



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 του χειριστή στην κυματομορφή ESD:
Ανάλυση αβεβαιοτήτων και χρήση φερριτών ως μέσο
προσομοίωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΟΡΤΑΝΙΔΗ Ι. ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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 του χειριστή στην κυματομορφή ESD:
Ανάλυση αβεβαιοτήτων και χρήση φερριτών ως μέσο
προσομοίωσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΣΟΡΤΑΝΙΔΗ Ι. ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Ιουνίου 2025.

Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής ΕΜΠ

Χρήστος Α. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Βασίλειος Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 23 Ιουνίου 2025

.....
Μαρία, Ι. Τσορτανίδη

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

Copyright © Μαρία, Ι. Τσορτανίδη, 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 τη συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), καθώς και με την αξιολόγηση πιθανών μεθόδων αναπαραγωγής της επίδρασης αυτής, με κύρια προσέγγιση τη χρήση φερριτών σε κατάλληλες θέσεις στο καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας ESD. Η εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και το ισχύον Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed. 2.0 και η νέα έκδοσή του (Ed. 3.0). Παράλληλα, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των κύριων προβληματισμών γύρω από την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών ESD, με έμφαση στο χρονικό διάστημα 10–40 ns και στην εμφάνιση του φαινομένου της ταλάντωσης (ringing), καθώς και στην αδήριτη ανάγκη ενσωμάτωσης αυτοματοποιημένων μεθόδων δοκιμών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ποσοτική ανάλυση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή μέσω πειραμάτων με δέκα διαφορετικούς χρήστες. Υπολογίζονται στατιστικά οι αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών, εκτιμώνται οι αντίστοιχες αβεβαιότητες επαναληψιμότητας και διερευνάται η προσαρμογή τους σε γνωστές κατανομές πυκνότητας πιθανότητας (Normal, Log-normal, Gamma, Weibull).

Στο επόμενο στάδιο, εξετάζεται η δυνατότητα αναπαραγωγής της ανθρώπινης επίδρασης μέσω της χρήσης φερριτικών υλικών σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του καλωδίου επιστροφής. Πραγματοποιούνται πειράματα με διαφορετικές γεννήτριες και φερρίτες, και αξιολογούνται έντεκα μορφολογικά, χρονικά και φασματικά metrics, βάσει των οποίων υλοποιείται διαδικασία κατάταξης με χρήση σταθμισμένων βαρών.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, Πρότυπο IEC 61000-4-2, γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), ρεύμα εκφόρτισης, ανθρώπινος χειριστής, επίδραση, φερρίτες, κατάταξη, κριτήρια/Metrics

Abstract

This thesis focuses on the experimental investigation of the influence of the human factor on the waveform of the electrostatic discharge (ESD) current, as well as on the evaluation of potential methods for reproducing this influence, with the main approach being the use of ferrites placed at appropriate positions along the return cable of the ESD generator. The thesis was conducted at the High Voltage and Electrical Measurements Laboratory of the School of Electrical and Computer Engineering at the National Technical University of Athens (NTUA).

Initially, the fundamental concepts of electromagnetic compatibility and electrostatic discharge are presented, along with the current IEC 61000-4-2 Ed. 2.0 Standard and its upcoming version (Ed. 3.0). A literature review follows, addressing the main concerns regarding the repeatability and reproducibility of ESD testing, with emphasis on the 10–40 ns time window and the occurrence of the oscillations (ringing phenomenon), as well as the urgent need for integrating automated testing methods.

Subsequently, a quantitative analysis of the influence of the human operator is conducted through experiments involving ten different users. Statistical deviations among the waveforms are calculated, reproducibility uncertainties are estimated, and their fit to known probability density functions (Normal, Log-normal, Gamma, Weibull) is examined.

In the next stage, the possibility of simulating the human effect using ferrite materials placed at different positions along the return cable is explored. Experiments are carried out with various generators and ferrites, and eleven morphological, temporal, and spectral metrics are evaluated, forming the basis for a weighted ranking process.

Keywords: Electromagnetic compatibility, electrostatic discharge, IEC 61000-4-2 Standard, ESD generator, discharge current, human operator, influence, ferrites, ranking, criteria/metrics

Πρόλογος

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. είναι η μελέτη της επίδρασης που έχουν οι παράμετροι μιας προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται οι έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενώ γίνεται περιγραφή της παλιάς (δεύτερης) έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 2.0. Αναλύονται οι τρόποι εμφάνισης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι επιπτώσεις της στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό, περιγράφονται μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και οι παράμετροι των κυματομορφών του ρεύματος εκφόρτισης .

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τους προβληματισμούς και τις αναδυόμενες προκλήσεις το κομμάτι της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD). Αναλύονται η τρίτη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2, προβληματισμοί και μελέτες γύρω από την αναπαραγωγικότητα και την επαναληψιμότητα της κυματομορφής του προτύπου, ειδικά του χρονικού παραθύρου 10ns-40ns, οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις αναφορικά με αυτοματοποιημένες δοκιμές, προβληματισμοί γύρω από το φαινόμενο ringing και πιθανές βελτιωτικές κινήσεις.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η μελέτη της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Μέσα από δύο πειραματικά σενάρια, αναλύεται η μεταβλητότητα που εισάγεται λόγω της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης και εκτιμώνται οι αντίστοιχες αβεβαιότητες. Η αξιολόγηση της επαναληψιμότητας και η στατιστική μοντελοποίηση των κυματομορφών επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση της συμβολής του ανθρώπινου παράγοντα. Επιπλέον, εξετάζεται η εφαρμογή κατανομών πιθανοτήτων (Normal, Log-normal, Gamma, Weibull) για την περιγραφή των παραμέτρων.

Στο **Κεφάλαιο 4** επιχειρείται η προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπου στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω της χρήσης φερριτών. Πραγματοποιούνται δύο πειραματικά σενάρια και με βάση 11 επιλεγμένα metrics, που

καλύπτουν μορφολογικά, χρονικά και φασματικά χαρακτηριστικά, υπολογίζονται αποκλίσεις από την ανθρώπινη κυματομορφή. Στη συνέχεια εφαρμόζεται διαδικασία κατάταξης (ranking) για κάθε περίπτωση. Στόχος είναι να διαπιστωθεί εάν και σε ποιο βαθμό οι φερρίτες μπορούν να προσομοιώσουν την ανθρώπινη επίδραση.

Στο **Κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα από τα πειράματα και αναφέρεται η μελλοντική συνέχεια της έρευνας με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, η οποία σηματοδοτεί και το πέρας των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Κ. Παπασταμάτη, υποψήφιο διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την πρώτη μας επικοινωνία μέχρι και σήμερα, για την συνεχή και άριστη καθοδήγηση και τη φιλική και υποστηρικτική συνεργασία.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόννο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη άψογη συνεργασία, την καθοδήγηση με συνέπεια και αξιοπιστία και τις χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο του προσωπικού του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τη συνεργασία στη διεξαγωγή των πειραμάτων και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για την απεριόριστη στήριξη και ώθηση που μου έδωσαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και χωρίς τους οποίους δεν θα βρισκόμουν εδώ σήμερα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Πρόλογος	9
Ευχαριστίες	11
Ευρετήριο Σχημάτων	17
Ευρετήριο Πινάκων	24
Κεφάλαιο 1: Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και το πρότυπο IEC 61000-4-2.....	27
1.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και πηγές ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών.....	27
1.2 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση.....	28
1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο.....	29
1.2.3 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	32
1.2.4 Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	34
1.3 Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 και γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	36
1.3.1 Γεννήτριες δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	38
1.3.1.1 Επίπεδα τάσεων δοκιμής.....	38
1.3.1.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά της ηλεκτροστατικής γεννήτριας	39
1.3.1.3 Κυκλωματικό μοντέλο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	41
1.3.2 Η κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση το πρότυπο IEC 61000-4-2Ed 2.0	43
1.3.3 Διάταξη και διαδικασία διακρίβωσης γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0	46
1.3.4 Διάταξη δοκιμών με χρήση γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής και για δοκιμές που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0	48

Κεφάλαιο 2: Προβληματισμοί και αναδυόμενες προκλήσεις στο κομμάτι του ESD..52

2.1 Εισαγωγή	52
2.2 Νέα έκδοση του Προτύπου – IEC 61000-4-2 Ed 3	52
2.1.1 Επίπεδα τάσεων δοκιμής, λειτουργικά χαρακτηριστικά και κυκλωματικό μοντέλο γεννήτριας ESD σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3.....	54
2.1.2 Η κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3.....	54
2.1.3 Διάταξη και διαδικασία διακρίβωσης γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3.....	54
2.1.4 Διάταξη δοκιμών με χρήση γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής και για δοκιμές που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3	57
2.1.5 Έρευνες πάνω στην αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου.....	60
2.3 Μελέτες σχετικά με θέματα αναπαραγωγιμότητας και επαναληψιμότητας.....	63
2.3.1 Μεταβλητότητα, Τεκμηρίωση και Στρατηγικές Βελτίωσης στις Δοκιμές ESD: Συμπεράσματα από το Industry Council White Paper 3	64
2.3.2 Διεργαστηριακή μελέτη της ESDA για τη δοκιμή ESD: Προβλήματα Αναπαραγωγιμότητας και Επαναληψιμότητας στη Δεύτερη Κορυφή του Ρεύματος	67
2.3.3 Διεργαστηριακή μελέτη για τη βελτίωση της επαναληψιμότητας και της επαναληψιμότητας της δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	69
2.3.4 Επαναληψιμότητα στις δοκιμές με εκφορτίσεις αέρος.....	72
2.4 Αυτοματοποιημένες δοκιμές και ρομποτικοί βραχίονες.....	74
2.5 Φαινόμενο ringing και προσπάθειες καταστολής του με φερρίτες	80
2.5.1 Φερρίτες.....	80
2.5.1.1 Γενικά για τους φερρίτες	80
2.5.1.2 Μαγνήτιση	82

2.5.1.3 Φερρίτες και ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	86
2.5.2 Μελέτη της επίδρασης του καλωδίου επιστροφής στο φαινόμενο ringing	88
2.5.3 Μελέτες μείωσης του φαινομένου ringing με χρήση φεριττών.....	92
Κεφάλαιο 3: Ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή του IEC 61000-4-2	99
3.1 Εισαγωγή	99
3.2 Εξοπλισμός εργαστηρίου υψηλών τάσεων	100
3.2.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.....	100
3.2.1.1 Γεννήτρια NSG 433.....	101
3.2.1.2 Γεννήτρια NSG 433	101
3.2.1.3 Γεννήτρια DITO	102
3.2.1.4 Σύγκριση των γεννητριών και παρουσίαση χαρακτηριστικών.....	103
3.2.2 Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης και ομοαξονικό καλώδιο υψηλής συχνότητας.....	104
3.2.3 Εξασθενητής	104
3.2.4 Παλμογράφος.....	105
3.2.5 Ανιχνευτής ρεύματος	106
3.3 Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία.....	106
3.3.1 Τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης.....	107
3.3.2 Διάταξη δοκιμών.....	108
3.3.3 Διόρθωση κυματομορφών δοκιμών.....	110
3.3.3.1 Προτεινόμενη μεθοδολογία για τη διόρθωση των κυματομορφών που λήφθηκαν με ανιχνευτή ρεύματος	111
3.3.3.2 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε τέσσερις γεννήτριες και σε τέσσερα επίπεδα τάσης	115
3.3.4 Στατιστική επεξεργασία κυματομορφών	123
3.3.4.1 Ανάλυση κυματομορφών, βασικές παράμετροι και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας κάθε παραμέτρου.....	124

3.3.4.2 Στατιστική ανάλυση κυματομορφών: ιστογράμματα, θεωρητικές κατανομές και αξιολόγηση προσαρμογής	125
3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων	128
3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων βασικών παραμέτρων και αβεβαιοτήτων αναπαραγωγιμότητας	128
3.4.1.1 Διακρίβωση DITO	128
3.4.1.2 Διάταξη δοκιμών DITO	131
3.4.2 Παρουσίαση συγκριτικής ανάλυσης ιστογραμμάτων και θεωρητικών κατανομών	143
3.5 Συμπεράσματα	148
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή με χρήση φερριτών	152
4.1 Εισαγωγή	152
4.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός	153
4.2.1 Χρησιμοποιούμενοι φερρίτες και οι χαρακτηριστικές τους κυματομορφές	153
4.3 Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία.....	157
4.3.1 Τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης.....	157
4.3.2 Διάταξη δοκιμών.....	159
4.3.2 Επεξεργασία κυματομορφών και μετρήσεων	161
4.3.2.1 Γενική μεθοδολογία επεξεργασίας	161
4.3.2.2 Ανάλυση και τεκμηρίωση επιλογής των 11 metrics και των βαρών για το τελικό ranking	164
4.4 Αποτελέσματα μετρήσεων	174
4.4.1 Διάταξη διακρίβωσης DITO	174
4.4.2 Διάταξη δοκιμών DITO	181
4.4.3 Διάταξη διακρίβωσης NSG 438.....	188
4.4.4 Διάταξη δοκιμών NSG 438.....	195

4.5 Συμπεράσματα	201
4.5.1 Επίδραση των φερριτών στην κυματομορφή ESD	201
4.5.2 Σχολιασμός των συχνοτήτων λειτουργίας των «επικρατέστερων» φερριτών	203
4.5.3 Σχολιασμός της επίδρασης της θέσης τοποθέτησης του φερρίτη στην συμπεριφορά εκφόρτισης.....	205
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Σύνοψη – Περαιτέρω διερεύνηση	209
Βιβλιογραφία	213

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: : Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά τη βάδισή του πάνω σε δάπεδο [4].....	30
Σχήμα 1.2: Στάδια ηλεκτροστατικής φόρτισης εξ' επαγωγής [6]	32
Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (a. HBM, b. MM, c. CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [2]	34
Σχήμα 1.4: Ηλεκτροστατικές γεννήτριες (a) Dito, (b) Teseq NSG 438, (c) EMC partner ESD3000, (d) Schaffner NSG 433.....	38
Σχήμα 1.5: Μυτερή ακίδα για εκφορτίσεις επαφής [15]	40
Σχήμα 1.6: Στρογγυλεμένη ακίδα για εκφορτίσεις αέρος [15]	40
Σχήμα 1.7: Αποπλοημένο διάγραμμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-4 [15]	42
Σχήμα 1.8: Κυκλωματικό διάγραμμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με τις τελευταίες μελέτες [18].....	43
Σχήμα 1.9: Ιδανική κυματομορφή ρεύματος στα 4kV σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2 Ed 2.0 [15]	44
Σχήμα 1.10: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]	47
Σχήμα 1.11: Διάταξη δοκιμών επιτραπέζιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15].....	50
Σχήμα 1.12: Διάταξη δοκιμών επιδαπέδιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15].....	50
Σχήμα 2.1: Ιδανική κυματομορφή ρεύματος στα 4kV σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2 Ed 3 [23]	55
Σχήμα 2.2: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]	57
Σχήμα 2.3: Διάταξη δοκιμών επιτραπέζιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23].....	59
Σχήμα 2.4: Διάταξη δοκιμών επιδαπέδιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23].....	59
Σχήμα 2.5: Πειραματικές διατάξεις διακρίβωσης (a) με βάση το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 (b) με βάση το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 [23].....	61

Σχήμα 2.6: Διατάξεις δοκιμών εξαρτημάτων που εφαρμόστηκαν στο Round Robin Study του HMM (a) Διάταξη A, (b) Διάταξη B, (c) Διάταξη C [26]	68
Σχήμα 2.7: Ανάλυση κατανομών δεδομένων από Round Robin Study του HMM [26]	68
Σχήμα 2.8: Μέγιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής ESD [27].....	71
Σχήμα 2.9: Μετασχηματισμός Fourier (Επίπεδο τάσης 8kV, Χειρός από άτομο, Υπάρχον μοντέλο) [27].....	71
Σχήμα 2.10: PCB επαλήθευσης ESD στο εξάρτημα [28].....	73
Σχήμα 2.11: Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος για 3 διαφορετικές γωνίες [28].....	74
Σχήμα 2.12: NSF 439 ESD Simulator - Fully automated robotic ESD testing [30]...	75
Σχήμα 2.13: Διάγραμμα ροής του αυτοματοποιημένου βραχίονα δοκιμών ESD [31]	77
Σχήμα 2.14: Παρατηρούμενα soft failures για την υπό εξέταση κάμερα [31]	77
Σχήμα 2.15: Διαφορετικές παραλλαγές στο φασματικό περιεχόμενο του δοκιμαστικού ήχου [31]	78
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ανίχνευσης και χαρακτηρισμού που βασίζεται σε ήχο [31].....	79
Σχήμα 2.17: α)Στοιχειώδης κυψελίδα δομή σπινελίου, β) Δομή εξαφερρίτη, γ) Δομή γρανάτη, δ) Η γενική δομή του περοβσκίτη [34], [36], [37]	83
Σχήμα 2.18: Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας μαγνήτισης [35]	85
Σχήμα 2.19: Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του ρεύματος ημιτονοειδούς κύματος που οδηγεί τη μαγνήτιση επί του βρόχου υστέρησης ανά κύκλο ημιτονοειδούς κύματος [35].....	86
Σχήμα 2.20: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη της σύνθετης αντίστασης Z, με τις επιμέρους καμπύλες ωμικής αντίστασης R και αντίδρασης X ενός φερρίτη [38]	87
Σχήμα 2.21: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο θορύβου [39]	88
Σχήμα 2.22: Διατάξεις μέτρησης για τη μελέτη επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής στην κυματομορφή ρεύματος [40]	89
Σχήμα 2.23: Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [40].....	90
Σχήμα 2.24: Σύγκριση φασματικών περιεχομένων των κυματομορφών ρεύματος για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [40]	91

Σχήμα 2.25: Σύγκριση κυματομορφών και φασμάτων για την Σύνθετη Α κυματομορφή της Lc διάταξης του καλωδίου επιστροφής [40]	92
Σχήμα 2.26: Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης 11 γεννητριών ESD για εκφορτίσεις επαφής των 8kV[41]	93
Σχήμα 2.27: "Τριγωνική" (a) και "πραγματική" (b) διάταξη του καλωδίου επιστροφής [41].....	94
Σχήμα 2.28: Αποτελέσματα πρώτου γύρου μετρήσεων [41].....	95
Σχήμα 2.29: Αποτελέσματα δεύτερου γύρου μετρήσεων [41]	95
Σχήμα 2.30: Πειραματική διάταξη διακρίβωσης με χρήση φερριτών [42]	97
Σχήμα 2.31: Φάσμα των αντιστάσεων καλωδίων επιστροφής ρεύματος, μήκους 2m από την πλευρά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με γειωμένο το άλλο άκρο [42].....	98
Σχήμα 2.32: Συγκριτικά αποτελέσματα για τα δύο καλώδια με χρήση φερριτών και για όλες τις διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [42].....	98
Σχήμα 3.1: Η γεννήτρια NSG 433 [2]	101
Σχήμα 3.2: Η γεννήτρια NSG 438 [2]	102
Σχήμα 3.3: Η γεννήτρια DITO a) γενική άποψη της γεννήτριας, b) οθόνη επιλογής προγράμματος λειτουργίας, c) οθόνη κατά τη διάρκεια λειτουργίας [2].....	102
Σχήμα 3.4: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη MD 103 [2]	104
Σχήμα 3.5: Ο εξασθενητής 011-0059-03 της Tektronix.....	105
Σχήμα 3.6: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B	106
Σχήμα 3.7: Ο ανιχνευτής ρεύματος FCC F-65	106
Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης	107
Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης	108
Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοκιμών	109
Σχήμα 3.11: Φωτογραφία από την πειραματική διάταξη δοκιμών.....	110
Σχήμα 3.12: Setup μέτρησης ρεύματος με αισθητήρα: a)Μέτρηση του Sc, b)Μέτρηση του Sv [46].....	111
Σχήμα 3.13: a) Απλό ισοδύναμο κύκλωμα για έναν αισθητήρα ρεύματος και μια διάταξη δοκιμής διακρίβωσης, b) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα [46].....	112
Σχήμα 3.14: Αντίσταση μεταφοράς ενός ιδανικού αισθητήρα ρεύματος [46]	112
Σχήμα 3.15: Ισοδύναμο κύκλωμα για αισθητήρα ρεύματος FCC F65 με βελτιστοποιημένες τιμές εξαρτημάτων [46]	113

Σχήμα 3.16: Αντίσταση μεταφοράς ενός ρεαλιστικού αισθητήρα ρεύματος FCC F65 [46].....	113
Σχήμα 3.17: Διαδικασία ανάπτυξης $H_{frc}(j\omega)$ χρησιμοποιώντας ισοδύναμο κύκλωμα [46].....	114
Σχήμα 3.18: Σύγκριση κυματομορφών σε διάστημα 200ns από τη μέτρηση ρεύματος του αισθητήρα FCC F65 [46]	115
Σχήμα 3.19: Διάγραμμα ροής της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας βελτιστοποίησης αποκλίσεων τάσης [47]..	116
Σχήμα 3.20: Πειραματική διάταξη [47]	117
Σχήμα 3.21: Η κυματομορφή ESD που αποκτήθηκε από τον στόχο Pellegrini και η αρχική κυματομορφή που αποκτήθηκε με τον αισθητήρα ρεύματος χωρίς την εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας [47].....	117
Σχήμα 3.22: Ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας διακρίβωσης του αισθητήρα ρεύματος F-65 [47]	118
Σχήμα 3.23: Σύνθετη αντίσταση μεταφοράς του αισθητήρα ρεύματος F-65 [47] ...	118
Σχήμα 3.24: Σύγκριση της κυματομορφής στόχου Pellegrini (αναφοράς), της αρχικής κυματομορφής που αποκτήθηκε από τον ανιχνευτή ρεύματος και της τελικής κυματομορφής που αποανακατασκευάστηκε για έναν παλμό +4 kV [47].....	120
Σχήμα 3.25: Σύγκριση του πρώτου μεγίστου της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή-στόχο Pellegrini (αναφοράς) για παλμό +2 kV , +4 kV , +6 kV και +8 kV της γεννήτριας EM TEST Dito ESD [47]	122
Σχήμα 3.26: Σύγκριση της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή-στόχο Pellegrini (αναφοράς) για έναν παλμό +4 kV της γεννήτριας EM TEST Dito ESD [47].....	122
Σχήμα 3.27: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO	128
Σχήμα 3.28: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO.....	129
Σχήμα 3.29: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO.....	129
Σχήμα 3.30: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση δοκιμών του DITO	131
Σχήμα 3.31: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του DITO	131

Σχήμα 3.32: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του DITO	132
Σχήμα 3.33: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433.....	133
Σχήμα 3.34: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433	134
Σχήμα 3.35: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433	134
Σχήμα 3.36: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433	136
Σχήμα 3.37: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433	136
Σχήμα 3.38: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433	137
Σχήμα 3.39: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438.....	138
Σχήμα 3.40: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438	139
Σχήμα 3.41: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438	139
Σχήμα 3.42: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438	141
Σχήμα 3.43: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438.....	141
Σχήμα 3.44: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438.....	142
Σχήμα 3.45: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO	143
Σχήμα 3.46: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση δοκιμών του DITO.....	144
Σχήμα 3.47: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433	144
Σχήμα 3.48: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433	144

Σχήμα 3.49: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438	144
Σχήμα 3.50: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438	145
Σχήμα 3.51: Παρασιτικές χωριτικότητες και αμοιβαίες επαγωγές που δημιουργεί ο άνθρωπος με τη διάταξη δοκιμών [21]	151
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0431164951 (31 Material για το DITO) [49].....	155
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0431164281 (31 Material για το NSG 438) [49]	155
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0444164951 (44 Material για το DITO) [49].....	155
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0444164281 (44 Material για το NSG 438) [49]	156
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0461164951 (61 Material για το DITO) [49].....	156
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0461164281 (61 Material για το NSG 438) [49]	156
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0475181651 (75 Material για το DITO) [49].....	157
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0475178281 (75 Material για το NSG 438) [49]	157
Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης	158
Σχήμα 4.10: Φωτογραφίες από την πειραματική διάταξη διακρίβωσης: α) Ferrite position 1 (GEN), β) Ferrite position 2 (MID), Ferrite position 3 (GND)	159
Σχήμα 4.11: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοκιμών	160
Σχήμα 4.12: Φωτογραφίες από την πειραματική διάταξη δοκιμών: α) Ferrite position 1 (GEN), β) Ferrite position 2 (MID), Ferrite position 3 (GND)	161
Σχήμα 4.13: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο - διακρίβωση DITO.....	174
Σχήμα 4.14: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διακρίβωση DITO	174
Σχήμα 4.15: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών DITO.....	181

Σχήμα 4.16: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών DITO	181
Σχήμα 4.17: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο - διακρίβωση NSG 438	188
Σχήμα 4.18: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διακρίβωση NSG 438.....	188
Σχήμα 4.19: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών NSG 438	195
Σχήμα 4.20: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών NSG 438.....	195
Σχήμα 4.21: Ανάδειξη των αργών και γρήγορων ταλαντώσεων σε μία κυματομορφή ESD, χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τη γεννήτρια DITO.....	205
Σχήμα 4.22: Πειραματική διάταξη μέτρησης ρεύματος χωρίς φερρίτες για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη	206
Σχήμα 4.23: Κυματομορφές ρεύματος χωρίς φερρίτες στις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη	207
Σχήμα 4.24: Φάσματα κυματομορφών ρεύματος χωρίς φερρίτες στις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη	207

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά [3]	31
Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μίας φόρτισης [3]	31
Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV) συναρτήσει της υγρασίας [3]....	32
Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [2].....	33
Πίνακας 1.5: Επίπεδα τάσεων δοκιμών [15]	39
Πίνακας 1.6: Γενικές προδιαγραφές γεννήτριας ESD [15]	42
Πίνακας 1.7: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]	45
Πίνακας 1.8: Διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15].....	48
Πίνακας 2.1: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]	55
Πίνακας 2.2: Διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23].....	58
Πίνακας 2.3: Συγκριτικά αποτελέσματα για την παράμετρο Ip2 [23].....	62
Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	103
Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου TDS 7254B	105
Πίνακας 3.3: Τιμές detrend για διαφορετικά επίπεδα δοκιμών και γεννήτριες δοκιμών ESD [47]	120
Πίνακας 3.4: Ανακατασκευασμένες και αναφορικές παράμετροι ρεύματος ESD για τη γεννήτρια EM TEST Dito ESD [47].....	121
Πίνακας 3.5: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO	130
Πίνακας 3.6: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση δοκιμών του DITO.....	132
Πίνακας 3.7: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433	135
Πίνακας 3.8: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433	137

Πίνακας 3.9: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438	140
Πίνακας 3.10: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438	142
Πίνακας 3.11: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO	145
Πίνακας 3.12: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση δοκιμών του DITO	145
Πίνακας 3.13: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433	146
Πίνακας 3.14: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433	146
Πίνακας 3.15: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438	146
Πίνακας 3.16: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438	147
Πίνακας 4.1: Κωδική ονομασία των εκεταζόμενων περιπτώσεων.....	162
Πίνακας 4.2: Τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της συνολικής κατάταξης.....	172
Πίνακας 4.3: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διακρίβωση DITO	176
Πίνακας 4.4: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διακρίβωση DITO.....	178
Πίνακας 4.5: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διακρίβωση DITO	179
Πίνακας 4.6: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών DITO	184
Πίνακας 4.7: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών DITO	185
Πίνακας 4.8: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διάταξη δοκιμών DITO.....	186
Πίνακας 4.9: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διακρίβωση NSG 438	191
Πίνακας 4.10: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διακρίβωση NSG 438	192
Πίνακας 4.11: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διακρίβωση NSG 438	193
Πίνακας 4.12: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών NSG 438	197

Πίνακας 4.13: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών NSG 438	198
Πίνακας 4.14: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διάταξη δοκιμών NSG 438	199

Κεφάλαιο 1: Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και το πρότυπο IEC 61000-4-2

1.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και πηγές ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών

Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον, χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σε αυτό το περιβάλλον [1].

Με την ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων τον τελευταίο αιώνα, η μελέτη της δυνατότητας ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων να συνυπάρχουν αρμονικά έχει απασχολήσει πολύ την επιστημονική κοινότητα. Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, καθώς και η ευρεία και εκτεταμένη χρήση των παραγώγων αυτής έχει οδηγήσει στην ανάγκη οι ηλεκτρικές συσκευές να μην αλληλοεπιδρούν τόσο μεταξύ τους όσο και με τον άνθρωπο, προκειμένου να επιτυγχάνεται η ικανοποιητική λειτουργίας τους.

Για το λόγο αυτό, έχει γίνει εκτεταμένη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, δηλαδή των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που μπορεί να προκαλέσουν πτώση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ή να επιδράσουν δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη [2]

Κύρια αίτια ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και διαταραχών είναι η διανομή ηλεκτρικής ισχύος, τα ραδιοκύματα, οι κεραυνοί, οι πυρηνικοί ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί και η ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Στη διανομή ηλεκτρικής ισχύος, πολλές διαταραχές δημιουργούνται από τις λειτουργίες ζεύξης και απόζευξης των κυκλωμάτων μεταγωγής, όπου παράγονται είτε υψηλής συχνότητας αρμονικές, είτε κύματα με πολύ γρήγορο ρυθμό ανόδου, φαινόμενα ιδιαίτερα επιβλαβή σε συστήματα με μικροεπεξεργαστές. Τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται από συστήματα απομακρυσμένου ελέγχου αποτελούν επίσης πηγές διαταραχών της τάξης αρκετών V/m, ενώ οι κεραυνοί έχουν καταστροφική επίδραση στις ηλεκτρονικές συσκευές λόγω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, των ρευμάτων

υψηλής έντασης και των τάσεων εξ' επαγωγής που δημιουργούν. Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί δημιουργούνται από μία έκρηξη, κατά τον διαχωρισμό φορτίου και κίνησης εντός της έκρηξης και η μελέτη αυτών έχει εφαρμογή κυρίως σε στρατιωτικούς χώρους. Τέλος, η ανάπτυξη εκφόρτισης με πολύ γρήγορο χρόνο ανόδου μεταξύ ενός φορτισμένου σώματος και ηλεκτρονικού εξοπλισμού παράγει μία σημαντική διαταραχή που εισέρχεται στη συσκευή, γνωστή και ως ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

1.2 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση

Η δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού είναι γνωστή από το 600 π.Χ. όταν ο Θαλής ο Μιλήσιος παρατήρησε ότι εάν τριφτεί ένα κομμάτι ήλεκτρο (κεχριμπάρι), αυτό μπορεί να έλκει μικρά κομμάτια χαρτιού. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic discharge, ESD) αποτελεί ένα από τα πιο συχνά φαινόμενα και μία από τις πιο σημαντικές αιτίες παρεμβολών στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Πρόκειται για την αιφνίδια και στιγμιαία μεταφορά ηλεκτροστατικού φορτίου από μία επιφάνεια σε μία άλλη. Η στιγμιαία αυτή φόρτιση μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών, ενώ η εκφόρτιση παράγει ρεύμα με απότομες μεταβολές, που μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει τις ηλεκτρικές συσκευές [3].

Καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται και οι συσκευές γίνονται ολοένα και μικρότερες, λειτουργώντας σε χαμηλότερα δυναμικά και με μικρότερους κύκλους ρολογιού, η ευαισθησία τους στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση αυξάνεται. Η τελευταία αποτελεί κίνδυνο για τις ηλεκτρονικές διατάξεις, αφού μπορεί να διαταράξει ή ακόμα και να καταστρέψει ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα. Σοβαρά προβλήματα έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, όπως εκρήξεις σε δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους, ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους, εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας αεροσκαφών με καύσιμα και βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων [2].

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση δημιουργείται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος, γνωστός ως τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, συμβαίνει, όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή, συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων

με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία. Ο δεύτερος μηχανισμός γνωστός ως φόρτιση εξ' επαγωγής, λαμβάνει χώρα όταν ένα υλικό είναι εκτεθειμένο σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, με αποτέλεσμα το υλικό αυτό να αποκτήσει μία περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτιζόμενο σώμα [3].

1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

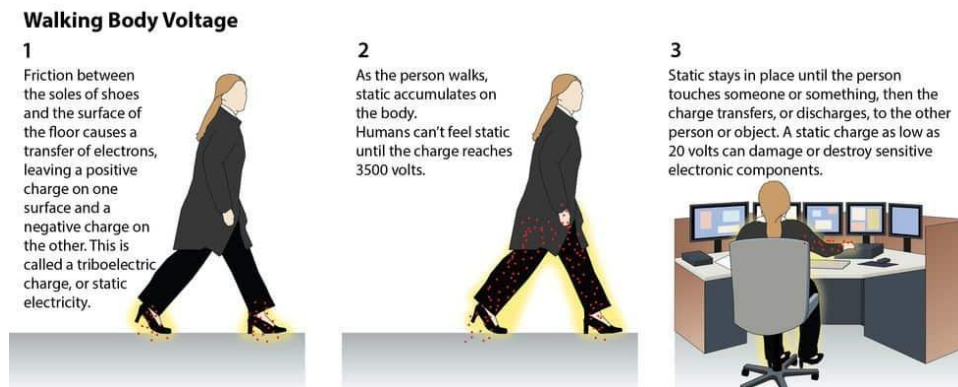
Όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και υπάρξει σχετική κίνηση του ενός με το άλλο (τριβή), όταν αποχωριστούν θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Παρ' ότι ο στατικός ηλεκτρισμός και πιο συγκεκριμένα το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο συνήθως εμφανίζονται αφού υπάρξει τριβή μεταξύ των υλικών, αυτό δεν είναι απαραίτητο.

Αυτό που ουσιαστικά γίνεται είναι ότι τα δύο υλικά φορτίζονται ηλεκτροστατικά με φορτία αντίθετης πολικότητας. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται ως αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Αποτέλεσμα της φόρτισης είναι η ανάπτυξη μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25kV, με αποθηκευόμενες ενέργειες των μερικών mJ. Η εκφόρτιση της ενέργειας αυτής παράγει ρεύμα, η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις, οι οποίες έχουν επιπτώσεις στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η φόρτιση του ανθρώπου κατά την κίνησή του πάνω στο δάπεδο. Καθώς ο αρχικά αφόρτιστος άνθρωπος κινείται πάνω στο δάπεδο με υποδήματα φτιαγμένο από συνθετικά μονωτικά, τα τελευταία έρχονται σε τριβή με το δάπεδο, ανταλλάσσοντας ηλεκτρόνια με αυτό. Αποτέλεσμα είναι η αντίθετη φόρτιση του δαπέδου και των υποδημάτων και επειδή ο άνθρωπος είναι αγωγίμος, η φόρτιση τελικά μεταφέρεται και στον άνθρωπο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Κατά συνέπεια δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού μεταξύ του ανθρώπου και γειτονικών αντικειμένων, καθιστώντας εύκολο να συμβούν ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις [2].

- 1 Η ένταση του φαινομένου και το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από την ηλεκτραρνητικότητα των υλικών. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η τριβοηλεκτρική σειρά των υλικών, με τα υλικά που βρίσκονται ψηλότερα να φορτίζονται περισσότερο σε σχέση με αυτά που βρίσκονται

χαμηλότερα. Είναι εύκολα αντιληπτό πως όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ηλεκτραρνητικότητας των υλικών,



Σχήμα 1.1: : Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά τη βόλτά του πάνω σε δάπεδο [4]

τόσο περισσότερο φορτίζονται και άρα οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι μονωτές, οι οποίοι δεν επιτρέπουν την εύκολη κίνηση των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα να συσσωρεύουν επιφανειακά το στατικό φορτίο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτροστατική φόρτιση και εκφόρτιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2. Σημειώνεται ότι η υγρασία του περιβάλλοντος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη συχνότητα και την τάση των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Υψηλή υγρασία στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται αυξημένη αγωγιμότητα του αέρα και άρα τα φορτία που δημιουργούνται διαρρέουν πιο εύκολα προς τη γη, μειώνοντας την πιθανότητα συσσώρευσης στατικών φορτίων, συνεπώς οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι πιο συχνές, αλλά μικρότερου δυναμικού. Αντίθετα, ξηρή ατμόσφαιρα συνεπάγεται μεγαλύτερη πιθανότητα συσσώρευσης ηλεκτροστατικών φορτίων, συνεπώς οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα, αλλά μεγαλύτερο δυναμικό [5].

Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και την αγώγιμη σύνδεση. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μία περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή του φορτισμένου σώματος και άρα τελικά θα φορτιστεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά [3]

Πολικότητα φόρτισης λόγω τριβοηλεκτρικού φαινομένου σε διάφορα υλικά	
Υλικά που φορτίζονται θετικά	Υλικά που φορτίζονται αρνητικά
Αέρας	Κερί γυαλίσματος
Ανθρώπινο δέρμα	Σκληρό λάστιχο
Γυαλί	Κόλλα συγκόλλησης
Ανθρώπινα μαλλιά	Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι
Νάιλον	Ανοξείδωτο ατσάλι
Μαλλί	Συνθετικό λάστιχο
Γούνα	Ακρυλικό
Μόλυβδος	Αφρός πολυουρεθάνης
Μετάξι	Πολυεστέρας
Αλουμίνιο	Πολυαιθυλένιο
Χαρτί	PVC
Πολυουρεθάνη	TEFLON
Βαμβάκι	Λάστιχο σιλικόνης
Ξύλο	
Ατσάλι	

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μίας φόρτισης [3]

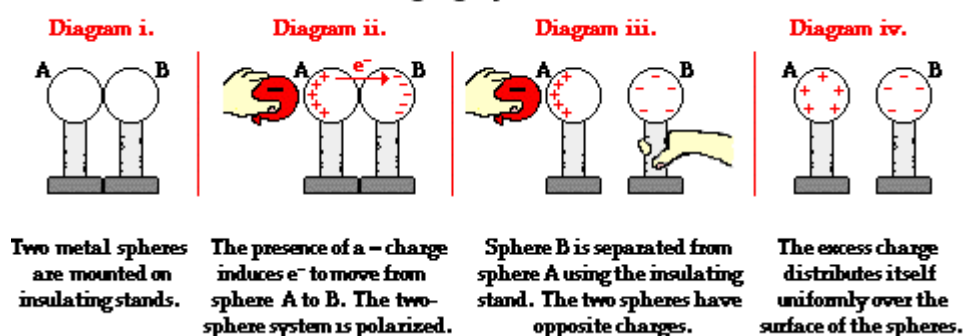
Συντελεστές φόρτισης	Συντελεστές εκφόρτισης
Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική σειρά	Αγωγιμότητα των υλικών
Επιφάνεια επαφής	Σχετική υγρασία
Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών	Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών
Βαθμός διαχωρισμού	Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού

Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις συναρτήσει της υγρασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV) συναρτήσει της υγρασίας [3]

Διαδικασία	Σχετική υγρασία		
	10%	40%	55%
	Ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)		
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου	12	5	3
Κινήσεις εργαζομένου σε γραφείο	6	0,8	0,4

Charging by Induction



Σχήμα 1.2: Στάδια ηλεκτροστατικής φόρτισης εξ' επαγωγής [6]

Εκτός από τους δύο μηχανισμούς που αναφέρθηκαν (τριβοηλεκτρικό φαινόμενο και φόρτιση εξ' επαγωγής), υπάρχουν και άλλες δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων όπως η δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση Corona, οι οποίες παραμένουν στατικές σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

1.2.3 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Τα συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτελούν ένα καθημερινό φαινόμενο στο οποίο εμπλέκονται ποικίλα είδη σωμάτων. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη τα συμβάντα αυτά να κατηγοριοποιηθούν σε ομάδες και να μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά προκειμένου να μπορούν να εκτιμηθούν οι επιδράσεις των εκφορτίσεων στην πραγματικότητα. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι [2]:

- Μοντέλο ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model, HBM)
- Μοντέλο της μηχανής (Machine Model, MM)
- Μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model, CDM)

Τα τρία μοντέλα στο σύνολό τους περιγράφονται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$L_s \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0$$

όπου

- R_{ESD} η συνολική ωμική αντίσταση του κυκλώματος, δηλαδή το άθροισμα της ίδιας ωμικής αντίστασης (R_{HBM} , R_{MM} , R_{CDM}) και της ωμικής αντίστασης R_L του υπό εξέταση εξοπλισμού (device under test, DUT)
- C_{ESD} η χωρητικότητα που είναι αρχικά φορτισμένη σε τάση V_{ESD}
- L_s η αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης

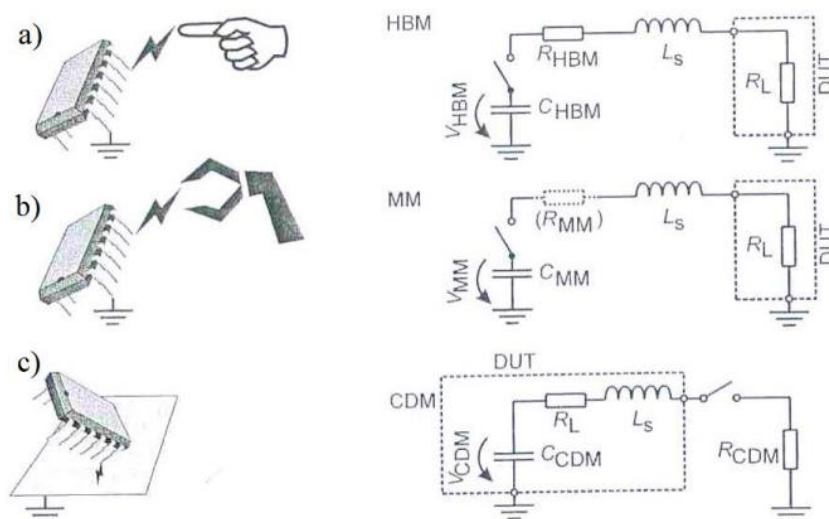
Τα τρία μοντέλα διαφοροποιούνται ουσιαστικά ως προς το τι μοντελοποιούν και ως προς τις τιμές των παραμέτρων RLC, τυπικές τιμές των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [2]

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
V_{ESD} (V)	4000	200	500
$R_{HBM}/R_{MM}/R_{CDM}$ (Ω)	1500	5	10
C_{ESD} (pF)	100	200	10
L_s (nH)	5000	750	750

Το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος είναι το πιο διαδεδομένο για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συσκευής και προσομοιώνει την εκφόρτιση ενός ανθρώπου σε ένα γειωμένο ηλεκτρονικό εξάρτημα. Το μοντέλο της μηχανής προσομοιώνει την εκφόρτιση ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου σε μία συσκευή. Τέτοιο παράδειγμα συναντάται στην κατασκευή βιομηχανικών αυτοματισμών και κυρίως κατά την ενεργοποίηση μηχανημάτων, όπου αυτά φορτίζονται ηλεκτρικά και στη συνέχεια εκφορτίζονται σε ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα μέσω της επαφής. Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής διαφέρει από τα δύο προηγούμενα, καθώς προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση από μία συσκευή και όχι προς μία συσκευή. Παράδειγμα αυτού, αποτελούν οι συσκευές σε αυτοματοποιημένο περιβάλλον παραγωγής, που λειτουργούν συνεχώς, με αποτέλεσμα τα ολοκληρωμένα τους να φορτίζονται ηλεκτρικά με την πάροδο του χρόνου και τελικά να εκφορτίζονται όταν έρχονται σε επαφή με γειωμένο αγωγό [2], [3].

Στο Σχήμα 1.3 δίνονται οι κυκλωματικές αναπαραστάσεις των τριών μοντέλων και παραδείγματα εκφορτίσεων.



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (a. HBM, b. MM, c. CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [2]

1.2.4 Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Σύμφωνα με το ESD ADV 1.0, η ηλεκτροστατική βλάβη ορίζεται ως η αλλαγή σε ένα στοιχείο που προκαλείται από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, η οποία το καθιστά μη συμμορφούμενο με μία ή περισσότερες προδιαγραφές [7]. Τα συμβάντα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχουν ως στόχο την εξισορρόπηση της φόρτισης μεταξύ δύο αντικειμένων. Η κίνηση των φορτίων είναι πολύ γρήγορη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υψηλά ρεύμα, τα οποία σε συνδυασμό με τη σύνθετη αντίσταση του αντικειμένου παράγουν τάση και άρα ηλεκτρικό πεδίο.

Στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, τα εξαρτήματα μικροσκοπικού μεγέθους όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με τρανζίστορ μπορούν να καταστραφούν από μία εκφόρτιση των μερικών δεκάδων Volts, βλάπτοντας σημαντικά τους ημιαγωγούς των ολοκληρωμένων, αφού παράγοντα τοπική θερμότητα, πυκνότητες υψηλής έντασης ρεύματος και υψηλές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου. Οι βλάβες αυτές, μπορεί να συμβούν σε οποιοδήποτε στάδιο, από τη κατασκευή μέχρι τη χρήση της συσκευής. Αναλυτικότερα, τα υψηλά ρεύματα που δημιουργούνται μέσω του φαινομένου Joule, παράγουν θερμότητα. Αν ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό απαγωγής θερμότητας, τότε υπάρχει θερμική διαρροή, η οποία είναι υπεύθυνη

για την καταστροφή μεταλλικών συνδέσεων σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ακόμα, οι πυκνότητες υψηλής έντασης ρεύματος οδηγούν σε διάσπαση ημιαγωγών, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο αν υπερβεί την διηλεκτρική αντοχή των υλικών οδηγεί σε καταστροφή των στρωμάτων. Ακόμα, αν η αναπτυσσόμενη τάση ξεπεράσει τα όρια αντοχής των υλικών, επέρχεται διάσπαση των ημιαγωγών και άρα μόνιμη βλάβη των τρανζίστορ [8], [9].

Εκτός από το κομμάτι της ηλεκτρονικής, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση έχει σημαντικές επιπτώσεις και σε μακροσκοπικό επίπεδο, όπου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ζητήματα ασφαλείας, όπως σπινθήρες, αναφλέξεις ή και εκρήξεις σε πετρελαϊκές, χημικές, φαρμακευτικές και στρατιωτικές βιομηχανίες. Όταν ηλεκτροστατικά φορτία συσσωρεύονται σε επιφάνειες ή υλικά χωρίς κατάλληλη εκτόνωση, μπορεί να δημιουργηθεί ηλεκτρικός σπινθήρας κατά την απότομη εκφόρτιση. Αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε περιβάλλοντα με εύφλεκτα αέρια, σκόνες ή υγρά, καθώς ένας σπινθήρας μπορεί να οδηγήσει σε ανάφλεξη και πιθανώς σε έκρηξη. Στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, η ESD αποτελεί μεγάλο κίνδυνο, καθώς κατά τη μεταφορά, αποθήκευση ή διύλιση πετρελαϊκών προϊόντων μπορεί να παραχθούν ηλεκτροστατικά φορτία λόγω τριβής ή ροής υγρών. Αν αυτά τα φορτία δεν εκτονωθούν σωστά, μπορεί να δημιουργηθούν σπινθήρες που να οδηγήσουν σε εκρήξεις σε δεξαμενές αποθήκευσης ή σε πλατφόρμες εξόρυξης. Σε χημικές και φαρμακευτικές μονάδες, η παρουσία εύφλεκτων διαλυτών, σκονών και αερίων καθιστά την ESD έναν κρίσιμο παράγοντα κινδύνου. Η συσσώρευση στατικού ηλεκτρισμού κατά την ανάμειξη, την επεξεργασία ή την αποθήκευση αυτών των ουσιών μπορεί να προκαλέσει ανεξέλεγκτες αντιδράσεις, βλάβες σε εξοπλισμό και επικίνδυνες εκρήξεις. Στη στρατιωτική και αμυντική βιομηχανία, η ESD μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες, ειδικά σε εγκαταστάσεις που χειρίζονται πυρομαχικά, εκρηκτικά ή καύσιμα. Ένα ανεξέλεγκτο ηλεκτροστατικό φορτίο μπορεί να προκαλέσει πρόωρη έκρηξη εκρηκτικών υλών ή πυρομαχικών, θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και υποδομές [10].

Ιδιαίτερα επικίνδυνα είναι και τα δευτερεύοντα ηλεκτρικά τόξα εντός του εξοπλισμού που μπορεί να πυροδοτήσουν την εμφάνιση νέων φαινομένων, η διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων, που μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, η ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης

σε μέρη του εξοπλισμού και μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εγχεόμενο ηλεκτρικό ρεύμα [2].

Προκειμένου να προστατευτεί ο ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ληφθούν προληπτικά μέτρα και να αναπτυχθούν τεχνικές προστασίας ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα δυσμενή αποτελέσματα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Βασικό μέτρο πρόληψης αποτελεί η προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, όπου απαιτείται η επικάλυψη μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή με ένα αγώγιμο στρώμα. Ακόμα, χρήσιμα είναι τα αντιστατικά δάπεδα που συντίθενται από υλικά τα οποία, ενώ έχουν μονωτικές ιδιότητες, έχουν τιμή αντίστασης τέτοια ώστε να διευκολύνουν την απαγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων προς την γη. Μελέτες υποδεικνύουν ότι η αντίσταση θα πρέπει να είναι μικρότερη των $10\text{M}\Omega$, αλλά από την άλλη θα πρέπει να αρκούντως μονωτικά, ώστε να μην υπάρχει κανένας κίνδυνος για την ασφάλεια των ανθρώπων [11]. Επίσης, βοηθητική είναι η πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού για αποτροπή δευτερευουσών εκφορτίσεων, η θωράκιση και γείωση των συσκευών, ώστε να εξασφαλίζεται μία εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος, η θωράκιση των κυκλωμάτων έναντι πεδίων εξ' επαγωγής και η εγκατάσταση συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό [2].

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 είτε έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μπουτόν, τα οποία διαπερνούν το κέλυφος.

1.3 Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 και γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Όπως φάνηκε από τις προηγούμενες ενότητες, τα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) μπορούν να προκαλέσουν πληθώρα προβλημάτων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, οδηγώντας τα σε αστοχίες ή ακόμα και ολική καταστροφή. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα που κυκλοφορούν στην αγορά είναι ικανά να λειτουργούν ικανοποιητικά, συνυπάρχοντας αρμονικά με τα

υπόλοιπα συστήματα στο περιβάλλον λειτουργίας τους, έχουν αναπτυχθεί Πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

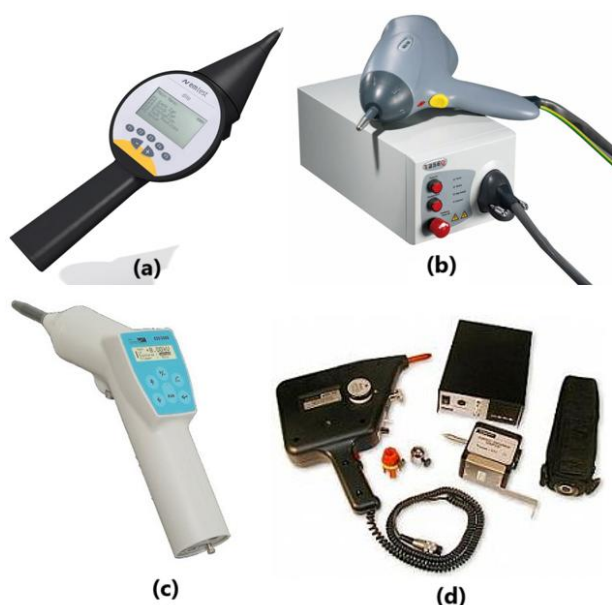
Τα Πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας περιγράφουν απαιτήσεις, μεθόδους δοκιμών, καθορίζουν τα ελάχιστα επίπεδα δοκιμών και τα αποδεκτά όρια για τα αποτελέσματα αυτών, ώστε να ελέγχεται εάν ένα ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό σύστημα έχει ηλεκτρομαγνητική ατρωσία. Διατυπώνουν επίσης, το περιβάλλον δοκιμής, τον εξοπλισμό με τον οποίο γίνεται η δοκιμή, καθώς και τις προδιαγραφές αυτού. Στόχος των Προτύπων είναι οι δοκιμές να μπορούν να είναι επαναλαμβανόμενες και αναπαραγωγίσιμες [12].

Τα πρότυπα EMC είτε ορίζονται και διατυπώνονται από διεθνείς και εθνικούς ή περιφερειακούς οργανισμούς και επιτροπές για λογαριασμό διοικητικών φορέων (όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση εκχωρεί τη διατύπωση των προτύπων EMC στη CENELEC) , είτε οι διοικητικοί ή/και ρυθμιστικοί φορείς αναφέρουν τα ίδια τα πρότυπα και τους κανονισμούς EMC [12]. Σημειώνεται ότι ενώ γενικά τα πρότυπα είναι προαιρετικής εφαρμογής, τα πρότυπα EMC είναι σχεδόν μονόδρομος υποχρεωτικής εφαρμογής στις περισσότερες χώρες, ενώ ειδικά για την Ευρωπαϊκή Ένωση, η συμμόρφωση με τα πρότυπα EMC αποτελεί νομική απαίτηση για τη λήψη της σήμανσης CE και την κυκλοφορία του προϊόντος στην αγορά [13].

Το επικρατέστερο Πρότυπο για την εκτέλεση δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) είναι σχεδιασμένο από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission, IEC) και είναι το IEC 61000-4-2 [2], [14], [15]. Αποτελεί το δεύτερο τμήμα του τέταρτου μέρους του Προτύπου IEC 1000:1995, που αφορά στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Σκοπός του Προτύπου IEC 61000-4-2 είναι η περιγραφή της διεξαγωγής δοκιμών, ώστε να διασφαλιστεί ότι το προϊόν θα μπορούσε να λειτουργήσει ικανοποιητικά τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά την εκδήλωση ενός φαινομένου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αναλύονται λοιπόν, η τυπική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, τα επίπεδα τάσεως δοκιμής, ο απαιτούμενος εξοπλισμός δοκιμής, η εγκατάσταση και η διαδικασία δοκιμής, η εγκατάσταση και η διαδικασία διακρίβωσης και η μέτρηση αβεβαιοτήτων.

1.3.1 Γεννήτριες δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Για την αναπαραγωγή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) και συγκεκριμένα της συχνότερης μορφής αυτής, δηλαδή άνθρωπος – αγωγίμο αντικείμενο, χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές που ονομάζονται γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD generators). Οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης συχνά αποκαλούνται και ως πιστόλια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD guns), λόγω του σχήματός τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Ηλεκτροστατικές γεννήτριες (a) Dito, (b) Teseq NSG 438, (c) EMC partner ESD3000, (d) Schaffner NSG 433

1.3.1.1 Επίπεδα τάσεων δοκιμής

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με βάση το πρότυπο IEC 61000-4-2 διακρίνονται σε εκφορτίσεις επαφής και αέρος. Επιπλέον, οι εκφορτίσεις επαφής κατηγοριοποιούνται σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες συνήθως εφαρμόζονται σε αγωγίμες επιφάνειες της υπό εξέταση συσκευής, ενώ οι έμμεσες εφαρμόζονται σε επίπεδα σύζευξης, που γειτνιάζουν με την υπό εξέταση συσκευή. Από την άλλη, οι εκφορτίσεις αέρος χρησιμοποιούνται όπου η εκφόρτιση επαφής δεν μπορεί να εφαρμοστεί και κυρίως σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει εκτεθειμένο αγωγίμο μέρος της συσκευής. Ωστόσο, η περίπτωση της εκφόρτισης αέρος είναι λιγότερο αναπαραγώγιμη σε σχέση με την εκφόρτιση επαφής και ως εκ τούτου λιγότερο χρησιμοποιούμενη [15], [16].

Τα προτεινόμενα επίπεδα τάσης για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δίνονται στον Πίνακα 1.5. Οι τάσεις για κάθε είδος εκφόρτισης είναι διαφορετικές, χωρίς αυτό

να σημαίνει ότι η σοβαρότητα της δοκιμής είναι ισοδύναμη μεταξύ των μεθόδων. Για τις εκφορτίσεις αέρος, πρέπει να πραγματοποιούνται δοκιμές με όλα τα επίπεδα τάσης που αναγράφονται στον Πίνακα 1.5, ενώ για τις εκφορτίσεις επαφής πρέπει να πραγματοποιείται δοκιμή μόνο για το καθορισμένο επίπεδο τάσης, εκτός αν προβλέπεται κάτι διαφορετικό από τις επιτροπές προϊόντος.

Πίνακας 1.5: Επίπεδα τάσεων δοκιμών [15]

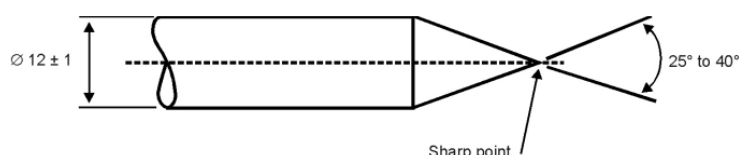
Επίπεδο	Τάση δοκιμής [kV]	
	Εκφόρτιση επαφής	Εκφόρτιση αέρος
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
x*	ειδικό	ειδικό
* Το επίπεδο «x» μπορεί να είναι οποιοδήποτε επίπεδο, μεγαλύτερο, μικρότερο ή ανάμεσα στα παραπάνω επίπεδα. Το επίπεδο τάσης θα πρέπει να καθορίζεται στις προδιαγραφές του εξοπλισμού. Εάν το επίπεδο τάσης είναι μεγαλύτερο από τις αναφερόμενες, ενδεχομένως να χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός για τη δοκιμή.		

1.3.1.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά της ηλεκτροστατικής γεννήτριας

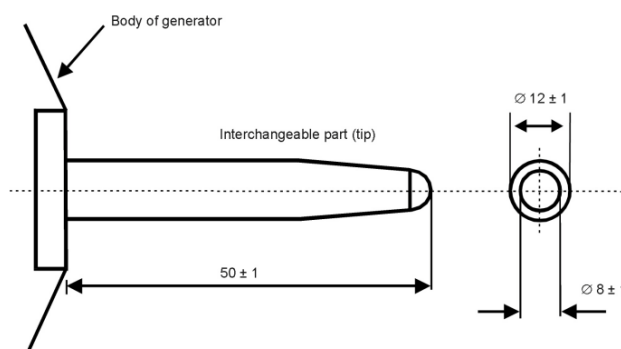
Η ηλεκτροστατική γεννήτρια βασίζεται στο μοντέλο ανθρωπίνου σώματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και αποτελείται από μία γεννήτρια υψηλής τάσης, ένα ηλεκτρόδιο εκφόρτισης και μία μονάδα ελέγχου. Η γεννήτρια υψηλής τάσης παράγει έναν παλμό υψηλής τάσης, ο οποίος εκφορτίζεται μέσω του ηλεκτροδίου στην υπό εξέταση συσκευή (Device Under Test, DUT). Η μονάδα ελέγχου επιτρέπει στο χρήστη να προσαρμόζει το επίπεδο τάσης, την πολικότητα της εκφόρτισης και τη διάρκεια του παλμού, προκειμένου να προσομοιώνονται διαφορετικά και ποικίλα συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.2.3 (HBM, MM, CDM).

Όταν ο παλμός υψηλής τάσης εκφορτίζεται μέσω του ηλεκτροδίου, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την υπό εξέταση συσκευή, το οποίο οδηγεί στη συσσώρευση φορτίου στην επιφάνεια της υπό εξέτασης συσκευής, προσομοιώνοντας έτσι το συμβάν ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η ποσότητα του φορτίου που συσσωρεύεται στη συσκευή εξαρτάται από το επίπεδο τάσης, την πολικότητα της εκφόρτισης και τη διάρκεια του παλμού [17].

Τα ηλεκτρόδια εκφόρτισης, γνωστά και ως ακίδες εκφόρτισης ή μύτες του πιστολιού, μπορεί να είναι είτε μυτερά (Σχήμα 1.5) είναι στρογγυλεμένα (Σχήμα 1.6), αναπαράγοντας δύο διαφορετικά είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην πρώτη περίπτωση της μυτερής μύτες, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι εκφόρτισης επαφής, ενώ στη δεύτερη περίπτωση της στρογγυλής μύτες, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι εκφόρτιση [15], [16].



Σχήμα 1.5: Μυτερή ακίδα για εκφορτίσεις επαφής [15]



Σχήμα 1.6: Στρογγυλεμένη ακίδα για εκφορτίσεις αέρος [15]

Ειδικότερα, με βάση το πρότυπο IEC 61000-4-2, για την εκφόρτιση επαφής, η γεννήτρια αναπαράγει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά, η ακίδα εκφόρτισης της γεννήτριας έρχεται σε επαφή με την γειωμένη (στις περισσότερες περιπτώσεις) συσκευή υπό εξέταση. Πριν από την εκφόρτιση, φορτίζεται ένας πυκνωτής μέσα στη γεννήτρια, του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο συνήθως περιορίζεται στο εσωτερικό της, με αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο της εκφόρτισης λίγο πριν την εκφόρτιση να είναι λιγότερο σε σχέση με το αντίστοιχο που θα δημιουργούνταν στην περίπτωση ενός φορτισμένου ανθρώπου στην ίδια τάση. Στη συνέχεια, η διαδικασία της εκφόρτισης εκκινεί με το κλείσιμο ενός διακόπτη, ωστόσο επειδή ο διακόπτης είναι εσωτερικός και όχι στο σημείο που η γεννήτρια ακουμπάει τη συσκευή, η έναρξη της ροής του ρεύματος εκφόρτισης είναι διαφορετική από την αντίστοιχη της ανθρώπινης εκφόρτισης στο σημείο αυτό.

Οι χρόνοι κατάρρευσης της τάσης μέσα στο διακόπτη είναι πολύ μικροί (της τάξης των 100ps και λιγότερο), οδηγώντας σε ένα κύμα ρεύματος απομακρυνόμενο από το

διακόπτη προς όλες τις κατευθύνσεις και σε όλα τα μεταλλικά μέρη που έρχονται σε επαφή και μη. Το ρεύμα διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός (σε διηλεκτρικά με μειωμένη ταχύτητα) και ο χρόνος ανόδου του ισούται με τον χρόνο κατάρρευσης της τάσης. Ωστόσο, το πρότυπο απαιτεί στο σημείο επαφής χρόνο ανόδου ρεύματος $0,8 \pm 0,2)ns$. Για να επιτευχθεί αυτό, σχεδιάζονται μέτρα στις γεννήτριες που αυξάνουν τον χρόνο από την πολύ χαμηλή τιμή εντός του διακόπτη στις τυποποιημένες τιμές στην ακίδα εκφόρτισης.

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγεται από την γεννήτρια και εκείνης που παράγεται από τον άνθρωπο με ένα μεταλλικό αντικείμενο είναι ο χρόνος ανόδου του ρεύματος. Για μία ανθρώπινη εκφόρτιση ο χρόνος ανόδου του ρεύματος στο τόξο είναι η ταχύτερη διαδικασία και καθορίζει το φάσμα των μεταβατικών πεδίων. Αντίθετα, σε μία γεννήτρια που αναπαράγει εκφορτίσεις επαφής, το φάσμα υψηλής συχνότητας καθορίζεται από την κατάρρευσης της τάσης του διακόπτη και όχι από τον χρόνο ανόδου του ρεύματος στην ακίδα εκφόρτισης. Επισημαίνεται ότι τα μεταβατικά πεδία που προκαλούνται από τα ταχύτερα συμβάντα στη γεννήτρια είναι γενικά ανεπιθύμητα, καθώς αυξάνουν το περιεχόμενο στις υψηλές συχνότητες, διαφοροποιώντας το από το αντίστοιχο μιας ανθρώπινης εκφόρτισης.

Από τα παραπάνω φαίνεται πως η συμβολή των ταχέως αυξανόμενων ρευμάτων στα μεταβατικά πεδία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Η συνεισφορά αυτή μπορεί άλλοτε να καταστέλλεται και άλλοτε να κυριαρχεί σε οποιαδήποτε δεδομένη γεννήτρια. Δυστυχώς, αυτές οι συνεισφορές δεν ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2, με αποτέλεσμα τα συμβάντα ανατροπής κατά τη διάρκεια της δοκιμής να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη χρησιμοποιούμενη γεννήτρια, όπως θα φανεί και στην πορεία αυτής της διπλωματικής εργασίας. [15] Οι γενικές προδιαγραφές της γεννήτριας ESD καθορίζονται από το πρότυπο και δίνονται στον Πίνακα 1.6.

1.3.1.3 Κυκλωματικό μοντέλο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

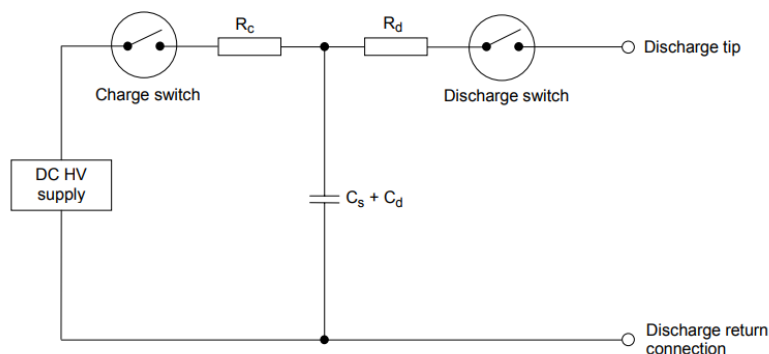
Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 βασίζεται στο μοντέλου ανθρώπινου σώματος και τα κύρια μέρη της είναι:

Πίνακας 1.6: Γενικές προδιαγραφές γεννήτριας ESD [15]

Παράμετροι	Τιμές
Τάση εξόδου, μέθοδος εκφόρτισης με επαφή [βλ. Σημείωση 1]	Τουλάχιστον 1kV έως 8kV, ονομαστική
Τάση εξόδου, μέθοδος εκφόρτισης μέσω αέρα [βλ. Σημείωση 1]	Τουλάχιστον 2kV έως 15kV, ονομαστική [βλ. Σημείωση 3]
Ακρίβεια τάσης εξόδου	$\pm 5\%$
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική και αρνητική
Χρόνος κρατήματος	$\geq 5\text{ s}$
Τρόπος λειτουργίας εκφόρτισης	Απλές εκφορτίσεις [βλ. Σημείωση 2]
Σημείωση 1: Τάση ανοιχτού κυκλώματος μετρημένη στο ηλεκτρόδιο φόρτισης της γεννήτριας ESD Σημείωση 2: Η γεννήτρια θα πρέπει να μπορεί να παράγει με ρυθμό επανάληψης τουλάχιστον 20 εκφορτίσεις ανά δευτερόλεπτο για διερευνητικούς λόγους. Σημείωση 3: Δεν είναι απαραίτητη η χρήση γεννήτριας με ικανότητα εκφόρτισης μέσω αέρα 15kV εάν η μέγιστη τάση δοκιμής είναι μικρότερη.	

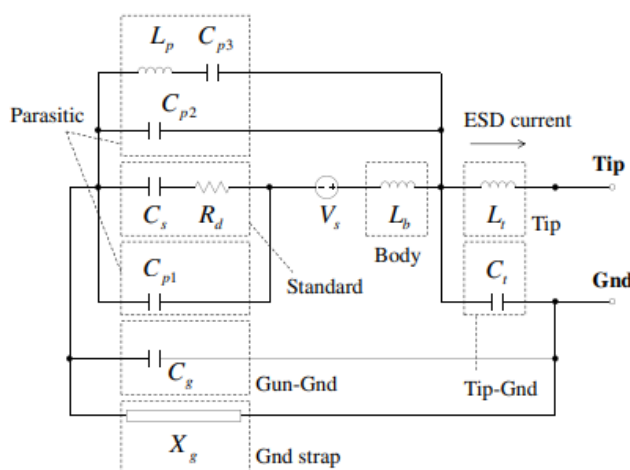
- αντίσταση φόρτισης R_c
- πυκνωτής αποθήκευσης ενέργειας C_s
- κατανεμημένη χωρητικότητα C_d (μεταξύ της γεννήτριας και του περιβάλλοντός της)
- αντίσταση εκφόρτισης R_d
- δείκτη τάσης
- διακόπτη εκφόρτισης
- διακόπτη φόρτισης
- εναλλάξιμες ακίδες εκφόρτισης
- καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης
- τροφοδοτικό

Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της γεννήτριας.



Σχήμα 1.7: Αποπλοποιημένο διάγραμμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-4 [15]

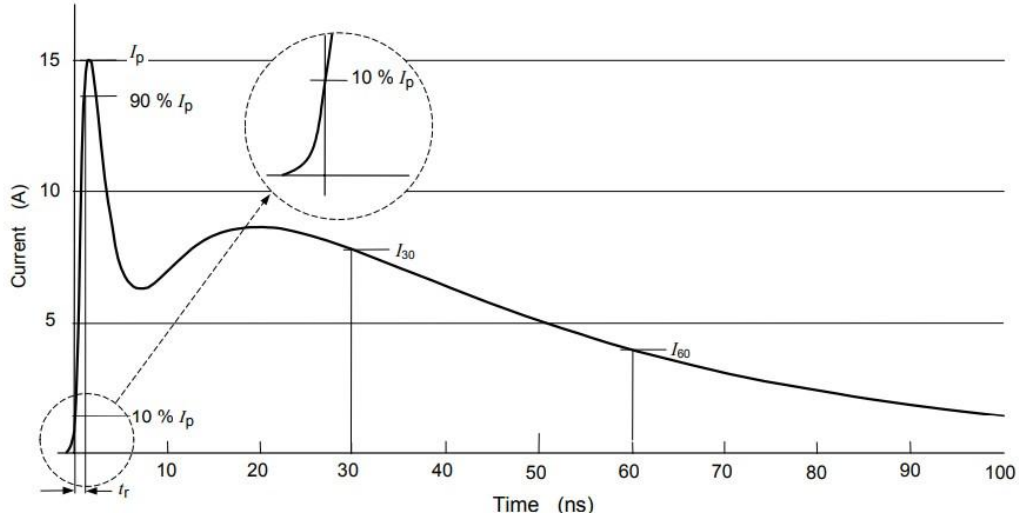
Στο Πρότυπο αναφέρονται ως κατάλληλες τιμές τα 330Ω για την αντίσταση εκφόρτισης R_d , η οποία αντιπροσωπεύει την αντίσταση του ανθρώπου κατά μέσο όρο και τα 150pF για το άθροισμα των δύο πυκνωτών C_s+C_d , τιμή επίσης αντιπροσωπευτική για το ανθρώπινο σώμα. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές το κυκλωματικό μοντέλο της γεννήτριας ESD και έχει επεκταθεί με επιπλέον στοιχεία, όπως χωρητικότητες που αφορούν στα παρασιτικά στοιχεία γύρω από το σώμα της γεννήτριας, την ακίδα εκφόρτισης και τη γείωση, την ίδια τη γεννήτρια με τη γείωση, ενώ επίσης έχουν προστεθεί και στοιχεία αυτεπαγωγής που προσομοιώνουν τα παρασιτικά στοιχεία της γεννήτριας και το καλώδιο επιστροφής, το οποίο από πολλούς μελετητές θεωρείται ότι μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία γραμμή μετάδοσης. Ένα τέτοιο κυκλωματικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8 [18].



Σχήμα 1.8: Κυκλωματικό διάγραμμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με τις τελευταίες μελέτες [18]

1.3.2 Η κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση το πρότυπο IEC 61000-4-2Ed 2.0

Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης $I(t)$ στα 4kV .



Σχήμα 1.9: Ιδανική κυματομορφή ρεύματος στα 4kV σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2 Ed 2.0 [15]

Το ρεύμα εκφόρτισης $I(t)$ της παραπάνω κυματομορφής μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο του ρεύματος (peak) I_p , που ονομάζεται «αρχική κορυφή», είναι πολύ γρήγορο, έχει υψηλή τιμή ρεύματος και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού και το δεύτερο peak που έχει αρκετά χαμηλότερη τιμή, διαχέεται με πιο αργό ρυθμό και προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος [19].

Μελέτες πολλών ερευνητών υποδεικνύουν ότι το πρώτο peak προέρχεται από την εκφόρτιση του ρεύματος από τη μύτη του πιστολιού, ενώ κατά το δεύτερο peak το ρεύμα ρέει από το καλώδιο επιστροφής. Μάλιστα, ενώ οι περισσότερες γεννήτριες επιτυγχάνουν ένα αρκετά παρόμοιο πρώτο peak, διαφοροποιούνται κατά πολύ ως προς τη μορφή και τις τιμές της κυματομορφής μετά το πρώτο peak, γεγονός που αποδίδεται στο καλώδιο επιστροφής (ή καλώδιο γείωσης), το οποίο ανάλογα με την τοποθέτησή του εισάγει ταλαντώσεις [20].

Η εξίσωση για την ιδανική κυματομορφή $I(t)$ του Σχήματος 1.9, είναι η εξής:

$$I(t) = \frac{I_1}{k_1} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \frac{I_2}{k_2} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_4}\right) \quad [1.1]$$

όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right), \quad k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{\frac{1}{n}}\right)$$

και

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

$$I_1 = 16,6A \text{ (στα } 4kV), I_2 = 9,3A \text{ (στα } 4kV)$$

$$n=1,8$$

Τα βασικά σημεία της κυματομορφής, που είναι σημειωμένα και στο Σχήμα 1.9 και που πρέπει να ελέγχονται κατά την επαλήθευση της γεννήτριας με βάση το Πρότυπο είναι:

- Μέγιστο ρεύμα I_{max} : η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή).
- Χρόνος ανόδου t_r : ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής είναι μεταξύ 0,7ns και 1ns.
- Ρεύμα στα 30ns I_{30} : Η τιμή του ρεύματος 30ns μετά τη χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.
- Ρεύμα στα 60ns I_{60} : Η τιμή του ρεύματος 60ns μετά τη χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Οι παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης θα πρέπει να φέρουν συγκεκριμένες τιμές, προκειμένου η γεννήτρια να συμμορφώνεται με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.7 [15].

