πολικότητας. Στην περίπτωση μη αγώγιμου υλικού τα φορτία τείνουν να παραμένουν πάνω στην επιφάνεια του, καθώς και στην επιφάνεια άλλων αγώγιμων υλικών με τα οποία έρχεται σε επαφή [14].

Η παραγωγή στατικού ηλεκτρισμού που προκαλείται από την επαφή ή την τριβή ("τρίψιμο") μεταξύ δύο υλικών ονομάζεται τριβοηλεκτρικό φαινόμενο φόρτισης. 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 [13].

Στην "τριβοηλεκτρική σειρά", τα υλικά παρατίθενται με σειρά θετικής έως αρνητικής φόρτισης ως αποτέλεσμα του τριβοηλεκτικού φαινομένου. Μια ουσία υψηλότερη στη λίστα είναι θετικά φορτισμένη (χάνει ηλεκτρόνια) όταν έρχεται σε επαφή με μια ουσία που βρίσκεται χαμηλότερα στην λίστα. Επίσης, ο βαθμός διαχωρισμού δύο υλικών στην τριβοηλεκτρική σειρά δεν υποδεικνύει απαραίτητα και το μέγεθος των φορτίων που δημιουργούνται από το τριβοηλεκτικό φαινόμενο. Ενώ, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των φορτίων περιλαμβάνουν τις συνθήκες περιβάλλοντος, την πίεση επαφής, την ταχύτητα τριβής ή απομάκρυνσης και την περιοχή επαφής που υπήρξε τριβή.

Παρακάτω παρατίθενται τόσο η τριβοηλεκτική σειρά όσο και παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και εκφόρτιση των υλικών, καθώς και ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που παράγονται από διαφορετικά γεγονότα [14].

Συντελεστές παραγωγής της 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

Σχήμα 1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών [5]

	Επίπεδο Ηλεκτροστατικής Τάσης (Volts)	
Μέσο παραγωγής ηλεκτροστατικού φορτίου	Σχετική υγρασία 10% έως 20%	Σχετική υγρασία 65% έως 90%
Περπάτημα πάνω σε χαλί	35.000	1.500
Ανύψωση κοινής πολυαιθυλενικής σακούλας από πάγκο	20.000	1.200
Καρέκλα εργασίας με επένδυση από αφρό πολυουρεθάνης	18.000	1.500
Περπάτημα σε δάπεδο από βινύλιο	12.000	250
Φάκελοι από βινύλιο για οδηγίες εργασίας	7.000	600
Εργαζόμενος σε πάγκο	6.000	100

Πίνακας 1.1 Ενδεικτικές Ηλεκτροστατικές Τάσεις [14]



Σχήμα 1.3 Τριβοηλεκτρική Σειρά [15]

Σε πολλές εγκαταστάσεις, οι άνθρωποι είναι ένας από τους κύριους παράγοντες στατικού ηλεκτρισμού. Μάλιστα, ένα πολύ γνωστό παράδειγμα τριβοηλεκτρικού φαινομένου αναφέρεται σε έναν άνθρωπο που περπατά σε ένα χαλί συσσωρεύοντας στατικό ηλεκτρισμό. Όταν ο άνθρωπος αγγίζει ένα μεταλλικό πόμολο πόρτας προκύπτει το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με αποτέλεσμα την ξαφνική εκκένωση στατικών φορτίων μεταξύ ανθρώπου και πόμολου και την εμφάνιση σπινθήρα. Επίσης, ο άνθρωπος μπορεί να έχει αναπτύξει ακόμα και δυναμικό των 30 kV από το χαλί, το οποίο είναι αρκετό για να βλάψει ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές αν έρθουν σε επαφή [16].



Σχήμα 1. 4 Φαινόμενο ESD που προέκυψε από τριβοηλεκτρισμό [16]

1.2.3 Φόρτιση εξ' επαγωγής

Κατά την φόρτιση εξ' επαγωγής - ή αλλιώς έμμεση φόρτιση – ένα φορτισμένο αντικείμενο προκαλεί πόλωση σε ένα άλλο αγώγιμο αντικείμενο που βρίσκεται κοντά του ή εντός του πεδίου που προέρχεται από το φορτισμένο. Τότε ως αποτέλεσμα έχουμε την εσωτερική απομάκρυνση και τον διαχωρισμό των θετικών και των αρνητικών φορτίων του αγώγιμου αντικειμένου. Δημιουργείται, λοιπόν, ηλεκτροστατικό δυναμικό μεταξύ των δύο αντικειμένων (του φορτισμένου και του αγώγιμου).

Φαινόμενο ESD μπορεί να προκύψει εάν το αγώγιμο αντικείμενο έρθει σε επαφή με ένα διαφορετικά φορτισμένο αντικείμενο (π.χ. ένα μεταλλικό εργαλείο), επιτρέποντας στο "συσσωρευμένο" φορτίο να εκφορτίσει άμεσα.



Σχήμα 1. 5 Φόρτιση εξ'επαγωγής [17]

1.3 Ηλεκτροστατικής εκφόρτιση και ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμισμός

1.3.1 Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται σε επαφή συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10 – 25 kV με αποθηκευμένες

ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει απότομους παλμούς ρεύματος. Σχετιζόμενα με την τάση και το ρεύμα είναι τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Αυτές οι τέσσερις παράμετροι του φαινομένου θα συζευχθούν με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που βρίσκονται στη διαδρομή του ρεύματος ή κοντά στην πηγή του πεδίου. Αυτή η σύζευξη προκαλεί επαγόμενες παροδικές τάσεις εντός των κυκλωμάτων σήματος.

Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίσει υψηλή τιμή, μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών, καταλήγοντας στην καταστροφή τους. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να παρατηρηθεί σε συνθήκες αυξημένης πεδιακής έντασης. Στην συγκεκριμένη περιοχή μάλιστα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μεγάλο πρόβλημα παρουσιάζει η καταστροφή των μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια διακίνησης τους. Επίσης οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις στα αεροπλάνα και στα αυτοκίνητα αποτελούν πηγή επικίνδυνων προβλημάτων. Ένας άλλος λόγος που έχει οδηγήσει στη συγκέντρωση του ενδιαφέροντος στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι οι αναφλέξεις ή και εκρήξεις που μπορεί να προκαλέσουν οι σπινθήρες κατά την εκφόρτιση σε εύφλεκτα υλικά, ένας κίνδυνος μεγάλης σημασίας για την πετρελαϊκή, τη χημική, τη φαρμακευτική και τη στρατιωτική βιομηχανία [2], [18], [25], [26].

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης μπορεί να λάβουν χώρα τα εξής φαινόμενα [18]:

- 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 του εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

1.3.2 Προστασία του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που ελαχιστοποιούν τις συνέπειες τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα εξής:

- 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 αγώγιμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης τάσης φόρτισης. Το αναπτυσσόμενο φορτίο εξ επαγωγής στην επιφάνεια του υλικού πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορουν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [21], όπως οι γνωστές αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [27] ανέπτυξαν

προτάσεις σχετικά με την σχεδίαση δαπέδων, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματα τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των 10⁷ Ω και θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

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 δευτερεύουσων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, η οποία θα εξασφαλίζει μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο κέλυφος (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. 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 [5], [18].

1.4 Μοντέλα Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης

Τα είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που λαμβάνουν χώρα καθημερινά ποικίλουν, καθώς σε αυτά εμπλέκονται και διαφορετικά είδη σωμάτων. Γίνεται, επομένως, επιτακτική η ανάγκη ομαδοποίησης αυτών των σωμάτων προκειμένου να μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά και να εκτιμηθούν οι επιδράσεις των εκάστοτε εκφορτίσεων ξεχωριστά. Η ομαδοποίηση αυτή αποτελεί και αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων [18], [19], [20].

Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι τα εξής:

- το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model HBM)
- το μοντέλο της μηχανής (Machine Model MM)
- το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model CDM)

Παρακάτω δίνεται σχήμα που αφορά τις απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των τριών κυκλωμάτων [20].



Σχήμα 1. 6 Παραδείγματα εκφορτίσεων (a,b,c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM και CDM αντίστοιχα) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [20]

Εκτός από τις μεθόδους τύπου RLC, έχουν χρησιμοποιηθεί και μέθοδοι τετραγωνικών παλμών για τον χαρακτηρισμό και την βελτιστοποίηση της προστασίας ESD, ενώ μόνο οι τετραγωνικοί παλμοί μπορούν να παρέχουν λεπτομερή εικόνα όσον αφορά τα μεταβατικά χαρακτηριστικά [20].

Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από δευτέρας τάξεως διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες ισχύουν στα κυκλώματα RLC. Το ρεύμα εκφόρτισης μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης δευτέρας τάξης:

$$\frac{d^2(i)}{dt^2} + \frac{R}{L} * \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} * i = 0$$

Όπου R 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 - DUT), C η χωρητικότητα πυκνωτή ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_C και L η αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης [22].



Σχήμα 1. 7 RLC – Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης των τριών μοντέλων (HBM, MM, CDM) για τυπικά κυκλώματα σε σύγκριση με τετραγωνικό παλμό TLP [20], [23]

1.4.1 Το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (HBM)

Το συγκεκριμένο μοντέλο υποθέτει την περίπτωση όπου ένα φορτισμένο άτομο πλησιάζει μια γειωμένη συσκευή. Είναι το παραδοσιακό πρότυπο δοκιμών ESD και χαρακτηρίζει την ευαισθησία ενός ηλεκτρονικού εξαρτήματος σε βλάβη λόγω ESD. Αρχικά ορίστηκε σύμφωνα με την μέθοδο MILSTD-993x 3015.7. Ορίζει την κυματομορφή ρεύματος για την εκφόρτιση ενός πυκνωτή 100 pF μέσω μιας αντίστασης 1,5 kΩ και ενός φορτίου 0 Ω για διαφορετικές τάσεις εκφόρτισης. Ο πυκνωτής C_{HBM} αποθηκεύει την φόρτιση. Η αντίσταση R_{HBM} περιορίζει το ρεύμα. Το πηνίο L_{HBM} είναι αυτεπαγωγή της διαδρομής εκφόρτισης, η οποία μαζί με την αντίσταση R_{HBM} καθορίζουν τον χρόνο ανόδου μεταξύ 2 ns και 10 ns από 10% έως 90% του πλάτους I_{MAX}. Στο παρακάτω σχήμα γίνεται σύγκριση του μοντέλου με τα υπόλοιπα (MM, CDM) [20].



Σχήμα 1. 8 Μοντέλα ESD (HBM, MM, CDM) και οι τυπικές τους παράμετροι [20], [23]

1.4.2 Το μοντέλο της μηχανής (ΜΜ)

Η δοκιμή μοντέλου μηχανής (Machine Model - MM) σε επίπεδο συσκευής είναι λιγότερο συνηθισμένη στις μέρες μας. Τόσο το κύκλωμα εκφόρτισης όσο και συνολικά το μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό του ανθρώπινου σώματος, εκτός από το ότι τα ηλεκτρικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν το ανθρώπινο σώμα αντικαθίστανται με τα χαρακτηριστικά ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου. Διαφορές μπορούν επίσης να αποδοθούν στα χαρακτηριστικά ενεργοποίησης εναλλακτικών διαδρομών ρεύματος εντός του στοιχείου προστασίας που μπορεί να διαφέρουν για διαφορετικές δοκιμές MM. Αποτελεί μια εκφόρτιση χαμηλής αντίστασης, υψηλού ρεύματος που ταλαντώνεται για μια μικρή σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Η χωρητικότητα C_{MM} ορίζεται έως 200 pF, ενώ η αντίσταση R_{MM} είναι ονομαστικά 0. Στην πραγματική ESD δοκιμή η R_{MM} θα είναι μεγαλύτερη από 0 κατά την διάρκεια της εκφόρτισης ανάλογα και με τον σχεδιασμό. Τα τυπικά απαιτούμενα επίπεδα τάσης αντοχής V_{MM} είναι συνήθως ± 200 V, ενώ για αυξημένες απαιτήσεις ± 400 V [20].

1.4.3 Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (CDM)

Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής είναι ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός εκφόρτισης σε ένα αυτοματοποιημένο περιβάλλον χειρισμού. Διαφέρει επίσης ως προς τα 2 προηγούμενα μοντέλα, καθώς προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση από μια συσκευή και όχι προς μια συσκευή. Για CDM με συνεχείς παλμούς διάρκειας λίγων ns και πλάτη έως περίπου 10Α που δημιουργούνται στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρούνται συχνά αστοχίες οξειδίου πύλης που μπορεί να μην παραχθούν από το HBM ή το MM [20].

Η κύρια παράμετρος του μοντέλου αυτού είναι η αντίσταση του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου R_{arc}, η οποία, προσεγγιστικά, λαμβάνεται ως μια σταθερά εν σειρά αντίσταση. Η R_{arc}, η οποία είναι της τάξεως των 5÷30 Ω και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συσκευή και από τις διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος [24].
Κεφάλαιο 2: Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD) και επίδραση της διάταξης του καλωδίου επιστροφής

2.1 Το Πρότυπο 61000-4-2

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC) σχετίζεται με τις απαιτήσεις ατρωσίας και με τις μεθόδους δοκιμής για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό που υπόκειται σε εκκενώσεις στατικού ηλεκτρισμού απευθείας από χειριστές και από προσωπικό σε γειτονικά αντικείμενα. Προσδιορίζει επίσης σειρές επιπέδων δοκιμής που σχετίζονται με διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες εγκατάστασης και καθιερώνει διαδικασίες δοκιμής.

Σκοπός του εν λόγω προτύπου είναι να διαμορφώσει μια κοινή βάση, καθώς και μια βάση αναπαραγωγιμότητας για την αξιολόγηση της απόδοσης ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού όταν υπόκειται σε ηλεκτροστατικές εκκενώσεις. Επιπλέον περιλαμβάνει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις που μπορούν να συμβούν από το προσωπικό σε αντικείμενα κοντά στον εξοπλισμό.

Το Πρότυπο καθορίζει τα εξής:

- Την χαρακτηριστική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης
- Το εύρος επιπέδων δοκιμής
- Τον εξοπλισμό της δοκιμής
- Την διαδικασία της δοκιμής
- Την διαδικασία της διακρίβωσης (calibration procedure)
- Την αβεβαιότητα των μετρήσεων

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generator) που περιγράφεται στο Πρότυπο βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (HBM) και έχει συγκεκριμένες αυστηρές προδιαγραφές. Υπάρχουν δύο είδη δοκιμών, η εκφόρτιση μέσω αέρα και η εκφόρτιση επαφής. Για τις δύο δοκιμές οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φέρουν διαφορετική "μύτη" η οποία καθορίζεται αυστηρά στο Πρότυπο ως προς τις διαστάσεις και τη γεωμετρία της. Η εκφόρτιση επαφής είναι η προτιμώμενη μέθοδος δοκιμής και αυτή είναι που θα μας απασχολήσει, ενώ οι εκφορτίσεις αέρα χρησιμοποιούνται όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί η εκφόρτιση επαφής.

Παρακάτω δίνεται ένα απλοποιημένο κύκλωμα της ESD γεννήτριας σύμφωνα και με το Πρότυπο:



Σχήμα 2.1 Απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστστικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2 [29]

Αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c , έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος. Προσομοιώνεται η περίπτωση εκφόρτισης ανθρώπου σε μεταλλικό αντικείμενο, μέσω μιας μεταλλικής ράβδου, την οποία αυτός κρατά στο χέρι του.

Η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής, καθώς και τα χαρακτηριστικά της μεγέθη όπως ορίζονται στο Πρότυπο παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 2.2 Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV [29]

Τα εμφανιζόμενα, στο Σχήμα 2.2, μέσω των συμβόλων τους, χαρακτηριστικά μεγέθη είναι τα εξής:

- $I_p: H$ μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης
- I_{30} : Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 30 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή $I_p*10\%$
- I₆₀: Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 60 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή I_p*10%
- tr: Ο χρόνος ανόδου, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή I_p*10% μέχρι τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή I_p*90%

Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη:

- το πρώτο μέγιστο του ρεύματος (initial peak), το οποίο αντιστοιχεί στην εκφόρτιση του χεριού, και
- το δεύτερο (second peak), το οποίο αντιστοιχεί στην εκφόρτιση του υπόλοιπου ανθρωπίνου σώματος.

Για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ακολουθεί η τυπική μαθηματική έκφραση:

$$I(t) = \frac{l_1}{k_1} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} * exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)^n + \frac{l_2}{k_2} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} * exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right)^n$$

Όπου:

$$k_1 = exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2}\left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right)$$
$$k_1 = exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4}\left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right)$$

Και

$$\tau_1 = 1,1 ns; \ \tau_2 = 2,0 ns; \ \tau_3 = 12,0 ns; \ \tau_4 = 37,0 ns;$$

 $I_1 = 16,6 A (at 4kV); \ I_2 = 9,3 A (at 4 kV);$
 $n = 1,8$ [29]

2.2 Φαινόμενο Αποσβεννυμένων Ταλαντώσεων (Ringing)

2.2.1 Ορισμός

To ringing είναι ένα φαινόμενο στα ηλεκτρικά κυκλώματα κατά το οποίο οι κυματομορφές ταλαντώνονται λόγω της ανάκλασης του σήματος και του συντονισμού των στοιχείων της αντίδρασης. Θεωρείται πηγή ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής (EMI). Εμφανίζεται όταν η σύνθετη αντίσταση του οδηγού (στοιχείο στην πλευρά εξόδου του σήματος) είναι χαμηλή και αυτή του δέκτη (στοιχείο στην πλευρά λήψης του σήματος) είναι υψηλή. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ άεργου ισχύος και ringing – σε RLC κυκλώματα – είναι θεμελιώδης, καθώς και τα δύο φαινόμενα προκύπτουν από την εναλλαγή ενέργειας μεταξύ επαγωγικών και χωρητικών στοιχείων. Όσο πιο ισχυρά τα στοιχεία L-C και λιγότερη απόσβεση R τόσο εντονότερο το ringing και η συνολική άεργος ισχύς του κυκλώματος.



Σχήμα 2.3 Παράδειγμα ringing [31]

2.2.2 Ringing στις Γεννήτριες Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων

Όπως αναφέρθηκε, οι ESD γεννήτριες έχουν σχεδιαστεί ώστε να προσομοιώνουν το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (HBM). Ένας από τους βασικούς στόχους, όπως ορίζεται και στο Πρότυπο, είναι η βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας. Το φαινόμενο ringing στις ESD γεννήτριες σχετίζεται με τις διαφορές στο πλάτος και στις συχνότητες της αποσβενυμένης ταλάντωσης που παρατηρείται μετά την πρώτη κορυφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής, στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Συνεπώς, οι αποκλίσεις αυτές κατά την δοκιμή επηρεάζουν άμεσα την αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων.

Το φαινόμενο απασχολούσε και απασχολεί τους επιστήμονες που καταπιάνονται με την έρευνα γύρω από το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Συγκεκριμένα, μία εκ των ερευνών διεξήγαγε δοκιμές σε οκτώ μοντέλα γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και 14 τύπους εξοπλισμού υπό δοκιμή (EUT). Τα αποτελέσματα των δοκιμών διέφεραν μεταξύ των γεννητριών λόγω των διαφορών στο πλάτος και τις συχνότητες της αποσβενυμένης ταλάντωσης (ringing) που εμφανίζεται μετά την πρώτη κορυφή του ρεύματος εκφόρτισης εξ επαφής, η οποία δεν καθορίζεται στο Πρότυπο IEC. Επιπλέον, με βάση την υπόθεση ότι οι δυσλειτουργίες του εξοπλισμού μπορεί να οφείλονται στον συντονισμό στενής ζώνης κατά τη διάρκεια της δοκιμής, διευκρινίστηκε ότι το επίπεδο δυσλειτουργίας σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη φασματική συνιστώσα των μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και ότι η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών από διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα βελτιωνόταν εάν αυτό ρυθμιζόταν [33], [34].

2.2.3 Καταστολή Ηλεκτρομαγνητικών Διαταραχών και Φερρίτες

Οι Φερρίτες είναι κεραμικά υλικά που αποτελούνται κυρίως από οξείδια σιδήρου (Fe₂O₃) σε συνδυασμό με άλλα μεταλλικά στοιχεία, όπως μαγγάνιο, ψευδάργυρο ή νικέλιο. Χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και εξαιρετικές μαγνητικές ιδιότητες σε υψηλές συχνότητες, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε ηλεκτρονικά κυκλώματα για την καταστολή παρεμβολών και την αποθήκευση ενέργειας [34].