Πίνακας 1.7: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]

Επίπεδο	Ένδειξη Τάσης [kV]	Ρεύμα 1 ^{ης} κορυφής (±15 %) [A]	Χρόνος ανόδου t_r (±25 %) [ns]	Ρεύμα (±30 %) στα 30ns [A]	Ρεύμα (±30 %) στα 60ns [A]
1	2	7,5	0,8	4	2
2	4	15	0,8	8	4
3	6	22,5	0,8	12	6
4	8	30	0,8	16	8
Παρατηρήσεις: 1. Το ρεύμα 1 ^{ης} κορυφής I_p είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης. 2. Ο χρόνος ανόδου t_r είναι ο χρόνος μεταξύ του 10% και 90% της 1 ^{ης} κορυφής του ρεύματος. 3. Το ρεύμα στα 30ns I_{30} είναι η τιμή του ρεύματος 30ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα φτάνει για πρώτη φορά το 10% της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης. 4. Το ρεύμα στα 60ns I_{60} είναι η τιμή του ρεύματος 60ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα φτάνει για πρώτη φορά το 10% της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.					

1.3.3 Διάταξη και διαδικασία διακρίβωσης γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0

Κατά την αξιολόγηση μίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι σημαντικό να υπάρχει συγκρίσιμο αποτέλεσμα διακρίβωσης, ειδικά όταν πρόκειται να διεξαχθούν δοκιμές με χρήση γεννητριών ESD διαφορετικών κατασκευαστών ή όταν οι δοκιμές αναμένεται να διαρκέσουν μεγάλο χρονικό διάστημα. Είναι λοιπόν, σημαντικό να υπάρχει επαναληψιμότητα στη διαδικασία των δοκιμών. Για το λόγο αυτό, η γεννήτρια ESD θα πρέπει να διακρίβώνεται σε συγκεκριμένα καθορισμένα χρονικά διαστήματα.

Η διακρίβωση της γεννήτριας θα πρέπει να πραγματοποιείται υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία: 15-35° C, σχετική υγρασία: 30-60% , ατμοσφαιρική πίεση: 860-1060mbar) και θα πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που τροφοδοτείται κατά τη διαδικασία της δοκιμής.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη διακρίβωση μίας γεννήτριας ESD σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 είναι ο ακόλουθος:

- Παλμογράφος με επαρκές εύρος ζώνης ($\geq 2\text{GHz}$ αναλογικό εύρος ζώνης)
- Ομοαξονική αλυσίδα στόχου ρεύματος – εξασθενητή – καλωδίου
- Μετρητής υψηλής τάσης, ικανός να μετράει τουλάχιστον 15kV. Μπορεί να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα ηλεκτροστατικό βολτόμετρο για να αποφευχθεί η φόρτωση της τάσης εξόδου.
- Κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης με τον ομοαξονικό στόχο ρεύματος, τοποθετημένο έτσι ώστε να απέχει τουλάχιστον 0,6m από τον στόχο έως οποιοδήποτε άκρο του επιπέδου.
- Εξασθενητή/ ές με επαρκή ικανότητα ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες.

Για την τυπική διάταξη διακρίβωσης μιας γεννήτριας ESD θα πρέπει να γίνουν τα εξής:

- Ο στόχος ρεύματος τοποθετείται στο κέντρο του κατακόρυφου επιπέδου διακρίβωσης.
- Η σύνδεση του καλωδίου ρεύματος επιστροφής της γεννήτριας ESD (ιμάντας γείωσης) πρέπει να γίνεται στο κάτω κέντρο του επιπέδου διακρίβωσης 0,5m κάτω από τον στόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10.

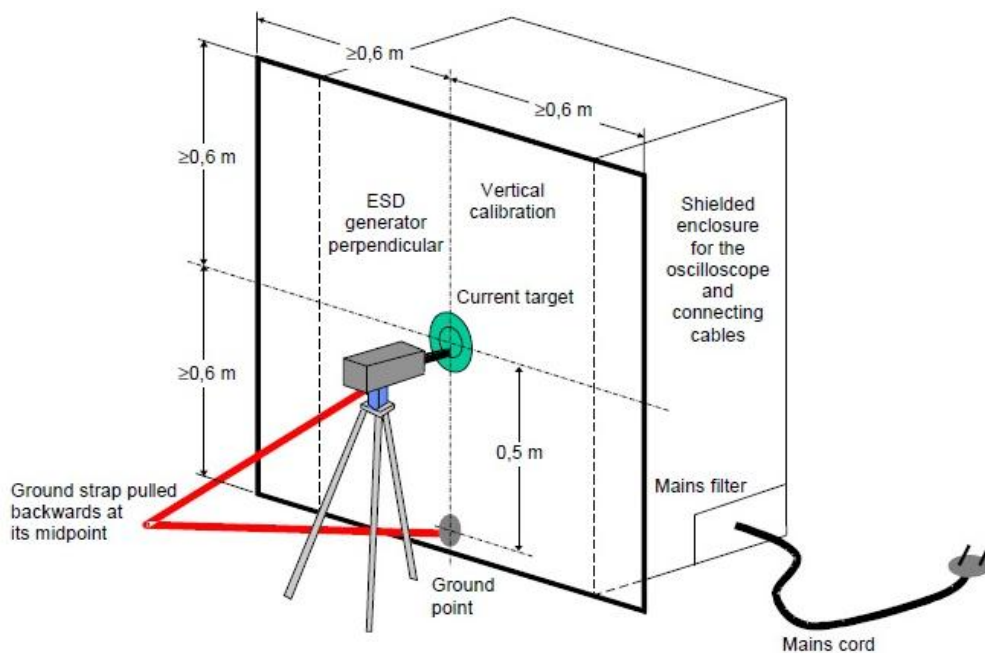
- Ο ιμάντας γείωσης πρέπει να τραβιέται προς τα πίσω στη μέση του καλωδίου, σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο. Ο ιμάντας γείωσης δεν επιτρέπεται να ακουμπά στο πάτωμα κατά τη διακρίβωση.
- Η γεννήτρια πρέπει να εγκατασταθεί σε τρίποδο ή ισοδύναμο μη μεταλλικό στήριγμα χαμηλών απωλειών.
- Η γεννήτρια ESD θα πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Μία τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD φαίνεται στο Σχήμα 1.10.

Ο θωράκιση του παλμογράφου δεν είναι απαραίτητη αν μπορεί να αποδειχθεί με μέτρηση ότι έμμεσες διαδρομές σύζευξης στο σύστημα μέτρησης δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα διακρίβωσης.

Το σύστημα διακρίβωσης μπορεί να χαρακτηριστεί επαρκώς άνοσο (δηλαδή ότι δεν απαιτείται κλωβός Faraday) εάν δεν προκύψει ενεργοποίηση του παλμογράφου όταν:

- Το επίπεδο του παλμογράφου έχει ρυθμιστεί στο $\leq 10\%$ του χαμηλότερου επιπέδου δοκιμής, και
- Η γεννήτρια ESD εκφορτίζεται με το υψηλότερο επίπεδο δοκιμής στον εξωτερικό δακτύλιο του στόχου (αντί στον εσωτερικό δακτύλιο)



Σχήμα 1.10: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]

Προκειμένου να επαληθευτεί εάν η τρέχουσα κυματομορφή μιας γεννήτριας ESD είναι εντός προδιαγραφών, ελέγχονται οι τέσσερις βασικές παράμετροι: το μέγιστο ρεύμα I_p , ο χρόνος ανόδου t_r , η τιμή του ρεύματος στα 30ns I_{30} και η τιμή του ρεύματος στα 60ns I_{60} . Η διαδικασία και τα όρια των τιμών των παραμέτρων για εκφορτίσεις επαφής δίνονται στον Πίνακα 1.8.

1.3.4 Διάταξη δοκιμών με χρήση γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής και για δοκιμές που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0

Η διάταξη δοκιμής αποτελείται από τη γεννήτρια δοκιμής, την υπό εξέταση συσκευή και τα βοηθητικά όργανα που είναι απαραίτητα για την άμεση και έμμεση εφαρμογή των εκκενώσεων στη συσκευή με τον ακόλουθο τρόπο:

Πίνακας 1.8: Διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]

Βήμα	Εξήγηση
Εκφόρτιση της γεννήτριας ESD σε κάθε επίπεδο τάσης δοκιμής, όπως ορίζεται στον Πίνακα 1.7, πέντε φορές για τις δύο πολικότητες και αποθήκευση του κάθε αποτελέσματος.	Οι προδιαγραφές πρέπει να πληρούνται και για τις 5 εκφορτίσεις.
Μέτρηση των I_p , I_{30} , I_{60} , t_r	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής
Ρεύμα στα 30ns Έλεγχος αν το I_{30} είναι $2A \pm 30\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής*
Ρεύμα στα 60ns Έλεγχος αν το I_{60} είναι $1A \pm 30\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής*
Μέγιστο ρεύμα Έλεγχος αν το I_p είναι $3,75A \pm 15\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής*
Χρόνος ανόδου t_r Έλεγχος αν το t_r είναι $0,8ns \pm 25\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής
* Η τιμή του ρεύματος που δίνεται σε αυτόν τον πίνακα αντιστοιχεί σε τάση 1 kV. Αυτή η μετρούμενη τιμή αλλάζει αναλογικά με την τάση της γεννήτριας.	

α) εκκένωση επαφής στις αγωγίμες επιφάνειες και στα επίπεδα ζεύξης.

β) εκκένωση αέρα σε μη αγωγίμες επιφάνειες. Το EUT πρέπει να ρυθμίζεται και να λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προϊόντος.

Η διάταξη δοκιμής περιλαμβάνει:

- τη γεννήτρια ESD
- το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης
- αντίσταση εκφόρτισης (bleeder resistor) 470kΩ
- επίπεδο αναφοράς εδάφους (Reference Ground Plane, RGP)
- όλες τις συνδέσεις που σχηματίζουν τη διαδρομή εκφόρτισης

Παραδείγματα διατάξεων δοκιμών ESD δίνονται στα Σχήματα 1.11 και 1.12, όπου παρουσιάζονται δοκιμές σε επιτραπέζιο και επιδαπέδιο εξοπλισμό αντίστοιχα.

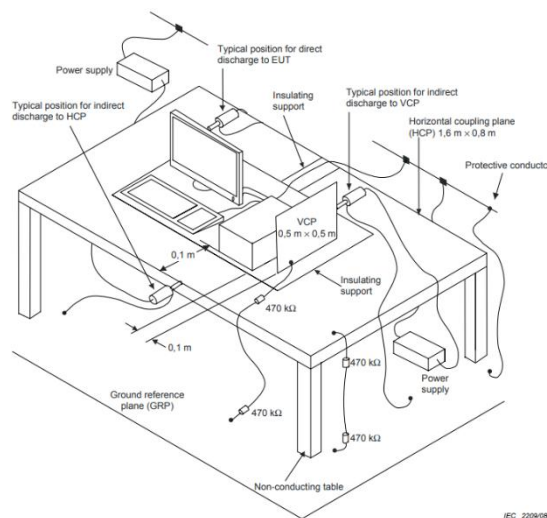
Για την επαλήθευση της σωστής διάταξης της δοκιμής, μία μέθοδος επαλήθευσης μπορεί να είναι η παρατήρηση ότι σε χαμηλή τιμή τάσης, δημιουργείται ένας μικρός σπινθήρας κατά την εκκένωση αέρος στο επίπεδο ζεύξης, ενώ ένας μεγαλύτερος σπινθήρας δημιουργείται σε υψηλότερες τιμές τάσης. Είναι απαραίτητο να επαληθευθεί η σύνδεση και η θέση του ιμάντα γείωσης πριν από την παραπάνω επαλήθευση.

Η λογική πίσω από την παραπάνω επαλήθευση είναι: Δεδομένου ότι οι κυματομορφές από γεννήτριες ESD συνήθως δεν αλλάζουν με λεπτούς τρόπους (για παράδειγμα, ο χρόνος ανόδου και η διάρκεια της κυματομορφής δεν μετατοπίζονται), οι πιο πιθανές αστοχίες της γεννήτριας ESD θα ήταν ότι δεν παραδόθηκε τάση στο ηλεκτρόδιο εκκένωσης ή ότι δεν υπήρχε έλεγχος τάσης. Οποιοδήποτε από τα καλώδια, αντιστάσεις ή συνδέσεις κατά μήκος της διαδρομής εκφόρτισης μπορεί να είναι κατεστραμμένο, χαλαρό ή να λείπει, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει εκκένωση.

Συνιστάται να επαληθεύεται η διάταξη της δοκιμής ESD πριν από τη δοκιμή.

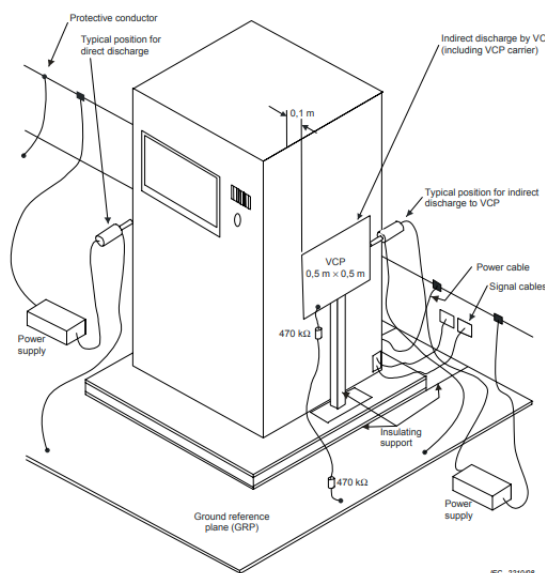
Η διάταξη δοκιμής περιλαμβάνει τη δοκιμαστική γεννήτρια ESD, τον υπό εξέταση εξοπλισμό (EUT) και τα απαιτούμενα βοηθητικά όργανα για την εφαρμογή άμεσης (εκκένωση επαφής σε αγωγίμες επιφάνειες και επίπεδα ζεύξης) και έμμεσης (εκκένωση αέρα σε μονωτικές επιφάνειες) ESD.

Διακρίνονται δύο τύποι δοκιμών: οι δοκιμές τύπου που διεξάγονται σε εργαστηριακές συνθήκες και οι δοκιμές μετά την εγκατάσταση στον τελικό χώρο λειτουργίας του εξοπλισμού.



Σχήμα 1.11: Διάταξη δοκιμών επιτραπέζιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]

Οι εργαστηριακές δοκιμές τύπου είναι η προτιμώμενη μέθοδος, ενώ η διάταξη του εξοπλισμού ακολουθεί τις οδηγίες εγκατάστασης του κατασκευαστή. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες για τις δοκιμές περιλαμβάνουν θερμοκρασία 15–35°C, σχετική υγρασία 30–60% και ατμοσφαιρική πίεση 860–1060 mbar.



Σχήμα 1.12: Διάταξη δοκιμών επιδαπέδιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [15]

Το δάπεδο του εργαστηρίου πρέπει να διαθέτει επίπεδο αναφοράς γείωσης (GRP), κατασκευασμένο από μεταλλικό φύλλο (χαλκό ή αλουμίνιο), με συγκεκριμένα ελάχιστα πάχη. Το GRP πρέπει να εκτείνεται τουλάχιστον 0,5 m πέρα από τον

εξοπλισμό και να συνδέεται με το σύστημα γείωσης. Εξασφαλίζεται απόσταση τουλάχιστον 0,8 m από τοίχους ή μεταλλικές δομές. Όλες οι γειώσεις πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές και να αποφεύγονται πρόσθετες συνδέσεις.

Το καλώδιο επιστροφής της εκφόρτισης πρέπει να συνδέεται στο GRP και να τοποθετείται κατά τρόπο που μειώνει την επαγωγή. Εναλλακτικά, μπορεί να συνδεθεί σε μεταλλικό τοίχωμα του εργαστηρίου, εφόσον αυτό είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με το GRP. Επίσης, οι αντιστάσεις εξαέρωσης 470 kΩ που τοποθετούνται στα καλώδια γείωσης των επιπέδων HCP και VCP επιβραδύνουν τη διαρροή φορτίου, ενισχύοντας τον αντίκτυπο της εκφόρτισης στον εξοπλισμό.

Για επιτραπέζιο εξοπλισμό, προβλέπεται μη αγωγίμο τραπέζι με οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (HCP) και κατάλληλη μονωτική στήριξη του EUT, εξασφαλίζοντας ρεαλιστική προσομοίωση και επαναληψιμότητα της δοκιμής.

Για επιτραπέζιο εξοπλισμό, η δοκιμή πραγματοποιείται σε μη αγωγίμο τραπέζι ύψους 0,8 m, πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (HCP). Ο εξοπλισμός και τα καλώδιά του πρέπει να απομονώνονται από το HCP με λεπτό μονωτικό υλικό. Αν ο εξοπλισμός είναι πολύ μεγάλος για να διατηρηθεί απόσταση 0,1 m από όλες τις πλευρές του HCP, χρησιμοποιείται δεύτερο, πανομοιότυπο HCP σε απόσταση 0,3 m. Οι δύο HCP δεν συνδέονται άμεσα, παρά μόνο μέσω καλωδίων με αντίσταση προς το επίπεδο αναφοράς γείωσης (GRP). Τα πόδια στήριξης του εξοπλισμού παραμένουν στη θέση τους [15].

Κεφάλαιο 2: Προβληματισμοί και αναδυόμενες προκλήσεις στο κομμάτι του ESD

2.1 Εισαγωγή

Από το 2008 μέχρι και τον Μάρτιο του 2025, το βασικό Πρότυπο για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ήταν το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0. Ωστόσο, πρόσφατα το Πρότυπο αναθεωρήθηκε με την τρίτη έκδοσή του να έχει μόλις κυκλοφορήσει το 2025, έχοντας σημαντικές αλλαγές, αφού έμφαση δίνεται στο μέγιστο ρεύμα μεταξύ 10ns - 40ns, ανανεώνοντας την εστίαση στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών ESD. Ακόμα, μελέτες στο χρονικό διάστημα της αναθεώρησης επισημαίνουν ανησυχίες σχετικά με την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών IEC 61000-4-2 ειδικά σχετικά με τη δεύτερη κορυφή της τρέχουσας κυματομορφής IEC ESD.

Πολλοί μελετητές εντοπίζοντας τα παραπάνω, προχώρησαν στην προσπάθεια αντιμετώπισής τους, σχεδιάζοντας αυτοματοποιημένες δοκιμές ESD, αξιοποιώντας ακόμα και τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Άλλοι μελετητές προσπάθησαν να τροποποιήσουν την κυματομορφή ESD ικανοποιώντας τις νέες απαιτήσεις για το δεύτερο μέγιστο και καταστέλλοντας το φαινόμενο του ringing ε τη χρήση φερριτών γύρω από το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ESD [21].

2.2 Νέα έκδοση του Προτύπου – IEC 61000-4-2 Ed 3

Τον Μάρτιο του 2023 προτάθηκε από την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) μια νεότερη αναθεώρηση την δεύτερης έκδοσης του τέταρτου μέρους του Προτύπου IEC 61000, το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0, το οποίο αντικαθιστά το IEC 61000-4-2 Ed 2.0. Η τρίτη έκδοση του προτύπου IEC 61000-4-2, που δημοσιεύθηκε το 2025, εισάγει σημαντικές αλλαγές στις διαδικασίες δοκιμών ατρωσίας σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Οι κύριες τροποποιήσεις περιλαμβάνουν:

1. Εισαγωγή της νέας παραμέτρου I_{p2} στη διακρίβωση
2. Απαίτηση διακρίβωσης για τη μύτη εκφόρτισης που αφορά σε εκφορτίσεις αέρος
3. Αλλαγές στη διάταξη διακρίβωσης

4. Αλλαγές στα παραρτήματα

Ειδικότερα, η νέα παράμετρος I_{p2} στη διακρίβωση της γεννήτριας, αναπαριστά το δεύτερο μέγιστο της κυματομορφής εκφόρτισης κατά το χρονικό διάστημα 10ns – 40ns, αφού η τιμή του ρεύματος φτάσει το 10% του πρώτου μεγίστου. Η προσθήκη αυτής της παραμέτρου στοχεύει στη βελτίωση της συνέπειας και της ακρίβειας των δοκιμών με γεννήτριες ESD. Η Επιτροπή υπογραμμίζει ότι προηγούμενες δοκιμές έχουν δείξει ότι το φαινόμενο των ταλαντώσεων (ringing), ένα φαινόμενο που εμφανίζεται ακανόνιστα σε πολλές γεννήτριες ESD στην αγορά, έχει σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα διακρίβωσης, ιδιαίτερα εντός του χρονικού παραθύρου 10 ns έως 40 ns. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η μέτρηση στοχεύει να διασφαλίσει ότι όλες οι γεννήτριες ESD μειώνουν τις ταλαντώσεις στις τιμές που καθορίζονται στη νέα έκδοση του Προτύπου.

Προστίθεται επίσης, η απαίτηση για διακρίβωση με το ηλεκτρόδιο (μύτη) για εκφορτίσεις αέρα, σε αντίθεση με τη δεύτερη έκδοση όπου η διακρίβωση πραγματοποιούνταν μόνο με το ηλεκτρόδιο (μύτη) για εκφορτίσεις επαφής. Με το τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι οι προδιαγραφές της κυματομορφής πληρούνται ακόμα και κατά τις εκφορτίσεις αέρος, ενώ εντοπίζονται και αντιμετωπίζονται απρόβλεπτες συμπεριφορές λόγω διακυμάνσεων στα εξαρτήματα ή τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου για εκφορτίσεις αέρα.

Αλλαγή υφίσταται και η διάταξη διακρίβωσης, αφού τροποποιούνται οι διαστάσεις για το κάθετο επίπεδο ζεύξης (Vertical Coupling Plane), ενώ εισάγεται και το επίπεδο γείωσης αναφοράς (Reference Grounding Plane), προκειμένου να βελτιωθούν η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Οι παραπάνω τροποποιήσεις εξομοιώνουν περισσότερο τη διάταξη διακρίβωσης με τις πραγματικές συνθήκες δοκιμών, περιορίζοντας τις αποκλίσεις που απορρέουν από γεωμετρικές ή λειτουργικές διαφορές και ενισχύοντας τη συνοχή μεταξύ εργαστηρίων.

Αναφορικά με τις αλλαγές των παραρτημάτων, η τροποποίηση του παραρτήματος F παρέχει καθοδήγηση σχετικά με την επιλογή σημείων δοκιμής και τον προσδιορισμό του αριθμού των παλμών που πρέπει να εφαρμόζονται κατά τη δοκιμή ESD. Στόχος είναι η μείωση της υποκειμενικότητας στην επιλογή σημείων δοκιμής και η διασφάλιση εναρμονισμένων διαδικασιών σε όλα τα εργαστήρια δοκιμών. Επιπρόσθετα, ο υπολογισμός των αβεβαιοτήτων μεταφέρεται στο παράρτημα G, όπου προστίθενται και

παραδείγματα υπολογισμού αβεβαιοτήτων, με στόχο τα εργαστήρια να ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα των μετρήσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια, υποστηρίζοντας καλύτερη αναπαραγωγιμότητα αποτελεσμάτων σε διαφορετικές τα παραρτήματα με περισσότερες οδηγίες και διευκρινίσεις σχετικά με ειδικά είδη εξοπλισμού [22].

2.1.1 Επίπεδα τάσεων δοκιμής, λειτουργικά χαρακτηριστικά και κυκλωματικό μοντέλο γεννήτριας ESD σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3

Τα επίπεδα τάσεων δοκιμής στην αναθεωρημένη έκδοση παραμένουν ίδια με όσα παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 1.3.1.1 και στον Πίνακα 1.5. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας δεν διαφοροποιούνται σε σχέση με όσα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.3.1.2. Το κυκλωματικό μοντέλο παραμένει ίδιο χωρίς καμία αλλαγή.

2.1.2 Η κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3

Η κυματομορφή του ρεύματος από άποψη μορφής παραμένει ίδια. Ωστόσο, προστίθεται μία νέα παράμετρος το I_{p2} , που αφορά τη μέγιστη τιμή που αποκτά το ρεύμα κατά το χρονικό διάστημα 10ns – 40ns. Πλέον το ενδιαφέρον μετατοπίζεται στο δεύτερο τοπικό μέγιστο που υπάρχει στο χρονικό αυτό διάστημα, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν στην αρχή της ενότητας 2.1. Ακόμα, η παράμετρος I_{30} δεν εμφανίζεται πλέον στις εξεταζόμενες παραμέτρους κατά τη διακρίβωση μιας γεννήτριας ESD.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης $I(t)$ στα 4kV για την εκφόρτιση με επαφή, ενώ στον Πίνακα 2.1 περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και τα όρια των τιμών που πρέπει να πληροί η κυματομορφή.

2.1.3 Διάταξη και διαδικασία διακρίβωσης γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3

Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας 2.1, με τη νέα έκδοση τροποποιούνται τόσο η διάταξη διακρίβωσης όσο και η διαδικασία αυτής. Συνοπτικά οι αλλαγές είναι:

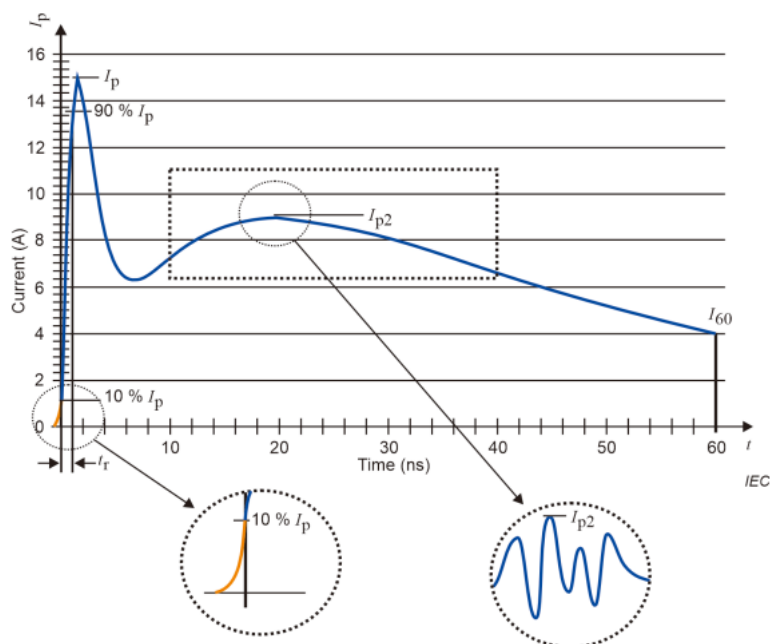
Πίνακας 2.1: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]

Επίπεδο		Ένδειξη Τάσης [kV]	Ρεύμα 1 ^{ης} κορυφής ($\pm 15\%$) [A]	Χρόνος ανόδου t_r ($\pm 25\%$) [ns]	Ρεύμα 2 ^{ης} κορυφής I_{p2} ($\pm 30\%$) [A]	Ρεύμα στα 60ns ($\pm 30\%$) [A]
CD	AD					
1	1	2	7,5	0,8	4,5	2
2	2	4	15	0,8	9	4
3	---	6	22,5	0,8	13,5	6
4	3	8	30	0,8	18	8
---	4	15	56,3	0,8	33,8	15

Το σημείο αναφοράς για τη μέτρηση του χρόνου για το ρεύμα στα 60 ns είναι η στιγμή που το ρεύμα φτάνει για πρώτη φορά το 10 % της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.

1. Ο χρόνος ανόδου, t_r , είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ 10 % και 90 % της τιμής της 1ης κορυφής του ρεύματος.

2. Αυτό είναι το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται στο χρονικό πλαίσιο από 10 έως 40 ns από το σημείο αναφοράς.



Σχήμα 2.1: Ιδανική κυματομορφή ρεύματος στα 4kV σύμφωνα με το Πρότυπο 61000-4-2 Ed 3 [23]

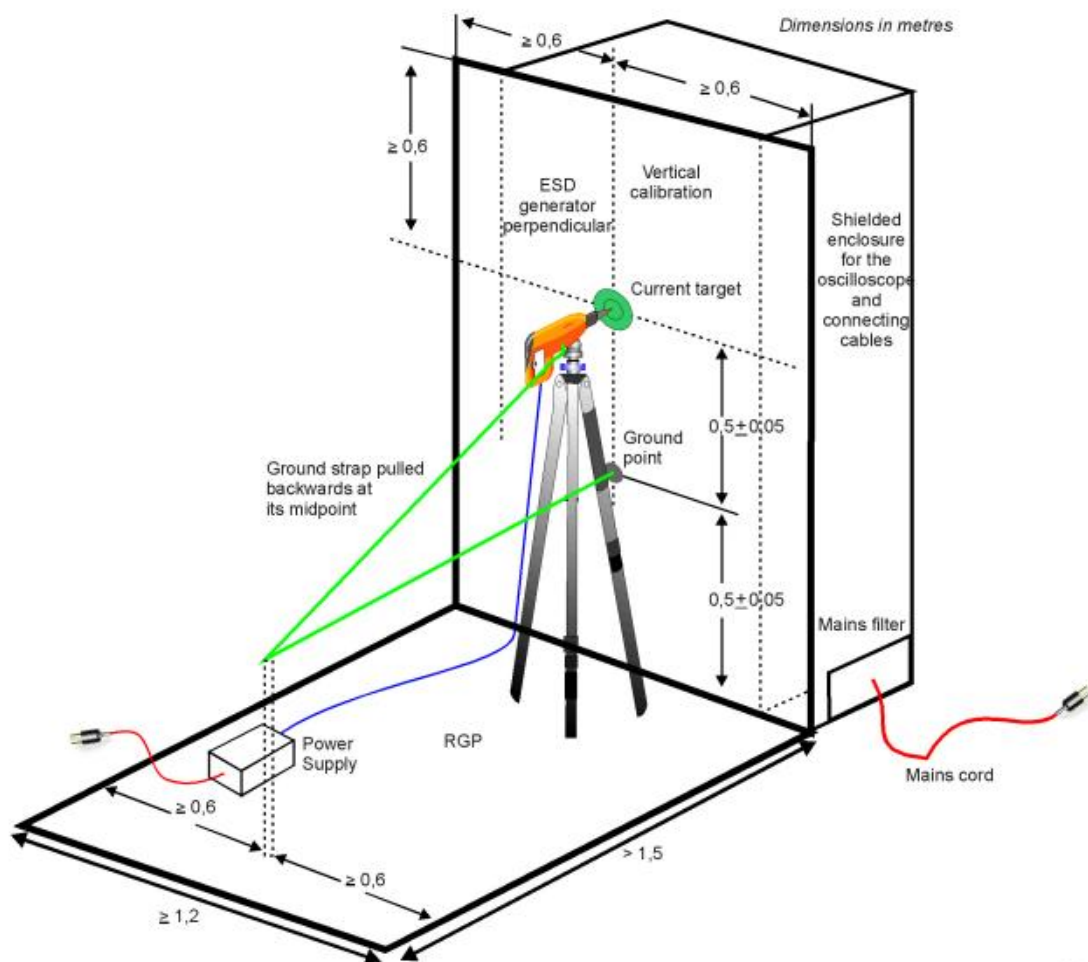
- Υποχρεωτική χρήση επιπέδου αναφοράς (Reference Ground Plane, RGP) κάτω από ολόκληρη τη διάταξη διακρίβωσης εξασφαλίζοντας μια πιο συνεπή διαδρομή επιστροφής και επαναλαμβανόμενη κυματομορφή ρεύματος και

μειώνοντας τη μεταβλητότητα της δοκιμής λόγω ασυνεπούς γεωμετρίας και διάταξης γείωσης.

2. Ενημερωμένες διαστάσεις και τοποθέτηση του κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης (VCP) και σαφέστερες απαιτήσεις σχετικά με τη θέση και την ευθυγράμμιση του αισθητήρα ρεύματος (συνήθως ομοαξονική διακλάδωση), διασφαλίζοντας ότι ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε σταθερή, τυπική απόσταση από το άκρο εκκένωσης, με στόχο τη βελτίωση της επαναληψιμότητας και τη συνέπεια σε εργαστήρια και εξοπλισμό
3. Απαιτήσεις δρομολόγησης (όδευσης) καλωδίων κατά τη διακρίβωση. Σε προηγούμενες εκδόσεις, η δρομολόγηση των καλωδίων κατά τη διακρίβωση δεν ελέγχονταν αυστηρά. Στην νέα έκδοση το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης πρέπει να είναι μη επαγωγικά διατεταγμένο και τυχόν πλεονάζον καλώδιο δεν πρέπει να παρεμβαίνει στο επίπεδο διακρίβωσης. Δεν πρέπει να πλησιάζει άλλα αγωγίμα μέρη πιο κοντά από 0,2 m (η ίδια απαίτηση ισχύει τώρα και για τις ρυθμίσεις διακρίβωσης, όχι μόνο για τις ρυθμίσεις δοκιμής). Σκοπός είναι η αποτροπή των παρεμβολών ή της σύζευξης που θα μπορούσαν να παραμορφώσουν τις κυματομορφές διακρίβωσης.
4. Απαίτηση για διακρίβωση και για εκφορτίσεις αέρος (στρογγυλεμένη μύτη). Προηγουμένως, μόνο η «μύτη» εκφόρτισης επαφής υπόκειται σε διακρίβωση κυματομορφής. Με τη νέα έκδοση εάν το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης αέρος (στρογγυλεμένη μύτη γεννήτριας) περιλαμβάνει ηλεκτρονικά ή παθητικά εξαρτήματα, πρέπει επίσης να διακριβωθεί.
5. Κατά τη διακρίβωση πρέπει επίσης να μετρηθεί και η νέα παράμετρος I_{p2} , όπως αυτή αναλύθηκε στην ενότητα 2.1.2
6. Ισχυρή σύσταση το καλώδιο επιστροφής να μην κρατείται από τον χειριστή.

Μία τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Προκειμένου να επαληθευτεί εάν η τρέχουσα κυματομορφή μιας γεννήτριας ESD είναι εντός προδιαγραφών, ελέγχονται οι τέσσερις βασικές παράμετροι: το μέγιστο ρεύμα I_p , ο χρόνος ανόδου t_r , η μέγιστη τιμή του ρεύματος στο χρονικό διάστημα 10ns - 40ns I_{p2} και η τιμή του ρεύματος στα 60ns I_{60} . Η διαδικασία και τα όρια των τιμών των παραμέτρων για εκφορτίσεις επαφής δίνονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.2: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]

2.1.4 Διάταξη δοκιμών με χρήση γεννήτριας ESD για εκφορτίσεις επαφής και για δοκιμές που πραγματοποιούνται σε εργαστήρια σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 3

Στη διάταξη και τη διαδικασία δοκιμών με χρήση γεννήτριας ESD επανακαθορίζονται ορισμένα σημεία:

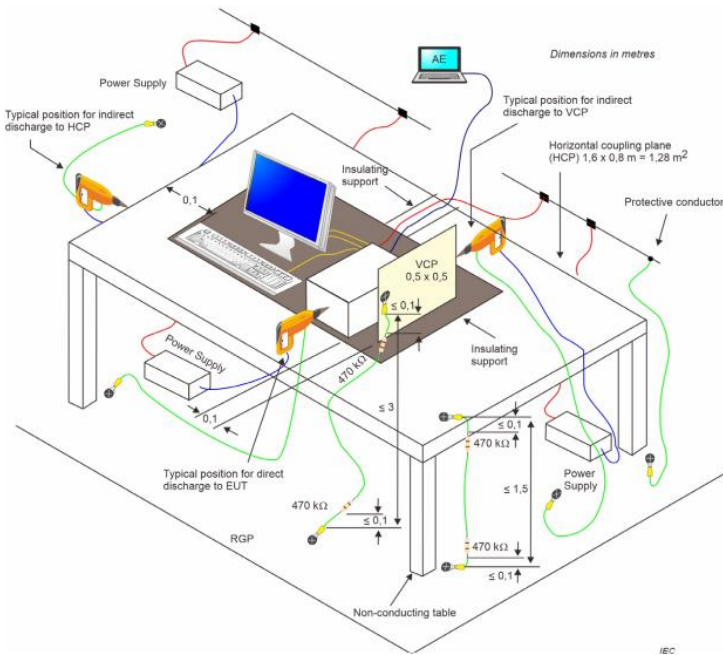
1. Υποχρεωτική χρήση επιπέδου αναφοράς (ground Reference Plane, RGP), το οποίο πρέπει να προεξέχει τουλάχιστον 0,5m από τον υπό εξέταση εξοπλισμό ή το οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (Horizontal Coupling Plane, HCP) προς όλες τις κατευθύνσεις, εξασφαλίζοντας σταθερότερη γείωση και ελαχιστοποιώντας τις διακυμάνσεις της κυματομορφής. Ουσιαστικά πρόκειται για αύξηση του εμβαδού της μεταλλικής επιφάνειας του επιπέδου αναφοράς.

Πίνακας 2.2: Διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]

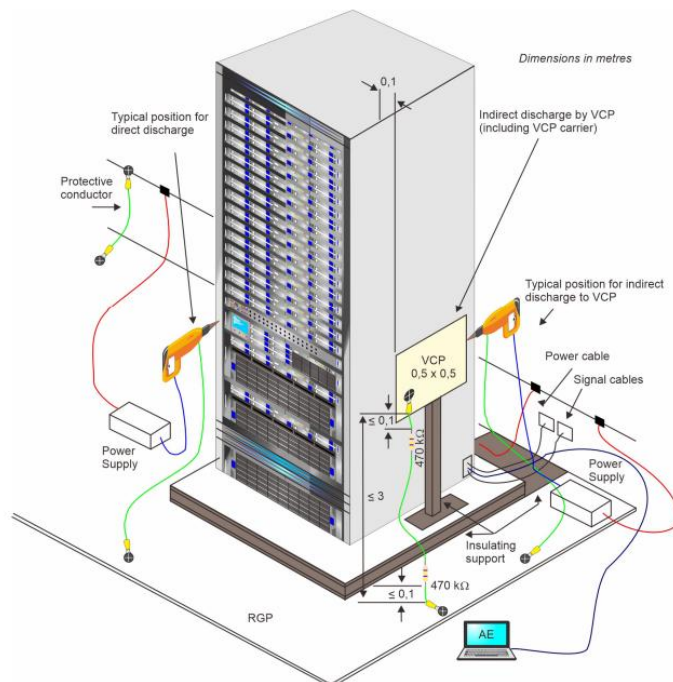
Βήμα	Εξήγηση
Εκφόρτιση της γεννήτριας ESD σε κάθε επίπεδο τάσης δοκιμής, όπως ορίζεται στον Πίνακα 1.7, πέντε φορές για τις δύο πολικότητες και αποθήκευση του κάθε αποτελέσματος.	Οι προδιαγραφές πρέπει να πληρούνται και για τις 5 εκφορτίσεις. ^b
Μέτρηση των I_p , I_{p2} , I_{60} , t_r σε κάθε κυματομορφή	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής
Μέγιστο ρεύμα Έλεγχος αν το I_p είναι $15A \pm 15\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής ^a
Μέγιστο ρεύμα Έλεγχος αν το I_{p2} είναι $9A \pm 30\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής ^a
Ρεύμα στα 60ns Έλεγχος αν το I_{60} είναι $4A \pm 30\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής ^a
Χρόνος ανόδου t_r Έλεγχος αν το t_r είναι $0,8ns \pm 25\%$	Οι παράμετροι ελέγχονται σε κάθε επίπεδο δοκιμής
^a Η τιμή του ρεύματος που δίνεται σε αυτόν τον πίνακα αντιστοιχεί σε τάση 4 kV. Αυτή η μετρούμενη τιμή αλλάζει αναλογικά με την τάση της γεννήτριας. ^b Η διακρίβωση εκφόρτισης αέρος εκτελείται σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής με το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης αέρος. Αρκεί η διακρίβωση σε οποιοδήποτε επίπεδο ή μέχρι το υψηλότερο επίπεδο εκφόρτισης επαφής.	

2. Απαίτηση για τήρηση της ελάχιστης απόστασης των 0,8m του εξοπλισμού από τους τοίχους και τις μεταλλικές επιφάνειες του εργαστηρίου, αποτρέποντας την ανεπιθύμητη σύζευξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
3. Το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης πρέπει να οδεύει μη επαγωγικά. Οπότε τοποθετείται σε απόσταση τουλάχιστον 0,2m από οποιοδήποτε αγωγίμο αντικείμενο, μειώνοντας τις παρεμβολές και την επαγωγική σύζευξη κατά τις εκφορτίσεις. Αυστηρή προτροπή το καλώδιο επιστροφής να μην κρατείται από τον χειριστή.
4. Ακριβής τοποθέτηση του κάθετου επιπέδου ζεύξης (Vertical Coupling Plane, VCP).
5. Επιτρέπεται αυστηρά στη γεννήτρια μόνο η γείωση που καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

Παραδείγματα διατάξεων δοκιμών ESD δίνονται στα Σχήματα 2.3 και 2.4, όπου παρουσιάζονται δοκιμές σε επιτραπέζιο και επιδαπέδιο εξοπλισμό αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: Διάταξη δοκιμών επιτραπέζιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]



Σχήμα 2.4: Διάταξη δοκιμών επιδαπέδιου εξοπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3 [23]

2.1.5 Έρευνες πάνω στην αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου

Από τη στιγμή που δημοσιεύθηκε η αναθεωρημένη Έκδοση 3.0 του προτύπου IEC 61000-4-2, η επιστημονική και τεχνική κοινότητα έχει επιδοθεί στη συστηματική μελέτη των νέων απαιτήσεων και των επιπτώσεών τους τόσο στις κυματομορφές των εκφορτίσεων όσο και στα αντίστοιχα όρια αποδοχής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει προκαλέσει η εισαγωγή της νέας παραμέτρου I_{p2} , η οποία επιδιώκει τον περιορισμό των ταλαντώσεων στο πίσω μέρος του παλμού εκφόρτισης, οδηγώντας ωστόσο σε απόκλιση πολλών γεννητριών και διακριβώσεων από τα νέα επιτρεπτά όρια. Παράλληλα, μελετήθηκε εκτενώς η επίδραση της υποχρεωτικής πλέον χρήσης μεταλλικού επιπέδου αναφοράς γείωσης (RGP) κάτω από ολόκληρη τη διάταξη, το οποίο φαίνεται να συμβάλλει στην αύξηση της επαναληψιμότητας και της σταθερότητας των μετρήσεων, αλλάζοντας σημαντικά τη γεωμετρία και τα όρια σχεδιασμού της δοκιμής.

Η **EMC Partner**, για να διατηρήσει τη συμμόρφωση των προϊόντων της με τα νέα όρια, προχώρησε σε βελτιώσεις στον εξοπλισμό της, ειδικά στη σειρά ESD3000. Παρόλο που οι υπάρχουσες διαμορφώσεις (DM1 και DN1) παραμένουν εντός προδιαγραφών ακόμα και στο επίπεδο δοκιμής των 8kV, η εταιρεία σχεδίασε νέο καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης, το οποίο περιορίζει περαιτέρω το φαινόμενο των ταλαντώσεων (ringing) και βελτιώνει την ακρίβεια και την εργονομία κατά τις δοκιμές. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται δείχνουν ότι οι συσκευές αυτές παραμένουν σταθερές, με τις τιμές I_{p2} , I_{30} και I_{60} να βρίσκονται εντός των καθορισμένων ανοχών.

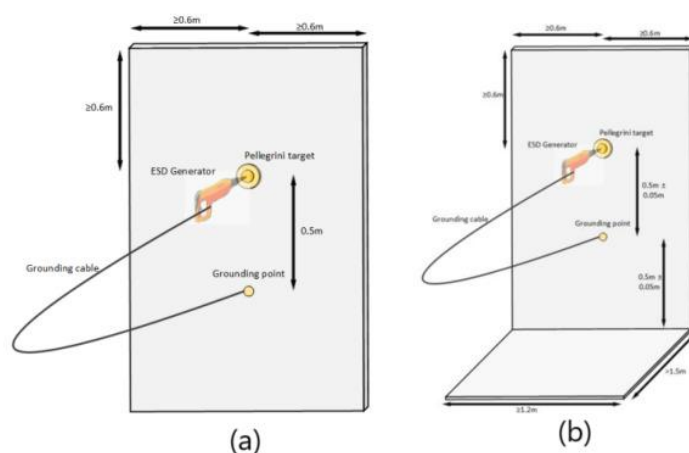
Επιπλέον, λόγω της νέας απαίτησης διακρίβωσης του ηλεκτροδίου εκφόρτισης αέρα, η EMC Partner επιβεβαιώνει ότι τα ανοξείδωτα ηλεκτρόδια της σειράς ESD3000 δεν περιέχουν παθητικά ή ενεργά στοιχεία, και ως εκ τούτου δεν απαιτείται επιπλέον διακρίβωση. Αυτό εξοικονομεί χρόνο και κόστος για τους χρήστες.

Τέλος, η εταιρεία προσαρμόζει και τη γεωμετρία της διάταξης διακρίβωσης, υιοθετώντας τα νέα απαιτούμενα μεγέθη επιπέδων και τη νέα τοποθέτηση γείωσης, σύμφωνα με την Έκδοση 3.0, με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας και επαναληψιμότητας στις μετρήσεις [22].

Οι ερευνητές **Παπασταμάτης, Κατσανάκη, Νικολοπούλου, Νικολόπουλος, Χριστοδούλου και Γκόνος** εκπόνησαν μία μελέτη [24] με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων που επιφέρουν οι αλλαγές της νέας Έκδοσης 3.0 (2025) του προτύπου IEC

61000-4-2 σε σχέση με την προηγούμενη Έκδοση 2.0 (2008), εστιάζοντας στη διαδικασία διακρίβωσης γεννητριών ESD και στις αποκλίσεις που προκύπτουν στις μετρούμενες κυματομορφές. Αφορμή για την ανάλυση αποτέλεσε το γεγονός ότι, παρά τη συμμόρφωση διαφόρων γεννητριών με τις υφιστάμενες απαιτήσεις του προτύπου, οι κυματομορφές παρουσίαζαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους, μειώνοντας την επαναληψιμότητα των δοκιμών. Η νέα έκδοση εισάγει την παράμετρο I_{p2} , η οποία στοχεύει στην ποσοτικοποίηση των ταλαντώσεων στην καθοδική πορεία του παλμού εκφόρτισης, με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου των ταλαντώσεων (ringing) και την επίτευξη μεγαλύτερης ομοιομορφίας μεταξύ διαφορετικών συσκευών.

Για τις ανάγκες της σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκε εμπορική γεννήτρια (EM TEST Dito), στην οποία εφαρμόστηκαν τρεις διαμορφώσεις διακρίβωσης: σύμφωνα με την Έκδοση 2.0 χωρίς επίπεδο αναφοράς γείωσης (RGP), σύμφωνα με την Έκδοση 3.0 με επίπεδο αναφοράς RGP, και τέλος, με χρήση ηλεκτροδίων εκφόρτισης αέρα σε κατάσταση επαφής (contact mode). Οι τρεις διατάξεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν σε επίπεδο $\pm 4\text{kV}$ για θετική και αρνητική πολικότητα και περιλάμβαναν τις παραμέτρους I_p , το χρόνο ανύψωσης (t_r), το I_{p2} , το I_{30} και το I_{60} . Το καλώδιο επιστροφής σε όλες τις περιπτώσεις ήταν σταθερά 2m σε μήκος. Σε κάθε σενάριο καταγράφηκαν 20 κυματομορφές (10 ανά πολικότητα) ώστε να αξιολογηθεί η σταθερότητα και η επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Οι πειραματικές διατάξεις των δύο σεναρίων φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Πειραματικές διατάξεις διακρίβωσης (a) με βάση το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 (b) με βάση το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 [23]

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι οι παράμετροι του πρώτου μεγίστου του ρεύματος I_p και του χρόνου ανόδου t_r παραμένουν πρακτικά ανεπηρέαστες από την

προσθήκη του οριζόντιου επιπέδου γείωσης ή τη χρήση ηλεκτροδίου για εκφορτίσεις αέρος. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι η χρήση τους ηλεκτροδίου για εκφορτίσεις αέρος οδηγεί σε μία μικρή αύξηση του χρόνου ανόδου t_r , πιθανώς λόγω μη ιδανικής επαφής ή μικρών αποστάσεων κατά την εκφόρτιση. Δηλαδή, η μικρή αυτή αύξηση αποδόθηκε σε γεωμετρικούς λόγους και στην αστάθεια της μηχανικής σύνδεσης με τον στόχο μέτρησης. Η επαναληψιμότητα και για τις δύο αυτές παραμέτρους ήταν πολύ καλή, με πολύ χαμηλή αβεβαιότητα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η συμπεριφορά της νέας παραμέτρου I_{p2} , καθώς οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι τιμές του ρεύματος μεταξύ 10ns και 40ns υπερέβαιναν σε αρκετές περιπτώσεις το επιτρεπόμενο όριο ανοχής του προτύπου, το οποίο είναι $\pm 30\%$. Αυτή η υπέρβαση ήταν ιδιαίτερα έντονη τόσο για εκφορτίσεις επαφής, όσο και για εκφορτίσεις με ηλεκτρόδιο εκφορτίσεων αέρος. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει τον ισχυρισμό ότι γεννήτριες που μέχρι πρότινος συμμορφώνονταν με το Πρότυπο, βάσει της παραμέτρου I_{30} , πλέον ενδέχεται να απορρίπτονται λόγω της αυστηρότερης απαίτησης του I_{p2} . Η επαναληψιμότητα για την παράμετρο I_{p2} ήταν εξαιρετικά υψηλή, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι αποκλίσεις δεν σχετίζονται με αστάθεια της μεθοδολογίας, αλλά με την απόκριση του ίδιου του εξοπλισμού. Ενδεικτικά τα αποτελέσματα για την παράμετρο I_{p2} παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Συγκριτικά αποτελέσματα για την παράμετρο I_{p2} [23]

		IEC 61000-4- 2 Ed 2.0 Επαφή	IEC 61000-4- 2 Ed 3.0 Επαφή	IEC 61000-4- 2 Ed 2.0 Αέρος
+4kV	Ανοχή Προτύπου [A]	6,30 - 11,70	6,30 - 11,70	6,30 - 11,70
	Μετρούμενη τιμή [A]	13,82	13,70	13,53
	Απόκλιση από την ιδανική τιμή [%]	53,60	52,18	50,13
	Επαναληψιμότητα [%]	0,14	0,21	0,16
-4kV	Ανοχή Προτύπου [A]	-11,70 - -6,30	-11,70 - -6,30	-11,70 - -6,30
	Μετρούμενη τιμή [A]	-13,72	-13,75	-13,52
	Απόκλιση από την ιδανική τιμή [%]	52,44	52,80	50,22
	Επαναληψιμότητα [%]	-0,18	-0,20	-0,20

Η παράμετρος I_{30} διατήρησε μικρές διακυμάνσεις και ήταν εντός προδιαγραφών σε όλες τις περιπτώσεις, με κάποιες αυξήσεις να εντοπίζονται στην περίπτωση της αρνητικής πολικότητας με χρήση ηλεκτροδίου εκφόρτισης αέρος. Η μέτρηση του I_{60} παρουσίασε μία αύξηση της τάξης του 4–5% όταν χρησιμοποιήθηκε το νέο επίπεδο αναφοράς γείωσης RGP, υποδηλώνοντας ότι η γεωμετρία του RGP επηρεάζει τη συμπεριφορά της κυματομορφής σε μεταγενέστερους χρόνους της κυματομορφής, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει τις αρχικές κορυφές ή τη μορφή της κυματομορφής κατά την άνοδο. Παρά την παρατήρηση αυτή, η επαναληψιμότητα των μετρήσεων του I_{60} ήταν πολύ υψηλή, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η εργασία επισημαίνει και τη νέα απαίτηση στη διακρίβωση με το ηλεκτρόδιο αέρα προσαρτημένο, ακόμα και σε εκφορτίσεις επαφής, και καταγράφει τη μικρή αλλά εντός προδιαγραφών επίδρασή του στη μορφή του παλμού.

Συνολικά, η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η εισαγωγή της παραμέτρου I_{p2} και η χρήση του RGP επηρεάζουν επιλεκτικά συγκεκριμένες περιοχές της κυματομορφής. Ειδικά η απαίτηση για το I_{p2} φαίνεται να δημιουργεί προβλήματα συμμόρφωσης σε γεννήτριες που ήταν έως τώρα αποδεκτές. Παρ' όλα αυτά, η σταθερότητα των μετρήσεων και η πολύ καλή επαναληψιμότητα ενισχύουν τη μεθοδολογική εγκυρότητα του προτύπου. Οι συγγραφείς προτείνουν μελλοντικές μελέτες με περισσότερες γεννήτριες και με την τελική μορφή της Έκδοσης 3.0, ώστε να εξακριβωθεί η καθολικότητα των επιπτώσεων και η δυνατότητα βελτιστοποίησης της διαδικασίας.

2.3 Μελέτες σχετικά με θέματα αναπαραγωγιμότητας και επαναληψιμότητας

Πολλοί μελετητές έχουν αναπτύξει ανησυχίες σχετικά με την αναπαραγωγιμότητα και την επαναληψιμότητα της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με βάση το πρότυπο IEC 61000-4-2, τόσο για εκφορτίσεις επαφής, όσο και για εκφορτίσεις αέρος. Ειδικότερα, η δεύτερη κορυφή της κυματομορφής του ρεύματος που προβλέπεται από το πρότυπο IEC 61000-4-2 φαίνεται να προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία στη βιβλιογραφία, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά και τις αντοχές των εξαρτημάτων κατά την εκφόρτιση. Άλλοι μελετητές προσπάθησαν να βελτιώσουν τους δύο δείκτες με διάφορες μεθόδους. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τέσσερις χαρακτηριστικές μελέτες.

2.3.1 Μεταβλητότητα, Τεκμηρίωση και Στρατηγικές Βελτίωσης στις Δοκιμές ESD: Συμπεράσματα από το Industry Council White Paper 3

Το **White Paper 3 – System Level ESD – Part III** [25] της Industry Council αποτελεί ένα από τα πλέον θεμελιώδη τεχνικά κείμενα για την κατανόηση και αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ηλεκτρονικών συστημάτων έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD) σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σε συνέχεια των δύο προηγούμενων εγγράφων της ίδιας σειράς, το τρίτο μέρος μετατοπίζει την έμφαση από την προστασία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ICs) στην εκτίμηση της συνολικής συστημικής συμπεριφοράς. Τεκμηριώνεται δηλαδή η ανάγκη απομάκρυνσης από τα παραδοσιακά πρότυπα HBM και CDM, τα οποία, ενώ προσφέρουν ένα ελάχιστο επίπεδο προστασίας για το επίπεδο του chip, δεν είναι αντιπροσωπευτικά των πολύπλοκων συνθηκών που επικρατούν σε ένα ολοκληρωμένο προϊόν κατά την πραγματική χρήση από τον τελικό χρήστη.

Ορίζεται με σαφήνεια η έννοια της "συστημικής ESD ανθεκτικότητας", ως η ικανότητα ενός πλήρους συστήματος να διαχειρίζεται ή να απορροφά παλμούς ESD χωρίς να υφίσταται λειτουργικές ή μόνιμες βλάβες – είτε πρόκειται για ήπιες αστοχίες (soft failures), όπως προσωρινές δυσλειτουργίες, είτε για μόνιμες αστοχίες (hard failures), όπως καταστροφή εξαρτημάτων. Το White Paper επισημαίνει ότι η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων, πέρα από τα χαρακτηριστικά των ICs. Παίζουν ρόλο η τοπολογία (layout) της πλακέτας (Printed Circuit Board – PCB), οι διαδρομές επιστροφής ρεύματος, οι χωρητικότητες ζευξης μεταξύ στοιχείων και περιβάλλοντος, καθώς και η παρουσία καλωδιώσεων, θωρακίσεων και εξωτερικών μεταλλικών επιφανειών.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα του εγγράφου είναι η διαπίστωση ότι η μεταβλητότητα στις μετρήσεις ESD μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων αποτελεί ένα συστηματικό και σημαντικό πρόβλημα. Ακόμα και όταν εφαρμόζονται τα ίδια πρότυπα και πρωτόκολλα, μικρές διαφοροποιήσεις στον εξοπλισμό, στην τοποθέτηση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, στο μήκος και τη διαδρομή των καλωδίων επιστροφής ή στη γείωση, οδηγούν σε αξιοσημείωτες αποκλίσεις στις κυματομορφές των παλμών και στα αποτελέσματα των δοκιμών. Αυτό σημαίνει ότι η ίδια συσκευή μπορεί να κριθεί ως "ανθεκτική" σε ένα εργαστήριο και "ευπαθής" σε ένα άλλο, κάτι που μειώνει τη δυνατότητα εξαγωγής αξιόπιστων και συγκρίσιμων συμπερασμάτων.

Για την αντιμετώπιση αυτής της ασυνέπειας, η Industry Council προτείνει την αυστηρή και πλήρη τεκμηρίωση όλων των κρίσιμων παραμέτρων του παλμού ESD, όπως είναι ο χρόνος ανόδου, το μέγιστο ρεύμα, η διάρκεια παλμού και η συνολική μεταφερόμενη ενέργεια. Η καταγραφή των πραγματικών τιμών αυτών των μεγεθών κατά τη διάρκεια των δοκιμών επιτρέπει την ακριβέστερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων και ενισχύει τη διαφάνεια και την επαναληψιμότητα των πειραμάτων. Για παράδειγμα, ένας παλμός με ταχύτερο χρόνο ανόδου μεταφέρει υψηλότερη ενέργεια σε μικρότερο χρονικό διάστημα, προκαλώντας ισχυρότερες επαγωγικές ζεύξεις και αυξημένο ρίσκο αποτυχίας για ευαίσθητα κυκλώματα. Αντίστοιχα, η διαφορά λίγων ampere στο μέγιστο ρεύμα (peak current) μπορεί να μετατοπίσει το όριο αντοχής μιας συσκευής και να προκαλέσει διαφορετική απόκριση.

Το White Paper 3 [25] αναγνωρίζει επίσης την αδυναμία των υφιστάμενων προτύπων να καθορίσουν με ακρίβεια τις επιτρεπόμενες αποκλίσεις σε αυτές τις παραμέτρους. Για παράδειγμα, το IEC 61000-4-2 προβλέπει εύρος τιμών για τον χρόνο ανόδου ή το μέγιστο ρεύμα, χωρίς να προσδιορίζει τις συνέπειες αυτών των διαφοροποιήσεων. Αυτό επιτρέπει αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών διατάξεων και αποτελεί βασική αιτία της ενδοεργαστηριακής και δια-εργαστηριακής μεταβλητότητας.

Μια από τις σημαντικότερες προτάσεις του White Paper 3 είναι η ενσωμάτωση της στατιστικής ανάλυσης στις δοκιμές ηλεκτροστατικής ατρωσίας. Η συλλογή πολλαπλών μετρήσεων για κάθε συνθήκη και η επεξεργασία τους μέσω δεικτών όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, το εύρος εμπιστοσύνης ή οι συντελεστές διασποράς, επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της μεταβλητότητας των πειραμάτων. Παράλληλα, η στατιστική αξιολόγηση βοηθά στον εντοπισμό συστημικών σφαλμάτων στον εξοπλισμό ή στη μεθοδολογία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα που αναφέρεται είναι η περίπτωση όπου μια μικρή αύξηση του χρόνου ανόδου (rise time) κατά 10% επέφερε ακύρωση μίας ήπιας αστοχίας (soft failure), κάτι που δείχνει τη σημασία της ακριβούς μέτρησης και τεκμηρίωσης ακόμα και για “δευτερεύουσες” παραμέτρους.

Σε αυτό το πλαίσιο, το White Paper 3 προτείνει επίσης πιο ρεαλιστικά πρότυπα δοκιμών, όπως το Human Metal Model (HMM) και το Extended-HMM, τα οποία λαμβάνουν υπόψη την πλήρη φυσική κατάσταση ενός ανθρώπου που κρατά μια συσκευή. Οι χωρητικότητες ζευξης με το περιβάλλον, τα μονοπάτια επιστροφής του ρεύματος και η σύνθετη γεωμετρία του σώματος επηρεάζουν ουσιαστικά την

κυματομορφή και τη διαδρομή της εκφόρτισης. Τα μοντέλα αυτά προσφέρουν καλύτερη συσχέτιση με πραγματικά σενάρια χρήσης και ενισχύουν την αξιοπιστία της ανάλυσης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στις στρατηγικές σχεδιασμού για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του συστήματος. Για παράδειγμα, η προσεκτική και στρατηγική τοποθέτηση των διατάξεων σύσφιξης (clamp devices) πολύ κοντά στα σημεία εισόδου του σήματος βοηθά ώστε η ενέργεια μιας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης να απορροφάται άμεσα, πριν προλάβει να φτάσει σε ευαίσθητα κυκλώματα. Εξίσου σημαντική είναι και η σωστή επιλογή κατασταλτικών διόδων στιγμιαίας υπέρτασης (Transient Voltage Suppressors – TVS), με βάση χαρακτηριστικά όπως η ηλεκτρική χωρητικότητα, ο χρόνος απόκρισης και το μέγιστο επίπεδο ενέργειας που μπορούν να απορροφήσουν. Αν το TVS δεν είναι σωστά επιλεγμένο, μπορεί είτε να ενεργοποιηθεί με καθυστέρηση είτε να επηρεάσει τη λειτουργία γραμμών υψηλής ταχύτητας, προκαλώντας προβλήματα στο ίδιο το κύκλωμα.

Η μείωση της αυτεπαγωγής και των φαινομένων σύζευξης μεταξύ γραμμών σήματος και επιστροφής είναι άλλη μία κρίσιμη πρακτική. Η υψηλή αυτεπαγωγή αυξάνει τις υπερτάσεις σε ESD παλμούς, με συνέπεια την υπέρβαση των ορίων λειτουργίας των ICs. Επίσης, η αποφυγή κυκλωμάτων με κοινή γείωση χωρίς επαρκείς φραγμούς αποτρέπει τη διασπορά του ESD ρεύματος σε περιοχές που δεν σχετίζονται άμεσα με το σημείο εκφόρτισης, μειώνοντας τον κίνδυνο απρόβλεπτων αποτυχιών.

Στο ίδιο πνεύμα, το έγγραφο υπογραμμίζει τη σημασία της βελτιστοποίησης του τρόπου κατασκευής των τυπωμένων πλακετών (PCB), τόσο ως προς τη διάταξη των εξαρτημάτων και των διαδρομών (layout), όσο και ως προς τη διάρθρωση των στρωμάτων (stack-up). Η ενσωμάτωση συνεχόμενων επιπέδων γείωσης, η αποφυγή ασυνεχειών στις διαδρομές επιστροφής του ρεύματος, καθώς και η προσεκτική τοποθέτηση των διαμπερών οπών, συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση της εμπέδησης και στην αύξηση της αντοχής του κυκλώματος απέναντι σε φαινόμενα ESD.

Επιπλέον, επισημαίνεται η ανάγκη περιορισμού των διαδρομών ζεύξεων, δηλαδή των ανεπιθύμητων μονοπατιών μέσω των οποίων μπορεί να μεταδοθεί η παλμική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη τοπολογία και επαρκείς αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων. Όταν ευαίσθητα κυκλώματα τοποθετούνται μακριά από περιοχές υψηλής

διέγερσης, μειώνεται αισθητά η πιθανότητα να δεχτούν ανεπιθύμητες παρεμβολές ή να υποστούν βλάβες λόγω μεταφοράς ενέργειας από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.

Συνοψίζοντας, το White Paper 3 [25] προσφέρει ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο για την κατανόηση και τη διαχείριση της συστημικής ESD ανθεκτικότητας. Αναδεικνύει τη σημασία της στατιστικής τεκμηρίωσης, της αυστηρής μέτρησης κρίσιμων παραμέτρων, της ενσωμάτωσης ρεαλιστικών μοντέλων προσομοίωσης και της εφαρμογής στοχευμένων σχεδιαστικών πρακτικών. Η συμβολή του στην κατανόηση της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας είναι καθοριστική για τη διασφάλιση αξιόπιστων και συγκρίσιμων αποτελεσμάτων στις δοκιμές ESD. Γι' αυτόν τον λόγο, το συγκεκριμένο υλικό αποτελεί βασικό πυλώνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τόσο για τη θεμελίωση της μεθοδολογικής προσέγγισης όσο και για την ανάδειξη των βέλτιστων πρακτικών αξιολόγησης των φαινομένων ESD.

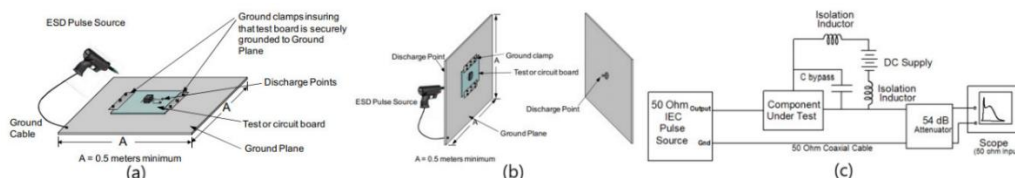
2.3.2 Διεργαστηριακή μελέτη της ESDA για τη δοκιμή ESD: Προβλήματα Αναπαραγωγιμότητας και Επαναληψιμότητας στη Δεύτερη Κορυφή του Ρεύματος

Χαρακτηριστική μελέτη πάνω στο πρόβλημα της επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας αποτελεί το **Round Robin Study** (Μελέτη διεργαστηριακής σύγκρισης) της ομάδας **5.6 του Συλλόγου Ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ElectroStatic Discharge Association, ESDA)** [26], στο οποίο συμμετείχαν οκτώ διαφορετικά εργαστήρια από διάφορες χώρες, με στόχο να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα και η αναπαραγωγιμότητα της μεθόδου Human Metal Model (HMM) εφαρμόζοντας την κυματομορφή του IEC 61000-4-2. Η μέθοδος HMM αποτελεί μία προσαρμογή της κυματομορφής IEC 61000-4-2 σε επίπεδο εξαρτήματος, με στόχο την προσομοίωση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από άνθρωπο που κρατά μεταλλικό αντικείμενο. Εφαρμόζεται ευρέως για τη δοκιμή εξαρτημάτων που εκτίθενται άμεσα σε ESD φαινόμενα.

Η διεργαστηριακή σύγκριση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τριών διαφορετικών διατάξεων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.6. Η διάταξη Α αφορά οριζόντια τοποθέτηση του υπό εξέταση εξοπλισμού (Device Under Test) σε μεταλλικό επίπεδο γείωσης με εμβαδόν 0,5m², η διάταξη Β έχει κάθετη διάταξη του μεταλλικού επιπέδου γείωσης, ώστε να περιορίζεται η επίδραση των πεδίων της γεννήτριας ESD, ενώ η διάταξη C χρησιμοποιεί γεννήτρια παλμών (pulser) 50Ω με ομοαξονικό καλώδιο και δεν

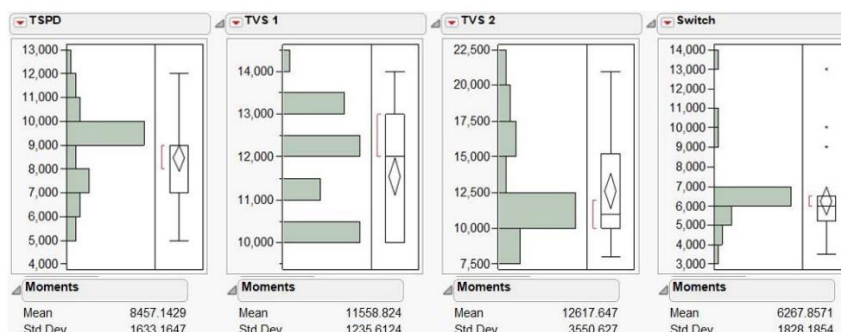
χρειάζεται μεταλλικό επίπεδο γείωσης. Η ποικιλία στον εξοπλισμό των εργαστηρίων ήταν σημαντική, καθώς χρησιμοποιήθηκαν γεννήτριες ESD με χαρακτηριστική αντίσταση 330Ω, γεννήτριες παλμών 50Ω και ειδικές γεννήτριες παλμών δύο ακίδων (2-pin pulsers).

Στο πλαίσιο της μελέτης δοκιμάστηκαν συνολικά τέσσερα διαφορετικά εξαρτήματα (DUTs), τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά προστασίας έναντι των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν δύο διόδους καταστολής υπέρτασης (TVS – Transient Voltage Suppression), μία διάταξη προστασίας με θυρίστορ (TSPD – Thyristor Surge Protection Device) και ένας διακόπτης ραδιοσυχνοτήτων (RF switch), ώστε να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και συμπεριφορών προστασίας.



Σχήμα 2.6: Διατάξεις δοκιμών εξαρτημάτων που εφαρμόστηκαν στο Round Robin Study του HMM (a) Διάταξη A, (b) Διάταξη B, (c) Διάταξη C [26]

Το πιο ενδιαφέρον εύρημα αυτής της μελέτης είναι ότι, παρά την τυπικά κοινή διαδικασία, τα αποτελέσματα παρουσίασαν πολύ μεγάλες διακυμάνσεις από εργαστήριο σε εργαστήριο. Η αναπαραγωγιμότητα, δηλαδή η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικά εργαστήρια, εμφάνισε αποκλίσεις στις τάσεις αστοχίας των εξαρτημάτων που ξεπερνούσαν ακόμη και τα 6kV. Ειδικά το δεύτερο TVS έδειξε τάσεις αστοχίας από 8kV έως 21kV, γεγονός που υπογραμμίζει τη δυσκολία πρόβλεψης συγκεκριμένων ορίων αντοχής. Ενδεικτικά στο Σχήμα 2.6 δίνεται η ανάλυση κατανομών δεδομένων.



Σχήμα 2.7: Ανάλυση κατανομών δεδομένων από Round Robin Study του HMM [26]

Αντίθετα, η επαναληψιμότητα, δηλαδή η ικανότητα του ίδιου εργαστηρίου να επαναλάβει με συνέπεια τα αποτελέσματα, ήταν καλύτερη. Τα περισσότερα εργαστήρια παρουσίασαν μικρή ή μηδενική διακύμανση όταν χρησιμοποιούσαν τα ίδια εξαρτήματα και εξοπλισμό. Ωστόσο, αυτό από μόνο του δεν είναι αρκετό όταν ο στόχος είναι η εξασφάλιση της αναπαραγωγιμότητας των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών οργανισμών ή εργαστηρίων.

Η στατιστική ανάλυση που εφαρμόστηκε - βασισμένη κυρίως στο πρότυπο ASTM E691 - έδειξε ότι οι διεθνώς χρησιμοποιούμενοι δείκτες (όπως οι στατιστικές h και k) δεν αρκούν πάντοτε για να αποκαλύψουν την ουσία του προβλήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί η ύπαρξη υψηλής τυπικής απόκλισης συχνά "καλύπτει" τις ακραίες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα να φαίνεται τεχνητά σταθερό ένα σύνολο δεδομένων που στην πραγματικότητα είναι προβληματικό. Επιπλέον, ο υπολογισμός του ορίου επαναληψιμότητας (Reproducibility Limit – R) ανέδειξε πολύ υψηλές τιμές, γεγονός που δείχνει ξεκάθαρα πόσο δύσκολο είναι να εφαρμοστεί η μέθοδος HMM με ακρίβεια, όταν ο στόχος είναι ο καθορισμός αξιόπιστων ορίων αστοχίας (fail thresholds).

Η κατάσταση αυτή εντείνεται λόγω της δεύτερης κορυφής του ρεύματος της κυματομορφής ESD. Η αβεβαιότητα που συνοδεύει αυτή την κορυφή επηρεάζει έντονα τα αποτελέσματα και δικαιολογεί το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών για το συγκεκριμένο θέμα. Το βασικότερο συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι η μέθοδος HMM, όπως εφαρμόζεται σήμερα, δεν επαρκεί για ασφαλή χαρακτηρισμό αστοχίας με ακρίβεια $\pm 1\text{kV}$. Η τεράστια μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση, βελτίωση των προδιαγραφών της κυματομορφής και ενδεχομένως νέες μεθόδους προσαρμοσμένες σε επίπεδο εξαρτήματος.

2.3.3 Διεργαστηριακή μελέτη για τη βελτίωση της επαναληψιμότητας και της επαναληψιμότητας της δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Με αφορμή την παρατήρηση της μεγάλης απόκλισης που παρατηρείται στα αποτελέσματα δοκιμών ESD ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή της γεννήτριας ESD, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών, οι **Masayuki Hirata, Takehiro Takahashi και Noboru Schibuya** διεξήγαγαν μία διεργαστηριακή μελέτη (Round Robin Test) [27] που πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία, τη Γερμανία και την Αμερική. Στόχος του round robin test ήταν η εύρεση μία αυστηρότερης προδιαγραφής για την κυματομορφή

ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτή περιγράφεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2, προκειμένου να μειωθεί το πρόβλημα της επαναληψιμότητας και γενικότερα οι διακυμάνσεις κατά τη δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

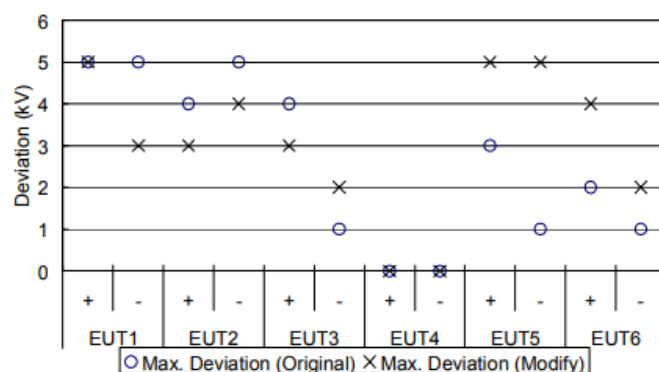
Η μελέτη ξεκίνησε από τη διαπίστωση ότι ακόμα και με χρήση του ίδιου προτύπου, διαφορετικοί τύποι γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παράγουν αποτελέσματα με σημαντικές αποκλίσεις. Οι αποκλίσεις αυτές σχετίζονται κυρίως με διαφορές στην κυματομορφή: χρόνο ανόδου, πλάτος πρώτου μεγίστου, φασματική συμπεριφορά και μετα-ταλαντώσεις. Προκειμένου να μειωθούν αυτές οι αποκλίσεις και να ενισχυθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, εξετάστηκε η δυνατότητα περιορισμού του χρόνου πτώσης της πρώτης κορυφής (falling time restriction) ως παράγοντας σταθεροποίησης της απόκρισης των υπό εξέταση συσκευών (Device Under Test – DUTs).

Η φάση της μελέτης που περιγράφεται στο άρθρο εστιάζει στα πειράματα που διεξήχθησαν στην Ιαπωνία. Συμμετείχαν οκτώ ESD γεννήτριες - συμβατικές και τροποποιημένες – με την τελευταία κατηγορία να έχει σχεδιαστεί ώστε να πληροί την προτεινόμενη απαίτηση στον χρόνο πτώσης. Οι τροποποιήσεις έγιναν από τους ίδιους τους κατασκευαστές και είχαν στόχο να εξομαλύνουν την απότομη μείωση του ρεύματος μετά την πρώτη κορυφή.

Ως συστήματα υπό δοκιμή επιλέχθηκαν έξι διαφορετικά DUTs, μεταξύ των οποίων υπολογιστές, εκτυπωτές και συσκευές δρομολόγησης δικτύου (routers), ενώ για κάθε επίπεδο δοκιμής εφαρμόστηκαν 100 εκφορτίσεις ανά πολικότητα. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.8, παρουσιάζεται η μέγιστη απόκλιση τάσης μεταξύ των γεννητριών, αποκαλύπτοντας ότι σε πολλές περιπτώσεις αυτή ξεπερνά τα 4 με 5 kV, μια απόκλιση ιδιαίτερα σημαντική, αναλογιζόμενοι το πόσο ευαίσθητα είναι τα περισσότερα σύγχρονα ηλεκτρονικά. Η σύγκριση μεταξύ συμβατικών και τροποποιημένων μοντέλων δείχνει αισθητά μικρότερη μεταβλητότητα για τα δεύτερα, υποδεικνύοντας ότι ο περιορισμός στον χρόνο πτώσης έχει ευεργετικό αποτέλεσμα.

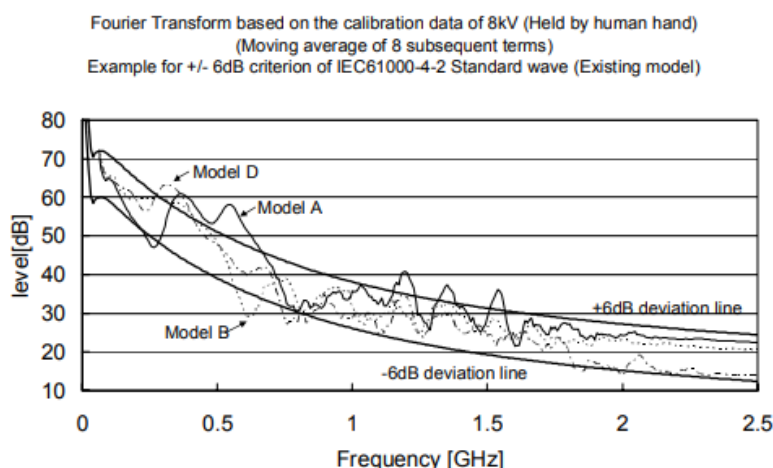
Παρόλα αυτά, η βελτίωση δεν ήταν καθολική. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για τη συσκευή DUT-5 που είχε σκόπιμα σχεδιαστεί ώστε να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη, αλλά και για το DUT-6, όπου η εκφόρτιση εφαρμόστηκε κοντά στη μεταλλική ψύκτρα ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC), η αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων παρέμεινε περιορισμένη. Φάνηκε ότι παράγοντες όπως η εσωτερική χωρητικότητα της

συσκευής, η τοπολογία του κυκλώματος και η ακριβής θέση όπου έγινε η εκφόρτιση επηρεάζουν έντονα τον τρόπο που αντιδρά το σύστημα.



Σχήμα 2.8: Μέγιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής ESD [27]

Η φασματική ανάλυση που ακολούθησε, μέσω μετασχηματισμού Fourier, επιβεβαίωσε τις παραπάνω διαπιστώσεις. Οι συμβατικές γεννήτριες παρήγαγαν μεγαλύτερες φασματικές συνιστώσες σε υψηλές συχνότητες, συχνά υπερβαίνοντας τα επιτρεπτά όρια. Αντίθετα, οι τροποποιημένες γεννήτριες επέδειξαν πιο ελεγχόμενο φάσμα – ειδικά κάτω από τα 800 MHz – βελτιώνοντας έτσι την επαναληψιμότητα. Το Σχήμα 2.9 απεικονίζει τη φασματική σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων γεννητριών και του πρότυπου φάσματος σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Είναι εμφανές ότι μόνο οι τροποποιημένες γεννήτριες διατηρούν το φάσμα τους εντός του αποδεκτού εύρους ± 6 dB, κάτι που αποτελεί σημαντικό κριτήριο αξιοπιστίας.



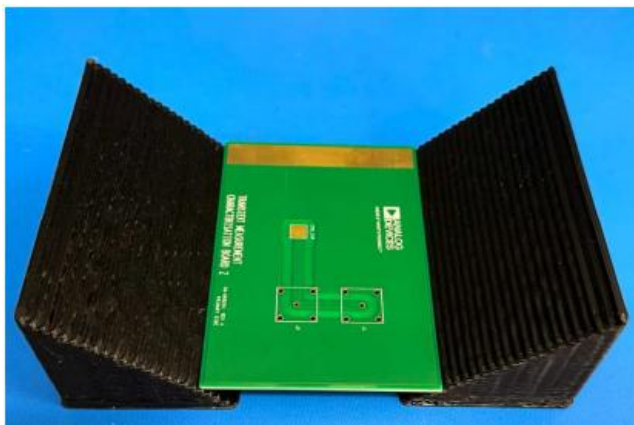
Σχήμα 2.9: Μετασχηματισμός Fourier (Επίπεδο τάσης 8kV, Χειρός από άτομο, Υπάρχον μοντέλο) [27]

Συμπερασματικά, το πείραμα ανέδειξε τη χρησιμότητα του περιορισμού στον χρόνο πτώσης ως παράγοντα βελτίωσης της συνέπειας στις δοκιμές ESD. Ωστόσο, για την πλήρη εξάλειψη των αποκλίσεων, οι συγγραφείς επισημαίνουν την ανάγκη παράλληλων βελτιώσεων και σε άλλες παραμέτρους, όπως ο χρόνος ανόδου και τα φασματικά χαρακτηριστικά. Προτείνεται επίσης η υιοθέτηση αυστηρότερων προδιαγραφών για το φάσμα, με στόχο ± 3 dB αντί για ± 6 dB. Η μελέτη των Hirata et al. αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της συγκρισιμότητας των ESD δοκιμών παγκοσμίως.

2.3.4 Επαναληψιμότητα στις δοκιμές με εκφορτίσεις αέρος

Οι **Mohit Gopalraj** και **Thane Sanford** στην εργασία τους [28] εξετάζουν τη δυσκολία επίτευξης επαναληψιμότητας στις δοκιμές ESD με εκφορτίσεις αέρος, λόγω της μεγάλης ποικιλίας παραμέτρων που επηρεάζουν την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Το πρότυπο IEC 61000-4-2 ορίζει συγκεκριμένες προδιαγραφές κυματομορφής (χρόνο ανόδου, μέγιστο ρεύμα πρώτης κορυφής, ρεύμα στα 30ns και 60ns), αλλά αυτές αφορούν κυρίως την εκφόρτιση επαφής. Αντίθετα, για την εκφόρτιση αέρος δεν υπάρχει πρότυπη διαδικασία επαλήθευσης κυματομορφής πριν από τη δοκιμή, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα.

Οι ερευνητές προτείνουν μια πιο αξιόπιστη μέθοδο ελέγχου πριν από τη διεξαγωγή δοκιμών εκφόρτισης αέρος, με στόχο να βελτιωθεί η συνέπεια των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος πάνω σε γνωστά φορτία (2 ή 50 Ω), χρησιμοποιώντας μια ειδικά σχεδιασμένη εκτυπωμένη πλακέτα (PCB) και έναν ρομποτικό βραχίονα που μετακινεί με ακρίβεια τη γεννήτρια ESD. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την εκτίμηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η γωνία με την οποία πλησιάζει η γεννήτρια στο σημείο δοκιμής. Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζεται η πλήρης πειραματική διάταξη, στην οποία ο ρομποτικός βραχίονας εξασφαλίζει απόλυτα επαναλαμβανόμενες κινήσεις, βοηθώντας στην επίτευξη σταθερών και συγκρίσιμων μετρήσεων κάθε φορά.

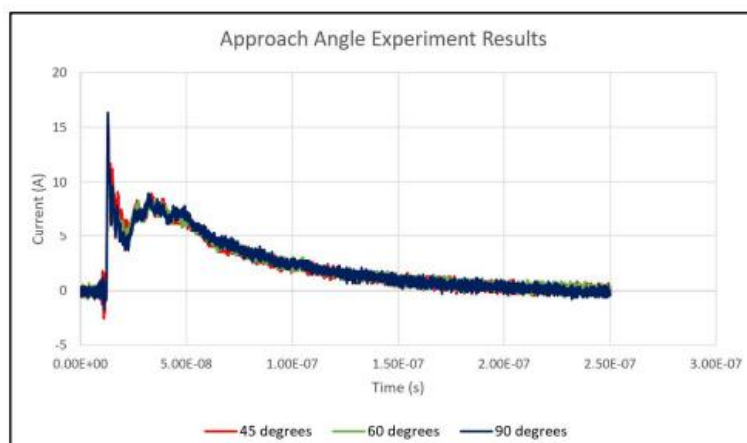


Σχήμα 2.10: PCB επαλήθευσης ESD στο εξάρτημα [28]

Στο πλαίσιο της μελέτης, αξιολογήθηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις της γεννήτριας στο σημείο δοκιμής: προσέγγιση χωρίς επαφή με σταθερό χέρι, κίνηση χωρίς επαφή και κίνηση με τελική επαφή. Τα αποτελέσματα έδειξαν τεράστια μεταβλητότητα στο μέγιστο ρεύμα, με διαφορές που σε κάποιες περιπτώσεις ξεπέρασαν το 500%, αναδεικνύοντας τη σημασία της διαδικασίας της εκφόρτισης στην τελική κυματομορφή. Η ταχύτητα προσέγγισης επηρεάζει άμεσα τον χρόνο ανόδου και το μέγιστο του παλμού, με αποτέλεσμα ακόμη και μικρές μεταβολές στην κινητική ενέργεια του ακροδέκτη να έχουν δυσανάλογο αντίκτυπο.

Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της γωνίας προσέγγισης (45° , 60° , 90°) στον χαρακτήρα της εκφόρτισης. Αν και η γωνία δεν επηρεάζει δραστικά το πλάτος του παλμού, μπορεί να μεταβάλει τον τρόπο ζευξης με τον υπό εξέταση εξοπλισμό (DUT), ιδίως σε γεωμετρικά πολύπλοκες επιφάνειες. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται η σύγκριση των κυματομορφών που καταγράφηκαν για τις διαφορετικές γωνίες προσέγγισης, οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοια δομή αλλά μικρές αποκλίσεις στο εύρος και τη διάρκεια, ενδεικτικές της επίδρασης της γωνίας στη συνολική συμπεριφορά.

Η μελέτη έδειξε ακόμη ότι ακόμη και όταν η ίδια δοκιμή επαναλαμβάνεται σε διαφορετικές μέρες ή σε διαφορετικούς χώρους, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν αισθητά – με το μέγιστο ρεύμα να παρουσιάζει αποκλίσεις που φτάνουν μέχρι και το 50%. Αυτές οι διαφορές φαίνεται να οφείλονται σε αλλαγές του περιβάλλοντος, όπως η υγρασία, η σταδιακή φθορά του ακροδέκτη της γεννήτριας ή σε μικρές αποκλίσεις στη διάταξη γείωσης. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει τη σημασία του να ελέγχεται και να επαληθεύεται η απόκριση της γεννήτριας πριν από κάθε νέα σειρά δοκιμών, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος για 3 διαφορετικές γωνίες [28]

Το βασικό συμπέρασμα της μελέτης είναι πως η προκαταρκτική επαλήθευση της εκφόρτισης, μέσω της καταγραφής της κυματομορφής που παράγει πάνω σε γνωστό φορτίο, θα πρέπει να καθιερωθεί ως στάνταρ πρακτική στις δοκιμές εκφορτίσεων αέρος. Με αυτόν τον τρόπο, δεν διασφαλίζεται μόνο η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών γεννητριών, αλλά και η συνέπεια της ίδιας γεννήτριας από τη μία μέρα στην άλλη. Η προσέγγιση αυτή βοηθά στην καλύτερη κατανόηση του φυσικού φαινομένου της εκφόρτισης, ενώ παράλληλα αυξάνει την αξιοπιστία των μετρήσεων και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Έτσι, τα ESD tests γίνονται πιο σταθερά και επαναλήψιμα, ακόμη και σε περιπτώσεις όπως η εκφόρτιση αέρος, που λόγω της φύσης της παρουσιάζει μεγαλύτερη αβεβαιότητα.

2.4 Αυτοματοποιημένες δοκιμές και ρομποτικοί βραχίονες

Για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων παραγόντων αβεβαιότητας, ιδιαίτερα εκείνων που σχετίζονται με τη διαδικασία εκκένωσης αέρα, η αυτοματοποιημένη δοκιμή ESD έχει κερδίσει σημαντική προσοχή. Εμπορικά διαθέσιμες λύσεις έχουν ήδη εμφανιστεί και πιο προηγμένα συστήματα που αξιοποιούν τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) βρίσκονται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη.

Για παράδειγμα το **NSG 439** [29], το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, αποτελεί έναν προηγμένο εξομοιωτή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD simulator), ειδικά σχεδιασμένο για αυτοματοποιημένες δοκιμές σε περιβάλλοντα ρομποτικής εφαρμογής. Το NSG 439 αντιμετωπίζει τα προβλήματα σε δοκιμές ESD με εκφορτίσεις αέρος, που προαναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μέσω ενός καινοτόμου προσαρτήματος για εκφορτίσεις αέρος, το οποίο καθοδηγεί σωστά το τόξο εκφόρτισης. Επιπλέον,

προσφέρει τη δυνατότητα προγραμματισμού της ταχύτητας προσέγγισης, κρίσιμο στοιχείο για τη σωστή αναπαραγωγή της δοκιμής.



Σχήμα 2.12: NSF 439 ESD Simulator - Fully automated robotic ESD testing [30]

Η χρήση ρομποτικής διάταξης σε συνδυασμό με το σύστημα NSG 439 επιτρέπει την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας δοκιμών, περιορίζοντας σε μεγάλο βαθμό τα σφάλματα που συνήθως προκύπτουν από χειροκίνητους χειρισμούς. Με αυτόν τον τρόπο, ενισχύεται σημαντικά η επαναληψιμότητα και η αξιοπιστία των μετρήσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το NSG 439 προσφέρεται ως πλήρης σταθμός δοκιμών (test station), που περιλαμβάνει τον ρομποτικό μηχανισμό, το απαραίτητο λογισμικό ελέγχου (control software), ειδική επιφάνεια δοκιμών (test bench) και προστατευτικό θάλαμο (shielded enclosure), προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη και επαγγελματική λύση για ESD δοκιμές σε πλήρως αυτοματοποιημένες εφαρμογές.

Οι αυτοματοποιημένες δοκιμές με ρομποτικούς βραχίονες έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμοι στην ανίχνευση και κατηγοριοποίηση των ήπιων αστοχιών (που δεν προκαλούν μόνιμη βλάβη - soft failures) που προκαλούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές κατά τη διάρκεια δοκιμών ESD, όπως αναδεικνύουν **οι Izadi, Meiguni, Araki, Shumiya και Pommerenke** στην εργασία τους [31]. Η μελέτη προτείνει τη χρήση ρομποτικού βραχίονα έξι αξόνων για την αυτοματοποιημένη εφαρμογή παλμών ESD σε διάφορα σημεία της συσκευής υπό δοκιμή (DUT), ενισχύοντας έτσι τη δυνατότητα επαναληψιμότητας και ακρίβειας των πειραμάτων. Η καινοτομία έγκειται στην αξιοποίηση τεχνικών επεξεργασίας εικόνας και ήχου, με στόχο να ανιχνευθούν αποτυχίες όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από τον τελικό χρήστη και όχι αποκλειστικά μέσω ηλεκτρικών μετρήσεων.

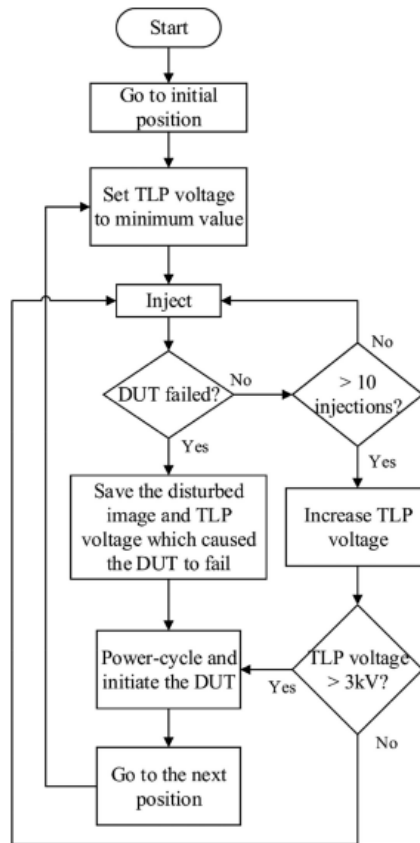
Το Σχήμα 2.13 παρουσιάζει τη συνολική πειραματική διάταξη, η οποία περιλαμβάνει τη γεννήτρια ESD, τον ρομποτικό βραχίονα για την τοποθέτηση του ηλεκτροδίου εκφόρτισης σε διάφορες θέσεις, μια κάμερα (webcam) που καταγράφει την οθόνη της συσκευής υπό δοκιμή, καθώς και ένα μικρόφωνο για την ηχητική ανάλυση. Το όλο σύστημα είναι πλήρως αυτοματοποιημένο και μπορεί να εκτελέσει μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων δοκιμών με ακρίβεια θέσης και χρόνου.

Στο Σχήμα 2.14 απεικονίζονται τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις ήπιων αστοχιών (soft failures) σε εικόνες οθόνης:

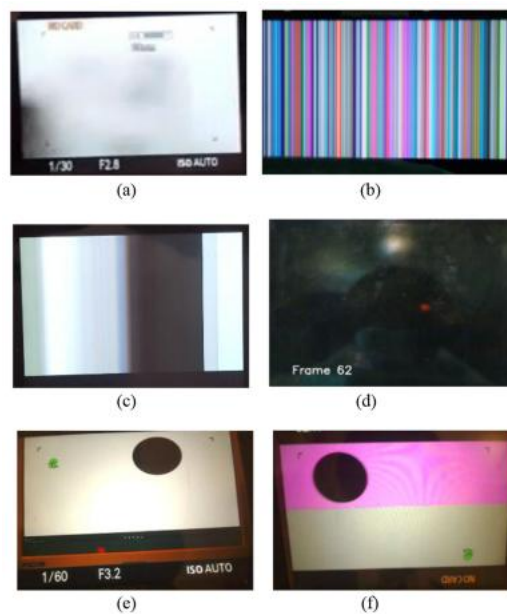
- Σχήμα 2.14α: παρουσιάζεται θόλωση (defocus), όπου χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι εστίασης όπως το Absolute Central Moment (ACM) για τον υπολογισμό της απώλειας ευκρίνειας. Η μέθοδος αυτή επιλέγεται λόγω της ικανότητάς της να διακρίνει μεταξύ απλής χαμηλής αντίθεσης και πραγματικής θόλωσης (blur).
- Σχήμα 2.14β: στατική εικόνα (freeze), όπου η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ διαδοχικών πλαισίων για την ανίχνευση έλλειψης κίνησης.
- Σχήμα 2.14γ: κατακόρυφες γραμμές (vertical lines), οι οποίες εντοπίζονται μέσω μετασχηματισμού Hough ή αντίστοιχων τεχνικών ανίχνευσης γραμμών.
- Σχήμα 2.14δ: επανεκκίνηση (reboot), όπου η επιστροφή σε οθόνη εκκίνησης εντοπίζεται με βάση την εμφάνιση συγκεκριμένων μοτίβων ή λογοτύπων.

Η ανίχνευση σφαλμάτων μέσω ήχου βασίζεται στην ανάλυση του φάσματος του ηχητικού σήματος πριν και μετά την εκφόρτιση ESD. Το Σχήμα 2.15 περιλαμβάνει τέσσερις περιπτώσεις παραμορφώσεων στον ήχο, που καταγράφονται από τη συσκευή υπό δοκιμή (DUT), και παρουσιάζει τα αντίστοιχα φασματικά χαρακτηριστικά:

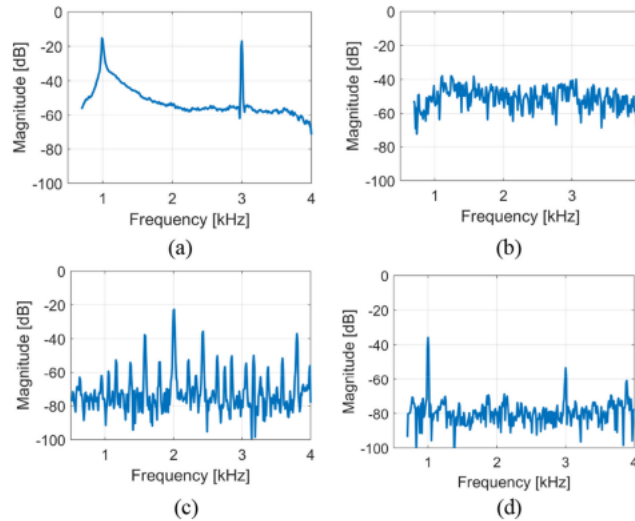
- Σχήμα 2.15α: Παρατηρείται έντονη αύξηση θορύβου (≥ 30 dB), που δημιουργεί την αίσθηση «βουίσματος». Για τη φασματική ανάλυση, χρησιμοποιείται γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) με περιορισμό στην περιοχή 700 Hz – 4 kHz, ώστε να εστιάζει στο φάσμα ευαισθησίας του ανθρώπινου αυτιού. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης σηματοδοτεί αποτυχία όταν η ενίσχυση του θορύβου ξεπερνά τα 10 dB.



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα ροής του αυτοματοποιημένου βραχίονα δοκιμών ESD [31]



Σχήμα 2.14: Παρατηρούμενα soft failures για την υπό εξέταση κάμερα [31]

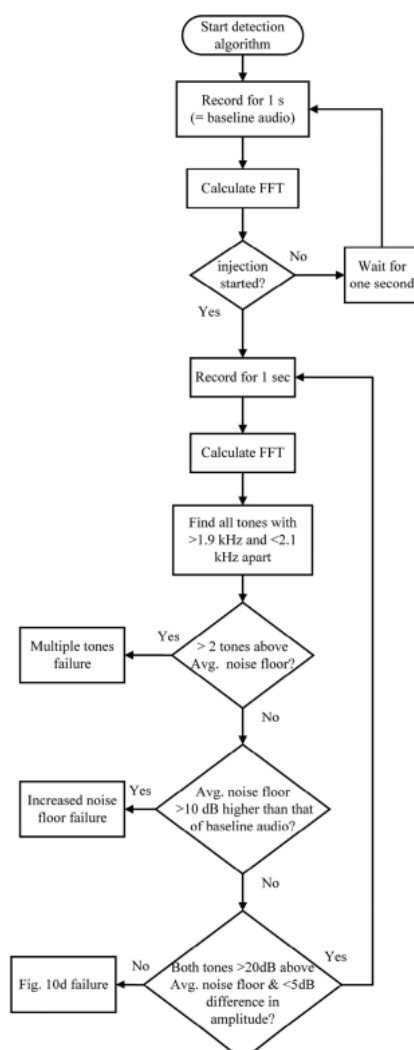


Σχήμα 2.15: Διαφορετικές παραλλαγές στο φασματικό περιεχόμενο του δοκιμαστικού ήχου [31]

- Σχήμα 2.15α: Παρατηρείται έντονη αύξηση θορύβου (≥ 30 dB), που δημιουργεί την αίσθηση «βουίσματος». Για τη φασματική ανάλυση, χρησιμοποιείται γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) με περιορισμό στην περιοχή 700 Hz – 4 kHz, ώστε να εστιάζει στο φάσμα ευαισθησίας του ανθρώπινου αυτιού. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης σηματοδοτεί αποτυχία όταν η ενίσχυση του θορύβου ξεπερνά τα 10 dB.
- Σχήμα 2.15β: Παρατηρείται πλήρης απώλεια των ηχητικών τόνων και παράλληλη αύξηση του θορύβου. Αν και η συμπεριφορά διαφέρει από την περίπτωση (α), ο μηχανισμός ανίχνευσης είναι ίδιος, συνεπώς δεν θεωρείται νέα κατηγορία σφάλματος.
- Σχήμα 2.15γ: Εμφανίζονται δύο νέοι ηχητικοί τόνοι με διαφορά συχνότητας κοντά στα 2 kHz (τυπικά 1 και 3 kHz). Ο αλγόριθμος εξετάζει την παρουσία τουλάχιστον δύο τόνων με απόσταση μεταξύ 1,9 και 2,1 kHz για να εντοπίσει την παραμόρφωση.
- Σχήμα 2.15δ: Οι αρχικοί τόνοι παραμένουν αλλά παρουσιάζουν εξασθένιση. Η αποτυχία εντοπίζεται μέσω δύο κατωφλίων: ο κάθε τόνος πρέπει να υπερβαίνει τον θόρυβο κατά τουλάχιστον 20 dB (T_1), και η μεταξύ τους διαφορά να μην ξεπερνά τα 5 dB (T_2). Παραβίαση οποιουδήποτε ορίου δηλώνει σφάλμα.

Το Σχήμα 2.16 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ανίχνευσης ήχου, ο οποίος εφαρμόζει τα παραπάνω κριτήρια για τη διάγνωση των ηχητικών σφαλμάτων.

Η χρήση πολλαπλών χαρακτηριστικών καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα ευαίσθητη και αξιόπιστη.



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ανίχνευσης και χαρακτηρισμού που βασίζεται σε ήχο [31]

Στη συνέχεια, περιγράφεται η δομή και η λειτουργία του συστήματος λογισμικού που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και αξιολόγηση των δεδομένων. Ειδικότερα, περιλαμβάνονται τεχνικές επεξεργασίας εικόνας (image registration, εντοπισμός χαρακτηριστικών pixel, υπολογισμός στατιστικών διαφορών), μέθοδοι φασματικής ανάλυσης ήχου, και εξαγωγής χαρακτηριστικών (όπως επίπεδα φωτεινότητας, μοτίβα κίνησης και ακουστικές κορυφές). Αναπτύσσονται επίσης αλγόριθμοι αυτόματης κατηγοριοποίησης και μέθοδοι ιεραρχικής αποτίμησης της σοβαρότητας των σφαλμάτων. Το σύστημα μπορεί να επεκταθεί ώστε να εντοπίζει και άλλα είδη βλαβών, όπως αλλαγές σε ενδείξεις LED ή αστοχίες αφής.

Οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται σε συσκευές καθημερινής χρήσης, όπως κάμερες και συσκευές αναπαραγωγής μουσικής (music players), με στόχο την ανίχνευση ήπιων, αλλά ουσιαστικών δυσλειτουργιών (soft failures). Στην περίπτωση της κάμερας, οι αστοχίες εκδηλώνονται μέσα από φαινόμενα όπως η «παγωμένη» εικόνα ή η απώλεια ευκρίνειας (θόλωση), τα οποία ανιχνεύονται με τη βοήθεια λογισμικού που αναλύει διαδοχικά καρέ ή αξιολογεί την ποιότητα εστίασης. Αντίστοιχα, στις συσκευές αναπαραγωγής μουσικής, η μεθοδολογία βασίζεται στη σύγκριση του ηχητικού σήματος πριν και μετά την εφαρμογή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD). Μέσω αυτής της σύγκρισης, οι αλγόριθμοι είναι σε θέση να εντοπίσουν είτε απώλεια ήχου (πλήρης σιγή), είτε την εμφάνιση ξένων και ανεπιθύμητων ήχων.

Συνολικά, η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός ρομποτικής αυτοματοποίησης, ανάλυσης εικόνας και ήχου (πολυτροπική ανάλυση) και έξυπνων αλγορίθμων δημιουργεί ένα αξιόπιστο και ευέλικτο πλαίσιο για τη μελέτη ήπιων αστοχιών. Η προσέγγιση αυτή μιμείται ρεαλιστικά την εμπειρία του χρήστη, επιτρέποντας την αντικειμενική καταγραφή και κατηγοριοποίηση των αποτυχιών, με υψηλή ακρίβεια και χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση σε κάθε βήμα της διαδικασίας.

2.5 Φαινόμενο ringing και προσπάθειες καταστολής του με φερρίτες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται μελέτες που εστιάζουν στην επίδραση του καλωδίου επιστροφής και του καλωδίου φόρτισης στη διαμόρφωση του φαινομένου ringing στις κυματομορφές εκφόρτισης εξ' επαφής. Εξετάζεται η χρήση φερρίτη για την απόσβεση των ταλαντώσεων, καθώς και η συμβολή της διάταξης του καλωδίου φόρτισης στον περιορισμό του ringing. Πρώτα όμως, γίνεται μία σύντομη παρουσίαση των φερριτών και του τρόπου λειτουργίας τους ως καταστολείς ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών [32].

2.5.1 Φερρίτες

2.5.1.1 Γενικά για τους φερρίτες

Οι φερρίτες είναι κεραμικά μαγνητικά οξείδια, αποτελούμενα από οξείδια μετάλλων, κυρίως οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3), και άλλα μεταλλικά οξείδια, όπως του νικελίου, του ψευδαργύρου ή του μαγγανίου. Ένα από τα πρώτα μαγνητικά οξείδια που

ανακαλύφθηκαν ήταν ο μαγνητίτης, ο οποίος αποτελείται από οξείδιο του σιδήρου και ήταν γνωστό από την αρχαιότητα για τις ισχυρές μαγνητικές του ιδιότητες [33].

Με την ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού τον 19^ο αιώνα από τον Hans Christian Oersted, επήλθε και η ανάπτυξη των ηλεκτρομαγνητών, βασισμένων στο σίδηρο και στα κράματα αυτού. Τα κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα, όπως το νικέλιο και ο κοβάλτιο, ήταν οι πρώτες επιλογές για τη δημιουργία μαγνητικών υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες. Ωστόσο, ενώ τα μεταλλικά κράματα προσέφεραν ικανοποιητική μαγνητική διαπερατότητα και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις πρώτες βιομηχανικές και ηλεκτρικές εφαρμογές, είχαν ως σημαντικό μειονέκτημα τις απώλειες ισχύος λόγω των δινορρευμάτων [33].

Τα δινορρεύματα δημιουργούνται όταν ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ρεύματα μέσα σε αγωγίμα (μεταλλικά) υλικά, προκαλώντας απώλειες ενέργειας υπό μορφή θερμότητας. Αυτό αποτελούσε σημαντικό εμπόδιο κυρίως σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπου οι μεταβολές του πεδίου είναι πιο γρήγορες. Παρόλο που εφαρμόστηκαν μέθοδοι όπως η διαίρεση των πυρήνων μετασχηματιστών σε λεπτές στρώσεις για τον περιορισμό των δινορρευμάτων, κατέστη σαφές ότι χρειαζόταν η ανάπτυξη υλικών με αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση [33].

Οι φερρίτες, που ανήκουν στα μαγνητικά οξείδια, θεωρήθηκαν εξαιρετικά κατάλληλα υλικά χάρη στις μοναδικές φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Σε αντίθεση με τα μεταλλικά υλικά, εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση, μειώνοντας σημαντικά τα δινορρεύματα. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές σε υψηλές συχνότητες, όπου απαιτείται περιορισμός των απωλειών ισχύος. Η μαγνητική τους συμπεριφορά συνδυάζεται με την κεραμική δομή, η οποία προσδίδει υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, διαφοροποιώντας τους από τα συνηθισμένα μεταλλικά μαγνητικά υλικά [33].

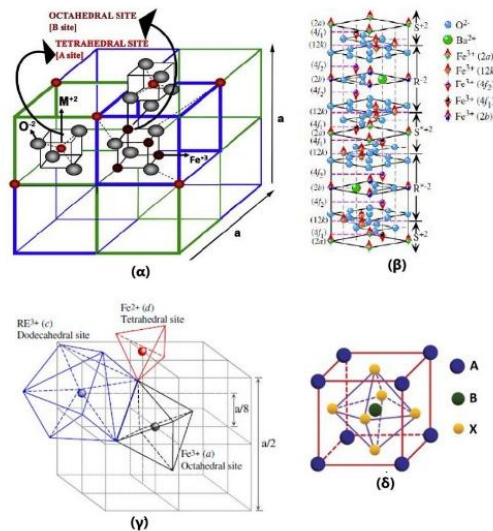
Οι φερρίτες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την απομαγνητότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα. Η πρώτη κατηγορία είναι οι μαλακοί φερρίτες, οι οποίοι διαθέτουν χαμηλή απομαγνητότητα, που μεταφράζεται σε ευκολία για την απομαγνήτιση τους χωρίς να χρειάζεται σημαντική εξωτερική μαγνητική δύναμη και υψηλή μαγνητική διαπερατότητα. Αποτελούν εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές υψηλής συχνότητας όπου απαιτείται γρήγορη εναλλαγή του μαγνητικού πεδίου και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μαγνητικής θωράκισης. Στους μαλακούς

φερρίτες εντάσσονται οι φερρίτες μαγγανίου – ψευδαργύρου και οι φερρίτες νικελίου – ψευδαργύρου [33]. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι σκληροί φερρίτες, με υψηλή απομαγνητότητα και χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα. Είναι πολύ δύσκολο να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν σε σχέση με τους μαλακούς φερρίτες και μπορούν να διατηρήσουν τη μαγνήτιση τους χωρίς εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως ηχεία, αισθητήρες και κινητήρες. Στους σκληρούς φερρίτες συγκαταλέγονται οι φερρίτες βαρίου και στροντίου [34].

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των φερριτών είναι ανάλογα με την κρυσταλλική τους δομή και διακρίνονται σε τύπου σπινελίου, τύπου γρανάτη, φερρίτες με εξαγωνική δομή και ορθοφερρίτες (ή αλλιώς φερρίτες τύπου περοβσκίτη) [33]. Οι φερρίτες τύπου σπινελίου είναι οι πιο γνωστοί, με αντιπροσωπευτικό μέλος τον μαγνήτιτη. Περιγράφονται από τον τύπο MFe_2O_4 , όπου M είναι συνήθως ένα δισθενές κατιόν όπως το κοβάλτιο ή ο ψευδάργυρος. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν τη δομική διαμόρφωση του σπινελίου $MgAl_2O_4$ και εξ αυτού πήρε το όνομα της η ομάδα. Οι φερρίτες εξαγωνικής δομής χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη κατιόντων μετάλλων, όπως το βάριο (Ba), το στρόντιο (Sr) ή το μόλυβδο (Pb), των οποίων η ακτίνα είναι παραπλήσια με αυτή των ιόντων οξυγόνου. Οι φερρίτες τύπου γρανάτη είναι μικτά οξείδια του σιδήρου και ενός άλλου τρισθενούς μετάλλου το οποίο έχει ιοντική ακτίνα μεγαλύτερη από του σιδήρου. Το τρισθενές αυτό μέταλλο μπορεί να είναι μια σπάνια γαία όπως το ύτριο ή οποιοδήποτε άλλο μέταλλο από το λανθάνιο μέχρι το υττέρβιο. Έχουν γενικό τύπο $Me_3Fe_2(FeO_4)_3$. Τέλος, Οι ορθοφερρίτες ή φερρίτες τύπου περοβσκίτη έχουν γενικό χημικό τύπο $MFeO_3$, όπου το M αντιπροσωπεύει ένα κατιόν σπάνιας γαίας, όπως το ιόν υτρίου. Οι κρυσταλλικές δομές των παραπάνω κατηγοριών φαίνονται στο Σχήμα 2.17 [34], [35], [36], [37].

2.5.1.2 Μαγνήτιση

Η πιο σημαντική ιδιότητα των φερριτών είναι η μαγνήτισή τους, η οποία οφείλεται στη μαγνητική ροπή των ηλεκτρονίων, που προκύπτει από το σπιν και το ηλεκτρικό τους φορτίο. Σε ιόντα με περιττό αριθμό ηλεκτρονίων, υπάρχουν μη αντισταθμισμένα σπιν, όπως συμβαίνει σε πολλά μέταλλα μετάπτωσης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον τρισθενή σίδηρο, που έχει πέντε μη αντισταθμισμένα σπιν [35].



Σχήμα 2.17: α) Στοιχειώδης κυψελίδα δομή σπινελίου, β) Δομή εξαφερρίτη, γ) Δομή γρανάτη, δ) Η γενική δομή του περοβσκίτη [34], [36], [37]

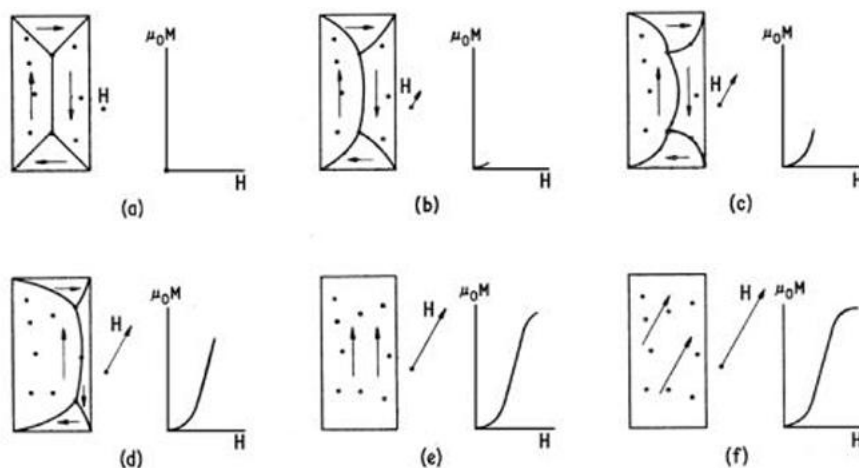
Όταν τα άτομα σχηματίζουν μεταλλικούς κρυστάλλους, οι μαγνητικές ροπές των σπιν προσανατολίζονται παράλληλα εντός κάθε κρυσταλλικής περιοχής. Αυτός ο προσανατολισμός ακολουθεί τη διεύθυνση ελάχιστης ενέργειας, και απαιτεί εξωτερική ενέργεια για να αλλάξει. Η κρυσταλλική ανισοτροπία (λόγω πλεγματικής δομής, μηχανικής καταπόνησης ή σχήματος) καθορίζει τον προτιμώμενο προσανατολισμό της μαγνήτισης, και όσο εντονότερη είναι, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η μαγνήτιση. Ο παράλληλος προσανατολισμός των σπιν οδηγεί σε μαγνητικό κορεσμό και η μαγνήτιση ορίζεται ως μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου. Η μορφή αυτής της μαγνήτισης ονομάζεται σιδηρομαγνητισμός ή φερρομαγνητισμός [35].

Στους φερρίτες τύπου σπινελίου, τα μεταλλικά ιόντα κατανέμονται σε τετραεδρικές (A) και οκταεδρικές (B) θέσεις και οι μαγνητικές ροπές τους είναι αντιπαράλληλες. Αν τα δύο υποπλέγματα ήταν ισοδύναμα, η συνολική μαγνητική ροπή θα ήταν μηδενική και το υλικό θα χαρακτηριζόταν αντιφερρομαγνητικό. Ωστόσο, επειδή τα πλέγματα A και B διαφέρουν ως προς το είδος και την ποσότητα των ιόντων, προκύπτει καθαρή μαγνήτιση — χαρακτηριστικό των φερριμαγνητικών υλικών. Για παράδειγμα, σε έναν σπινελικό φερρίτη, ένα από τα τρία ιόντα μετάλλου καταλαμβάνει τετραεδρική θέση και τα άλλα δύο οκταεδρικές. Έτσι, παραμένει η μαγνητική ροπή ενός ιόντος (π.χ. πέντε μη αντισταθμισμένα σπιν για τον Fe^{3+}), με αποτέλεσμα καθαρή μαγνήτιση πέντε σπιν ανά μόριο [35].

Οι κρύσταλλοι φερριτών χωρίζονται σε μαγνητικές περιοχές (domains) με διαφορετικούς προσανατολισμούς σπιν, ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό μαγνητικό πεδίο. Τα τοιχώματά τους (Bloch walls) είναι περιοχές σταδιακής αλλαγής σπιν, με ενεργειακό κόστος λόγω της αντίθεσης προς την ανισοτροπία. Ο αριθμός και η διάταξη αυτών των περιοχών εξισορροπεί την ενέργεια των τοιχωμάτων και του πεδίου απομαγνήτισης. Όταν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τα τοιχώματα μετακινούνται, αυξάνοντας την έκταση των περιοχών με ίδιο προσανατολισμό μαγνήτισης με το πεδίο [35].

Στην πράξη, τα μαγνητικά τοιχώματα (όρια μεταξύ μαγνητικών περιοχών) τείνουν να κινούνται μέσα από κρυσταλλικές ατέλειες όπως κενά ή καταπονημένες περιοχές, επειδή αυτό είναι ενεργειακά ευνοϊκό. Στο Σχήμα 2.18 φαίνεται η διαδικασία μαγνήτισης. Στην αρχική κατάσταση (a), χωρίς εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα τοιχώματα είναι ευθύγραμμα. Καθώς εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο H σταθερής διεύθυνσης αλλά αυξανόμενης έντασης, παρατηρούνται τα εξής:

- Σε χαμηλές εντάσεις (b), τα τοιχώματα παραμένουν σχεδόν στη θέση τους λόγω των ατελειών, αλλά παραμορφώνονται σαν μεμβράνη υπό πίεση. Η μαγνήτιση αυξάνεται αργά, λόγω της δυσκαμψίας των τοιχωμάτων, χαράσσοντας το αρχικό τμήμα της καμπύλης μαγνήτισης.
- Με αυξανόμενη ένταση πεδίου (c, d), τα τοιχώματα ξεπερνούν τις ατέλειες και μετατοπίζονται, αλλά η διαδικασία είναι μη αναστρέψιμη — όταν το πεδίο αφαιρεθεί, τα τοιχώματα δεν επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις.
- Όταν όλο το υλικό αποκτήσει ομοιόμορφη μαγνητική περιοχή (e), περαιτέρω αύξηση του πεδίου (f) απλώς ευθυγραμμίζει πλήρως το διάνυσμα της μαγνήτισης με το εξωτερικό πεδίο. Η καμπύλη μαγνήτισης οριζοντιώνεται, υποδεικνύοντας μαγνητικό κορεσμό – δεν υπάρχει περαιτέρω αύξηση της μαγνήτισης, ακόμα και με ισχυρότερο πεδίο.

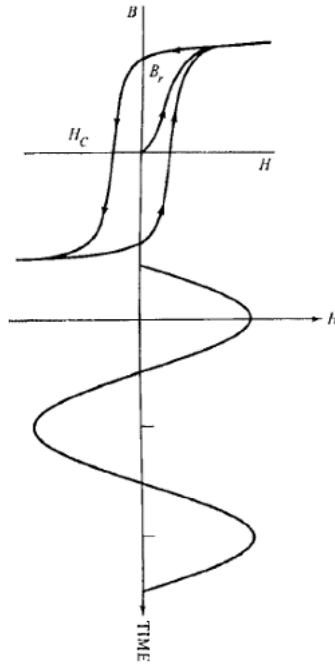


Σχήμα 2.18: Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας μαγνήτισης [35]

Αν στη συνέχεια εφαρμοστεί εναλλασσόμενο πεδίο γύρω από το μηδέν, η καμπύλη δεν ακολουθεί την αρχική πορεία, λόγω των μη αντιστρεπτών αλλαγών των τοιχωμάτων. Αντί γι' αυτό, εμφανίζεται μαγνητική υστέρηση: η μαγνήτιση "υστερεί" ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο και διαγράφει έναν κλειστό βρόχο στην καμπύλη μαγνήτισης, γνωστό ως βρόχος υστέρησης.

Ο βρόχος υστέρησης απεικονίζει τη σχέση μεταξύ μαγνητικής επαγωγής και έντασης μαγνητικού πεδίου και είναι θεμελιώδης για την κατανόηση της συμπεριφοράς μαγνητικών υλικών. Ένα σχηματικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Δημιουργείται κατά την αρχική μαγνήτιση ενός πλήρως απομαγνητισμένου υλικού μέσω εφαρμογής εξωτερικού πεδίου αυξανόμενης έντασης, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μετατόπιση των μαγνητικών τοιχωμάτων και τελικά τον κορεσμό του υλικού.

Αν το πεδίο αποσυρθεί πρόωρα, προκύπτει μερική μαγνήτιση και σχηματίζεται υποβρόχος υστέρησης. Η καμπύλη της αρχικής μαγνήτισης περιγράφεται από τη σχέση $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$, και η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής ορίζεται ως μαγνήτιση κόρου (B_s). Η παραμένουσα μαγνήτιση (B_r) και η απομαγνητότητα (H_c) χαρακτηρίζουν αντίστοιχα την υπολειπόμενη μαγνήτιση και την απαιτούμενη ένταση πεδίου για τον μηδενισμό της.



Σχήμα 2.19: Σχηματικό διάγραμμα της σχέσης του ρεύματος ημιτονοειδούς κύματος που οδηγεί τη μαγνήτιση επί του βρόχου υστέρησης ανά κύκλο ημιτονοειδούς κύματος [35]

Ο βρόχος υστέρησης, ειδικά σε εναλλασσόμενο πεδίο, αποκαλύπτει τις ενεργειακές απώλειες του υλικού, τόσο λόγω μαγνητικής υστέρησης όσο και λόγω δινορρευσμάτων, οι οποίες αυξάνονται με τη συχνότητα και επηρεάζουν την απόδοση του υλικού σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

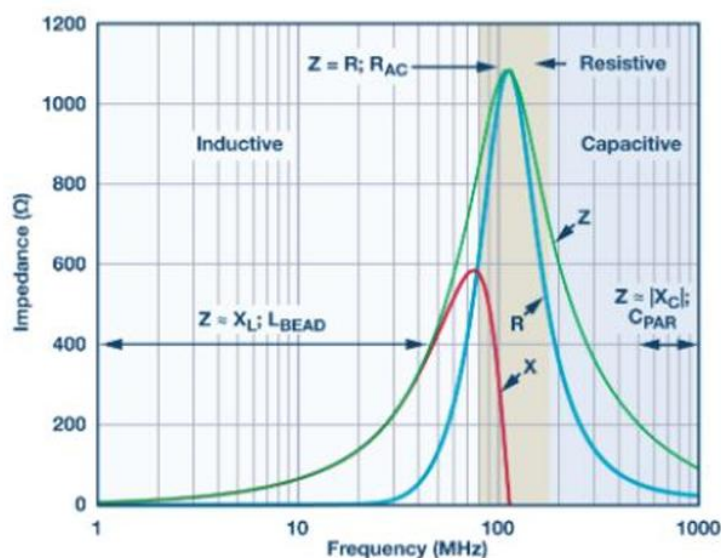
2.5.1.3 Φερρίτες και ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

Όπως προαναφέρθηκε, οι φερρίτες χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, ιδιαίτερα στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Μέσω μαγνητικών κυκλωμάτων αυξάνουν τη σύνθετη αντίσταση ενός κυκλώματος είτε με τη μορφή της ωμικής αντίστασης είτε με την μορφή της επαγωγικής αντίδρασης. Κάθε διαφορετικός τύπος φερρίτη έχει διαφορετικά αποτελέσματα, αφού οι ιδιότητες τους έχουν άμεση σχέση με την δομή του υλικού. Ως επί το πλείστον για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών χρησιμοποιούνται μαλακοί φερρίτες [38].

Η πιο σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της ικανότητας καταστολής των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι η σύνθετη αντίσταση Z , η οποία εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα. Η σύνθετη αντίσταση ορίζεται ως $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, όπου R είναι η ισοδύναμη αντίσταση και X_L η ισοδύναμη αυτεπαγωγή [25]. Σε χαμηλές συχνότητες, η ωμική αντίσταση R είναι πολύ μικρότερη από την επαγωγική αντίδραση

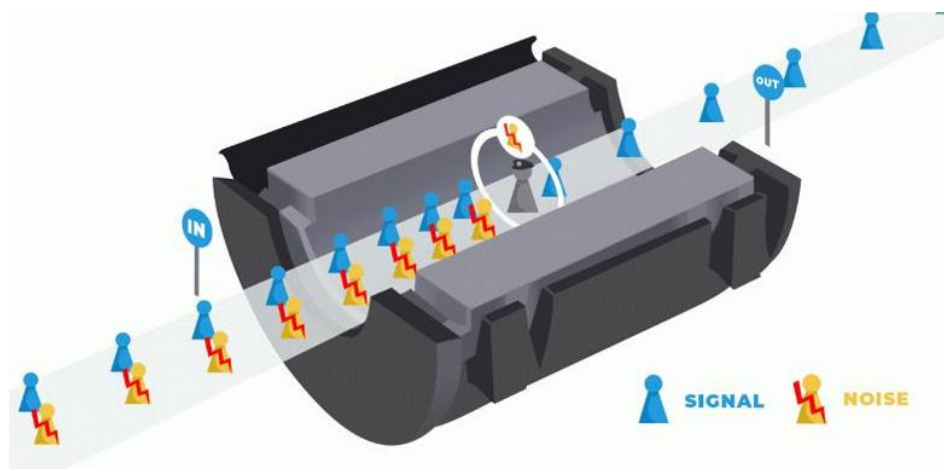
X_L , η οποία τελικά κυριαρχεί και καθορίζει τη συνολική σύνθετη αντίσταση του συστήματος. Σε αυτό το εύρος συχνοτήτων, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μειώνονται κυρίως λόγω της επαγωγικής δράσης. Ωστόσο, σε συχνότητες όπου παρατηρείται απότομη πτώση της μαγνητικής διαπερατότητας (όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20), η αυτεπαγωγή μειώνεται και η ωμική αντίσταση αυξάνεται, με αποτέλεσμα η καταστολή των παρεμβολών να βασίζεται κυρίως στην απορρόφησή τους και τη μετατροπή τους σε θερμότητα. Η επιλογή του κατάλληλου φερρίτη βασίζεται στο προφίλ της σύνθετης αντίστασής του, και πιο συγκεκριμένα στο εύρος συχνοτήτων όπου αυτή παρουσιάζει μέγιστη τιμή. Η σύμπτωση αυτού του εύρους με τη συχνότητα των ανεπιθύμητων διαταραχών είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή του κατάλληλου τύπου φερρίτη [38].

Ένα είδος φερριτών που χρησιμοποιείται ως καταστολέας ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι οι φερρίτες αρπαγής (clamp-in ferrites). Οι φερρίτες αρπαγής είναι παθητικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών υψηλής συχνότητας. Κατασκευάζονται κυρίως από μαλακούς φερρίτες τύπου MnZn ή NiZn και έχουν κυλινδρικό σχήμα. Συναντώνται συχνά στα καλώδια τροφοδοσίας ηλεκτρονικών συσκευών και τοποθετούνται πάνω στους αγωγούς για να φιλτράρουν ανεπιθύμητα σήματα, απορροφώντας τον θόρυβο και μετατρέποντάς τον σε θερμότητα, περιορίζοντας αλώγιμες και ακτινοβολούμενες παρεμβολές.



Σχήμα 2.20: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη της σύνθετης αντίστασης Z , με τις επιμέρους καμπύλες ωμικής αντίστασης R και αντίδρασης X ενός φερρίτη [38]

Μία αναπαράσταση της λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο φαίνεται στο Σχήμα 2.21 [39].



Σχήμα 2.21: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο θορύβου [39]

Κάθε φερρίτης διαθέτει χαρακτηριστική καμπύλη που περιγράφει τη συμπεριφορά της αντίστασης, της αυτεπαγωγής και της σύνθετης αντίστασης σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Η καμπύλη αυτή δείχνει το εύρος συχνοτήτων όπου η σύνθετη αντίσταση μεγιστοποιείται, υποδεικνύοντας την αποτελεσματική ζώνη λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο θορύβου. Η λειτουργία τους διακρίνεται σε τρεις περιοχές: επαγωγική, αντιστατική και χωρητική. Για την απόσβεση θορύβου υψηλής συχνότητας, ο φερρίτης πρέπει να λειτουργεί στην αντιστατική περιοχή, όπου συμπεριφέρεται ως αντίσταση και απορροφά τον θόρυβο. Η αντιστατική περιοχή ξεκινά από τη συχνότητα όπου $X = R$ και φτάνει μέχρι τη συχνότητα όπου $-X = R$, οριοθετώντας την αρχή της χωρητικής περιοχής. Η επαγωγική περιοχή προηγείται χρονικά και συχνотικά της αντιστατικής [39]. Για τους παραπάνω λόγους, έχει μελετηθεί αρκετά η επίδραση των φερριτών στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση και ειδικά στο φαινόμενο ringing που παρατηρείται στην κυματομορφή αυτής.

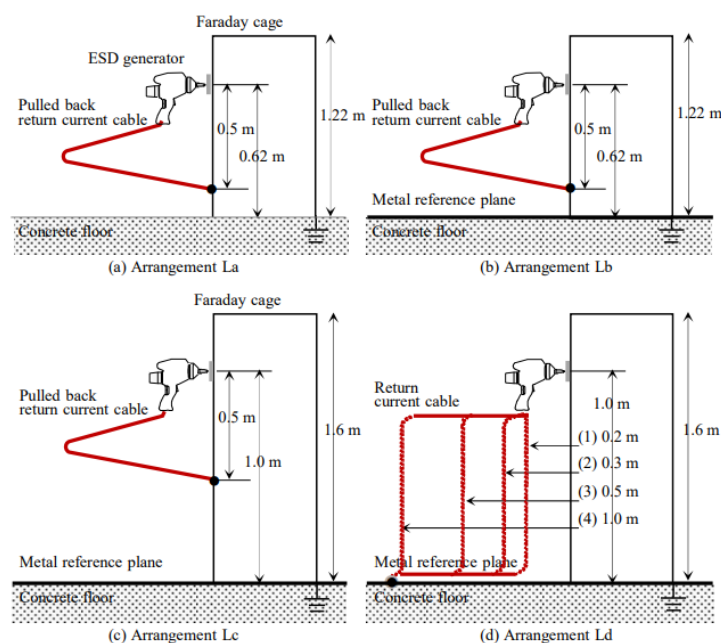
2.5.2 Μελέτη της επίδρασης του καλωδίου επιστροφής στο φαινόμενο ringing

Στη μελέτη τους οι **Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jiaqing Wang** και **Osamu Fujiwara** [40] εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο η διάταξη του καλωδίου επιστροφής ρεύματος και το περιβάλλον μέτρησης επηρεάζουν την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης κατά τη διαδικασία διακρίβωσης γεννήτριας ESD σε εκφορτίσεις επαφής. Η εργασία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς μέχρι σήμερα το ισχύον πρότυπο

IEC 61000-4-2 ορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις για την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, αλλά δεν καθορίζει περιορισμούς αναφορικά με το φαινόμενο των αποσβεννόμενων ταλαντώσεων (ringing), οι οποίες εμφανίζονται μετά την πρώτη κορυφή της κυματομορφής.

Στο πλαίσιο της μελέτης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διακρίβωσης επαφής με χρήση γεννήτριας ESD στα 4 kV, εφαρμόζοντας διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής ρεύματος σε διαφορετικά περιβάλλοντα μέτρησης. Το μήκος του καλωδίου σε όλες τις δοκιμές ήταν 2 μέτρα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου. Κατά τη διαδικασία της μέτρησης καταγράφηκαν οι κυματομορφές του ρεύματος και αναλύθηκαν τα φασματικά χαρακτηριστικά τους μέσω Fourier, με στόχο την εκτίμηση της συχνότητας και της έντασης των ταλαντώσεων που εμφανίζονται μετά την κορυφή του παλμού.

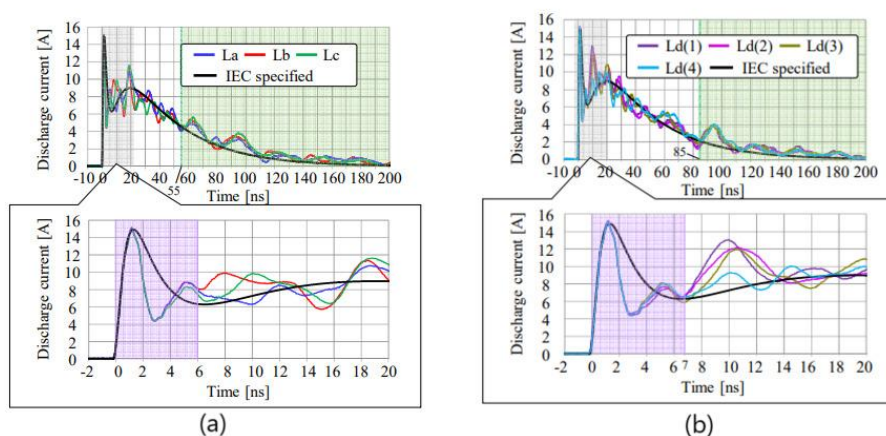
Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τέσσερις κύριες διατάξεις μέτρησης, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 2.22: La, Lb, Lc και Ld. Οι διατάξεις La και Lb πληρούν πλήρως τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2 και διαφοροποιούνται μεταξύ τους μόνο ως προς την παρουσία ή όχι μεταλλικής οριζόντιας επιφάνειας αναφοράς (ground plane) στο δάπεδο.



Σχήμα 2.22: Διατάξεις μέτρησης για τη μελέτη επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής στην κυματομορφή ρεύματος [40]

Η διάταξη Lc διαφοροποιείται από τις προηγούμενες κυρίως ως προς το ύψος τοποθέτησης του στόχου και του σημείου γείωσης, φτάνοντας το 1 μέτρο από το δάπεδο, σε αντίθεση με τις La και Lb όπου το ύψος είναι 62 εκατοστά. Τέλος, η διάταξη Ld βρίσκεται εκτός προδιαγραφών του Προτύπου, καθώς το καλώδιο επιστροφής ρεύματος δεν σχηματίζει το απαιτούμενο ισοσκελές τρίγωνο αλλά αντίθετα αιωρείται και εκτείνεται ελεύθερα πριν ακουμπήσει το δάπεδο.

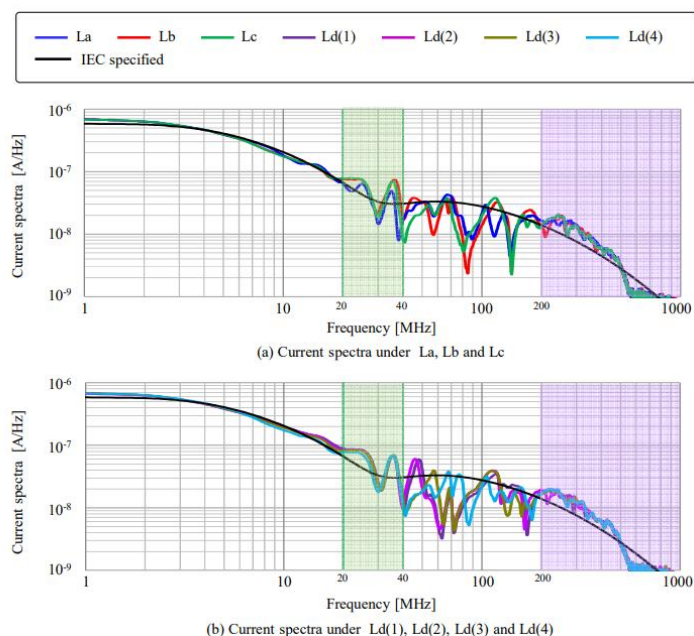
Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι κυματομορφές των διατάξεων La, Lb και Lc παρουσίαζαν παρόμοια συμπεριφορά για χρόνους μικρότερους των 6ns και μεγαλύτερους των 55ns. Ωστόσο, μεταξύ αυτών των χρονικών διαστημάτων παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές, ιδιαίτερα έντονες στη ζώνη 6–55 ns, όπου το φαινόμενο των ταλαντώσεων (ringing) εμφανίζεται πιο έντονο. Στη συνέχεια της μελέτης εξετάστηκε εκτενέστερα η διάταξη Ld, η οποία δοκιμάστηκε με τέσσερις υποδιατάξεις (Ld1 έως Ld4), διαφοροποιούμενες μόνο ως προς τον τρόπο ανάρτησης και την απόσταση του καλωδίου από τα τοιχώματα του κλωβού. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι σε ορισμένες υποδιατάξεις (Ld3 και Ld4) οι τιμές του ρεύματος στα 60 ns (I_{60}) υπερέβησαν τα ανώτατα όρια που θέτει το Πρότυπο, γεγονός που αναδεικνύει την επίδραση της ελεύθερης διάταξης του καλωδίου στην ένταση των ταλαντώσεων, ενώ γενικά οι κυματομορφές των υποδιατάξεων παρουσίαζαν παρόμοια συμπεριφορά για χρόνους μικρότερους των 7ns και μεγαλύτερους των 85ns. Ενδεικτικά κυματομορφές από τα παραπάνω σενάρια δείχνονται στο Σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23: Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [40]

Αντίστοιχες αποκλίσεις καταγράφηκαν και στο φασματικό περιεχόμενο των κυματομορφών. Οι φασματικές αναλύσεις αποκάλυψαν μεγάλες διαφορές στην

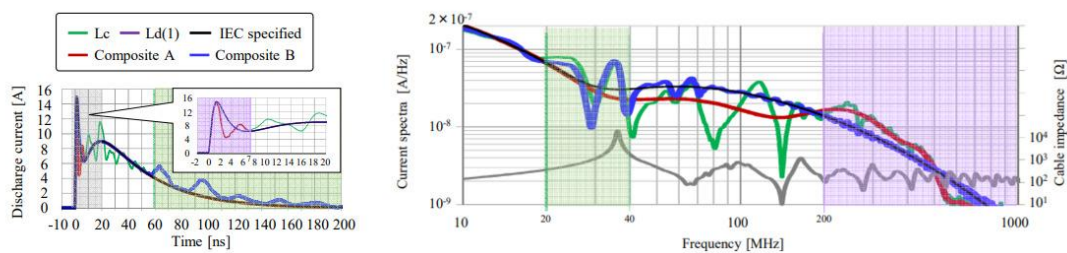
περιοχή συχνοτήτων 40 MHz έως 200 MHz, γεγονός που αποδεικνύει ότι η διάταξη του καλωδίου και το περιβάλλον μέτρησης επηρεάζουν κυρίως αυτό το φασματικό εύρος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24: Σύγκριση φασματικών περιεχομένων των κυματομορφών ρεύματος για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [40]

Για την πληρέστερη κατανόηση των φασματικών ιδιοτήτων των κυματομορφών, οι ερευνητές κατασκεύασαν συνθετικές κυματομορφές (Composite Waveforms) μέσω συνδυασμού μετρούμενων κυματομορφών και της ιδανικής κυματομορφής που ορίζεται στο Πρότυπο. Δημιουργήθηκαν δύο τύποι: η Σύνθετη Α, η οποία ακολουθεί την πραγματική κυματομορφή μέχρι τα 7 ns και στη συνέχεια προσαρμόζεται στην ιδανική του Προτύπου, και η Σύνθετη Β, η οποία ταυτίζεται αρχικά με την ιδανική κυματομορφή μέχρι τα 60 ns ή 85 ns και στη συνέχεια ταυτίζεται με την μετρούμενη.

Η ανάλυση του φασματικού περιεχομένου αυτών των συνθετικών κυματομορφών επιβεβαίωσε ότι οι ζώνες συχνοτήτων κάτω των 40 MHz και άνω των 200 MHz δεν επηρεάζονται από τη διάταξη του καλωδίου ή το περιβάλλον μέτρησης. Η περιοχή 40–200 MHz, ωστόσο, εξαρτάται έντονα από τα παραπάνω, γεγονός που δικαιολογεί τις αποκλίσεις και το φαινόμενο ringing. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το φάσμα κάτω των 40 MHz αντιστοιχεί κυρίως σε φαινόμενα μετά τα 60 ns (ή 85 ns), ενώ το φάσμα άνω των 200 MHz σχετίζεται με τα πρώτα 7 ns του παλμού, όπου κυριαρχεί η απότομη ανύψωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25 ενδεικτικά για την Σύνθετη Α της διάταξης Lc.



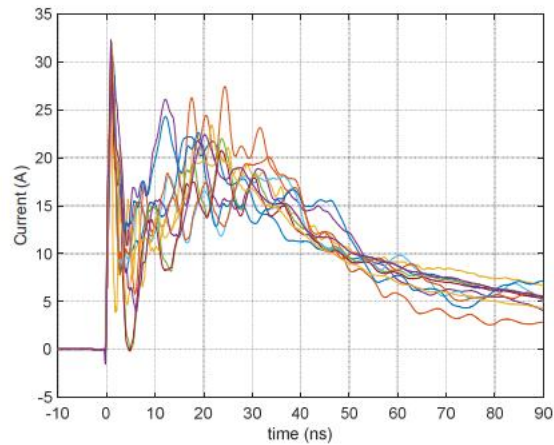
Σχήμα 2.25: Σύγκριση κυματομορφών και φασμάτων για την Σύνθετη Α κυματομορφή της Lc διάταξης του καλωδίου επιστροφής [40]

Το γενικό συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι, παρά το γεγονός ότι όλες οι διατάξεις (εκτός της Ld) συμμορφώνονται με τις βασικές απαιτήσεις του IEC 61000-4-2 ως προς τα χαρακτηριστικά σημεία της κυματομορφής (I_p , I_{30} , I_{60}), το φαινόμενο ringing δεν μπορεί να αγνοηθεί. Αντίθετα, αποτελεί άμεση συνέπεια της διάταξης του καλωδίου επιστροφής και του τρόπου μέτρησης, με άμεσες επιπτώσεις στο φάσμα συχνοτήτων και κατά συνέπεια στη συμπεριφορά των εξαρτημάτων ή συστημάτων υπό δοκιμή. Η μελέτη αυτή τονίζει τη σημασία της λεπτομερούς περιγραφής και τυποποίησης της διάταξης του καλωδίου στις δοκιμές ESD, προκειμένου να διασφαλιστεί καλύτερη επαναληψιμότητα και αξιοπιστία στις μετρήσεις.

2.5.3 Μελέτες μείωσης του φαινομένου ringing με χρήση φεριττών

Οι **Carlo Carobbi**, **Alain Burger** και **Spartaco Caniggia** στην εργασία τους [41] εξετάζουν την επίδραση που έχει τόσο η διάταξη του καλωδίου επιστροφής, όσο και η εισαγωγή φερριτή (ferrite core) κατά μήκος του καλωδίου αυτού, στη μορφή της κυματομορφής εκφόρτισης κατά τη διαδικασία διακρίβωσης με εκφορτίσεις επαφής γεννητριών ESD. Το κεντρικό πρόβλημα που μελετάται είναι το φαινόμενο των αποσβεννυόμενων ταλαντώσεων (ringing) που εμφανίζονται κυρίως μεταξύ 10ns και 40ns μετά την πρώτη κορυφή του παλμού ρεύματος.

Η μελέτη βασίστηκε σε προηγούμενη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε το 2019, όπου συμμετείχαν έντεκα διαφορετικές γεννήτριες ESD από πολλούς κατασκευαστές, μετρώντας τις κυματομορφές τους σε τρία διαπιστευμένα εργαστήρια. Παρά το γεγονός ότι όλες οι γεννήτριες πληρούσαν τις βασικές απαιτήσεις του προτύπου IEC 61000-4-2 ως προς το μέγιστο ρεύμα, το χρόνο ανόδου, το I_{30} και το I_{60} , το φαινόμενο των ταλαντώσεων (ringing) που παρατηρήθηκε ήταν ιδιαίτερα έντονο και διαφοροποιούνταν σημαντικά από μοντέλο σε μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.26.

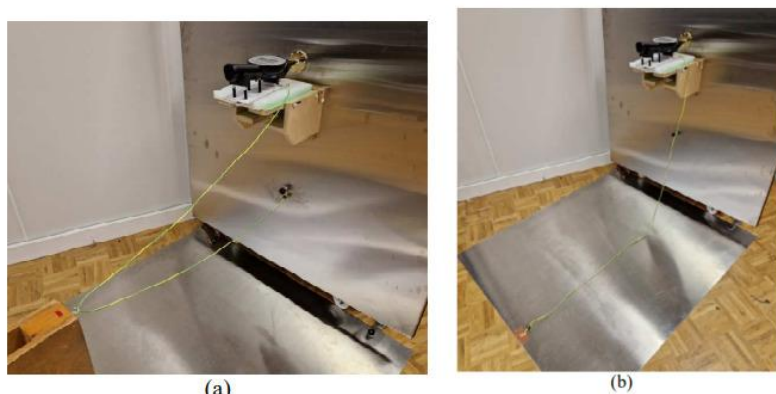


Σχήμα 2.26: Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης 11 γεννητριών ESD για εκφορτίσεις επαφής των 8kV[41]

Για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού, εξετάστηκε τόσο πειραματικά όσο και μέσω προσομοιώσεων, η εισαγωγή κατάλληλου φερρίτη (χρησιμοποιήθηκαν φερρίτες της εταιρείας Fair Rite με κωδικούς 2643625002 και 2643806402). Η διάταξη στην οποία πάρθηκαν οι μετρήσεις είναι η τυποποιημένη διάταξη διακρίβωσης, που περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2, με την προσθήκη ενός οριζοντίου επιπέδου γείωσης συνδεδεμένο με το κατακόρυφο επίπεδο γείωσης, προκειμένου να βελτιωθεί η αναπαραγωγικότητα της διαδικασίας. Μελετήθηκε η επίδραση των φερριτών σε δύο σημεία σύνδεσής τους: στο σημείο όπου το καλώδιο επιστροφής συνδέεται με τη γείωση και στο σημείο όπου το καλώδιο επιστροφής συνδέεται με τη γεννήτρια. Παράλληλα, εξετάστηκαν διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου, όπως η «τριγωνική» διάταξη διακρίβωσης που ορίζει το Πρότυπο, η «πραγματική» που προσομοιάζει τη πραγματική διάταξη δοκιμών και η «απομονωμένη πραγματική», που είναι σαν την «πραγματική» ανυψώνοντας όμως ένα τμήμα του καλωδίου, ώστε να απομονωθεί από τη γείωση. Οι δύο πρώτες διατάξεις φαίνονται στο Σχήμα 2.27.

Στον πρώτο γύρο μετρήσεων διερευνήθηκε η «τριγωνική» διάταξη του καλωδίου. Μελετήθηκαν και οι δύο φερρίτες στις δύο διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικό αριθμό σπειρών. Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η εισαγωγή του φερρίτη είναι αποτελεσματική κυρίως στην καταστολή του φαινομένου ringing στην περιοχή των 20ns. Αντίθετα, ο χρόνος ανόδου, το μέγιστο ρεύμα και το I_{60} σπάνια επηρεάζονται από την εισαγωγή φερριτών. Παρατηρήθηκε ακόμα, πως ο φερρίτης φέρει καλύτερα αποτελέσματα όταν τοποθετείται στο άκρο στο άκρο που έρχεται σε επαφή με τη γείωση. Προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος CST

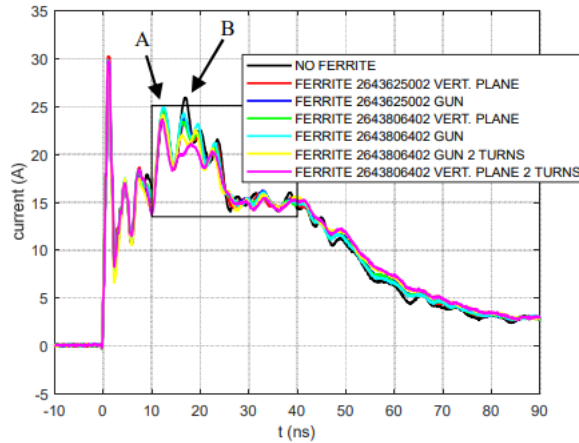
Microwave Studio επιβεβαίωσαν τα πειραματικά ευρήματα, ενώ επέτρεψαν την ανάλυση της συμπεριφοράς διαφορετικών διατάξεων καλωδίων και θέσεων φερρίτη χωρίς την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Στο Σχήμα 2.28 ευδιάκριτη είναι η μικρή μείωση της κορυφής της Α με την εισαγωγή του φερρίτη, ενώ η κορυφή Β παρουσιάζει έντονη εξασθένηση. Η κυματομορφή Β χωρίς φερρίτη βρίσκεται εκτός προδιαγραφών της νέας έκδοσης του Προτύπου, για χρόνους μεταξύ των 10ns και 40ns. Τα όρια των προδιαγραφών απεικονίζονται με το παραλληλόγραμμο μεταξύ 10ns και 40ns.