Σχήμα 2.4 Φερρίτες [4]

Οι φερρίτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), καθώς συμβάλλουν αποτελεσματικά στην καταστολή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Μέσω μαγνητικών κυκλωμάτων, οι φερρίτες αυξάνουν τη σύνθετη αντίσταση ενός κυκλώματος, είτε μέσω ωμικής αντίστασης είτε μέσω επαγωγικής αντίδρασης, ιδιαίτερα σε υψηλές συχνότητες. Η συμπεριφορά αυτή επιτρέπει την απόσβεση ανεπιθύμητων ρευμάτων και την απορρόφηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Οι ιδιότητες των φερριτών εξαρτώνται άμεσα από τη δομή και τη σύσταση του υλικού, με αποτέλεσμα κάθε τύπος φερρίτη να παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά απόσβεσης [4].

2.3 Νέα έκδοση του Προτύπου ΙΕС 61000-4-2

Η νέα – τρίτη σε σειρά – έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2, του 2025 [30], [31], ακυρώνει και αντικαθιστά τη δεύτερη έκδοση που δημοσιεύτηκε το 2008 και αποτελεί μια τεχνική αναθεώρηση ορίζοντας νέες προδιαγραφές και απαιτήσεις με στόχο την βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας.

Το Πρότυπο της δεύτερης έκδοσης, του 2008, ορίζει τέσσερις παραμέτρους που αφορούν την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής (I_p, t_r, I₃₀, I₆₀) κι αυτό δεν έχει αλλάξει ποτέ από την δημοσίευση της πρώτης έκδοσης του Προτύπου. Ο δοκιμές του παρελθόντος έδειξαν ότι το ringing επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των δοκιμών εντός του χρονικού διαστήματος των 10 ns και 40 ns, καθώς και ότι το δεύτερο μέγιστο, δηλαδή το μέγιστο που αντιστοιχεί στο δεύτερο μέρος της κυματομορφής και προσομοιώνει την εκφόρτιση του υπόλοιπου ανθρώπινου σώματος, όπως αναφέρθηκε, παίζει σημαντικό ρόλο. Επίσης, ο στόχος είναι η μείωση του ringing εντός του διαστήματος 10 ns και 40 ns. Παρακάτω παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής, καθώς και τα χαρακτηριστικά της μεγέθη όπως ορίζονται στο νέο αναθεωρημένο Πρότυπο:



Σχήμα 2.5 Ιδανική Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 του 2023 [30]

Οι οριζόμενες από το Πρότυπο τιμές για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής, ανάλογα με το επίπεδο τάσης φόρτισης, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Τάση Φόρτισης (kV)	Ip ±15% (A)	tr ±25% (ns)	Ip2 -20%/+40% (A)	I ₃₀ ±30% (A)	I ₆₀ ±30% (A)
2	7,5	0,8	4,5	4,0	2,0
4	15,0	0,8	9,0	8,0	4,0
6	22,5	0,8	13,5	12,0	6,0
8	30,0	0,8	18,0	16,0	8,0

Πίνακας 2.1 Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής σύμφωνα με το Πρότυπο [30]

Επιπλέον, στην τρίτη έκδοση εισάγονται κάποιες βασικές αλλαγές που αφορούν την διαδικασία της διακρίβωσης. Συγκεκριμένα:

 Νέες Διαστάσεις Κάθετου Επιπέδου Διακρίβωσης: Ελάχιστες διαστάσεις 1,2 × 1,6 m, εξασφαλίζοντας ένα πιο τυποποιημένο και κατάλληλο περιβάλλον δοκιμών.

- Νέο Επίπεδο Αναφοράς Γείωσης (RGP): Ελάχιστες διαστάσεις: 1,5 × 1,2 m, προκειμένου να παρέχει μια πιο αξιόπιστη αναφορά γείωσης.
- Αναθεωρημένη Τοποθέτηση Στόχου Ρεύματος: πλέον στο 1 m πάνω από το έδαφος (προηγουμένως 0,5 m) βελτιώνοντας την ακρίβεια των μετρήσεων.
- Προσαρμοσμένη Θέση Σημείου Γείωσης: Το σημείο γείωσης θα πρέπει να τοποθετείται 0,5 m από το επίπεδο γείωσης, εξασφαλίζοντας καλύτερο έλεγχο της γείωσης.

Τέλος, πριν από την τρίτη Έκδοση δεν υπήρχαν διαδικασίες ή απαιτήσεις για διακρίβωση εκκένωσης αέρα, η οποία είναι και πολύ δύσκολο να αναπαραχθεί, επειδή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η ταχύτητα προσέγγισης, η υγρασία και ο σχεδιασμός των γεννητριών ESD.

Η νέα Έκδοση του Προτύπου, λοιπόν, περιορίζει τη διακρίβωση εκκένωσης αέρα στη μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος στην ακίδα εκκένωσης αέρα στη μέγιστη τάση δοκιμής χρησιμοποιώντας έναν ωμικό διαιρέτη υψηλής τάσης. Ωστόσο, εάν οι ακίδες περιέχουν παθητικά ή ενεργά εξαρτήματα, απαιτείται επιπλέον και υπό όρους διακρίβωση της κυματομορφής ρεύματος εκκένωσης αέρα χρησιμοποιώντας στόχο ρεύματος 2 Ω, για οποιοδήποτε επίπεδο μεταξύ 2 kV και 15 kV. Αυτή η διαδικασία διακρίβωσης πρέπει να πραγματοποιείται σε λειτουργία εκκένωσης επαφής, αλλά με τοποθετημένη την ακίδα εκκένωσης αέρα.

2.4 Καλώδιο Επιστροφής της Γεννήτριας Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων

2.4.1 Καλωδίωση στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Τα καλώδια είναι ιδιαίτερα σημαντικά επειδή συνήθως αποτελούν τα μεγαλύτερα μέρη ενός συστήματος κι επομένως λειτουργούν ως αποδοτικές κεραίες που συλλαμβάνουν ή/και εκπέμπουν θόρυβο. Όπως αναφέρθηκε κατά την ανάλυση του προβλήματος της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, τα καλώδια εντάσσονται στην διαδρομή σύζευξης ενός συστήματος. Διακρίνονται τρεις τρόποι σύζευξης όσον αφορά τις διαδρομές των καλωδίων:

- χωρητική ή ηλεκτρική σύζευξη, η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση ηλεκτρικών πεδίων μεταξύ κυκλωμάτων
- επαγωγική ή μαγνητική σύζευξη, η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητικών πεδίων δύο κυκλωμάτων
- συνδυασμός επαγωγικής και χωρητικής σύζευξης

Η σύζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων μπορεί να αναπαρασταθεί από το άθροισμα των χωρητικοτήτων και των αυτεπαγωγών μεταξύ των αγωγών και στη συνέχεια το κύκλωμα μπορεί να αναλυθεί μέσω της θεωρίας δικτύων [4].

2.4.2 Εμπέδηση Καλωδίου

Ένα καλώδιο μοντελοποιείται σαν γραμμή μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους. Μεταξύ άλλων, ο υπολογισμός του ringing είναι ένας από τους λόγους μοντελοποίησης. Κάθε τμήμα του καλωδίου μοντελοποιείται βάσει των εξής παραμέτρων [4]:

- R: αντίσταση ανά μονάδα μήκους (Ω/m)
- L: αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους (H/m)
- C: χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους (F/m)
- G: αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους (S/m)

Παρακάτω δίνεται η χαρακτηριστική εμπέδηση μιας γραμμής μεταφοράς:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Ενώ για ιδανικά καλώδια, όπου δεν έχουμε απώλειες η χαρακτηριστική εμπέδηση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ενώ η χαρακτηριστική εμπέδηση για μια ομοαξονική γραμμή μεταφοράς:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{e_r}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Όπου r_1 η ακτίνα του εσωτερικού αγωγού, r_2 η ακτίνα του εξωτερικού αγωγού και $ε_r$ η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού μεταξύ των αγωγών.

Η μοντελοποίηση του καλωδίου σε γραμμή μεταφοράς κυκλωματικά αντιστοιχεί σε ένα RLC κύκλωμα ή αλλιώς γνωστό ως κύκλωμα συντονισμού. Τα κυκλώματα συντονισμού έχουν συχνότητες συντονισμού, free, κατά τις οποίες το κύκλωμα συμπεριφέρεται σαν καθαρή αντίσταση (δεν διαθέτει αυτεπαγωγή ή χωρητικότητα) δίνοντας κορυφές ή βυθίσεις στο πεδίο της συχνότητας. Ο συντελεστής ποιότητας Q περιγράφει το πόσο "στενή" ή "καθαρή" είναι μια συντονισμένη απόκριση — δηλαδή το πόσο έντονα "κορυφώνεται" ή "βυθίζεται" η καμπύλη σε σχέση με τη συχνότητα. Όσο πιο έντονη η κορυφή ή η βύθιση τόσο μεγαλύτερος και ο συντελεστής ποιότητας.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
$$Q = \frac{f_{rec}}{\Delta f_{3dB}}$$

Η εμπέδηση σχετίζεται άμεσα με την ανάκλαση και τον συντονισμό σημάτων και ειδικότερα, κατά την ESD δοκιμή, έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του ringing. Συγκεκριμένα ο συντονισμός στο πεδίο της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του ringing στο πεδίο του χρόνου [4], [32].

2.4.3 Καλώδιο Επιστροφής της Γεννήτριας Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων και Φαινόμενο Ringing

Σύμφωνα με το Πρότυπο [30], κατά την δοκιμή, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αναπαραγωγιμότητα, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες θέσεις και μήκη καλωδίων. Θα πρέπει να έχει μήκος τουλάχιστον 2 m και να είναι κατασκευασμένο ώστε να επιτρέπει στη γεννήτρια να πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Σε περιπτώσεις που το μήκος των 2 m είναι ανεπαρκές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μακρύτερο καλώδιο (έως 3 m). Το μήκος του καλωδίου μετράται από την γεννήτρια μέχρι το άκρο του σημείου σύνδεσης. Πρέπει να είναι επαρκώς μονωμένο ώστε να αποτρέπεται η ροή του ρεύματος εκφόρτισης στο προσωπικό ή σε άλλες αγώγιμες επιφάνειες (πέραν της απόληξης του) κατά την διάρκεια της δοκιμής. Τέλος, το καλώδιο επιστροφής που χρησιμοποιείται για την δοκιμή συνίσταται να είναι το ίδιο που χρησιμοποιήθηκε και για την διακρίβωση.

Ενώ για την διακρίβωση, το Πρότυπο [30] ορίζει για το καλώδιο επιστροφής διάταξη ισοσκελούς τριγώνου με το κέντρο του να είναι τραβηγμένο προς τα πίσω και γειωμένο 0,5 m κάτω από τον στόχο (target). Δεν επιτρέπεται να ακουμπάει στο πάτωμα και ούτε να χειρίζεται από προσωπικό κατά την διαδικασία της διακρίβωσης. Παρακάτω δίνεται σχηματικά το περιβάλλον διακρίβωσης για ESD γεννήτρια:



Σχήμα 2.6 Περιβάλλον μέτρησης για διακρίβωση ESD γεννήτριας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [30]

Το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας ESD ασκεί καθοριστική επίδραση στη δυναμική του φαινομένου ringing. Η χαρακτηριστική εμπέδηση του εν λόγω καλωδίου, η οποία συναρτάται άμεσα με το μήκος, τη γεωμετρία και τη σχετική του τοποθέτηση κατά τη δοκιμή, επηρεάζει την ταλάντωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης και συγκεκριμένα το ringing που εμφανίζεται μετά την πτώση της πρώτης

κορυφής της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής, προκαλώντας συντονισμό. Συνεπώς, η βέλτιστη σχεδίαση της διαδρομής επιστροφής συνιστούν κρίσιμους παράγοντες στον περιορισμό του ringing και αποτελούν αντικείμενο συστηματικής μελέτης στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της τεχνολογίας δοκιμών ESD [4].

Επιπλέον, το ringing της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής προκαλείται κυρίως από τον συντονισμό του καλωδίου επιστροφής, αλλά η φασματική διακύμανση του εμφανίζεται στο εύρος συχνοτήτων 20 MHz έως 200 MHz. Όσον αφορά την φασματική διακύμανση από 20 MHz έως 40 MHz, καθώς και μετά από 200 MHz εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος εντός της ESD γεννήτριας, το οποίο δεν επηρεάζεται από το περιβάλλον της μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου. Το εύρος συχνοτήτων που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εσωτερικό κύκλωμα της γεννήτριας περιορίζεται στα 40 MHz έως 200 MHz, αλλά η φασματική διακύμανση δεν συμπίπτει απαραίτητα με τα χαρακτηριστικά συχνότητας συντονισμού της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής [47], [48], [49].

2.5 Μελέτες της επίδρασης της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής στην κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής

2.5.1 Επίδραση της καταστολής του ringing στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής δύο διαφορετικών ESD γεννητριών με την χρήση φερριτών στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος

Οι Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jianqing Wang και Osamu Fujiwara στην έρευνα τους [39] εξετάζουν τη δυνατότητα της καταστολής του ringing στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής δύο διαφορετικών ESD γεννητριών με την χρήση φερριτών στο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος. Συγκεκριμένα, διερευνάται η δυνατότητα της καταστολής του ringing στις κυματομορφές εκφόρτισης επαφής της διακρίβωσης μέσω ενός καλωδίου επιστροφής 2 m, με και χωρίς προσάρτηση φερρίτη, σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του συντονισμού της εμπέδησης των καλωδίων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι ESD γεννητριών: μία με μπαταρία και μια εναλλασσόμενου ρεύματος.

Παρακάτω παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των δύο γεννητριών, καθώς και των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας:

ESD γεννήτρια	Κατασκευαστής	Χώρα	Μέγιστη Τάσης Φόρτισης	Παρατηρήσεις	
В	a	Japan	30,5 kV	Με τροφοδοσία	
D*	с	Switzerland	16,0 kV	Με μπαταρία	
*D: καλώδιο επιστροφής ρεύματος με επίπεδο φερρίτη συνδεδεμένο στο κέντρο					
του					

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά των ESD γεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις



Σχήμα 2.7 (a) Επίπεδος φερρίτης προσαρτημένος στο καλώδιο D (b) Κυλινδρικός φερρίτης που χρησιμοποιείται για το καλώδιο B σε αντιπαραβολή με το καλώδιο D

Η ESD γεννήτρια "D" τροφοδοτείται από μπαταρία κι επομένως δεν διαθέτει καλώδιο φόρτισης. Το καλώδιο ρεύματος επιστροφής που χρησιμοποιείται για την γεννήτρια "B" θα αναφέρεται ως "καλώδιο B" και αυτό για τη γεννήτρια "D" ως "καλώδιο D". Στο καλώδιο D είναι προσαρτημένος ένας επίπεδος φερρίτης – όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7 (a) – στο κέντρο του από τον κατασκευαστή, με τη συγκεκριμένη τεχνική προδιαγραφή να μην έχει δημοσιευτεί. Για λόγους, λοιπόν, συγκρισιμότητας, τοποθετείται σε αντίστοιχη θέση στο καλώδιο της γεννήτριας B ένας κοινά διαθέσιμος κυλινδρικός φερρίτης (ZCAT3035-1330), ώστε να εκτιμηθεί κατά πόσο επηρεάζει το ringing υπό παρόμοιες συνθήκες.

Η διάταξη και το περιβάλλον διακρίβωσης, καθώς και η μέθοδος των μετρήσεων των κυματομορφών εκφόρτισης επαφής διακρίβωσης ακολουθήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.8 Διάταξη μέτρησης για διακρίβωση ESD γεννήτριας και διάταξη για κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής σύμφωνα και με το Πρότυπο 61000-4-2

Το ηλεκτρόδιο της ESD γεννήτριας βρίσκεται σε επαφή με το κεντρικό ηλεκτρόδιο ενός ομοαξονικού αισθητήρα ρεύματος (στόχος ρεύματος) που είναι τοποθετημένος στο κέντρο ενός γειωμένου κλωβού Faraday. Το καλώδιο επιστροφής θα πρέπει να είναι (2±0,05) m. Το καλώδιο επηρεάζει το ringing που λαμβάνει χώρα μετά την πτώση του

πρώτου μεγίστου της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής και γι' αυτό το Πρότυπο ορίζει διάταξη ισοσκελούς τριγώνου με το κέντρο του να είναι τραβηγμένο προς τα πίσω και γειώνεται 50cm κάτω από τον στόχο ρεύματος, Ενώ, σύμφωνα με το Σχήμα 2.7, Z_R είναι η εμπέδηση εισόδου του καλωδίου επιστροφής που γειώνεται σε ένα άκρο και που "βλέπει" η ESD γεννήτρια.

Όσον αφορά το καλώδιο φόρτισης υψηλής τάσης - της ESD γεννήτριας που λειτουργεί με τροφοδοσία (B) – είναι περίπου 2 m και το Πρότυπο δεν ορίζει προδιαγραφές για το μήκος ή την τοποθέτηση του. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8, το εν λόγω καλώδιο κατέβηκε παράλληλα με το κατακόρυφο μεταλλικό επίπεδο (vertical metal plane) από την ESD γεννήτρια και συνδέθηκε στην παροχή ρεύματος κατά μήκος ενός οριζόντιου μεταλλικού επιπέδου (horizontal metal plane) στο πάτωμα. Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση στο ringing της διαφοράς μεταξύ της τυπικής διάταξης (normal arrangement, όπως αναφέρεται και στο Σχήμα 2.8) που περιγράφηκε και οριζόντια μεταλλικά επίπεδα – ελεύθερης διάταξης (floating arrangement, όπως αναφέρεται και στο Σχήμα 2.8).

Προτού περιγραφούν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας, στην επιστημονική εργασία παρουσιάζονται κάποια στοιχεία που αφορούν την εμπέδηση των διαθέσιμων καλωδίων.

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της συχνότητας της εμπέδησης $|Z_R|$ ενός καλωδίου ρεύματος επιστροφής (γειωμένου από το ένα άκρο), τα οποία αντιστοιχούν σε εκείνα της εμπέδησης που "βλέπει" η ESD γεννήτρια σύμφωνα με την διάταξη καλωδίου σε περιβάλλον διακρίβωσης, όπως ορίζεται από το Πρότυπο 61000–4–2 σύμφωνα και με το Σχήμα 2.8. Τα χαρακτηριστικά συχνότητας της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής σε συχνότητες πάνω από 200MHz δεν επηρεάζουν το φάσμα της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής.

Η κόκκινη γραμμή δείχνει τα αποτελέσματα της μέτρησης που ακολουθήθηκε για το καλώδιο B, η γαλάζια για το καλώδιο D και η μωβ για το καλώδιο B με προσαρτημένο τον κυλινδρικό φερρίτη στο κέντρο του.



Σχήμα 2.9 Εμπέδηση καλωδίου που "βλέπει" η γεννήτρια για καλώδια 2 m ρεύματος επιστροφής γειωμένων από το ένα άκρο

Η εμπέδηση των καλωδίων μετρήθηκε ως εξής. Στην διάταξη καλωδίων σε συνθήκες διακρίβωσης, το ένα άκρο του καλωδίου επιστροφής αποσυνδέθηκε από την ESD γεννήτρια και συνδέθηκε στην υποδοχή του SMA ακροδέκτη που έχει τοποθετηθεί στον στόχο ρεύματος, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.8 και 2.9. Η έξοδος του SMA συνδέθηκε σε έναν αναλυτή δικτύου (network analyzer Rohde & Schwarz ZNB8, 9 kHz - 8.5 GHz) μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω για την μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης S₁₁ σε συχνότητες από 1 MHz έως 8,5 GHz κάθε 1 MHz. Έτσι, η εμπέδηση καλωδίου μετρήθηκε με χρήση του τύπου:

$$Z_{R} = |Z_{R}|e^{i\varphi} = \frac{(1+S_{11})}{1-S_{11}} * Z_{0}$$
$$Z_{0} = 50\Omega$$

Με βάση το Σχήμα 2.9 παρατηρούμε τα εξής. Σε κάθε περίπτωση ο συντονισμός των καλωδίων ξεκινάει να εμφανίζεται σε συχνότητες πάνω από 30 MHz έως 40 MHz. Όπου χρησιμοποιήθηκε φερρίτης μπορούμε εύκολα να δούμε εμφανή μείωση των κορυφών συντονισμού γύρω στα 40 MHz και στα 100 MHz κι επομένως μείωση και της τιμής του συντελεστή ποιότητας Q.

Επιπλέον, συγκρίνοντας το καλώδιο B με τον προσαρτημένο φερρίτη και το καλώδιο D και (μωβ και γαλάζια γραμμή αντίστοιχα) παρατηρείται πως η πρώτη κορυφή και η πρώτη βύθιση (τοπικό ελάχιστο) συντονισμού του πρώτου (καλώδιο B) είναι χαμηλότερη και πιο "ρηχή", αντίστοιχα, σε σχέση με αυτές του δεύτερου (καλώδιο D). Ενώ, όσον αφορά την δεύτερη κορυφή, διακρίνεται ψηλότερη αυτή του καλωδίου B σε σχέση με αυτή του D, ενώ τα βυθίσματα δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ τους.

Εν συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας. Αρχικά, χρησιμοποιείται μόνο γεννήτρια D (τροφοδοτείται με μπαταρία) και λαμβάνονται μετρήσεις για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV, καθώς και για το φάσμα ρεύματος συχνοτήτων από 20 MHz έως 200 MHz. Τα αποτελέσματα αφορούν το ρεύμα της γεννήτριας με χρήση του καλωδίου της (καλώδιο D), καθώς και με χρήση του καλωδίου B (χωρίς φερρίτη) έπειτα από αφαίρεση του καλωδίου D και προσθήκη του B στην γεννήτρια D.

Παρακάτω βλέπουμε στο Σχήμα 2.10 τα αποτελέσματα για τις δύο αυτές πειραματικές διαδικασίες μαζί με την ιδανική κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης σύμφωνα με το IEC. Η γαλάζια γραμμή υποδεικνύει τα αποτελέσματα της μέτρησης με χρήση του καλωδίου D και η κόκκινη με χρήση του καλωδίου B.



Σχήμα 2.10 (a) Κυματομορφές ρευμάτων εκφόρτισης επαφής στα 4 kV από την ESD γεννήτρια D και ιδανική κυματομορφή IEC μαζί με (b) τα φάσματα του ρεύματος και το ιδανικό φάσμα IEC

Παρ' όλο που το ringing εμφανίζεται και στις δύο κυματομορφές παρατηρούμε ότι καταστέλλεται εμφανώς από το καλώδιο D με τον προσαρτημένο φερρίτη. Το φάσμα ρευμάτων των δύο καλωδίων αν και παρεμφερές, εμφανίζεται για το καλώδιο D μια πιο "ρηχή" βύθιση στα 28 MHz και μια χαμηλότερη κορυφή στα 111 MHz σε σχέση αυτές του καλωδίου B. Αυτό οφείλονται στην χαμηλότερη κορυφή στα 36 MHz και στην πιο "ρηχή" βύθιση στα 136 MHz, αντίστοιχα, της εμπέδησης του καλωδίου B σύμφωνα και με το Σχήμα 2.9. Αυτό υποδηλώνει πως η επίδραση του προσαρτημένο φερρίτη (στο καλώδιο D) εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή ποιότητας Q του καλωδίου επιστροφής.

Η πρώτη κορυφή συντονισμού και η δεύτερη βύθιση συντονισμού της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής προκαλούν αντίστοιχα μια φασματική βύθιση και μια φασματική

κορυφή στην αντίστοιχη συχνότητα για την κυματομορφή εκφόρτισης επαφής από την ESD γεννήτρια D. Οι φασματικές συχνότητες συντονισμού των κυματομορφών εκφόρτισης επαφής δεν συμπίπτουν ακριβώς με τις συχνότητες συντονισμού των καλωδίων παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει καλώδιο φόρτισης στην ESD γεννήτρια D που να επηρεάζει και την εμπέδηση. Αυτό πιθανώς να προκαλείται από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος που έχει εγκαταστήσει ο κατασκευαστής μεταξύ του καλωδίου επιστροφής και του πυκνωτή στην εν λόγω γεννήτρια.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η κορυφή που εμφανίζεται από 400 MHz έως 500 MHz δεν οφείλεται στον συντονισμό του καλωδίου επιστροφής, αλλά στον συντονισμό ενός κυκλώματος κατανεμημένων παραμέτρων που σχηματίζεται μεταξύ του ηλεκτροδίου εκφόρτισης της γεννήτριας και του στόχου ρεύματος, το οποίο αρχικά δεν υπάρχει στην ιδανική κυματομορφή IEC.

Για την δεύτερη και τελευταία φάση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιείται η ESD γεννήτρια B (που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα) έναντι της γεννήτριας D και αντίστοιχα λαμβάνονται μετρήσεις για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV, καθώς και για το φάσμα ρεύματος συχνοτήτων από 20 MHz έως 200 MHz. Τα αποτελέσματα αφορούν το ρεύμα της γεννήτριας με χρήση του καλωδίου της (καλώδιο B) χωρίς και με τον κυλινδρικό φερρίτη, καθώς και με χρήση του καλωδίου D έπειτα από αφαίρεση του καλωδίου B και προσθήκη του D στην γεννήτρια B. Λαμβάνονται δύο φορές, μία για το καλώδιο φόρτισης υψηλής τάσης σε τυπική διάταξη (normal arrangement) και μία για το εν λόγω καλώδιο σε ελεύθερη διάταξη (floating arrangement).

Παρακάτω βλέπουμε στο Σχήμα 2.11 τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών μαζί με την ιδανική κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης σύμφωνα με το IEC. Η γαλάζια γραμμή υποδεικνύει τα αποτελέσματα της μέτρησης με χρήση του καλωδίου D, η κόκκινη με χρήση του καλωδίου B (χωρίς φερρίτη) και η μωβ με χρήση του καλωδίου B με προσαρτημένο φερρίτη. Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στις μετρήσεις με τυπική διάταξη του καλωδίου φόρτισης, ενώ αυτές με τις κουκίδες αντιστοιχούν στις μετρήσεις ελεύθερης διάταξης, το φάσμα του ρεύματος αποτυπώνεται ξεχωριστά για τις δύο αυτές περιπτώσεις.





Από την κυματομορφή του ρεύματος (Σχήμα 2.11 (a)) υποδεικνύεται ότι η χρήση φερρίτη, τόσο στο καλώδιο D όσο και στο καλώδιο B, μειώνει την εμφάνιση του ringing. To ringing καταστέλλεται περεταίρω, μάλιστα, όταν το καλώδιο φόρτισης βρίσκεται σε ελεύθερη διάταξη.

Με την επιλογή τυπικής διάταξης του καλωδίου φόρτισης παρατηρείται στο αντίστοιχο φάσμα του ρεύματος (Σχήμα 2.11 (b)) ότι η χρήση φερρίτη καταστέλλει τα βυθίσματα συντονισμού στα 81 MHz και στα 143 MHz, καθώς και την κορυφή συντονισμού στα 104 MHz. Οι εν λόγω συχνότητες συντονισμού δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα σε εκείνες της κορυφής και της βύθισης της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής (όπως αυτές λήφθηκαν και στο Σχήμα 2.9). Αυτό οφείλεται στα χαρακτηριστικά της συχνότητας της εμπέδησης του καλωδίου φόρτισης.

Επιπλέον, δεν παρατηρείται στο Σχήμα 2.11 (b) βαθιά βύθιση από 20 MHz έως 40 MHz εν αντιθέσει με το Σχήμα 2.10 (b) παρά την ύπαρξη της πρώτης κορυφής συντονισμού της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα εκφόρτισης επαφής από τον φορτισμένο πυκνωτή (της γεννήτριας) επιστρέφει σε αυτόν τόσο μέσω του καλωδίου επιστροφής όσο και μέσω του καλωδίου φόρτισης. Συγκεκριμένα, κατά τον συντονισμό του καλωδίου επιστροφής και της "απότομης" αύξησης της εμπέδησης του, σε περίπτωση που στην αντίστοιχη συχνότητα συντονισμού η εμπέδηση του καλωδίου φόρτισης λαμβάνει συγκριτικά μικρότερη τιμή, το ρεύμα εκφόρτισης επιστρέφει μέσω του καλωδίου φόρτισης με αποτέλεσμα η κυματομορφή εκφόρτισης επαφής να μην βυθίζεται σημαντικά.

Με την επιλογή ελεύθερης διάταξης του καλωδίου φόρτισης υποδεικνύεται στο αντίστοιχο φάσμα του ρεύματος (Σχήμα 2.11 (c)) η αξιοσημείωτη μείωση του ringing με τις φασματικές διακυμάνσεις να μειώνονται ακόμα και για το καλώδιο Β χωρίς προσαρτημένο φερρίτη με εξαίρεση την βύθιση στα 143 MHz. Καταστέλλονται δε περαιτέρω για τα καλώδια επιστροφής με προσάρτηση φερρίτη, με αποτέλεσμα οι κυματομορφές να προσεγγίζουν καλύτερα την ιδανική κυματομορφή IEC του φάσματος.

Προτού αναλυθούν τα συμπεράσματα της ερευνητικής διαδικασίας, παρατίθενται κάποια στοιχεία πρόσφατων μελετών [51], [52]. Συγκεκριμένα, μια ελεύθερη διάταξη του καλωδίου φόρτισης πάνω από το μεταλλικό επίπεδο σε περιβάλλον διακρίβωσης τείνει να καταστέλλει το ringing καλύτερα σε σχέση με μια διάταξη καλωδίου φόρτισης κατά μήκος του μεταλλικού επιπέδου (τυπική διάταξη). Επίσης, οι συχνότητες μεταβολής του φάσματος αντιστοιχούν αρκετά στα χαρακτηριστικά συντονισμού της παράλληλης εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής και του καλωδίου φόρτισης.

Τέλος, τα συμπεράσματα της ερευνητικής διαδικασίας εν συνόλω ήταν τα εξής. Και για τις δύο ESD γεννήτριες επιβεβαιώθηκε ότι η φασματική διακύμανση γύρω στα 100MHz, που αντιστοιχεί στον συντονισμό του καλωδίου επιστροφής, καταστάλθηκε με την τοποθέτηση του φερρίτη στην κεντρική θέση του καλωδίου. Αυτό ήταν αποτέλεσμα των χαμηλότερων τιμών συντονισμού Q από τα χαρακτηριστικά συχνότητας της εμπεδησης του καλωδίου επιστροφής.

Επιπλέον, για την ESD γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, στην περίπτωση καλωδίου φόρτισης ελεύθερης διάταξης, το ringing καταστέλλεται σημαντικά σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων από 20 MHz έως 200 MHz. Οι κυματομορφές τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας προσεγγίζουν την ιδανική κυματομορφή IEC.

2.5.2 Επίδραση της διάταξης του καλωδίου επιστροφής ρεύματος στις ταλαντώσεις με απόσβεση τύπου ringing στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής της διακρίβωσης από γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης

Οι Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jianqing Wang και Osamu Fujiwara στην έρευνα τους [48] εξετάζουν την επίδραση της διάταξης του καλωδίου επιστροφής ρεύματος στο ringing στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής της διακρίβωσης από γεννήτρια ESD. Συγκεκριμένα, διερευνάται η επίδραση του ringing στις κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης επαφής από μια γεννήτρια ESD με τάση δοκιμής στα 4 kV σε διαφορετικές διατάξεις ενός καλωδίου επιστροφής ρεύματος μήκους 2 m. Επιπλέον, αναλύονται τα φάσματα συχνοτήτων που προκαλούνται από το ringing, προκειμένου να εξεταστούν τα φασματικά τους χαρακτηριστικά.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως σύμφωνα και με προηγούμενες μελέτες που αναφέρονται στην εν λόγω έρευνα παρατηρήθηκαν εμφανείς αποκλίσεις από την προδιαγεγραμμένη κυματομορφή του IEC κατά τη διαδικασία διακρίβωσης της γεννήτριας ESD. Εξακολουθούν να μην υπάρχουν διατάξεις σχετικά με τον περιορισμό του ringing, διότι ο μηχανισμός εμφάνισης των ταλαντώσεων αυτών στις κυματομορφές εκφόρτισης επαφής παραμένει μέχρι σήμερα ασαφής [42], [46], [47].

Η διάταξη της μέτρησης και το περιβάλλον διακρίβωσης των κυματομορφών εκφόρτισης επαφής διακρίβωσης ακολουθήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.12 Το περιβάλλον διακρίβωσης της ESD γεννήτριας και η διάταζη της μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής

Ενώ στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι διατάξεις μέτρησης για τις διαφορετικές γεωμετρίες του καλωδίου επιστροφής ρεύματος της γεννήτριας μήκους 2 m:



Σχήμα 2.13 Περινάλλον Μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής από ESD γεννήτρια για διαφορετικές διατάζεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος μήκους 2 m. (a) Διάταζη La, (b) Διάταζη Lb, (c) Διάταζη Lc, (d) Διάταζη Ld

Τα σχήματα 2.13(a), 2.13(b) και 2.13(c) συμμορφώνονται με τα πρότυπα διακρίβωσης του IEC. Η διάταξη των καλωδίων στα σχήματα 2.13(a) και 2.13(b) είναι ίδια με εκείνη του σχήματος 2.12, με τη διαφορά ότι στο πρώτο υπάρχει δάπεδο από σκυρόδεμα, ενώ στο δεύτερο έχει τοποθετηθεί μεταλλική επιφάνεια στο πάτωμα ως σημείο αναφοράς γείωσης, η οποία είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη με το κλωβό Faraday.

Οι αποστάσεις από την επιφάνεια του δαπέδου έως τον στόχο ρεύματος και έως το σημείο γείωσης του καλωδίου είναι 0,62 m και 0,12 m αντίστοιχα, και είναι ίδιες τόσο στο σχήμα 2.13(a) όσο και στο 2.13(b). Το σχήμα 2.13(c) παρουσιάζει διάταξη καλωδίου με μεταλλική επιφάνεια στο δάπεδο όπως στο σχήμα 2.13(b), αλλά οι αποστάσεις από το πάτωμα προς τον στόχο ρεύματος και το σημείο γείωσης του καλωδίου είναι 1,0 m και 0,5 m αντίστοιχα, δηλαδή διαφέρουν από εκείνες των 2.13(a)

Η διάταξη μέτρησης στο σχήμα 2.13(d) δεν συμμορφώνεται με το Πρότυπο διακρίβωσης, αλλά μοιάζει περισσότερο με την πραγματική κατάσταση (in-situ) δοκιμών ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε εξοπλισμό με χρήση ESD γεννήτριας.

Παρακάτω, στο σχήμα 2.14, παρουσιάζονται οι κυματομορφές εκφόρτισης επαφής στα 4 kV, οι οποίες μετρήθηκαν στις διατάξεις διακρίβωσης που φαίνονται στα σχήματα 2.13(a), 2.13(b) και 2.13(c), σε σύγκριση με την ιδανική κυματομορφή του IEC, ενώ στο σχήμα 2.15 οι κυματομορφές εκφόρτισης επαφής στα 4 kV, οι οποίες μετρήθηκαν στις διατάξεις διακρίβωσης που φαίνονται στο σχήμα 2.13(d), σε σύγκριση με την ιδανική του IEC:



Σχήμα 2.14 Σύγκριση κυματομορφών ρευμάτων εκφόρτισης επαφής που μετρήθηκαν από γεννήτρια ESD στα 4 kV με διαφορετικές διατάζεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος, σύμφωνα με το Πρότυπο διακρίβωσης του IEC, μαζί με την ιδανική κυματομορφή του IEC



Σχήμα 2.15 Σύγκριση κυματομορφών ρευμάτων εκφόρτισης επαφής που μετρήθηκαν από γεννήτρια ESD στα 4 kV με διαφορετικές διατάζεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος, που δεν συμμορφώνονται με το Πρότυπο διακρίβωσης του IEC, μαζί με την ιδανική κυματομορφή του IEC

Στο σχήμα 2.14, παρόλο που οι διατάξεις συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του IEC, αποσβενόμενες ταλαντώσεις τύπου ringing μπορούν να παρατηρηθούν μετά τη φθίνουσα πλευρά της κορυφής και παρουσιάζουν διακυμάνσεις γύρω από την κυματομορφή που ορίζεται από το Πρότυπο IEC, με διαφορετικό εύρος ταλάντωσης και διαφορετικές περιόδους επανάληψης, ανάλογα με το περιβάλλον μέτρησης.

Οι φθίνουσες κυματομορφές μετά τα 6 ns διαφέρουν ανάλογα με τα περιβάλλοντα μέτρησης, ενώ οι φθίνουσες κυματομορφές έως τα 6 ns και μετά τα 55 ns δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από τα περιβάλλοντα μέτρησης.

Στο σχήμα 2.15 οι τιμές του ρεύματος στα 60 ns υπερβαίνουν το ανώτατο όριο των απαιτήσεων του IEC μόνο στις διατάξεις Ld(3) και Ld(4), ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κυματομορφής πληρούν τις απαιτήσεις.

Οι ταλαντώσεις τύπου ringing στη φθίνουσα κυματομορφή μετά τα 7 ns, όπως και στο σχήμα 2.14, μεταβάλλονται ανάλογα με τη διάταξη του καλωδίου, ενώ οι φθίνουσες κυματομορφές έως τα 7 ns και μετά τα 85 ns δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από τις διατάξεις του καλωδίου.

Επιπλέον, παρουσιάζονται παρακάτω, στο σχήμα 2.16, τα φάσματα των κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης επαφής των σχημάτων 2.14 και 2.15, μαζί με το φάσμα της ιδανικής κυματομορφής του IEC:



Σχήμα 2.16 Φασματική σύγκριση των ρευμάτων εκφόρτισης επαφής από γεννήτρια ESD 4 kV με διαφορετικές διατάζεις καλωδίου επιστροφής ρεύματος, μαζί με το φάσμα της ιδανικής κυματομορφής του IEC

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι το φάσμα στην περιοχή συχνοτήτων από 40 MHz έως 200 MHz διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το περιβάλλον μέτρησης και τη διάταξη των καλωδίων, ενώ επηρεάζεται ελάχιστα το φάσμα από 20 MHz έως 40 MHz και πάνω από 200 MHz.

Στην επόμενη φάση της μελέτης συζητιόνται τα αποτελέσματα αυτά βάσει των φασματικών χαρακτηριστικών μιας σύνθετης κυματομορφής που προκύπτει από τη σύνθεση της μετρηθείσας κυματομορφής εκφόρτισης επαφής με την κυματομορφή του προτύπου IEC χωρίς ringing.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η αρχική ανύψωση μιας παροδικής κυματομορφής στο πεδίο του χρόνου δημιουργεί φάσμα υψηλών συχνοτήτων, ενώ η ομαλή πτώση της δημιουργεί φάσμα χαμηλών συχνοτήτων.

Παρακάτω, στο σχήμα 2.17, παρουσιάζονται οι σύνθετες κυματομορφές της ιδανικής κυματομορφής του IEC για τις μετρηθείσες κυματομορφές εκφόρτισης επαφής υπό τις διατάξεις μέτρησης Lc και Ld(1), όπως παρουσιάζονται στα σχήματα 2.13(c) και 2.13(d) αντίστοιχα, μαζί με τις κυματομορφές ρεύματος υπό το Lc και το Ld(1).

Η επιλογή αυτή έγινε, καθώς κάτω από το ίδιο περιβάλλον με το μεταλλικό επίπεδο αναφοράς στο δάπεδο, ο βαθμός δημιουργίας ταλαντώσεων τύπου ringing υπό το Lc βρίσκεται στο μέσο όρο μεταξύ των συνθηκών La και Lb, ενώ οι ταλαντώσεις υπό το Ld(1) είναι οι πιο έντονες μεταξύ των συνθηκών Ld.

Η σύνθετη κυματομορφή Α αποτελείται από την κυματομορφή που μετρήθηκε από την έναρξη της ανόδου έως τα 7 ns και από την ιδανική κυματομορφή του IEC μετά τα 7

ns. Η σύνθετη κυματομορφή Β αποτελείται από την ιδανική κυματομορφή του IEC στα σχήματα 2.17(a) και 2.17(b), από την έναρξη της ανόδου έως τα 60 ns και 85 ns αντίστοιχα, και από τις μετρηθείσες κυματομορφές στα σχήματα 2.17(a) και 2.17(b) μετά τα 60 ns και 85 ns αντίστοιχα.