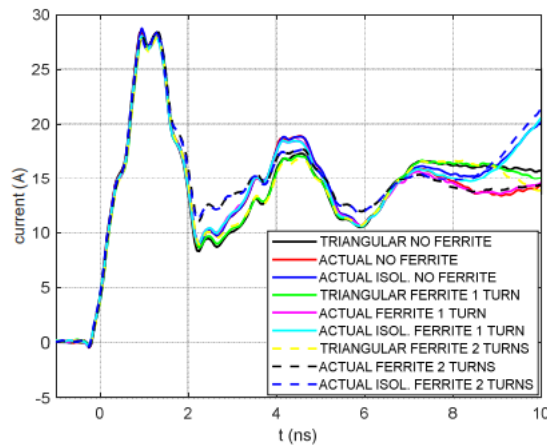
Σχήμα 2.27: "Τριγωνική" (a) και "πραγματική" (b) διάταξη του καλωδίου επιστροφής [41]

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δεύτερος γύρος μετρήσεων, όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο ο φερρίτης με κωδικό 2643625002 σε όλες τις διατάξεις του καλωδίου επιστροφής. Από τις μετρήσεις αυτές επιβεβαιώθηκε ότι η χρήση της «πραγματικής» διάταξης σε συνδυασμό με την τοποθέτηση φερρίτη κοντά στο σημείο γείωσης οδηγεί στη μέγιστη απόσβεση του φαινομένου ringing και διασφαλίζει καλύτερη συμμόρφωση της γεννήτριας με τις νέες απαιτήσεις της τρίτης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 αναφορικά με τη δεύτερη κορυφή του παλμού, ενώ η κορυφή Α δεν επηρεάζεται από την εφαρμογή φερριτών. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.29.

Συμπερασματικά, η εργασία αποδεικνύει ότι η σωστή επιλογή διάταξης καλωδίου επιστροφής και η στρατηγική τοποθέτηση κατάλληλου φερρίτη μπορούν να μειώσουν σημαντικά το πρόβλημα των ταλαντώσεων στις κυματομορφές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων επαφής. Ακόμη συμπεραίνεται ότι εφαρμογή φερρίτη και η διάταξη του καλωδίου δεν επηρεάζουν την πρώτη κορυφή και το χρόνο ανόδου, καθώς και ότι ο φερρίτης πρέπει να τοποθετείται επί του καλωδίου επιστροφής κοντά στο άκρο στο οποίο πραγματοποιείται η σύνδεση με τη γείωση.



Σχήμα 2.28: Αποτελέσματα πρώτου γύρου μετρήσεων [41]



Σχήμα 2.29: Αποτελέσματα δεύτερου γύρου μετρήσεων [41]

Προτείνεται η χρήση της «πραγματικής» διάταξης του καλωδίου επιστροφής κατά τη διαδικασία διακρίβωσης της γεννήτριας καθώς αυτή είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών σε εξοπλισμό. Το αποτέλεσμα είναι η βελτίωση της επαναληψιμότητας και της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών ESD, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και καλύτερη προσαρμογή των μετρήσεων στις πραγματικές συνθήκες εφαρμογής.

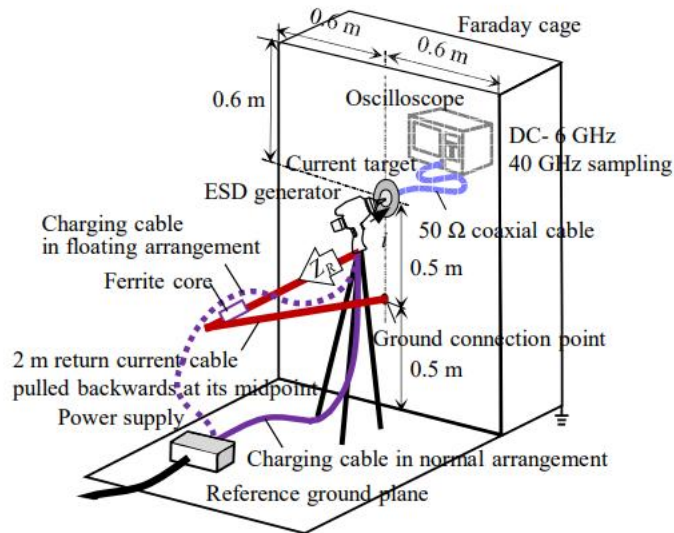
Οι **Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jianqing Wang** και **Osamu Fujiwara** στην εργασία τους [42] εξετάζουν την επίδραση του φερριτή, όταν αυτός τοποθετείται στο μέσο του καλωδίου επιστροφής κατά τη διαδικασία διακρίβωσης σε επίπεδο τάσης 4kV.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες τους [40], [43], [44], έχει διαπιστωθεί ότι το φαινόμενο του ringing στις κυματομορφές εκφόρτισης εξ επαφής οφείλεται κυρίως σε

συντονιστικά φαινόμενα του καλωδίου επιστροφής ρεύματος. Οι φασματικές διακυμάνσεις που προκαλούνται από το φαινόμενο ringing εμφανίζονται κυρίως στο εύρος συχνοτήτων 40 MHz έως 200 MHz, καθώς οι περιοχές κάτω των 40 MHz και άνω των 200 MHz σχετίζονται με την εσωτερική αρχιτεκτονική των γεννητριών ESD και δεν επηρεάζονται από τη διάταξη του καλωδίου ή το περιβάλλον μέτρησης. Επίσης, μέσα από έρευνες που εστιάζουν στη διάταξη του καλωδίου φόρτισης της γεννήτριας, προέκυψε ότι όταν το καλώδιο φόρτισης αιωρείται πάνω από τη μεταλλική επιφάνεια γείωσης, το ringing καταστέλλεται πιο αποτελεσματικά συγκριτικά με την περίπτωση όπου το καλώδιο ακουμπά πάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Παρόλα αυτά, δεδομένα από προηγούμενες μελέτες, όπου χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια ESD μπαταρίας με ενσωματωμένο εργοστασιακά φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής, έδειξαν ότι το ringing εξακολουθεί να εμφανίζεται, γεγονός που καθιστά αβέβαιο κατά πόσο η προσθήκη φερρίτη από μόνη της είναι επαρκής για την πλήρη καταστολή του φαινομένου.

Τα παραπάνω οδήγησαν τους ερευνητές να εξετάσουν τη μείωση του φαινομένου ringing με την εφαρμογή φερριτών αλλά λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά συντονισμού των καλωδίων επιστροφής. Η μελέτη εξετάζει δύο διαφορετικές γεννήτριες ESD: μία τροφοδοτούμενη από μπαταρία (γεννήτρια D) και μία τροφοδοτούμενη από εναλλασσόμενο ρεύμα (γεννήτρια B). Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε καλώδιο επιστροφής μήκους 2 μέτρων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2. Η διαφορά μεταξύ των δύο γεννητριών έγκειται στο γεγονός ότι το καλώδιο της γεννήτριας D διαθέτει εργοστασιακά τοποθετημένο φερρίτη, ενώ στη γεννήτρια B προστέθηκε κυλινδρικός φερρίτης (τύπου ZCAT3035-1330) στο κέντρο του καλωδίου, προκειμένου να εξεταστεί η επίδρασή του στη μείωση του φαινομένου ringing. Στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζεται η διάταξη μετρήσεων, η οποία συμμορφώνεται με το Πρότυπο.

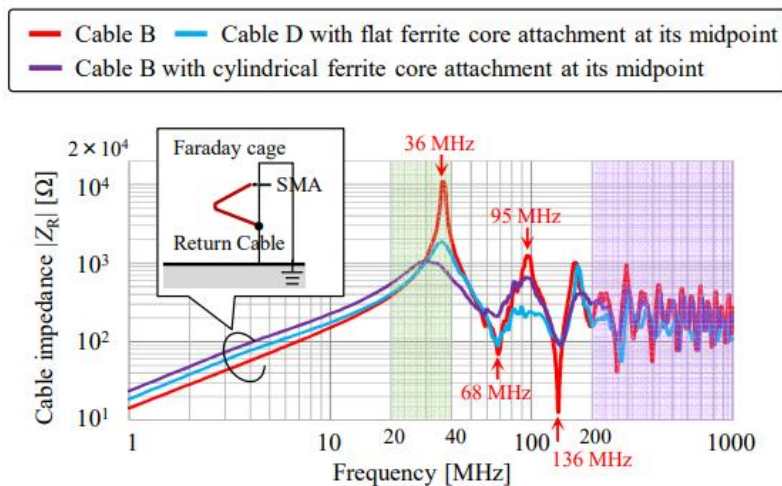
Στο Σχήμα 2.31 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές συχνότητες της σύνθετης αντίστασης $|Z_R|$ των καλωδίων επιστροφής, οι οποίες σχετίζονται με τις συντονιστικές συμπεριφορές τους. Η χρήση φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής, είτε εργοστασιακά ενσωματωμένου (καλώδιο D) είτε πρόσθετου (καλώδιο B με φερρίτη), οδηγεί σε μείωση των κορυφών συντονισμού στα 40 MHz και 100 MHz, περιορίζοντας το ringing λόγω της μείωσης του συντελεστή ποιότητας (quality factor Q) του καλωδίου.



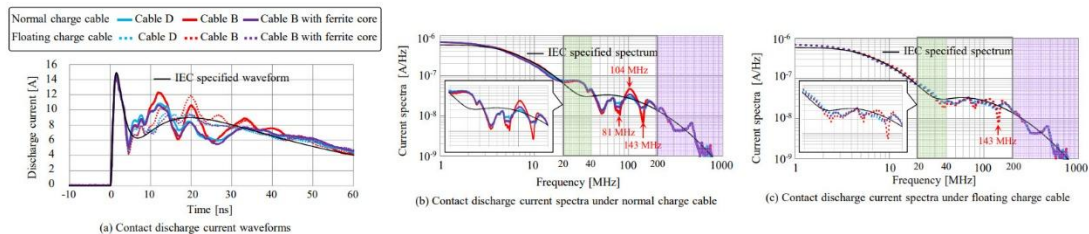
Σχήμα 2.30: Πειραματική διάταξη διακρίβωσης με χρήση φερριτών [42]

Συγκρίνοντας τα δύο καλώδια, το καλώδιο D αποδείχθηκε πιο αποτελεσματικό στον περιορισμό του ringing συγκριτικά με το καλώδιο B, επιβεβαιώνοντας την επίδραση του φερρίτη στη μείωση των συντονισμών. Ακόμα, αναφορικά με τη γεννήτρια B, εξετάστηκε η επίδραση διαφορετικών διατάξεων του καλωδίου φόρτισης. Η αιωρούμενη (floating) διάταξη του καλωδίου φόρτισης οδηγεί σε περαιτέρω περιορισμό του ringing, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με την εφαρμογή φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής, προσεγγίζοντας την ιδανική κυματομορφή του προτύπου IEC. Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.32.

Στο πεδίο του χρόνου, η μείωση του ringing με την εφαρμογή φερρίτη ήταν ξεκάθαρη, ειδικά για τη δεύτερη κορυφή της κυματομορφής. Αντίστοιχα, στο πεδίο της συχνότητας, το φάσμα των κυματομορφών παρουσίασε σαφή μείωση των συντονιστικών μεγίστων, ιδιαίτερα στα 36 MHz, 81 MHz, 104 MHz και 143 MHz, ανάλογα με το καλώδιο και τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύτηκε με βάση τη συμπεριφορά της σύνθετης εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής, καθώς η τοποθέτηση φερρίτη προκαλεί μείωση των συντονιστικών μεγίστων και ελαχίστων στο φάσμα της εμπέδησης, γεγονός που οδηγεί και στη μείωση των ταλαντώσεων στην κυματομορφή εκφόρτισης.



Σχήμα 2.31: Φάσμα των αντιστάσεων καλωδίων επιστροφής ρεύματος, μήκους 2m από την πλευρά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με γειωμένο το άλλο άκρο [42]



Σχήμα 2.32: Συγκριτικά αποτελέσματα για τα δύο καλώδια με χρήση φερριτών και για όλες τις διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [42]

Συμπερασματικά, η μελέτη αποδεικνύει ότι η εφαρμογή φερρίτη σε κατάλληλη θέση και η προσεκτική διαμόρφωση του καλωδίου φόρτισης και επιστροφής μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αναπαραγωγιμότητα και την αξιοπιστία των δοκιμών ESD, προσεγγίζοντας την ιδανική κυματομορφή που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2. Ακόμα, η χρήση φερρίτη στο καλώδιο επιστροφής περιορίζει τις φασματικές διακυμάνσεις γύρω από τα 100 MHz, μειώνοντας τις τιμές συντονισμού για τον παράγοντα ποιότητα Q, ενώ η αιωρούμενη διάταξη του καλωδίου φόρτισης συμβάλλει επιπλέον στον περιορισμό του ringing, ειδικά στη γεννήτρια AC παροχής, για συχνότητες από 20 MHz έως 200 MHz.

Κεφάλαιο 3: Ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή του IEC 61000-4-2

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης και της δοκιμής ατρωσίας έναντι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) παρεμβάλλονται ποικίλες πηγές αβεβαιότητας, οι οποίες ενδέχεται να αλλοιώσουν την κυματομορφή του ρεύματος και, σε αρκετές περιπτώσεις, να οδηγήσουν σε τιμές εκτός των προβλεπόμενων ορίων. Ένα ζήτημα που καθίσταται ολοένα και πιο επίκαιρο είναι η σταδιακή μετάβαση σε πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες διακρίβωσης και δοκιμών, μέσω της χρήσης ρομποτικού βραχίονα, χωρίς την παρουσία ανθρώπινου χειριστή. Το γεγονός αυτό εγείρει έναν σημαντικό προβληματισμό: σε ποιο βαθμό επηρεάζει η ανθρώπινη παρουσία την κυματομορφή του ESD ρεύματος κατά τη διακρίβωση και τη δοκιμή; Επιπλέον, τίθεται το ερώτημα κατά πόσο τα καθορισμένα όρια της διακρίβωσης, όπως αυτά ορίζονται στην ισχύουσα έκδοση του προτύπου IEC 61000-4-2 —η οποία βασίζεται σε διαδικασίες που εκτελούνται απουσία ανθρώπου— θα έπρεπε να επαναξιολογηθούν, ώστε να λαμβάνουν υπόψη την ανθρώπινη παρουσία, όπως συμβαίνει στις πραγματικές συνθήκες δοκιμής. Ιδιαίτερα προβληματισμό προκαλεί το ενδεχόμενο τα υφιστάμενα όρια να μην είναι πλέον αντιπροσωπευτικά όταν εφαρμόζονται σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες με ρομποτικό βραχίονα, όπου ο ανθρώπινος παράγοντας απουσιάζει πλήρως, γεγονός που ενδέχεται να μεταβάλλει κρίσιμα χαρακτηριστικά της κυματομορφής.

Το παρόν κεφάλαιο επιχειρεί να διερευνήσει τους ανωτέρω προβληματισμούς. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται πειραματικά δεδομένα που εξετάζουν την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην κυματομορφή ρεύματος, τόσο κατά τη διάρκεια διακρίβωσης ESD γεννητριών, όσο και κατά τη φάση δοκιμών ατρωσίας με δοκίμιο ένα μεταλλικό, γειωμένο κουτί. Στα δύο αυτά πειραματικά σενάρια, υπολογίζονται και συγκρίνονται κρίσιμες παράμετροι της κυματομορφής για δέκα διαφορετικούς χειριστές ESD γεννητριών έναντι τιμών αναφοράς χωρίς την παρουσία χειριστή. Στη συνέχεια, η πιθανότητα εμφάνισης κάθε παραμέτρου προσεγγίζεται μαθηματικά μέσω προσαρμογής σε γνωστές κατανομές (Normal, Log-normal, Gamma και Weibull), με

στόχο την αξιολόγηση της δυνατότητας ένταξης της ανθρώπινης αβεβαιότητας στο συνολικό μοντέλο αβεβαιότητας των μετρήσεων.

3.2 Εξοπλισμός εργαστηρίου υψηλών τάσεων

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων του παρόντος κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός παραγωγής και καταγραφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ο οποίος ήταν διαθέσιμος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του ΕΜΠ και συνοπτικά είναι ο ακόλουθος:

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

3.2.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που είναι διαθέσιμες στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων είναι οι ακόλουθες:

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

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν και οι τρεις γεννήτριες προκειμένου να εξεταστεί εάν το φαινόμενο της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι καθολικό ή αν αφορά μόνο συγκεκριμένες γεννήτριες. Οι παραπάνω γεννήτριες καλύπτουν τόσο δύο διαφορετικές εταιρείες, όσο και δύο διαφορετικά είδη, αφού οι γεννήτριες της εταιρείας Schaffner λειτουργούν με τροφοδοτικό, ενώ η γεννήτρια της εταιρείας EM TEST λειτουργεί με μπαταρίες.

3.2.1.1 Γεννήτρια NSG 433

Η γεννήτρια NSG-433 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ -18kV και $+18\text{kV}$, με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1ns . Στο «πιστόλι» είναι ενσωματωμένο ψηφιακό βολτόμετρο, στο οποίο εμφανίζεται η τάση φόρτισης, και ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας. Η συγκεκριμένη γεννήτρια λειτουργεί με τροφοδοτικό, το οποίο περιλαμβάνει ενσωματωμένο μετρητή, ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκφορτίσεων που πραγματοποιούνται. Διαθέτει προσαρμοστή εκφόρτισης επαφής ο οποίος απαλλάσσει τον παλμό από ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος όπως πίεση, θερμοκρασία και υγρασία. Η γεννήτρια φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



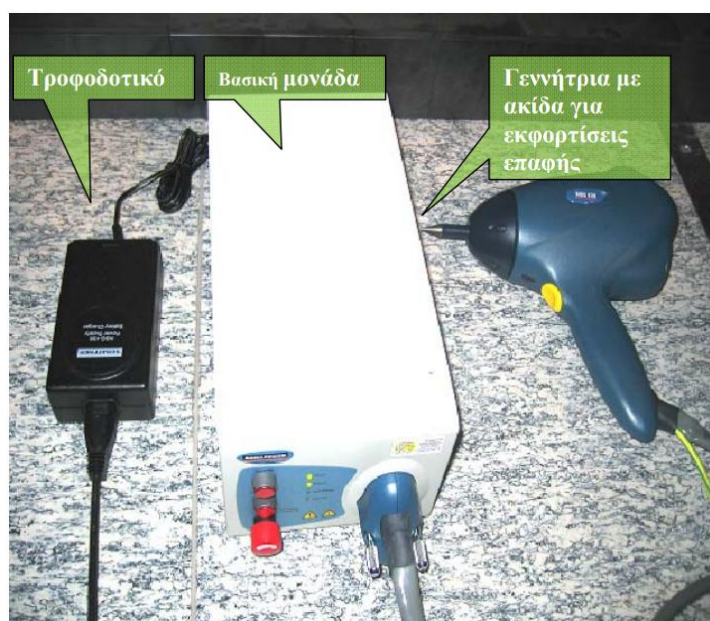
Σχήμα 3.1: Η γεννήτρια NSG 433 [2]

3.2.1.2 Γεννήτρια NSG 433

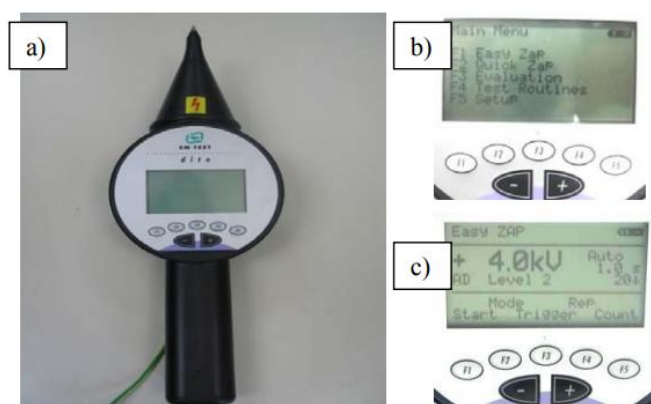
Η γεννήτρια NSG-438 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ -30kV και $+30\text{kV}$ και διαθέτει οθόνη αφής για τη πραγματοποίηση των αναγκαίων χειρισμών. Αποτελείται από τρία βασικά τμήματα. Η βασική μονάδα περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και το ρυθμιστή υψηλής τάσης. Το πιστόλι στο οποίο βρίσκονται οι ακίδες εκφόρτισης (αέρα και επαφής), στη λαβή του οποίου βρίσκεται το μπουτόν – σκανδάλη, το οποίο χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των εκφορτίσεων. Το DC τροφοδοτικό μηχανήμα της γεννήτριας με είσοδο $100\text{-}250\text{ V}_{\text{ac}}$, $50\text{-}60\text{Hz}$, 1 A που δίνει στη βασική μονάδα 24V_{dc} και $2,3\text{A}$. Η γεννήτρια φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

3.2.1.3 Γεννήτρια DITO

Η γεννήτρια DITO παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μεταξύ $-16,5\text{kV}$ και $+16,5\text{kV}$. 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, όπου διαφαίνονται ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι εκφορτίσεις (αέρος ή επαφής, απλές ή επαναφορτιζόμενες), ο αριθμός των επαναλήψεων και το επίπεδο της τάσης. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η γεννήτρια DITO, μαζί με δύο χαρακτηριστικές οθόνες διαλόγου κατά τη διάρκεια λειτουργίας της.



Σχήμα 3.2: Η γεννήτρια NSG 438 [2]



Σχήμα 3.3: Η γεννήτρια DITO α) γενική άποψη της γεννήτριας, β) οθόνη επιλογής προγράμματος λειτουργίας, γ) οθόνη κατά τη διάρκεια λειτουργίας [2]

3.2.1.4 Σύγκριση των γεννητριών και παρουσίαση χαρακτηριστικών

Στον Πίνακα 3.1 δίνονται συγκριτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας.

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Γεννήτρια ESD		NSG-433	NSG-438	DITO
Τεχνικά χαρακτηριστικά				
Πυκνωτής εκκένωσης C_s		150 pF $\pm$ 10%	150 pF $\pm$ 10%	150 pF $\pm$ 10%
Αντίσταση εκκένωσης R_d		330 Ω $\pm$ 10%	330 Ω $\pm$ 10%	330 Ω $\pm$ 10%
Αντίσταση φόρτισης R_c		100 M Ω	50 M Ω	
Τάση εξόδου V_0	Εκφορτίσεις αέρος	2÷18 kV	200 V÷30 kV	500V÷16,5 kV
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	2÷9 kV		
Πολικότητα τάσης εξόδου		Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική
Χρόνος διατήρησης του 90% της τάσης φόρτισης (90% V_0)		>5 s	>5 s	>5 s
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (tr)	Εκφορτίσεις αέρος	< 1 ns (για τάσεις $\leq$ 8 kV)	< 1 ns (για τάσεις $\leq$ 8 kV)	0,7÷1 ns
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	0,7÷1 ns	0,7÷1 ns	
Μέγιστο ρεύματος (I_p)		2 kV: 7,5A $\pm$ 10% 4 kV: 15A $\pm$ 10% 6 kV: 22,5A $\pm$ 10% 8 kV: 30A $\pm$ 10%	2 kV: 7,5A $\pm$ 10% 4 kV: 15A $\pm$ 10% 6 kV: 22,5A $\pm$ 10% 8 kV: 30A $\pm$ 10%	2 kV: 7,5A $\pm$ 10% 4 kV: 15A $\pm$ 10% 6 kV: 22,5A $\pm$ 10% 8 kV: 30A $\pm$ 10%
Τάση τροφοδοσίας		100/120/220/240 Vac, 50÷60 Hz	100/120/220/240 Vac, 50÷60 Hz	Battery NiCd 12V
Κατανάλωση		25 VA	25 VA	
Θερμοκρασία λειτουργίας		5÷40 °C	5÷40 °C	10÷35 °C
Υγρασία λειτουργίας		20%÷80%	20%÷80%	20%÷80%

3.2.2 Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης και ομοαξονικό καλώδιο υψηλής συχνότητας

Ο ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης είναι ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) ,με την βοήθεια του οποίου μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Είναι γνωστός και ως στόχος Pellegrini. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο MD 103 της TESEQ. Ακόμα, τα ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του ρεύματος υψηλής συχνότητας. Η λειτουργία τους είναι σημαντική καθώς το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns και συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το ομοαξονικό καλώδιο τύπου SUCOFLEX 106 λόγω της καλής απόκρισης συχνότητας του. Η συνολική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη MD 103 [2]

3.2.3 Εξασθενητής

Ο εξασθενητής είναι χρήσιμος, ώστε να μην διατρέχει κίνδυνο καταστροφής το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος και τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Ο ομοαξονικός προσαρμογέας έχει ενσωματωμένο εξασθενητή με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 6 GHz. Το καλώδιο τύπου SUCOFLEX, και ο ομοαξονικός προσαρμογέας MD103 έχουν κατασκευασθεί και διακριβωθεί ως ενιαίο σύστημα, κατάλληλο για τη μέτρηση του ρεύματος των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [45]. Ο εξασθενητής 011-0059-03 της Tektronix φαίνεται στο Σχήμα 3.5.

3.2.4 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TDS 7254B της εταιρείας Tektronix, ο οποίος λειτουργεί στα 2.5GHz και συνεπώς πληροί τις προδιαγραφές του Προτύπου



Σχήμα 3.5: Ο εξασθενητής 011-0059-03 της Tektronix

IEC 61000-4-2 [23] στο οποίο αναφέρεται η απαίτηση ο παλμογράφος να έχει οριακή συχνότητα άνω του 1GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, λειτουργικό σύστημα Windows 2000 και η αποθήκευση των δεδομένων έγινε μέσω φορητής αποθηκευτικής μονάδας USB. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του παρατίθενται στον Πίνακα 3.2, ενώ εικόνα αυτού στο Σχήμα 3.6.

Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου TDS 7254B

Κανάλια Εισόδου	4
Εύρος ζώνης	2,5 GHz
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	130 ps
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	83 ps
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 2\% + (2\% \times \text{offset})$
Σύζευξη εισόδου	DC, GND
Αντίσταση εισόδου	$50 \Omega \pm 2,5\%$
Ευαισθησία εισόδου στα 50Ω	2 mV/div έως 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	$<1 \text{ VRMS}$ για $r < 100\text{mV/div}$, $<5 \text{ VRMS}$ $r \geq 100\text{mV/div}$
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch1	20 GS/s
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch2	10 GS/s
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch3	5 GS/s
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch4	1 GS/s



Σχήμα 3.6: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

3.2.5 Ανιχνευτής ρεύματος

Ο ανιχνευτής ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο FCC F-65 της εταιρείας Fischer Custom Communications και είναι ένα εργαλείο υψηλής ακρίβειας, σχεδιασμένο για μετρήσεις παλμικών και RF ρευμάτων σε εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 10 kHz έως 1 GHz, ενώ διαθέτει σταθερή αντίσταση μεταφοράς 1 Ω από 1 MHz και πάνω. Είναι κατάλληλος για καταγραφή κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), όπως αυτές που προκύπτουν σε δοκιμές βάσει του προτύπου IEC 61000-4-2. Υποστηρίζει μέγιστο παλμικό ρεύμα έως 100 A και παρέχει εξαιρετικά γρήγορη απόκριση με χρόνο ανόδου μόλις 200 ps. Ο ανιχνευτής ρεύματος φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Ο ανιχνευτής ρεύματος FCC F-65

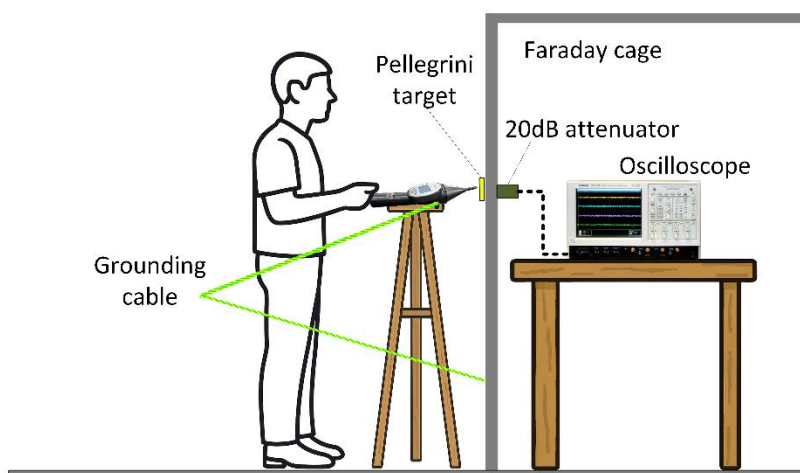
3.3 Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στις κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), καθώς και για την ποσοτικοποίηση της προκύπτουσας αβεβαιότητας, σχεδιάστηκαν δύο ελεγχόμενα σενάρια μετρήσεων, βάσει του Προτύπου IEC 61000-4-2: ένα που αφορά στη διαδικασία διακρίβωσης και

ένα που αφορά στη διαδικασία δοκιμών. Σε κάθε σενάριο λήφθηκαν μετρήσεις από δέκα διαφορετικούς ανθρώπινους χειριστές, οι οποίες στη συνέχεια συγκρίθηκαν προκειμένου να προκύψουν τα τελικά συμπεράσματα.

3.3.1 Τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης

Το πρώτο σενάριο αφορά μία τροποποιημένη εκδοχή της τυποποιημένης διάταξης διακρίβωσης, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2. Η γεννήτρια ESD παρέμεινε τοποθετημένη σε ξύλινο τρίποδο, αλλά ταυτόχρονα συγκρατούνταν χειροκίνητα από έναν ανθρώπινο χειριστή. Σημειώνεται ότι ο χειριστής κράταγε τη γεννήτρια από τη λαβή της και ακουμπώντας τη σκανδάλη, προσομοιώνοντας το κράτημα ενός χειριστή κατά τη διαδικασία των δοκιμών, ενώ η τοποθέτηση του σώματός του ήταν παρόμοια με αυτή κατά τη διαδικασία των δοκιμών. Κάτω από τη συνολική διάταξη και τον ανθρώπινο χειριστή, τοποθετήθηκε το γειωμένο επίπεδο αναφοράς εδάφους (Reference Ground Plane, RGP), σύμφωνα με την τρίτη έκδοση του Προτύπου. Ουσιαστικά το RGP αποτελούνταν από μεταλλικές πλάκες συνδεδεμένες με τη γείωση του Εργαστηρίου. Το καλώδιο γείωσης/ επιστροφής ρεύματος της γεννήτριας ήταν τοποθετημένο στη διάταξη τριγώνου, όπως ορίζεται από το Πρότυπο και δεν συγκρατούνταν από κάποιον χειριστή. Σχηματικά η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8, ενώ μία φωτογραφία κατά τη διάρκεια της τροποποιημένης διακρίβωσης φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Η διάταξη αυτή διατηρεί τη γεωμετρική συνέπεια του περιβάλλοντος διακρίβωσης, επιτρέποντας παράλληλα τη φυσική αλληλεπίδραση του χειριστή με αυτή, διευκολύνοντας τη στοχευμένη διερεύνηση της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στα χαρακτηριστικά της εκφόρτισης.



Σχήμα 3.8: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης



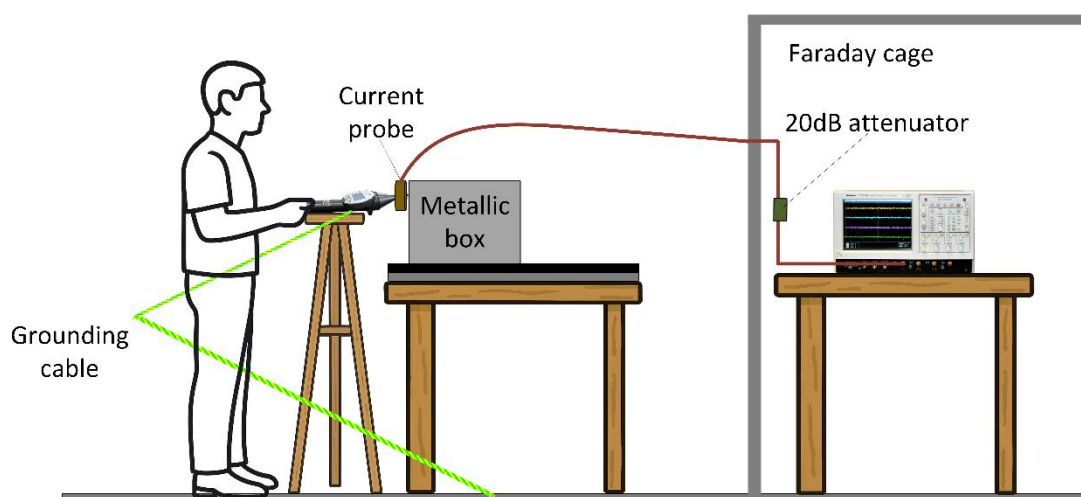
Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ακόλουθη: δέκα διαφορετικοί άνθρωποι χειριστές εκτέλεσαν ξεχωριστά από δέκα εκφορτίσεις επαφής των +4 kV έκαστος. Σημειώνεται ότι η διάταξη παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, ενώ όσο λαμβάνονταν μετρήσεις δεν πλησίαζε κάποιος άλλος τη διάταξη (πέρα από τον ανθρώπινο χειριστή προφανώς που κρατάγε τη γεννήτρια), προκειμένου να περιοριστούν όσο το δυνατόν οι εξωτερικές παρεμβολές. Η γεννήτρια κάθε φορά ρυθμιζόταν ώστε να παράγει αυτόματα εκφορτίσεις, χωρίς να χρειάζεται ο χειριστής να πατάει τη σκανδάλη (παρ' ότι την ακούμπαγε), προκειμένου να γίνει εξοικονόμηση χρόνου. Η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές για τις τρεις διαφορετικές γεννήτριες του εργαστηρίου (DITO, NSG 433, NSG438).

3.3.2 Διάταξη δοκιμών

Το δεύτερο σενάριο προσομοιώνει ένα τυπικό περιβάλλον δοκιμής ατρωσίας, όπου οι εκφορτίσεις εφαρμόζονταν σε ένα γειωμένο μεταλλικό κουτί, το οποίο αναπαριστά τον Εξοπλισμό υπό Δοκιμή (Equipment Under Test - EUT). Και σε αυτήν την περίπτωση, η γεννήτρια συγκρατούνταν από ανθρώπινο χειριστή, χωρίς αυτός να έρχεται σε επαφή με οποιοδήποτε άλλο μέρος της διάταξης. Η διάταξη δοκιμής ήταν σύμφωνη με το

Πρότυπο IEC 61000-4-2, με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Αρχικά, όλη η διάταξη και ο χειριστής, όπως και στη διαδικασία της διακρίβωσης, έτσι και στη διαδικασία της δοκιμής βρισκόταν πάνω στο γειωμένο RGP. Ακόμα, το καλώδιο γείωσης/επιστροφής της γεννήτριας τοποθετήθηκε σε τριγωνική διάταξη και δεν αφέθηκε ελεύθερο στο πάτωμα. Καθώς στην περίπτωση των δοκιμών η εκφόρτιση εφαρμόζεται πάνω στο εξοπλισμό υπό εξέταση και όχι πάνω στον Pellegrini target, προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή του ρεύματος στον παλμογράφο, ήταν αναγκαία η χρήση ενός ανιχνευτή ρεύματος, ο οποίος τοποθετήθηκε γύρω από τη μύτη εκφόρτισης της γεννήτριας. Προκειμένου ο ανιχνευτής να είναι σταθερός και να μην έρχεται σε επαφή με την γεννήτρια, χρησιμοποιήθηκε επαναχρησιμοποιούμενη κολλώδης μάζα (putafix) στο κενό ανάμεσα στον ανιχνευτή και τη μύτη της γεννήτριας. Σχηματικά η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10, ενώ μία φωτογραφία κατά τη διάρκεια της τροποποιημένης διακρίβωσης φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοκιμών

Ομοίως με το σενάριο της διακρίβωσης, λήφθηκαν μετρήσεις από 10 διαφορετικούς χειριστές από 10 μετρήσεις έκαστος. Η τάση εκφόρτισης ήταν και πάλι τα +4 kV. Και την διάταξη αυτή τηρήθηκε η απομόνωσή της κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ενώ η γεννήτρια ήταν ρυθμισμένη ώστε να παράγει αυτόματα τις εκφορτίσεις. Η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές για τις τρεις διαφορετικές γεννήτριες του εργαστηρίου (DITO, NSG 433, NSG438). Το εκτενές αυτό σύνολο δεδομένων υποστηρίζει μια αξιόπιστη στατιστική ανάλυση της αναπαραγωγιμότητας μεταξύ διαφορετικών χειριστών.



Σχήμα 3.11: Φωτογραφία από την πειραματική διάταξη δοκιμών

3.3.3 Διόρθωση κυματομορφών δοκιμών

Η μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) με χρήση ανιχνευτών ρεύματος αποτελεί κοινή πρακτική και όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο σενάριο μετρήσεων, ωστόσο συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Το βασικό πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι ανιχνευτές, λόγω της επαγωγικής τους λειτουργίας, δεν διατηρούν σταθερή εμπέδηση μεταφοράς σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, παρατηρείται μείωση της ευαισθησίας (roll-off), προκαλώντας παραμόρφωση της χρονικής κυματομορφής του ESD ρεύματος. Αν και αυτό δεν επηρεάζει τις συχνοτικές μετρήσεις, καθίσταται ιδιαίτερα προβληματικό για χρονικές μετρήσεις όπου απαιτείται η ακριβής καταγραφή του παροδικού ρεύματος προκειμένου να εκτιμηθεί το συνολικό μεταφερόμενο φορτίο. Σε περιβάλλοντα δοκιμών ESD, η δυνατότητα εκτίμησης του πλήρους φορτίου είναι κρίσιμη, καθώς αν απομείνει σημαντικό υπόλοιπο φορτίου μετά το αρχικό παλμικό γεγονός, μπορεί να συμβεί δευτερογενής εκφόρτιση, θέτοντας σε κίνδυνο τη λειτουργικότητα των υπό δοκιμή συσκευών.

Για τη διόρθωση αυτού του φαινομένου έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες με προτεινόμενες λύσεις, δύο εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω. Συγκεκριμένα, και οι δύο μελέτες αναφέρονται και στον ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65, που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική, αλλά και στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση των κυματομορφών που προέκυψαν από το σενάριο των δοκιμών.

3.3.3.1 Προτεινόμενη μεθοδολογία για τη διόρθωση των κυματομορφών που λήφθηκαν με ανιχνευτή ρεύματος

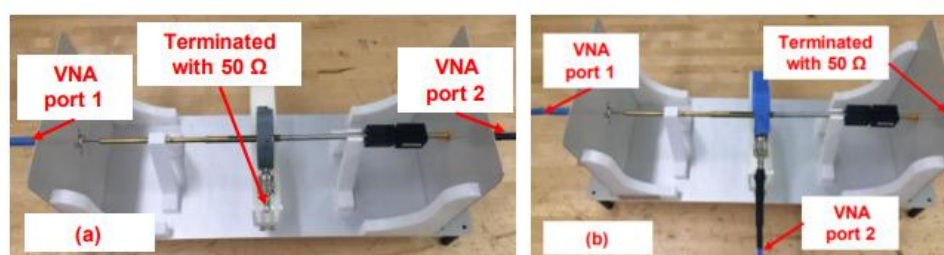
Οι Yang, Zhou και Pommerenke για την αποκατάσταση της πραγματικής κυματομορφής, στην εργασία τους [46], πρότειναν δύο εναλλακτικές λύσεις: τη χρήση της άμεσα μετρούμενης πολύπλοκης εμπέδησης του ανιχνευτή ή την ανάπτυξη ισοδύναμου κυκλώματος που να προσεγγίζει τη συχνοτική του συμπεριφορά. Η πρώτη επιλογή, αν και άμεση, ενδέχεται να ενσωματώνει θόρυβο λόγω μετρητικών ατελειών. Η δεύτερη προσέγγιση, μέσω μοντελοποίησης με ισοδύναμο κύκλωμα, επιτρέπει τη δημιουργία μίας μαθηματικά «καθαρής» συνάρτησης, αποφεύγοντας την ενσωμάτωση θορύβου και επιτρέποντας τη χρήση μόνο των δεδομένων μεγέθους της εμπέδησης.

Η μέτρηση της εμπέδησης μεταφοράς (transfer impedance) ενός ανιχνευτή ρεύματος πραγματοποιήθηκε με ειδική διάταξη διακρίβωσης. Η συνολική αντίσταση του μονοπατιού ρεύματος (R_{sense}) μετρήθηκε στα 1,99 Ω με τετρασύρματο LCR μετρητή. Χρησιμοποιήθηκε δικτυοαναλυτής Agilent E5071C (VNA) για την καταγραφή των S-παραμέτρων σε φάσμα 100 kHz έως 2 GHz, με 1601 σημεία και μέσο όρο 16 μετρήσεων ανά σάρωση. Η διαδικασία απαιτούσε δύο μετρήσεις, που φαίνονται στο Σχήμα 3.12: πρώτα, με την έξοδο του ανιχνευτή τερματισμένη σε 50 Ω , καταγράφηκε η μέτρηση "SC" για τον υπολογισμό του ρεύματος μέσω του πυρήνα. Στη συνέχεια, με την έξοδο συνδεδεμένη στο VNA και τον αγωγό επίσης τερματισμένο σε 50 Ω , καταγράφηκε η μέτρηση "SV" που αντιπροσωπεύει την τάση εξόδου.

Η μεταφορά εμπέδησης υπολογίστηκε με τη σχέση:

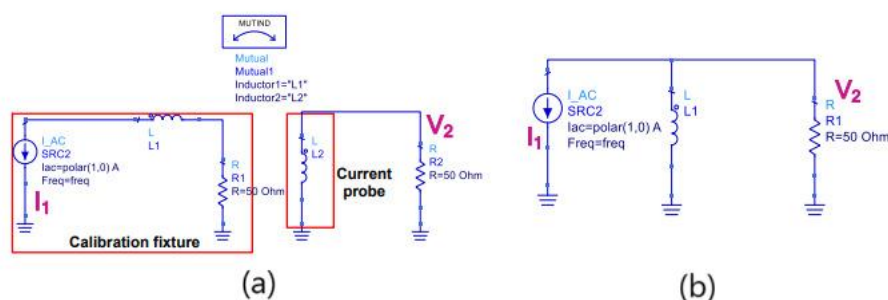
$$Z_t = S_V - S_C + 20 \log_{10} \frac{R_{sense} * 50}{R_{sense} + 50}$$

επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό της συχνοτικής απόκρισης του ανιχνευτή σε όλο το εξεταζόμενο εύρος.



Σχήμα 3.12: Setup μέτρησης ρεύματος με αισθητήρα: a)Μέτρηση του S_C , b)Μέτρηση του S_V [46]

Η εργασία εξετάζει δύο τύπους ισοδύναμων κυκλωμάτων. Παρόλο που η άμεση χρήση της πολύπλοκης μεταφοράς εμπέδησης επιτρέπει αποσυνέλιξη της κυματομορφής, η δημιουργία ισοδύναμου κυκλώματος προσφέρει πλεονεκτήματα, καθώς αποφεύγει την ενσωμάτωση θορύβου από τα δεδομένα καλιμπραρίσματος και επιτρέπει τη χρήση μόνο δεδομένων μεγέθους από το datasheet. Γίνεται η υπόθεση ότι το ισοδύναμο κύκλωμα είναι σύστημα ελάχιστης φάσης, υπόθεση λογική για τις απλές κατασκευές ανιχνευτών, και ότι το σύστημα λειτουργεί σε γραμμική περιοχή χωρίς κορεσμό του πυρήνα. Ένα απλό ισοδύναμο κύκλωμα που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον ADS περιλαμβάνει μια πηγή ρεύματος, έναν επαγωγέα και ένα φορτίο 50 Ω και φαίνεται στο Σχήμα 3.13.a. Η αμοιβαία επαγωγή απλοποιείται σε μια μοναδική επαγωγή, επιτρέποντας περαιτέρω απλοποίηση του κυκλώματος, όπως στο Σχήμα 3.13.b.

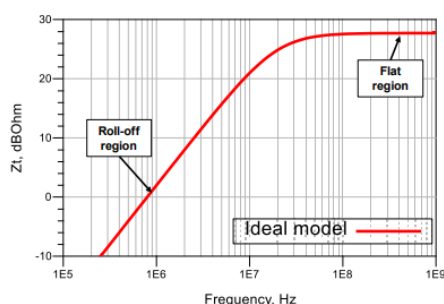


Σχήμα 3.13: a) Απλό ισοδύναμο κύκλωμα για έναν αισθητήρα ρεύματος και μια διάταξη δοκιμής διακρίβωσης, b) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα [46]

Η μεταφορά εμπέδησης δίνεται από:

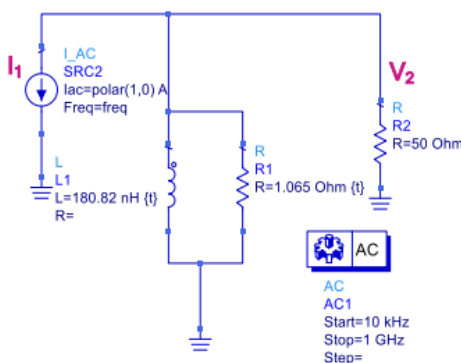
$$Z_T(j\omega) = \frac{j\omega L_1 R_1}{R_1 + j\omega L_1}$$

Η ιδανική καμπύλη μεταφοράς εμπέδησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14, εμφανίζει πτώση (roll-off) σε χαμηλές συχνότητες λόγω της επαγωγής και επίπεδη απόκριση σε υψηλότερες συχνότητες, χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς ενός ανιχνευτή ρεύματος.

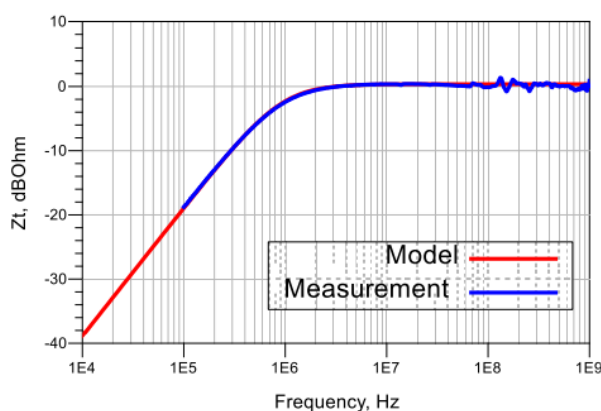


Σχήμα 3.14: Αντίσταση μεταφοράς ενός ιδανικού αισθητήρα ρεύματος [46]

Το δεύτερο μοντέλο είναι πιο ρεαλιστικό και περιλαμβάνει επιπλέον στοιχεία, όπως αντιστάσεις (R) και χωρητικότητες (C), προκειμένου να ληφθούν υπόψη φαινόμενα όπως οι απώλειες λόγω φερριτική και οι χωρητικές συνιστώσες μεταξύ του αγωγού και της θωράκισης. Ένα παράδειγμα τέτοιας μοντελοποίησης για τον ανιχνευτή FCC F-65 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.15, ενώ η αντιπαραβολή της μοντελοποιημένης και της μετρούμενης εμπέδησης φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Η ρεαλιστική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την πιο ακριβή αντιστάθμιση της χρονικής κυματομορφής.



Σχήμα 3.15: Ισοδύναμο κύκλωμα για αισθητήρα ρεύματος FCC F65 με βελτιστοποιημένες τιμές εξαρτημάτων [46]



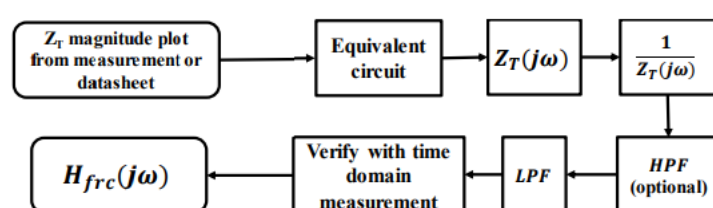
Σχήμα 3.16: Αντίσταση μεταφοράς ενός ρεαλιστικού αισθητήρα ρεύματος FCC F65 [46]

Η διαδικασία αντιστάθμισης της συχνοτικής απόκρισης βασίζεται στον υπολογισμό μίας συνάρτησης αντιστάθμισης:

$$F(f) = \frac{1}{Z_T(f)} x LPF(f) x HPF(f)$$

όπου το $Z_T(f)$ είναι η εμπέδηση μεταφοράς του ανιχνευτή, και τα $LPF(f)$ και $HPF(f)$ είναι φίλτρα χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων αντίστοιχα. Η συνάρτηση αυτή

αναπτύσσεται με τη διαδικασία που συνοψίζεται στο Σχήμα 3.17. Το χαμηλοπερατό φίλτρο (LPF) εφαρμόζεται για την αποκοπή ανεπιθύμητων υψηλών συχνοτήτων όπου η απόκριση του ανιχνευτή είναι άγνωστη ή επηρεάζεται από φαινόμενα χωρητικής σύζευξης. Το υψηλοπερατό φίλτρο (HPF) χρησιμοποιείται προαιρετικά, κυρίως όταν γίνεται αποκατάσταση κυματομορφής από άμεσα μετρούμενα δεδομένα εμπέδησης, για να αντιμετωπιστούν σφάλματα και θόρυβος στις χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, λόγω του ότι οι παλμογράφοι εισάγουν μικρό offset στις μετρήσεις, εφαρμόζεται μια διαδικασία detrending, με σκοπό την απομάκρυνση σωρευτικών σφαλμάτων DC και την επιστροφή της αποκατεστημένης κυματομορφής στο μηδέν μετά την εκφόρτιση.

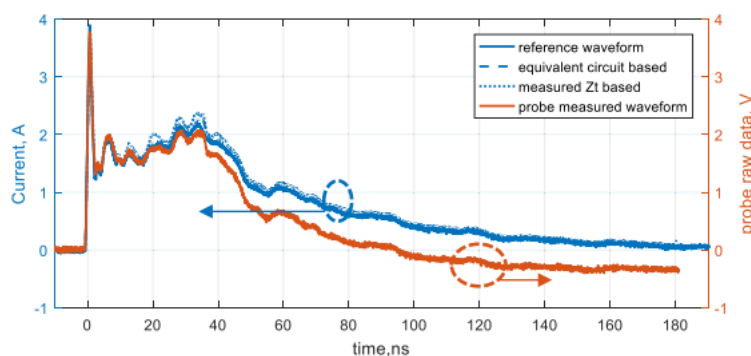


Σχήμα 3.17: Διαδικασία ανάπτυξης $H_{frc}(j\omega)$ χρησιμοποιώντας ισοδύναμο κύκλωμα [46]

Για την πειραματική επαλήθευση της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής FCC F-65. Μετρήθηκε η εμπέδηση μεταφοράς του και αναπτύχθηκε το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα. Το ESD ρεύμα καταγράφηκε και συγκρίθηκε με μέτρηση αναφοράς από τον στόχο ESD. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18, παρουσιάζεται η σύγκριση των κυματομορφών εντός χρονικού παραθύρου 200 ns. Η πορτοκαλί καμπύλη αντιστοιχεί στην ακατέργαστη μέτρηση του FCC F-65, ενώ οι διορθωμένες κυματομορφές, υπολογισμένες μέσω των δύο μεθόδων αντιστάθμισης, ακολουθούν με μεγάλη ακρίβεια την κυματομορφή αναφοράς (μπλε καμπύλη). Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αντισταθμισμένη κυματομορφή χρησιμοποιώντας την μεταφορά εμπέδησης που προήλθε από το ισοδύναμο κύκλωμα (βλ. Σχήμα 6). Η τελεία-τελεία γραμμή δείχνει την κυματομορφή που προκύπτει άμεσα από τη χρήση της μετρούμενης πολύπλοκης μεταφοράς εμπέδησης. Οι αντισταθμισμένες κυματομορφές και από τις δύο μεθόδους συμφωνούν καλά με την κυματομορφή αναφοράς.

Για να ελεγχθεί περαιτέρω η ευελιξία της μεθόδου, εφαρμόστηκε και σε έναν ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου (H-field probe), μη ειδικά σχεδιασμένο για ESD μετρήσεις. Αν και η ανακατασκευή της κυματομορφής είχε μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με τον FCC F-65, η βασική μορφή και το φορτίο αποτυπώθηκαν με ικανοποιητικό τρόπο,

υποδεικνύοντας ότι η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλους τύπους ανιχνευτών.



Σχήμα 3.18: Σύγκριση κυματομορφών σε διάστημα 200ns από τη μέτρηση ρεύματος του αισθητήρα FCC F65 [46]

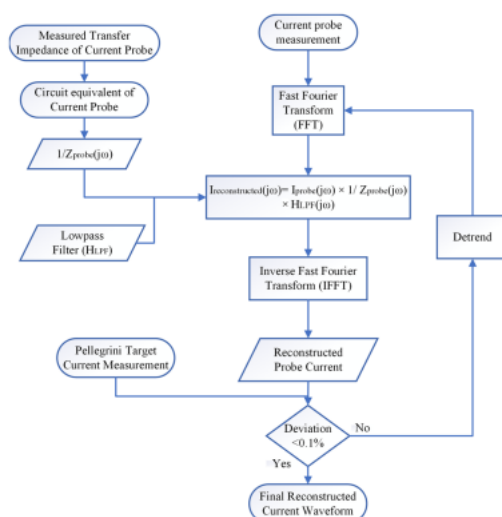
Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη μέθοδος προσφέρει έναν απλό και αξιόπιστο τρόπο αντιστάθμισης της συχνοτικής απόκρισης ανιχνευτών ρεύματος για χρονικές μετρήσεις ESD. Η εφαρμογή της δεν απαιτεί απαραίτητα νέα μέτρηση εμπέδησης εφόσον διατίθεται αξιόπιστο datasheet, ενώ και οι δύο προτεινόμενες προσεγγίσεις (χρήση ισοδύναμου κυκλώματος ή άμεσα μετρούμενης εμπέδησης) αποδεικνύονται αποτελεσματικές, υπό την προϋπόθεση επαρκούς φροντίδας στην καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων. Συνιστάται πάντοτε η επικύρωση των αποτελεσμάτων με μέτρηση αναφοράς, όπως μέσω ESD target, προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια των αποκατεστημένων κυματομορφών.

3.3.3.2 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε τέσσερις γεννήτριες και σε τέσσερα επίπεδα τάσης

Οι Παπασταμάτης, Παλιάτσος, Γκόνος και Σταθόπουλος στην εργασία τους [47], ασχολήθηκαν με τη βελτίωση της ακρίβειας στη μέτρηση χρονικών κυματομορφών ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) μέσω της διόρθωσης της συχνοτικής απόκρισης ανιχνευτών ρεύματος. Ανέπτυξαν μια μεθοδολογία βασισμένη στην αποσυνέλιξη του σήματος, ώστε να ανακατασκευαστεί η πραγματική μορφή του ρεύματος, αποφεύγοντας την παραμόρφωση που προκαλείται λόγω των περιορισμών εύρους ζώνης των ανιχνευτών. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε σε διαφορετικές ESD γεννήτριες και επίπεδα τάσης, ώστε να αξιολογηθεί η καθολικότητα και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε συνοψίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.19 και βασίζεται στη μελέτη που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.3.3.1. Πραγματοποιούνται

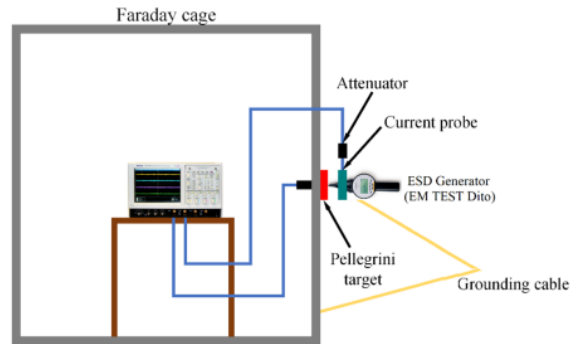
αρχικές μετρήσεις με ανιχνευτή ρεύματος και στόχο Pellegrini, ακολουθεί αποσυνέλιξη στο πεδίο της συχνότητας με εφαρμογή φίλτρων και τέλος βελτιστοποίηση της διαδικασίας detrending για την απομάκρυνση σωρευτικών σφαλμάτων offset.



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα ροής της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας βελτιστοποίησης αποκλίσεων τάσης [47]

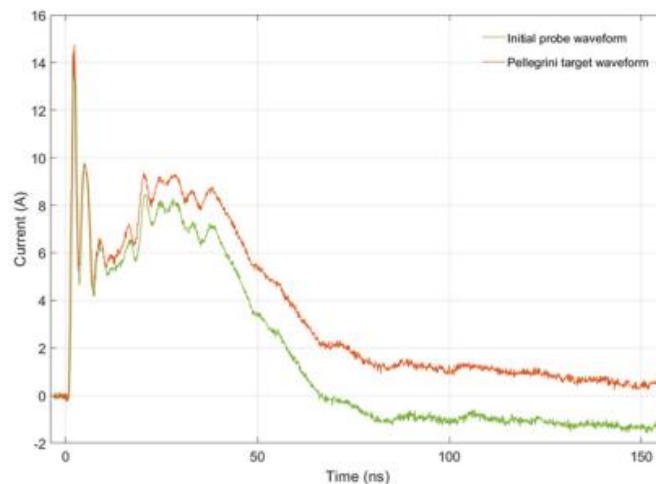
Για τη μέτρηση του ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής ρεύματος FCC F-65 της Fischer Custom Communications, γνωστός για την ευρεία του χρήση σε μετρήσεις ESD λόγω της καλής απόκρισής του σε χαμηλές συχνότητες. Οι κυματομορφές καταγράφηκαν μέσω παλμογράφου Tektronix TDS 7254B, με εύρος ζώνης 2,5 GHz και ρυθμό δειγματοληψίας 20 GS/s, ενώ η μέτρηση αναφοράς έγινε με στόχο Pellegrini MD103 της Teseq. Η όλη διάταξη μέτρησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20, όπου ο ανιχνευτής τοποθετείται γύρω από την ακίδα της γεννήτριας ESD και οι εκφορτίσεις πραγματοποιούνται στον στόχο, μέσα σε κλωβό Faraday για απομόνωση θορύβων.

Για την αποκατάσταση της πραγματικής χρονικής κυματομορφής του ρεύματος ESD, αρχικά επιλέγεται ένα χρονικό παράθυρο διάρκειας 200 ns από τη μετρούμενη κυματομορφή (-4ns έως 156ns, με χρονικό βήμα 40ps και συνολικό αριθμό καταγεγραμμένων σημείων 4000). Το παράθυρο αυτό περιλαμβάνει τον κύριο παλμό της εκφόρτισης, αποκόπτοντας τον περιβάλλοντα θόρυβο πριν και μετά το παλμικό γεγονός.



Σχήμα 3.20: Πειραματική διάταξη [47]

Οι αρχικές χρονικές κυματομορφές που λαμβάνονται τόσο από τον FCC F-65 όσο και από τον στόχο Pellegrini παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.21, όπου παρατηρείται η παραμόρφωση στο σήμα του ανιχνευτή λόγω της περιορισμένης συχνοτικής απόκρισής του.



Σχήμα 3.21: Η κυματομορφή ESD που αποκτήθηκε από τον στόχο Pellegrini και η αρχική κυματομορφή που αποκτήθηκε με τον αισθητήρα ρεύματος χωρίς την εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας [47]

Η αποκατάσταση της κυματομορφής πραγματοποιείται αρχικά με τη μεταφορά του σήματος στο πεδίο της συχνότητας μέσω εφαρμογής Ταχείας Μετασχηματισμού Fourier (FFT). Το σήμα που προκύπτει διορθώνεται μέσω διαίρεσης με τη μεταφορά εμπέδησης του ανιχνευτή, η οποία μοντελοποιείται με ένα απλοποιημένο επαγωγικό κύκλωμα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.22. Η μορφή της εμπέδησης μεταφοράς, που προκύπτει από το απλοποιημένο μοντέλο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.23, όπου διακρίνεται ότι το κύκλωμα παρουσιάζει σταθερή απόκριση σε υψηλές συχνότητες και πτώση σε χαμηλές, αποτυπώνοντας ρεαλιστικά το roll-off του ανιχνευτή.

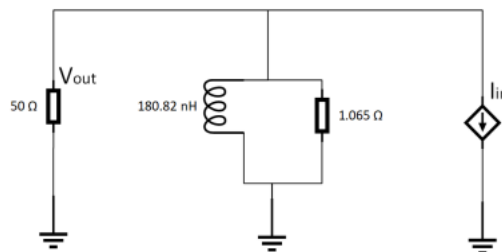
Για να περιοριστεί η ανεπιθύμητη ενίσχυση του θορύβου που θα προέκυπτε από τη διόρθωση στα υψηλά συχνοτικά συστατικά, εφαρμόζεται χαμηλοπερατό φίλτρο RC πρώτης τάξης με συνάρτηση μεταφοράς:

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

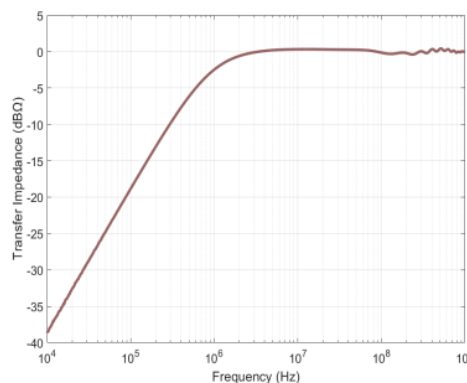
όπου επιλέχθηκαν $C_{LPF}=1,592\text{C}$ και $R_{LPF}=100\Omega$, ώστε να επιτευχθεί συχνότητα αποκοπής στα 1 GHz. Η κλίση του φίλτρου είναι -20 dB/decade, χαρακτηριστική ενός φίλτρου πρώτης τάξης. Αντί για χρήση ενός ιδανικού φίλτρου με απότομη αποκοπή, οι συγγραφείς προτίμησαν τη σταδιακή αποκοπή που αντικατοπτρίζει καλύτερα τη φυσική συμπεριφορά του ανιχνευτή σε υψηλές συχνότητες. Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη διαδικασία αποσυνέλιξης δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου το $I_{probe}(j\omega)$ προκύπτει από τον FFR της κυματομορφής ρεύματος που αποκτάται με τον αισθητήρα ρεύματος και το $Z_{probe}(j\omega)$ μπορεί να υπολογιστεί από το ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας διακρίβωσης του αισθητήρα.



Σχήμα 3.22: Ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας διακρίβωσης του αισθητήρα ρεύματος F-65 [47]



Σχήμα 3.23: Σύνθετη αντίσταση μεταφοράς του αισθητήρα ρεύματος F-65 [47]

Μετά την αποσυνέλιξη της κυματομορφής και τη διόρθωση της συχνοτικής απόκρισης του ανιχνευτή ρεύματος, το σήμα μεταφέρεται εκ νέου στο πεδίο του χρόνου μέσω του Αντίστροφου Ταχή Μετασχηματισμού Fourier (Inverse FFT). Ωστόσο, η χρονική κυματομορφή που προκύπτει εξακολουθεί να περιέχει μικρές αλλά σημαντικές αποκλίσεις από το ιδανικό μηδενικό επίπεδο μετά την εκφόρτιση, εξαιτίας της παρουσίας DC offset που εισάγεται από τον παλμογράφο.

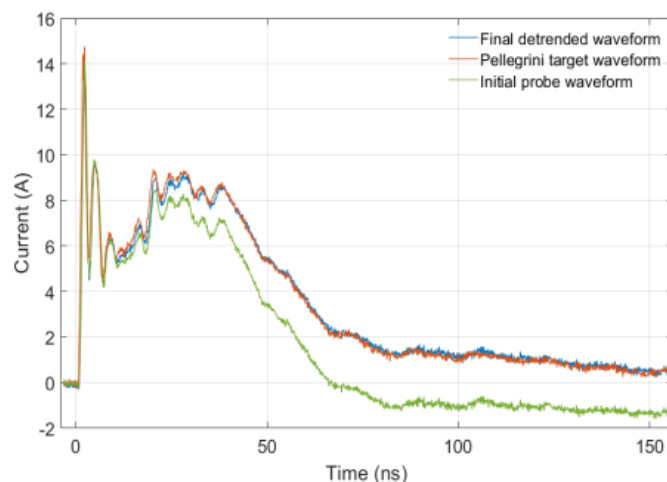
Το DC offset ενός παλμογράφου αποτελεί μια σταθερή ανεπιθύμητη συνιστώσα τάσης, η οποία προστίθεται στο επιθυμητό σήμα κατά την ανίχνευση. Σε συμβατικές μετρήσεις, το offset αυτό θεωρείται αμελητέο. Ωστόσο, στην περίπτωση μέτρησης ESD ρευμάτων με ανιχνευτή ρεύματος, το φαινόμενο αυτό γίνεται ιδιαίτερος κρίσιμος, λόγω της ολοκληρωτικής φύσης του ανιχνευτή: ακόμα και ένα μικρό στατικό σφάλμα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική σωρευτική απόκλιση στο ολοκληρωμένο ρεύμα, επηρεάζοντας την εκτίμηση του φορτίου και αλλοιώνοντας την επιστροφή της κυματομορφής στο μηδενικό επίπεδο.

Για την αντιμετώπιση του σφάλματος που προκαλείται από το DC offset του παλμογράφου, εφαρμόζεται διαδικασία detrending, κατά την οποία προστίθεται ή αφαιρείται μια σταθερή DC τιμή στην κυματομορφή ώστε να εξασφαλιστεί η επιστροφή της στο μηδέν μετά την εκφόρτιση. Η σωστή επιλογή της τιμής detrend είναι κρίσιμη, καθώς επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της εκτίμησης του μεταφερόμενου φορτίου και τη συνολική μορφή του παλμού. Εσφαλμένη αποτάση μπορεί να οδηγήσει σε παραμένονσα μετατόπιση της κυματομορφής ή σε λανθασμένο υπολογισμό του φορτίου, επηρεάζοντας τα τελικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της εκφόρτισης ESD.

Μετά την εφαρμογή της βέλτιστης τιμής detrend, το σήμα ανακατασκευάζεται πλήρως, αποκαθιστώντας το αρχικό φυσικό φαινόμενο της εκφόρτισης και επιτρέποντας την αξιόπιστη ανάλυση χαρακτηριστικών όπως το μέγιστο ρεύμα ($I_{\max}$), ο χρόνος ανόδου (t_{rise}), το ρεύμα στα 30 ns και 60 ns (I_{30} , I_{60}), καθώς και το συνολικό φορτίο.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.24, όπου παρουσιάζεται η αρχική κυματομορφή από τον ανιχνευτή, η κυματομορφή αναφοράς από τον στόχο Pellegrini, και η τελικά διορθωμένη και αποταμένη κυματομορφή μετά τη διαδικασία detrending, για παλμό +4 kV. Παρατηρείται ότι η ανακατασκευασμένη

κυματομορφή ακολουθεί πλέον πιστά το φυσικό σήμα αναφοράς, επιστρέφοντας στο μηδέν με ομαλό τρόπο και χωρίς σωρευτικά σφάλματα.



Σχήμα 3.24: Σύγκριση της κυματομορφής στόχου Pellegrini (αναφοράς), της αρχικής κυματομορφής που αποκτήθηκε από τον ανιχνευτή ρεύματος και της τελικής κυματομορφής που αποανακατασκευάστηκε για έναν παλμό +4 kV [47]

Στο σκέλος των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν πέντε επαναλήψεις για κάθε επίπεδο τάσης (+2, +4, +6 και +8 kV) και για τέσσερις διαφορετικές ESD γεννήτριες. Οι μέσες τιμές των detrend offsets που εφαρμόστηκαν σε κάθε περίπτωση και που θα χρησιμοποιηθούν και στην παρούσα διπλωματική, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Τιμές detrend για διαφορετικά επίπεδα δοκιμών και γεννήτριες δοκιμών ESD [47]

Επίπεδο τάσης [kV]	I _{max} [A]	mV/div	Τιμή detrend			
			DITO	NSG 433	NSG 438	Transient 3000
2	7,5	100	0,40	0,45	0,38	0,51
4	15	200	0,88	0,96	0,84	0,95
6	22,5	500	1,17	1,39	1,12	1,28
8	30	500	1,52	1,91	1,50	1,45

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τέσσερις διαφορετικές γεννήτριες ESD και τέσσερα επίπεδα τάσης (+2, +4, +6 και +8 kV), με πέντε επαναλήψεις ανά περίπτωση. Οι υπολογισθείσες παράμετροι περιλάμβαναν το μέγιστο ρεύμα (I_{max}), τον χρόνο ανόδου (t_{rise}), τις τιμές ρεύματος στα 30 ns και 60 ns (I₃₀, I₆₀), καθώς και το

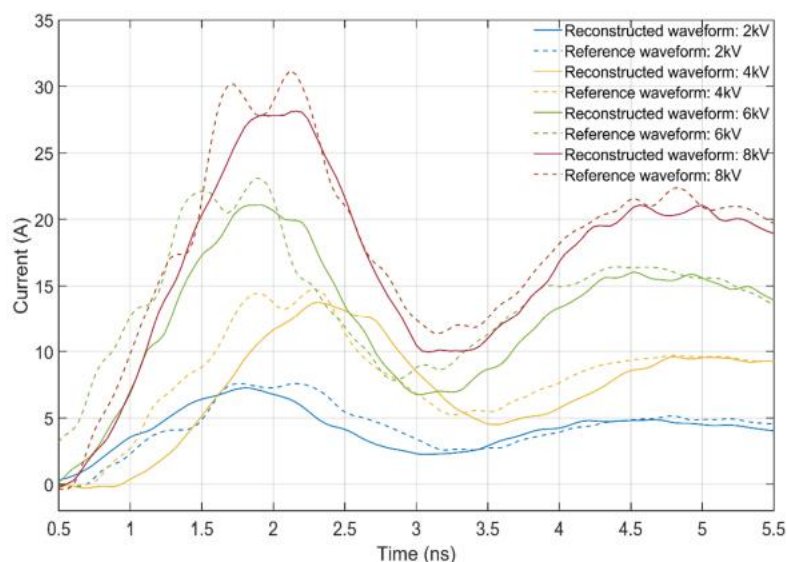
συνολικό μεταφερόμενο φορτίο. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές των βασικών παραμέτρων για την ανακατασκευασμένη και την κυματομορφή αναφοράς στο επίπεδο +4 kV. Για κάθε συνδυασμό παρουσιάστηκαν οι τιμές τόσο της ανακατασκευασμένης κυματομορφής όσο και της κυματομορφής αναφοράς από τον στόχο Pellegrini. Η σύγκριση μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων έδειξε ότι η μέθοδος αντιστάθμισης της συχνοτικής απόκρισης επιτυγχάνει πολύ καλή προσέγγιση στις παραμέτρους που σχετίζονται με τη χαμηλή συχνότητα, όπως το I₃₀, το I₆₀ και το φορτίο. Αντίθετα, οι παράμετροι υψηλής συχνότητας, I_{max} και t_{rise}, εμφάνισαν μεγαλύτερες αποκλίσεις, κυρίως λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης του ανιχνευτή FCC F-65 (1 GHz) και του φαινομένου φόρτωσης (loading effect).

Πίνακας 3.4: Ανακατασκευασμένες και αναφορικές παράμετροι ρεύματος ESD για τη γεννήτρια EM TEST Dito ESD [47]

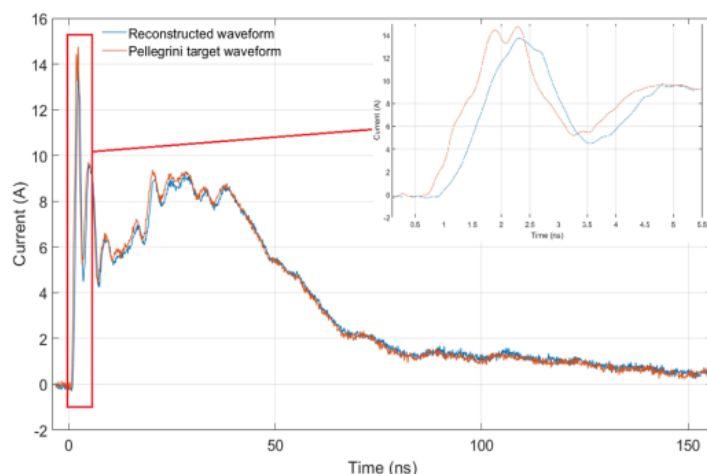
Επίπεδο τάσης [kV]		DITO				
		I _{max} [A]	t _{rise} [ns]	I ₃₀ [A]	I ₆₀ [A]	Φορτίο [nC]
2	FCC F65	7,260	0,927	3,852	1,872	236,226
	Pellegrini	7/581	0,853	4,059	1,839	245,346
4	FCC F65	13,757	0,961	8,125	3,326	440,175
	Pellegrini	14,760	0,893	8,085	3,291	481,197
6	FCC F65	21,102	0,928	13,296	5,183	697,017
	Pellegrini	23,100	0,903	13,427	5,166	675,119
8	FCC F65	28,135	0,934	17,654	6,532	1022,790
	Pellegrini	31,200	0,893	17,813	6,788	952,539

Οι αποκλίσεις στις τιμές του I_{max} αυξάνονταν με την αύξηση της τάσης εκφόρτισης, φθάνοντας έως και το 21% για ορισμένες γεννήτριες στο επίπεδο +4 kV, ξεπερνώντας έτσι τα όρια ανοχής του προτύπου IEC 61000-4-2. Το εύρος αυτών των αποκλίσεων διέφερε μεταξύ των γεννητριών, γεγονός που υποδεικνύει ότι η μέθοδος πρέπει να επικυρώνεται ξεχωριστά για κάθε διαφορετική γεννήτρια ESD. Το Σχήμα 3.25 παρουσιάζει γραφικά τις αποκλίσεις του I_{max} για όλα τα επίπεδα δοκιμής για μία από τις τέσσερις γεννήτριες.