Σχήμα 2.17 Σύνθετες κυματομορφές που προέκυψαν από τον συνδυασμό των μετρηθεισών κυματομορφών εκφόρτισης επαφής και της ιδανικής κυματομορφής του IEC από ESD γεννήτρια στα 4 kV

Παρακάτω, στο σχήμα 2.18, βλέπουμε τα φάσματα συχνότητας (σε A/Hz στον αριστερό άξονα) των κυματομορφών ρεύματος του σχήματος 2.17, συγκριτικά με το φάσμα της ιδανικής κυματομορφής του IEC, στο οποίο οι μετρηθείσες εμπεδήσεις εισόδου (σε Ω στον δεξιό άξονα) του καλωδίου επιστροφής με γείωση στο ένα άκρο, που βλέπει η γεννήτρια, έχουν επικάλυψη για αναφορά.





Θα πρέπει να σημειωθεί ο τρόπος με τον οποίον μετρήθηκαν οι εμπεδήσεις εισόδου του καλωδίου Z_{in} που βλέπει η γεννήτρια. Στην διάταξη καλωδίων σε συνθήκες διακρίβωσης, το ένα άκρο του καλωδίου επιστροφής αποσυνδέθηκε από την ESD γεννήτρια και συνδέθηκε στην υποδοχή του SMA ακροδέκτη που έχει τοποθετηθεί στον στόχο ρεύματος. Η έξοδος του SMA συνδέθηκε σε έναν αναλυτή δικτύου (network analyzer Rohde & Schwarz ZNB8, 9 kHz - 8.5 GHz) μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου 50Ω για την μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης S₁₁. Έτσι, η εμπέδηση καλωδίου μετρήθηκε με χρήση του τύπου:

$$Z_{in} = |Z_{in}|e^{i\varphi} = \frac{(1+S_{11})}{1-S_{11}} * Z_0$$
$$Z_0 = 50\Omega$$

Όπως παρατηρείται και στο σχήμα 2.18, οι εμπεδήσεις εισόδου του καλωδίου έχουν πολλαπλές κορυφές και βυθίσματα λόγω των συντονισμών που εμφανίζονται εναλλάξ με τις συχνότητες. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό από το γεγονός ότι η εμπέδηση εισόδου Z_{in} μιας παράλληλης γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες με μήκος 1, η οποία είναι γειωμένη στο ένα άκρο, δίνεται από την εξίσωση:

$$Z_{in} = \left| jZ * \tan\left(\frac{2\pi fl}{c}\right) \right|$$

(Ζ: χαρακτηριστική εμπέδηση, f: συχνότητα, c: ταχύτητα του φωτός)

Συνεπώς, η εμπέδηση εισόδου φτάνει σε $Z_{in} = 0$ στο βύθισμα στη συχνότητα f = nc/(2l) (n =1,2,3,...), και σε $Z_{in} = \infty$ στην κορυφή στη συχνότητα f = (2n+1)c/(4l) (n =0,1,2,...).

Τα φάσματα των μετρηθεισών κυματομορφών, στα σχήματα 2.18(a) και 2.18(b), στο πεδίο συχνοτήτων που επηρεάζεται λιγότερο από τις διατάξεις του καλωδίου, παρουσιάζουν το πρώτο βύθισμα και το δεύτερο βύθισμα περίπου στα 30 MHz και 40 MHz, αντίστοιχα. Τα πρώτα βυθίσματα των φασμάτων δεν αντιστοιχούν στις πρώτες κορυφές των μετρημένων εμπεδήσεων του καλωδίου εισόδου, αλλά οι συχνότητες των δεύτερων βυθισμάτων είναι κοντά στις συχνότητες των 36 MHz και 41 MHz, στις οποίες εμφανίζονται οι πρώτες κορυφές συντονισμού των μετρημένων εμπεδήσεων εισόδου υπό τα Lc και Ld(1), αντίστοιχα. Αυτές οι συχνότητες είναι επίσης κοντά στις 37,5 MHz, που υπολογίζονται από την πρώτη κορυφή συντονισμού (n = 0) για την παράλληλη γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες με μήκος l, γειωμένη στο ένα άκρο.

Επιπλέον, η σύγκριση των φασμάτων των μετρηθεισών κυματομορφών και των σύνθετων κυματομορφών δείχνει ότι τα φάσματα από 20 MHz έως 40 MHz της μετρηθείσας κυματομορφής αντιστοιχούν στο φάσμα της σύνθετης κυματομορφής B, και τα φάσματα μετά τα 200 MHz αντιστοιχούν στο φάσμα της σύνθετης κυματομορφής Α.

Συνεπώς, τα φάσματα και στις δύο περιοχές δεν επηρεάζονται από τα περιβάλλοντα μέτρησης, όπως οι διατάξεις του καλωδίου, η παρουσία του μεταλλικού επιπέδου στο δάπεδο και η απόσταση του στόχου ρεύματος από την επιφάνεια του δαπέδου.

Τα φάσματα από 20 MHz έως 40 MHz προκαλούνται από τις διακυμάνσεις που παρατηρούνται μετά τα 60 ns υπό το Lc και μετά τα 85 ns υπό το Ld(1) των κυματομορφών πτώσης της μέτρησης στο σχήμα 2.17, ενώ αυτά μετά τα 200 MHz μπορεί να προέρχονται από την κορυφή της κυματομορφής γύρω στα 7 ns από την άνοδο της μετρηθείσας κυματομορφής. Και τα δύο φάσματα μπορεί να οφείλονται σε χαρακτηριστικά της γεννήτριας και εξαρτώνται από τη δομή του εσωτερικού κυκλώματος.

Οι συχνότητες των διαδοχικών κορυφών και βυθισμάτων που εμφανίζονται στο φάσμα από 40 MHz έως 200 MHz αντιστοιχούν χονδρικά στις συχνότητες συντονισμού των μετρημένων εισόδων σύνθετης αντίστασης του καλωδίου. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι αποσβενόμενες ταλαντώσεις τύπου ringing προέρχονται κυρίως από τους κατανεμημένους συντονισμούς του καλωδίου επιστροφής ρεύματος.

Τέλος, τα συμπεράσματα της έρευνας συνοπτικά ήταν τα εξής. Διαπιστώθηκε ότι το ringing της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής προκαλεί τα φάσματα από 20 MHz έως 200 MHz, αλλά η συχνότητα που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου κυμαίνεται από 40 MHz έως 200 MHz, στην οποία εμφανίζονται οι κατανεμημένοι συντονισμοί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος, ενώ τα φάσματα από 20 MHz έως 40 MHz και πάνω από 200 MHz βρέθηκαν να επηρεάζονται ελάχιστα από τα περιβάλλοντα μέτρησης και τις διατάξεις του καλωδίου.

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδικασίας

3.1 Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός παραγωγής και καταγραφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται ευρέως για την διεξαγωγή των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής ήταν διαθέσιμος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων και είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων
- Ομοαξονικά Καλώδια Υψηλής Συχνότητας
- Εξασθενητής
- Παλμογράφος
- Κλωβός Faraday
- Συσκευή Δοκιμής (Device Under Test DUT)

3.1.1 Γεννήτριες Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων

Οι Γεννήτριες Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων, που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία είναι οι εξής:

- DITO της εταιρείας EM TEST
- SESD 230 της εταιρίας Schlöder GmbH

Αμφότερες οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες λειτουργούν με μπαταρία και συνεπώς δεν εμπλέκονται καλώδια φόρτισης, τροφοδοτικά και καλώδια τροφοδοσίας.

3.1.1.1 Γεννήτρια DITO

Η γεννήτρια DITO παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ ±16.5 kV. 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.

3.1.1.2 Γεννήτρια Schlöder / SESD 230

Η γεννήτρια Schlöder / SESD 230 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρα μεταξύ ±30 kV. Διαθέτει επιλογή συχνότητας επανάληψης των παλμών εκφόρτισης, καθώς και επιλογή μετρητή από 1 έως 9999. Αντίστοιχα, 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.

3.1.3. 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 διαρκεία 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 τους.

3.1.4. Εξασθενητής

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

3.1.5. Παλμογράφος

Ο παλμογράφος TDS 7245B της εταιρείας Tektronix διαθέτει εύρος ζώνης 2.5 GHz και συνεπώς πληροί τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61000-4-2 στο οποίο αναφέρεται η απαίτηση ο παλμογράφος να έχει οριακή συχνότητα άνω των 2 GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, λειτουργικό σύστημα Windows 2000 και η αποθήκευση των δεδομένων έγινε μέσω φορητής αποθηκευτικής μονάδας USB. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.1).

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	$\pm 2\% + (2\% \text{ x offset})$		
Σύζευξη εισόδου	DC, GND		
Αντίσταση εισόδου	$50 \ \Omega \pm 2,5\%$		
Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω	2 mV/div έως 1 V/div		
Κάθετη ανάλυση	8 bit		
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	$<1 V_{RMS}$ για r < 100 mV/div, $<5 V_{RMS}$ για r ≥ 100 mV/div		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Chl	20 GS/s		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch2	10 GS/s		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch3	5 GS/s		
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch4	1 GS/s		

Σχήμα 3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Παλμογράφου

3.2 Η Πειραματική Διάταξη

Η κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης τοποθετούνταν πάνω σε μια ξύλινη βάση και δενόταν σε αυτή έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη σταθερότητα κατά τις μετρήσεις, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (Σχ. 3.2, 3.3), για κάθε μία από τις γεννήτριες.



Σχήμα 3.2 Τοποθέτηση Γεννήτριας SESD 230 κατά τις μετρήσεις



Σχήμα 3.3 Τοποθέτηση Γεννήτριας DITO κατά τις μετρήσεις

Πραγματοποιήθηκαν εκφορτίσεις επαφής και συνεπώς χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι ακίδες για ηλεκτροστατική εκφόρτιση επαφής, οι οποίες και εκφόρτιζαν πάνω σε ένα σημείο του κουτιού δοκιμής, το οποίο κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο προς αξιοποίηση για τις μετρήσεις. Η ακίδα του "πιστολιού" ερχόταν σε επαφή με τον ομοαξονικό μετατροπέα, ο οποίος 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 μία. Ο ένας τύπος αρχείου ήταν φιλικός προς το λειτουργικό περιβάλλον Matlab και είχε κατάληξη .dat, ενώ ο δεύτερος τύπος αρχείου την κατάληξη .csv.

Για κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι καλωδίου. Ένα καλώδιο επιστροφής ρεύματος με το ένα άκρο γειωμένο που συνδεόταν με την ESD γεννήτρια (ESD Grounded Return Cable) με μήκος 2 m κι ένα καλώδιο επιστροφής με το ένα άκρο γειωμένο και το άλλο συνδεδεμένο με το EUT (EUT Grounded Return Cable) μικρότερου μήκους, περίπου 1,5 m. Για την στήριξη του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας, η διάταξη και το σημείο γείωσης του οποίου μας απασχόλησε ιδιαίτερα, χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος τριπόδου όταν κρινόταν αναγκαίο (π.χ. τριγωνική διάταξη του εν λόγω καλωδίου), όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.4).



Σχήμα 3.4 Στήριζη Καλωδίου Γεννήτριας σε Τρίποδο

3.3 Στάδια Μετρήσεων

Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια DITO ρυθμισμένη σε εκφόρτιση επαφής για τα επίπεδα τάσης: +4 kV, -4 kV, +8 kV, -8 kV. Για κάθε ένα σετ μετρήσεων που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο τάσης διεξήχθησαν πέντε επαναλήψεις και συνεπώς λήφθηκαν πέντε αποτελέσματα. Συνολικά, λήφθηκαν σετ μετρήσεων για τρεις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας με σημείο γείωσης κοινό με αυτό του καλωδίου επιστροφής του κουτιού δοκιμής, το οποίο βρισκόταν σε ελεύθερη διάταξη. Αρχικά, το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας τέθηκε σε ελεύθερη διάταξη με σημείο γείωσης στο κέντρο της πλάκας, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5. Έπειτα, τέθηκε σε τριγωνική διάταξη με την στήριξη του τρίποδου με σημείο γείωσης στο κέντρο, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.6. Τέλος, τέθηκε σε τριγωνική διάταξη με σημείο γείωσης κεντρικά και πλησίον του κλωβού Faraday, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7.



Σχήμα 3.5 Καλώδιο επιστροφής σε τριγωνική διάταζη με σημείο γείωσης κεντρικά και πλησίον του κλωβού Faraday



Σχήμα 3.6 Καλώδιο επιστροφής σε τριγωνική διάταζη με σημείο γείωσης στο κέντρο



Σχήμα 3.7 Καλώδιο επιστροφής σε ελεύθερη διάταξη με σημείο γείωσης στο κέντρο

Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια SESD 230 με χρήση του δικού της πλακέ καλωδίου ρυθμισμένη σε εκφόρτιση επαφής για τα επίπεδα τάσης: +4 kV, -4 kV, +8 kV, -8 kV. Αντίστοιχα και με το πρώτο στάδιο για κάθε ένα σετ μετρήσεων που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο τάσης διεξήχθησαν πέντε επαναλήψεις και συνεπώς λήφθηκαν πέντε αποτελέσματα. Συνολικά, λήφθηκαν σετ μετρήσεων για τρεις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας με σημείο γείωσης κοινό με αυτό του καλωδίου επιστροφής του κουτιού δοκιμής, το οποίο βρισκόταν σε ελεύθερη διάταξη. Αρχικά, το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας τέθηκε σε ελεύθερη διάταξη με σημείο γείωσης στο κέντρο της πλάκας. Έπειτα, τέθηκε σε τριγωνική διάταξη με την στήριξη του τρίποδου με σημείο γείωσης στο κέντρο. Τέλος, τέθηκε σε τριγωνική διάταξη με σημείο γείωσης κεντρικά και πλησίον του κλωβού Faraday.

Σε τρίτο και τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με την γεννήτρια SESD 230 ρυθμισμένη σε εκφόρτιση επαφής για τα επίπεδα τάσης: +4 kV, -4 kV, +8 kV, -8 kV. Σε αυτό το στάδιο όμως απομακρύνθηκε το δικό της καλώδιο και αντικαταστάθηκε από το καλώδιο επιστροφής που χρησιμοποιήθηκε για την γεννήτρια DITO κατά το πρώτο στάδιο. Στο Σχήμα 3.8 παρατηρούμε την γεννήτρια SESD 230 με το καλώδιο της DITO, ενώ στο Σχήμα 3.9 την γεννήτρια SESD με το δικό της πλακέ καλώδιο. Αντίστοιχα για κάθε ένα σετ μετρήσεων που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο τάσης διεξήχθησαν πέντε επαναλήψεις και συνεπώς λήφθηκαν πέντε αποτελέσματα. Συνολικά, λήφθηκαν σετ μετρήσεων για τρεις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής του κουτιού δοκιμής, το οποίο βρισκόταν σε ελεύθερη διάταξη. Αρχικά, το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας τέθηκε σε ελεύθερη διάταξη με σημείο γείωσης στο κέντρο της πλάκας. Έπειτα, τέθηκε σε τριγωνική διάταξη με την στήριξη του τρίποδου με σημείο γείωσης στο κέντρο. Τέλος, τέθηκε σε τριγωνική διάταξη με σημείο γείωσης κεντρικά και πλησίον του κλωβού Faraday.



Σχήμα 3.8 Γεννήτρια SESD 230 με το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε για την γεννήτρια DITO



Σχήμα 3.9 Γεννήτρια SESD 230 με το δικό της πλακέ καλώδιο

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται επιγραμματικά τα διαφορετικά στάδια των μετρήσεων.

ΣΤΑΔΙΟ	1°	2°	3°
Γεννήτρια	DITO	SESD 230	SESD 230
	+4	+4	+4
Επίπεδα Τάσης	-4	-4	-4
(kV)	+8	+8	+8
	-8	-8	-8

Πίνακας 3.1	Συνοπτική	Παρουσίαση	των Σταδίων	των Μετρήσεων
2	1	1 1		/ /

Καλώδιο Κατασκευαστή	NAI	NAI	ΟΧΙ (καλώδιο επιστροφής της DITO)
	Ελεύθερη με σημείο	Ελεύθερη με σημείο	Ελεύθερη με σημείο
	γείωσης στο κέντρο	γείωσης στο κέντρο	γείωσης στο κέντρο
Διάταξη	Τριγωνική με σημείο	Τριγωνική με σημείο	Τριγωνική με σημείο
Καλωδίου	γείωσης στο κέντρο	γείωσης στο κέντρο	γείωσης στο κέντρο
Επιστροφής	Τριγωνική με σημείο	Τριγωνική με σημείο	Τριγωνική με σημείο
Γεννήτριας	γείωσης κεντρικά	γείωσης κεντρικά	γείωσης κεντρικά
	πλησίον του κλωβού	πλησίον του κλωβού	πλησίον του κλωβού
	Faraday	Faraday	Faraday
Αριθμός			
Επαναλήψεων	5	5	5
ανά επίπεδο	5	5	5
τάσης			

Συνολικά λήφθηκαν 40 σετ μετρήσεων με 5 αποτελέσματα - επαναλήψεις στο καθένα από αυτά. Προς αξιοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένα αποτέλεσμα από κάθε σετ, καθώς και μόνο οι μετρήσεις που αντιστοιχούσαν στα θετικά επίπεδα τάσης (+4 kV ως επί το πλείστων και +8 kV όπου κρίθηκε αναγκαίο).

Για την επεξεργασία των μετρήσεων (πέντε μετρήσεις ανά σετ, με κάθε σετ να αντιστοιχεί σε ένα από τα 4 επίπεδα τάσης) συγκεντρώθηκαν φάκελοι με βάση τις συγκρίσεις που θα μας απασχολήσουν. Συνολικά δημιουργήθηκαν οι εξής 9 φάκελοι:

- DITO FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE
- DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY
- DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE
- SESD 230 FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE
- SESD 230 FREE GROUNDING FLAT CABLE POINT CENTRE
- SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY
- SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE
- SESD 230 TRIANGLE FLAT CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY
- SESD 230 TRIANGLE FLAT CABLE GROUNDING POINT CENTRE

Σε κάθε έναν από αυτούς εμπεριέχονται τα διάφορα σετ με τις μετρήσεις που αντιστοιχούν στο περιβάλλον που αυτές πραγματοποιήθηκαν. Το περιβάλλον και συνεπώς οι φάκελοι διαφοροποιούνται ως προς την γεννήτρια (DITO ή SESD 230), το καλώδιο για την SESD 230 (FLAT αντιστοιχεί στο καλώδιο του κατασκευαστή όπου αναφέρεται, ενώ όταν δεν χρησιμοποιείται προσδιορισμός ως προς το καλώδιο εξυπακούεται το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε και για την DITO) και τέλος, η διάταξη του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας (FREE GROUNDING POINT CENTRE, TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE, TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE, TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα διαφορετικά σενάρια μέτρησης με τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό τους.

Σενάριο	Γεννήτρια	Καλώδιο Κατασκευαστή	Σημείο Γείωσης Καλωδίου	Διάταξη Καλωδίου
DITO FREE				
GROUNDING CABLE	DITO	NAI	Κέντρο	ελεύθερη
POINT CENTRE				
DITO TRIANGLE			πλησίον του	
CABLE GROUNDING	DITO	NAI	κλωβού	τοινωνική
POINT CENTRE LINE	DITO		Faraday	τριγωνικη
EDGE FARADAY			Taraday	
DITO TRIANGLE				
CABLE GROUNDING	DITO	NAI	Κέντρο	τριγωνική
POINT CENTRE				
SESD 230 FREE				
GROUNDING CABLE	SESD 230	OXI	Κέντρο	ελεύθερη
POINT CENTRE				
SESD 230 FREE				
GROUNDING FLAT	SESD 230	NAI	Κέντρο	ελεύθερη
CABLE POINT CENTRE				
SESD 230 TRIANGLE			πλησίον του	
CABLE GROUNDING	SESD 230	OXI	κλωβού	τοινωνική
POINT CENTRE LINE	SESD 250	OAI	Faraday	τριγωνική
EDGE FARADAY			1 araday	
SESD 230 TRIANGLE				
CABLE GROUNDING	SESD 230	OXI	Κέντρο	τριγωνική
POINT CENTRE				
SESD 230 TRIANGLE				
FLAT CABLE	SESD 230	NAI	Κέντοο	τοινωνική
GROUNDING POINT	SLSD 250		Kevipo	τριγωνική
CENTRE				
SESD 230 TRIANGLE				
FLAT CABLE			πλησίον	
GROUNDING POINT	SESD 230	NAI	κλωβού	τριγωνική
CENTRE LINE EDGE			Faraday	
FARADAY				

Πίνακας 3.2 Συνοπτική Παρουσίαση των Διαφορετικών Σεναρίων Μέτρησης

3.4 Επεξεργασία Μετρήσεων

3.4.1 Πρώτη Φάση Επεξεργασίας

Η μέτρηση της κυματομορφής ρεύματος κατά την δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής σε πραγματικό χρόνο αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, ειδικά στα πρώτα νανοδευτερόλεπτα που αντιστοιχούν και στις υψηλότερες συχνότητες. Η ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε και να αναλύσουμε τις μετρήσεις των κυματομορφών που προκύπτουν είναι αρκετά κρίσιμη τόσο για τα συμπεράσματα της

παρούσας εργασίας όσο και συνολικότερα για την αναπαραγωγιμότητα της μεθόδου των δοκιμών ατρωσίας.

Κατά την πρώτη φάση της επεξεργασίας, συνεπώς, μας ενδιαφέρει η ανακατασκευή των κυματομορφών που προέκυψαν από τις μετρήσεις κατά τις δοκιμές και αποθηκεύτηκαν μέσω του παλμογράφου. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να αποδοθούν με ακρίβεια πραγματικού χρόνου οι κυματομορφές.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε, με τη χρήση κατάλληλου κώδικα στο περιβάλλον MATLAB, βασίστηκε σε μελέτη [55] που αξιοποιεί μετρήσεις από ανιχνευτές ρεύματος και τεχνικές αντιστάθμισης της συχνότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εν λόγω μελέτη.

Η πειραματική διαδικασία συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις διακρίβωσης του Προτύπου IEC 61000-4-2, το οποίο καθορίζει τα χαρακτηριστικά του στόχου ρεύματος 2 Ω που χρησιμοποιείται για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση επαφής, καθώς και την απαιτούμενη διάταξη, που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.10 Διάταξη Διακρίβωσης για τις μετρήσεις της γεννήτριας ΕΜ TEST Dito ESD μέσω του ανιχνευτή ρεύματος F-65 και του στόχου Pellegrini

Ο στόχος ρεύματος που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις είναι ο MD 103 Pellegrini Target της Teseq [56]. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας όσον αφορά τις μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι το εύρος ζώνης του εξοπλισμού της μέτρησης. Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 απαιτεί τη χρήση παλμογράφου με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 2 GHz. Ωστόσο, έρευνα [57] επισημαίνει ότι το απαραίτητο εύρος ζώνης για την ορθή καταγραφή κυματομορφών ESD και την ελαχιστοποίηση της σχετικής αβεβαιότητας μέτρησης είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Ο επιλεγμένος παλμογράφος για τις μετρήσεις είναι ο TDS 7254B της Tektronix [58] με εύρος ζώνης 2,5 GHz και ρυθμό δειγματοληψίας 20 GS/s. Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο FCC F-65 Current Monitor Probe [59]. Το χρονικό παράθυρο καταγραφής έχει οριστεί μεταξύ –4 και 156 ns, καταγράφοντας το σύνολο της κυματομορφής ESD, επιτρέποντας την εκτίμηση του συνολικού φορτίου που εγχέεται από τη γεννήτρια ESD στον στόχο ρεύματος. Η τιμή των 40 ps ήταν το επιλεγμένο χρονικό βήμα και ο αριθμός των καταγεγραμμένων τιμών ήταν 4000. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι παραγόμενες κυματομορφές που προέκυψαν από τον στόχο Pellegrini και με τον ανιχνευτή ρεύματος.



Σχήμα 3.11 Κυματομορφή ESD που προέκυψε από τον στόχο Pellegrini (πορτοκαλί) και η αρχική προκύπτουσα κυματομορφή με τον τρέχοντα ανιχνευτή χωρίς την εφαρμογή μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας (πράσινο)

Αποσυνέλιξη ορίζεται η διαδικασία φιλτραρίσματος ενός σήματος για την αντιστάθμιση μιας ανεπιθύμητης συνέλιξης. Η ανεπιθύμητη συνέλιξη στην περίπτωση της προαναφερθείσας διαδικασίας μέτρησης προκύπτει από την απόσβεση στις χαμηλές συχνότητες του ανιχνευτή ρεύματος και το περιορισμένο εύρος ζώνης του (1 GHz). Η παραμόρφωση αυτή μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί όταν συγκριθούν οι δύο καταγεγραμμένες κυματομορφές πριν εφαρμοστεί οποιαδήποτε μέθοδος αντιστάθμισης.

Η μέθοδος αποσυνέλιξης συνοψίζεται ως εξής:

$$I_{reconstructed}(j\omega) = I_{probe}(j\omega) * \frac{1}{Z_{probe}(j\omega)} * H_{LPF}(j\omega)$$

, όπου

- Ο παράγοντας Ι_{probe}(jω) προκύπτει από τον Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier του σήματος ρεύματος που προέκυψε με τον ανιχνευτή ρεύματος
- Ο παράγοντας Z_{probe}(jω) μπορεί να υπολογιστεί από το ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας διακρίβωσης του ανιχνευτή, που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα [60], όταν το μέτρο της εμπέδησης μεταφοράς είναι διαθέσιμο από τον κατασκευαστή

 Ο παράγοντας Η_{LPF}(jω) είναι η συνάρτηση μεταφοράς ενός φίλτρου χαμηλής διέλευσης με συχνότητα αποκοπής ίση με το εύρος ζώνης του ανιχνευτή, το οποίο στην περίπτωση του ανιχνευτή F-65 είναι 1 GHz, και εφαρμόζεται για την ενσωμάτωση του περιορισμού εύρους ζώνης. Το χαμηλοπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται είναι ένα απλό φίλτρο πρώτης τάξης με τη συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης:

$$H_{LPF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega C_{LPF} R_{LPF}}$$

Η διορθωμένη κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορεί να υπολογιστεί με χρήση Αντίστροφου Γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier του Ireconstructed(jw).



Σχήμα 3.12 Ισοδύναμο Κύκλωμα του ανιχνευτή ρεύματος F-65 κατά την διάταζη διακρίβωσης

Στην συνέχεια μέσω του κώδικα πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των τιμών detrend.

Το DC offset ενός παλμογράφου ορίζεται ως η ανεπιθύμητη DC τάση που εμφανίζεται στην έξοδο του λειτουργικού ενισχυτή ενός παλμογράφου και επικαλύπτεται με το επιθυμητό σήμα. Γενικά, το DC offset δεν παραμορφώνει σημαντικά το αρχικό σήμα. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται ανιχνευτής ρεύματος για τη μέτρηση ρευμάτων ESD, το τελευταίο μέρος της αποκτηθείσας κυματομορφής παραμορφώνεται σημαντικά. Αυτή η παραμόρφωση αποδίδεται στη χαρακτηριστική ολοκλήρωση του ανιχνευτή ρεύματος και μπορεί να αντισταθμιστεί με την απομάκρυνση της τάσης DC από την αρχική κυματομορφή, δηλαδή με την προσθήκη ή την αφαίρεση μιας DC τιμής σε ολόκληρη την κυματομορφή ώστε η προκύπτουσα κυματομορφή χωρίς DC τάση και η κυματομορφή που αποκτάται από τον στόχο Pellegrini να συγκλίνουν στο μηδέν με τον ίδιο τρόπο.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τη σύγκριση της μη διορθωμένης κυματομορφής αποσυνελικτικής επεξεργασίας με την κυματομορφή αναφοράς που έχει αποκτηθεί με τον στόχο Pellegrini. Οι τιμές ρεύματος για τα τελευταία 80 σημεία μέτρησης της ανακατασκευασμένης, μη διορθωμένης κυματομορφής συγκρίνονται με την κυματομορφή αναφοράς και υπολογίζεται η απόκλισή τους. Αν αυτή η απόκλιση υπερβαίνει την τιμή του 0.1%, η τιμή detrend που εφαρμόζεται στην αρχική κυματομορφή που αποκτήθηκε με τον ανιχνευτή ρεύματος πρέπει να επαναρυθμιστεί και να επαναληφθεί ολόκληρη η μέθοδος αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας.

Το Σχήμα 3.14 παρουσιάζει την αρχική κυματομορφή ρεύματος του ανιχνευτή, την κυματομορφή αναφοράς από τον στόχο Pellegrini και την τελική κυματομορφή χωρίς DC τάση (με τιμή detrend 0.87) και αποσυνελιγμένη (μέσω της προαναφερθείσας μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας) για παλμό +4 kV.



Σχήμα 3.13 Σύγκριση των τιμών ρεύματος της μη διορθωμένης (χωρίς detrend) κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς για τα τελευταία 80 σημεία μέτρησης



Σχήμα 3.14 Σύγκριση της κυματομορφής του στόχου Pellegrini (κυματομορφή αναφοράς), της αρχικής κυματομορφής που αποκτήθηκε με τον ανιχνευτή ρεύματος, και της τελικής κυματομορφής χωρίς DC τάση (ανακατασκευασμένη) για παλμό +4 kV με τη γεννήτρια EM Test Dito
3.4.2 Δεύτερη Φάση Επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των μετρήσεων από τις διορθωμένες και ανακατασκευασμένες κυματομορφές που προέκυψαν από τις δοκιμές και αποθηκεύτηκαν μέσω του παλμογράφου, αναπτύχθηκε κώδικας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του 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 έκδοση που έχει προταθεί και είναι οι εξής [29], [30]:

- Ip: Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης
- I₃₀: Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 30ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή I_p*10%
- I60: Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 60ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή I_p*10%
- t_r: Ο χρόνος ανόδου, το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή I_p*10% μέχρι τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή I_p*90%
- I_{p2}: Το δεύτερο μέγιστο, δηλαδή το μέγιστο που αντιστοιχεί στο δεύτερο μέρος της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης μεταξύ 10 ns και 40 ns

Κάθε σετ που εμπεριέχει 5 αποτελέσματα επεξεργάζεται με βάση τον κώδικα. Τα αρχεία που αντιστοιχούν σε κάθε μέτρηση αποθηκεύονται εκ νέου ως .dat, διορθωμένα, για να επαναχρησιμοποιηθούν και μετέπειτα.

Τέλος, συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα του MATLAB ως προς τις παραμέτρους ελέγχους, μαζί με τους μέσους όρους για κάθε έναν από αυτούς που αντιστοιχεί σε ένα σετ. Ανά περιβάλλον μέτρησης και συνεπώς ανά φάκελο συγκεντρώθηκαν πίνακες με τους μέσους όρους των παραμέτρων για κάθε επίπεδο τάσης. Επειδή ως προς την έκβαση συμπερασμάτων μας ενδιαφέρει η σύγκριση των αποτελεσμάτων για συγκρίσιμα περιβάλλοντα μέτρησης, η αυτούσια παράθεση των πινάκων αυτών δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο νόημα. Ως εκ τούτου τα στοιχεία των πινάκων θα αξιοποιηθούν στην μετέπειτα φάση επεξεργασίας για τις απαιτούμενες συγκρίσεις.

3.4.3 Τρίτη Φάση Επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των μετρήσεων από τις κυματομορφές που προέκυψαν από τις δοκιμές και αποθηκεύτηκαν μέσω του παλμογράφου, αναπτύχθηκε κώδικας στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB για την άμεση και αυτοματοποιημένη μέθοδο επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων αυτών.

Με το πρόγραμμα έχουμε τη δυνατότητα να ανακατασκευάσουμε την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης της κάθε προσομοίωσης καθώς και το φασματικό της περιεχόμενο.

Όπως αναφέρθηκε, για κάθε σετ πραγματοποιήθηκαν πέντε επαναλήψεις μέτρησης και συνεπώς συλλέχθηκαν πέντε ξεχωριστές κυματομορφές. Τελικώς, καταγράφησαν κάθε

μία από τις 13 διατάξεις μέτρησης τα σετ για επίπεδο τάσης στα +4 kV, και όπου κρίθηκε αναγκαίο τα σετ στα +8 kV, και από κάθε ένα από τα τελικά σετ η 3^η σε σειρά μέτρηση από τις κυματομορφές που προέκυψαν. Οι εν λόγω κυματομορφές για τα συγκρίσιμα περιβάλλοντα μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν στον σχετικό κώδικα του MATLAB. Ενώ, για τους πίνακες σύγκρισης αξιοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των παραμέτρων ελέγχου του κάθε σετ κυματομορφών που κρατήθηκε προς την απαιτούμενη σύγκριση.

3.5 Αποτελέσματα Μετρήσεων και Σχολιασμός Κυματομορφών

Παρακάτω παρουσιάζονται, με τη μορφή γραφημάτων, τα αποτελέσματα των διαφόρων σταδίων του πειράματος. Οι κυματομορφές, παρουσιασμένες σε γραφήματα έχουν ομαδοποιηθεί έτσι ώστε να μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα. Το επίπεδο τάσης ως επί το πλείστων είναι στα +4 kV και όπου κρίθηκε αναγκαίο στα +8 kV, και αυτά αναφέρονται στα διαγράμματα.

3.5.1 Πρώτη Φάση Αποτελεσμάτων – DITO και SESD 230 με χρήση του ίδιου καλωδίου για τις τρεις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου επιστροφής

Σε πρώτη φάση παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του ίδιου καλωδίου από τις δύο γεννήτριες, την DITO και την SESD 230. Στα επόμενα διαγράμματα παρατηρούμε την παραγόμενη κυματομορφή ρεύματος δύο γεννήτριες με το ίδιο καλώδιο κατά τις τρεις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου που επιλέχθηκαν.



Σχήμα 3.15 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.16 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE

Πίνακας 3.3 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE και μεταζύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
DITO FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	14.682	8.0471	1.6206	5.2365	8.2104
SESD 230 FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	14.295	5.9703	1.3629	5.1046	6.8741
	2.6359%	25.808%	15.902%	2.5189%	16.2757%

Διαπιστώνεται ότι, για τις δύο γεννήτριες με σημείο γείωσης τοποθετημένο στο κέντρο σε ελεύθερη διάταξη του καλωδίου επιστροφής, προκύπτουν δύο κυματομορφές ρεύματος με σημαντικές διαφοροποιήσεις. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα φάσματα του ρεύματος εκφόρτισης που αντιστοιχούν σε κάθε γεννήτρια παρουσιάζουν διαφορές, με χαρακτηριστικές εμφανίσεις βυθισμάτων και κορυφών σε διαφορετικές συχνότητες. Ενδεικτικά, η SESD 230 παρουσιάζει ένα εκ των βυθισμάτων περί τα 230 MHz, ενώ αντίστοιχα η DITO περί τα 260 MHz. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων συντονισμού σε διαφορετικούς χρονικούς συσχετισμούς στο πεδίο του χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών. Αντίστοιχα, περί τα 55 MHz η DITO εμφανίζει μια σημαντική κορυφή σε σύγκριση με την SESD 230, το οποίο αποτυπώνεται σε αντίστοιχο συντονισμό στο πεδίο του χρόνου. Οι διαφοροποιήσεις επιβεβαιώνονται και από τα στοιχεία του αντίστοιχου πίνακα, στον οποίο καταγράφονται και οι ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των αντίστοιχων παραμέτρων, οι οποίες είναι σημαντικού μεγέθους.



Σχήμα 3.17 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.18 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE

Πίνακας 3.4 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	Ip2 (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	13.533	7.7649	2.2665	5.4429	7.9056
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	14.092	6.1454	1.1593	5.0052	6.6954
	-4.1306%	20.857%	48.851%	8.0417%	15.308%

Διαπιστώνεται επίσης ότι, στην περίπτωση των δύο γεννητριών με σημείο γείωσης τοποθετημένο στο κέντρο σε τριγωνική διάταξη του καλωδίου επιστροφής, προκύπτουν κυματομορφές ρεύματος με σαφώς διακριτές διαφοροποιήσεις. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι τα φάσματα του ρεύματος εκφόρτισης που αντιστοιχούν σε κάθε γεννήτρια εμφανίζουν διαφορές, με χαρακτηριστικά βυθίσματα και κορυφές σε διαφορετικές συχνότητες. Επιπλέον, σε σύγκριση με την ελεύθερη διάταξη, παρατηρείται ότι τα φασματικά χαρακτηριστικά (βυθίσματα και κορυφές) εμφανίζουν διαφοροποιήσεις για κάθε μία από τις δύο γεννήτριες.



Σχήμα 3.19 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY



Σχήμα 3.20 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY

Πίνακας 3.5 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO AND SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	Ip2 (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	13.970	7.9505	2.1576	5.7649	7.8186
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	14.220	6.2268	1.3405	5.0045	7.0327
	-1.7896%	21.680%	37.871%	13.190%	10.052%

Αντίστοιχα, στην περίπτωση των δύο γεννητριών με σημείο γείωσης τοποθετημένο πλησίον του κλωβού Faraday σε τριγωνική διάταξη του καλωδίου επιστροφής, προκύπτουν κυματομορφές ρεύματος με σαφώς διακριτές διαφοροποιήσεις. Επιπλέον, σε σύγκριση με τις προηγούμενες διαδρομές του καλωδίου επιστροφής, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις ως προς τα φασματικά χαρακτηριστικά (βυθίσματα και κορυφές) για κάθε μία από τις δύο γεννήτριες.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των κυματομορφών των δύο γεννητριών, σε καθεμία από τις προαναφερθείσες διατάξεις, δεν θα αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης στην παρούσα εργασία. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται

κυρίως σε διαφορές στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των γεννητριών, οι οποίες συνεπάγονται τη δημιουργία διαφορετικών παραγόμενων κυκλωματικών διατάξεων. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζουν αποκλίνουσες εμπεδήσεις, με αποτέλεσμα διαφοροποιημένα φασματικά χαρακτηριστικά και, κατ' επέκταση, διαφορετικές παραγόμενες κυματομορφές ρεύματος.

3.5.2 Δεύτερη Φάση Αποτελεσμάτων – DITO κατά τη σύγκριση των τριών διαφορετικών διατάξεων καλωδίου επιστροφής

Σε δεύτερη φάση παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση της γεννήτριας DITO συγκρίνοντας τις παραγόμενες κυματομορφές κατά τις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου. Αρχικά συγκρίνεται για το ίδιο σημείο γείωσης η παραγόμενη κυματομορφή της γεννήτριας για ελεύθερη και τριγωνική διάταξη καλωδίου και μετέπειτα για την τριγωνική διάταξη με αλλαγή του σημείου γείωσης.