Η ανακατασκευή της κυματομορφής ήταν γενικά πολύ ικανοποιητική από τα 5–6 ns και μετά, με τις κυματομορφές της ανακατασκευής και της αναφοράς να συγκλίνουν σχεδόν πλήρως, όπως φάνηκε στα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν για παλμούς +4 kV. Στο Σχήμα 3.26 απεικονίζεται η σύγκριση της ανακατασκευασμένης και της κυματομορφής αναφοράς για μία από τις γεννήτριες ESD.



Σχήμα 3.25: Σύγκριση του πρώτου μεγίστου της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή-στόχο Pellegrini (αναφοράς) για παλμό +2 kV, +4 kV, +6 kV και +8 kV της γεννήτριας EM TEST Dito ESD [47]



Σχήμα 3.26: Σύγκριση της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή-στόχο Pellegrini (αναφοράς) για έναν παλμό +4 kV της γεννήτριας EM TEST Dito ESD [47]

Στη συζήτηση των αποτελεσμάτων, επιβεβαιώθηκε η γραμμικότητα της τιμής αποτάσης (detrend) ως προς το επίπεδο τάσης για όλες τις γεννήτριες, γεγονός που υποδηλώνει τη σταθερότητα της μεθοδολογίας. Ωστόσο, επισημάνθηκε ότι η ακριβής

τιμή αποτάσης μπορεί να επηρεάζεται από παράγοντες όπως η συχνότητα δειγματοληψίας FFT/IFFT και τα χαρακτηριστικά του χαμηλοπερατού φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε στην αποσυνέλιξη. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον περιορισμό που επιβάλλει το εύρος ζώνης του ανιχνευτή. Με δεδομένο ότι για ακριβή αποτύπωση της αρχικής αιχμής του παλμού ESD απαιτείται εύρος ζώνης άνω των 2 GHz, το όριο του 1 GHz του FCC F-65 δεν επαρκεί για την πλήρη καταγραφή των ταχέων μεταβατικών φαινομένων. Αυτή η αδυναμία οδηγεί σε εξασθένηση του αρχικού παλμού και σε αύξηση του χρόνου ανόδου. Επιπλέον, παρατηρήθηκε το φαινόμενο φόρτωσης (loading effect) από τον ανιχνευτή ρεύματος, το οποίο προκαλεί περαιτέρω παραμορφώσεις στην καταγεγραμμένη κυματομορφή, ιδίως στον αρχικό παλμό. Η ανάγκη τοποθέτησης του ανιχνευτή γύρω από την άκρη της γεννήτριας ESD εντείνει το πρόβλημα, κάτι που υποδηλώνει ότι μελλοντικές εφαρμογές της μεθόδου θα πρέπει να εξετάζουν εναλλακτικά σημεία μέτρησης ή να ενσωματώνουν προσομοιώσεις φόρτωσης για τη διόρθωση αυτών των επιδράσεων.

Συμπερασματικά, η μέθοδος αντιστάθμισης μέσω αποσυνέλιξης αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη για την αποκατάσταση της χρονικής κυματομορφής σε μετρήσεις ESD, ιδίως για παραμέτρους χαμηλής συχνότητας. Ωστόσο, απαιτείται προσοχή όταν η ακριβής αποτύπωση των κορυφών και των ταχέων μεταβολών είναι κρίσιμη, και προτείνεται η περαιτέρω ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνικών μέτρησης ή εναλλακτικών μοντέλων για καλύτερη απόδοση στις υψηλές συχνότητες.

3.3.4 Στατιστική επεξεργασία κυματομορφών

Στη συνέχεια της επεξεργασίας των παραγόμενων κυματομορφών και αφού έχουν γίνει οι απαραίτητες διορθώσεις της προηγούμενης ενότητας, γίνεται μία στατιστική ανάλυση για κάθε σενάριο, προκειμένου να διερευνηθεί αν η αβεβαιότητα που εισάγεται λόγω του ανθρώπινου χειριστή μπορεί να μοντελοποιηθεί με κάποια γνωστή κατανομή πιθανότητας, ώστε να βελτιωθεί η αναπαραγωγικότητα των μετρήσεων. Η στατιστική μοντελοποίηση παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης εκτίμησης της μέσης τιμής και της διασποράς κάθε παραμέτρου, ενώ παράλληλα διευκολύνει την ενσωμάτωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στον συνολικό υπολογισμό της αβεβαιότητας. Όλη η στατιστική επεξεργασία έγινε μέσω του λογισμικού Matlab.

3.3.4.1 Ανάλυση κυματομορφών, βασικές παράμετροι και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας κάθε παραμέτρου

Αρχικά, βρέθηκε η μέση κυματομορφή για κάθε ανθρώπινο χειριστή. Αναλυτικότερα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, για κάθε άνθρωπο λήφθηκαν δέκα μετρήσεις κυματομορφών (η μορφή των δεδομένων είναι σε .csv αρχείο), ενώ η γεννήτρια ESD βρισκόταν σε αυτόματη παραγωγή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα +4kV. Για κάθε άτομο, η μέση κυματομορφή υπολογίζεται αρχικά διαβάζοντας τα δέκα ξεχωριστά αρχεία κυματομορφών, το καθένα εκ των οποίων περιέχει τα δεδομένα μίας μέτρησης κυματομορφής ESD. Για κάθε χρονικό σημείο αυτών των μετρήσεων, τα αντίστοιχα στιγμιαία ρεύματα αθροίζονται σημείο-προς-σημείο. Αφού συσσωρευτούν και οι δέκα κυματομορφές, το άθροισμα σε κάθε χρονικό σημείο διαιρείται δια δέκα, με αποτέλεσμα να προκύψει η μέση κυματομορφή του κάθε ανθρώπου, εξασφαλίζοντας ότι οι τυχαίες διακυμάνσεις μεταξύ των εκφορτίσεων εξομαλύνονται, παρέχοντας έτσι μια αντιπροσωπευτική κυματομορφή για κάθε άτομο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για δέκα μετρήσεις εκφορτίσεων χωρίς την παρουσία ανθρώπου και η μέση κυματομορφή που προκύπτει είναι η αναφορά για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι βασικές παράμετροι της μέσης κυματομορφής του κάθε ανθρώπου και της κυματομορφής αναφοράς χωρίς άνθρωπο, που (βάσει Προτύπου) συνοψίζονται στις:

- I_{max} : μέγιστη τιμή του ρεύματος, δηλαδή το πρώτο peak της κυματομορφής
- t_{rise} : χρόνος ανόδου, υπολογιζόμενος ως ο χρόνος από το 10% έως το 90% της πρώτης κορυφής, όπως ορίζεται και στο Πρότυπο
- I_{p2} : το μέγιστο ρεύμα μεταξύ 10ns και 40ns, δηλαδή το δεύτερο peak της κυματομορφής
- I_{30} : η τιμή του ρεύματος στα 30ns
- I_{60} : η τιμή του ρεύματος στα 60ns

Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται σε έναν πίνακα, προκειμένου να μπορεί να γίνει η σύγκρισή τους με την κυματομορφή αναφοράς. Στη συνέχεια υπολογίζεται για κάθε παράμετρο η μέση τιμή των δέκα ανθρώπων και βρίσκεται η εκατοστιαία απόκλιση της από την τιμή της κυματομορφής αναφοράς ως εξής:

$$Deviation (\%) = \frac{Mean\ value\ of\ 10\ individuals - Refercne\ value\ (no\ human)}{Refercne\ value\ (no\ human)} \cdot 100\%$$

Για κάθε παράμετρο υπολογίζεται ακόμα η αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας μεταξύ των 10 ανθρώπων, ως εξής:

$$Reproducibility\ Uncertainty\ (\%) = \frac{\sigma}{\sqrt{N} \cdot \mu} \cdot 100\%$$

Όπου σ η τυπική απόκλιση των μετρήσεων της κάθε παραμέτρου για τους διαφορετικούς ανθρώπινους χειριστές, N το πλήθος των διαφορετικών ανθρώπινων χειριστών (στη συγκεκριμένη εργασία $N=10$) και μ η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου για τους διαφορετικούς ανθρώπινους χειριστές.

Τέλος, πλοτάρονται συγκεντρωτικά οι μέσες κυματομορφές ρεύματος για κάθε άνθρωπο ξεχωριστά και για την περίπτωση χωρίς άνθρωπο (αναφορά), καθώς και τα αντίστοιχα φασματικά διαγράμματα.

3.3.4.2 Στατιστική ανάλυση κυματομορφών: ιστογράμματα, θεωρητικές κατανομές και αξιολόγηση προσαρμογής

Στο δεύτερο μέρος της ανάλυσης, η κατνομή πυκνότητας πιθανότητας κάθε παραμέτρου οπτικοποιείται χρησιμοποιώντας το ιστόγραμμα. Αναλυτικότερα, για μία επιλεγμένη παράμετρο (όπως η μέγιστη τιμή ρεύματος, ο χρόνος ανόδου κλπ.), ο κώδικας πρώτα συλλέγει όλες τις τιμές (μία ανά άτομο) σε ένα διάνυσμα. Στη συνέχεια δημιουργεί ένα ιστόγραμμα αυτού του διανύσματος, ορίζοντας τα άκρα των διαστημάτων (bin edges) ώστε να χωρίσουν το εύρος των δεδομένων σε μικρό αριθμό διαστημάτων — συγκεκριμένα, τα άκρα των διαστημάτων τοποθετούνται ομοιόμορφα μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου των τιμών, χρησιμοποιώντας συνολικά πέντε διαστήματα. Το ιστόγραμμα μετρά πόσα δεδομένα πέφτουν σε κάθε διάστημα και στη συνέχεια κανονικοποιείται ώστε το συνολικό εμβαδόν κάτω από το ιστόγραμμα να ισούται με 1, αναπαριστώντας έτσι μια εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF). Αυτό το κανονικοποιημένο ιστόγραμμα προσεγγίζει την εμπειρική πιθανότητα κατανομής της παραμέτρου ανάμεσα σε όλους τους χειριστές.

Μόλις δημιουργηθεί το ιστόγραμμα, εφαρμόζονται θεωρητικές κατανομές (Κανονική, Λογαριθμοκανονική, Gamma και Weibull) στα δεδομένα και οι αντίστοιχες καμπύλες PDF προβάλλονται πάνω στο ιστόγραμμα για οπτική σύγκριση. Η προσαρμογή των κατανομών πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `fitdist` του

MATLAB. Για κάθε παράμετρο δημιουργεί ένα υποδιάγραμμα (subplot), όπου εμφανίζεται το ιστόγραμμα των μετρημένων τιμών μαζί με τις καμπύλες των τεσσάρων προσαρμοσμένων κατανομών. Για την περιγραφή των μετρούμενων δεδομένων, όπως προαναφέρθηκε εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές πιθανότητες κατανομών: η Κανονική (Normal), η Λογαριθμοκανονική (Log-Normal), η Gamma και η Weibull. Η Κανονική κατανομή θεωρείται κατάλληλη για συμμετρικές, μικρές διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή, όπως σε τυπικά σφάλματα μέτρησης. Η Λογαριθμοκανονική κατανομή χρησιμοποιείται σε δεδομένα με θετική ασυμμετρία, όπως παρατηρείται συχνά στον χρόνο ανόδου. Η κατανομή Gamma είναι επίσης κατάλληλη για ασύμμετρα, μη αρνητικά δεδομένα, όπως η διάρκεια ή η ένταση παλμών, ενώ η Weibull χρησιμοποιείται για χαρακτηριστικά που εξαρτώνται από κατώφλια, όπως φαινόμενα επαγόμενης χωρητικότητας.

Η εφαρμογή αυτών των κατανομών στα πειραματικά δεδομένα έγινε με χρήση της μεθόδου μεγίστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation – MLE). Η βέλτιστη εκτίμηση των παραμέτρων της κάθε κατανομής επιτεύχθηκε με την επίλυση της εξίσωσης:

$$l(\theta) = \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i|\theta)$$

όπου $f(x_i|\theta)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για κάθε παρατήρηση x_i και σύνολο παραμέτρων θ . Για τις Κανονική και Λογαριθμοκανονική κατανομές, οι παράμετροι είναι η μέση τιμή μ και η τυπική απόκλιση σ , ενώ για τις κατανομές Gamma και Weibull είναι ο συντελεστής μορφής k και η παράμετρος κλίμακας λ .

Η ποιότητα κάθε στατιστικής προσαρμογής αξιολογείται μέσω του υπολογισμού του Σφάλματος Ρίζας Μέσου Τετραγώνου (Root Mean Square Error – RMSE) μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και της προσαρμοσμένης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF). Πιο συγκεκριμένα, το RMSE υπολογίζεται στα κέντρα των διαστημάτων (bins) του ιστογράμματος, συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές της PDF. Για να επιτευχθεί μία κανονικοποιημένη αξιολόγηση, ανεξάρτητη από την κλίμακα των δεδομένων, χρησιμοποιείται το κανονικοποιημένο RMSE (RMSE_n), το οποίο ορίζεται ως:

$$RMSE_n = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\max(y) - \min(y)}$$

όπου y_i είναι οι πειραματικές τιμές, $\hat{y}_i$ οι τιμές της PDF στα αντίστοιχα σημεία, N το πλήθος των σημείων, και $\max(y) - \min(y)$ το εύρος των δεδομένων. Η χρήση του $RMSE_n$ είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση της ποιότητας προσαρμογής μεταξύ διαφορετικών τύπων δεδομένων, ακόμα και όταν αυτά διαφέρουν σημαντικά ως προς το εύρος ή την κλίμακά τους.

Γενικά, τιμές $RMSE_n$ κοντά στο μηδέν δηλώνουν πολύ καλή προσαρμογή, καθώς η μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών είναι πολύ μικρή σε σχέση με το εύρος των δεδομένων. Αντίθετα, τιμές $RMSE_n$ μεγαλύτερες από 0,3 υποδεικνύουν ανεπαρκή προσαρμογή και την ανάγκη αναθεώρησης του μοντέλου που χρησιμοποιείται. Τυπικά, τιμές κάτω από 0,1 θεωρούνται εξαιρετικές, ενώ τιμές μεταξύ 0,1 και 0,3 χαρακτηρίζονται ως αποδεκτές για πρακτικούς σκοπούς.

Η εφαρμογή του $nRMSE$ στο πλαίσιο της στατιστικής προσαρμογής των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος ESD επιτρέπει την αντικειμενική και ακριβή αξιολόγηση της ποιότητας κάθε υποψήφιας κατανομής (Normal, Log-Normal, Gamma, Weibull), συμβάλλοντας στον εντοπισμό της βέλτιστης μαθηματικής προσέγγισης για την περιγραφή της μεταβλητότητας των μετρούμενων παραμέτρων.

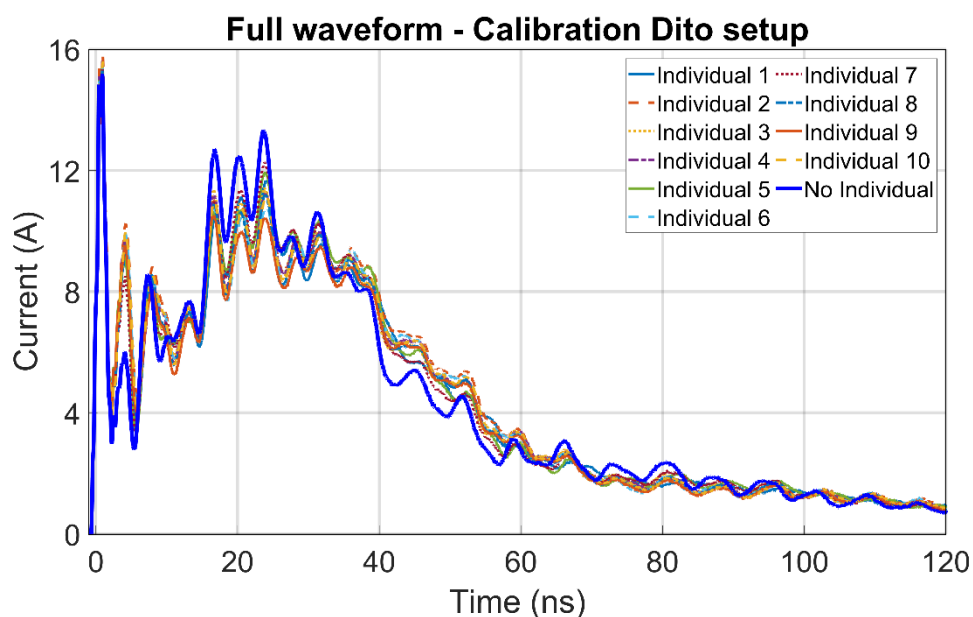
Τέλος, το πρόγραμμα εκτυπώνει τις τιμές του κανονικοποιημένου $RMSE$ για όλες τις παραμέτρους και για όλες τις κατανομές, προσφέροντας έναν σαφή ποσοτικό δείκτη του πόσο καλά κάθε κατανομή ταιριάζει με τα παρατηρηθέντα δεδομένα. Το αποτέλεσμα είναι τόσο οπτικό (μέσω των διαγραμμάτων) όσο και αριθμητικό (μέσω των πινάκων $RMSE$), στηρίζοντας ασφαλή συμπεράσματα για το ποια στατιστικά μοντέλα περιγράφουν καλύτερα τη μεταβλητότητα που προκαλείται από τον χειριστή στις παραμέτρους της κυματομορφής.

3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

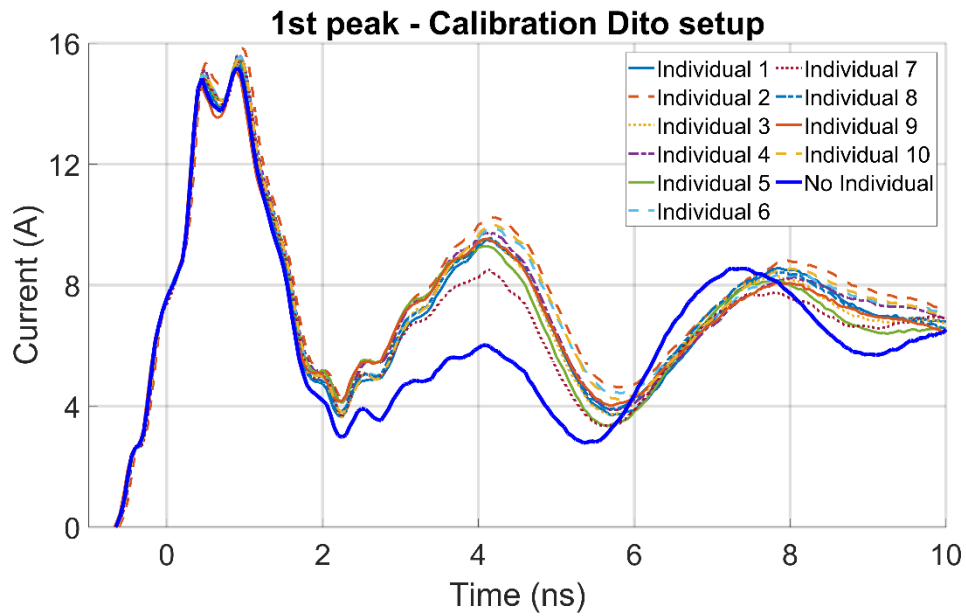
3.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων βασικών παραμέτρων και αβεβαιοτήτων αναπαραγωγιμότητας

Παρακάτω παρατίθενται για κάθε γεννήτρια ESD και για κάθε διάταξη (τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης και διάταξη δοκιμών), οι μέσες κυματομορφές των 10 ανθρώπινων χειριστών και η μέση κυματομορφή αναφοράς (χωρίς ανθρώπινο χειριστή), καθώς επίσης και οι πίνακες που προκύπτουν από το πρώτο στάδιο επεξεργασίας του Matlab. Αναλυτικότερα, για κάθε περίπτωση (κάποια γεννήτρια ESD και κάποια από τις δύο διατάξεις) παρατίθεται ένα αρχικό διάγραμμα που φαίνεται ολόκληρη η κυματομορφή από -1ns έως 120ns και στη συνέχεια δύο μεγεθύνσεις του διαγράμματος (η πρώτη από -1ns έως 10ns και η δεύτερη από 10ns έως 80ns), ώστε να φαίνονται καθαρά τα δύο peaks της κυματομορφής και να μπορεί να γίνει μία πρώτη οπτική σύγκριση. Η κάθε περίπτωση ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του πίνακα που περιγράφεται στη ενότητα 3.3.4.1.

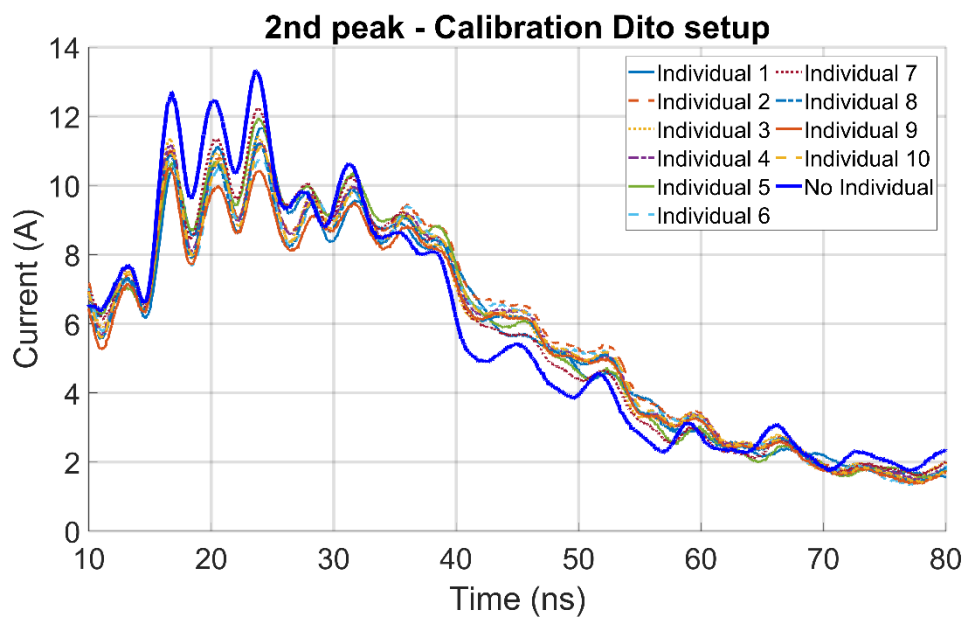
3.4.1.1 Διακρίβωση DITO



Σχήμα 3.27: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO



Σχήμα 3.28: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO



Σχήμα 3.29: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO

Πίνακας 3.5: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO

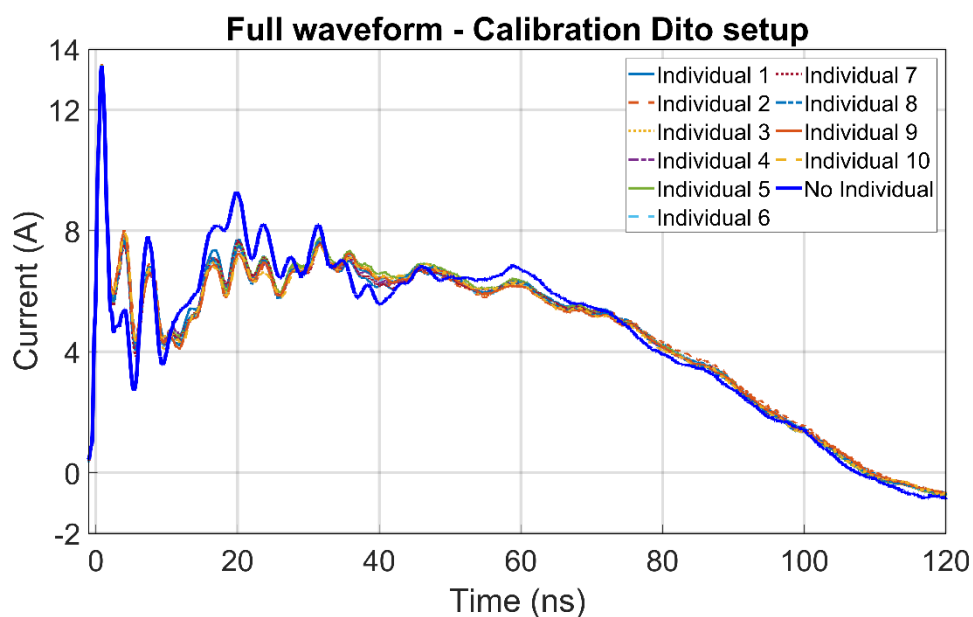
Χειριστής	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]
1	15,43	0,888	11,67	8,423	2,907
2	15,86	0,881	11,27	9,075	3,502
3	15,42	0,883	11,43	8,809	3,393
4	15,59	0,876	11,24	9,146	3,362
5	15,45	0,877	11,95	9,108	3,015
6	15,58	0,880	10,83	9,118	3,333
7	15,46	0,883	12,26	8,891	2,996
8	15,29	0,884	11,20	8,692	3,300
9	15,04	0,881	10,52	8,737	3,272
10	15,60	0,881	11,16	8,998	3,341
Μέση τιμή	15,47	0,881	11,35	8,900	3,242
Αναφορά	15,19	0,878	13,33	8,826	3,146
Απόκλιση [%]	1,843	0,342	-14,85	0,838	3,051
Αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας [%]	0,440	0,123	1,418	0,835	1,927

Η επίδραση του ανθρώπινου σώματος είναι εμφανής από τα σχήματα. Παρόλο που το πρώτο μέγιστο στο Σχήμα 3.28 φαίνεται να επηρεάζεται σχετικά λίγο, εμφανίζονται αξιοσημείωτες αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών των ατόμων και της κυματομορφής αναφοράς μετά το χρονικό σημείο των 2 ns. Παρομοίως, το Σχήμα 3.29 αναδεικνύει σημαντικές διακυμάνσεις στα χρονικά διαστήματα 15ns – 30ns και 40ns – 60ns, καταδεικνύοντας τη σημαντική επίδραση της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης στη φθίνουσα και ταλαντωτική συμπεριφορά της κυματομορφής.

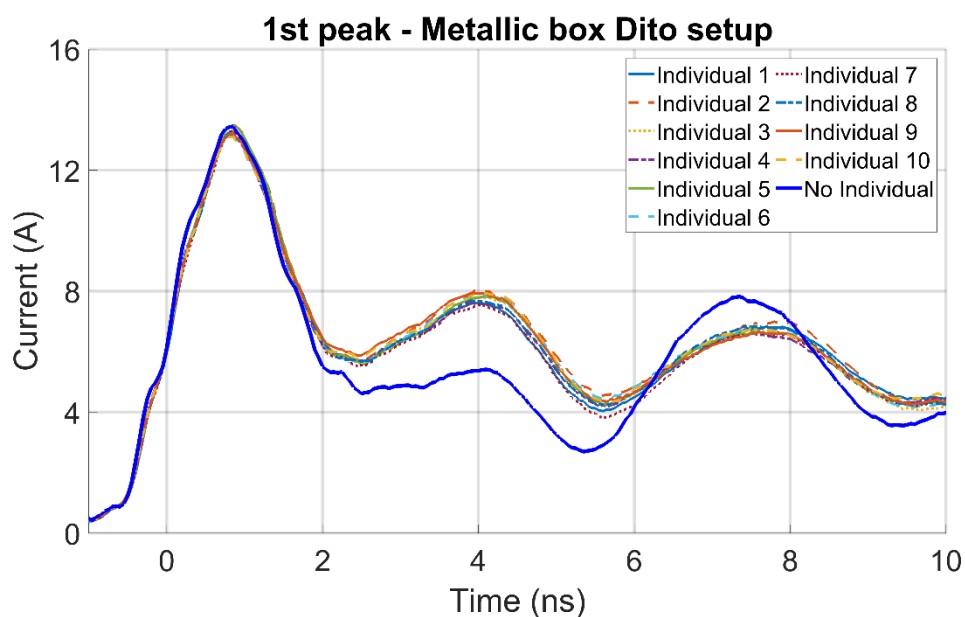
Οι υπολογισμένες αβεβαιότητες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5, υπογραμμίζουν τη σημασία των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ των διαφορετικών ατόμων. Συγκεκριμένα οι χαμηλότερες τιμές αναπαραγωγιμότητας για τις παραμέτρους που σχετίζονται με την πρώτη κορυφή της κυματομορφής επιβεβαιώνουν τις προηγούμενες ποιοτικές παρατηρήσεις, δηλαδή ότι το ανθρώπινο σώμα έχει ελάχιστη επίδραση στο

αρχικό τμήμα του παλμού. Αντίθετα, οι παράμετροι που σχετίζονται με το δεύτερο μέγιστο παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές αναπαραγωγιμότητας, καταδεικνύοντας τη μεγάλη επίδραση της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης στο μεταγενέστερο τμήμα της κυματομορφής — επιρροή που μπορεί να μην αναγνωρίζεται άμεσα από τις μικρές αποκλίσεις στις μέσες τιμές του Πίνακα 3.5.

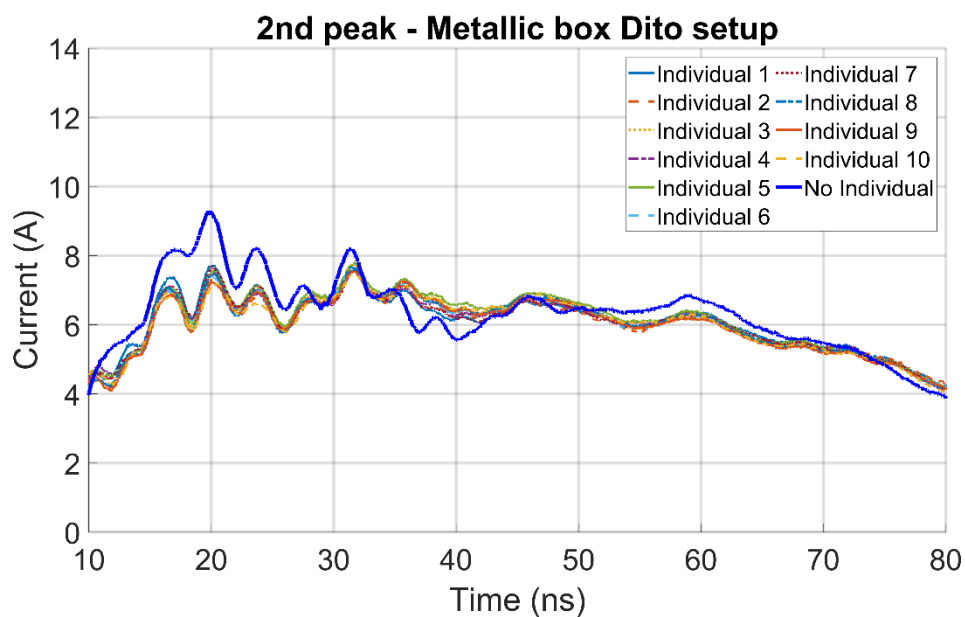
3.4.1.2 Διάταξη δοκιμών DITO



Σχήμα 3.30: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση δοκιμών του DITO



Σχήμα 3.31: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του DITO



Σχήμα 3.32: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του DITO

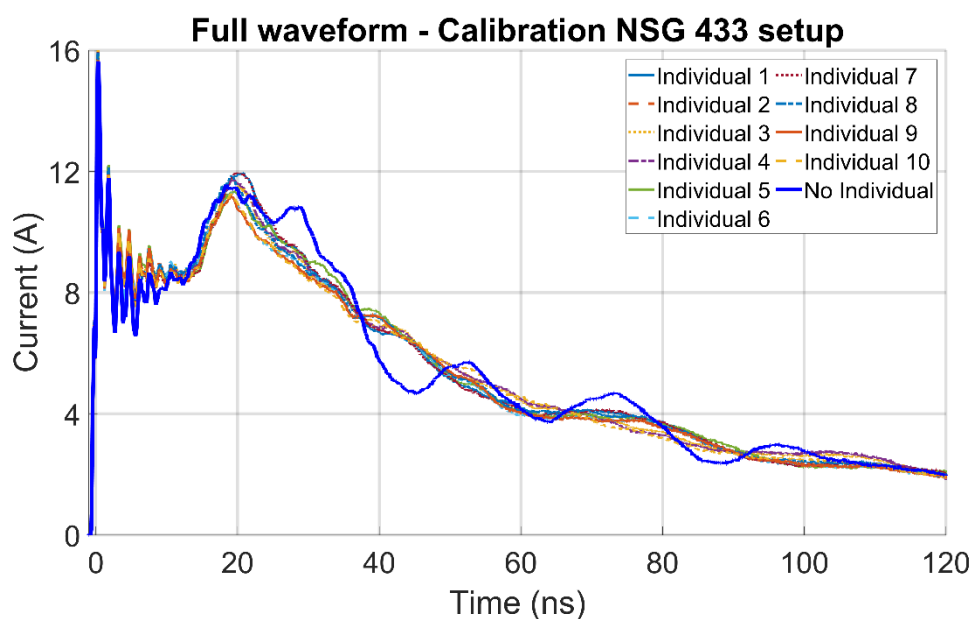
Πίνακας 3.6: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση δοκιμών του DITO

Χειριστής	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]
1	13,28	1,056	7,730	6,565	6,359
2	13,52	1,067	7,662	6,673	6,215
3	13,27	1,052	7,738	6,719	6,189
4	13,19	1,060	7,562	6,608	6,362
5	13,49	1,057	7,801	6,753	6,378
6	13,21	1,057	7,629	6,625	6,230
7	13,33	1,089	7,706	6,561	6,284
8	13,17	1,068	7,685	6,555	6,312
9	13,23	1,080	7,563	6,620	6,206
10	13,10	1,056	7,495	6,691	6,323
Μέση τιμή	13,28	1,064	7,657	6,637	6,286
Αναφορά	13,54	1,069	9,306	6,666	6,722
Απόκλιση [%]	-1,920	-0,468	-13,35	-0,435	-6,486
Αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας [%]	0,322	0,356	0,391	0,331	0,358

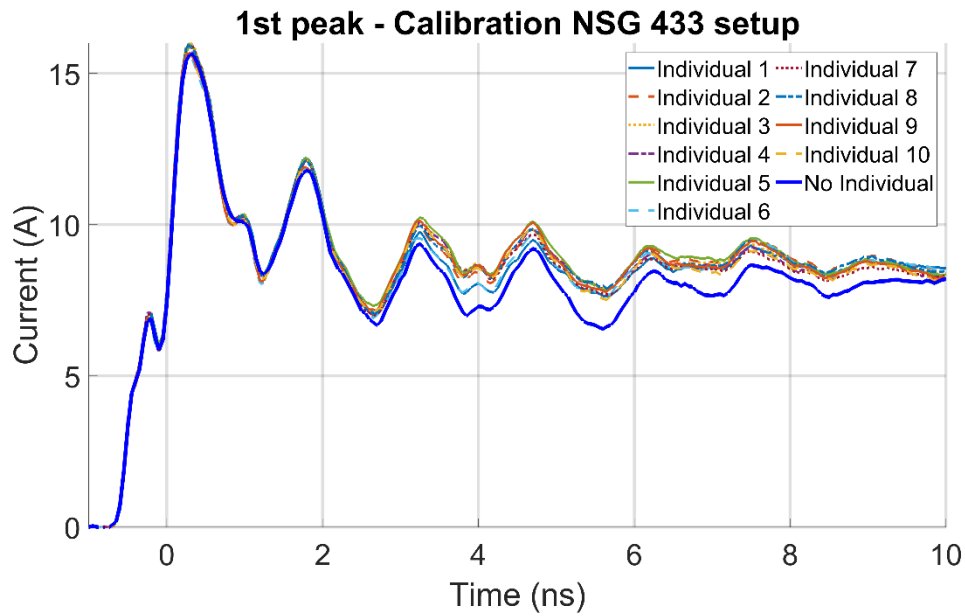
Ομοίως και στην περίπτωση των δοκιμών, παρ' ότι η μορφή της κυματομορφής τροποποιείται, η σχέση μεταξύ των κυματομορφών των ανθρώπων με την κυματομορφή αναφοράς παρουσιάζει παρόμοιες διαφορές. Και πάλι η επίδραση του ανθρώπινου σώματος είναι εμφανής. Το πρώτο μέγιστο εξακολουθεί να επηρεάζεται σχετικά λίγο, εμφανίζοντας αξιοσημείωτες αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών των ατόμων και της κυματομορφής αναφοράς μετά το χρονικό σημείο των 2 ns. Παρομοίως, το Σχήμα 3.31 αναδεικνύει σημαντικές διακυμάνσεις στα χρονικά διαστήματα 10ns –30ns και 50ns – 70ns.

Οι υπολογισμένες αβεβαιότητες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6, υποδεικνύουν σχετικά χαμηλές τιμές αναπαραγωγιμότητας για όλες τις παραμέτρους, γεγονός που φανερώνει ότι ο ανθρώπινος χειριστής ασκεί μια σχετικά σταθερή επίδραση στην κυματομορφή. Αντίθετα, οι σημαντικές αποκλίσεις, και ιδιαίτερα στην παράμετρο IP2, μεταξύ των μέσων τιμών των κυματομορφών με συμμετοχή ανθρώπου και της αντίστοιχης αναφοράς, καταδεικνύουν τη σημαντική επιρροή του ανθρώπινου παράγοντα στο ρεύμα ESD.

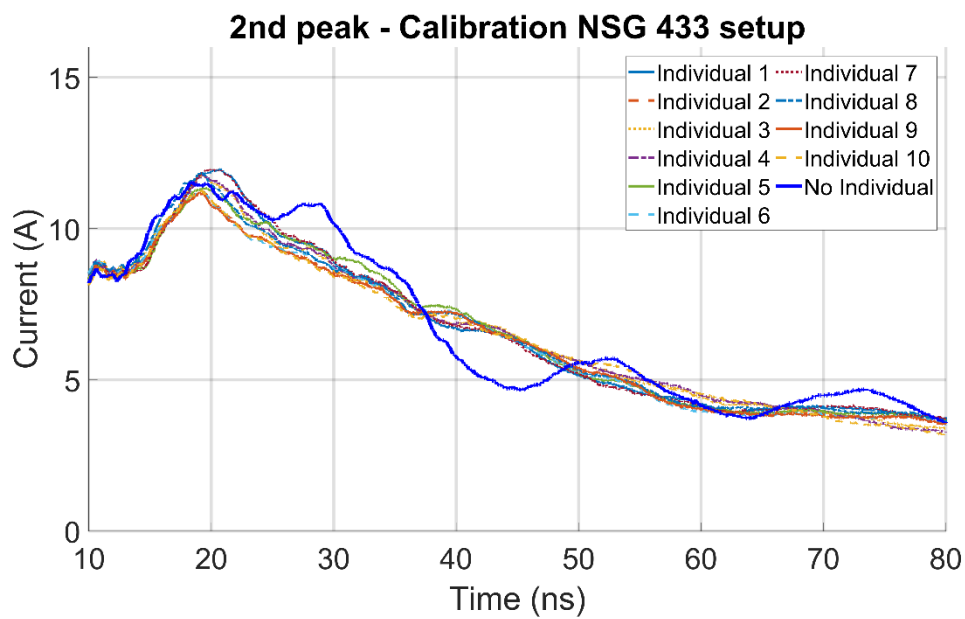
3.4.1.3 Διακρίβωση NSG 433



Σχήμα 3.33: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433



Σχήμα 3.34: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433



Σχήμα 3.35: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433

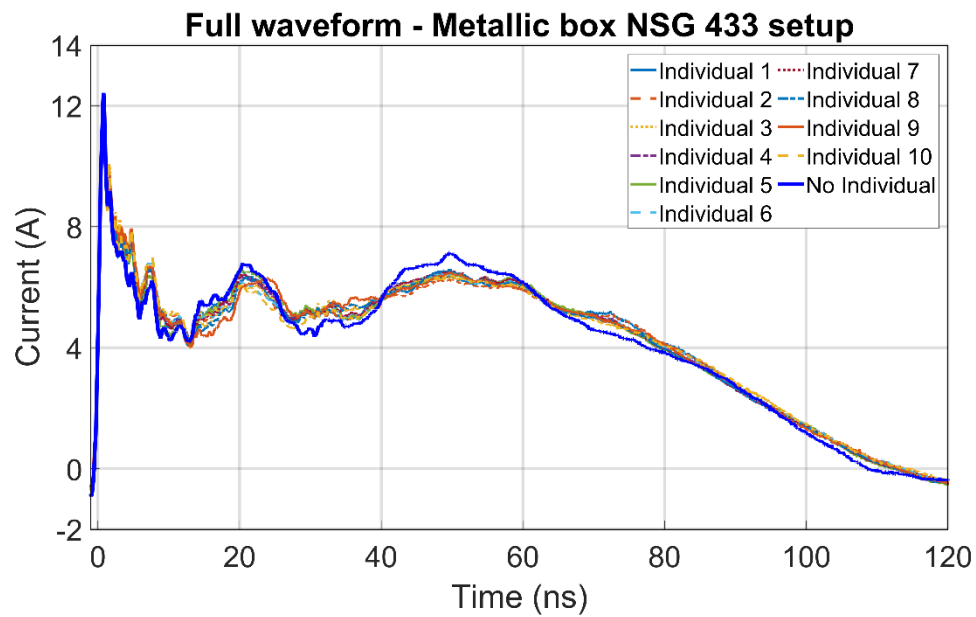
Πίνακας 3.7: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433

Χειριστής	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]
1	16,09	0,735	11,96	9,182	4,258
2	15,75	0,737	11,26	8,659	4,081
3	16,02	0,740	11,78	8,977	4,481
4	15,93	0,736	11,78	9,08	4,574
5	15,92	0,740	11,35	9,09	4,151
6	15,66	0,732	11,3	8,773	3,964
7	15,96	0,738	11,97	9,225	4,175
8	15,93	0,735	11,88	8,844	4,100
9	15,67	0,734	11,22	8,667	4,080
10	15,62	0,737	11,28	8,519	4,615
Μέση τιμή	15,86	0,736	11,58	8,902	4,248
Αναφορά	15,48	0,739	11,64	10,72	4,268
Απόκλιση [%]	2,455	-0,419	-0,516	-16,96	-0,469
Αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας [%]	0,331	0,107	0,873	0,867	1,699

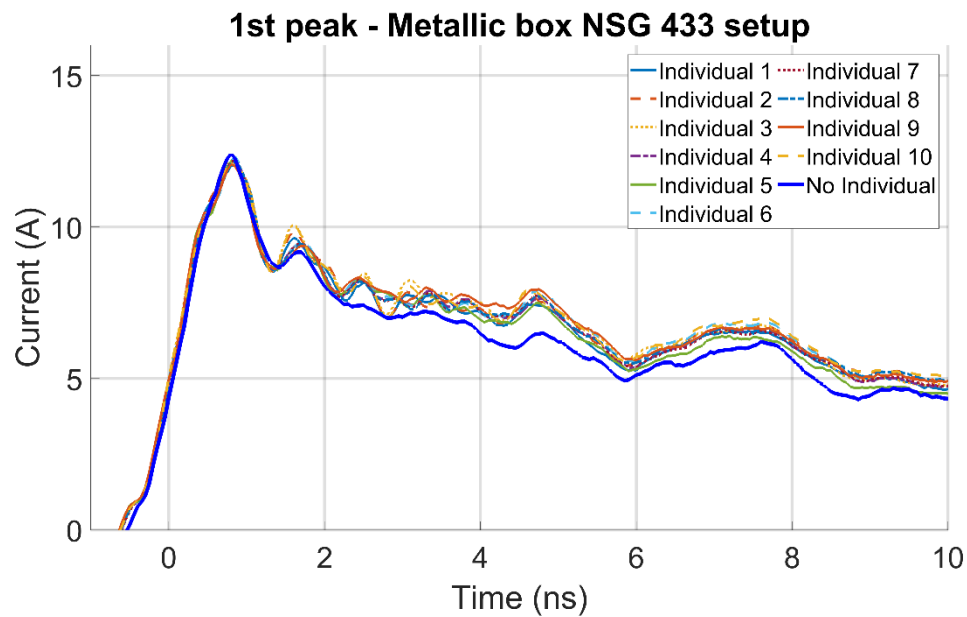
Παρ' ότι αλλάζει η γεννήτρια και η μορφή της κυματομορφής, παρατηρείται και πάλι η έντονη επίδραση του ανθρώπου σε αυτή. Το πρώτο μέγιστο εξακολουθεί να επηρεάζεται ελάχιστα, εμφανίζοντας αξιοσημείωτες αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών των ατόμων και της κυματομορφής αναφοράς μετά το χρονικό σημείο των 2 ns. Παρομοίως, το Σχήμα 3.36 αναδεικνύει σημαντικές διακυμάνσεις στο χρονικό διάστημα 25ns –50ns.

Οι υπολογισμένες αβεβαιότητες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7, υποδεικνύουν αρκετά χαμηλές τιμές αναπαραγωγιμότητας για τις παραμέτρους που σχετίζονται με το πρώτο μέγιστο, αλλά αντίθετα υψηλότερες τιμές για τις παραμέτρους που σχετίζονται με το μεταγενέστερο κομμάτι. Υψηλές τιμές εμφανίζουν και οι αποκλίσεις μεταξύ της μέσης τιμής των κυματομορφών με άνθρωπο και της κυματομορφής αναφοράς, ειδικά για την παράμετρο I_{30} .

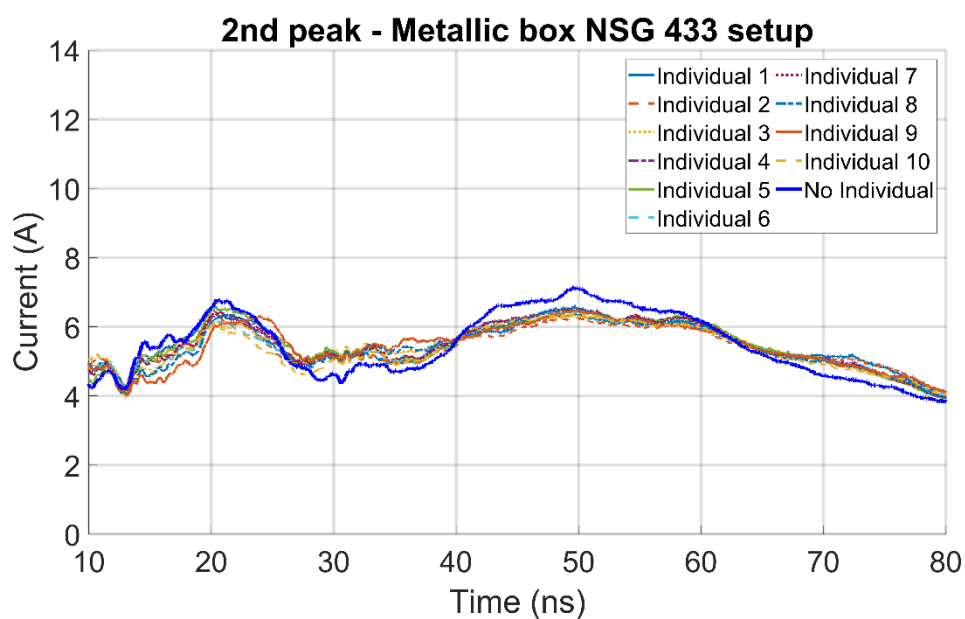
3.4.1.4 Διάταξη δοκιμών NSG 433



Σχήμα 3.36: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433



Σχήμα 3.37: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433



Σχήμα 3.38: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433

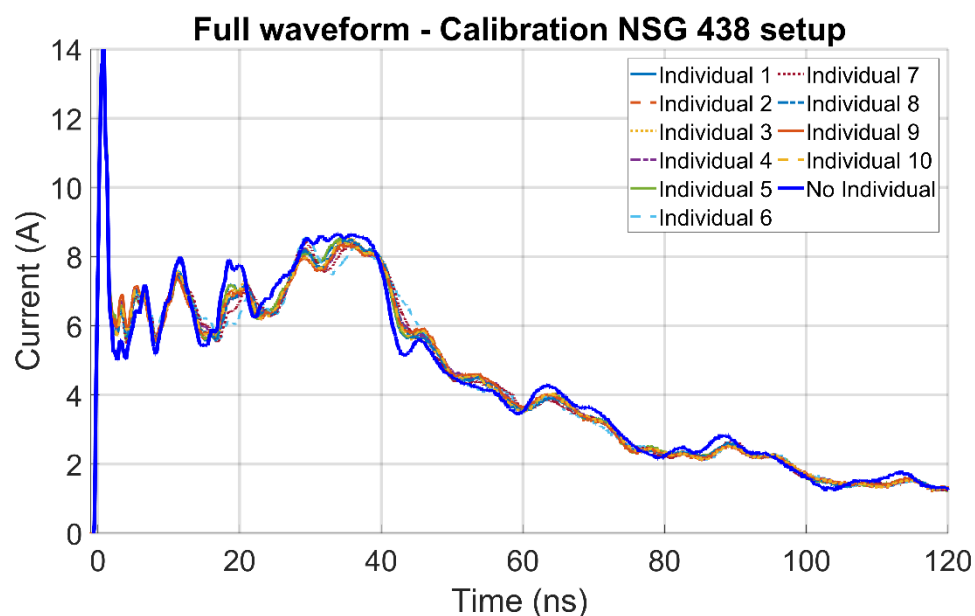
Πίνακας 3.8: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433

Χειριστής	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]
1	12,04	0,865	6,595	5,232	5,996
2	12,07	0,839	6,356	5,120	5,941
3	12,17	0,888	6,161	5,227	6,076
4	12,33	0,930	6,373	5,205	6,093
5	12,17	0,936	6,554	5,287	6,180
6	12,34	0,946	6,211	5,037	6,044
7	12,20	0,911	6,455	5,138	6,129
8	12,17	0,915	6,370	5,079	6,080
9	12,08	0,941	6,314	5,144	5,916
10	12,14	0,891	6,085	4,992	6,032
Μέση τιμή	12,17	0,906	6,347	5,146	6,049
Αναφορά	12,48	0,905	6,886	4,572	6,184
Απόκλιση [%]	-2,513	0,141	-7,829	12,55	-2,185
Αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας [%]	0,262	1,227	0,814	0,573	0,426

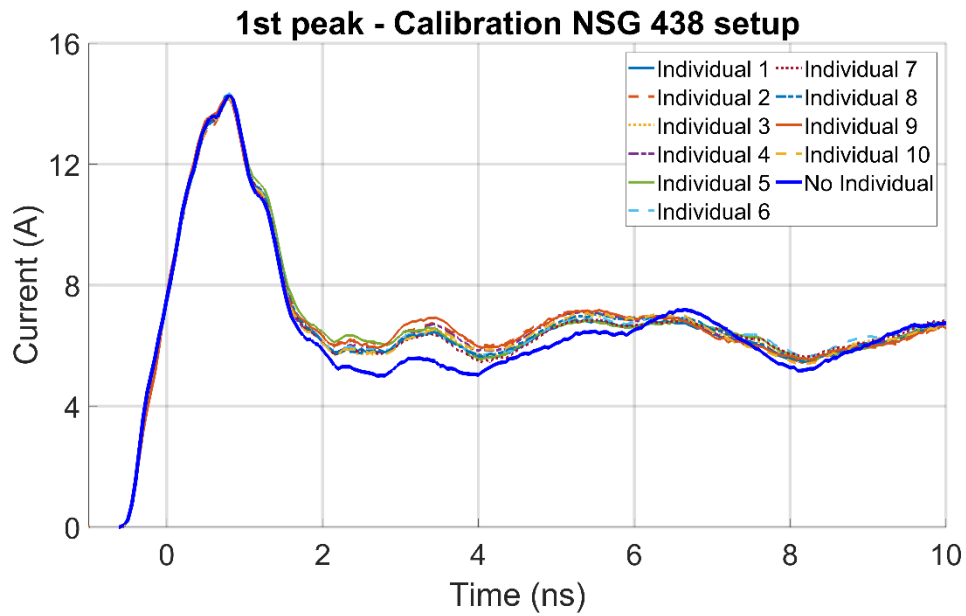
Όπως και στην περίπτωση του DITO, έτσι και για το NSG 433, παρατηρείται αλλαγή στη μορφή της κυματομορφής δοκιμών σε σχέση με αυτή της διακρίβωσης, ωστόσο η επίδραση του ανθρώπου γίνεται εμφανής για ακόμα μία φορά. Το πρώτο μέγιστο εξακολουθεί να επηρεάζεται ελάχιστα, εμφανίζοντας αξιοσημείωτες αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών των ατόμων και της κυματομορφής αναφοράς μετά το χρονικό σημείο των 2 ns. Παρομοίως, το Σχήμα 3.36 αναδεικνύει σημαντικές διακυμάνσεις στο χρονικό διάστημα 10ns –60ns.

Οι υπολογισμένες αβεβαιότητες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7, υποδεικνύουν αρκετά χαμηλές τιμές αναπαραγωγιμότητας για την παραμέτρο που σχετίζονται με την τιμή ρεύματος του πρώτου μεγίστου, αλλά αντίθετα υψηλότερη τιμή για το χρόνο ανόδου, κάτι που παρατηρείται πρώτη φορά στις μέχρι τώρα δοκιμές. Μάλιστα, η τιμή της αβεβαιότητας αναπαραγωγιμότητας του χρόνου ανόδου στην περίπτωση αυτή, είναι μεγαλύτερη ακόμα και από τις τιμές αβεβαιότητας που αφορούν το δεύτερο μέγιστο. Τέλος, για ακόμα μία φορά είναι εμφανής η υψηλή απόκλιση της μέσης τιμής των κυματομορφών με άνθρωπο σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς (χωρίς άνθρωπο) για το I_{p2} και το I_{30} .

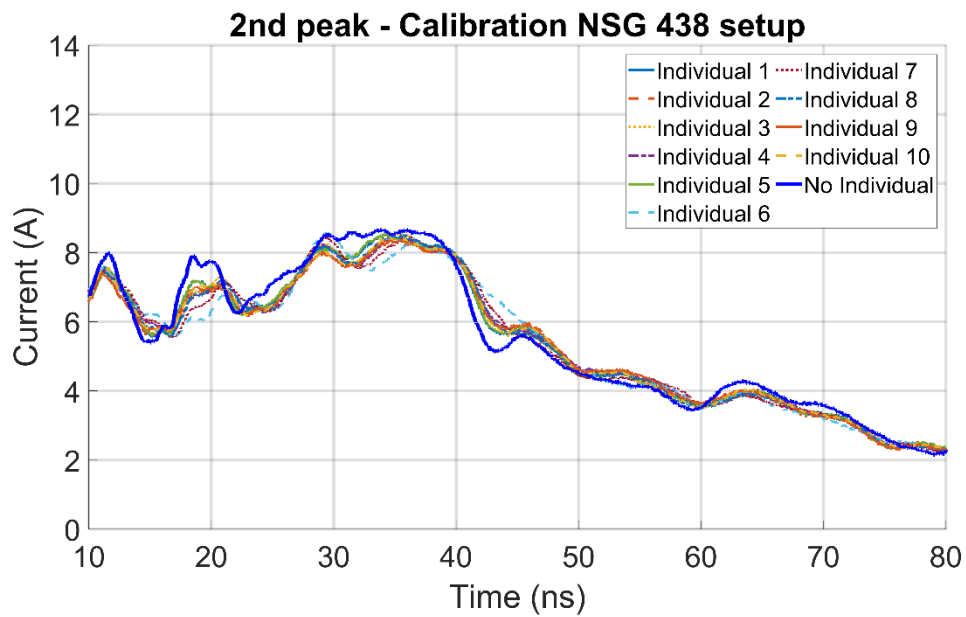
3.4.1.5 Διακρίβωση NSG 438



Σχήμα 3.39: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438



Σχήμα 3.40: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438



Σχήμα 3.41: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 2ο μέγιστο για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438

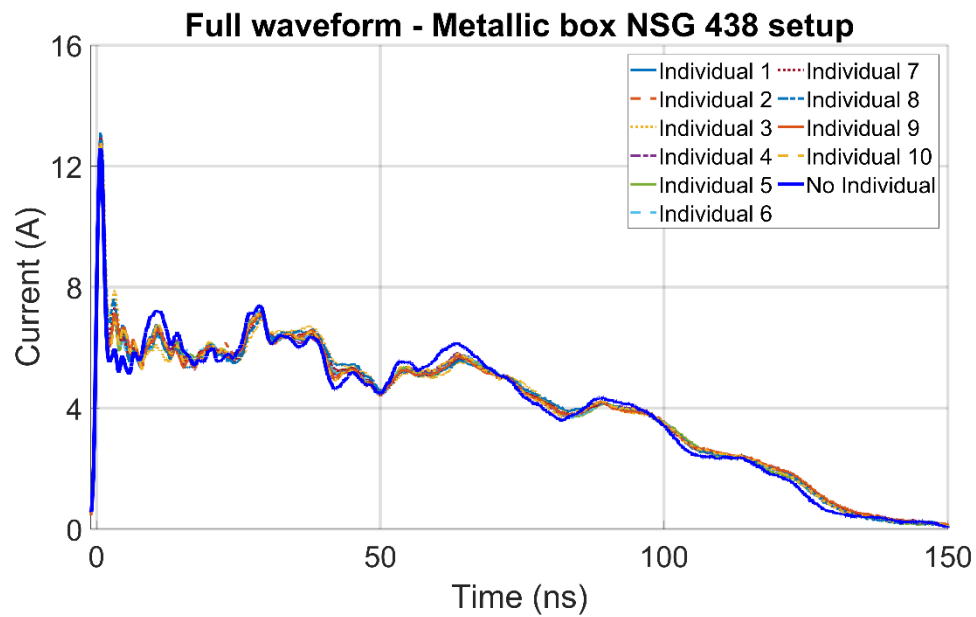
Πίνακας 3.9: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438

Χειριστής	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]
1	14,27	0,858	8,552	8,165	3,592
2	14,22	0,862	8,336	7,915	3,629
3	14,18	0,847	8,560	8,222	3,537
4	14,15	0,849	8,480	8,139	3,631
5	14,32	0,861	8,552	8,051	3,619
6	14,34	0,859	8,576	8,536	3,643
7	14,20	0,862	8,464	8,396	3,671
8	14,26	0,865	8,528	8,113	3,512
9	14,23	0,818	8,376	7,944	3,640
10	14,21	0,862	8,456	7,921	3,512
Μέση τιμή	14,24	0,854	8,488	8,140	3,599
Αναφορά	14,30	0,847	8,672	8,514	3,519
Απόκλιση [%]	-0,420	0,826	-2,122	-4,393	2,273
Αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας [%]	0,133	0,519	0,304	0,793	0,509

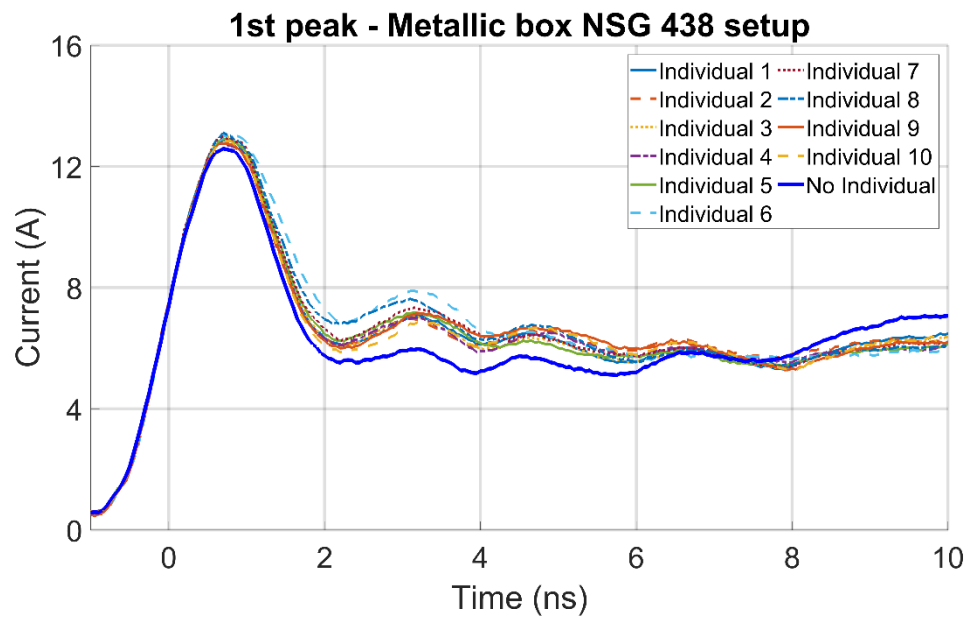
Στο πιστόλι αυτό, από μία αρχική οπτική σύγκριση των κυματομορφών παρατηρείται μειωμένη η ανθρώπινη επίδραση, αλλά επαρκής. Διαφορές παρατηρούνται κυρίως στα χρονικά διαστήματα 2ns – 6ns και 10ns – 45ns.

Οι τιμές αβεβαιότητας αναπαραγωγιμότητας είναι σχετικά χαμηλές για την τιμή ρεύματος του πρώτου μεγίστου και μεγαλύτερες για τις υπόλοιπες παραμέτρους, ειδικά για το I_{30} . Φαίνεται, και για αυτό το πιστόλι, να εμφανίζεται το μοτίβο πως η αναπαραγωγιμότητα για τις παραμέτρους του πρώτου μεγίστου είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνη που αφορά στις παραμέτρους του μεταγενέστερου μέρους της κυματομορφής. Οι αποκλίσεις μεταξύ της μέσης τιμής των κυματομορφών με άνθρωπο και της αναφοράς είναι επαρκείς, αλλά στο σύνολό τους χαμηλότερες από τα προηγούμενα πιστόλια.

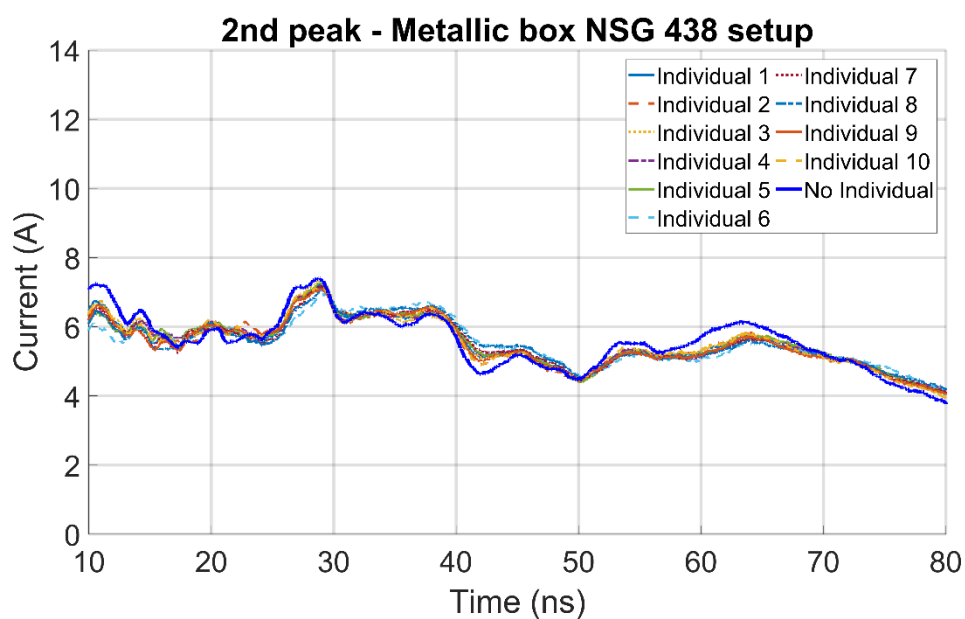
3.4.1.5 Διάταξη δοκιμών NSG 438



Σχήμα 3.42: Σύγκριση κυματομορφών ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438



Σχήμα 3.43: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438



Σχήμα 3.44: Σύγκριση κυματομορφών ESD – 1ο μέγιστο για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438

Πίνακας 3.10: Παράμετροι κυματομορφής ESD, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438

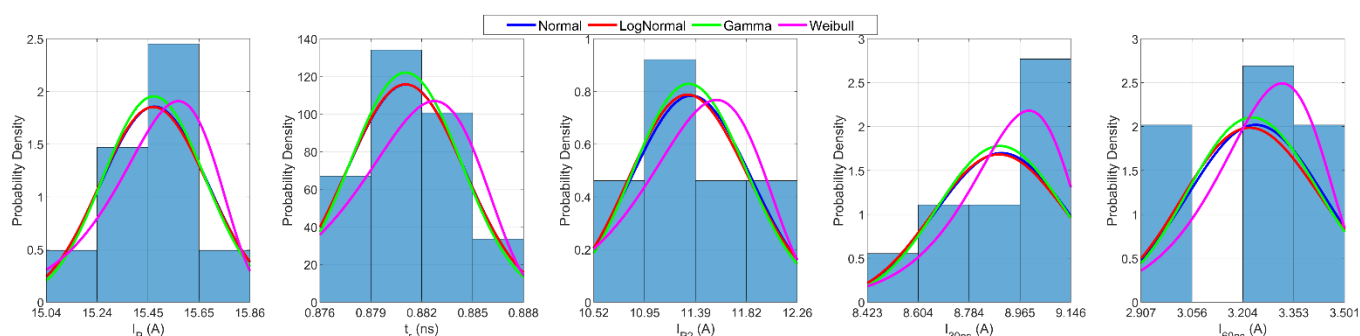
Χειριστής	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]
1	12,93	1,089	7,231	7,075	5,214
2	12,90	1,077	7,157	7,052	5,231
3	13,00	1,072	7,364	7,198	5,225
4	12,75	1,087	7,167	7,081	5,069
5	12,92	1,100	7,280	7,063	5,180
6	13,02	1,071	6,977	6,940	5,028
7	13,01	1,085	7,222	6,999	5,149
8	13,11	1,106	7,070	7,016	5,187
9	12,77	1,047	7,096	6,986	5,127
10	12,86	1,078	7,180	7,048	5,268
Μέση τιμή	12,93	1,081	7,174	7,046	5,168
Αναφορά	12,75	1,030	7,548	7,158	5,593
Απόκλιση [%]	1,411	4,951	-4,955	-1,565	-7,599
Αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας [%]	0,278	0,484	0,485	0,311	0,462

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται μειωμένη η επίδραση του ανθρώπου, αλλά υπαρκτή. Για τη γεννήτρια NSG 438, τόσο στη διακρίβωση, όσο και στις δοκιμές φαίνεται ο άνθρωπος να μην επηρεάζει πολύ το ρεύμα εκφόρτισης. Οπτικά από τα Σχήματα 3.43 και 3.44 σημειώνονται σημαντικές αποκλίσεις κυρίως κατά τα χρονικά διαστήματα 2ns – 6ns, 8ns – 25ns, 40ns – 45ns και 50ns – 70ns.

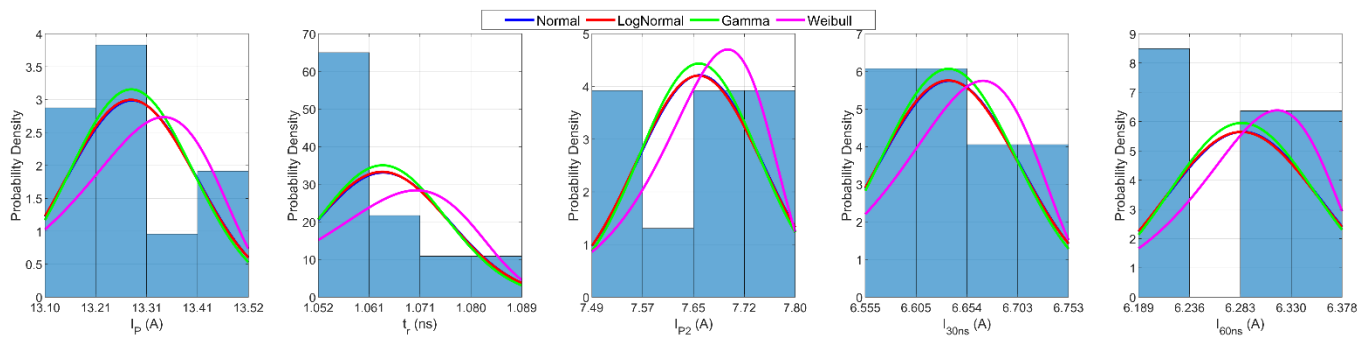
Οι αβεβαιότητες αναπαραγωγιμότητας παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές για όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους. Αντίθετα, οι αποκλίσεις μεταξύ της μέσης τιμής των κυματομορφών με άνθρωπο και της κυματομορφής αναφοράς παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές, υπολογισμού που καταδεικνύουν την επίδραση του ανθρώπου και σε αυτή την περίπτωση.

3.4.2 Παρουσίαση συγκριτικής ανάλυσης ιστογραμμάτων και θεωρητικών κατανομών

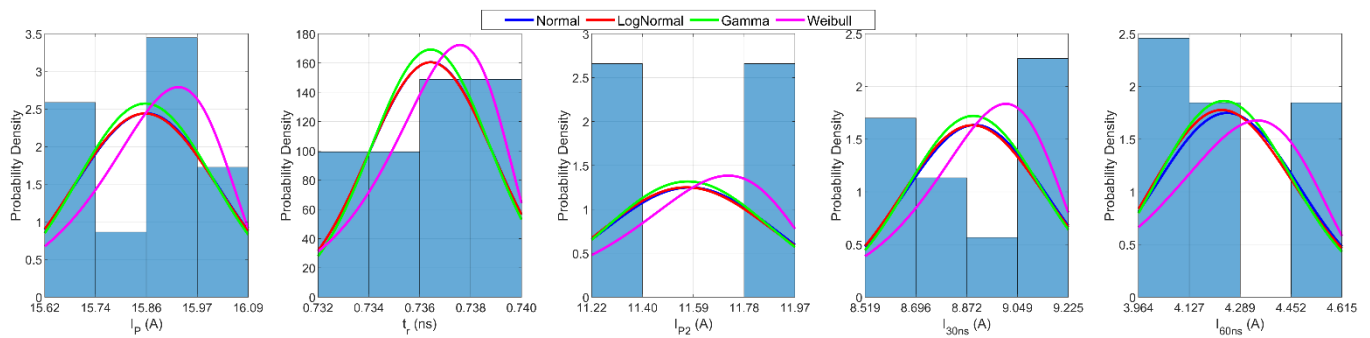
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των βασικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος ESD. Ειδικότερα, οπτικοποιούνται τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα των μετρούμενων δεδομένων για κάθε παράμετρο και συγκρίνονται με τις θεωρητικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDF) που προσαρμόστηκαν. Επιπλέον, παρατίθενται σε μορφή πίνακα οι τιμές του κανονικοποιημένου σφάλματος RMSE για κάθε κατανομή, προσφέροντας ποσοτική εκτίμηση της ποιότητας προσαρμογής. Μέσω αυτής της ανάλυσης αναδεικνύονται οι στατιστικές συμπεριφορές των παραμέτρων και προσδιορίζονται τα στατιστικά μοντέλα που περιγράφουν καλύτερα τη μεταβλητότητα λόγω του ανθρώπινου παράγοντα.