Σχήμα 3.21 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.22 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.23 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +8 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.24 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +8 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE

Πίνακας 3.6 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	Ip2 (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
DITO FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	14.683	8.0471	1.6206	5.2365	8.2104
DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	13.533	7.7649	2.2665	5.4429	7.9056
	7.8322%	3.5069%	-39.856%	-3.9416%	3.7124%

Πίνακας 3.7 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +8 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+8 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I ₃₀ (A)	I60 (A)
DITO FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	29.228	15.4376	1.3297	9.7598	15.8313
DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	26.635	15.3323	1.8589	10.1041	15.4160
	8.8716%	0.6821%	-39.799%	-3.5277%	2.6233%

Διαπιστώνεται ότι, για την γεννήτρια DITO με σημείο γείωσης τοποθετημένο στο κέντρο για ελεύθερη και για τριγωνική διάταξη του καλωδίου επιστροφής, προκύπτουν δύο διαφορετικές κυματομορφές ρεύματος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα φάσματα του ρεύματος εκφόρτισης που αντιστοιχούν σε κάθε γεωμετρία της διάταξης (ελεύθερη και τριγωνική) παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τα φασματικά γαρακτηριστικά τους (βυθίσματα και κορυφές). Αν και σε σύγκριση με την προηγούμενη φάση, οι αποκλίσεις αυτές δεν είναι στον ίδιο βαθμό σημαντικές - όπως επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία του αντίστοιχου πίνακα, στον οποίο καταγράφονται και οι ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των αντίστοιχων παραμέτρων – είναι αρκετές ώστε να προκύψουν κυματομορφές με εμφανείς διαφοροποιήσεις. Ενδεικτικά, η κορυφή περί τα 55 MHz για την ελεύθερη διάταξη και το βύθισμα περί τα 240 MHz για την τριγωνική οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων συντονισμού σε διαφορετικούς γρονικούς συσχετισμούς στο πεδίο του γρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών. Συμπεραίνεται πως η διαφορετική γεωμετρία της διάταξης του καλωδίου επιστροφής και συνεπώς του μονοπατιού επιστροφής του ρεύματος παίζει καθοριστικό ρόλο για την αποκτηθείσα κυματομορφή του ρεύματος, καθώς προκύπτουν διαφορετικές εμπεδήσεις και συνεπώς διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 3.25 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.26 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE

Πίνακας 3.8 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	Ip2 (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
DITO FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	14.683	8.0471	1.6206	5.2365	8.2104
DITO TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	13.970	7.9505	2.1576	5.7649	7.8186
	8.8716%	0.6821%	-39.799%	-3.5277%	2.6233%

Όπως επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία του αντίστοιχου πίνακα, στον οποίο καταγράφονται και οι ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των αντίστοιχων παραμέτρων, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο κυματομρφών για την γεννήτρια DITO σε τριγωνομετρική διάταξη ως προς το σημείο γείωσης στο κέντρο και πλησίον του κλωβού Faraday είναι αμελητέες. Παρατηρείται και με βάση τα φάσματα των κυματομορφών, όπου υπάργει και σύγκλιση των φασματικών τους γαρακτηριστικών. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το βύθισμα περί τα 250 MHz για σημείο γείωσης τοποθετημένο στο κέντρο, όπου και εμφανίζεται πιο "βαθύ", καθώς και η ποσοστιαία διαφορά (περίπου 40%) του γρόνου ανόδου. Όπως αναφέρεται και στο Πρότυπο, ο χρόνος ανόδου είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή Ι_p*10% μέχρι τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή Ι_p*90%. Επιπλέον, μετά από 200MHz εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος εντός της ESD γεννήτριας, το οποίο δεν επηρεάζεται από το περιβάλλον της μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου. Άλλωστε, το πρώτο κομμάτι της κυματομορφών, κατά το οποίο διακρίνονται και οι εν λόγω διαφοροποιήσεις αφορούν καθαρά την γεννήτρια και όχι τόσο το περιβάλλον μέτρησης. Συνεπώς, η μετακίνηση του σημείου γείωσης από το κέντρο πλησίον του κλωβού Faraday με την διάταξη να παραμένει τριγωνική δεν επηρέασε σημαντικά το μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος και κατ' επέκταση και την ίδια την κυματομορφή.

3.5.3 Τρίτη Φάση Αποτελεσμάτων – SESD 230 κατά τη σύγκριση των τριών διαφορετικών διατάξεων καλωδίου επιστροφής με χρήση του καλωδίου της DITO

Σε τρίτη φάση παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση της γεννήτριας SESD 230 συγκρίνοντας τις παραγόμενες κυματομορφές κατά τις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου. Αρχικά συγκρίνεται για το ίδιο σημείο γείωσης η παραγόμενη κυματομορφή της γεννήτριας για ελεύθερη και τριγωνική διάταξη καλωδίου και μετέπειτα για την τριγωνική διάταξη η παραγόμενη κυματομορφή ως προς την αλλαγή του σημείου γείωσης. Οι μετρήσεις που αξιοποιήθηκαν για την σύγκριση ήταν αυτές που πραγματοποιήθηκαν με το ίδιο καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε και για την DITO. Ως προς την σύγκριση δεν μας απασχολεί εδώ τόσο το καλώδιο.



Σχήμα 3.27 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.28 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE

Πίνακας 3.9 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE AND FREE GROUNDING POINT CENTRE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	Ip2 (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
SESD 230 FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	14.295	5.9703	1.3629	5.1046	6.8741
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	14.092	6.1454	1.1593	5.0052	6.6954
	1.4200%	-2.9329%	14.939%	1.9473%	2.5996%

Όπως και για την DITO, διαπιστώνεται ότι, για την γεννήτρια SESD 230 με σημείο γείωσης τοποθετημένο στο κέντρο για ελεύθερη και για τριγωνική διάταξη του καλωδίου επιστροφής, προκύπτουν δύο διαφορετικές κυματομορφές ρεύματος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα φάσματα του ρεύματος εκφόρτισης που αντιστοιχούν σε κάθε γεωμετρία της διάταξης (ελεύθερη και τριγωνική) παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τα φασματικά χαρακτηριστικά τους (βυθίσματα και κορυφές). Μάλιστα, όπως αναφέρθηκε, η συχνότητα που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου κυμαίνεται από 40 MHz έως 200 MHz, στην οποία εμφανίζονται οι κατανεμημένοι συντονισμοί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Εντός αυτού του διαστήματος παρατηρούμε και τα διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά, που οφείλονται στη διαφορετική επιλογή της διαδρομής του καλωδίου επιστροφής λόγω διατάξεων διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 3.29 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE



Σχήμα 3.30 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE

Πίνακας 3.10 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY AND GROUNDING POINT CENTRE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	14.220	6.2268	1.3405	5.0045	7.0327
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	14.092	6.1454	1.1593	5.0052	6.6954
	0.9001%	1.3073%	13.517%	-0.0140%	4.7962%

Όπως και για την DITO παρατηρείται ότι οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο κυματομρφών για την γεννήτρια SESD 230 σε τριγωνομετρική διάταξη ως προς το σημείο γείωσης στο κέντρο και πλησίον του κλωβού Faraday είναι αμελητέες. Μάλιστα, επιβεβαιώνεται και από τα στοιχεία του αντίστοιχου πίνακα, στον οποίο καταγράφονται και οι ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των αντίστοιχων παραμέτρων συγκαταλέγοντας στην περίπτωση της εν λόγω γεννήτριας και τον χρόνο ανόδου. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται πως η μετακίνηση του σημείου γείωσης από το κέντρο πλησίον του κλωβού Faraday με την διάταξη να παραμένει τριγωνική δεν επηρεάζει σημαντικά το μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος και κατ' επέκταση και την ίδια την κυματομορφή σε αντιδιαστολή με την σύγκριση ελεύθερης και τριγωνικής διάταξης.

3.5.4 Τέταρτη Φάση Αποτελεσμάτων – SESD 230 κατά τη σύγκριση των τριών διαφορετικών διατάξεων καλωδίου επιστροφής ως προς με και χωρίς τη χρήση του πλακέ καλωδίου της

Σε τέταρτη φάση παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση της γεννήτριας SESD 230 συγκρίνοντας την παραγόμενη κυματομορφή του ρεύματος κατά τις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου ως προς με και χωρίς την χρήση του δικού της πλακέ καλωδίου.



Σχήμα 3.31 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE



Σχήμα 3.32 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE

Πίνακας 3.11 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 FREE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I ₃₀ (A)	I60 (A)
SESD 230 FREE GROUNDING CABLE POINT CENTRE	14.295	5.9703	1.3629	5.1046	6.8741
SESD 230 FREE GROUNDING FLAT CABLE POINT CENTRE	14.763	6.1281	1.2552	4.6640	6.9387
	-3.2739%	-2.6431%	7.9023%	8.6314%	-0.9398%



Σχήμα 3.33 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE



Σχήμα 3.34 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE



Σχήμα 3.35 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +8 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE



Σχήμα 3.36 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +8 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE

Πίνακας 3.12 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	14.220	6.2268	1.3405	5.0045	7.0327
SESD 230 TRIANGLE FLAT CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	14.418	6.9317	1.4671	4.9123	7.1565
	-1.3924%	-11.320%	-9.4442%	1.8423%	-1.7604%

Πίνακας 3.13 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +8 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY WITH AND WITHOUT FLAT CABLE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+8 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	28.717	10.9309	1.1025	8.2638	13.1795
SESD 230 TRIANGLE FLAT CABLE GROUNDING POINT CENTRE LINE EDGE FARADAY	27.407	13.1975	1.1150	8.8472	13.8075
	4.5618%	-20.736%	-1.1338%	-7.0597%	-4.7650%



Σχήμα 3.37 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE



Σχήμα 3.38 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE

Πίνακας 3.14 Παράμετροι των Κυματομορφών του Ρεύματος στα +4 kV για την περίπτωση SESD 230 TRIANGLE GROUNDING POINT CENTRE WITH AND WITHOUT FLAT CABLE και μεταξύ τους ποσοστιαία μεταβολή

+4 kV	Ip (A)	I _{p2} (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
SESD 230 TRIANGLE CABLE GROUNDING POINT CENTRE	26.929	11.5730	1.0113	9.3183	12.9246
SESD 230 TRIANGLE FLAT CABLE GROUNDING POINT CENTRE	27.220	12.6668	1.0930	8.5431	13.7721
	-1.0806%	-9.4513%	-8.0787%	8.3191%	-6.5573%

Για κάθε μία από τις παραπάνω διατάξεις καλωδίου, παρατηρούνται – όσον αφορά τη γεννήτρια SESD 230 με ή χωρίς τη χρήση του πλακέ καλωδίου της – κυματομορφές ρεύματος με σαφώς διακριτές διαφοροποιήσεις. Οι διαφοροποιήσεις αυτές τεκμηριώνονται αφενός από τα δεδομένα του σχετικού πίνακα, όπου καταγράφονται και οι ποσοστιαίες μεταβολές μεταξύ των αντίστοιχων παραμέτρων, και αφετέρου από τα διαφοροποιημένα φασματικά χαρακτηριστικά των υπό σύγκριση φασμάτων. Παρότι οι ποσοστιαίες μεταβολές δεν είναι ιδιαίτερα έντονες, καθώς δεν καταγράφονται σημαντικές αποκλίσεις, η εμφάνιση βυθισμάτων και κορυφών σε διαφορετικός χρονικούς συσχετισμούς στο πεδίο του χρόνου, οδηγώντας έτσι σε απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στην περιοχή

συχνοτήτων από 40 MHz έως 200 MHz, όπου αναπτύσσονται οι κατανεμημένοι συντονισμοί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Συνεπώς, η χρήση διαφορετικού καλωδίου παρουσιάζει και διαφορετικούς κατανεμημένους συντονισμούς, άρα και διαφορετικό μονοπάτι επιστροφής ρεύματος, καθώς η γεννήτρια "βλέπει" διαφορετική εμπέδηση εισόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση διαφορών τόσο στα φασματικά χαρακτηριστικά όσο και στις κυματομορφές του ρεύματος.

3.5.5 Συμπεράσματα Συγκρίσεων

Συνοψίζοντας, η σχεδίαση της διαδρομής επιστροφής συνιστά κρίσιμο παράγοντα ως προς το προκύπτον φάσμα και τα φασματικά χαρακτηριστικά και κατ' επέκτασης ως προς την κυματομορφή ρεύματος. Η χαρακτηριστική εμπέδηση του καλωδίου επιστροφής, η οποία συναρτάται άμεσα με το μήκος, τη γεωμετρία και τη σχετική του τοποθέτηση κατά τη δοκιμή, επηρεάζει την ταλάντωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, προκαλώντας συντονισμούς.

Αξιοσημείωτη ήταν η παρατήρηση που προέκυψε με βάση τα συμπεράσματα που αφορούσαν και τις δύο γεννήτριες. Συγκεκριμένα, η διαφορετική γεωμετρία της διάταξης του καλωδίου επιστροφής και συνεπώς του μονοπατιού επιστροφής του ρεύματος παίζει καθοριστικό ρόλο για την αποκτηθείσα κυματομορφή του ρεύματος. Με σημείο γείωσης τοποθετημένο στο κέντρο η ελεύθερη και η τριγωνική διάταξη παρουσίαζαν σαφώς διαφορετικές διαφοροποιήσεις με αυτές να αποτυπώνονται αφενός στο φάσμα τους και αφετέρου στις κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης. Ενώ για την τριγωνική διάταξη η μετακίνηση του σημείου γείωσης από το κέντρο πλησίον του κλωβού Faraday δεν επίφερε σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τις κυματομορφές.

Όπως αναφέρθηκε, η συχνότητα που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου κυμαίνεται από 40 MHz έως 200 MHz, στην οποία εμφανίζονται οι κατανεμημένοι συντονισμοί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Εντός αυτού του διαστήματος παρατηρούμε και τα διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά, που οφείλονται στη διαφορετική επιλογή της διαδρομής του καλωδίου επιστροφής λόγω διατάξεων διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων συντονισμού σε διαφορετικούς χρονικούς συσχετισμούς στο πεδίο του χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών.

Τα διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά εμφανίζονται όχι μόνο λόγω αλλαγής της διάταξης και των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών, αλλά και λόγω αλλαγής καλωδίου. Διαφορετικά καλώδια – όπως διαπιστώσαμε και κατά την τέταρτη φάση των αποτελεσμάτων – εμφανίζουν και διαφορετικούς κατανεμημένους συντονισμούς με αποτέλεσμα η γεννήτρια να "βλέπει" διαφορετική εμπέδηση εισόδου όταν αλλάζουμε καλώδιο. Γεγονός που αποδίδει στο μονοπάτι επιστροφής ρεύματος διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά με αυτά να επηρεάζουν κυρίως το φάσμα μεταξύ 40 MHz και 200 MHz και κατ' επέκταση την απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών. Τέλος, πέραν του ίδιου μονοπατιού επιστροφής, διαφορετικές γεννήτριες παρουσιάζουν αποκλίσεις ως προς τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά. Οι αποκλίσεις αυτές συνεπάγονται τη δημιουργία διαφορετικών παραγόμενων κυκλωματικών διατάξεων. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζουν αποκλίνουσες εμπεδήσεις, με αποτέλεσμα διαφοροποιημένα φασματικά χαρακτηριστικά και, κατ' επέκταση, διαφορετικές παραγόμενες κυματομορφές ρεύματος, όπως διαπιστώθηκε και κατά την πρώτη φάση των αποτελεσμάτων. Κατά τη φασματική διακύμανση από 20 MHz έως 40 MHz, καθώς και μετά από 200 MHz εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος εντός της ESD γεννήτριας, το οποίο δεν επηρεάζεται από το περιβάλλον της μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου. Το εύρος συχνοτήτων που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εσωτερικό κύκλωμα της γεννήτριας περιορίζεται στα 40 MHz έως 200 MHz.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα Προσομοίωσης

4.1 Το περιβάλλον προσομοιώσεων στο Λογισμικό CST Studio Suite 2024

Το CST Studio Suite 2024 αποτελεί ένα προηγμένο λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης, αναπτυγμένο από τη Dassault Systèmes, το οποίο εντάσσεται στην πλατφόρμα SIMULIA. Προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για την ανάλυση και μοντελοποίηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων, καθιστώντας το ιδιαίτερα χρήσιμο σε τομείς όπως η σχεδίαση κεραιών, μικροκυματικών και RF κυκλωμάτων, η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθώς και σε βιοϊατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η προσομοίωση επικεντρώθηκε στην μελέτη της επίδρασης στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής κατά την διαδικασία δοκιμής των διαφορετικών διατάξεων των καλωδίων επιστροφής. Οι δυνατότητες που παρέχει το εν λόγω λογισμικό μας επέτρεψαν να μελετήσουμε επιπλέον περιπτώσεις όσον αφορά τα περιβάλλοντα των καλωδίων σε σχέση με την πειραματική διαδικασία.

Προς τούτο, δημιουργήθηκε ένα εξειδικευμένο προσομοιωτικό περιβάλλον, το οποίο αναπαριστά με ακρίβεια τη διαδικασία δοκιμής, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61000-4-2. Στο περιβάλλον αυτό προσομοιώθηκαν η ESD γεννήτρια, η συσκευή υπό δοκιμή (Equipment Under Test – EUT), το τραπέζι στήριξης των δύο στοιχείων, η πλάκα γείωσης, καθώς και τα δύο καλώδια επιστροφής: το ένα της γεννήτριας και το άλλο της συσκευής, αμφότερα με το ένα άκρο τους γειωμένο.



Σχήμα 4.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης Διαδικασίας Δοκιμής Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης Επαφής στο CST Studio Suite 2024

4.2 Μοντελοποίηση και Παράμετροι Προσομοίωσης

Ένα αντικείμενα μελέτης της παρούσας εργασίας αφορά τη διάταξη των καλωδίων επιστροφής εντός του προσομοιωτικού περιβάλλοντος. Επομένως, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον ακριβή ορισμό της διαδρομής τους. Για τον σκοπό αυτό, ορίστηκαν παράμετροι που επιτρέπουν τη δημιουργία σημείων στον τρισδιάστατο χώρο, μέσω των

οποίων καθορίζεται η τροχιά που ακολουθεί κάθε καλώδιο, από την αρχή μέχρι το τέλος του.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη διατήρηση σταθερού του ενός άκρου κάθε καλωδίου – του άκρου που δεν εφάπτεται απευθείας στη γείωση – ώστε να είναι δυνατή η αναπαράσταση πολλαπλών εναλλακτικών διατάξεων μέσω τροποποίησης των αντίστοιχων συντεταγμένων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ευελιξία στη μοντελοποίηση και διευκολύνεται η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών διαδρομών στο τελικό ρεύμα εκφόρτισης.

Το τελικό μήκος των καλωδίων καθορίστηκε με βάση τα προαναφερθέντα σημεία στον χώρο. Ιδιαίτερη μέριμνα λήφθηκε για την τήρηση της απαίτησης του Προτύπου ΙΕC 61000-4-2 αναφορικά με το μήκος του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας, το οποίο πρέπει να είναι (2 ± 0,05) m. Οι παράμετροι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω.

<	Y	Z
gr_cable_shift	110	-EUT_Width/2
gr_cable_shift	gr_cable_middlepoint_Y_shift	-hcp_width/2+gr_cable_top
gr_cable_shift + gr_cable_x_s	gr_cable_middlepoint_Y_shift	-hcp_width/2+gr_cable_top
gr_cable_shift + gr_cable_x_s	-Table_Height	-gr_cable_connectionpoint_z

Σχήμα 4.2 Παράμετροι Προσομοίωσης του Καλωδίου Επιστροφής της Συσκευής υπό Δοκιμή (EUT)

Х	γ	Z
0+Gen_X_Shift	41	320
0+Gen_X_Shift	20	410
ESD_Cable_X2	ESD_Cable_Y2	ESD_Cable_Z2
ESD_Cable_X3	ESD_Cable_Y3	ESD_Cable_Z3
ESD_Cable_X4	ESD_Cable_Y4	ESD_Cable_Z4
ESD_Cable_X5	ESD_Cable_Y5	ESD_Cable_Z5
ESD_Cable_Ground_X	ESD_Cable_Ground_Y	ESD_Cable_Ground_Z

Σχήμα 4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης του Καλωδίου Επιστροφής της ESD γεννήτριας

4.3 Στάδια Προσομοίωσης

Σε πρώτο στάδιο, η μελέτη επικεντρώθηκε στο καλώδιο επιστροφής της συσκευής υπό δοκιμή (EUT). Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην παραδοχή σταθερής θέσης των δύο άκρων του καλωδίου, με το συνολικό του μήκος να μεταβάλλεται μέσω της τροποποίησης της διαδρομής του εντός του τρισδιάστατου χώρου. Το σημείο σύνδεσης του καλωδίου με την γη φαίνεται παρακάτω και το ορίσαμε ως connection

point A. Το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας διατηρήθηκε σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται οι διαφορετικές διαμορφώσεις μήκους που ορίστηκαν για το καλώδιο επιστροφής του EUT κατά το πρώτο στάδιο:

Πίνακας 4.1 Μήκη Καλωδίου Επιστροφής του EUT (mm)



Σχήμα 4.4 Μήκος Καλωδίου Επιστροφής EUT: 1116,22 mm



Σχήμα 4.5 Μήκος Καλωδίου Επιστροφής ΕUT: 1887,09 mm

Με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θέσης γείωσης του καλωδίου επιστροφής, πραγματοποιήθηκε μία επιπλέον παραλλαγή της διάταξης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μήκος του καλωδίου επιστροφής του EUT να είναι 1,4 m – τιμή που περιλαμβάνεται ήδη στο φάσμα των υπό μελέτη διαμορφώσεων – και στη συνέχεια μετακινήθηκε το άκρο της γείωσης στο κέντρο, όπως φαίνεται και παρακάτω. Το συγκεκριμένο σημείο ορίστηκε ως connection point B.



Σχήμα 4.6 Καλώδιο Επιστροφής EUT 1,4 m με άκρο γείωσης το σημείο που επιλέχθηκε αρχικά κατά το πρώτο στάδιο για τα διάφορα μήκη του καλωδίου – connection point A



Σχήμα 4.7 Καλώδιο Επιστροφής EUT 1,4 m με άκρο γείωσης στο κέντρο – connection point B

Κατά το δεύτερο στάδιο της προσομοιωτικής διαδικασίας, η μελέτη επικεντρώθηκε στο καλώδιο επιστροφής της ESD γεννήτριας, το οποίο σε κάθε περίπτωση παρέμεινε τεντωμένο προς τα πίσω και σε τριγωνική διάταξη. Για λόγους συνέπειας και συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων, το καλώδιο επιστροφής του EUT διατηρήθηκε σταθερό, τόσο ως προς το συνολικό του μήκος (1,4 m) όσο και ως προς τη θέση των άκρων του στον τρισδιάστατο χώρο.