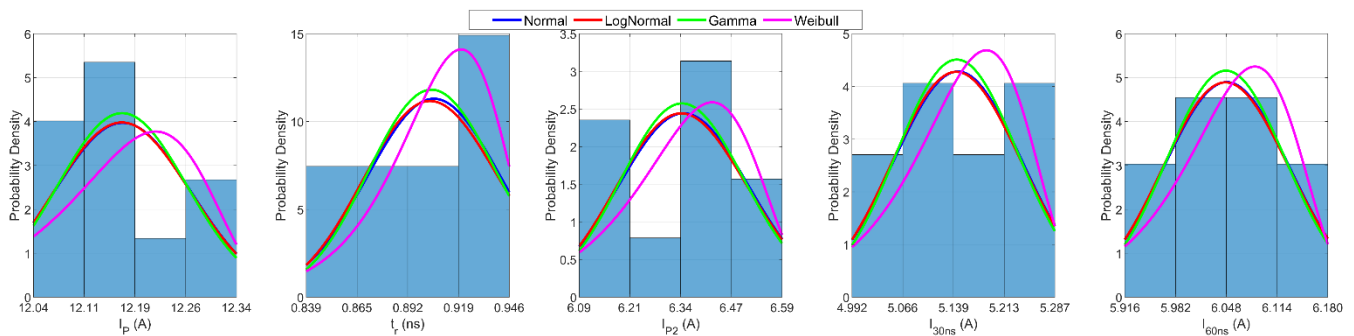
Σχήμα 3.45: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO



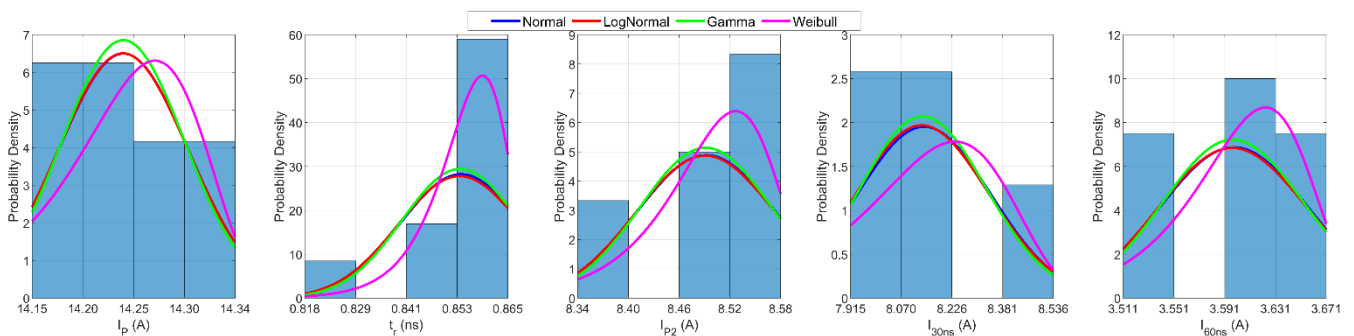
Σχήμα 3.46: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση δοκιμών του DITO



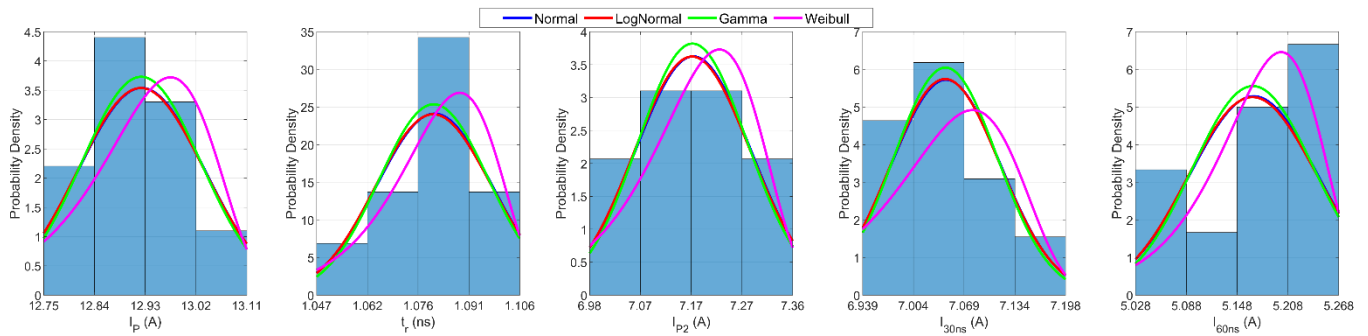
Σχήμα 3.47: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433



Σχήμα 3.48: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433



Σχήμα 3.49: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438



Σχήμα 3.50: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438

Πίνακας 3.11: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του DITO

Παράμετρος ESD	Κανονικοποιημένο RMSE – Διακρίβωση DITO			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
$I_{\max}$	0,199	0,202	0,181	0,207
t_{rise}	0,111	0,111	0,080	0,240
I_{p2}	0,371	0,348	0,368	0,520
I_{30}	0,344	0,351	0,350	0,237
I_{60}	0,430	0,441	0,444	0,380

Πίνακας 3.12: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση δοκιμών του DITO

Παράμετρος ESD	Κανονικοποιημένο RMSE – Διάταξη δοκιμών DITO			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
$I_{\max}$	0,374	0,370	0,375	0,482
t_{rise}	0,373	0,369	0,368	0,446
I_{p2}	0,693	0,696	0,727	0,623
I_{30}	0,663	0,656	0,669	0,929
I_{60}	0,470	0,471	0,479	0,451

Πίνακας 3.13: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 433

Παράμετρος ESD	Κανονικοποιημένο RMSE – Διακρίβωση NSG 433			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
$I_{\max}$	0,430	0,432	0,437	0,395
t_{rise}	0,775	0,778	0,833	0,581
I_{p2}	0,578	0,577	0,584	0,576
I_{30}	0,551	0,552	0,571	0,546
I_{60}	0,456	0,447	0,458	0,498

Πίνακας 3.14: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 433

Παράμετρος ESD	Κανονικοποιημένο RMSE – Διάταξη δοκιμών NSG 433			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
$I_{\max}$	0,382	0,380	0,382	0,491
t_{rise}	0,569	0,580	0,596	0,502
I_{p2}	0,438	0,443	0,452	0,397
I_{30}	0,875	0,873	0,931	0,991
I_{60}	0,322	0,322	0,361	0,565

Πίνακας 3.15: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438

Παράμετρος ESD	Κανονικοποιημένο RMSE – Διακρίβωση NSG 438			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
$I_{\max}$	0,754	0,751	0,798	1,009
t_{rise}	0,305	0,310	0,301	0,112
I_{p2}	0,365	0,348	0,367	0,260
I_{30}	0,391	0,383	0,383	0,480
I_{60}	0,428	0,431	0,434	0,375

Πίνακας 3.16: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων ESD για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438

Παράμετρος ESD	Κανονικοποιημένο RMSE – Διάταξη δοκιμών NSG 438			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
$I_{\max}$	0,187	0,185	0,163	0,328
t_{rise}	0,210	0,214	0,197	0,190
I_{p2}	0,400	0,398	0,478	0,597
I_{30}	0,197	0,192	0,198	0,356
I_{60}	0,442	0,447	0,458	0,330

Παρατηρώντας τα διαγράμματα είναι ήδη φανερό από οπτική παρατήρηση και μόνο, πως καμία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατανομές πιθανότητας δεν μπορεί να περιγράψει αξιόπιστα την αβεβαιότητα που προκαλεί ο ανθρώπινος χειριστής.

Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από τις τιμές του κανονικοποιημένου RMSE, το οποίο παρέχει μία ποσοτική αξιολόγηση της ποιότητας προσαρμογής. Όπως φαίνεται από τους πίνακες, ενδέχεται η τιμή του κανονικοποιημένου RMSE να είναι ικανοποιητική (≤ 0.3) για κάποιες παραμέτρους, αλλά σίγουρα όχι για όλες.

Ειδικότερα, τις καλύτερες προσαρμογές, δηλαδή τις χαμηλότερες, αλλά όχι απαραίτητα αποδεκτές τιμές κανονικοποιημένου RMSE, φαίνεται να έχει το DITO, παρ' ότι είναι και το πιστόλι ESD που οπτικά παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις τόσο στην κυματομορφή, όσο και στις αποκλίσεις των κυματομορφών μεταξύ ανθρώπου και της κυματομορφής αναφοράς χωρίς άνθρωπο. Μάλιστα, η συγκεκριμένη γεννήτρια ESD στη διάταξη διακρίβωσης και όσον αφορά στις παραμέτρους που σχετίζονται με το πρώτο μέγιστο ($I_{\max}$, t_{rise}) παρουσιάζει καλή προσαρμογή και ως προς τις τέσσερις κατανομές που δοκιμάστηκαν, με τις καλύτερες τιμές να εμφανίζονται στην κατανομή Gamma ($RMSE_{n,I_{\max}}=0,181$, $RMSE_{n,t_{\text{rise}}}=0,080!$). Ωστόσο, ως προς τις υπόλοιπες παραμέτρους δεν φαίνεται να παρουσιάζει καλή προσαρμογή καμία δοκιμαζόμενη κατανομή πιθανότητας, με τις τιμές του κανονικοποιημένου RMSE να ξεπερνάνε το 0,35.

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για την περίπτωση δοκιμών του NSG 438, όπου καλύτερη προσαρμογή στις παραμέτρους που σχετίζονται με το πρώτο μέγιστο φαίνεται και πάλι να παρουσιάζει η κατανομή Gamma, ενώ είναι και η

μοναδική περίπτωση όπου παρουσιάζονται καλές τιμές κανονικοποιημένου RMSE και για την παράμετρο I30, με (μικρή διαφορά) καλύτερη προσαρμογή να εμφανίζει η Log-normal.

Όλες οι υπόλοιπες πυκνότητες πιθανοτήτων των εναπομεινάντων περιπτώσεων διατάξεων και γεννητριών δεν φαίνεται να ταιριάζουν με καμία από τις δοκιμαζόμενες γνωστές κατανομές, με τιμές κανονικοποιημένου RMSE που ξεπερνάνε το 0,3 και σε κάποιες περιπτώσεις αγγίζουν ακόμα και 1,009! (Imax με Weibull στην περίπτωση διακρίβωσης του NSG 438). Τέλος, δεν φαίνεται να παρουσιάζεται κάποιο μοτίβο ως προς τις προσαρμογές (για παράδειγμα μία κατανομή να παρουσιάζει καλύτερες προσαρμογές σε όλες τις περιπτώσεις για κάποιες παραμέτρους, ή κάποιες παράμετροι να παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές κανονικοποιημένου RMSE για όλες τις κατανομές).

3.5 Συμπεράσματα

Το συμπέρασμα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων και την επεξεργασία αυτών, είναι πως η παραγόμενη κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παραμορφώνεται σημαντικά από την ύπαρξη ενός ανθρώπινου χειριστή.

Ειδικότερα, όλες οι περιπτώσεις υποδεικνύουν πως η πρώτη κορυφή παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη από την παρουσία ανθρώπου, με τις αποκλίσεις για το I_{max} και τον χρόνο ανόδου t_{rise}, να παραμένουν εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2, με αποδεκτές αποκλίσεις $\pm 15\%$ και $\pm 25\%$ αντίστοιχα. Μάλιστα, οι μετρούμενες αποκλίσεις δεν ξεπερνούν στις περισσότερες περιπτώσεις το $\pm 2,5\%$ για το I_{max} και το $\pm 0,5\%$ για το t_{rise}.

Ωστόσο, το επόμενο κομμάτι της κυματομορφής επηρεάζεται σημαντικά. Στην περίπτωση του DITO, το χρονικό παράθυρο μετά το πρώτο μέγιστο (2ns – 10ns) εμφανίζει μία πρόσθετη κορυφή τόσο στην περίπτωση της διακρίβωσης, όσο και στην περίπτωση των δοκιμών. Ειδικότερα, στην περίπτωση της διακρίβωσης παρουσιάζεται στην περίπτωση των ανθρώπων ένα μέγιστο περί τα 4ns με τιμή ρεύματος περίπου 10A και πολύ μικρό χρόνου ανόδου ($\sim 1,2$ ns), όταν η αντίστοιχη κυματομορφή αναφοράς στα 4ns έχει τιμή ρεύματος 6A. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στη διάταξη δοκιμών, όπου περίπου στα 4ns, παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο όταν υπάρχει ανθρώπινος χειριστής, με τιμή ρεύματος περίπου 7,6A και χρόνο ανόδου $\sim 1,2$ ns, όταν

η αντίστοιχη τιμή ρεύματος της κυματομορφής αναφοράς είναι 5,3A. Μία ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζει και η γεννήτρια ESD NSG 438, όπου στην περίπτωση της διακρίβωσης περί τα 3ns εμφανίζεται μία κορυφή με τιμή 7A και χρόνο ανόδου ~1,1 ns, ενώ η αντίστοιχη τιμή αναφοράς είναι 5A. Στην περίπτωση των δοκιμών δεν παρατηρείται μία μόνο ανεβασμένη κορυφή, αλλά όλες οι τιμές του χρονικού διαστήματος 2ns – 6ns έχουν μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση του ανθρώπου σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς, με την ανύψωση να φτάνει έως και τα 2A. Αντίθετα, στη γεννήτρια ESD NSG 433 δε παρατηρείται το φαινόμενο της εμφανιζόμενης κορυφής, αλλά οι τιμές ρεύματος των κυματομορφών με άνθρωπο είναι υψηλότερες συγκριτικά με εκείνες χωρίς άνθρωπο στο διάστημα 3ns - 10 ns, τόσο στην περίπτωση της διακρίβωσης, όσο και στην περίπτωση των δοκιμών.

Αυτή η κορυφή αποδίδεται στην τοπική χωρητικότητα που εισάγεται από τη δομή χεριού/βραχίονα του ανθρώπου και το καλώδιο γείωσης το οποίο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μεταβολές. Αν και αυτό το χρονικό διάστημα δεν καλύπτεται προς το παρόν από τον κανονισμό IEC 61000-4-2, το σχετικά μεγάλο πλάτος και ο μικρός χρόνος ανόδου μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση στο αποτέλεσμα της δοκιμής αντοχής έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Διαφορές παρατηρούνται και στο κομμάτι του δεύτερου μεγίστου και της ουράς. Χαρακτηριστικό είναι το φαινόμενο πως στο χρονικό διάστημα 10ns – 40ns, οι τιμές ρεύματος της κυματομορφής αναφοράς είναι υψηλότερες σε σχέση με αυτές των κυματομορφών με χειριστή, ενώ η συμπεριφορά αυτή αντιστρέφεται στο επόμενο διάστημα των 40ns – 60ns. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στις γεννήτριες DITO και NSG 438, ενώ στο πιστόλι NSG 433 υπάρχουν διακυμάνσεις σε όλο αυτό το εύρος. Ειδικότερα, όμως, στο δεύτερο μέρος της κυματομορφής παρατηρούνται και σημαντικότερες αποκλίσεις, λόγω της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή. Ειδικότερα, εμφανίζονται αποκλίσεις της τάξης του -14% για την παράμετρο I_{p2} και στις δύο περιπτώσεις μέτρησης με τη γεννήτρια DITO και αποκλίσεις -12,55% και +16,96% για την παράμετρο I_{30} στην περίπτωση της γεννήτριας NSG 433. Για τη γεννήτρια NSG 438, οι αποκλίσεις έχουν μικρότερες τιμές. Παρ' ότι οι παραπάνω τιμές παραμένουν εντός των προβλεπόμενων ορίων που ορίζει το Πρότυπο, που είναι $\pm 30\%$ για το I_{p2} , παραμένουν αρκετά υψηλές και αξιοσημείωτες.

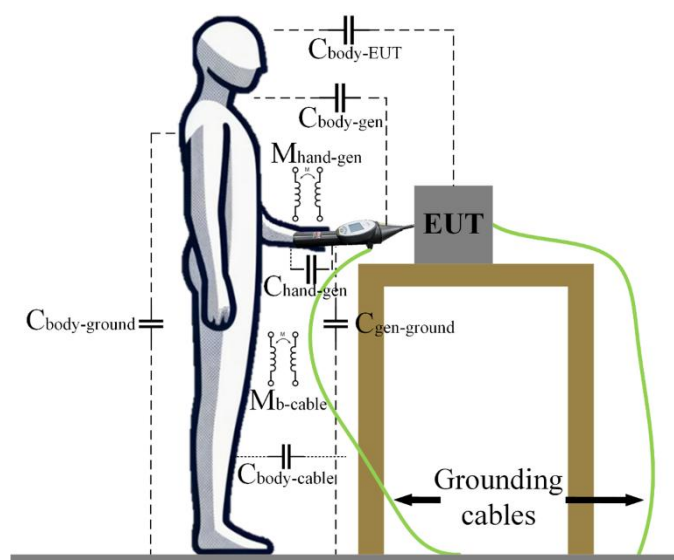
Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι σε πολλές παραμέτρους οι τιμές αβεβαιότητας αναπαραγωγιμότητας ξεπερνούν το 1% ή βρίσκονται κοντά σε αυτό, ιδίως για τις παραμέτρους που αφορούν το δεύτερο μέρος της κυματομορφής, επιβεβαιώνοντας τη μεταβλητότητα που προκαλεί η ανθρώπινη αλληλεπίδραση στην κυματομορφή ESD.

Τέλος, η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σχετικά με την αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας που προκαλείται από την ανθρώπινη επίδραση, έδειξε ότι το φαινόμενο αυτό δεν μπορεί να συμπεριληφθεί αξιόπιστα ως επιπλέον πηγή αβεβαιότητας σε ένα πιθανό προϋπολογισμό αβεβαιότητας, καθώς δεν παρουσιάζεται κάποιο μοτίβο στην αβεβαιότητα. Ειδικότερα, από την ανάλυση προκύπτει ότι καμία από τις τέσσερις γνωστές κατανομές (Normal, Log-Normal, Gamma, Weibull) δεν περιγράφει με συνέπεια την αβεβαιότητα που προκαλεί ο ανθρώπινος χειριστής σε όλες τις παραμέτρους του ESD ρεύματος. Αν και σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για το DITO ή το NSG 438, παρατηρούνται σχετικά χαμηλές τιμές κανονικοποιημένου RMSE, αυτές αφορούν κυρίως τις παραμέτρους του πρώτου παλμού (I_{max} , t_{rise}), ενώ για τις υπόλοιπες (I_{p2} , I_{30} , I_{60}) η προσαρμογή των κατανομών υπολείπεται σημαντικά. Επιπλέον, οι εξαιρετικά υψηλές τιμές $RMSE_n$ που καταγράφηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις —φθάνοντας ακόμα και το 1,009— καταδεικνύουν σαφώς την αναντιστοιχία ανάμεσα στις θεωρητικές κατανομές και την εμπειρική κατανομή των δεδομένων. Η έλλειψη σαφούς μοτίβου στις προσαρμογές, τόσο ως προς τις παραμέτρους όσο και ως προς τις κατανομές, υποδηλώνει ότι η στοχαστική συμπεριφορά του ανθρώπινου παράγοντα δεν ακολουθεί κάποιο απλό ή καθολικά αποδεκτό στατιστικό μοντέλο.

Αυτά τα αποτελέσματα εγείρουν ανησυχίες για την επαναληψιμότητα των δοκιμών αντοχής, ιδίως όταν συγκρίνονται χειροκίνητες δοκιμές με αυτοματοποιημένες ρομποτικές δοκιμές, όπου η απουσία του ανθρώπινου χειριστή θα οδηγήσει σε μετρήσιμες αποκλίσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές διαδικασίες που εφαρμόζουν τα περισσότερα εργαστήρια.

Σημειώνεται, πως το συμπέρασμα ότι ο άνθρωπος αλληλοεπιδρά με τη γεννήτρια και μάλιστα κάθε άνθρωπος με διαφορετικό τρόπο, ήταν αναμενόμενο. Οι αποκλίσεις της κυματομορφής χωρίς άνθρωπο και με άνθρωπο εξαρτώνται όχι μόνο από το υπό δοκιμή σύστημα (EUT) αλλά και από την εσωτερική λειτουργία και σχεδίαση της ίδιας της γεννήτριας ESD. Σε αυτό συμβάλλει και ο άνθρωπος, ο οποίος μοντελοποιείται ως ένα

δίκτυο παρασιτικών χωρητικότητων και αμοιβαίων αυτεπαγωγών, το οποίο συνδέεται δυναμικά με το κύκλωμα εκφόρτισης και τη δομή της γεννήτριας. Η χωρητικότητα του σώματος επηρεάζει τη συνολική χωρητικότητα εκφόρτισης της γεννήτριας, οδηγώντας σε μεταβολές στην αποθηκευμένη ενέργεια και στον χρόνο ανόδου του παλμού. Παράλληλα, τα επαγωγικά στοιχεία του ανθρώπινου σώματος επηρεάζουν την απόσβεση της ενέργειας και μπορούν να ενισχύσουν ή να καταστείλουν τις υψηλές συχνότητες των ταλαντώσεων (ringing) της κυματομορφής. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.51, το σώμα του ανθρώπου εισάγει παρασιτικές χωρητικότητες με τη γεννήτρια, την μύτη/άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας, τον υπό εξέταση εξοπλισμό, το RGP και τη γείωση, ενώ επηρεάζει και τη συμπεριφορά του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας, αλλάζοντας τόσο τη χωρητικότητα, όσο και την αυτεπαγωγή του [21].



Σχήμα 3.51: Παρασιτικές χωρητικότητες και αμοιβαίες επαγωγές που δημιουργεί ο άνθρωπος με τη διάταξη δοκιμών [21]

Η έκταση αυτών των μεταβολών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από φυσιολογικούς παράγοντες του κάθε χειριστή, όπως το ύψος, το βάρος, η στάση του σώματος, η θέση των χεριών, η απόσταση από γειωμένες ή αγωγίμες επιφάνειες και η αντίσταση επαφής με τη γεννήτρια [48]. Αυτή η ατομική διαφοροποίηση οδηγεί σε αναμενόμενη υψηλή μεταβλητότητα μεταξύ διαφορετικών χειριστών και συνεπώς σε μειωμένη αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών ESD, γεγονός που θέτει προβληματισμούς για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων με βάση τις ανθρώπινες παραμέτρους.

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή με χρήση φερριτών

4.1 Εισαγωγή

Όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 3, ο άνθρωπος επιδρά και μεταβάλλει την κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης τόσο κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης, όσο και κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Μάλιστα, επιδρά με τρόπο που ενδέχεται να οδηγήσει μία μέτρηση εκτός ορίων, με αποτέλεσμα την αστοχία στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ακόμα, όπως φάνηκε από τις μετρήσεις του Κεφαλαίου 3, ο κάθε ανθρώπινος χειριστής έχει διαφορετική επίδραση στην κυματομορφή, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καλή αναπαραγωγικότητα στις μετρήσεις. Η προσπάθεια που έγινε για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που εισάγει ο άνθρωπος απέτυχε, καθώς φάνηκε να μην υπάρχει κάποιο μοτίβο σε αυτή τόσο ως προς τις παραμέτρους της κυματομορφής, όσο και ως προς τις διάφορες περιπτώσεις εκφορτίσεων (διακρίβωσης ή δοκιμών). Η κακή αναπαραγωγικότητα και επαναληψιμότητα των δοκιμών, εντείνεται όταν εισέρχεται στο προσκήνιο και η χρήση αυτοματοποιημένων βραχιόνων για τη διεξαγωγή δοκιμών, όπου αναμένεται οι κυματομορφές να έχουν τη μορφή των κυματομορφών αναφοράς (δηλαδή χωρίς άνθρωπο) που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Στην περίπτωση αυτή, η διεργαστηριακή αβεβαιότητα αναπαραγωγικότητας λαμβάνει τις τιμές της απόκλισης που μελετήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως είναι, λοιπόν, φανερό, υπάρχει η ανάγκη για εύρεση μίας αναπαραγωγικής μεθόδου για την αντικατάσταση της ανθρώπινης επίδρασης στην κυματομορφή ESD, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης της γεννήτριας ESD ή κατά τη διάρκεια αυτοματοποιημένων δοκιμών ατρωσίας.

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται η προσπάθεια της προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης με τη χρήση φερριτών αρπαγής. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, από προηγούμενες εργασίες [40], [41], [42] έχει φανεί πως η χρήση φερριτών αρπαγής (clamp-on ferrites) γύρω από το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ESD οδηγεί στην τροποποίηση της ουράς (μετά το όριο των 10ns) της κυματομορφής ρεύματος ESD. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα από τη χρήση τεσσάρων τύπων φερριτών αρπαγής, ο καθένας σχεδιασμένος για μία συγκεκριμένη περιοχή

συχνοτήτων, οι οποίοι προσαρμόστηκαν στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας. Η πειραματική μελέτη έγινε για δύο διαφορετικές γεννήτριες τόσο για την περίπτωση της διακρίβωσης όσο και για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Στη συνέχεια, έγινε η προσπάθεια κατάταξης των φερριτών ως προς την αποτελεσματικότητάς τους να φέρνουν την κυματομορφή του ρεύματος ESD χωρίς άνθρωπο, πιο κοντά σε αυτή με άνθρωπο.

4.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων του παρόντος κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εξοπλισμός παραγωγής και καταγραφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ο οποίος αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 και ήταν διαθέσιμος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του ΕΜΠ. Συνοπτικά, χρησιμοποιήθηκαν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO της εταιρείας EM TEST και NSG 433 της εταιρείας Schaffner, ο ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης (γνωστός και ως στόχος Pellegrini) MD 103 της TESEQ, ο εξασθενητής 011-0059-03 της Tektronix, ο παλμογράφος TDS 7254B της Tektronix και ο ανιχνευτής ρεύματος FCC F-65 της εταιρείας Fischer Custom Communications.

Επιπλέον, για τη διεξαγωγή των πειραμάτων του παρόντος κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκαν και τέσσερις φερρίτες της εταιρείας Fair-Rite, οι οποίοι αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

4.2.1 Χρησιμοποιούμενοι φερρίτες και οι χαρακτηριστικές τους κυματομορφές

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν φερρίτες τεσσάρων διαφορετικών υλικών της εταιρείας Fair-Rite, κατάλληλα για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών θορύβων σε διαφορετικές συχνότητες. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν φερρίτες από τα kit: 31 Material Snap-It REVAMP kit, 44 Material Snap-It kit, 61 Material Snap-It REVAMP kit και 75 Material Snap-It kit. Προφανώς, από κάθε kit χρησιμοποιήθηκε ο φερρίτης που εφάρμοζε καλύτερα στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας, χωρίς να μετακινείται. Το κάθε υλικό είναι [49]:

- 31 Material: Ένας φερρίτης MnZn σχεδιασμένος ειδικά για εφαρμογές μείωσης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από 1 MHz έως 300 MHz. Αυτό το υλικό δεν

έχει τους περιορισμούς διαστατικού συντονισμού που σχετίζονται με τα συμβατικά υλικά φερρίτη MnZn.

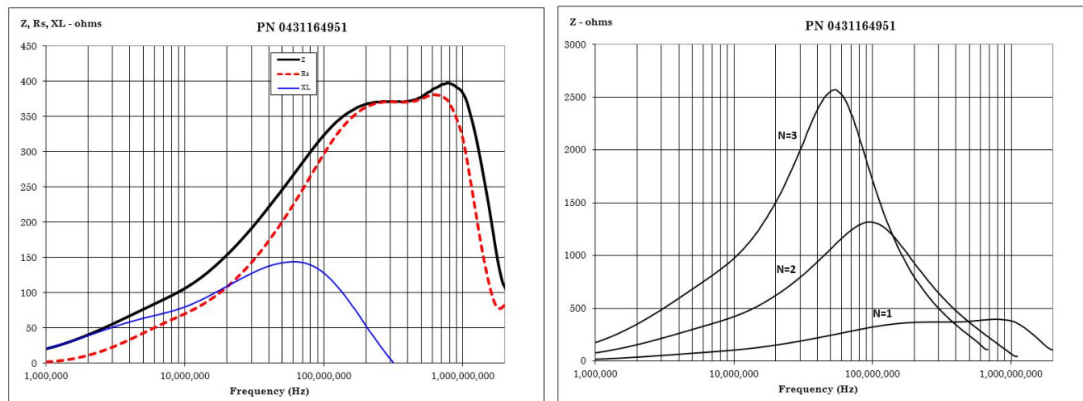
- 44 Material: Ένας φερρίτης NiZn που αναπτύχθηκε για να συνδυάζει υψηλή απόδοση μείωσης, από 25 MHz έως 300 MHz, με πολύ υψηλή αντίσταση DC.
- 61 Material: Φερρίτης NiZn υψηλής συχνότητας που αναπτύχθηκε για μια σειρά επαγωγικών εφαρμογών έως 25 MHz. Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται, επίσης, σε εφαρμογές μείωσης ηλεκτρομαγνητικών παρασίτων για περιοχή συχνοτήτων από 200 MHz έως 1GHz. Εξαιρετικά χαρακτηριστικά σταθερότητας.
- 75 Material: Φερρίτης MnZn υψηλής διαπερατότητας που προορίζεται για μια σειρά εφαρμογών μετασχηματιστών ευρείας ζώνης και παλμών και για επαγωγείς κοινής λειτουργίας. Κατάλληλο για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών παρασίτων κοινής λειτουργίας (common mode) από 150 kHz έως 10 MHz.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των φερριτών, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, είναι η χαρακτηριστική καμπύλη της σύνθετης αντίστασής του συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας του. Η καμπύλη αυτή εξάγεται ύστερα με τη χρήση αναλυτών (Vector analyzer) και δίνεται από τον κατασκευαστή στο datasheet του εκάστοτε φερρίτη. Σημειώνεται ότι η καμπύλη είναι διαφορετική τόσο για κάθε υλικό, όσο και για κάθε μέγεθος ενός υλικού, ενώ μεταβάλλεται και με το πλήθος των σπειρών του καλωδίου εντός του πυρήνα φερρίτη. Για κάθε γεννήτρια χρησιμοποιήθηκαν:

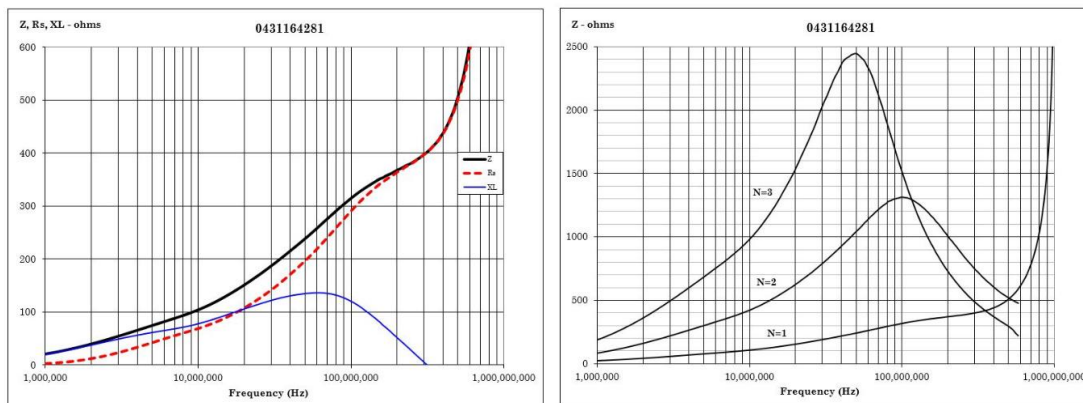
- Γεννήτρια DITO: φερρίτες με διάμετρο 4,9mm και κωδικούς
 - 0431164951
 - 0444164951
 - 0461164951
 - 0475181651
- Γεννήτρια NSG 438: φερρίτες με διάμετρο 6,3mm και κωδικούς
 - 0431164281
 - 0444164281
 - 0461164281
 - 0475178281

Στα Σχήματα 4.1 έως 4.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύνθετης αντίστασης – συχνότητας και τα αντίστοιχα για διάφορες περιελίξεις του καλωδίου, για κάθε

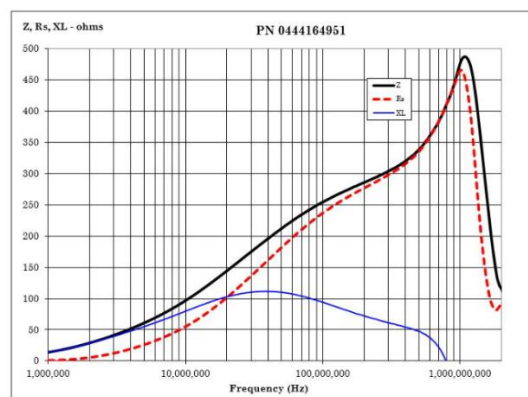
κωδικό φερρίτη που χρησιμοποιήθηκε, όπως (και όσα από αυτά) δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία [49]:



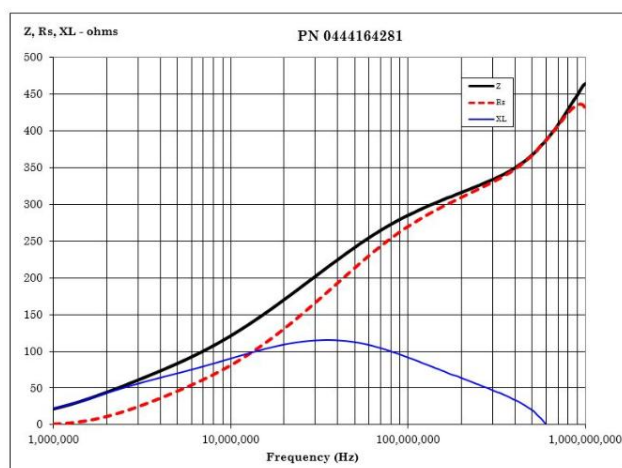
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0431164951 (31 Material για το DITO) [49]



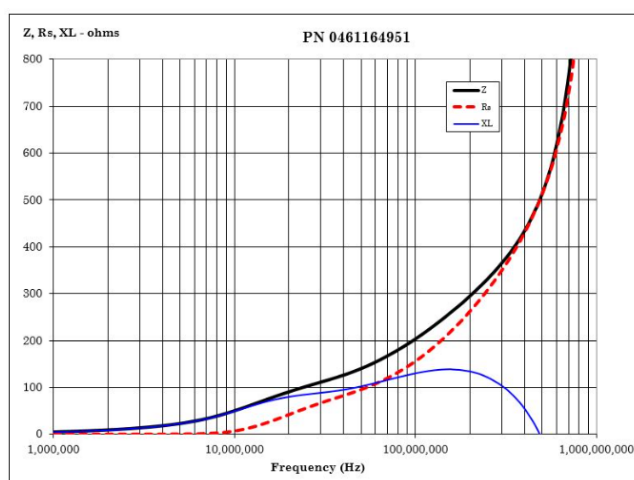
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0431164281 (31 Material για το NSG 438) [49]



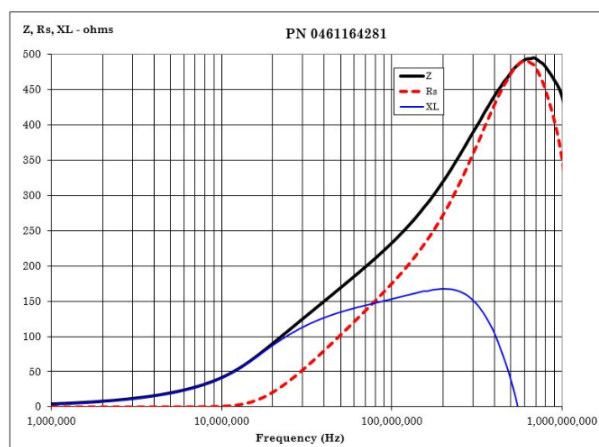
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0444164951 (44 Material για το DITO) [49]



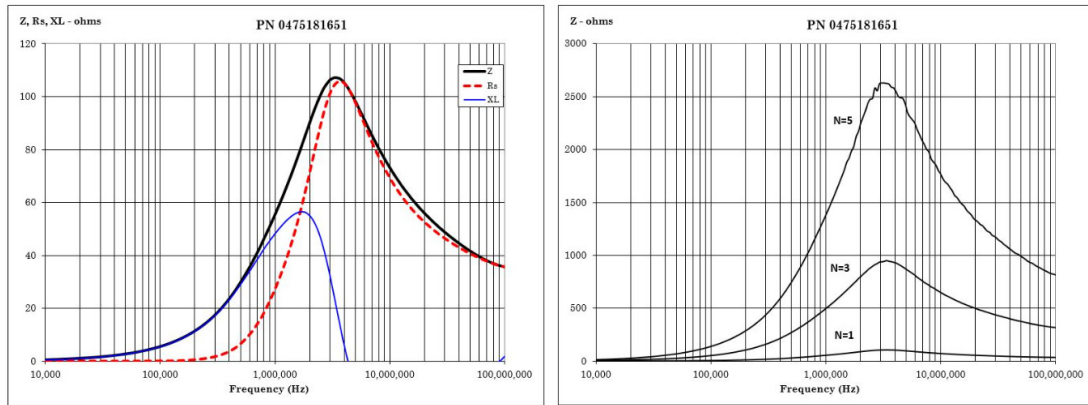
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0444164281 (44 Material για το NSG 438) [49]



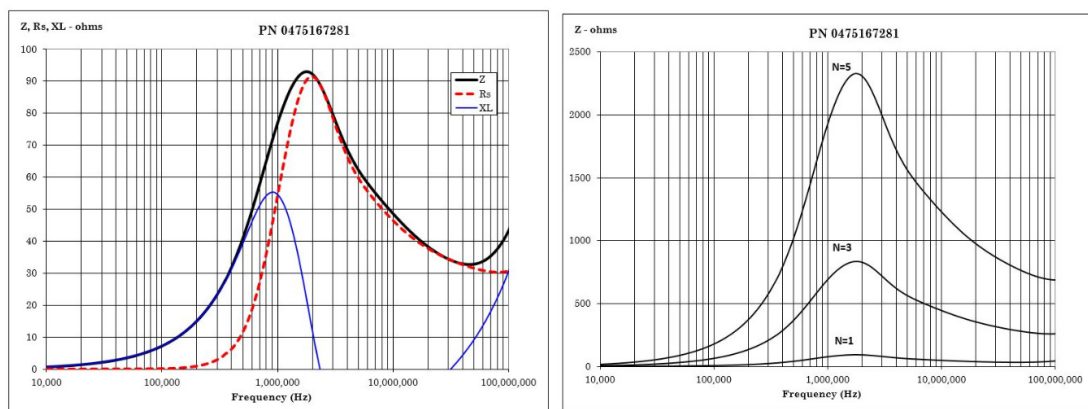
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0461164951 (61 Material για το DITO) [49]



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0461164281 (61 Material για το NSG 438) [49]



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0475181651 (75 Material για το DITO) [49]



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης - συχνότητας για τον φερρίτη 0475167281 (75 Material για το NSG 438) [49]

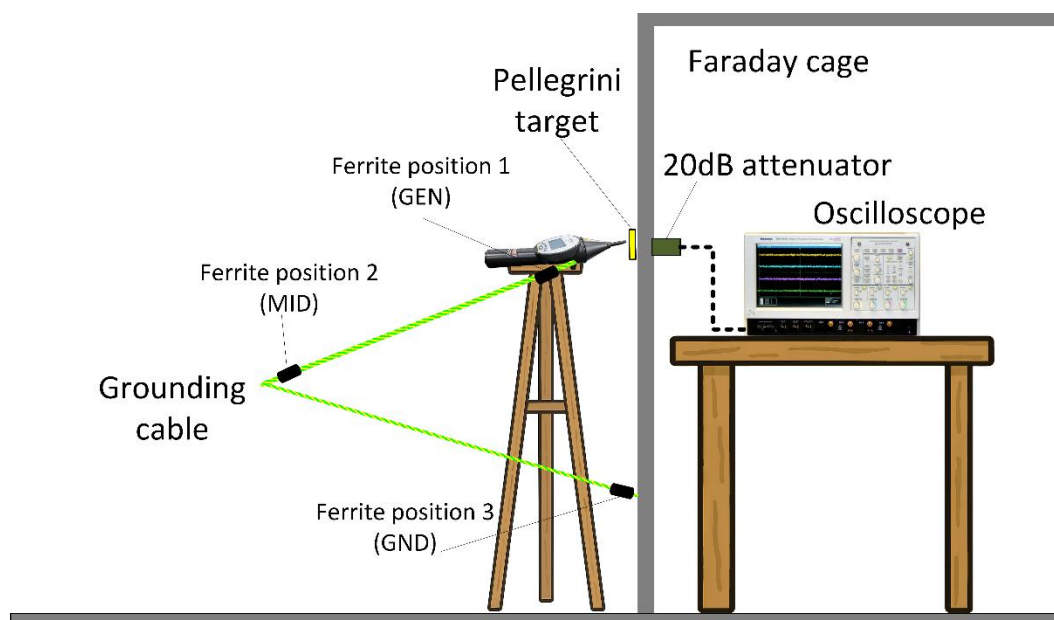
4.3 Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία

Για την προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης με τη χρήση φερριτών αρπαγής, σχεδιάστηκαν δύο ελεγχόμενα σενάρια μετρήσεων, βάσει του Προτύπου IEC 61000-4-2: ένα που αφορά στη διάταξη διακρίβωσης και ένα που αφορά στη διαδικασία δοκιμών. Σε κάθε σενάριο λήφθηκαν από πέντε μετρήσεις για κάθε θέση φερρίτη, με μία περιέλιξη του καλωδίου οι οποίες στη συνέχεια αναλύθηκαν προκειμένου να προκύψουν τα τελικά αποτελέσματα.

4.3.1 Τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης

Το πρώτο σενάριο αφορά μία τροποποιημένη εκδοχή της τυποποιημένης διάταξης διακρίβωσης, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2. Η γεννήτρια ESD βρισκόταν τοποθετημένη σε ξύλινο τρίποδο και το καλώδιο γείωσης/επιστροφής ρεύματος της γεννήτριας ήταν τοποθετημένο στη διάταξη τριγώνου, όπως ορίζεται από

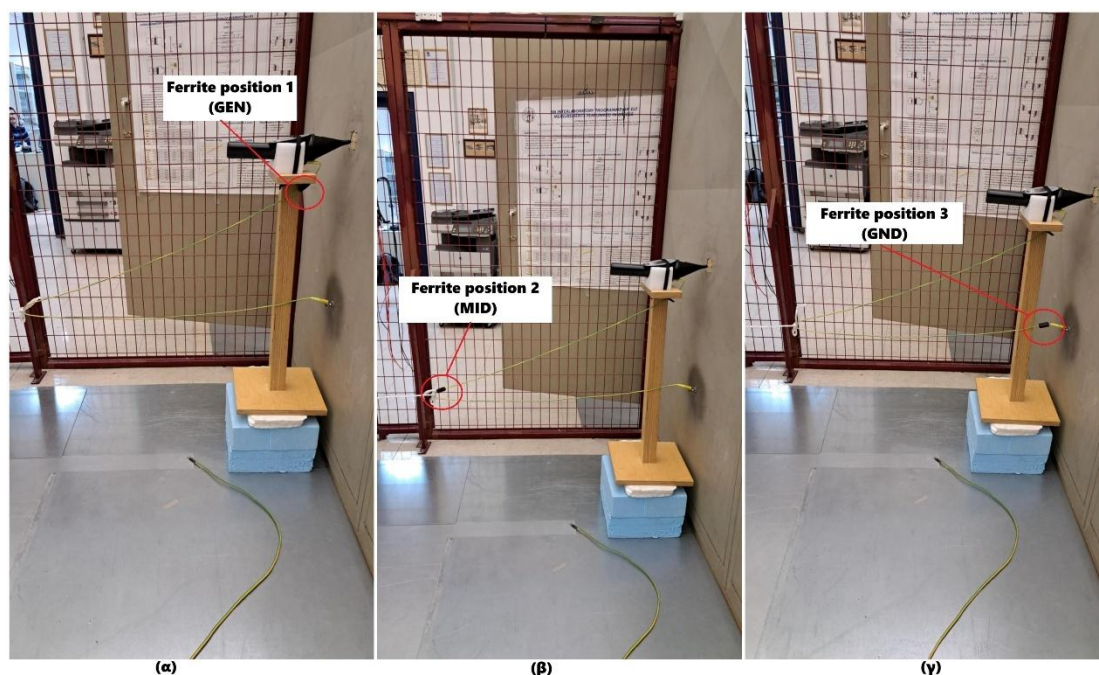
το Πρότυπο. Κάτω από τη συνολική διάταξη, τοποθετήθηκε το γειωμένο επίπεδο αναφοράς εδάφους (Reference Ground Plane, RGP), σύμφωνα με την τρίτη έκδοση του Προτύπου. Ουσιαστικά το RGP αποτελούνταν από μεταλλικές πλάκες συνδεδεμένες με τη γείωση του Εργαστηρίου. Η διαφοροποίηση είναι πως στο καλώδιο γείωσης τοποθετούνταν κάθε φορά ένας φερρίτης σε διαφορετικό σημείο. Σημειώνεται πως ο φερρίτης τοποθετείται στο καλώδιο γείωσης, καθώς στο Κεφάλαιο 3 φάνηκε πως ο άνθρωπος επηρεάζει κυρίως το κομμάτι της κυματομορφής μετά το πρώτο peak και βάσει διαφόρων μελετών [40], [50] έχει φανεί ότι κατά τη δεύτερο αιχμή (peak) το ρεύμα διέρχεται από το καλώδιο επιστροφής γείωσης, οπότε προκειμένου το αποτέλεσμα με τη χρήση φερρίτη να προσομοιώνει την επίδραση του ανθρώπου, κρίθηκε σκόπιμο να μπει σε αυτό το σημείο. Κάθε φερρίτης τοποθετήθηκε σε τρεις θέσεις πάνω στο καλώδιο γείωσης: μία στο άκρο του καλωδίου γείωσης κοντά στη γεννήτρια (ferrite position 1 – GEN), μία στη μέση του καλωδίου γείωσης (ferrite position 2 – MID) και μία στο άκρο του καλωδίου γείωσης κοντά στην ένωσή του με τη γείωση (ferrite position 3 – GND). Σχηματικά η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9, ενώ μία φωτογραφία κατά τη διάρκεια της τροποποιημένης διακρίβωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Η διάταξη αυτή διατηρεί τη γεωμετρική συνέπεια του περιβάλλοντος διακρίβωσης, προσθέτοντας την επίδραση του φερρίτη.



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ακόλουθη: Για κάθε φερρίτη σε κάθε θέση λήφθηκαν πέντε εκφορτίσεις επαφής των +4 kV. Σημειώνεται ότι η διάταξη παρέμεινε

σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, ενώ όσο λαμβάνονταν μετρήσεις δεν πλησίαζε κάποιος τη διάταξη, προκειμένου να περιοριστούν όσο το δυνατόν οι εξωτερικές παρεμβολές. Η γεννήτρια κάθε φορά ρυθμιζόταν ώστε να παράγει αυτόματα εκφορτίσεις. Η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε δύο φορές για δύο διαφορετικές γεννήτριες του εργαστηρίου τις DITO και NSG438.

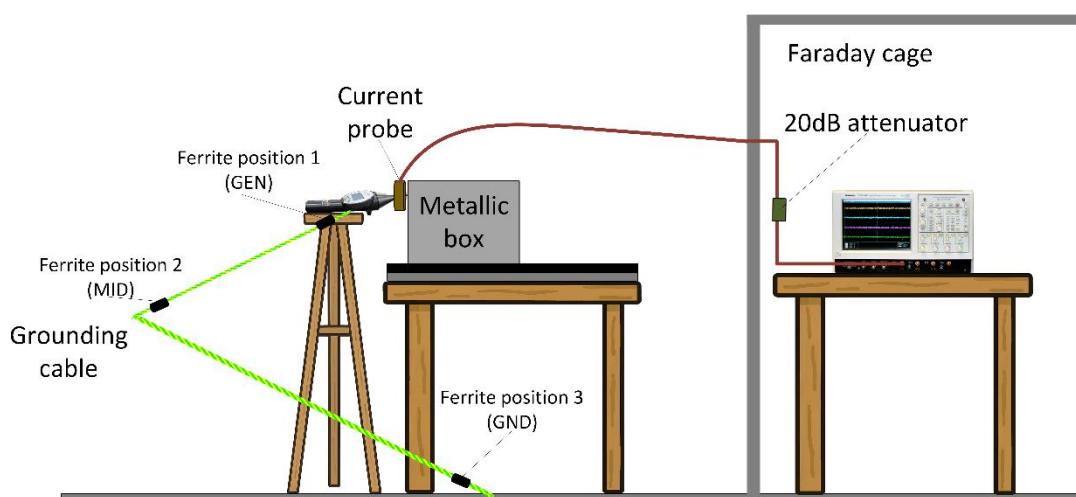


Σχήμα 4.10: Φωτογραφίες από την πειραματική διάταξη διακρίβωσης: α) Ferrite position 1 (GEN), β) Ferrite position 2 (MID), Ferrite position 3 (GND)

4.3.2 Διάταξη δοκιμών

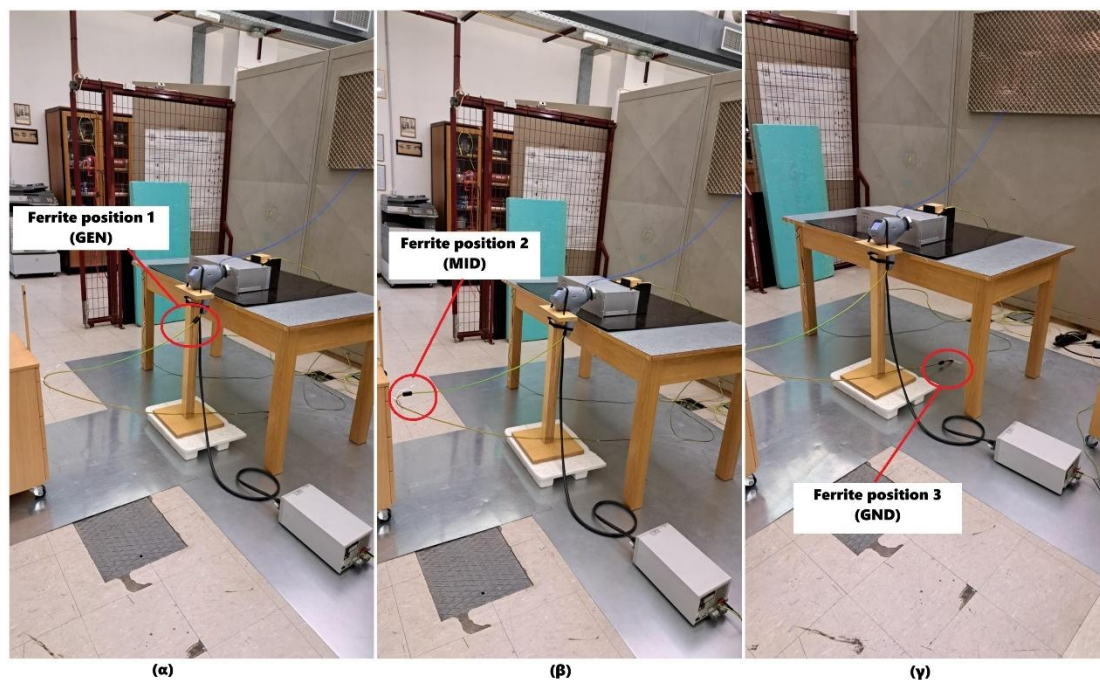
Το δεύτερο σενάριο προσομοιώνει ένα τυπικό περιβάλλον δοκιμής ατρωσίας, όπου οι εκφορτίσεις εφαρμόζονταν σε ένα γειωμένο μεταλλικό κουτί, το οποίο αναπαριστά τον Εξοπλισμό υπό Δοκιμή (Equipment Under Test - EUT). Και σε αυτήν την περίπτωση, στο καλώδιο γείωσης τοποθετούνταν κάθε φορά ένας φερρίτης σε διαφορετικό σημείο. Η διάταξη δοκιμής ήταν σύμφωνη με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, με κάποιες μικρές τροποποιήσεις. Αρχικά, όλη η διάταξη, όπως και στη διαδικασία της διακρίβωσης, έτσι και στη διαδικασία της δοκιμής βρισκόταν πάνω στο γειωμένο RGP. Ακόμα, το καλώδιο γείωσης/επιστροφής της γεννήτριας τοποθετήθηκε σε τριγωνική διάταξη και δεν αφέθηκε ελεύθερο στο πάτωμα. Καθώς στην περίπτωση των δοκιμών η εκφόρτιση εφαρμόζεται πάνω στο εξοπλισμό υπό εξέταση και όχι πάνω στον Pellegrini target, προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή του ρεύματος στον παλμογράφο, ήταν αναγκαία η χρήση ενός «ανιχνευτή ρεύματος», ο οποίος τοποθετήθηκε γύρω από τη

«μύτη» εκφόρτισης της γεννήτριας. Προκειμένου ο ανιχνευτής να είναι σταθερός και να μην έρχεται σε επαφή με την γεννήτρια, χρησιμοποιήθηκε επαναχρησιμοποιούμενη κολλώδης μάζα (putafix) στο κενό ανάμεσα στον ανιχνευτή και τη μύτη της γεννήτριας. Ομοίως με το προηγούμενο σενάριο, κάθε φερρίτης τοποθετήθηκε σε τρεις θέσεις πάνω στο καλώδιο γείωσης: μία στο άκρο του καλωδίου γείωσης κοντά στη γεννήτρια (ferrite position 1 – GEN), μία στη μέση του καλωδίου γείωσης (ferrite position 2 – MID) και μία στο άκρο του καλωδίου γείωσης κοντά στην ένωσή του με τη γείωση (ferrite position 3 – GND). Σχηματικά η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11, ενώ μία φωτογραφία κατά τη διάρκεια της τροποποιημένης διακρίβωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.11: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοκιμών

Ομοίως με το σενάριο της διακρίβωσης, λήφθηκαν για κάθε φερρίτη σε κάθε θέση πέντε εκφορτίσεις επαφής των +4 kV. Σημειώνεται ότι η διάταξη παρέμεινε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, ενώ όσο λαμβάνονταν μετρήσεις δεν πλησίαζε κάποιος τη διάταξη, προκειμένου να περιοριστούν όσο το δυνατόν οι εξωτερικές παρεμβολές. Η γεννήτρια κάθε φορά ρυθμιζόταν ώστε να παράγει αυτόματα εκφορτίσεις. Η όλη διαδικασία επαναλήφθηκε δύο φορές για δύο διαφορετικές γεννήτριες του εργαστηρίου τις DITO και NSG438. Σημειώνεται πως οι κυματομορφές αυτού του σεναρίου, επειδή έχουν ληφθεί μέσω του ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65, χρειάζονται μία διόρθωση πριν την επεξεργασία τους. Η διόρθωση είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3.3, που αφορούσε και πάλι στις κυματομορφές που λήφθηκαν μέσω του ανιχνευτή ρεύματος.



Σχήμα 4.12: Φωτογραφίες από την πειραματική διάταξη δοκιμών: α) Ferrite position 1 (GEN), β) Ferrite position 2 (MID), Ferrite position 3 (GND)

4.3.2 Επεξεργασία κυματομορφών και μετρήσεων

4.3.2.1 Γενική μεθοδολογία επεξεργασίας

Προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσο η προσθήκη φερρίτη στη διάταξη επιφέρει επίδραση στην κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρόμοια με εκείνη της ανθρώπινης παρουσίας, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των κυματομορφών που καταγράφηκαν με χρήση φερριτών, σε σχέση με τις κυματομορφές αναφοράς που προέρχονται από δοκιμές με άνθρωπο. Στόχος της ανάλυσης ήταν, μεταξύ άλλων, η κατάταξη των φερριτών ανά θέση τοποθέτησης ως προς την ικανότητά τους να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά του ανθρώπου, ώστε να εντοπιστούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί τύπου και θέσης φερρίτη. Η επεξεργασία των δεδομένων υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Matlab. Η ανάλυση που περιγράφεται παρακάτω εφαρμόστηκε σε όλα τα πειραματικά σενάρια (διάταξη διακρίβωσης DITO, διάταξη δοκιμών DITO, διάταξη διακρίβωσης NSG 438, διάταξη δοκιμών NSG 438).

Πιο συγκεκριμένα, ο κώδικας επεξεργασίας λαμβάνει ως είσοδο αρχεία μορφής .csv, στα οποία είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα των κυματομορφών, όπως καταγράφηκαν από τον παλμογράφο. Οι είσοδοι περιλαμβάνουν πέντε κυματομορφές για καθεμία από τις τρεις θέσεις τοποθέτησης κάθε φερρίτη για καθένα από τους τέσσερις διαφορετικούς φερρίτες, πέντε κυματομορφές χωρίς την παρουσία ανθρώπου, καθώς

και πέντε κυματομορφές με παρουσία ανθρώπου, οι οποίες και αποτελούν τη βασική κυματομορφή αναφοράς. Συνολικά, εξετάζονται 70 κυματομορφές, προερχόμενες από τις εξής περιπτώσεις: $5 \text{ κυματομορφές} \times 3 \text{ θέσεις} \times 4 \text{ φερρίτες} + 5 \text{ κυματομορφές (χωρίς άνθρωπο)} + 5 \text{ κυματομορφές (με άνθρωπο)} = 70 \text{ κυματομορφές}$. Οι κυματομορφές αυτές χαρακτηρίζονται και αναφέρονται στα διαγράμματα και στους πίνακες αποτελεσμάτων με ειδική κωδική ονομασία, όπως περιγράφεται αναλυτικά στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Κωδική ονομασία των εκεταζόμενων περιπτώσεων

DITO			NSG 438		
Περίπτωση	Φερρίτης	Θέση	Περίπτωση	Φερρίτης	Θέση
Ferrite 1	0431164951	1 - GEN	Ferrite 1	0431164281	1 - GEN
Ferrite 2	0431164951	2 - MID	Ferrite 2	0431164281	2 - MID
Ferrite 3	0431164951	3 - GND	Ferrite 3	0431164281	3 - GND
Ferrite 4	0444164951	1 - GEN	Ferrite 4	0444164281	1 - GEN
Ferrite 5	0444164951	2 - MID	Ferrite 5	0444164281	2 - MID
Ferrite 6	0444164951	3 - GND	Ferrite 6	0444164281	3 - GND
Ferrite 7	0461164951	1 - GEN	Ferrite 7	0461164281	1 - GEN
Ferrite 8	0461164951	2 - MID	Ferrite 8	0461164281	2 - MID
Ferrite 9	0461164951	3 - GND	Ferrite 9	0461164281	3 - GND
Ferrite 10	0475181651	1 - GEN	Ferrite 10	04751178281	1 - GEN
Ferrite 11	0475181651	2 - MID	Ferrite 11	04751178281	2 - MID
Ferrite 12	0475181651	3 - GND	Ferrite 12	04751178281	3 - GND
Ferrite 13	No human*		Ferrite 13	No human*	
*Η περίπτωση No human, δηλαδή χωρίς άνθρωπο και χωρίς φερρίτη, προστίθεται ως 13 ^{ος} φερρίτης, καθώς διευκόλυνε την επεξεργασία στο Matlab σχετικά με το ranking.					

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων, για κάθε μία από τις 65 κυματομορφές (δεν υπολογίστηκαν για τις κυματομορφές με παρουσία ανθρώπου) υπολογίστηκαν έντεκα χαρακτηριστικά μεγέθη (metrics), για την εκτίμηση της ομοιότητας με την κυματομορφή του ανθρώπου. Συγκεκριμένα, τα metrics είναι τα εξής:

1. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMSE (Root Mean Square Error)
2. Συντελεστής συσχέτισης (Cross-Correlation)
3. Απόσταση DTW (Dynamic Time Wrapping Distance)
4. Απόκλιση της μέγιστης τιμής ρεύματος (peak current)
5. Απόκλιση του χρόνου ανόδου (rise time)
6. Απόκλιση του I_{p2} (μέγιστο ρεύμα στο χρονικό διάστημα 10ns – 40ns)
7. Απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 30 ns (I_{30})
8. Απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 60 ns (I_{60})
9. Απόκλιση της ολικής ενέργειας (total energy)
10. Απόκλιση της φασματικής ενέργειας στην περιοχή 1-200 MHz
11. Απόκλιση της φασματικής ενέργειας στην περιοχή 200 MHz – 1GHz

Τα παραπάνω μεγέθη θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, ενώ θα τεκμηριωθεί και η επιλογή τους. Για κάθε ομάδα πέντε κυματομορφών ανά περίπτωση (εκτός της περίπτωσης με άνθρωπο), υπολογίστηκε ο μέσος όρος των παραπάνω χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια, με τη χρήση της συνάρτησης `tiedrank` του Matlab, πραγματοποιήθηκε κατάταξη των περιπτώσεων για κάθε χαρακτηριστικό/metric ξεχωριστά. Ακόμα, εφαρμόστηκε στάθμιση (βάρη) στα επιμέρους χαρακτηριστικά και προέκυψε συνολική κατάταξη των δεκατριών διαφορετικών περιπτώσεων (τέσσερις φερρίτες × τρεις θέσεις + μία περίπτωση χωρίς άνθρωπο), προκειμένου αφενός να αξιολογηθεί κατά πόσο η χρήση φερρίτη είναι αποτελεσματική στην προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπου (γι' αυτό και στο ranking χρησιμοποιήθηκε και η περίπτωση χωρίς άνθρωπο) και αφετέρου να εντοπιστεί ποιος φερρίτης από τους δοκιμαζόμενους και σε ποια θέση, προσφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα. Αναλυτικότερα, οι θέσεις κατάταξης κάθε φερρίτη στα επιμέρους metrics σταθμίστηκαν ανάλογα με τη βαρύτητα κάθε κριτηρίου, και το σταθμισμένο άθροισμα χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της συνολικής, τελικής κατάταξης.

Τέλος, ο κώδικας παράγει δύο γραφήματα: ένα στο πεδίο του χρόνου και ένα στο πεδίο της συχνότητας, σχεδιασμένα να παρέχουν οπτική σύγκριση των κυματομορφών ρεύματος από τα διάφορα σενάρια μέτρησης. Στο γράφημα του πεδίου του χρόνου, ο άξονας x παριστά τον χρόνο σε νανοδευτερόλεπτα (ns), ενώ ο άξονας y παριστά το ρεύμα σε αμπέρ (A). Σχεδιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος της περίπτωσης με άνθρωπο, καθεμία από τις 12 διαμορφώσεις φερρίτη και τέλος η κυματομορφή για την περίπτωση χωρίς άνθρωπο. Το γράφημα του φάσματος πραγματοποιεί ανάλυση στο

πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιώντας τον Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (FFT) των ίδιων σημάτων ρεύματος. Για κάθε κυματομορφή, υπολογίζεται ο FFT, κανονικοποιείται και μετατρέπεται σε dB. Ο άξονας x δείχνει τη συχνότητα σε MHz σε λογαριθμική κλίμακα, ενώ ο άξονας y δείχνει το μέγεθος σε ντεσιμπέλ (dB). Το εύρος συχνοτήτων που απεικονίζεται κυμαίνεται περίπου από 6,3 MHz έως 200 MHz, ενώ το εύρος πλάτους είναι σταθερό από -35 dB έως +10 dB. Το γράφημα αυτό αποκαλύπτει πώς κατανέμεται η ενέργεια κάθε κυματομορφής στα φασματικά διαστήματα, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την κατανόηση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC).

4.3.2.2 Ανάλυση και τεκμηρίωση επιλογής των 11 metrics και των βαρών για το τελικό ranking

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος των πειραμάτων είναι η διερεύνηση του κατά πόσο η προσθήκη φερρίτη στις διατάξεις διακρίβωσης και δοκιμών επιφέρει επίδραση στην κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρόμοια με εκείνη της ανθρώπινης παρουσίας. Προκειμένου να γίνει αυτή η ανάλυση, υπήρξε μία κατάταξη των φερριτών (ranking), βάσει κάποιων παραμέτρων – metrics. Τα 11 metrics που χρησιμοποιήθηκαν συνοπτικά είναι τα ακόλουθα: RMSE (Root Mean Square Error), συντελεστής συσχέτισης (Cross-Correlation), απόσταση DWT (Dynamic Time Wrapping Distance), απόκλιση της μέγιστης τιμής ρεύματος (peak current), απόκλιση του χρόνου ανόδου (rise time), απόκλιση του I_{p2} (μέγιστο ρεύμα στο χρονικό διάστημα 10ns – 40ns), απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 30 ns (I_{30}), απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 60 ns (I_{60}), απόκλιση της ολικής ενέργειας (total energy), απόκλιση της φασματικής ενέργειας στην περιοχή 1-200 MHz και απόκλιση της φασματικής ενέργειας στην περιοχή 200 MHz – 1GHz.

Σημειώνεται πως ως κυματομορφή αναφοράς έχει ληφθεί η κυματομορφή με άνθρωπο, αφού στόχος είναι να βρεθεί κάποια διάταξη που να προσομοιώνει την επίδραση του ανθρώπου. Μάλιστα, προκειμένου να γίνει σωστός υπολογισμός και σύγκριση των metrics, έχει γίνει παρεμβολή (interpolation) στις τιμές των κυματομορφών με φερρίτες και χωρίς άνθρωπο, ως εξής: αν ένα χρονικό σημείο στο διάγραμμα χρόνου της κυματομορφής αναφοράς (ref_time) βρίσκεται εντός του εύρους των χρονικών τιμών του time (δηλαδή της κυματομορφής του φερρίτη ή του no human), τότε εκτελείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα υπάρχοντα σημεία του φερρίτη/no human και υπολογίζεται μια πραγματική (ενδιάμεση) τιμή ρεύματος. Αντίθετα, αν κάποιο χρονικό

σημείο του `ref_time` βρίσκεται εκτός του εύρους του `time`, τότε δίνεται τιμή 0. Έτσι αποφεύγονται τα NaN και διασφαλίζεται ότι η κυματομορφή του φερρίτη/no human είναι πλήρως ορισμένη και συμβατή με την αναφορά για τον υπολογισμό των `metrics`. Ακόμα, οι τιμές ρεύματος πριν χρησιμοποιηθούν κανονικοποιούνται, ώστε σε κάποια `metrics` να εστιάζεται η διαφορά στη μορφή των κυματομορφών και όχι απαραίτητα στο πλάτος.

Αναλυτικότερα, για κάθε `metric`:

RMSE (Root Mean Square Error):

είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει πόσο διαφέρει ένα σήμα από ένα άλλο. Συγκεκριμένα, υπολογίζει τη μέση τετραγωνική απόσταση ανά σημείο μεταξύ δύο κυματομορφών και στη συνέχεια παίρνει τη ρίζα αυτής της τιμής. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του RMSE, τόσο πιο κοντά είναι τα δύο σήματα μεταξύ τους. Ο τύπος υπολογισμού του RMSE που χρησιμοποιείται είναι:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i}{\max(y)} - \frac{\hat{y}_i}{\max(\hat{y})} \right)^2}$$

όπου y οι τιμές ρεύματος της μέσης κυματομορφής αναφοράς και $\hat{y}$, οι τιμές ρεύματος της κυματομορφής φερρίτη/no human. Δηλαδή, για τον υπολογισμό του RMSE, η μέση κυματομορφή αναφοράς συγκρίνεται ξεχωριστά με καθεμία από τις πέντε επαναλήψεις της εκάστοτε περίπτωσης, και ως τελική τιμή λαμβάνεται ο μέσος όρος των πέντε επιμέρους τιμών RMSE.

Συντελεστής συσχέτισης (Cross-Correlation):

Η διασυσχέτιση (cross-correlation) είναι ένα μέτρο ομοιότητας μεταξύ δύο σημάτων, το οποίο εξετάζει πόσο καλά ταιριάζει το ένα σήμα με το άλλο, επιτρέποντας να γίνει μετατόπιση (ολίσθηση) του ενός σήματος ως προς το άλλο. Με άλλα λόγια, δεν συγκρίνει τα δύο σήματα μόνο σημείο-προς-σημείο (όπως το RMSE), αλλά «γλιστράει» το ένα σήμα πάνω στο άλλο και υπολογίζει κάθε φορά το βαθμό σύμπτωσης. Η μέγιστη τιμή που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία δείχνει πόσο παρόμοια είναι τα δύο σχήματα, ακόμα κι αν είναι χρονικά μετατοπισμένα. Στον κώδικα υπολογίζεται η κανονικοποιημένη διασυσχέτιση (normalized cross-correlation) ανάμεσα στην κανονικοποιημένη κυματομορφή ρεύματος του φερρίτη/no human και

στη μέση κυματομορφή αναφοράς από τον άνθρωπο. Δηλαδή, για τον υπολογισμό του cross-correlation, η μέση κυματομορφή αναφοράς συγκρίνεται ξεχωριστά με καθεμία από τις πέντε επαναλήψεις της εκάστοτε περίπτωσης, και ως τελική τιμή λαμβάνεται ο μέσος όρος των πέντε επιμέρους τιμών cross-correlation. Από όλα τα αποτελέσματα (για κάθε δυνατή χρονική μετατόπιση), κρατά μόνο τη μέγιστη τιμή, ως το δεύτερο metric. Η κανονικοποιημένη διασυσχέτιση που υπολογίζει το Matlab μέσω της εντολής `xcorr(..., 'normalized')`, η οποία βασίζεται στον εξής τύπο:

$$R_{xy}[l] = \frac{1}{\|x\| \cdot \|y\|} \sum_{n=1}^N x[n] \cdot y[n - l]$$

όπου: $x[n]$ η μέση κυματομορφή αναφοράς με άνθρωπο, $y[n]$ η συγκρινόμενη κυματομορφή με φερρίτη/πο human, l η χρονική ολίσθηση, $\|x\|$ και $\|y\|$ οι ευκλείδειες νόρμες (δηλαδή το μέτρο κάθε σήματος). Η κανονικοποίηση αυτή διασφαλίζει ότι το αποτέλεσμα της διασυσχέτισης θα βρίσκεται ανάμεσα στο -1 και το +1, όπου: τιμή κοντά στο +1 σημαίνει πολύ μεγάλη ομοιότητα, τιμή κοντά στο 0 σημαίνει ελάχιστη ή καθόλου ομοιότητα, τιμή κοντά στο -1 σημαίνει αντιστραμμένη ομοιότητα (αντιστροφή φάσης). Καθώς κρατείται μόνο η μέγιστη τιμή της διασυσχέτισης, αυτός ο αριθμός αντιπροσωπεύει το βέλτιστο δυνατό ταίριασμα μεταξύ των δύο σημάτων.

Απόσταση DTW (Dynamic Time Wrapping Distance):

είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση δύο χρονικών σημάτων, ακόμη και όταν αυτά είναι χρονικά εκτός συγχρονισμού, δηλαδή όταν ένα σήμα είναι "επιμηκυμένο" ή καθυστερημένο σε σχέση με το άλλο. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που συγκρίνουν τα σήματα σημείο προς σημείο, το DTW έχει την ικανότητα να παραμορφώνει μη γραμμικά τον άξονα του χρόνου, ώστε να ευθυγραμμίσει καλύτερα κοινά χαρακτηριστικά των σημάτων (όπως αιχμές ή κλίσεις), ακόμη κι αν αυτά εμφανίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ουσιαστικά, το DTW δημιουργεί έναν πίνακα αποστάσεων $D(i,j)$ όπου κάθε στοιχείο είναι η διαφορά ανάμεσα στο σημείο x_i του πρώτου σήματος και στο σημείο y_j του δεύτερου. Έπειτα, βρίσκει τη βέλτιστη διαδρομή (warping path) μέσα από αυτό τον πίνακα — από την αρχή μέχρι το τέλος — με τον χαμηλότερο συνολικό «κόστος ευθυγράμμισης». Το άθροισμα των αποστάσεων αυτής της διαδρομής είναι το DTW distance. Δεν υπάρχει απλός κλειστός τύπος, αλλά η βασική ιδέα είναι:

$$DTW(x, y) = \min_{\text{όλες οι ευθυγραμμίσεις}} \sum_{(i,j) \text{ στο μονοπάτι}} |x_i - y_j|$$

Συγκεκριμένα στο Matlab χρησιμοποιείται η έτοιμη συνάρτηση dtw, η οποία συγκρίνει τα κανονικοποιημένα σήματα του φερρίτη/πο human και της μέσης κυματομορφής του ανθρώπου, υπολογίζει το ελάχιστο συνολικό κόστος ευθυγράμμισης μεταξύ των δύο σημάτων, χρησιμοποιώντας δυναμικό προγραμματισμό. Το αποτέλεσμα είναι μια μόνο τιμή (scalar), που εκφράζει πόσο διαφορετικά είναι τα σήματα μετά από την ευθυγράμμιση: μηδέν σημαίνει τέλεια ταύτιση, ενώ όσο μεγαλύτερη η τιμή, τόσο πιο διαφορετικά είναι τα σήματα. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του dtw, η μέση κυματομορφή αναφοράς συγκρίνεται ξεχωριστά με καθεμία από τις πέντε επαναλήψεις της εκάστοτε περίπτωσης, και ως τελική τιμή λαμβάνεται ο μέσος όρος των πέντε επιμέρους τιμών dtw.

Απόκλιση της μέγιστης τιμής ρεύματος (peak current):

Υπολογίζεται η μέση τιμή, από τις 5 κυματομορφές, μέγιστου ρεύματος για την κυματομορφή αναφοράς με άνθρωπο και η αντίστοιχη μέση τιμή για κάθε συγκρινόμενη κυματομορφή με φερρίτη/πο human. Στη συνέχεια ως 4^ο metric ορίζεται η απόκλιση του μέσου μέγιστου ρεύματος της κυματομορφής αναφοράς από τη μέση μέγιστη τιμή ρεύματος κάθε συγκρινόμενης κυματομορφής, ως εξής:

$$\text{Deviation} = |\text{ferrite_or_NoHuman_metric} - \text{Human_metric}|$$

Σημειώνεται, πως η απόκλιση είναι σε απόλυτες τιμές και όχι σε εκατοστιαίο ποσοστό. Ακόμα, καθώς η απόκλιση θα υπολογιστεί και άλλα μεγέθη και όχι μόνο για το μέγιστο ρεύμα, στον τύπο το «metric», συμβολίζει ακριβώς αυτό, δηλαδή το εκάστοτε μέγεθος. Προφανώς, όσο μικρότερη η τιμή της απόκλισης, τόσο πιο κοντά είναι η κυματομορφή αναφοράς και η συγκρινόμενη με αυτή αναφορικά με το εξεταζόμενο metric.

Απόκλιση του χρόνου ανόδου (rise time):

Ομοίως υπολογίζεται η απόκλιση του χρόνου ανόδου της κυματομορφής αναφοράς από κάθε συγκρινόμενη κυματομορφή. Ο χρόνος ανόδου υπολογίζεται από τον κώδικα όπως ορίζεται και στο Πρότυπο IEC 61000-4-2, δηλαδή ως ο χρόνος που χρειάζεται η κυματομορφή ρεύματος για να φτάσει από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής της.

Απόκλιση του I_{P2} (μέγιστο ρεύμα στο χρονικό διάστημα 10ns – 40ns):

Ομοίως υπολογίζεται η απόκλιση του I_{P2} της κυματομορφής αναφοράς από κάθε συγκρινόμενη κυματομορφή. Ως I_{P2} , σύμφωνα με την τρίτη έκδοση του Προτύπου ορίζεται το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα 10ns – 40ns.

Απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 30 ns (I_{30}):

Ομοίως υπολογίζεται η απόκλιση του I_{30} της κυματομορφής αναφοράς από κάθε συγκρινόμενη κυματομορφή, δηλαδή η τιμή ρεύματος στα 30ns.

Απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 60 ns (I_{60}):

Ομοίως υπολογίζεται η απόκλιση του I_{60} της κυματομορφής αναφοράς από κάθε συγκρινόμενη κυματομορφή, δηλαδή η τιμή ρεύματος στα 60ns.

Απόκλιση της ολικής ενέργειας (total energy):

Η ολική ενέργεια κάθε κυματομορφής υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα της κυματομορφής του ρεύματος συναρτήσει του χρόνου, δηλαδή η περιοχή κάτω από την καμπύλη ρεύματος-χρόνου και δίνεται από τον τύπο $Energy = \int I(t)dt$, για συνεχή δεδομένα. Στο Matlab, καθώς τα δεδομένα είναι διακριτά, υπολογίζεται με την έτοιμη συνάρτηση trapz, η οποία ολοκληρώνει την κυματομορφή χρησιμοποιώντας τον τραπεζοειδή κανόνα. Συγκεκριμένα, πίσω από την εντολή αυτή, υπολογίζεται ο προσεγγιστικός τύπος:

$$Energy \approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{t_{i+1} - t_i}{2} (I_i + I_{i+1})$$

Όπου t ο διακριτός χρόνος της κυματομορφής αναφοράς και I το ρεύμα της συγκρινόμενης κυματομορφής.

Καθώς για κάθε περίπτωση υπάρχουν 5 κυματομορφές, ο κώδικας υπολογίζει την ολική ενέργεια για κάθε κυματομορφή ξεχωριστά και στη συνέχεια ανά 5 βρίσκει τον μέσο όρο τους, βρίσκοντας τελικά τη μέση ολική ενέργεια κάθε περίπτωσης. Τέλος, ομοίως με τις παραπάνω περιπτώσεις υπολογίζεται η απόκλιση ως η διαφορά της ολικής ενέργειας της κυματομορφής αναφοράς από την ολική ενέργεια της συγκρινόμενης κυματομορφής.

Απόκλιση της φασματικής ενέργειας στην περιοχή 1-200 MHz:

Η φασματική ενέργεια είναι ένα μέτρο του πόσο από την ισχύ ενός σήματος κατανέμεται σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Στόχος είναι η σύγκριση πόσης ενέργεια συγκεντρώνεται σε ζώνες χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Αυτό βοηθά στον προσδιορισμό του πόσο παρόμοια είναι μια κυματομορφή φερρίτη/πο human με την κυματομορφή που συγκρατείται από τον άνθρωπο από την οπτική γωνία των εκπομπών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Για να υπολογιστεί η φασματική ενέργεια, ο κώδικας μετατρέπει το ρεύμα της κυματομορφής από τον χρονικό τομέα στον συχνοτικό τομέα, χρησιμοποιώντας το Fast Fourier Transform (FFT). Πριν γίνει αυτό, η κυματομορφή έχει ήδη επαναδειγματοληφθεί και κανονικοποιηθεί. Ο υπολογισμός ξεκινά με τη χρήση της συνάρτησης `fft` του MATLAB, η οποία μετατρέπει τη χρονική κυματομορφή σε φάσμα συχνοτήτων. Από το φάσμα αυτό, ο κώδικας κρατάει μόνο το μισό (την "θετική πλευρά") καθώς το φάσμα ενός πραγματικού σήματος είναι συμμετρικό. Στη συνέχεια, χρησιμοποιεί τη συνάρτηση `abs` για να πάρει το μέτρο του φάσματος και υπολογίζει την φασματική πυκνότητα ενέργειας ως το τετράγωνο του μέτρου. Για να υπολογίσει τη συνολική φασματική ενέργεια στο εύρος 6,2 MHz έως 1 GHz, εφαρμόζει αριθμητική ολοκλήρωση με τη συνάρτηση `trapz`. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται για να ολοκληρώσει επιμέρους περιοχές του φάσματος. Αφού βρεθεί η συνολική ενέργεια στο εύρος 6,2 MHz έως 1 GHz, ο κώδικας συνεχίζει να υπολογίζει το ποσοστό της ενέργειας που βρίσκεται στο υποσύνολο 1–200 MHz (metric 10) και που βρίσκεται στο υπόλοιπο 200 MHz–1 GHz (metric 11). Αυτά τα ποσοστά υπολογίζονται ως:

$$100 \times \frac{\text{spectral energy in range 1MHz} - 200\text{MHz}}{\text{total spectral energy}}$$

Η ολοκλήρωση για κάθε εύρος γίνεται πάλι με τη `trapz`. Το αποτέλεσμα είναι δύο ποσοστά (%) που συνοψίζουν τη φασματική κατανομή του σήματος. Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι και εδώ, υπολογίζεται ο μέσος όρος της φασματικής ενέργειας των 5 κυματομορφών που έχουν ληφθεί ανά περίπτωση και στη συνέχεια υπολογίζεται η απόκλιση της φασματικής ενέργειας της κυματομορφής αναφοράς στο εύρος 1 MHz – 200MHz από το αντίστοιχο της συγκρινόμενης κυματομορφής. Η απόκλιση στην περίπτωση της φασματικής ενέργειας είναι σε εκατοστιαίο ποσοστό και όχι σε φυσική τιμή.

Απόκλιση της φασματικής ενέργειας στην περιοχή 200 MHz – 1GHz:

Ο τρόπος υπολογισμού είναι ίδιος με αυτόν που περιγράφεται παραπάνω, με τη διαφορά ότι στον αριθμητή του ποσοστού μπαίνει η φασματική ενέργεια στο εύρος 200 MHz – 1GHz και άρα γίνεται υπολογισμός για τη ζώνη υψηλών συχνοτήτων.

Στόχος, λοιπόν, μέσα από τον υπολογισμό των metrics, είναι να γίνει μια ποσοτική σύγκριση ως προς το κατά πόσο οι κυματομορφές που προκύπτουν είτε από την προσθήκη φερριτή είτε από την απουσία ανθρώπου προσομοιώνουν αποτελεσματικά την επίδραση του ανθρώπινου σώματος. Όπως φαίνεται από την παραπάνω ανάλυση, τα 11 metrics που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση και τη λειτουργία τους:

1. Μετρικές σύγκρισης μορφής κυματομορφών:

Τα πρώτα τρία metrics (RMSE, Cross-Correlation, DTW Distance) αξιολογούν τη συνολική μορφολογική ομοιότητα μεταξύ της κυματομορφής αναφοράς (άνθρωπος) και κάθε άλλης κυματομορφής. Το RMSE μετρά την μέση τετραγωνική απόκλιση σημείο προς σημείο, η διασυσχέτιση (Cross-Correlation) εκτιμά το πόσο καλά ταυτίζονται τα σήματα υπό χρονική ολίσθηση, ενώ το DTW (Dynamic Time Warping) επιτρέπει μη γραμμική ευθυγράμμιση στον άξονα του χρόνου, ώστε να συγκρίνει δύο σήματα με παρόμοια μορφή αλλά διαφορετική χρονική κατανομή. Αυτές οι μετρικές δεν εστιάζουν σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αλλά αξιολογούν τη γενική «ομοιότητα σχήματος».

2. Παράμετροι βασισμένες στο Πρότυπο IEC 61000-4-2:

Τα επόμενα πέντε metrics ($I_{\max}$, t_{rise} , I_{p2} , I_{30} , I_{60}) είναι τυπικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Το $I_{\max}$ είναι το μέγιστο ρεύμα της παλμοσειράς, το t_{rise} είναι ο χρόνος ανόδου από 10% σε 90% του μέγιστου, ενώ το I_{p2} εκφράζει τη μέγιστη τιμή ρεύματος στο παράθυρο 10–40 ns μετά την έναρξη της ανόδου. Τα I_{30} και I_{60} είναι οι τιμές του ρεύματος στα 30 και 60 ns αντίστοιχα. Αυτές οι παράμετροι αποτυπώνουν την χρονοσειρά και ένταση του παλμού με βάση αυστηρά χρονικά κριτήρια, και είναι κρίσιμες για την πιστότητα αναπαράστασης ESD παλμών.

3. Φασματικά χαρακτηριστικά:

Τα τελευταία τρία metrics αφορούν στην ανάλυση της κυματομορφής στον συχνοτικό τομέα. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η συνολική φασματική ενέργεια (μέσω ολοκλήρωσης του φάσματος FFT), και έπειτα προσδιορίζεται το ποσοστό της ενέργειας που συγκεντρώνεται στο εύρος 1–200 MHz και στο εύρος 200 MHz–1 GHz. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι κρίσιμα για την αξιολόγηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της κυματομορφής, καθώς σχετίζονται με το πόσο «θορυβώδες» ή ενεργό είναι το σήμα σε συχνότητες που επηρεάζουν ηλεκτρονικά συστήματα.

Τα παραπάνω metrics, όπως φαίνεται, παρέχουν μια πολύπλευρη αποτίμηση της μορφολογίας, των χρονικών χαρακτηριστικών και της φασματικής συμπεριφοράς των κυματομορφών. Βάσει των χαρακτηριστικών αυτών, όπως έχει ήδη αναφερθεί έγινε η κατάταξη των δεκατριών περιπτώσεων (4 φερρίτες x 3 θέσεις ο καθένας και χωρίς άνθρωπο), για να φανεί ποια διάταξη προσομοιάζει καλύτερα την επίδραση του ανθρώπου. Το ranking έγινε αρχικά ανά metric, δηλαδή για κάθε metric, με τη συνάρτηση tiedrank βγήκε μία κατάταξη των δεκατριών περιπτώσεων και στη συνέχεια με χρήση σταθμισμένων βαρών υπολογίστηκε μία τελική κατάταξη.

Σημειώνεται πως η συνάρτηση tiedrank τοποθετεί στην καλύτερη θέση (πρώτη θέση) την μικρότερη τιμή του metric, δηλαδή ακολουθεί τη λογική ότι όσο μικρότερη η τιμή ενός metric, τόσο καλύτερη η θέση που παίρνει (rank). Αυτό ισχύει για όλα τα metrics όπου μικρότερη τιμή σημαίνει καλύτερη σύγκριση με την ανθρώπινη κυματομορφή — όπως RMSE, DTW, αποκλίσεις peak, rise time κ.λπ. Στην περίπτωση της διασυσχέτισης όμως, ισχύει το ανάποδο, δηλαδή μεγαλύτερη τιμή του metric σημαίνει καλύτερη ομοιότητα, αφού η τέλεια σύμπτωση κυματομορφών έχει cross-correlation = 1, ενώ η κακή έχει κοντά στο 0. Για αυτόν τον λόγο, στον υπολογισμό του ranking για τη διασυσχέτιση, υπάρχει αρνητικό πρόσημο ($\text{correlation_rank} = \text{tiedrank}(-\text{ferrite_metrics})$).

Για το τελικό ranking ακολουθήθηκε η μέθοδος των σταθμισμένων βαρών, σύμφωνα με την οποία κάθε ένα από τα έντεκα metrics συνεισφέρει στην τελική κατάταξη με διαφορετική βαρύτητα (weight), ανάλογα με τη σημασία του. Συγκεκριμένα, μετά τον επιμέρους υπολογισμό και κατάταξη (ranking) κάθε metric για τις 13 περιπτώσεις, οι θέσεις κατάταξης πολλαπλασιάζονται με το αντίστοιχο βάρος τους και προκύπτει ένα

συνολικό σταθμισμένο άθροισμα για κάθε φερρίτη. Τέλος, εφαρμόζεται ξανά η tiedrank στο σύνολο αυτό, ώστε να προσδιοριστεί η τελική σειρά κατάταξης, με βάση τη συνολική τους απόδοση ως προς όλα τα κριτήρια. Σε περίπτωση ισοβαθμίας σε κάποιο metric, η tiedrank αποδίδει τον μέσο όρο των ισοβαθμών θέσεων στους ισόβαθμους φερρίτες. Δεν σπάει την ισοβαθμία αυθαίρετα, αλλά η ισοδυναμία διατηρείται και μεταφέρεται στο τελικό σταθμισμένο άθροισμα. Τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε metric παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της συνολικής κατάταξης

α/α	Metric	Βάρος	α/α	Metric	Βάρος
1	RMSE	0,3	7	Απόκλιση I ₃₀	0,5
2	Cross-Correlation	0,3	8	Απόκλιση I ₆₀	0,5
3	DTW distance	0,3	9	Απόκλιση ολικής ενέργειας	0,1
4	Απόκλιση I _{max}	0,1	10	Απόκλιση φασματικής ενέργειας στο φάσμα 1-200MHz	0,3
5	Απόκλιση t _{rise}	0,1	11	Απόκλιση φασματικής ενέργειας στο φάσμα 200MHz-1GHz	0,1
6	Απόκλιση I _{P2}	0,5			

Τα βάρη ανατέθηκαν σε κάθε metric με την ακόλουθη λογική:

- Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 3, ο άνθρωπος δεν επιδρά ιδιαίτερα στο πρώτο peak της κυματομορφής και στο χρόνο ανόδου, γι' αυτό και τα metrics 4, 5 πήραν τα μικρότερα βάρη, έστω 0,1. Επίσης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 [40], η χρονική περιοχή 0-7ns φαίνεται να αντιστοιχεί σε συχνότητες μεγαλύτερες των 200MHz και όπως παρατηρήθηκε πειραματικά στο Κεφάλαιο 3, το τμήμα αυτό δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από την παρουσία του ανθρώπου. Συνεπώς, στο metric 11, δόθηκε επίσης η ελάχιστη τιμή βάρους, ήτοι 0,1. Ακόμα, το ελάχιστο βάρος δόθηκε και στο metric 9, που αφορά στην ολική ενέργεια, καθώς πρόκειται για έναν πολύ

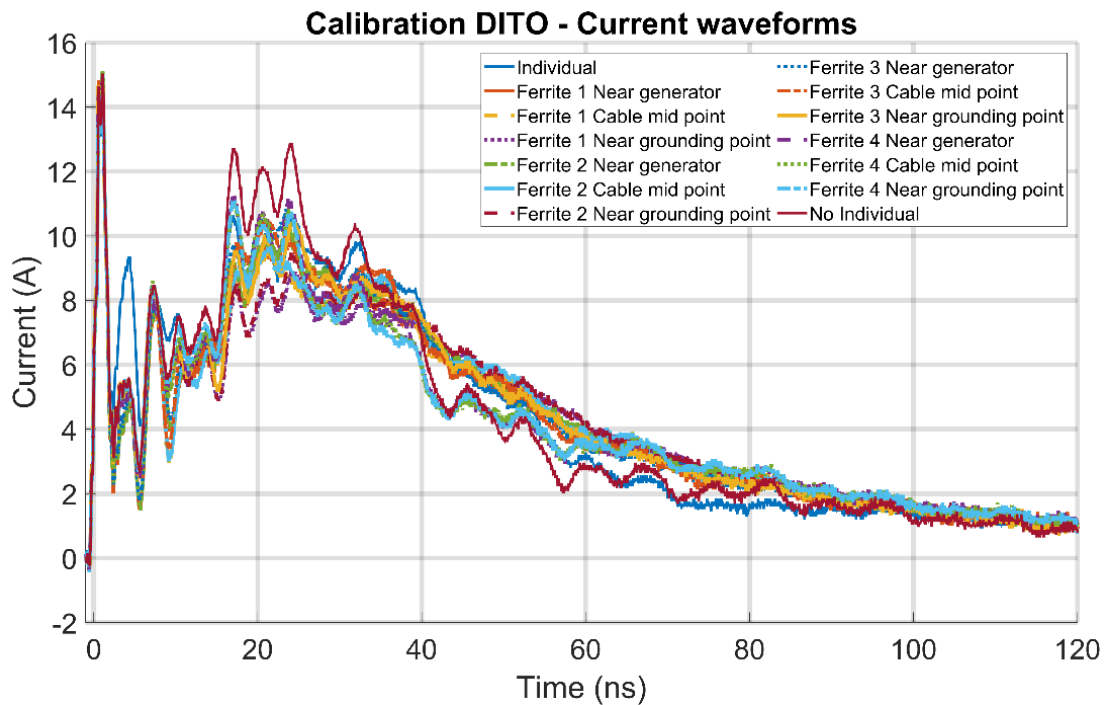
γενικό υπολογισμό, χωρίς ιδιαίτερη εξειδίκευση σε χαρακτηριστικά που συνδέονται άμεσα με την ανθρώπινη παρουσία.

- Αντίθετα, μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στα πρώτα τρία metrics, που ουσιαστικά αφορούν στη συνολική μορφολογική ομοιότητα μεταξύ της κυματομορφής αναφοράς και των κυματομορφών των δεκατριών περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Το βάρος αυτό τέθηκε ίσο με 0,3, ενώ το ίδιο βάρος δόθηκε και στο metric 10, δηλαδή στην απόκλιση φασματικής ενέργειας στο φάσμα 1-200MHz, που όπως αναφέρθηκε, το συγκεκριμένο φασματικό εύρος αντιστοιχεί στο κομμάτι του έντονου ringing της κυματομορφής, δηλαδή στο περίπου στο κομμάτι 7-60ns [40], όπου ο άνθρωπος έχει και την μεγαλύτερη επίδραση.
- Τέλος, το μεγαλύτερο βάρος, έστω 0,5, δόθηκε στα metrics 6-8, τα οποία σχετίζονται με κρίσιμες παραμέτρους του Προτύπου IEC 61000-4-2 και μάλιστα πρόκειται για τις τιμές που παρουσίασαν τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ κυματομορφής με και χωρίς άνθρωπο, άρα θεωρούνται ιδιαίτερα ευαίσθητοι δείκτες ανθρώπινης επίδρασης.

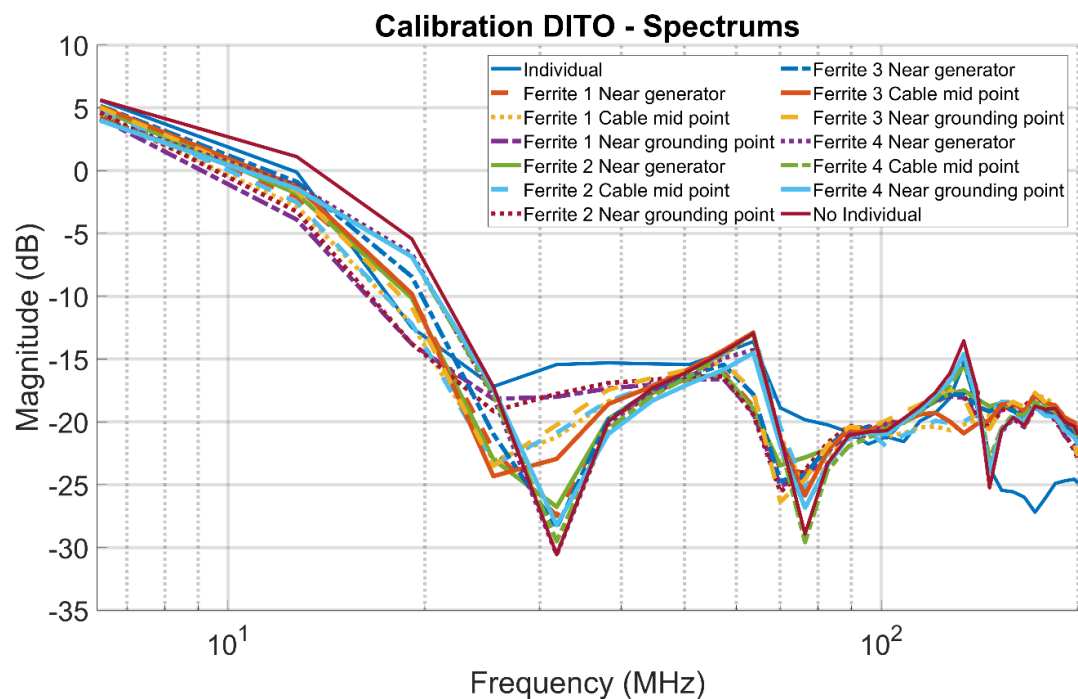
Τονίζεται ότι τα βάρη που αποδόθηκαν στα επιμέρους metrics είναι ενδεικτικά και δεν αποτελούν μοναδική ή απόλυτη επιλογή. Είναι πιθανό μια διαφορετική στάθμιση να οδηγούσε σε παραλλαγές στην κατάταξη. Ωστόσο, ο στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι να οριστεί μια καθολικά βέλτιστη μέθοδος αξιολόγησης, αλλά να διερευνηθεί κατά πόσο η χρήση φερρίτη μπορεί να φέρει την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο έστω και μερικώς πιο κοντά στην κυματομορφή με ανθρώπινη επαφή. Εφόσον διαπιστωθεί θετική επίδραση, είναι προφανές ότι η επιλογή του κατάλληλου υλικού φερρίτη, καθώς και η βέλτιστη θέση τοποθέτησής του, θα πρέπει να καθορίζονται από την εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρεία της ESD γεννήτριας, βάσει των τεχνικών και λειτουργικών της απαιτήσεων.

4.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

4.4.1 Διάταξη διακρίβωσης DITO



Σχήμα 4.13: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο - διακρίβωση DITO



Σχήμα 4.14: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο - διακρίβωση DITO

Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ESD και τα φάσματά τους για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις, καθώς και η περίπτωση με ανθρώπινο χειριστή (κυματομορφή αναφοράς), ώστε να είναι δυνατή μια πρώτη οπτική σύγκριση. Από το Σχήμα 4.13 παρατηρείται, όπως και στο Κεφάλαιο 3, ότι ο άνθρωπος δεν επιδρά ουσιαστικά στο πρώτο peak της κυματομορφής, όπως και οι φερρίτες. Στο χρονικό διάστημα 2ns – 6ns, όπου ο άνθρωπος προκαλεί ανύψωση της κυματομορφής, δεν φαίνεται κάποιος φερρίτης να προσομοιώνει αυτή την επίδραση. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι και οι τέσσερις φερρίτες στη θέση 1 (GEN – κοντά στη γεννήτρια) μειώνουν την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο, ενώ στις άλλες θέσεις παρουσιάζουν παρόμοιο αποτέλεσμα με εκείνη χωρίς ανθρώπινη παρουσία. Στο διάστημα 6ns – 8ns, οι φερρίτες 0431264951 και 0444164951 στη θέση 1 φαίνεται να προσομοιάζουν ικανοποιητικά την επίδραση του ανθρώπου. Το ίδιο δεν ισχύει για το τοπικό ελάχιστο γύρω στα 9ns, όπου ο άνθρωπος ανυψώνει την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο, ενώ οι φερρίτες την μειώνουν.

Στο τμήμα 15ns – 30ns, όπου η ανθρώπινη παρουσία μειώνει την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο, παρατηρείται ότι και οι φερρίτες επιδρούν αντίστοιχα, σε διαφορετικό όμως βαθμό. Οπτικά δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί ποιος φερρίτης προσομοιώνει καλύτερα την ανθρώπινη επίδραση, καθώς διαφορετικοί φερρίτες σε διαφορετικές θέσεις φαίνεται να ταυτίζονται κατά διαστήματα με την κυματομορφή αναφοράς. Στο χρονικό διάστημα 30ns – 35ns, η κυματομορφή αναφοράς είναι χαμηλότερη από αυτή χωρίς άνθρωπο και παρόμοια επίδραση ασκούν οι φερρίτες, αν και τη μειώνουν σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό. Καλή προσαρμογή στην περιοχή 40ns – 55ns παρουσιάζουν όλοι οι φερρίτες, με εξαίρεση τον 0475181651.

Στο υπόλοιπο της ουράς, οι φερρίτες ανυψώνουν την κυματομορφή σε σχέση τόσο με την κυματομορφή αναφοράς όσο και με εκείνη χωρίς άνθρωπο. Συνολικά, γίνεται σαφές ότι οι φερρίτες σε αρκετά σημεία προσεγγίζουν την επίδραση του ανθρώπου και μπορούν να φέρουν την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο πιο κοντά σε εκείνη με ανθρώπινη παρουσία.

Στο φάσμα παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτή της χρονικής κυματομορφής. Στις χαμηλές συχνότητες έως περίπου τα 25MHz, τόσο η παρουσία του ανθρώπου όσο και οι φερρίτες προκαλούν εξασθένηση του σήματος σε σχέση με την περίπτωση χωρίς άνθρωπο. Το αντίθετο εμφανίζεται στις περιοχές 25MHz – 50MHz

και 70MHz – 90MHz, όπου η ανθρώπινη παρουσία ενισχύει την κυματομορφή συγκριτικά με αυτή χωρίς άνθρωπο. Για τις συχνότητες 25MHz – 50MHz, παρόμοιας ενίσχυσης με αυτή του ανθρώπου εμφανίζουν οι φερρίτες 0444164951 στη θέση 3 και 0431164951 στη θέση 3, ενώ οι υπόλοιποι ενισχύουν με μικρότερη ένταση. Στην περιοχή 70MHz – 90MHz, οι περισσότεροι φερρίτες ενισχύουν επίσης το σήμα, χωρίς όμως να φτάνουν το επίπεδο ενίσχυσης που προκαλεί ο άνθρωπος. Τέλος, για τις συχνότητες 146MHz – 200MHz, η ανθρώπινη παρουσία επιφέρει έντονη εξασθένηση, κάτι που δεν παρατηρείται σε κανέναν από τους φερρίτες. Αντιστοιχίζοντας τις συχνοτικές περιοχές με τα χρονικά διαστήματα, όπως παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία [40], διαπιστώνεται, τουλάχιστον οπτικά, συνέπεια ανάμεσα στα ευρήματα της χρονικής και της φασματικής ανάλυσης.

Πίνακας 4.3: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διακρίβωση DITO

Calibration Dito								
Περίπτωση	$I_{\max}(A)$	$t_{rise}(ns)$	$I_{P2}(A)$	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$	Total Energy (nC)	Φάσμα 1MHz - 200MHz (%)	Φάσμα 200MHz - 1GHz (%)
Ferrite 1	14,96	0,8819	10,14	8,074	3,971	557,9	91,49	8,51
Ferrite 2	15,14	0,8817	9,536	7,713	3,820	557,6	91,71	8,29
Ferrite 3	14,99	0,8790	8,976	7,512	4,222	558,2	91,24	8,76
Ferrite 4	14,89	0,8791	10,28	8,448	4,016	559,8	92,17	7,83
Ferrite 5	15,02	0,8851	9,688	8,035	3,932	559,8	92,38	7,62
Ferrite 6	14,76	0,8824	9,464	7,835	4,232	560,4	92,04	7,96
Ferrite 7	14,94	0,8859	10,84	8,644	3,654	558,5	92,97	7,03
Ferrite 8	14,95	0,8785	10,55	8,390	3,578	558,6	93,15	6,85
Ferrite 9	14,92	0,8827	10,54	8,331	3,686	558,5	93,10	6,90
Ferrite 10	14,95	0,8808	11,27	7,702	3,614	555,7	92,38	7,62
Ferrite 11	14,87	0,8821	11,05	7,350	3,517	555,7	92,41	7,59
Ferrite 12	14,84	0,8847	11,16	7,315	3,687	555,6	92,25	7,75
Ferrite 13	15,01	0,8824	12,85	8,774	2,836	554,5	94,45	5,55
Reference	15,12	0,8862	10,64	8,745	3,074	553,8	93,13	6,87

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές κυματομορφών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις και για την κυματομορφή αναφοράς, όπου μπορεί να γίνει μία εκτίμηση της απόκλισης για κάθε παράμετρο και για κάθε περίπτωση ξεχωριστά σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς. Σημειώνεται πως για την περίπτωση Ferrite 13, δηλαδή την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, το IP2 είναι εκτός ορίων του Προτύπου ($IP_2: 9A \pm 30\% \rightarrow 6,3A \leq I_{P2} \leq 11,7A$)!

Ειδικότερα, για τις τιμές που σχετίζονται με το πρώτο μέγιστο (I_{max}) φαίνεται τόσο ο άνθρωπος (reference), όσο και οι φερρίτες να μην επιδρούν ιδιαίτερα συγκρίνοντάς τις με τις αντίστοιχες τιμές χωρίς άνθρωπο, αφού η μεγαλύτερη απόκλιση είναι την τάξης -1,666% και για μία μόνο περίπτωση, ενώ οι υπόλοιπες είναι κάτω από 1% στην πλειοψηφία τους. Για την παράμετρο του χρόνου ανόδου (t_{rise}) οι επιμέρους τιμές είναι ακόμα πιο κοντινές, με αποκλίσεις που δεν ξεπερνούν το 0,45%. Για το ρεύμα στα 30ns (I_{30}) οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες και δεν υπάρχει ξεκάθαρα αυξητική ή πτωτική επίδραση τόσο από τον άνθρωπο, όσο και από τους φερρίτες. Ξεκάθαρα ωστόσο, είναι τα αποτελέσματα για την παράμετρο IP2, όπου τόσο ο άνθρωπος όσο και οι φερρίτες δρουν πτωτικά και για την παράμετρο I60, όπου φερρίτες και άνθρωπος επιδρούν ανοδικά στην κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, υποδεικνύοντας πως πράγματι οι φερρίτες δύνανται να παρουσιάσουν παρόμοια επίδραση με αυτή του ανθρώπου. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με τις παρατηρήσεις από την οπτική σύγκριση των κυματομορφών που αναλύθηκαν νωρίτερα.

Στον Πίνακα 4.4 παρατίθενται οι τιμές των έντεκα metrics που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και την κατάταξη των δεκατριών περιπτώσεων. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η τιμή ενός metric, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η επίδραση της ανθρώπινης παρουσίας, με εξαίρεση το cross-correlation, στο οποίο υψηλότερη τιμή δηλώνει μεγαλύτερη μορφολογική ομοιότητα με την κυματομορφή αναφοράς. Ήδη από την παρατήρηση των τιμών στον πίνακα, καθίσταται σαφές ότι δεν υπάρχει κάποιος φερρίτης που να υπερέχει σε όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα. Αντιθέτως, κάθε περίπτωση επιτυγχάνει καλές επιδόσεις σε ορισμένα metrics και υστερεί σε άλλα, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της πολυπαραμετρικής αξιολόγησης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η θέση τοποθέτησης του φερρίτη κατά μήκος του αγωγού επιστροφής επηρεάζει την απόδοσή του, χωρίς ωστόσο να προκύπτει κάποιο σταθερό ή επαναλαμβανόμενο μοτίβο, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αλληλεπίδραση εξαρτάται από τη σύνθετη κατανομή των ρευμάτων και των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο εκάστοτε σενάριο.

Πίνακας 4.4: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διακρίβωση DITO

Calibration Dito											
Περίπτωση	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_{max} (A)	Dev t_{rise} (ns)	Dev I_{p2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 - 200MHz (%)	Dev spectrum 0.2 -1GHz (%)
Ferrite 1	0,05807	0,9844	31,91	0,16	0,004301	0,496	0,6712	0,8966	4,113	1,640	1,484
Ferrite 2	0,06061	0,9834	36,59	0,016	0,004479	1,104	1,032	0,7458	3,834	1,418	1,182
Ferrite 3	0,06425	0,9821	38,90	0,128	0,007190	1,664	1,233	1,148	4,453	1,891	1,763
Ferrite 4	0,05574	0,9852	31,16	0,232	0,007120	0,360	0,2969	0,9423	6,049	0,9559	0,8132
Ferrite 5	0,05659	0,9852	32,63	0,104	0,001107	0,952	0,7100	0,8581	5,963	0,7463	0,5476
Ferrite 6	0,05760	0,9844	34,22	0,36	0,003731	1,176	0,9100	1,158	6,646	1,086	0,9770
Ferrite 7	0,04965	0,9882	30,34	0,184	0,0002642	0,200	0,1016	0,5800	4,722	0,1539	0,0400
Ferrite 8	0,04851	0,9887	27,54	0,168	0,007638	0,088	0,3548	0,5046	4,814	0,02098	0,1954
Ferrite 9	0,04509	0,9905	25,90	0,200	0,003436	0,104	0,4141	0,6116	4,727	0,02352	0,06040
Ferrite 10	0,05861	0,9840	32,49	0,168	0,005352	0,632	1,043	0,5405	1,939	0,7448	0,5802
Ferrite 11	0,05893	0,9839	31,29	0,248	0,004048	0,408	1,395	0,4433	1,890	0,7197	0,5519
Ferrite 12	0,05883	0,9841	29,98	0,280	0,001449	0,520	1,430	0,6132	1,767	0,8791	0,7263
Ferrite 13	0,05412	0,9863	39,45	0,112	0,003770	2,208	0,02882	0,2378	0,7088	1,326	1,421

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατάταξης, τόσο για κάθε metric ξεχωριστά όσο και συνολικά. Παρατηρείται ότι η θέση κάθε φερρίτη διαφέρει ανάλογα με το κριτήριο, γεγονός που δείχνει πως δεν υπάρχει μία απόλυτα κυρίαρχη περίπτωση. Ακόμη και η όγδοη περίπτωση, η οποία συνολικά κατατάσσεται πρώτη, έχει λάβει από την πρώτη έως και τη δέκατη τρίτη θέση στις επιμέρους κατατάξεις. Αξιοσημείωτο είναι ότι η κυματομορφή χωρίς άνθρωπο καταλαμβάνει, σε ορισμένα metrics, την καλύτερη θέση. Αυτό δείχνει ότι η ανθρώπινη παρουσία έχει αμελητέα επίδραση σε συγκεκριμένες παραμέτρους. Αντίθετα, κάποιοι φερρίτες επιδρούν τροποποιώντας την κυματομορφή, οδηγώντας σε χειρότερη προσαρμογή.

Ειδικότερα, η ανάλυση του Πίνακα 4.5 αναδεικνύει σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των φερριτών σε διαφορετικές θέσεις, αλλά και τη σύγκριση με την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο. Η περίπτωση Ferrite 8 καταλαμβάνει την πρώτη θέση συνολικά, επιτυγχάνοντας κορυφαίες επιδόσεις σε αρκετά metrics (όπως RMSE, Cross-correlation, DTW, deviation του I_{p2} και της φασματικής ενέργειας στο εύρος 1-200MHz), ενώ παρουσιάζει και χαμηλές αποκλίσεις στα περισσότερα άλλα. Παρότι σε

κάποιες παραμέτρους, όπως το deviation του χρόνου ανόδου, κατατάσσεται τελευταία (13η θέση), η συνολική της επίδοση παραμένει ισχυρή, αποδεικνύοντας την αξία της πολυπαραμετρικής αξιολόγησης.

Πίνακας 4.5: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διακρίβωση DITO

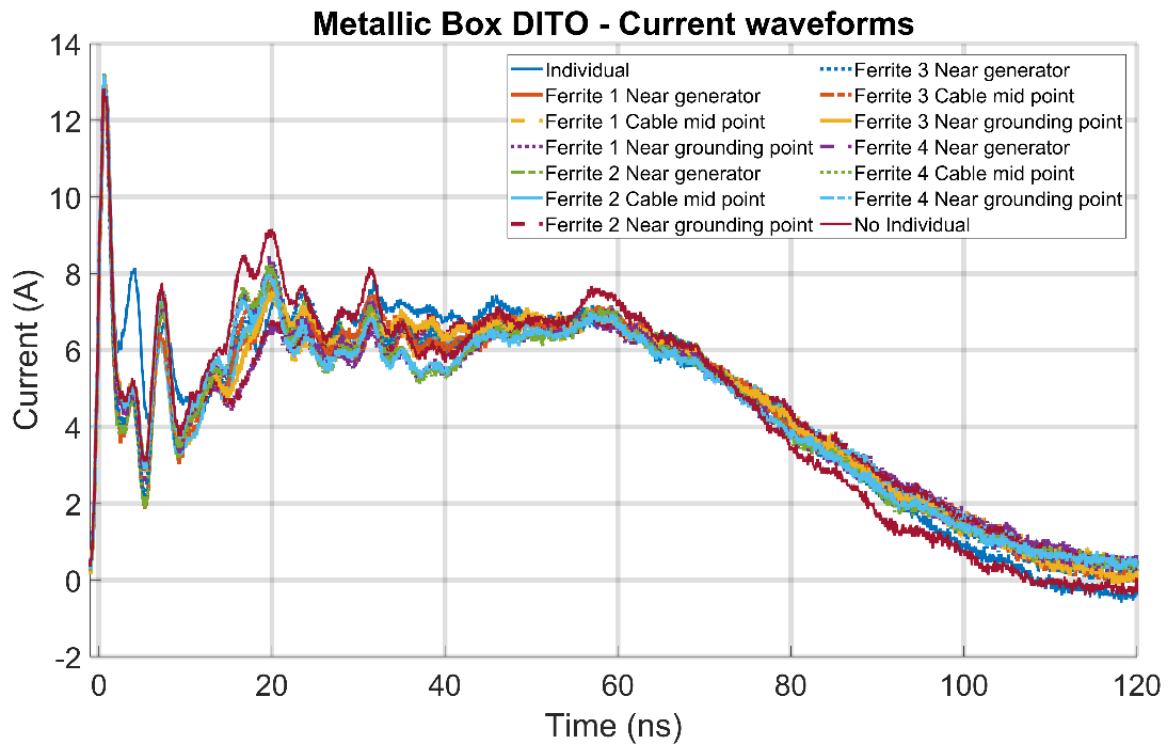
Calibration Dito												
Περίπτωση	Ranking											
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_{max} (A)	Dev t_{rise} (ns)	Dev I_{P2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 - 200MHz	Dev spectrum 0.2 - 1GHz	Final Ranking
Ferrite 1	8	7	7	5	8	6	6	10	6	12	12	9
Ferrite 2	12	11	11	1	9	10	9	8	5	11	10	11
Ferrite 3	13	13	12	4	12	12	11	12	7	13	13	13
Ferrite 4	5	5	5	10	11	4	3	11	12	8	8	5
Ferrite 5	6	6	9	2	2	9	7	9	11	6	4	7
Ferrite 6	7	8	10	13	5	11	8	13	13	9	9	12
Ferrite 7	3	3	4	8	1	3	2	5	8	3	1	3
Ferrite 8	2	2	2	6,5	13	1	4	3	10	1	3	1
Ferrite 9	1	1	1	9	4	2	5	6	9	2	2	2
Ferrite 10	9	10	8	6,5	10	8	10	4	4	5	6	8
Ferrite 11	11	12	6	11	7	5	12	2	3	4	5	6
Ferrite 12	10	9	3	12	3	7	13	7	2	7	7	10
Ferrite 13	4	4	13	3	6	13	1	1	1	10	11	4

Ο Ferrite 9 ακολουθεί στη δεύτερη θέση, με πολύ καλές επιδόσεις σε metrics όπως η διασυσχέτιση, το RMSE, DTW, deviation του I_{P2} και της φασματικής ενέργειας και οι χρονικές τιμές ρεύματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση Ferrite 13, που αντιστοιχεί στην κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, η οποία καταλαμβάνει την τέταρτη θέση συνολικά και την πρώτη σε metrics όπως deviation των I_{30} , I_{60} και total Energy. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι σε ορισμένες παραμέτρους η ανθρώπινη επίδραση είναι αμελητέα, ενώ αντίθετα η χρήση φερριτή μπορεί να μεταβάλλει την κυματομορφή.

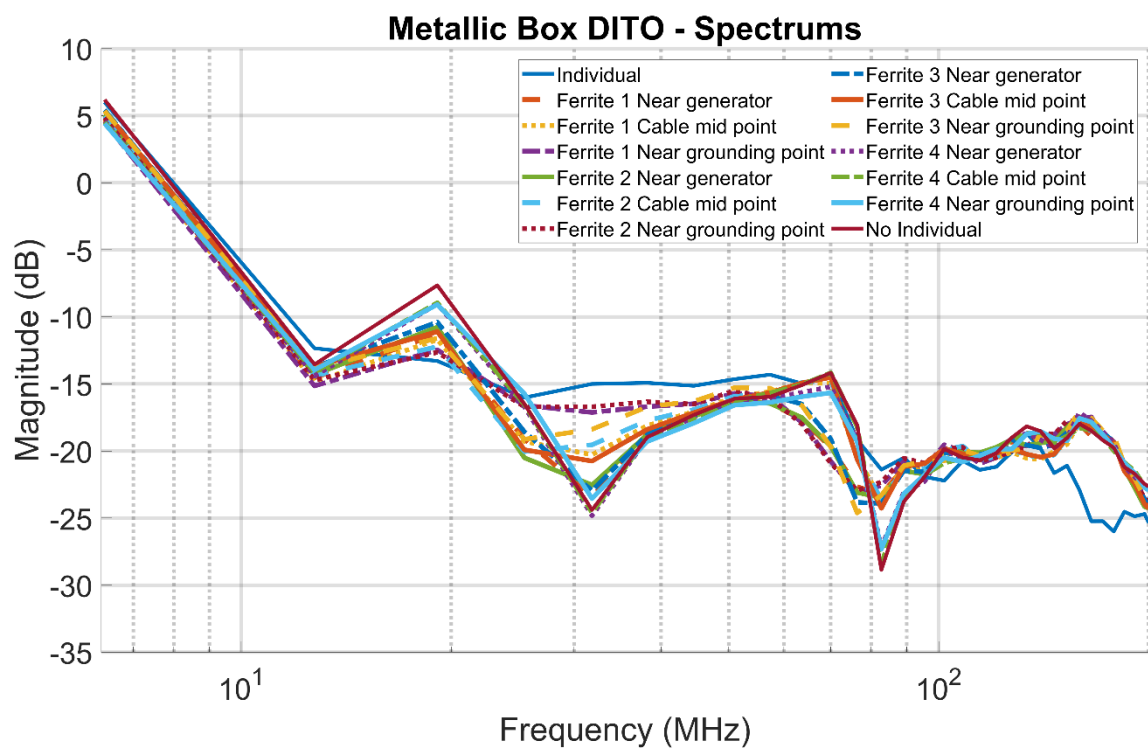
Τέλος, η διακύμανση της κατάταξης μεταξύ των φερριτών της ίδιας οικογένειας υποδηλώνει ότι και η θέση τοποθέτησης επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά τους.

Για παράδειγμα ο φερρίτης 0475181651 (Ferrite 10 -12) καταλαμβάνει από την έκτη θέση με το position 2 (MID) έως τη δέκατη θέση με το position 3 (GND). Αντίστοιχα, ο φερρίτης 0444164951 καταλαμβάνει από την πέμπτη θέση με το position 1 (GEN) έως τη δωδέκατη θέση με το position 3 (GND). Ωστόσο, ο φερρίτης 0461169451 καταλαμβάνει τις πρώτες τρεις θέσεις στη συνολική κατάταξη κάτι που υποδεικνύει πως η χρήση του συγκεκριμένου φερρίτη, για τη συγκεκριμένη γεννήτρια ESD προσομοιώνει καλύτερα από όλους την ανθρώπινη επίδραση. Μάλιστα, το γεγονός πως στην τέταρτη θέση της συνολικής κατάταξης βρίσκεται ο άνθρωπος υποδεικνύει πως οι υπόλοιποι φερρίτες δεν προσομοιώνουν ικανοποιητικά την ανθρώπινη συμπεριφορά.

4.4.2 Διάταξη δοκιμών DITO



Σχήμα 4.15: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών DITO



Σχήμα 4.16: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών DITO

Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ESD και φάσματα αυτών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις, καθώς και η περίπτωση με ανθρώπινο χειριστή (κυματομορφή αναφοράς), ώστε να μπορεί να γίνει μία πρώτη οπτική σύγκριση.

Από το Σχήμα 4.15 για την περίπτωση των δοκιμών παρατηρούνται παρόμοια συμβάντα με την περίπτωση της διακρίβωσης. Αρχικά, όπως και στη περίπτωση της διακρίβωσης, ομοίως και στην περίπτωση των δοκιμών, ο άνθρωπος δεν επιδρά ουσιαστικά στο πρώτο peak της κυματομορφής, όπως επίσης και οι φερρίτες. Στο χρονικό διάστημα 2ns – 6ns, όπου ο άνθρωπος προκαλεί μία ανύψωση της κυματομορφής, δεν φαίνεται κάποιος φερρίτης να μπορεί να προσομοιώσει αυτή την επίδραση. Μάλιστα, από το διάγραμμα προκύπτει ότι και οι τέσσερις φερρίτες στη θέση 1 (GEN – κοντά στη γεννήτρια) μειώνουν την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις παρουσιάζουν παρόμοιο αποτέλεσμα με την κυματομορφή χωρίς ανθρώπινη παρουσία, όπως ακριβώς και στην περίπτωση διακρίβωσης. Στο διάστημα 6ns – 8ns, οι φερρίτες 0431264951 και 0444164951 στη θέση 1 φαίνεται να προσομοιάζουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την επίδραση του ανθρώπου. Ίδια συμπεριφορά με τη διακρίβωση παρατηρείται και στο τοπικό ελάχιστο στα 9ns, όπου ο άνθρωπος ανυψώνει την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο, ενώ οι φερρίτες την μειώνουν, επιδρώντας αντίστροφα. Συνεχίζοντας χρονικά, στο τμήμα 15ns – 30ns, όπου η ανθρώπινη παρουσία μειώνει την κυματομορφή σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, παρατηρείται ότι και οι φερρίτες ασκούν αντίστοιχη επίδραση, αν και σε διαφορετικό βαθμό, χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένος φερρίτης σε συγκεκριμένη θέση που να ταυτίζεται οπτικά σε όλο το εύρος. Αντίθετα με την περίπτωση διακρίβωσης, στο χρονικό διάστημα 30ns – 35ns, η κυματομορφή αναφοράς είναι υψηλότερα από αυτή χωρίς άνθρωπο, ενώ κάποιοι φερρίτες σε κάποιες θέσεις ασκούν αντίστοιχη επίδραση (Ferrite 4, 7, 8, 9, 12), ενώ οι υπόλοιποι κατεβάζουν την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο. Καλή προσαρμογή στην περιοχή 40ns – 95ns παρουσιάζουν όλοι οι φερρίτες, ενώ αντίθετα η κυματομορφή χωρίς άνθρωπο παρουσιάζει παροδικά αποκλίσεις, γεγονός που υποδεικνύει ότι στο χρονικό αυτό διάστημα, η χρήση του φερρίτη προσομοιάζει σημαντικά την ανθρώπινη επίδραση. Στο υπόλοιπο τμήμα της ουράς της κυματομορφής, οι φερρίτες την ανυψώνουν σε σχέση τόσο με την κυματομορφή αναφοράς όσο και με εκείνη χωρίς άνθρωπο. Συνολικά, γίνεται σαφές ότι οι φερρίτες σε αρκετά σημεία προσεγγίζουν την επίδραση του ανθρώπου και μπορούν να φέρουν

την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο πιο κοντά σε εκείνη με ανθρώπινη παρουσία, ενώ παρατηρείται πως γενικά οι φερρίτες επιδρούν παρόμοια τόσο στην περίπτωση της διακρίβωσης, όσο και στην περίπτωση των δοκιμών.

Στο φάσμα παρατηρείται μία κάπως διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με το αντίστοιχο φάσμα στην περίπτωση διακρίβωσης. Στις χαμηλές συχνότητες έως περίπου τα 12MHz, η παρουσία του ανθρώπου προκαλεί μία μικρή, αλλά υπαρκτή ενίσχυση, ενώ αντίθετα οι φερρίτες προκαλούν εξασθένηση του σήματος σε σχέση με την περίπτωση χωρίς άνθρωπο. Στην περιοχή 12MHz – 25MHz, η ανθρώπινη παρουσία εξομαλύνει το φάσμα και εξαφανίζει την ύπαρξη έντονων μεγίστων, ενώ γίνεται εξασθένηση του σήματος σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο. Αντίθετα, οι φερρίτες, διατηρούν το έντονο τοπικό μέγιστο, ακολουθώντας σχηματικά την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, αλλά προκαλώντας επίσης μία εξασθένηση. Στο διάστημα αυτό των συχνοτήτων, πιο κοντινή επίδραση στον άνθρωπο έχουν οι φερρίτες 0444164951 και 0431164951 στη θέση 3 (GND). Για τις συχνότητες 25MHz – 60MHz, παρατηρείται και πάλι εξομάλυνση στην κυματομορφή αναφοράς, προκαλώντας ενίσχυση αυτή τη φορά. Ενίσχυση προκαλούν και οι φερρίτες, χωρίς όμως να εξομαλύνουν πάντα την καμπύλη. Την καλύτερη προσαρμογή φαίνεται να έχουν και πάλι οι φερρίτες 0444164951 και 0431164951 στη θέση 3 (GND). Στην περιοχή 60MHz – 146MHz, δεν υπάρχει σταθερή συμπεριφορά τόσο στην κυματομορφή αναφοράς, όσο και στις κυματομορφές των φερριτών, με αποτέλεσμα να μην είναι ξεκάθαρο αν κάποιος φερρίτης έχει καλύτερα αποτελέσματα. Είναι όμως φανερό πως οι φερρίτες ακολουθούν κατά βάση τη συμπεριφορά της κυματομορφής χωρίς άνθρωπο, προσομοιάζονται κατά διαστήματα την ανθρώπινη επίδραση. Τέλος, για τις συχνότητες 146MHz – 200MHz, η ανθρώπινη παρουσία επιφέρει έντονη εξασθένηση, κάτι που δεν παρατηρείται σε κανέναν από τους φερρίτες, ομοίως με την περίπτωση της διακρίβωσης. Σε γενικές γραμμές ωστόσο, παρατηρείται πως οι φερρίτες σε αρκετά διαστήματα συχνοτήτων μπορούν να προκαλέσουν φαινόμενα παρόμοια με αυτά της ανθρώπινης παρουσίας, ενώ φαίνεται τα καλύτερα αποτελέσματα να έχουν οι φερρίτες 0444164951 και 0431164951 στη θέση 3 (GND), ειδικά στα κομμάτια των έντονων αποκλίσεων.

Πίνακας 4.6: Τιμές παραμέτρων μέσω κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών DITO

Metallic Box Dito								
Περίπτωση	$I_{\max}(A)$	$t_{rise}(ns)$	$I_{P2}(A)$	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$	Total Energy (nC)	Φάσμα 1MHz - 200MHz (%)	Φάσμα 200MHz - 1GHz (%)
Ferrite 1	12,68	1,064	7,737	5,803	6,887	570,2	93,63	6,37
Ferrite 2	13,05	1,089	7,502	5,918	6,847	570,8	94,40	5,6
Ferrite 3	13,11	1,068	6,819	5,649	6,622	570,8	94,16	5,84
Ferrite 4	12,64	1,073	7,868	6,021	6,891	569,3	94,16	5,84
Ferrite 5	12,91	1,065	7,580	6,186	6,895	569,5	94,79	5,21
Ferrite 6	12,94	1,059	6,956	5,872	6,671	570,2	94,65	5,35
Ferrite 7	12,67	1,090	8,340	6,125	7,003	568,5	94,83	5,17
Ferrite 8	12,81	1,068	8,078	6,375	6,997	568,9	95,37	4,63
Ferrite 9	13,06	1,077	7,614	6,148	6,862	568,8	95,16	4,84
Ferrite 10	12,87	1,066	8,308	6,086	6,998	565,8	94,19	5,81
Ferrite 11	13,03	1,081	8,240	5,940	6,943	565,8	94,26	5,74
Ferrite 12	13,07	1,084	8,023	5,869	6,748	566,4	94,18	5,82
Ferrite 13	12,98	1,076	9,167	6,897	7,479	563,5	95,69	4,31
Reference	13,11	1,077	7,779	6,732	6,865	564,2	95,01	4,99

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές κυματομορφών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις και για την κυματομορφή αναφοράς, όπου μπορεί να γίνει μία εκτίμηση της απόκλισης για κάθε παράμετρο και για κάθε περίπτωση ξεχωριστά σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς.

Ειδικότερα, παρατηρείται ότι οι τιμές για το πρώτο μέγιστο είναι παραπλήσιες μεταξύ τους, ενώ φαίνεται ο άνθρωπος (reference) να επιδρά ελαφρώς αυξητικά στην κυματομορφή χωρίς άνθρωπο (Ferrite 13) ενώ οι διάφοροι φερρίτες σε διαφορετικές θέσεις μπορεί να επιδρούν είτε αυξητικά είναι πτωτικά. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για το χρόνο ανόδου. Είναι ξεκάθαρο όμως, πως τόσο οι φερρίτες όσο και ο άνθρωπος

επιδρούν πτωτικά στις παραμέτρους I_{P2} , I_{60} και I_{30} , σε σχέση με τις τιμές που παρουσιάζει η κυματομορφή χωρίς άνθρωπο.

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές των έντεκα metrics, βάσει των οποίων πραγματοποιείται η διαδικασία κατάταξης. Γενικά, ισχύει ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή ενός metric, τόσο καλύτερα προσομοιώνεται η ανθρώπινη παρουσία από την αντίστοιχη περίπτωση. Εξαίρεση αποτελεί το cross-correlation, όπου η καλή προσαρμογή της εκάστοτε κυματομορφής στην κυματομορφή αναφοράς υποδεικνύεται από υψηλή τιμή διασυσχέτισης.

Πίνακας 4.7: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών DITO

Metallic Box Dito											
Περίπτωση	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_{max} (A)	Dev t_{rise} (ns)	Dev I_{P2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 -200MHz (%)	Dev spectrum 0.2-1GHz (%)
Ferrite 1	0,05373	0,9888	40,27	0,4303	0,01246	0,04200	0,9286	0,02161	5,999	1,383	1,311
Ferrite 2	0,05035	0,9903	39,66	0,06252	0,01286	0,2768	0,8137	0,01811	6,629	0,6126	0,5238
Ferrite 3	0,05354	0,9892	42,59	0,0009785	0,0008881	0,9593	1,082	0,2432	6,689	0,8538	0,7583
Ferrite 4	0,05118	0,9902	35,19	0,4657	0,003221	0,08985	0,7105	0,02558	5,103	0,8522	0,7920
Ferrite 5	0,04502	0,9921	32,15	0,2011	0,0112	0,1985	0,5459	0,04048	5,390	0,2266	0,1509
Ferrite 6	0,04786	0,9911	34,90	0,1721	0,01722	0,8226	0,8592	0,1943	6,043	0,3611	0,2776
Ferrite 7	0,04679	0,9922	31,81	0,4350	0,01389	0,5609	0,6062	0,1380	4,337	0,1833	0,1397
Ferrite 8	0,04047	0,9938	29,03	0,2954	0,008509	0,2998	0,3564	0,1324	4,701	0,3621	0,4152
Ferrite 9	0,04006	0,9938	27,95	0,05113	0,00004175	0,1642	0,5839	0,01324	4,664	0,1448	0,2051
Ferrite 10	0,05247	0,9895	45,12	0,2419	0,0106	0,5291	0,6458	0,1328	1,635	0,8244	0,7054
Ferrite 11	0,05231	0,9898	47,52	0,07858	0,004412	0,4615	0,7920	0,07813	1,665	0,7472	0,6120
Ferrite 12	0,05236	0,9899	47,46	0,03833	0,007705	0,2441	0,8630	0,1171	2,215	0,8343	0,7008
Ferrite 13	0,04897	0,9916	33,55	0,1284	0,0005037	1,389	0,1648	0,6135	0,6681	0,6819	0,7619

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατάταξης, τόσο για κάθε metric ξεχωριστά όσο και συνολικά. Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση παρατηρείται ότι η θέση κατάταξης κάθε φερρίτη διαφέρει ανάλογα με το κριτήριο, γεγονός που υποδεικνύει και πάλι πως δεν υπάρχει μία απόλυτα κυρίαρχη περίπτωση. Καλύτερη προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης έχει η περίπτωση Ferrite 9, η οποία κατατάσσεται και πρώτη, δηλαδή ο φερρίτης 0461164951 στη θέση position 3 (GND).

Η περίπτωση χωρίς άνθρωπο κατατάσσεται έβδομη, υποδεικνύοντας ότι είναι μία ενδιάμεση κατάταξη σε σχέση με τους φερρίτες.

Πίνακας 4.8: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διάταξη δοκιμών DITO

Metallic Box Dito												
Περίπτωση	Ranking											
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I _{max} (A)	Dev t _{rise} (ns)	Dev I _{p2} (A)	Dev I ₃₀ (A)	Dev I ₆₀ (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 -200MHz (%)	Dev spectrum 0.2 -1GHz (%)	Final Ranking
Ferrite 1	13	13	9	11	10	1	12	3	10	13	13	11
Ferrite 2	7	7	8	4	11	6	9	2	12	6	6	5
Ferrite 3	12	12	10	1	7	12	13	12	13	12	10	13
Ferrite 4	8	8	7	13	3	2	7	4	8	11	12	6
Ferrite 5	3	4	4	8	9	4	3	5	9	3	2	2
Ferrite 6	5	6	6	7	13	11	10	11	11	4	4	10
Ferrite 7	4	3	3	12	12	10	5	10	5	2	1	4
Ferrite 8	2	1	2	10	6	7	2	8	7	5	6	3
Ferrite 9	1	2	1	3	1	3	4	1	6	1	3	1
Ferrite 10	11	11	11	9	8	9	6	9	2	9	9	12
Ferrite 11	9	10	13	5	4	8	8	6	3	8	7	8
Ferrite 12	10	9	12	2	5	5	11	7	4	10	8	9
Ferrite 13	6	5	5	6	2	13	1	13	1	7	11	7

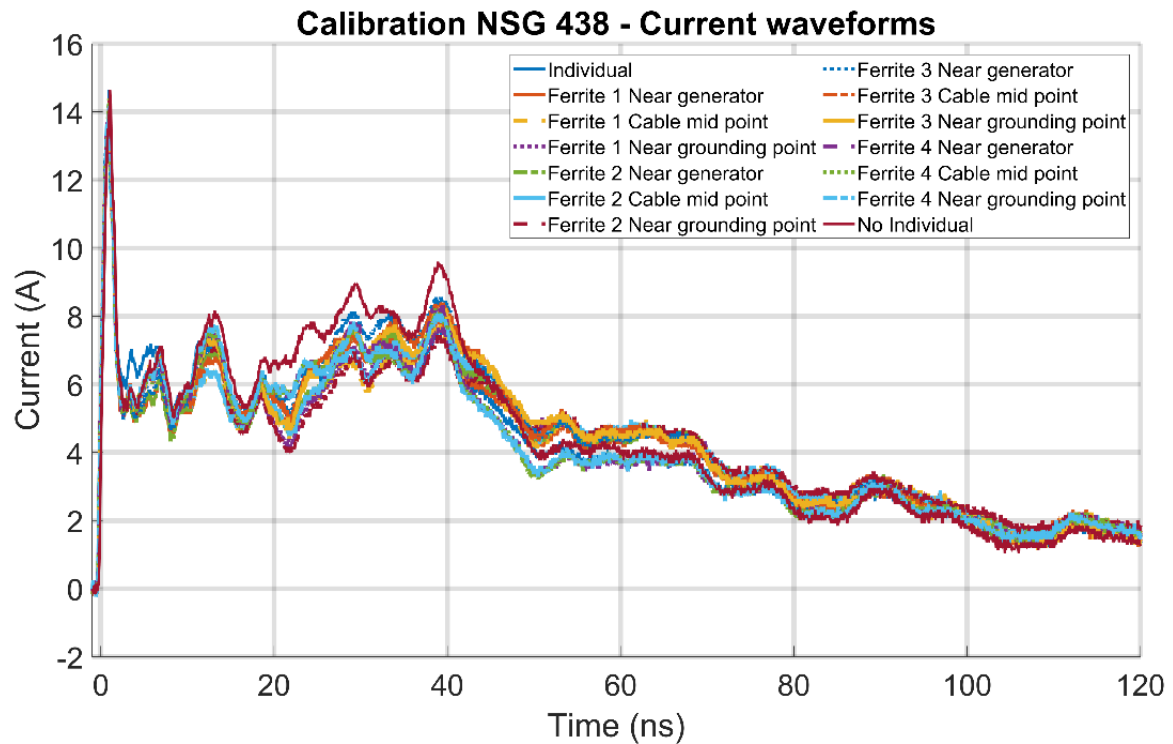
Ειδικότερα, παρατηρώντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα, φαίνεται και πάλι, όπως και στην περίπτωση της διακρίβωσης, πως οι φερρίτες ανάλογα με το κριτήριο κατατάσσονται σε διαφορετική θέση, χωρίς όμως να παρατηρείται τόσο μεγάλη διασπορά στις θέσεις για τις περισσότερες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των δοκιμών τη συνολικά πρώτη θέση καταλαμβάνει η περίπτωση Ferrite 9, η οποία στα περισσότερα επιμέρους ranking βρίσκεται από τη θέση 1 (RMSE, DTW, deviation t_{rise}, deviation I₆₀, deviation spectral energy 1MHz – 200MHz) έως και τη θέση 3 (θέση 2: cross-correlation, θέση 3: deviation I_{max}, deviation I_{p2}, deviation spectral energy 200MHz – 1GHz), ενώ μόνο στο deviation of total energy κατατάσσεται στην έκτη θέση. Αντίθετα, ο Ferrite 8 που κατατάχθηκε πρώτος στη διακρίβωση, στις επιμέρους κατατάξεις λαμβάνει από την πρώτη θέση (σε λιγότερες

περιπτώσεις: deviation I_{P2} , deviation spectral energy 1MHz – 200MHz) έως και την τελευταία (deviation t_{rise}). Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπως αυτή χωρίς άνθρωπο (Ferrite 13), που καταλαμβάνει στις επιμέρους κατατάξεις μεγάλο εύρος θέσεων (από πρώτη έως δέκατη τρίτη), με αποτέλεσμα να κατατάσσεται συνολικά έβδομη. Σε γενικές γραμμές, κάθε περίπτωση φαίνεται να καταλαμβάνει συγκεκριμένο εύρος θέσεων, όπως για παράδειγμα ο Ferrite 1, που στα περισσότερα metrics κατατάσσεται από τη δέκατη έως τη δέκατη τρίτη θέση (RMSE, cross-correlation, deviation I_{max} , deviation t_{rise} , deviation I_{30} , deviation total energy, deviation spectral energy 1MHz – 200MHz, deviation spectral energy 200MHz – 1GHz), ενώ μόνο στην απόκλιση του I_{P2} εμφανίζει καλή επίδοση.

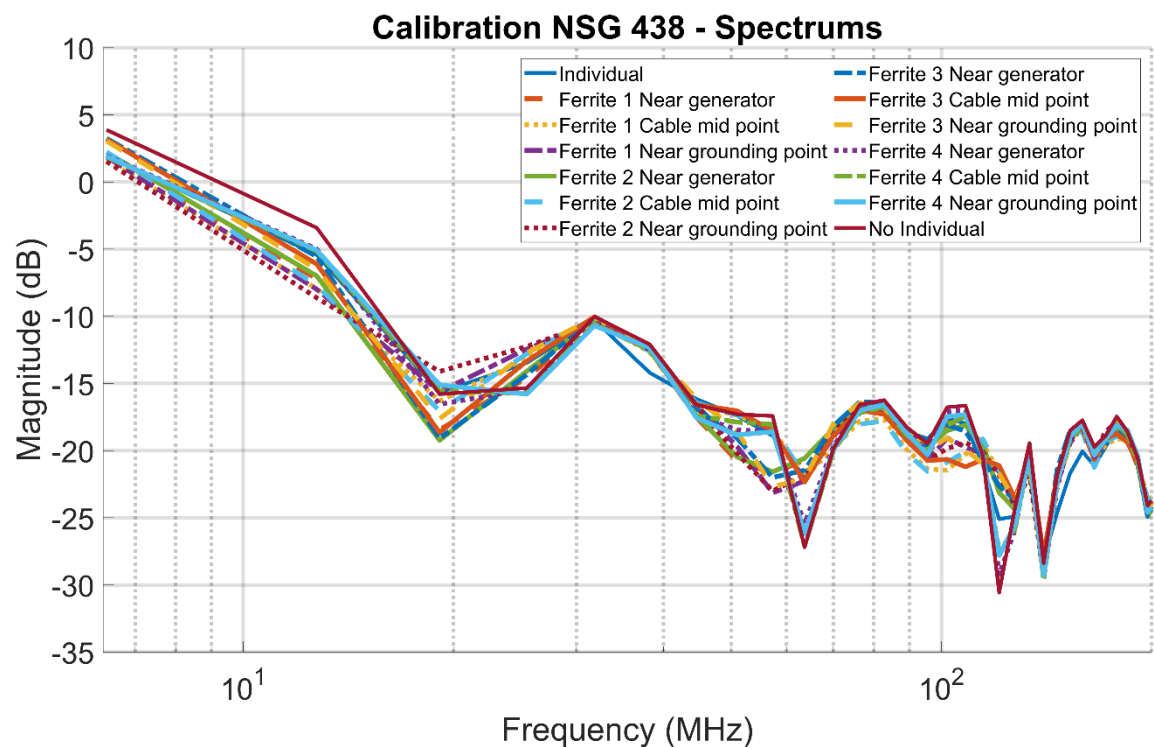
Αξιοσημείωτο είναι πως και στην περίπτωση των δοκιμών, όπως και στη διακρίβωση, ο καλύτερος φερρίτης είναι ο 0461164951, ο οποίος για τις θέσεις 3, 2, 1 καταλαμβάνει στη συνολική κατάταξη τις θέσεις ένα, τρία και τέσσερα αντίστοιχα. Στην περίπτωση των δοκιμών, τη δεύτερη καλύτερη θέση έχει ο φερρίτης 0444164951 στη θέση 2, ο οποίος ανά κριτήριο καταλαμβάνει κυρίως την τρίτη (RMSE, deviation I_{30} , deviation spectral energy 1MHz – 200MHz) και την τέταρτη θέση (cross-correlation, DTW, deviation I_{P2}), ενώ παρουσιάζει και χειρότερα αποτελέσματα, όπως την ένατη θέση στο deviation t_{rise} και την deviation total energy, κατατάσσεται όμως συνολικά δεύτερος. Το παραπάνω αναδεικνύει τη σημασία της πολυπαραμετρικής ανάλυσης και της χρήσης σταθμισμένων βαρών.

Ομοίως με τη διακρίβωση, η διακύμανση της κατάταξης μεταξύ των φερριτών της ίδιας οικογένειας δείχνει πως και η θέση τοποθέτησης επηρεάζει τη συμπεριφορά τους. Για παράδειγμα, ο φερρίτης 0444164951 (Ferrite 4–6) καταλαμβάνει από τη δεύτερη θέση με το position 2 (MID) έως τη δέκατη θέση με το position 3 (GND). Αντίστοιχα, ο φερρίτης 0432164951 κυμαίνεται από την πέμπτη θέση με position 2 έως τη δέκατη τρίτη με position 3. Τέλος, δεν φαίνεται να προκύπτει κάποια σταθερή κατάταξη ως προς τη θέση τοποθέτησης, αν και η θέση MID για κάθε φερρίτη εμφανίζει γενικά καλύτερη απόδοση.

4.4.3 Διάταξη διακρίβωσης NSG 438



Σχήμα 4.17: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο - διακρίβωση NSG 438



Σχήμα 4.18: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο - διακρίβωση NSG 438

Στα Σχήματα 4.17 και 4.18 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ESD και φάσματα αυτών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις, καθώς και η περίπτωση με ανθρώπινο χειριστή (κυματομορφή αναφοράς), ώστε να μπορεί να γίνει μία πρώτη οπτική σύγκριση.

Από το Σχήμα 4.17 με μία αρχική οπτική επισκόπηση, οι αποκλίσεις μεταξύ ανθρώπου και χωρίς άνθρωπο για τη γεννήτρια αυτή, όπως διαπιστώθηκε και στο Κεφάλαιο 3, είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση του DITO. Μάλιστα, για το διάστημα 7ns – 40ns η κυματομορφή χωρίς άνθρωπο βρίσκεται ψηλότερα από όλες τις υπόλοιπες, κάτι που υποδεικνύει πως οι φερρίτες, σε αυτό το χρονικό παράθυρο τουλάχιστον, έχουν παρόμοια επίδραση με αυτή του ανθρώπου.

Ειδικότερα, ομοίως και με τις προηγούμενες περιπτώσεις, έτσι σε αυτήν, ούτε ο άνθρωπος ούτε οι φερρίτες δεν επιδρούν ουσιαστικά στο πρώτο peak της κυματομορφής, ενώ απεναντίας στο χρονικό διάστημα 2ns – 6ns, όπου ο άνθρωπος προκαλεί μία ανύψωση της κυματομορφής, δεν φαίνεται κάποιος φερρίτης να μπορεί να προσομοιώσει αυτή την επίδραση. Στο διάστημα 10ns – 40ns, η κυματομορφή χωρίς άνθρωπο είναι φανερά ψηλότερα από τις υπόλοιπες, γεγονός που υποδεικνύει την παρόμοια επίδραση των φερριτών με αυτή που προκαλεί η ανθρώπινη παρουσία. Ωστόσο, σε κάθε διάστημα διαφορετικός φερρίτης σχεδόν ταυτίζεται με την ανθρώπινη κυματομορφή, οπότε δεν είναι σαφές από οπτική μόνο παρατήρηση αν κάποιος έχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Συνεχίζοντας χρονικά, στο τμήμα 40ns – 80ns, η ανθρώπινη παρουσία μειώνει την κυματομορφή σε σχέση με την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο και παρατηρείται ότι και ο φερρίτης 0475181651 και στις τρεις δοκιμαζόμενες θέσεις (GEN, MID, GND) ασκεί πολύ παρόμοια επίδραση. Στο υπόλοιπο τμήμα της κυματομορφής, ήδη η κυματομορφή με άνθρωπο και αυτή χωρίς έχουν πολύ μικρές διαφορές, ωστόσο παρατηρείται πως η πρώτη είναι ελάχιστα ανεβασμένη σε σχέση με τη δεύτερη, κάτι που συμβαίνει και με όλους σχεδόν τους φερρίτες, αλλά ωστόσο παρατηρείται πως πολύ καλή προσαρμογή έχει και πάλι ο φερρίτης 0475181651. Συνολικά, λοιπόν, γίνεται σαφές ότι οι φερρίτες σε μεγάλο τμήμα της κυματομορφής προσεγγίζουν την ανθρώπινη επίδραση φέρουν την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο πιο κοντά σε εκείνη με ανθρώπινη παρουσία.

Στο φάσμα παρατηρείται μία παρόμοια συμπεριφορά. Για συχνότητες 1MHz – 20MHz, όπως ο άνθρωπος, έτσι και όλοι οι φερρίτες εξασθενούν το σήμα, με τον φερρίτη 0475181651 σε όλες τις θέσεις, να ταυτίζεται σχεδόν με την ανθρώπινη κυματομορφή.

Για το διάστημα 20MHz – 30MHz πιο κοντά στην ανθρώπινη κυματομορφή είναι οι φερρίτες 0431164951 στη θέση MID, ο 0444164951 στις θέσεις MID και GND και ο 0461164951 στη θέση MID. Συνεχίζοντας στο εύρος 30MHz – 40MHz, ο άνθρωπος εξασθενεί το σήμα, ενώ οι φερρίτες το επηρεάζουν ελάχιστα, ενώ στο εύρος 40MHz – 60MHz, φαίνεται όλοι οι φερρίτες στη θέση MID να πλησιάζουν αρκετά μορφολογικά το φάσμα της κυματομορφής αναφοράς. Για τις επόμενες συχνότητες μέχρι και τα 115MHz και πάλι αρκετά κοντά στην ανθρώπινη κυματομορφή είναι ο φερρίτης 0475181651 σε όλες τις θέσεις. Το ίδιο δεν ισχύει για το εύρος 115MHz – 130MHz, όπου ο άνθρωπος ενισχύει αρκετά την κυματομορφή σε σχέση με αυτή με χωρίς άνθρωπο, και ενώ ναι μεν όλοι οι φερρίτες κάνουν επίσης ενίσχυση, ο 0475181651 κάνει τη λιγότερη και μάλιστα λιγότερη από αυτή που κάνει ο άνθρωπος, ενώ όλοι υπόλοιποι κάνουν μεγαλύτερη ενίσχυση από αυτή του ανθρώπου. Παρατηρείται ακόμα ότι για 140MHz – 160MHz ο άνθρωπος κάνει μία εξασθένηση, που οι φερρίτες δεν κάνουν. Για τις εναπομείναντες συχνότητες οι φερρίτες προσομοιάζουν αρκετά την ανθρώπινη συμπεριφορά με μικροαποκλίσεις. Συνολικά, λοιπόν, φαίνεται ο άνθρωπος στην περίπτωση διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438 να προσομοιώνουν αρκετά καλά την ανθρώπινη παρουσία.

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές κυματομορφών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις και για την κυματομορφή αναφοράς, όπου μπορεί να γίνει μία εκτίμηση της απόκλισης για κάθε παράμετρο και για κάθε περίπτωση ξεχωριστά σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς. Κάνοντας μία σύγκριση, οι φερρίτες για τις πρώτες δύο παραμέτρους που αφορούν στο πρώτο μέγιστο (I_{max} , t_{rise}) έχουν αρκετά κοντινές τιμές τόσο μεταξύ τους όσο και με την κυματομορφή αναφοράς, με τις τιμές που εξήχθησαν από τις κυματομορφές αναφοράς και με φερρίτες να είναι ελαφρώς μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες χωρίς άνθρωπο. Ενώ αντίθετα για τις παραμέτρους του δεύτερου μέρους της κυματομορφής (I_{p2} , I_{30} , I_{60}) υπάρχουν αισθητές αποκλίσεις τόσο μεταξύ των φερριτών, όσο και με την κυματομορφή αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για τις παραμέτρους I_{p2} και I_{30} , τόσο οι φερρίτες όσο και ο άνθρωπος επιδρούν καθοδικά στην κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, με τη μέγιστη απόκλιση μεταξύ φερριτών και ανθρώπου να είναι 13,95% για την παράμετρο I_{p2} και 28,23% για την παράμετρο I_{30} . Ωστόσο, οι αντίστοιχες ελάχιστες αποκλίσεις είναι 1,05% και 0,22%, τιμές που αποτελούν μία πρώτη ένδειξη πως πράγματι οι φερρίτες μπορούν να προσομοιώσουν την ανθρώπινη επίδραση στην κυματομορφή.