Ορίζουμε ως bending point A, το σημείο στο οποίο το τεντωμένο καλώδιο - που σχημάτιζε γεωμετρικά τρίγωνο - ήταν λυγισμένο προς τα πάνω (προς την πλευρά του τραπεζιού στο επίπεδο που ορίζει η γη και το τραπέζι) όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.8 bending point A του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας

Ορίζουμε ως bending point B, το σημείο στο οποίο το τεντωμένο καλώδιο ήταν λυγισμένο στην μέση (στο μέσον του επιπέδου που ορίζει η γη και το τραπέζι) όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.9 bending point B του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας

Ορίζουμε ως bending point C, το σημείο στο οποίο το τεντωμένο καλώδιο ήταν λυγισμένο προς τα κάτω (προς την πλευρά της γης στο επίπεδο που ορίζει η γη και το τραπέζι) όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.10 bending point C του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας

Για σημείο γείωσης στο κέντρο, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντεταγμένες (X, Y, Z) που επιλέχθηκαν προς την διαδρομή των τριών διατάξεων:

	Х	Y	Z
arrangement with bending point A	-200	41	320
	-200	20	410
	-200	-400	940
	-200	-400	940
	-200	-680	558
	-200	-800	0
	-200	-800	0
	-200	41	320
	-200	20	410
amon agen ant with	-200	-200	955
handing point P	-200	-200	955
bending point B	-200	-550	558
	-200	-800	0
	-200	-800	0
arrangement with bending point C	-200	41	320
	-200	20	410
	-200	-600	900
	-200	-600	900
	-200	-725	558
	-200	-800	0
	-200	-800	0

Πίνακας 4.2 Συντεταγμένες (Χ, Υ, Ζ) που επιλέχθηκαν προς την διαδρομή των τριών διατάζεων

Για κάθε μία από αυτές τις τρεις διατάξεις το γειωμένο άκρο έλαβε τις εξής θέσεις στον χώρο όπως αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα, καθώς και στις παρακάτω εικόνες:

Πίνακας 4.3 Θέσεις γειωμένου άκρου του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας στον χώρο

Θέσεις γειωμένου άκρου του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας στον χώρο
στο κέντρο (connection point A)
στο κέντρο και μετακινημένο (connection point B)
απομακρυσμένο (connection point C)



Σχήμα 4.11 Καλωδίου Επιστροφής Γεννήτριας με άκρο στο κέντρο και μετακινημένο και bending point B



Σχήμα 4.12 Καλωδίου Επιστροφής Γεννήτριας με άκρο απομακρυσμένο και bending point A

Στο τρίτο στάδιο εξετάστηκε η επίδραση της σχετικής απόστασης μεταξύ των δύο καλωδίων επιστροφής — της γεννήτριας και της συσκευής υπό δοκιμή (EUT). Για λόγους συνέπειας και εγκυρότητας της σύγκρισης, η γεωμετρία του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας διατηρήθηκε σταθερή, ακολουθώντας τη διάταξη Β όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως. Επίσης, το μήκος του καλωδίου επιστροφής του EUT παρέμεινε σταθερό στα 1,4 m. Αποτυπώθηκαν οι εξής περιπτώσεις σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα και με τα παρακάτω σχήματα:

Θέση του Καλωδίου Επιστροφής της Γεννήτριας	Θέση του Καλωδίου Επιστροφής του ΕUT	Arrangement
στο κέντρο	κεντρικά και προς τα πίσω όπως ορίζει η πλευρά του	А
πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του	πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του	В
στο κέντρο	στο κέντρο	С
προς την πλευρά που ορίζει το καλώδιο του EUT	προς την πλευρά που ορίζει το καλώδιο της γεννήτριας	D

Πίνακας 4.4 Διατάζεις Καλωδίου Επιστροφής της Γεννήτριας και Καλωδίου Επιστροφής του ΕUT



Σχήμα 4.13 Γείωση Καλωδίου Γεννήτριας στο κέντρο : Γείωση Καλωδίου EUT κεντρικά και προς τα πίσω όπως ορίζει η πλευρά του – Arrangement A



Σχήμα 4.14 Γείωση Καλωδίου Γεννήτριας πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του : Γείωση Καλωδίου ΕUT πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του – Arrangement B



Σχήμα 4.15 Γείωση Καλωδίου Γεννήτριας στο κέντρο : Γείωση Καλωδίου ΕUΤ στο κέντρο – Arrangement C



Σχήμα 4.16 Γείωση Καλωδίου Γεννήτριας προς την πλευρά που ορίζει το καλώδιο του EUT : Γείωση Καλωδίου EUT προς την πλευρά που ορίζει το καλώδιο της γεννήτριας – Arrangement D

Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της μελέτης, η ανάλυση επικεντρώθηκε στην ελεύθερη διάταξη του καλωδίου επιστροφής της ESD γεννήτριας. Βασικός στόχος του σταδίου είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα προηγούμενων, περισσότερο ελεγχόμενων σεναρίων, και ειδικότερα με τις περιπτώσεις τεντωμένου καλωδίου της γεννήτριας που εξετάστηκαν στο δεύτερο στάδιο (π.χ. διάταξη Β). Επιπλέον, διατηρήθηκε η ανάλυση της σχετικής απόστασης μεταξύ των δύο καλωδίων επιστροφής, κατά αντιστοιχία με το τρίτο στάδιο. Παρακάτω, βλέπουμε διάφορες περιπτώσεις ελεύθερου καλωδίου της γεννήτριας και σχετικής απόστασης μεταξύ των δύο καλωδίου της δύο καλωδίων επιστροφής.



Σχήμα 4.17 Γείωση Ελεύθερου Καλωδίου Γεννήτριας στο κέντρο : Γείωση Καλωδίου ΕUΤ στο κέντρο – Arrangement C



Σχήμα 4.18 Γείωση Ελεύθερου Καλωδίου Γεννήτριας πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του : Γείωση Καλωδίου EUT στο κέντρο – Arrangement A



Σχήμα 4.19 Γείωση Ελεύθερου Καλωδίου Γεννήτριας πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του : Γείωση Καλωδίου ΕUT πλησίον του άκρου της πλάκας γείωσης όπως ορίζει η πλευρά του – Arrangement B

4.4 Λήψη και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Αρχικά, για κάθε διαδρομή των καλωδίων επιστροφής, δηλαδή για κάθε συνδυασμό παραμέτρων που όριζαν τη γεωμετρία της διαδρομής στον τρισδιάστατο χρόνο, εκτελούνταν η αντίστοιχη προσομοίωση μέσω του λογισμικού CST. Η διαδικασία εκκίνησης της κάθε προσομοίωσης πραγματοποιούνταν χειροκίνητα, με την επιλογή της εντολής "Start Simulation" από το Home Menu, όπως φαίνεται και παρακάτω:



Σχήμα 4.20 Διαδικασία εκκίνησης της κάθε προσομοίωσης με την επιλογή της εντολής "Start Simulation" από το Home Menu
Έπειτα από κάθε εκτέλεση, αυτή αποθηκευόταν και μπορούσαμε για κάθε μία από αυτές να δούμε τις παραγόμενες κυματομορφές του ρεύματος και του φάσματος επιλέγοντας τα εξής:



Σχήμα 4.21 Κατάλληλες Επιλογές Λογισμικού για την παρατήρηση των ζητούμενων κυματομορφών

Έπειτα, με την εντολή "Plot Data (ASCII)" στο μενού "Import/Export" της καρτέλας Post-Processing, εξαγάγαμε τις κυματομορφές και τις αποθηκεύαμε ως .txt αρχεία.

Στη συνέχεια, για σκοπούς επεξεργασίας και ταξινόμησης, γινόταν επανεισαγωγή των αρχείων αυτών μέσω της εντολής "Import Result Curve from ASCII File", από το ίδιο υπομενού. Η λειτουργία αυτή επέτρεπε την οπτική επεξεργασία των κυματομορφών, δίνοντας τη δυνατότητα τροποποίησης στοιχείων όπως οι ετικέτες, το χρώμα γραμμής, καθώς και το πάχος της καμπύλης, ώστε να καταστούν οι γραφικές παραστάσεις πιο ευανάγνωστες και κατάλληλες για παρουσίαση.

Η μεθοδολογία αυτή διασφαλίζει ομοιομορφία στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων και διευκολύνει τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών προσομοιωτικών σεναρίων.

4.5 Αποτελέσματα και Σχολιασμός Κυματομορφών

4.5.1 Πρώτη Φάση Αποτελεσμάτων – Διαφορετικά Μήκη Καλωδίου του EUT

Σε πρώτη φάση παρουσιάζονται στα ίδια διαγράμματα ρεύματος και φάσματος οι κυματομορφές που προέκυψαν κατά την προσομοίωση για τα διαφορετικά μήκη καλωδίου του EUT όπως αυτά παρουσιάστηκαν και προηγουμένως. Επίσης, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θέσης γείωσης του καλωδίου επιστροφής παρουσιάζονται και οι κυματομορφές ρεύματος και φάσματος για καλώδιο επιστροφής του EUT ίδιου μήκους, άλλα διαφορετικής θέσης γείωσης.



Σχήμα 4.22 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικά μήκη καλωδίου επιστροφής του EUT



Σχήμα 4.23 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά μήκη καλωδίου επιστροφής του EUT

Διαπιστώνεται ότι μετά το δεύτερο μέγιστο της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις επιμέρους κυματομορφές, οι οποίες ακολουθούν μια γραμμική ακολουθία που σχετίζεται με την αύξηση του μήκους του καλωδίου επιστροφής. Συγκεκριμένα, μεταξύ των 25 ns και 50 ns, οι τιμές του ρεύματος παρουσιάζουν μια σχέση αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος του καλωδίου. Αντίθετα, στο χρονικό διάστημα μεταξύ 50 ns και 90 ns, οι τιμές του ρεύματος παρουσιάζουν ανάλογη σχέση με το μήκος του καλωδίου.

Η παραπάνω συμπεριφορά εξηγείται μέσω του φάσματος συχνοτήτων: στην περιοχή 10 – 20 MHz παρατηρούνται βυθίσματα στα φάσματα των διαφορετικών περιπτώσεων, τα οποία εμφανίζονται κατά σειρά, ξεκινώντας από την περίπτωση με το μεγαλύτερο μήκος καλωδίου. Το δεύτερο βύθισμα, περίπου στα 30 MHz, είναι κοινό για όλες τις περιπτώσεις. Το μέγιστο που παρατηρείται μεταξύ των δύο αυτών βυθισμάτων (10 –

20 MHz και 30 MHz) ακολουθεί επίσης γραμμική μετατόπιση, ανάλογη με εκείνη του πρώτου βυθίσματος. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων συντονισμού σε διαφορετικούς χρονικούς συσχετισμούς στο πεδίο του χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών. Ενδεικτικά, για το καλώδιο μεγαλύτερου μήκους (1887,09 mm) που εμφανίζει στο φάσμα το πρώτο βύθισμα σε μικρότερη συχνότητα σε σχέση με τα καλώδια μικρότερου μήκους, θα εμφανίσει στο πεδίο του χρόνου συντονισμό με σχετική καθυστέρηση σε σχέση με αυτά.

Συμπεραίνεται πως τα διαφορετική μήκη καλωδίου συνεπάγονται και διαφορετικούς κατανεμημένους συντονισμούς του καλωδίου επιστροφής ρεύματος κι επομένως καθιστούν και διαφορετικό μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος εκφόρτισης με αποτέλεσμα να βλέπουμε και διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά και αποκλίσεις στις κυματομορφές. Οι αποκλίσεις αυτές στο πεδίο της συχνότητας εμφανίζονται εντός του διαστήματος των 10 – 25 MHz και συνεπώς επιδρούν στις διαφοροποιήσεις μεταξύ των κυματομορφών ρεύματος περί τα 40 ns και έπειτα.



Σχήμα 4.24 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικές θέσεις γείωσης του καλωδίου επιστροφής του EUT



Σχήμα 4.25 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικές θέσεις γείωσης του καλωδίου επιστροφής του ΕUT

Επιβεβαιώνεται, ότι για ίδιο μήκος καλωδίου επιστροφής του EUT, αλλά διαφορετικό σημείο γείωσης δεν προκύπτει καμία απόκλιση για την κυματομορφή εκφόρτισης ρεύματος.

4.5.2 Δεύτερη Φάση Αποτελεσμάτων – Διαφορετικές Γεωμετρίες της Τριγωνικής Διάταξης του Καλωδίου Επιστροφής της ESD Γεννήτριας

Κατά τη δεύτερη φάση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και φάσματος για τα διαφορετικά bending points (A, B, C) όπως αυτά ορίστηκαν προηγουμένως. Αρχικά, για κάθε ένα από τα τρία αυτά σενάρια παρουσιάζονται διαγράμματα κυματομορφών για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου της γεννήτριας (A, B, C) – όπως αυτά ορίστηκαν. Το καλώδιο επιστροφής του EUT παραμένει σταθερό.



Σχήμα 4.26 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τριγωνική διάταζη και bending point: A



Σχήμα 4.27 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη και bending point: A

Διαπιστώνεται πως δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών με εξαίρεση μια μικρή "καθυστέρηση" στο πεδίο του χρόνου της κυματομορφής που αντιστοιχεί στην διάταξη με σημείο γείωσης το B, δηλαδή στο κέντρο και μετακινημένο. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η κυματομορφή του φάσματος που αντιστοιχεί στην εν λόγω διάταξη έχει ένα μικρό "προβάδισμα" σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ενδεικτικά, ένα από τα φασματικά βυθίσματα για τη διάταξη B εμφανίζεται περί τα 80 MHz, ενώ για τις υπόλοιπες διατάξεις το αντίστοιχο βύθισμα εντοπίζεται περί τα 90 MHz. Το φαινόμενο αυτό αντιστοιχεί σε χρονικά μετατοπισμένους (ετεροκαθορισμένους) συντονισμούς στο πεδίο του χρόνου, με τους συντονισμούς των διατάξεων με σημεία γείωσης A και C να προηγούνται του αντίστοιχου της διάταξης B.

Παρά αυτά τα μικρά "προβαδίσματα" εντός του φάσματος, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται και αφορούν τα φασματικά χαρακτηριστικά είναι αμελητέες, όπως αντίστοιχα και στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 4.28 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη και bending point: B



Σχήμα 4.29 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη και bending point: B

Για την γεωμετρία του καλωδίου επιστροφής με bending point B, διαπιστώνεται, μεταξύ άλλων αμελητέων σχεδόν διαφοροποιήσεων, ένα "προβάδισμα" στην κυματομορφή που αντιστοιχεί στην διάταξη με σημείο γείωσης C, δηλαδή απομακρυσμένο. Αυτό είναι αναμενόμενο και οφείλεται σε διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά στο πεδίο της συχνότητας όπως και παρατηρείται στην κυματομορφή

του φάσματος. Ενδεικτικά, το βύθισμα της διάταξης με σημείο γείωσης στο C περίπου στα 30 MHz, καθυστερεί σε σχέση με το αντίστοιχο βύθισμα των υπόλοιπων διατάξεων, γεγονός που αντιστοιχεί στο "προβάδισμα" του συντονισμού που θα εμφανίσει στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 4.30 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη και bending point: C



Σχήμα 4.31 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη και bending point: C

Αντίστοιχες παρατηρήσεις διαπιστώνονται και σε αυτή την περίπτωση. Παρ' όλα αυτά οι αποκλίσεις που εντοπίζονται στις εν λόγω κυματομορφές και αφορούν κυρίως την περίπτωση του καλωδίου με σημείο γείωσης C (απομακρυσμένο) είναι σαφώς εμφανείς και όχι τόσο αμελητέες. Το "προβάδισμα" της συγκεκριμένης περίπτωσης – στο πεδίο του χρόνου – είναι διακριτό και οφείλεται, όπως αναφέρθηκε, σε διαφοροποιήσεις των φασματικών χαρακτηριστικών στην κυματομορφή του φάσματος. Συγκρίνοντας με τις προηγούμενες περιπτώσεις γεωμετρίας του καλωδίου (bending point A, B) επιμέρους αποκλίσεις και "καθυστερήσεις" στο πεδίο του χρόνου – αν και αμελητέες – είναι αναμενόμενες λόγω και διαφορετικής διαδρομής του σχηματίζεται για το ρεύμα επιστροφής. Ωστόσο, η εμφανής διακριτή απόκλιση στην περίπτωση της γεωμετρίας με bending point C δεν είναι αναμενόμενη και αποδίδεται σε πιθανό σφάλμα στη διαμόρφωση της διάταξης με σημείο γείωσης στο C, όπως αυτή υλοποιήθηκε στον τρισδιάστατο χώρο κατά την προσομοίωση. Το τεντωμένο καλώδιο παρουσιάζει συγκεκριμένες προκλήσεις ως προς την προσομοίωσή του στο χρησιμοποιούμενο λογισμικό, και είναι πιθανό η συγκεκριμένη περίπτωση να προσεγγίζει περισσότερο τη συμπεριφορά μιας ελεύθερης διάταξης καλωδίου. Το γεγονός αυτό θα επιβεβαιωθεί και στη συνέχεια βάσει των συνολικών συμπερασμάτων.

Επομένως, για τα διαφορετικά σημεία γείωσης παρατηρούνται αποκλίσεις στις κυματομορφές που απορρέουν από τις διαφορετικές διαδρομές που ακολουθεί το ρεύμα επιστροφής. Αυτές όμως είναι σχεδόν αμελητέες, καθώς τα φασματικά χαρακτηριστικά παρά τις επιμέρους μετατοπίσεις βυθισμάτων και κορυφών δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.

4.5.3 Τρίτη Φάση Αποτελεσμάτων – Σχετική Απόσταση μεταξύ των δύο Καλωδίων Επιστροφής μέσω Διαφορετικών Διατάξεων

Κατά την τρίτη φάση των αποτελεσμάτων, αρχικά, παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και φάσματος για τις τέσσερις διαφορετικές διατάξεις – όπως αυτές ορίστηκαν προηγουμένως - μεταξύ του καλωδίου επιστροφής του EUT και του τεντωμένου καλωδίου επιστροφής της ESD γεννήτριας. Έπειτα, παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και φάσματος για τις τρεις διαφορετικές διατάξεις – όπως αυτές ορίστηκαν προηγουμένως - μεταξύ του καλωδίου επιστροφής του EUT και του καλωδίου επιστροφής της ESD γεννήτριας διαφορετικές διατάξεις – όπως αυτές ορίστηκαν προηγουμένως - μεταξύ του καλωδίου επιστροφής του EUT και του καλωδίου επιστροφής της ESD γεννήτριας ελεύθερης διάταξης.



Σχήμα 4.32 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικές διατάζεις μεταζύ του καλωδίου επιστροφής του EUT και του τεντωμένου καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας



Σχήμα 4.33 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικές διατάζεις μεταζύ του καλωδίου επιστροφής του EUT και του τεντωμένου καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας

Όπως επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση των φασμάτων των κυματομορφών, παρατηρούνται επιμέρους αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών του ρεύματος, οι οποίες ωστόσο είναι σχεδόν αμελητέες. Μεταξύ των διαφορετικών διατάξεων των καλωδίων επιστροφής του EUT και της ESD γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη, δεν εντοπίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις. Οι μικρές φασματικές αποκλίσεις που παρατηρούνται εντοπίζονται κυρίως εντός της συχνοτικής περιοχής 10 – 100 MHz. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι κατανεμημένοι συντονισμοί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος εκδηλώνονται κυρίως στο εύρος 40 – 200 MHz, περιοχή στην οποία η φασματική συμπεριφορά επηρεάζεται έντονα από το περιβάλλον μέτρησης και τη γεωμετρία του καλωδίου. Εντός αυτού του συχνοτικού διαστήματος εμφανίζονται και οι επιμέρους διαφορές στα φασματικά χαρακτηριστικά, οι οποίες αποδίδονται στη διαφορετική διαδρομή του καλωδίου επιστροφής, ανάλογα με τη διάταξη κάθε περίπτωσης.