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές των έντεκα metrics, βάσει των οποίων πραγματοποιείται η διαδικασία κατάταξης. Γενικά, ισχύει ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή ενός metric, τόσο καλύτερα προσομοιώνεται η ανθρώπινη παρουσία από την αντίστοιχη περίπτωση. Εξάιρεση αποτελεί το cross-correlation, όπου η καλή προσαρμογή της εκάστοτε κυματομορφής στην κυματομορφή αναφοράς υποδεικνύεται από υψηλή τιμή διασυσχέτισης.

Πίνακας 4.9: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διακρίβωση NSG 438

Calibration NSG 438								
Περίπτωση	$I_{\max}(A)$	$t_{\text{rise}}(ns)$	$I_{P2}(A)$	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$	Total Energy (nC)	Φάσμα 1MHz - 200MHz (%)	Φάσμα 200MHz -1GHz (%)
Ferrite 1	14,34	0,8777	8,016	7,235	4,470	567,6	90,85	9,15
Ferrite 2	14,22	0,8544	7,744	6,407	4,642	565	90,58	9,42
Ferrite 3	14,14	0,8586	7,648	6,803	4,449	564,3	91,03	8,97
Ferrite 4	14,26	0,8592	8,208	7,333	4,420	566,7	91,17	8,83
Ferrite 5	14,21	0,8650	8,064	6,675	4,724	568,8	91,26	8,74
Ferrite 6	14,19	0,8522	7,424	6,528	4,564	568,3	90,40	9,6
Ferrite 7	14,16	0,8487	8,624	7,874	4,422	566,3	92,66	7,34
Ferrite 8	14,26	0,8785	8,464	7,335	4,718	566,8	92,50	7,5
Ferrite 9	14,27	0,8492	8,384	7,520	4,573	571,4	92,38	7,62
Ferrite 10	14,16	0,8568	8,352	7,624	3,692	546,3	91,55	8,45
Ferrite 11	14,34	0,8696	8,240	7,420	3,830	546,9	91,37	8,63
Ferrite 12	14,19	0,8512	8,080	7,430	3,840	547,1	91,48	8,52
Ferrite 13	14,54	0,9099	9,504	8,748	4,137	567,4	93,73	6,27
Reference	14,42	0,8708	7,568	7,205	3,684	552,2	91,27	8,73

Ήδη από τις τιμές του Πίνακα 4.10 και με βάση το παραπάνω σχόλιο, είναι εμφανές ότι για κάθε κριτήριο υπάρχει και διαφορετικός φερρίτης με την καλύτερη τιμή, όπως και στις προηγούμενες εξεταζόμενες περιπτώσεις (διάταξη διακρίβωσης και διάταξη

δοκιμών του DITO), ωστόσο τις καλύτερες τιμές φαίνεται ποσοτικά να συγκεντρώνει με διαφορά ο φερρίτης 0475181651.

Πίνακας 4.10: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διακρίβωση NSG 438

Calibration NSG 438											
Περίπτωση	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_{max} (A)	Dev t_{rise} (ns)	Dev I_{p2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 - 200MHz (%)	Dev spectrum 0.2 -1GHz (%)
Ferrite 1	0,03341	0,9938	29,00	0,080	0,006853	0,448	0,02954	0,7861	15,42	0,4136	0,4203
Ferrite 2	0,03483	0,9932	26,72	0,192	0,01645	0,176	0,7980	0,9582	12,79	0,6821	0,6595
Ferrite 3	0,03428	0,9938	23,79	0,272	0,01222	0,080	0,4024	0,7660	12,06	0,2369	0,2449
Ferrite 4	0,03537	0,9934	29,69	0,160	0,01167	0,640	0,1278	0,7360	14,49	0,09166	0,1105
Ferrite 5	0,03780	0,9927	25,48	0,208	0,005811	0,496	0,5296	1,040	16,60	0,004663	0,002337
Ferrite 6	0,03868	0,9917	25,71	0,224	0,01862	0,144	0,6773	0,8804	16,11	0,8653	0,8599
Ferrite 7	0,04048	0,9935	33,18	0,256	0,02209	1,056	0,6692	0,7388	14,12	1,392	1,335
Ferrite 8	0,03911	0,9935	28,35	0,160	0,007626	0,896	0,1302	1,034	14,59	1,235	1,208
Ferrite 9	0,03866	0,9939	27,52	0,144	0,02163	0,816	0,3153	0,8894	19,18	1,116	1,075
Ferrite 10	0,02056	0,9978	21,18	0,256	0,01401	0,784	0,4186	0,008497	5,896	0,2798	0,2420
Ferrite 11	0,01798	0,9981	19,06	0,080	0,001181	0,672	0,2153	0,1468	5,303	0,1031	0,07276
Ferrite 12	0,01820	0,9983	19,36	0,224	0,01966	0,512	0,2252	0,1561	5,098	0,2107	0,1778
Ferrite 13	0,04197	0,9932	36,43	0,128	0,03908	1,936	1,543	0,4331	15,23	2,467	2,381

Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατάταξης, τόσο για κάθε metric ξεχωριστά όσο και συνολικά. Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι η θέση κατάταξης κάθε φερρίτη διαφέρει ανάλογα με το κριτήριο, γεγονός που υποδεικνύει και πάλι πως δεν υπάρχει μία απόλυτα κυρίαρχη περίπτωση. Ωστόσο, με ελάχιστες εξαιρέσεις, κάθε φερρίτης, στις επιμέρους κατατάξεις, τείνει να καταλαμβάνει ένα συγκεκριμένο και σχετικά στενό εύρος θέσεων, δηλαδή οι θέσεις κυμαίνονται γύρω από έναν μέσο βαθμό απόδοσης χωρίς έντονες διακυμάνσεις, σε αντίθεση με τις δύο περιπτώσεις της γεννήτριας DITO, όπου η κάθε περίπτωση φερρίτη μπορεί να βαθμολογούνταν στα επιμέρους ranking από την πρώτη έως τη δέκατη τρίτη θέση. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η απόδοση κάθε φερρίτη είναι συνεπής ως προς τα διαφορετικά κριτήρια αξιολόγησης και ενισχύει τη συνοχή των αποτελεσμάτων της

κατάταξης. Καλύτερη προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης έχει η περίπτωση Ferrite 11, η οποία κατατάσσεται και πρώτη, δηλαδή ο φερρίτης 0475181651 στη θέση position 2 (MID). Η περίπτωση χωρίς άνθρωπο κατατάσσεται τελευταία, υποδεικνύοντας ξεκάθαρα ότι η χρήση φερρίτη προσομοιώνει την ανθρώπινη επίδραση και αποτελεί μία μέθοδο για την αντικατάσταση αυτής με αναπαραγώγιμο και επαναλήψιμο τρόπο.

Πίνακας 4.11: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διακρίβωση NSG 438

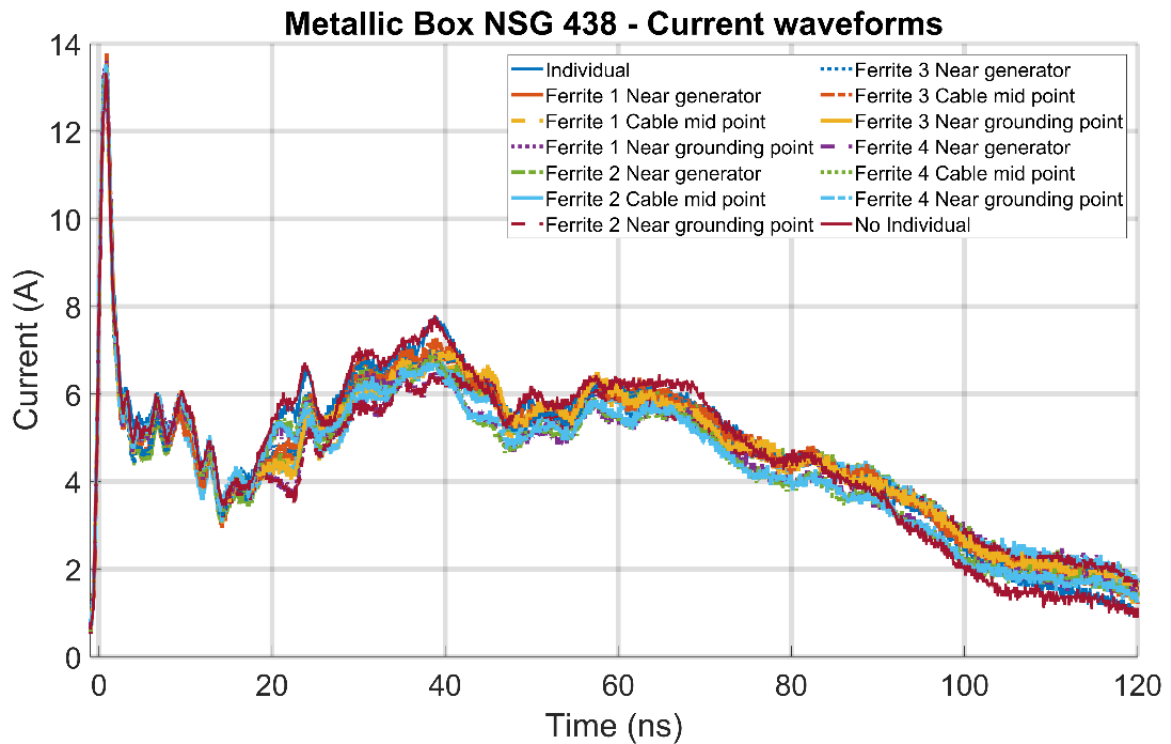
Calibration NSG 438												
Περίπτωση	Ranking											
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev $I_{\max}$ (A)	Dev t_{rise} (ns)	Dev I_{P2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)	Final Ranking
Ferrite 1	4	5	10	2	3	4	1	8	10	7	7	5
Ferrite 2	6	10	7	7	8	3	12	11	5	8	8	8
Ferrite 3	5	6	4	13	6	1	7	7	4	5	6	4
Ferrite 4	7	9	11	5,5	5	7	2	5	7	2	3	6
Ferrite 5	8	12	5	8	2	5	9	13	12	1	1	7
Ferrite 6	10	13	6	10	9	2	11	9	11	9	9	10
Ferrite 7	12	7	12	11	12	12	10	6	6	12	12	12
Ferrite 8	11	8	9	5,5	4	11	3	12	8	11	11	11
Ferrite 9	9	4	8	4	11	10	6	10	13	10	10	9
Ferrite 10	3	3	3	12	7	9	8	1	3	6	5	3
Ferrite 11	1	2	1	1	1	8	4	2	2	3	2	1
Ferrite 12	2	1	2	9	10	6	5	3	1	4	4	2
Ferrite 13	13	11	13	3	13	13	13	4	9	13	13	13

Ειδικότερα, για την περίπτωση της διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438, καλύτερη θέση λαμβάνει ο φερρίτης 0475181651 στη θέση position 2 (MID). Μάλιστα, σε όλες τις επιμέρους κατατάξεις καταλαμβάνει τις θέσεις 1-3, εκτός της κατάταξης αναφορικά με την απόκλιση του I_{P2} , όπου καταλαμβάνει την όγδοη θέση. Γενικότερα, ο φερρίτης 0475188881 για τις τρεις θέσεις, καταλαμβάνει την πρώτη τριάδα στις επιμέρους κατατάξεις για τα metrics RMSE, cross-correlation, DTW, deviation των I_{60} και της ολικής ενέργειας. Για τα κριτήρια της απόκλισης του χρόνου ανόδου και της φασματικής ενέργειας, ενώ ο ίδιος φερρίτης στη θέση MID φαίνεται να έχει αρκετά

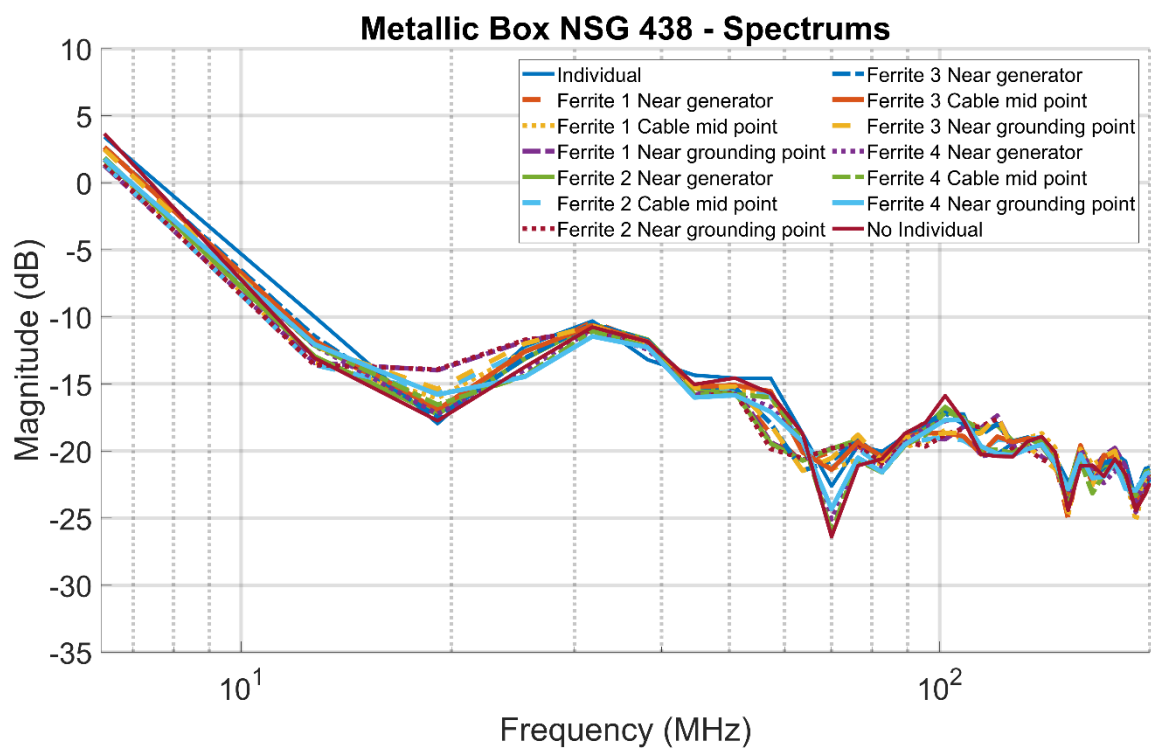
καλά αποτελέσματα (θέσεις 1,2 και 3 στις επιμέρους κατατάξεις), στις άλλες δύο θέσεις (GEN, GND) έχει μέτρια έως κακή απόδοση αφού βαθμολογείται στις θέσεις 4 έως και 10, γεγονός που αποδεικνύει και πάλι πως δεν υπάρχει φερρίτης που να έχει τα τέλεια αποτελέσματα για όλα τα κριτήρια. Όπως προαναφέρθηκε, η περίπτωση χωρίς άνθρωπο (Ferrite 13) κατατάσσεται τελευταία, συνεπώς οποιοσδήποτε φερρίτης προσομοιάζει έστω και ελάχιστα την ανθρώπινη επίδραση και έχει νόημα η χρήση του.

Όπως και στις δύο προηγούμενες για τη γεννήτρια DITO, έτσι και στην περίπτωση της γεννήτριας φαίνεται η θέση τοποθέτηση του φερρίτη να επηρεάζει την επίδραση που αυτός έχει και το βαθμό στον οποίο προσομοιώνει την ανθρώπινη παρουσία, αφού παρατηρείται διακύμανση της κατάταξης μεταξύ των φερριτών της ίδιας οικογένειας. Για παράδειγμα, ο φερρίτης 0431164951 (Ferrite 1 – 3) καταλαμβάνει από της τέταρτη θέση με το position GND έως την όγδοη θέση με το position MID, ενώ δεν φαίνεται κάποια θέση να έχει σταθερά καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις υπόλοιπες για τους 4 φερρίτες.

4.4.4 Διάταξη δοκιμών NSG 438



Σχήμα 4.19: Σύγκριση κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών NSG 438



Σχήμα 4.20: Σύγκριση φασμάτων των κυματομορφών ESD με φερρίτες, χωρίς άνθρωπο, με άνθρωπο – διάταξη δοκιμών NSG 438

Στα Σχήματα 4.19 και 4.20 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ESD και τα φάσματά τους για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις, καθώς και η περίπτωση με ανθρώπινο χειριστή (κυματομορφή αναφοράς), ώστε να είναι δυνατή μια πρώτη οπτική σύγκριση. Από το Σχήμα 4.19 με μία αρχική οπτική επισκόπηση, οι αποκλίσεις μεταξύ ανθρώπου και χωρίς άνθρωπο για τη γεννήτρια αυτή, όπως διαπιστώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση του DITO. Μάλιστα, σε κάποια χρονικά διαστήματα, όπως για παράδειγμα στο 20ns - 45ns, η κυματομορφή αναφοράς με άνθρωπο είναι πολύ παρόμοια με την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, κάτι που υποδεικνύει πως ο άνθρωπος δεν ασκεί μεγάλη επίδραση στην κυματομορφή ESD και ενδεχομένως η χρήση φερριτών να μην είναι αναγκαία.

Ειδικότερα, όπως διαπιστώθηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις, ούτε ο άνθρωπος ούτε οι φερρίτες δεν επιδρούν ουσιαστικά στο πρώτο peak της κυματομορφής. Η ανύψωση από τον άνθρωπο που παρατηρούνταν προηγουμένως στο χρονικό διάστημα 2ns – 6ns, υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση αλλά αισθητά μειωμένη. Οι φερρίτες στο διάστημα αυτό δεν κάνουν ανύψωση, αλλά απεναντίας υποβίβαση στην κυματομορφή, η οποία όμως είναι πολύ μικρή. Μάλιστα, η μέγιστη διαφορά της ανυψωμένης κυματομορφής αναφοράς με την ελάχιστη κυματομορφή με φερρίτη, δεν ξεπερνάει τα 0,9A. Στο διάστημα 10ns – 20ns, όλες οι κυματομορφές (των δεκατριών περιπτώσεων και της κυματομορφής αναφοράς) κυμαίνονται με παρόμοιο τρόπο, χωρίς να παρουσιάζονται εμφανείς αποκλίσεις. Συνεχίζοντας χρονικά, στο διάστημα 20ns - 45ns, όπως επισημάνθηκε και νωρίτερα, η κυματομορφή αναφοράς ταυτίζεται σχεδόν με την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, ενώ οι φερρίτες κάνουν υποβίβαση της κυματομορφής, σε διαφορετικό, όμως, βαθμό ο καθένας. Στο χρονικό παράθυρο 45ns – 90ns, οι δεκατέσσερις κυματομορφές έχουν παρόμοια μορφή και τιμές και δεν μπορεί να προσδιοριστεί σαφώς αν κάποιος φερρίτης προσομοιώνει καλά την επίδραση του ανθρώπου. Στο υπόλοιπο της ουράς, τόσο οι φερρίτες όσο και ο άνθρωπος ανυψώνουν την κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο. Ωστόσο οι φερρίτες επιφέρουν ανύψωση σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τον άνθρωπο, ενώ δεν καθίσταται εμφανές αν κάποιος φερρίτης έχει καλύτερα αποτελέσματα.

Στο φάσμα οι παρατηρήσεις προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό εκείνες της περίπτωσης δοκιμών της γεννήτριας DITO. Για συχνότητες 1MHz – 15MHz, ο άνθρωπος προκαλεί μία μικρή ενίσχυση του σήματος, ενώ οι φερρίτες δεν έχουν σταθερή συμπεριφορά. Για συχνότητες πριν τα 8 MHz, οι φερρίτες προκαλούν εξασθένηση του σήματος, ενώ

μετά τα 8MHz, ο 0461164951 σε όλες τις θέσεις επιφέρει μία μικρή ενίσχυση (μικρότερη από την αντίστοιχη του ανθρώπου). Από τα 15MHz – 40MHz, οι κυματομορφές των δεκατριών περιπτώσεων και της αναφοράς έχουν παρόμοια μορφή, με ορατές διακυμάνσεις ανά διαστήματα, ενώ για συχνότητες 15MHz – 25MHz, κανένας φερρίτης δεν προσομοιώνει ικανοποιητικά την ανθρώπινη επίδραση. Για 40MHz – 70MHz, η κυματομορφή αναφοράς εμφανίζει σαφώς ομαλότερη και πιο ευθύγραμμη μεταβολή, χωρίς έντονες διακυμάνσεις, σε αντίθεση με τις υπόλοιπα φάσματα, που δεν έχουν τόσο αιχμηρή πτώση και μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Για τις υπόλοιπες απεικονιζόμενες συχνότητες, τα φάσματα έχουν παρόμοια μορφή, αλλά παρουσιάζουν και διακυμάνσεις, χωρίς να είναι οπτικά κατανοητό αν κάποιος φερρίτης προσομοιώνει τον άνθρωπο σε κάποιο εύρος συχνοτήτων.

Πίνακας 4.12: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών NSG 438

Metallic Box NSG 438								
Περίπτωση	I_{max}(A)	t_{rise}(ns)	I_{P2}(A)	I₃₀(A)	I₆₀(A)	Total Energy (nC)	Φάσμα 1MHz - 200MHz (%)	Φάσμα 200MHz -1GHz (%)
Ferrite 1	13,49	1,071	7,072	6,405	6,136	603,9	93,04	6,99
Ferrite 2	13,54	1,095	6,904	5,894	5,967	600,2	92,35	7,65
Ferrite 3	13,53	1,097	6,520	5,708	5,991	600,7	91,86	8,14
Ferrite 4	13,41	1,078	6,850	6,125	5,984	602,5	92,49	7,51
Ferrite 5	13,47	1,057	6,794	5,638	5,882	601,3	91,92	8,08
Ferrite 6	13,29	1,081	6,500	5,575	5,968	593,7	92,10	7,90
Ferrite 7	13,41	1,105	7,132	6,344	6,202	601,1	93,50	6,50
Ferrite 8	13,36	1,109	7,282	6,103	6,072	599,1	93,57	6,43
Ferrite 9	13,32	1,093	6,997	5,966	6,100	596,8	93,46	6,54
Ferrite 10	13,43	1,084	6,987	6,016	5,495	578,3	92,37	6,63
Ferrite 11	13,33	1,133	6,952	5,916	5,548	576,5	92,31	6,69
Ferrite 12	13,43	1,096	6,862	5,982	5,576	579,3	92,16	6,84
Ferrite 13	13,25	1,058	7,812	6,775	6,165	601,6	94,34	5,66
Reference	13,70	1,053	7,732	6,522	6,001	600,1	94,30	5,700

Στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές κυματομορφών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις και για την κυματομορφή αναφοράς. Κάνοντας μία σύγκριση, οι φερρίτες για τις πρώτες δύο παραμέτρους που αφορούν στο πρώτο μέγιστο (I_{max} , t_{rise}) έχουν αρκετά κοντινές τιμές τόσο μεταξύ τους όσο και με την κυματομορφή αναφοράς, με τις αποκλίσεις να μην ξεπρνάνε το 3,4% για το I_{max} και το 4,8% για το t_{rise} . Αντίθετα για τις παραμέτρους του δεύτερου μέρους της κυματομορφής (I_{P2} , I_{30} , I_{60}) υπάρχουν αισθητές αποκλίσεις τόσο μεταξύ των φερριτών, όσο και με την κυματομορφή αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για τις παραπάνω παραμέτρους τόσο οι φερρίτες όσο και ο άνθρωπος επιδρούν κυρίως καθοδικά στην κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, αποτελώντας μία ένδειξη πως τουλάχιστον σημειακά οι φερρίτες μπορούν να προσομοιώσουν την ανθρώπινη επίδραση στην κυματομορφή.

Πίνακας 4.13: Τιμές των metrics για κάθε περίπτωση – διάταξη δοκιμών NSG 438

Metallic Box NSG 438											
Περίπτωση	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_{max} (A)	Dev t_{rise} (ns)	Dev I_{P2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 - 200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 - 1GHz (%)
Ferrite 1	0,02656	0,9969	21,80	0,2074	0,01814	0,6602	0,1177	0,1350	3,817	1,258	1,151
Ferrite 2	0,03308	0,9953	25,32	0,1632	0,04215	0,8274	0,6281	0,03449	0,05829	1,951	1,810
Ferrite 3	0,04220	0,9923	34,02	0,1705	0,04367	1,212	0,8148	0,01020	0,6023	2,438	2,303
Ferrite 4	0,03459	0,9946	26,46	0,2901	0,0250	0,8814	0,3977	0,01703	2,438	1,807	1,675
Ferrite 5	0,03869	0,9934	28,00	0,2335	0,003514	0,9378	0,8840	0,1197	1,229	2,383	2,229
Ferrite 6	0,04011	0,9928	27,74	0,4140	0,02796	1,232	0,9476	0,03318	6,373	2,200	2,068
Ferrite 7	0,02286	0,9978	20,65	0,2947	0,05199	0,6001	0,1784	0,2008	1,038	0,7977	0,7135
Ferrite 8	0,02046	0,9981	17,74	0,3422	0,05561	0,4496	0,4198	0,0710	1,013	0,7298	0,6496
Ferrite 9	0,02606	0,9969	20,47	0,3852	0,03987	0,7344	0,5563	0,09926	3,331	0,8458	0,7771
Ferrite 10	0,03043	0,9969	35,72	0,2722	0,03123	0,7442	0,5062	0,5061	21,84	1,933	1,807
Ferrite 11	0,03163	0,9964	36,71	0,3732	0,07993	0,7794	0,6068	0,4527	23,62	1,992	1,859
Ferrite 12	0,03319	0,9962	38,04	0,2079	0,04333	0,8699	0,5406	0,4253	20,80	2,142	2,006
Ferrite 13	0,02204	0,9986	20,33	0,4529	0,005052	0,07996	0,2521	0,1639	1,500	0,04256	0,02586

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται οι τιμές των έντεκα metrics, βάσει των οποίων πραγματοποιείται η διαδικασία κατάταξης. Από τον πίνακα αυτόν, γίνεται ήδη εμφανές πως η περίπτωση χωρίς άνθρωπο (Ferrite 13) παρουσιάζει πολλές καλές τιμές στα διάφορα κριτήρια. Ακόμα, φαίνεται για ακόμα μία φορά, πως δεν υπάρχει φερρίτης που να επικρατεί απόλυτα συγκεντρώνοντας τις περισσότερες καλές τιμές, επισημαίνοντας την αξία της πολυπαραμετρικής ανάλυσης.

Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατάταξης, τόσο για κάθε metric ξεχωριστά όσο και συνολικά.

Πίνακας 4.14: Ranking των 13ων περιπτώσεων – διάταξη δοκιμών NSG 438

Metallic Box NSG 438												
Περίπτωση	Ranking											
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I _{max} (A)	Dev t _{rise} (ns)	Dev I _{P2} (A)	Dev I ₃₀ (A)	Dev I ₆₀ (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 1 - 200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)	Final Ranking
Ferrite 1	5	5	5	3	3	4	1	8	9	5	5	4
Ferrite 2	8	9	6	1	8	8	10	4	1	8	8	7
Ferrite 3	13	13	10	2	10	12	11	1	2	13	13	11
Ferrite 4	10	10	7	7	4	10	4	2	7	6	6	6
Ferrite 5	11	11	9	5	1	11	12	7	5	12	12	12
Ferrite 6	12	12	8	12	5	13	13	3	10	11	11	13
Ferrite 7	3	3	4	8	11	3	2	10	4	3	3	3
Ferrite 8	1	2	1	9	12	2	5	5	3	2	2	1
Ferrite 9	4	4	3	11	7	5	8	6	8	4	4	5
Ferrite 10	6	6	11	6	6	6	6	13	12	7	7	8
Ferrite 11	7	7	12	10	13	7	9	12	13	9	9	10
Ferrite 12	9	8	13	4	9	9	7	11	11	10	10	9
Ferrite 13	2	1	2	13	2	1	3	9	6	1	1	2

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται εμφανές ότι οι φερρίτες δεν είναι αναγκαίοι, αφού ως δεύτερη καλύτερη περίπτωση προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης αναδεικνύεται η περίπτωση χωρίς άνθρωπο. Αν και ακούγεται αρχικά παράλογο, αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι ότι οι φερρίτες επιδρούν υπερβολικά στην κυματομορφή και την τροποποιούν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με την τροποποίηση που επιβάλλει ο άνθρωπος, οπότε τελικά η χρήση τους δυσχεραίνει την κατάσταση. Μάλιστα, το γεγονός αυτό, ότι δηλαδή οι κυματομορφές αναφοράς και χωρίς άνθρωπο συγκλίνουν, ενώ οι κυματομορφές με φερρίτες αποκλίνουν από την κυματομορφή αναφοράς, παρατηρήθηκε και κατά τον σχολιασμό του Σχήματος 4.19. Ακόμα, παρατηρώντας τις περιπτώσεις Ferrite 8 (πρώτη στη συνολική κατάταξη) και Ferrite 13 (δεύτερη στη συνολική κατάταξη) στον Πίνακα 4.13, δηλαδή τις τιμές στα επιμέρους metrics, συνδυαστικά με τα επιμέρους ranking στον Πίνακα 4.14, φαίνεται οι δύο περιπτώσεις σε κάποια κριτήρια, όπως τα RMSE, cross-correlation, deviation total energy να λαμβάνουν κοντινές θέσεις κατάταξης, έχοντας και κοντινές τιμές στα αντίστοιχα metrics, ενώ για άλλα κριτήρια, όπως τα DTW, deviation I_{p2} , I_{30} , I_{60} , spectral energy, ενώ έχουν παρόμοιες θέσεις στην κατάταξη, έχουν μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές των τιμές των metrics. Από το παραπάνω συμπεραίνεται πως η τελική θέση κατάταξης καθορίζεται από τη χρήση σταθμισμένων βαρών, ενώ εγείρεται ο προβληματισμός για το ποιο θα ήταν το αποτέλεσμα με χρήση διαφορετικών βαρών.

Στην περίπτωση δοκιμών με τη γεννήτρια NSG 438, παρ' ότι οι φερρίτες φαίνεται να μην επιδρούν ικανοποιητικά, παρατηρείται πως για κάθε οικογένεια φερριτών, η θέση position 1 (GND) καταλαμβάνει σχεδόν πάντα την καλύτερη θέση κατάταξης μεταξύ των τριών εξεταζόμενων θέσεων, αναδεικνύοντας πως η θέση επηρεάζει τη συμπεριφορά. Το επιχείρημα αυτό ενισχύεται από το γεγονός πως η κάθε οικογένεια φερριτών δεν καταλαμβάνει διαδοχικές θέσεις, αλλά θέσεις σε ένα μεγάλο εύρος (για παράδειγμα η οικογένεια Ferrite 1 – 3, καταλαμβάνει στην τελική κατάταξη τις θέσεις 4, 7 και 11). Αξιολογώντας τον Πίνακα 4.14, την καλύτερη προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης φαίνεται να επιτυγχάνει ο φερρίτης 0461164281 στη θέση position 2(MID), ενώ γενικά ο φερρίτης αυτός για όλες της θέσης τοποθέτησής του, ανέρχεται στις πρώτες θέσεις της τελικής κατάταξης, υποδεικνύοντας πως μάλλον είναι ο καταλληλότερος.

4.5 Συμπεράσματα

Το συμπέρασμα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων και την επεξεργασία αυτών, είναι πως οι φερρίτες δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης με αναπαραγωγίμο και επαναλήψιμο τρόπο, χωρίς όμως να υπάρχει κάποιος φερρίτης που να ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί καθολικά για όλες τις γεννήτριες και σε όλες τις καταστάσεις.

Ειδικότερα, και για τις τέσσερις περιπτώσεις την πρώτη θέση της τελικής κατάταξης καταλαμβάνει κάποιος από τους τέσσερις εξεταζόμενους φερρίτες σε κάποια από τις τρεις δοκιμαζόμενες θέσεις τοποθέτησής τους, γεγονός που υποδεικνύει πως πράγματι η χρήση φερρίτη αποτελεί μία λύση στο πρόβλημα της προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης. Αναλυτικότερα, για τις περιπτώσεις της διακρίβωσης και των δοκιμών με τη γεννήτρια DITO και των δοκιμών με τη γεννήτρια NSG 438 κρίθηκε ως καταλληλότερος ο φερρίτης με υλικό 61, ενώ για την περίπτωση διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438 κρίθηκε ως καταλληλότερος ο φερρίτης με υλικό 75.

4.5.1 Επίδραση των φερριτών στην κυματομορφή ESD

Αν και οι φερρίτες παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς την επίδρασή τους, ανάλογα με το υλικό και τη θέση τοποθέτησης (θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες), εμφανίζουν ωστόσο ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά ως προς τον τρόπο που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του ρεύματος στο καλώδιο. Ειδικότερα, όπως φάνηκε από την προηγούμενη ενότητα, οι φερρίτες:

- Δεν επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά του πρώτου peak, ούτε ως προς τη μέγιστη τιμή ρεύματος, ούτε ως προς το χρόνο ανόδου. Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται, είτε θετικές, είτε αρνητικές, είναι πολύ μικρές και θεωρούνται αμελητέες και εμπεριέχονται στα όρια της πειραματικής αβεβαιότητας.
- Επηρεάζουν αισθητά το μέγιστο ρεύμα στο χρονικό διάστημα 10–40 ns, δηλαδή την παράμετρο I_{p2} . Και οι τέσσερις φερρίτες, ανεξαρτήτως θέσης τοποθέτησης, επιφέρουν μείωση της τιμής αυτής (σε σχέση με την τιμή χωρίς άνθρωπο και χωρίς φερρίτες) - επίδραση παρόμοια με εκείνη που προκαλεί η ανθρώπινη παρουσία. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι φερρίτες περιορίζουν παρασιτικά φαινόμενα που οφείλονται κυρίως σε παρασιτικές χωρητικότητες, οι οποίες επηρεάζουν ιδιαίτερα το δεύτερο τμήμα της

κυματομορφής. Το τμήμα αυτό διαρρέεται από το καλώδιο επιστροφής ρεύματος, σημείο στο οποίο τοποθετούνται και οι φερρίτες, εξηγώντας έτσι τη σημαντική τους επίδραση στην εν λόγω παράμετρο. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως στην περίπτωση διακρίβωσης της γεννήτριας DITO, η παράμετρος I_{P2} στην περίπτωση Ferrite 13 (δηλαδή χωρίς άνθρωπο και φερρίτη) είναι εκτός των ορίων του Προτύπου, ενώ με την χρήση φερρίτη ή την παρουσία ανθρώπου είναι εντός ορίων, αναδεικνύοντας τη διαφοροποίηση που μπορεί να εισάγει ο άνθρωπος αναφορικά με τη διεργαστηριακή μεταβλητότητα στα αποτελέσματα των δοκιμών και την αναγκαιότητα εύρεσης μία αναπαραγωγίσιμης μεθόδου επίλυσης του προβλήματος αυτού.

- Επιδρούν στην τιμή του ρεύματος στα 30ns και στα 60ns, δηλαδή στις παραμέτρους I_{30} και I_{60} . Ειδικότερα, τόσο ο άνθρωπος όσο και οι φερρίτες επιδρούν μειώνοντας τις τιμές των παραμέτρων αυτών. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της διακρίβωσης της γεννήτριας DITO, όπου φερρίτες και άνθρωπος επιδρούν αυξάνοντας την τιμή αυτή, κρατώντας της όμως εντός των προβλεπόμενων ορίων από το Πρότυπο.
- Επιδρούν έντονα στο φάσμα 20MHz – 40MHz, δηλαδή στο κομμάτι που αντιστοιχεί, βάσει της βιβλιογραφίας [40], στο δεύτερο κομμάτι της κυματομορφής.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι σε μεγάλο βαθμό οι φερρίτες προσομοιώνουν αποτελεσματικά την ανθρώπινη επίδραση αναφορικά με τις παραμέτρους που ορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ζήτημα που προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων είναι το γεγονός ότι η περίπτωση χωρίς άνθρωπο (Ferrite 13) δεν καταλαμβάνει σταθερά την τελευταία θέση στη συνολική κατάταξη.

Για να ερμηνευτεί αυτό, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητό με ποιόν τρόπο επιδρά ο άνθρωπος στην κυματομορφή ESD. Η ανθρώπινη παρουσία λειτουργεί σαν παθητικό φίλτρο στο κύκλωμα, αφού ο ανθρώπινος χειριστής εισάγει παρασιτικές χωρητικότητες και αυτεπαγωγές, οι οποίες καταστέλλουν συγκεκριμένα συχνοτικά φαινόμενα της κυματομορφής. Παρόμοια λειτουργία επιτελούν και οι φερρίτες, οι οποίοι μέσω μαγνητικής απώλειας καταστέλλουν ταχέως μεταβαλλόμενες συνιστώσες. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, η απόκριση των φερριτών υπερβαίνει το επιθυμητό επίπεδο καταστολής, με αποτέλεσμα η αλλοίωση της κυματομορφής να είναι μεγαλύτερη από

την αντίστοιχη που προκαλεί ο άνθρωπος. Έτσι, ενώ η χρήση φερρίτη στοχεύει στην προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης, ενδέχεται σε ορισμένα σημεία να απομακρύνει την κυματομορφή περισσότερο από την αναφορά, σε σχέση με την περίπτωση χωρίς φερρίτη. Αυτό εξηγεί γιατί η περίπτωση χωρίς άνθρωπο κατατάσσεται κάποιες φορές σε καλύτερη θέση από τους φερρίτες. Παράδειγμα των παραπάνω αποτελούν οι περιπτώσεις της διακρίβωσης με γεννήτρια DITO, όπου η περίπτωση χωρίς άνθρωπο καταλαμβάνει την τέταρτη θέση και των δοκιμών με τη γεννήτρια NSG 438, όπου η περίπτωση χωρίς άνθρωπο εμφανίζεται στη δεύτερη θέση της συνολικής κατάταξης.

Από τα παραπάνω λοιπόν, το συμπέρασμα είναι ότι οι φερρίτες πράγματι έχουν παρόμοια επίδραση με αυτή του ανθρώπου, ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα να υπερ-επιδρούν, καταλήγοντας σε μη επιθυμητά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό και η χρήση φερρίτη είναι ένα εξαρτώμενο από την εκάστοτε γεννήτρια ζήτημα και πρέπει να γίνεται ξεχωριστή μελέτη, ενδεχομένως και από τον κατασκευαστή της, προκειμένου να επιλέγεται ο κατάλληλος φερρίτης.

4.5.2 Σχολιασμός των συχνοτήτων λειτουργίας των «επικρατέστερων» φερριτών

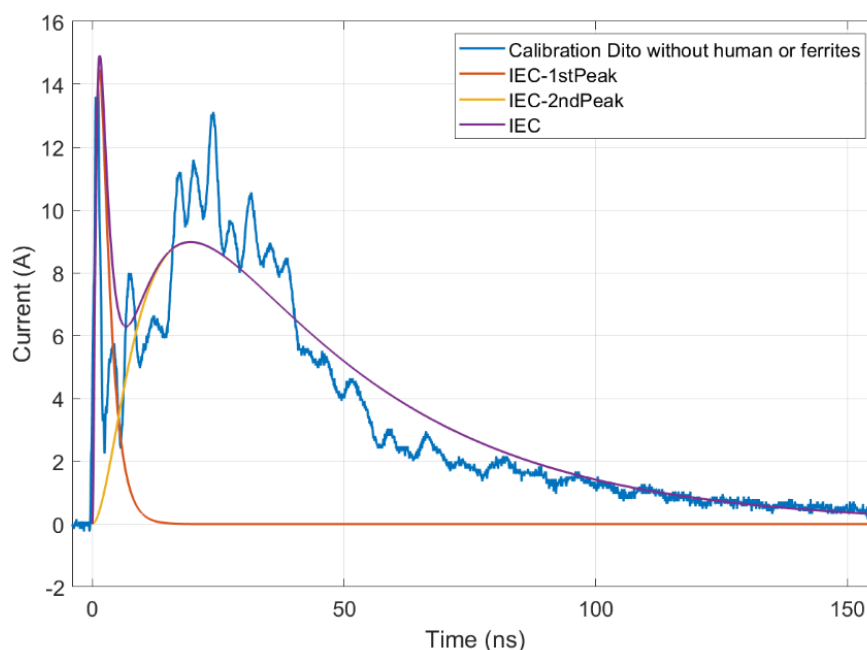
Όπως έχει ήδη φανεί από το Κεφάλαιο 3, η επίδραση του ανθρώπου στην κυματομορφή ESD είναι εντονότερη στη γεννήτρια DITO και στις δύο διατάξεις (διακρίβωση και δοκιμών) απ' ότι στη γεννήτρια NSG 438, παρ' όλα αυτά και για τις δύο γεννήτρίες φαίνεται η χρήση φερρίτη να προσομοιώνει την ανθρώπινη επίδραση.

Πιο συγκεκριμένα, οι δύο φερρίτες που ξεχώρισαν στα πειράματα είναι οι φερρίτες από τα υλικά 61 και 75, κάτι που προκαλεί εντύπωση, αφού οι δύο φερρίτες λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες και όπως φάνηκε από τους Πίνακες 4.2, 4.5, 4.8 και 4.11 το μεγαλύτερο φασματικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις συχνότητες 1MHz – 200MHz, όπου παρατηρούνται και οπτικά από τα Σχήματα 4.14, 4.16, 4.18 και 4.20 μεγάλες διαφορές μεταξύ των κυματομορφών χωρίς άνθρωπο και με άνθρωπο και η επίδραση των φερριτών. Μάλιστα ο φερρίτης 61 λειτουργεί σε εύρος 200MHz – 1GHz, ενώ ο φερρίτης 75 σε εύρος 150kHz – 10MHz, συχνότητες δηλαδή εκτός του εύρους 1MHz – 200MHz. Το αποτέλεσμα αυτό, αν και αρχικά παράλογο, έχει μία εξήγηση.

Κάθε κυματομορφή ESD περιλαμβάνει δύο είδη ταλαντώσεων: τις αργές με μεγάλη περίοδο και τις γρήγορες με μικρή περίοδο. Κάνοντας την απλή αντιστοιχία $f = \frac{1}{T}$, οι πρώτες αντιστοιχούν σε χαμηλές συχνότητες, ενώ οι δεύτερες σε μεγαλύτερες συχνότητες. Οι ταλαντώσεις αυτές εντοπίζονται στην κυματομορφή στα εξής σημεία: οι αργές ταλαντώσεις στις δύο βασικές παλμικές εκτονώσεις που ορίζονται στην βασική κυματομορφή του Προτύπου IEC 61000-4-2 και οι γρήγορες στις επιμέρους ταλαντώσεις με μικρότερη περίοδο, που είναι εξαρτώμενες από τη γεννήτρια. Σημειώνεται πως τα δύο κύρια peaks της κυματομορφής ESD δεν αποτελούν περιοδικές ταλαντώσεις με συγκεκριμένη περίοδο, αλλά μεμονωμένα χαρακτηριστικά σημεία της παλμικής απόκρισης. Συγκεκριμένα, το πρώτο peak οφείλεται στην αρχική αποφόρτιση, ενώ το δεύτερο στις ανακλάσεις μέσα στο κύκλωμα. Ωστόσο, λόγω της χρονικής τους διάρκειας, συμβάλλουν κυρίως στο φάσμα χαμηλών συχνοτήτων. Ειδικότερα, το πρώτο peak έχει χρονική διάρκεια περίπου 10–15 ns και άρα αντιστοιχεί σε συχνότητες περίπου $f \approx 70\text{--}100\text{ MHz}$, ενώ το δεύτερο peak εκτείνεται έως και 60–70 ns και άρα αντιστοιχεί σε συχνότητες περίπου $f \approx 15\text{--}30\text{ MHz}$. Αντίθετα, οι υπερτιθέμενες γρήγορες ταλαντώσεις, με διάρκεια 3–5 ns, αντιστοιχούν σε φασματικό περιεχόμενο της τάξης των 200–300 MHz και άνω και είναι υπεύθυνες για τη συμπεριφορά του σήματος στις υψηλές συχνότητες. Στο Σχήμα 4.21 φαίνονται με μεγαλύτερη σαφήνεια οι αργές και γρήγορες ταλαντώσεις για την περίπτωση της διακρίβωσης της γεννήτριας DITO και ομοίως ισχύουν ανάλογα συμπεράσματα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις και γεννήτριες.

Αυτό, λοιπόν, που συμβαίνει είναι πως ο άνθρωπος γενικά φαίνεται να μειώνει το πλάτος της κυματομορφή σε σχέση με αυτή χωρίς άνθρωπο. Το παραπάνω μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε επιδρώντας στο πλάτος των αργών ταλαντώσεων, είτε επιδρώντας στο πλάτος των γρήγορων ταλαντώσεων. Έτσι, ο φερρίτης 75 επιδρά στις αργές ταλαντώσεις, ενώ ο φερρίτης 61 στις γρήγορες. Ειδικότερα, όπως παρατηρήθηκε από τις κυματομορφές και τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών τους (Σχήματα 4.14, 4.16 και 4.20 και Πίνακες 4.2, 4.5 και 4.11 – περιπτώσεις διακρίβωσης και δοκιμών DITO και δοκιμών NSG 438), ο φερρίτης 61 επιδρά μειώνοντας το πλάτος των γρήγορων ταλαντώσεων, ενώ από το Σχήμα 4.18 και τον Πίνακα 4.8, φαίνεται πως για την περίπτωση διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438, ο φερρίτης 75 επιδρά μειώνοντας το πλάτος της αργής ταλάντωσης του δεύτερου peak. Όμως, είναι σημαντικό να επισημανθεί πως οι φερρίτες δεν επιφέρουν αλλαγές μόνο στο κομμάτι

ονομαστικής λειτουργίας τους, καθώς η χαρακτηριστική τους καμπύλη εμφανίζει ουρές απόσβεσης, δηλαδή κάθε φερρίτης ξεκινά και να σταματά να λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος από αυτό για το οποίο έχει την μέγιστη επίδρασή του.



Σχήμα 4.21: Ανάδειξη των αργών και γρήγορων ταλαντώσεων σε μία κυματομορφή ESD, χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τη γεννήτρια DITO

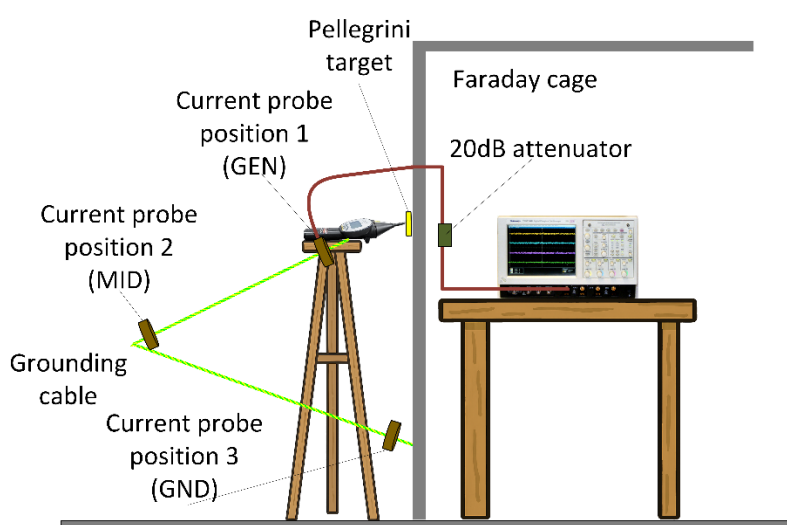
Συνεπώς, επιβεβαιώνεται πως δεν υπάρχει ένα μοναδικός καταλληλότερος φερρίτης, αλλά διαφέρει για κάθε γεννήτρια, ενώ ενδέχεται να διαφέρει και για τις διαφορετικές καταστάσεις εκφορτίσεων (διακρίβωσης και δοκιμών), αναλόγως την κυματομορφή που παράγεται κάθε φορά και τις ταλαντώσεις που αυτή εμπεριέχει.

4.5.3 Σχολιασμός της επίδρασης της θέσης τοποθέτησης του φερρίτη στην συμπεριφορά εκφόρτισης

Ένα ζήτημα που προκύπτει από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων είναι πως η θέση τοποθέτησης του φερρίτη πάνω στο καλώδιο επιστροφής επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο ο φερρίτης επιδρά πάνω στην κυματομορφή ESD. Μάλιστα, όπως φάνηκε από τους Πίνακες 4.5, 4.8, 4.11 και 4.14, η θέση τοποθέτησης του φερρίτη επηρεάζει μεν την τελική θέση κατάταξής του, χωρίς όμως κάποιο εμφανές μοτίβο.

Με βάση αυτή την παρατήρηση, έγινε μία περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου, λαμβάνοντας κάποιες ακόμα μετρήσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διακρίβωσης και η γεννήτρια DITO, όπως αυτή περιγράφεται από το Πρότυπο και

όπως χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα με μία τροποποίηση. Η μύτη της γεννήτριας εφάρμοζε μεν στο στόχο Pellegrini, αλλά ο τελευταίος δεν ήταν συνδεδεμένος με τον παλμογράφο. Αντιθέτως, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρεύματος χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή παρακολούθησης ρεύματος FCC F-65 και τη μέθοδο αντιστάθμισης συχνοτικής απόκρισης που περιγράφηκε προηγουμένως. Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε στις τρεις προβλεπόμενες για τοποθέτηση φερρίτη θέσεις (position 1 – GEN, position 2 – MID, position 2 – GND), χωρίς να υπάρχουν φερρίτες στο καλώδιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.22. Σε κάθε θέση πάρθηκε και από μία μέτρηση της κυματομορφής του ρεύματος.



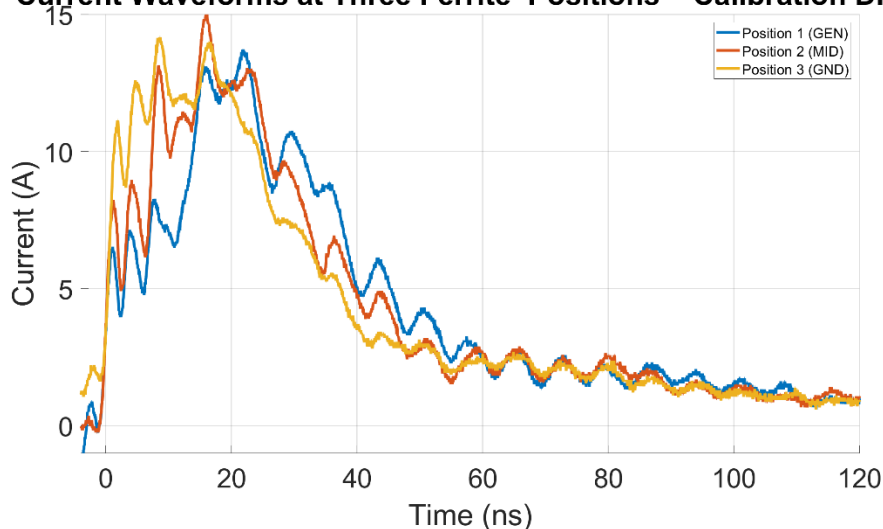
Σχήμα 4.22: Πειραματική διάταξη μέτρησης ρεύματος χωρίς φερρίτες για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη

Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική διακύμανση της μορφής του ρεύματος μεταξύ των τριών θέσεων, τόσο στη κυματομορφή του ρεύματος όσο και στο φάσμα συχνοτήτων, ιδιαίτερα για συχνότητες άνω των 15MHz, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.23 και 4.24. Όπως φαίνεται, η μέγιστη τιμή, ο χρόνος και η μορφή του ρεύματος που διέρχεται από κάθε ένα από τα τρία εξεταζόμενα σημεία είναι διαφορετικά, με αποτέλεσμα ο φερρίτης να καταστέλλει διαφορετικά φαινόμενα με διαφορετικές ταλαντώσεις και σε διαφορετικές συχνότητες. Για το λόγο αυτό και η επίδραση του φερρίτη είναι διαφορετική σε κάθε θέση.

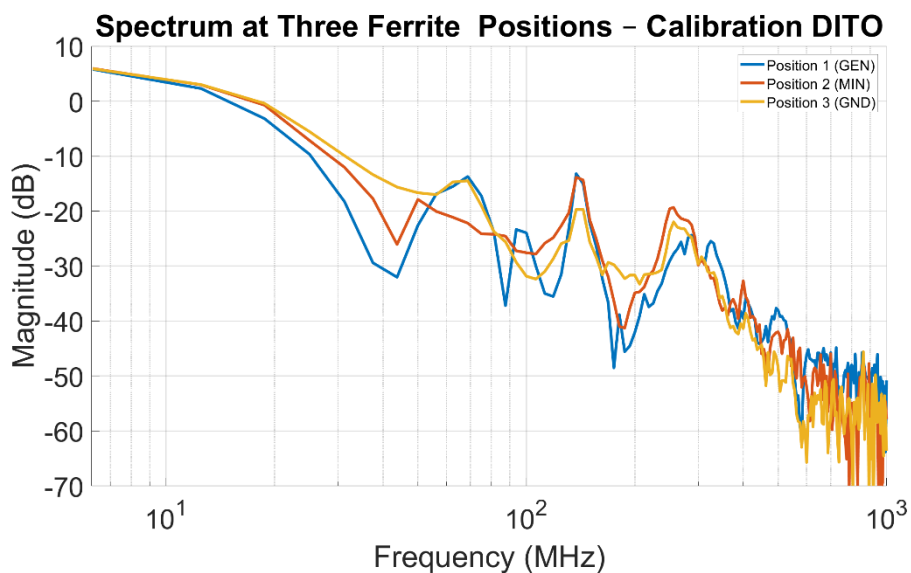
Η συμπεριφορά που παρατηρείται στα Σχήματα 4.23 και 4.24, αποδίδεται στο φαινόμενο σχηματισμού στάσιμων κυμάτων και στα φαινόμενα συντονισμού. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος του καλωδίου γείωσης, ανακλάται στα άκρα του καλωδίου (π.χ. στη γεννήτρια ESD και στη σύνδεση γείωσης). Η

υπέρθεση του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος δημιουργεί στάσιμα κύματα, εφόσον το μήκος του καλωδίου ικανοποιεί τις συνθήκες συντονισμού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία δεσμών και κοιλιών, τα οποία επηρεάζουν τη λειτουργία του φερρίτη.

Current Waveforms at Three Ferrite Positions – Calibration DITO



Σχήμα 4.23: Κυματομορφές ρεύματος χωρίς φερρίτες στις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη



Σχήμα 4.24: Φάσματα κυματομορφών ρεύματος χωρίς φερρίτες στις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη

Για τους παραπάνω λόγους, η θέση τοποθέτησης του φερρίτη επηρεάζει την επίδρασή του στην κυματομορφή ρεύματος, γι' αυτό και πρέπει να γίνεται αναλυτική μελέτη των κυμάτων και των ανακλάσεων στο καλώδιο, των δεσμών και των κοιλάδων που

δημιουργούνται από αυτά και των συχνοτήτων συντονισμών, προκειμένου να επιλέγεται η κατάλληλη θέση για την κάθε γεννήτρια.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Σύνοψη – Περαιτέρω διερεύνηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μία προσπάθεια για την ανάλυση, ποσοτικοποίηση και αναπαραγωγίμη προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που παράγεται από εμπορικές γεννήτριες κατά τις δοκιμές ατρωσίας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2. Συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από δέκα διαφορετικούς ανθρώπινους χειριστές, υπολογίστηκαν οι αποκλίσεις των παραμέτρων που ορίζονται από το Πρότυπο των κυματομορφών των ανθρώπων από την κυματομορφή χωρίς άνθρωπο, καθώς και η αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τις παραμέτρους αυτές, ενώ παράλληλα επιχειρήθηκε η προσαρμογή των κατανομών αυτών σε γνωστές πυκνότητες πιθανότητας, ώστε να ενταχθούν σε ένα συνεπές πλαίσιο εκτίμησης αβεβαιότητας. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, ως προσεγγιστική λύση για την προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή, μελετήθηκε η χρήση φερριτών σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος του καλωδίου επιστροφής (γείωσης) της γεννήτριας ESD. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με ποικιλία φερριτικών υλικών και τοποθετήσεων και στη συνέχεια, οι φερρίτες κατατάχθηκαν βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, προκειμένου να αναδειχθούν οι πιο αποτελεσματικοί συνδυασμοί τοποθέτησης και υλικού.

Τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους της εργασίας έδειξαν πως ο άνθρωπος χειριστής παραμορφώνει σημαντικά την παραγόμενη κυματομορφή ESD, επηρεάζοντας κυρίως το τμήμα μετά την πρώτη αιχμή, το οποίο σχετίζεται με το βραδύτερο μέρος της κυματομορφής και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε μεταβολές στο περιβάλλον του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας. Παρατηρήθηκαν αποκλίσεις άνω του 15% (Πίνακες 3.5 – 3.10), καθιστώντας το ζήτημα αυτό ακόμη πιο κρίσιμο αν ληφθεί υπόψη η αναμενόμενη αύξηση της χρήσης αυτοματοποιημένων ρομποτικών διατάξεων για δοκιμές ESD, στις οποίες η απουσία του ανθρώπινου χειριστή θα οδηγήσει σε αποκλίσεις σε σχέση με την παραδοσιακή διαδικασία που χρησιμοποιείται από τα περισσότερα εργαστήρια. Επιπλέον, η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο δεύτερο μέρος της μελέτης, αναφορικά με την αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας που προκύπτει από την επίδραση του χειριστή, έδειξε ότι αυτό

το φαινόμενο δεν μπορεί να ενταχθεί ως πρόσθετη συνιστώσα αβεβαιότητας σε ενδεχόμενο ισοζύγιο αβεβαιότητας (Σχήματα 3.45 – 3.50, Πίνακες 3.11 – 3.16). Συνεπώς, απαιτείται η διερεύνηση μιας τυποποιημένης λύσης.

Η λύση που προτείνεται και μελετήθηκε στο δεύτερο μέρος αυτής της διπλωματικής, είναι η χρήση φερριτών αρπαγής στο καλώδιο γείωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι φερρίτες αποτελούν μία υποσχόμενη προσέγγιση για την προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης, αφού δεν επηρεάζουν το πρώτο μέγιστο της κυματομορφής, αλλά επιδρούν στο κομμάτι μετά από αυτό. Εξαίρεση αποτελεί το χρονικό παράθυρο 3ns – 9ns, όπου ενώ ο άνθρωπος επιδρά ανυψώνοντάς το, οι φερρίτες δεν επιφέρουν κάποια αλλαγή σε αυτό (Σχήματα 4.13, 4.15, 4.17, 4.19). Ακόμα, αν και τα αποτελέσματα κατάταξης (Πίνακες 4.5, 4.8, 4.11, 4.14) έδειξαν σαφώς πως η χρήση φερρίτη μπορεί, έστω και σε περιορισμένο βαθμό, να προσεγγίσει την κυματομορφή της περίπτωσης με ανθρώπινο χειριστή, παραμένουν αποκλίσεις που υποδηλώνουν ότι η επίδραση του ανθρώπου δεν αναπαράγεται ικανοποιητικά και αποτελεσματικά για όλες τις περιπτώσεις γεννητριών και διατάξεων. Βασικό εύρημα της παρούσας εργασίας είναι πως για τις τρεις από τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ο φερρίτης με την ικανοποιητικότερη επίδραση ήταν αυτός που επιδρά σε συχνότητες άνω των 200MHz, υποδεικνύοντας πως άνθρωπος και φερρίτες επηρεάζουν τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα του ρεύματος ESD. Φάνηκε επίσης, πως η επίδραση του ανθρώπου είναι εξαρτώμενη από τη γεννήτρια (generator specific), ενώ η επίδραση του φερρίτη εξαρτάται και από τη θέση τοποθέτησής του, ενώ δεν προκύπτει ένας φερρίτης που να αποδεικνύεται καθολικά αποτελεσματικός για όλες τις γεννήτριες και τις διατάξεις δοκιμής. Ωστόσο, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στη διπλωματική αυτή εργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο από κατασκευαστές γεννητριών ESD όσο και από εργαστήρια δοκιμών και διακρίβωσης, ως εργαλείο για τον προσδιορισμό της καταλληλότερης διάταξης φερριτών ανά γεννήτρια. Τα ευρήματα αναδεικνύουν την πολυπλοκότητα και τις προκλήσεις που σχετίζονται με το συγκεκριμένο ζήτημα, προσφέροντας σημαντικές γνώσεις για την επίτευξη συνεπούς και αξιόπιστης αναπαραγωγής κυματομορφών ESD σε ένα διαρκώς εξελισσόμενο περιβάλλον δοκιμών.

Τα παραπάνω συμπεράσματα διαμορφώθηκαν βάσει συγκεκριμένων περιορισμών που τέθηκαν, αναπόφευκτα, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά,

χρειάζεται να επισημανθεί πως στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να διερευνήσει αν επιδρά ο επιδρά στην κυματομορφή ESD και το ενδεχόμενο η χρήση φερρίτη να προσομοιάζει την επίδραση αυτή, κάνοντας μία πρώτη εκτίμηση για το ποιος φερρίτης ενδεχομένως να επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ένας πρώτος περιορισμός είναι το πλήθος των γεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο μέρη της διπλωματικής. Ακόμα, οι περιορισμοί πως οι εξεταζόμενοι φερρίτες αφορούν σε μόνο τέσσερα από τα δεκάδες υλικά φερριτών, εξετάζεται μόνο η χρήση φερριτών αρπαγής (clamp on ferrites) και με μόνο μία περιέλιξη του καλωδίου επιστροφής, καθιστούν σαφές πως ο φερρίτης που κάθε φορά χαρακτηρίζεται ως «καλύτερος» δεν αποτελεί καθολικό συμπέρασμα και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί, πως στην περίπτωση της διακρίβωσης, ήδη από το Πρότυπο αποκλείεται αυστηρά η ανθρώπινη παρουσία και συγκράτηση της γεννήτριας, συνεπώς η χρήση φερρίτη δεν έχει νόημα, ωστόσο αποτελεί μία τυπική διάταξη, στην οποία ενδείκνυται να γίνουν πειράματα και δοκιμές. Ακόμα, η διάταξη δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της διπλωματικής είχε ως δοκίμιο ένα γειωμένο μεταλλικό κουτί, αντιπροσωπεύοντας ένα πολύ μικρό δείγμα δοκιμίων. Τέλος, η κατάταξη των φερριτών πραγματοποιήθηκε με χρήση σταθμισμένων βαρών σε έντεκα αξιολογικά κριτήρια. Τα βάρη αυτά επιλέχθηκαν συγκεκριμένα για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης, ωστόσο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι διαφορετική επιλογή βαρών θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε διαφοροποιημένα αποτελέσματα κατάταξης.

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει τη μελέτη σε μεγαλύτερο αριθμό εμπορικά διαθέσιμων γεννητριών ESD, με στόχο την επιβεβαίωση των παρόντων ευρημάτων και τη διερεύνηση της γενικευσιμότητάς τους. Παράλληλα, προτείνεται η αξιολόγηση πιθανών παθητικών ή ενεργών παρεμβάσεων που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο πρότυπο IEC 61000-4-2, με σκοπό τη μείωση της ανθρώπινης επίδρασης και τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών σε επίπεδο συστήματος. Επιπλέον, προτείνεται η μελέτη περισσότερων στατιστικών κατανομών, με σκοπό την πληρέστερη περιγραφή της αβεβαιότητας που προκαλεί ο ανθρώπινος παράγοντας, είτε με βάση μεγαλύτερο δείγμα δοκιμών είτε με χρήση ποικιλίας γεννητριών, με στόχο την αναγνώριση πιθανών μοτίβων στις πυκνότητες πιθανότητας των πραγματικών αποκλίσεων.

Όσον αφορά το σκέλος της προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης μέσω φερριτών, η περαιτέρω διερεύνηση μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση ευρύτερης γκάμας φερριτικών υλικών και διατάξεων (π.χ. περισσότερες περιελίξεις καλωδίου), καθώς και την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας των σταθμισμένων βαρών που χρησιμοποιούνται στην κατάταξη. Έτσι, θα είναι δυνατή η στατιστική ανάδειξη του πλέον αποτελεσματικού φερρίτη και της βέλτιστης θέσης τοποθέτησής του, ανά γεννήτρια.

Βιβλιογραφία

- [1] Chatterton PA, Houlden MA, Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) – Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1992
- [2] Παύλος Σ. Κατσιβέλης, “Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης”, Διδακτορική Διατριβή, Νοέμβριος 2011, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [3] Λάμπρος Οικονόμου, Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου, Υψηλές τάσεις, 3η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2023
- [4] Εικόνα διαθέσιμη στη διεύθυνση: https://staticworx.com/learning_center/esd-flooring-technical-information/walking-body-voltage
- [5] Θεοδόσιος Κ. Λαμπρινός, “Καταγραφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για διαφορετικά σημεία έγχυσης κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων σύμφωνα με τον Πρότυπο IEC 61000-4-2 και επίδραση σε SpaceWire Link”, Διπλωματική Εργασία, Μάρτιος 2022, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [6] Εικόνα διαθέσιμη στη διεύθυνση: <https://www.physicsclassroom.com/class/estatics/Lesson-2/Charging-by-Induction>
- [7] Υλικό διαθέσιμο στη διεύθυνση του ESD Association: <https://www.esda.org/esd-overview/esd-fundamentals/part-1-an-introduction-to-esd/>
- [8] Jin Shao, Yanbin Qiao, Qiang Ma, Jianqiang Li, Yanning Chen, Yidong Yuan, Xiaoke Tang, Haifeng Zhang, Dongyan Zhao, “Investigation on the ESD failure mechanism of integrated circuits in a 0.11μm CMOS process”, 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), August 2017, doi: 10.1109/ICEPT.2017.8046409
- [9] James E. Vinson, J.J. Liou, “Electrostatic discharge in semiconductor devices: An overview”, Proceedings of the IEEE, March 1998, doi: 10.1109/5.659493
- [10] Διεθνής Συνεταιρισμός κοινωνικής ασφάλισης issa, Οδηγός για την εκτίμηση των Κινδύνων στις Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις, διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.issa.int/sites/default/files/documents/prevention/Explosion_greek_el-36214.pdf

- [11] 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/techpaper/sfowler/esd97/esd97.html>.
- [12] Υλικό διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.academyofemc.com/emc-standards>
- [13] Υλικό διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://compliancetesting.com/is-emc-testing-mandatory/>
- [14] ΕΛΟΤ EN 61000.04.02 2η Έκδοση 2009 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4-2: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων - Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης
- [15] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2008.
- [16] Dassault Systems, Simulia, Electrostatic Discharge: Air, διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.3ds.com/fileadmin/Products/Simulia/PDF/whitepapers/ESD_air_discharge-v2.pdf
- [17] Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.lisungroup.com/news/technology-news/how-esd-simulator-gun-work-and-why-theyre-important.html?srsId=AfmBOoqqmM9Kn6-9P2aCGIsz1QJ-neHbAwYmsx8XcLmZDKu0Ga0FPFJT>
- [18] Tadatoshi Sekine, Hideki Asai, “A framework for the simulation of electrostatic discharge immunity using the unified circuit modeling technique”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2013, doi: 10.1109/ISEMC.2013.6670532
- [19] Yuanzhong Zhou, Jean-Jacques Hajjar, “A circuit model of electrostatic discharge generators for ESD and EMC SPICE”, IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, June 2014, doi: 10.1109/EDSSC.2014.7061083
- [20] Jawad Yousaf, Jaeyoung Shin, Rao Leqian, Wansoo Nah, Jinsung Youn, Daehee Lee, Chanseok Hwang, “Effect of ESD generator ground strap configuration on ESD waveform”, Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), June 2017, doi: 10.1109/APEMC.2017.7975441

- [21] Panagiotis K. Papastamatis, Eleni P. Nicolopoulou, Christos A. Christodoulou, Ioannis F. Gonos, “Operator Influence on IEC 61000-4-2 ESD Waveform: A study and Ferrite-Based Replication Proposal”, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, April 2025, doi: 10.1109/TEM.2025.3560614
- [22] EMC Paper, “White Paper: Implications of the new changes in IEC 61000-4-2, edition 3, on ESD Generators”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.emc-partner.com/downloads/white-papers/130-white-paper-esd-iec61000-4-2-edition-3-2025/file>
- [23] IEC 61000-4-2 Ed3.0: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test – Committee Draft”, 2023
- [24] P. K. Papastamatis, I. P. Katsanaki, E. P. Nicolopoulou, C. D. Nikolopoulos, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Comparative analysis of calibration procedures in current and proposed editions of the IEC 61000-4-2 Standard", International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, September 2024, doi: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722155
- [25] Industry Council on ESD Target Levels, White Paper 3 System Level ESD Part III: Review of IEC 61000-4-2 ESD Testing and Impact on System-Efficient ESD Design (SEED), Jan. 17, 2024. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.esdindustrycouncil.org/ic/en/shared/industry-council-white-paper-3-piii-rev-1.2.pdf>
- [26] K. Muhonen *et al.*, "HMM round robin study: What to expect when testing components to the IEC 61000-4-2 waveform", Electrical Overstress / Electrostatic Discharge Symposium Proceedings 2012, October 2012
- [27] M. Hirata, T. Takahashi and N. Schibuya, "Evaluation of Falling Time Restriction of ESD Immunity Test Current Waveform: The Result of IEC 61000-4-2 Round Robin Test in Japan", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, July 2007, doi: 10.1109/ISEMC.2007.171
- [28] M. Gopalraj and T. Sanford, "Analyzing Repeatability During Air Discharge ESD Tests", IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMC+SIPI), August 2023, doi: 10.1109/EMCSIPI50001.2023.10241666

- [29] NSG 439-Teseq. 2015, διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.dqm.it/wp-content/uploads/2015/06/NSG_439.pdf
- [30] Εικόνα διαθέσιμη στη διεύθυνση: https://www.testequipmentconnection.com/70686/Teseq_Schaffner_NSG_439.php
- [31] O. H. Izadi, J. Meiguni, K. Araki, H. Shumiya and D. J. Pommerenke, "Automated Detection and Characterization of ESD-Induced Soft Failures Using Image- and Audio-Based Methods", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, August 2020, doi: 10.1109/TEM.2020.2986173
- [32] Βασίλειος Γ. Κουτσοχέρας, “Πειραματική μελέτη της επίδρασης φερριτών στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης”, Διπλωματική Εργασία, Σεπτέμβριος 2024, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [33] Pankaj Sharma, Gagan Kumar Bhargava, Sumit Bhardwaj, Indu Sharma, “Engineered Ferrites and Their Applications”, Springer, 2023, doi: 10.1007/978-981-99-2583-4
- [34] Υλικό διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://gr.yanhemagnet.com/info/introduction-to-hard-ferrites-98611689.html>
- [35] E. C. Snelling, “Soft Ferrites: Properties and Applications”, Iliffe Books, 1969
- [36] Ü. Özgür, Y. Alivov, and H. Morkoç (2009). Microwave ferrites, part 1: fundamental properties. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://doi.org/10.1007/s10854-009-9923-2>
- [37] Alex Goldman, “Modern Ferrite Technology”, 2nd Edition, Springer, 2006 . <https://doi.org/10.1007/978-0-387-29413-1>
- [38] Aldrick Limjoco, Jefferson Eco, Ferrite Beads Demystified. Analog Dialogue 50-02, February 2016. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/ferrite-beadsdemystified.html>
- [39] EMC Directory. What is a Ferrite Clamp? .2024. διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.emc-directory.com/community/what-is-the-ferrite-clamp>
- [40] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang and O. Fujiwara, "Influence of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations in Contact Discharge Calibration Waveform from ESD Generator", International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, September 2023, doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274328

- [41] C. Carobbi, A. Burger and S. Caniggia, "Effect of the Insertion of a Ferrite Along Return Cable and of Return Cable Layout on ESD Contact Discharge", XXXVth Genela Assembly Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), August 2023, doi: 10.23919/URSIGASS57860.2023.10265511
- [42] 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", IEEE Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity: EMC Japan/Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Japan/APEMC Okinawa), May 2024, doi: 10.23919/EMCJapan/APEMCOkinaw58965.2024.10584971
- [43] 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)
- [44] 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
- [45] Teseq MD 103 ESD target set, user manual
- [46] S. Yang, J. Zhou, D. Pommerenke and D. Liu, "A simple frequency response compensation method for current probe measurements of ESD currents", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), October 2017, doi: 10.1109/ISEMC.2017.8077859
- [47] P. K. Papastamatis., E. A. Paliatsos, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos "Analysis of the ESD Reconstruction Methodology Based on Current Probe Measurements and Frequency Response Compensation for Different ESD Generators and Severity Test Levels", MDPI Electronics 10, doi: 10.3390/electronics10060728
- [48] A. Sălceanu, O. Neacșu, V. David, E. Luncă, "Measurements upon Human Body Capacitance: Theory and Experimental Setup", International Symposium of IMEKO TC4, September 2007, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.imeko.org/publications/tc4-2007/IMEKO-TC4-2007-191.pdf>

- [49] Υλικό διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://fair-rite.com/kits/>
- [50] 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)