Σχήμα 4.34 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε ελεύθερη διάταζη



Σχήμα 4.35 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικά σημεία γείωσης του καλωδίου επιστροφής της Γεννήτριας σε ελεύθερη διάταζη

Αντίστοιχα με τις παρατηρήσεις που αφορούν τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής της ESD γεννήτριας σε τριγωνική διάταξη, και στην παρούσα περίπτωση παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών του ρεύματος — οι οποίες όμως είναι ακόμη πιο περιορισμένες και ουσιαστικά αμελητέες σε σχέση με εκείνες της τριγωνικής διάταξης. Συνεπώς, οι τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις που επιλέχθηκαν κατά την προσομοίωση δεν επέφεραν σημαντική επίδραση στο μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος και, κατά συνέπεια, ούτε στην ίδια την κυματομορφή.

4.5.4 Τέταρτη Φάση Αποτελεσμάτων – Σύγκριση της Ελεύθερης Διάταξης με τις Διαφορετικές Τριγωνικές Διατάξεις του Καλωδίου Επιστροφής της Γεννήτριας

Κατά την τέταρτη και τελευταία φάση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι κυματομορφές ρεύματος και φάσματος για το ίδιο σημείο γείωσης και με σταθερό το καλώδιο επιστροφής του EUT η ελεύθερη διάταξη, καθώς και οι τρεις περιπτώσεις διαφορετικών bending points της τριγωνικής διάταξης – όπως αυτές ορίστηκαν – του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας.



Σχήμα 4.36 Κυματομορφές Ρεύματος Εκφόρτισης Επαφής στα +4 kV για διαφορετικές διατάζεις του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας με σταθερό σημείο γείωσης και καλώδιο επιστροφής του EUT



Σχήμα 4.37 Φάσμα Κυματομορφών Ρεύματος στα +4 kV για διαφορετικές διατάζεις του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας με σταθερό σημείο γείωσης και καλώδιο επιστροφής του EUT

Παρά τις μικρές και σχεδόν αμελητέες διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφορετικών γεωμετριών εντός της τριγωνικής διάταξης του καλωδίου επιστροφής, παρατηρούνται σαφώς διακριτές αποκλίσεις όταν αυτές συγκρίνονται με την περίπτωση της ελεύθερης διάταξης του καλωδίου. Συγκεκριμένα, το δεύτερο μέγιστο Ip2 της κυματομορφής στην ελεύθερη διάταξη εμφανίζεται περίπου στα 15 ns, ενώ στις περιπτώσεις της τριγωνικής διάταξης εμφανίζεται περί τα 20 ns. Συνολικά, η κυματομορφή της ελεύθερης διάταξης φαίνεται να «προπορεύεται» χρονικά σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αυτή η παρατήρηση είναι αναμενόμενη και επιβεβαιώνεται και στο πεδίο της συχνότητας, όπου μετά τα 20 MHz το φάσμα της ελεύθερης διάταξης εμφανίζει σχετική "καθυστέρηση" ως προς τις υπόλοιπες διατάξεις. Επιπλέον, προκύπτουν διακριτά φασματικά χαρακτηριστικά: εντός της περιοχής 30 - 200 MHz, οι γεωμετρίες της τριγωνικής διάταξης παρουσιάζουν συνολικά τρία βυθίσματα σε διαφορετικές συχνότητες, ενώ η ελεύθερη διάταξη παρουσιάζει μόνο δύο. Οι φασματικές αυτές διαφορές οδηγούν σε διαφορετικούς χρονικούς συντονισμούς στο πεδίο του χρόνου, προκαλώντας αποκλίσεις στη μορφή των παραγόμενων κυματομορφών. Συνεπώς, η πιο ελεγχόμενη και τεντωμένη διαμόρφωση του καλωδίου — όπως αυτή που παρατηρείται στις γεωμετρίες της τριγωνικής διάταξης — δημιουργεί διαφορετικό μονοπάτι επιστροφής για το ρεύμα και επηρεάζει καθοριστικά την παραγόμενη κυματομορφή. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις διαφορετικές εμπεδήσεις του καλωδίου που προκύπτουν κατά την επιλογή της ελεγχόμενης ή μη διάταξης, οι οποίες καθορίζουν τα αντίστοιχα φασματικά χαρακτηριστικά.

4.6 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας, η σχεδίαση της διαδρομής επιστροφής συνιστά κρίσιμο παράγοντα ως προς το προκύπτον φάσμα και τα φασματικά χαρακτηριστικά και, κατ' επέκταση, ως προς την κυματομορφή ρεύματος. Η χαρακτηριστική εμπέδηση του καλωδίου επιστροφής, η οποία συναρτάται άμεσα με το μήκος, τη γεωμετρία και τη σχετική του τοποθέτηση κατά τη δοκιμή, επηρεάζει την ταλάντωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, προκαλώντας φαινόμενα συντονισμού που διαφοροποιούν τη χρονική και φασματική του συμπεριφορά.

Από την ανάλυση των κυματομορφών του ρεύματος εκφόρτισης προκύπτει ότι το μήκος του καλωδίου επιστροφής επηρεάζει σαφώς τη μορφή των κυματομορφών, κυρίως μετά το δεύτερο μέγιστο. Οι αποκλίσεις αυτές – όπως εξετάστηκαν με αλλαγές στο μήκος του καλωδίου επιστροφής του EUT - ακολουθούν μια γραμμική τάση, με το ρεύμα να παρουσιάζει διαφορετική χρονική συμπεριφορά ανάλογα με το μήκος του καλωδίου. Αντίστοιχες διαφοροποιήσεις καταγράφονται και στο φάσμα συχνοτήτων, όπου τα φασματικά χαρακτηριστικά μετατοπίζονται με συστηματικό τρόπο, οδηγώντας σε χρονικά μετατοπισμένους συντονισμούς. Όταν διατηρείται σταθερό το μήκος του καλωδίου επιστροφής του ΕUT και αλλάζει μόνο το σημείο γείωσης, δεν παρατηρούνται ουσιαστικές αποκλίσεις στις κυματομορφές.

Σε ό,τι αφορά τη γεωμετρία του καλωδίου επιστροφής, η τριγωνική διάταξη δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τις κυματομορφές, καθώς οι μεταξύ τους διαφορές είναι αμελητέες. Συγκεκριμένα, όταν διατηρείται σταθερό το μήκος του καλωδίου και αλλάζει μόνο το σημείο γείωσης, δεν παρατηρούνται ουσιαστικές αποκλίσεις στις κυματομορφές, με εξαίρεση μεμονωμένες μικρές χρονικές καθυστερήσεις ή προβαδίσματα, που οφείλονται σε μικρές φασματικές μετατοπίσεις.

Ωστόσο, όταν συγκρίνεται η ελεύθερη διάταξη με την τριγωνική, εντοπίζονται σαφείς διαφορές τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο φάσμα. Η ελεύθερη διάταξη εμφανίζει χρονικό προβάδισμα και διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά, γεγονός που αποδίδεται στο ελεύθερο και λιγότερο ελεγχόμενο μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος, το οποίο οδηγεί σε διαφοροποιημένες εμπεδήσεις.

Όπως αναφέρθηκε, η συχνότητα που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου κυμαίνεται από 40 MHz έως 200 MHz, στην οποία εμφανίζονται οι κατανεμημένοι συντονισμοί του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Εντός αυτού του διαστήματος παρατηρούμε και τα διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά, που οφείλονται στη διαφορετική επιλογή της διαδρομής του καλωδίου επιστροφής λόγω διατάξεων, όπως το μήκος της διαδρομής ή ελεύθερη ή πιο ελεγχόμενη διάταξη. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων συντονισμού σε διαφορετικούς χρονικούς συσχετισμούς στο πεδίο του χρόνου, με αποτέλεσμα την απόκλιση των παραγόμενων κυματομορφών.

Συνολικά, προκύπτει ότι οι βασικές αποκλίσεις οφείλονται κυρίως στο μήκος και στη μορφή της διάταξης του καλωδίου επιστροφής, ενώ η επίδραση του σημείου γείωσης ή μικρών γεωμετρικών διαφορών είναι περιορισμένη και, στις περισσότερες περιπτώσεις, αμελητέα.

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη – Συμπεράσματα και Επόμενη Ημέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε η μελέτη της επίδρασης του περιβάλλοντος μέτρησης και της διάταξης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής κατά τη διαδικασία δοκιμής. Σε αντίθεση με τη διαδικασία διακρίβωσης, το Πρότυπο [30] δεν θέτει αυστηρές απαιτήσεις για το περιβάλλον μέτρησης και τη διάταξη του καλωδίου κατά τη δοκιμή, με αποτέλεσμα η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων να επηρεάζεται. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές μελέτες υπό διαφορετικές συνθήκες, τόσο μέσω πειραμάτων όσο και μέσω προσομοιώσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του ρεύματος εκφόρτισης.

Αρχικά έγινε μια θεωρητική εισαγωγή στην έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας / ατρωσίας και ειδικότερα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, παρουσιάζοντας σχετικές έννοιες όπως το φαινόμενο των αποσβεννυμένων ταλαντώσεων (ringing) και η εμπέδηση καλωδίου. Παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν τόσο η παλαιότερη όσο και η νέα έκδοση του Προτύπου [30], καθώς και βιβλιογραφικές αναφορές και μελέτες, προκειμένου να διαμορφωθεί ένα πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο. Στο πειραματικό μέρος χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές γεννήτριες (DITO της EMTEST και SESD 230 της Schlöder) και ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, με την επεξεργασία των μετρήσεων να πραγματοποιείται μέσω MATLAB. Στο σκέλος της προσομοίωσης, αξιοποιήθηκε το λογισμικό CST Studio Suite 2024, όπου δημιουργήθηκαν κατάλληλα μοντέλα του περιβάλλοντος δοκιμής για τη λήψη και ανάλυση αποτελεσμάτων.

Κοινό συμπέρασμα και των δύο μεθόδων αποτελεί η καθοριστική σημασία του καλωδίου επιστροφής ως προς την απόκριση των δοκιμών ESD. Παράγοντες όπως η γεωμετρία, το μήκος και η διαμόρφωση της διαδρομής επιστροφής επιδρούν έντονα στις κυματομορφές και στο φάσμα, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή συχνοτήτων 40–200 MHz, όπου εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού. Η προσομοίωση ανέδειξε κυρίως την επίδραση του μήκους και της γεωμετρίας, καταλήγοντας στο ότι η θέση γείωσης ή μικρές γεωμετρικές διαφορές έχουν ελάχιστη επίδραση. Ωστόσο, η πειραματική διαδικασία ενίσχυσε τη μελέτη εντάσσοντας και τις επιδράσεις των διαφορετικών γεννητριών και τύπων καλωδίων, που αποδείχθηκαν σημαντικές. Ιδιαίτερα, τα εσωτερικά κυκλώματα των γεννητριών επηρεάζουν κυρίως τις αποκρίσεις εκτός της περιοχής 40 – 200 MHz, ενώ η επιλογή καλωδίου επηρεάζει άμεσα την εμπέδηση και, κατ' επέκταση, την τελική κυματομορφή.

Συνολικά, η εργασία καταλήγει ότι η διαδρομή επιστροφής του ρεύματος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αναπαραγωγιμότητα και αξιοπιστία των δοκιμών ESD, με την προσομοίωση να δίνει έμφαση στις διατάξεις και τη γεωμετρία, ενώ το πείραμα αναδεικνύει και την επίδραση εξωτερικών παραμέτρων, όπως ο τύπος καλωδίου και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας.

Κατ' επέκταση, τα ευρήματα της παρούσας εργασίας δύνανται να συμβάλουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας των δοκιμών ESD μέσω της καλύτερης κατανόησης των παραμέτρων που επηρεάζουν την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Η ενσωμάτωση αυτής της γνώσης σε μελλοντικά μοντέλα προσομοίωσης, καθώς και σε πρότυπα δοκιμών, μπορεί να ενισχύσει την ακρίβεια στην αναπαραγωγή των

πραγματικών συνθηκών, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό προστασίας για ηλεκτρονικά συστήματα.

Βιβλιογραφία

- [1] IEEE editorial policy statement (1987) IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility EMC-29 202-206.
- [2] Paul A. Chatterton Michael A. Houlden, "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η Εφαρμογή της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας στον Πρακτικό Σχεδιασμό", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [3] Χ. Καψάλης Π. Τρακαδάς, "Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα", Εκδόσεις Τζιόλα 2006.
- [4] Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons Inc. Publication, August 2009.
- [5] Παύλος Σ. Κατσιβέλης, "Συμβολή Στη Μελέτη Της Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης", Διδακτορική Διατριβή, Ιούνιος 2012, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [6] LearnEMC. "Introduction to EMC". διαθέσιμο στη διεύθυνση: <u>https://learnemc.com/introduction-to-emc</u>.
- [7] EMTEST "The structure of EMC standards", διαθέσιμο εδώ: <u>http://www.emtest.com/fr/what_is/standards.php</u>.
- [8] Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons Inc. Publication, Second Edition, 2009.
- [9] Mardiguian, M. (1984) Interference Control in Computers and Microprocessor Based Equipment Interference Control Technologies, Gainesville, VA.
- [10] EMC, Electromagnetic Compatibility (1985) Schaffner Electronik AG., CH-4708 Luberbach, Switzerland.
- [11] Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-2: Testing and measurement techniques Electrostatic discharge immunity test.
- [12] ΕΛΟΤ ΕΝ 61000.06.01:2001: "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος
 6.1: Γένια Πρότυπα Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής
 βιομηχανίας περιβάλλοντα".
- [13] Reto B. Keller, Design for electromagnetic compatibility In a nutshell, Springer, 1st Edition, 2023.
- [14] Elya B. Joffe Kai-Sang Lock, "GROUNDS FOR GROUNDING A Circuitto-System Handbook", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
- [15] Γεωργία Παυλοπούλου, "Μελέτη της Επίδρασης του Βάρους των Ηλεκτροδίων και της Εφαρμοζόμενης Τάσης στη Μέτρηση της Αντίστασης Αντιστατικών Δαπέδων", Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2010, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [16] What is Charged Device Model? EMC Directory, διαθέσιμο εδώ: https://www.emc-directory.com/community/what-is-charged-device-model.
- [17] Electrostatic Induction (Explanation, Principle), διαθέσιμο εδώ: <u>https://electrical-information.com/electrostatic-induction-explanation-principle/</u>.
- [18] Theodore Dangelmayer, "ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control", Van Noshand Ranhold, New York, 1990.

- [19] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, "Dielectric characteristics of materials -Electrostatic Discharge", 2002, αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: <u>http://www2.sjsu.edu/faculty/</u><u>selvaduray/page</u>/papers/mate210/electrostatic.pdf.
- [20] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, "Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development", Elsevier, 2003.
- [21] Ajith Amerasekera, Charvaka Duvvury, "ESD in Silicon Integrated Circuits", John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [22] 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
- [23] H. Gieser, "Verfahren zur Charakterisierung von integrierten Schaltungen mit sehr schnellen Hochstromimpulsen (Methods for the characterisation of integrated circuits employing very fast high current impulses)" in Dissertation Technische Universitaet Muenchen TUM, Shaker-Verlag, Aachen, Germany, 1999.
- [24] R. Rompe and W. Weizel, "Ueber das Toeplershe Funkengesetz", Z. Physik, vol.122, pp.636-639, 1944.
- [25] T. Pommerenke, "ESD: Causes and Effects", IEEE Transactions on Industry Applications, 2002.
- [26] Teseq, "Transient Immunity Testing, Handy Guide", διαθέσιμο στη διεύθυνση: <u>https://www.unitest.com/pdf/Transient_immunity_testing_e.pdf</u>.
- [27] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, "Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems", αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.esdjournal.com/techpapr/sfowler/esd97/esd97.htm.
- [28] IEC 60050(161), International Electrotechnical Vocabulary (IEV) Chapter 161: Electromagnetic compatibility.
- [29] IEC 61000-4-2: "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test," Edition 2.0, December 2008.
- [30] 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.
- [31] Implications of the new changes in IEC 61000-4-2, edition 3, on ESD Generators, EMC PARTNER, διαθέσιμο εδώ: <u>https://www.emc-partner.com/downloads/white-papers/130-white-paper-esd-iec61000-4-2-edition-3-2025/file</u>.
- [32] Paul Horowitz, Winfield Hill, "THE ART OF ELECTRONICS", Cambridge University Press 1980, 1989.
- [33] Tech Web "What Is Ringing? Problems with Switching Power Supplies and Countermeasures", διαθέσιμο στην διεύθυνση: <u>https://techweb.rohm.com/trend/glossary/16530/</u>.
- [34] J. Koo, Q. Cai, D. Pommerenke, K. Wang, J. Maas, M. Hirata, A. Martwick: "The Repeatability of System Level ESD Test and Relevant ESD Generator

Parameters," Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2008.

- [35] J. Koo, Q. Cai, K. Wang, J. Maas, T. Takahashi, A. Martwick, and D. Pommerenke: "Correlation between EUT failure levels and ESD generatoor parameters," IEEE Trans. EMC, Vol.50, No.4, pp.794-801 (2008).
- [36] IEC 60050-311, International electrotechnical vocabulary Part 311: General terms relating to electrical measurement.
- [37] TME"FERRITE-DEFINITION",διαθέσιμοεδώ:https://www.tme.eu/ng/en/news/library-articles/page/61816/ferrite-definition/.
- [38] IEC 61000-6-1, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 6-1: Generic standards Immunity for residential, commercial and light-industrial environments.
- [39] IEC Guide 107, Electromagnetic compatibility Guide to the drafting of electromagnetic compatibility publications.
- [40] 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.
- [41] IEC Publication 801-2, "Electromagnetic compatibility for industrialprocess measurement and control equipment, part 2: Electrostatic discharge requirements," Second Edition, 1989.
- [42] T. Ishida, "General Outline of ESD Immunity Test and its Current Background and Prescription of System Level ESD International ESD Standard -," The Institute of Electrostatics Japan, Vol. 44, No.2, 2020 (in Japanese).
- [43] IEC 61000-4-2, "Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test," Edition 2.0, December 2008.
- [44] M. Hirata, T. Takahashi, and N. Shibuya, "Evaluation of Falling Time Restriction of ESD Immunity Test Current Waveform: The result of IEC 61000-4-2 Round Robin Test in Japan," Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, July 2007.
- [45] J. Koo, Q. Cai, K. Wang, J. Maas, T. Takahashi, A. Martwick, and D. Pommerenke, "Correlation between EUT failure levels and ESD generator parameters," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.50, No.4, pp.794-801, 2008.
- [46] Y. Tozawa, Y. Kobayashi, T. Ishida, O. Fujiwara, "Waveform Comparison of Discharge Currents for Contact Discharges from Different Eight Models of Electrostatic Discharge Generators," IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 140, No.2, pp.86-91, 2020 (in Japanese).
- [47] 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).

- [48] 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.
- [49] 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 Transactions on Communications, 2023EBP3080. Early publicized: 2023/09/06.
- [50] 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).
- [51] 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).
- [52] 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).
- [53] 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).
- [54] 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.
- [55] Panagiotis K. Papastamatis, Evangelos A. Paliatsos, Ioannis F. Gonos and Ioannis A. Stathopulos, "Analysis of the ESD Reconstruction Methodology Based on Current Probe Measurements and Frequency Response Compensation for Different ESD Generators and Severity Test Levels", Electronics 2021, 10, 728, διαθέσιμο εδώ: https://www.mdpi.com/2079-9292/10/6/728.
- [56] ESD Pulse Calibration Set—Teseq MD 103. Available online: <u>https://www.teseq.com/products/downloads/datasheet/MD_103.pdf</u> (accessed on 12 February 2021).
- [57] Baran, J.; Sroka, J. Distortion of ESD Generator Pulse Due to Limited Bandwidth of Verification Path. IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2010, 52, 797–803.
- [58] Digital Phosphor Oscilloscope—Tektronix TDS7254B. Available online: <u>http://www.testequipmenthq.com/datasheets/TEKTRONIX-TDS7254B-</u> <u>Datasheet.pdf</u> (accessed on 15 February 2021).
- [59] Current Monitor Probe—Fischer Custom Communications F-65. Available online: <u>http://www.fischercc.com/products/f-65/</u> (accessed on 16 February 2021).
- [60] Yang, S.; Zhou, J.; Pommerenke, D.; Liu, D. A simple frequency response compensation method for current probe measurements of ESD currents. In

Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Washington, DC, USA, 7–11 August 2017; pp. 158–163.