



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συμβολή στη μελέτη γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Συμβολή στη μελέτη γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ιωάννης Φ. Γκόνος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Χρήστος Α. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Οκτωβρίου 2025.

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χρήστος Α. Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ελευθερία Χ. Πυργιώτη
Καθηγήτρια Παν. Πατρών

.....

Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Ν. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Δ. Πέππας
Επίκουρος Καθηγητής Πολ. Κρήτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2025

.....
Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

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

Copyright © Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

“Non est ad astra mollis e terris via”

Seneca

Στην οικογένειά μου

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται τεχνικές προκλήσεις, που σχετίζονται με τις δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, στο πλαίσιο εφαρμογής του Προτύπου IEC 61000-4-2, με ιδιαίτερη έμφαση στις συνέπειες της πρόσφατης (2025) αναθεώρησής του και στην επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα. Κεντρικό άξονα της εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της νέας απαίτησης για έλεγχο του δεύτερου σκέλους της κυματομορφής εκφόρτισης μέσω της παραμέτρου I_{P2} , όπως εισάγεται στην τρίτη έκδοση του Προτύπου. Η αλλαγή αυτή ενδέχεται να καταστήσει μη συμμορφούμενες πολλές υφιστάμενες γεννήτριες, δημιουργώντας τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις για τα διαπιστευμένα εργαστήρια. Ως απάντηση, προτείνεται μια πρακτικά εφαρμόσιμη και τεκμηριωμένη λύση, βασισμένη στη χρήση φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης, η οποία τροποποιεί το σχήμα της κυματομορφής χωρίς επεμβάσεις στον σχεδιασμό της γεννήτριας.

Η διατριβή εισφέρει για πρώτη φορά εκτενή πειραματική αξιολόγηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος, αναλύοντας τις αποκλίσεις σε κρίσιμες παραμέτρους (όπως τις παραμέτρους I_{P2} , I_{30} , I_{60}) και τη φασματική αλλοίωση που προκαλείται κυρίως μετά την πρώτη αιχμή. Παράλληλα, αναλύεται η δυνατότητα προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης με χρήση φερριτών αρπάγης, υπό διάφορες διατάξεις καλωδίου γείωσης. Εξετάζονται παραλλαγές στη θέση και τον τύπο φερρίτη, καθώς και η ευστάθεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας μέσω Monte Carlo ανάλυσης ευαισθησίας.

Το επόμενο σκέλος της διατριβής εστιάζει στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας μεταξύ αυτοματοποιημένων και τυπικών δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μέσω αξιολόγησης μεταλλικών ρομποτικών βραχιόνων. Αναλύεται η επίδραση της γείωσης, της αντίστασης σύνδεσης και της ενσωμάτωσης φερρίτη αρπάγης στην κυματομορφή, ώστε να επιτευχθεί προσομοίωση της ανθρώπινης παρουσίας και σύγκλιση αποτελεσμάτων. Τεκμηριώνεται ότι με κατάλληλη ρύθμιση παραμέτρων, ο ρομποτικός βραχίονας μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την επίδραση του χειριστή. Παράλληλα, εξετάζεται η επίδραση του χειριστή στις έμμεσες εκφορτίσεις προς το οριζόντιο και το κάθετο επίπεδο σύζευξης υπό πραγματικές συνθήκες δοκιμής, αποδεικνύοντας ότι όχι μόνο επηρεάζει την κυματομορφή αλλά επηρεάζει και την επίδοση του εξοπλισμού υπό δοκιμή. Η εφαρμογή τεχνικών μέτρων, όπως προστατευτικά γάντια και υποδήματα, οδηγεί σε μερική εξομάλυνση των επιδράσεων.

Η συνολική συμβολή της διατριβής έγκειται στην παροχή ενός ποσοτικά τεκμηριωμένου και εφαρμόσιμου πλαισίου για αξιόπιστες και πλήρως συμμορφούμενες αυτοματοποιημένες δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, σύμφωνα με τις αυστηρές απαιτήσεις της τρίτης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2.

Λέξεις-Κλειδιά: Πρότυπο IEC 61000-4-2, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, αναπαραγωγιμότητα, ανιχνευτές ρεύματος, μέθοδος αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, φαινόμενο ταλαντώσεων, φερρίτες αρπάγης, μεταλλικοί βραχίονες, έμμεσες εκφορτίσεις, ηλεκτρομαγνητική ατρωσία

Abstract

This thesis investigates technical challenges associated with immunity testing against electrostatic discharges, within the framework of the IEC 61000-4-2 Standard, with particular emphasis on the implications of its recent (2025) revision and the influence of the human operator. A central focus of the work is the analysis of the newly introduced requirement for monitoring the second portion of the discharge current waveform through the I_{P2} parameter, as defined in the third edition of the Standard. This change may render many existing generators non-compliant, leading to significant technical and economic implications for accredited laboratories. As a response, a practically feasible and technically substantiated solution is proposed, based on the use of clamp-on ferrites applied to the grounding cable, enabling the reshaping of the waveform without modifications to the internal structure of the electrostatic discharge generator.

The thesis provides, for the first time, a comprehensive experimental assessment of the influence of the human operator on the discharge current waveform, analyzing deviations in critical parameters (such as I_{P2} , I_{30} , and I_{60}) and spectral distortions that predominantly occur after the first peak. In parallel, it evaluates the ability to replicate this influence through clamp-on ferrites under various grounding cable arrangements. Variations in ferrite position and type are investigated, along with the robustness of the proposed methodology through a Monte Carlo sensitivity analysis.

The next part of the thesis focuses on enhancing the reproducibility between automated and conventional electrostatic discharge testing setups, by evaluating the use of metallic robotic arms. The impact of grounding conditions, contact resistance, and ferrite placement on waveform characteristics is examined, aiming to emulate human presence and achieve measurement consistency. It is demonstrated that, with appropriate parameter tuning, the robotic setup can effectively replicate the operator's influence. Moreover, the operator's effect on indirect discharges to the horizontal and vertical coupling planes is studied under realistic test conditions, showing that it not only alters the current waveform but can also affect the immunity performance of the equipment under test. The partial mitigation of these effects is explored through technical countermeasures such as protective gloves and footwear.

The overall contribution of the thesis lies in the development of a quantitatively substantiated and practically applicable framework for reliable and fully compliant automated electrostatic discharge immunity testing, aligned with the stringent requirements introduced in the third edition of the IEC 61000-4-2 Standard.

Keywords: IEC 61000-4-2 Standard, electrostatic discharge, reproducibility, current probes, frequency response compensation method, ringing phenomenon, clamp-on ferrites, metallic robotic arms, indirect discharges, electromagnetic immunity.

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Φ. Γκόνου, και πραγματεύεται τη φυσική ανάλυση, τις τεχνικές παραμέτρους και τις μεθόδους βελτιστοποίησης των δοκιμών ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, στο πλαίσιο εφαρμογής του Προτύπου IEC 61000-4-2. Η διατριβή αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Περιγράφονται οι φυσικοί μηχανισμοί δημιουργίας της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η αρχιτεκτονική των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και τα κύρια ηλεκτρικά μεγέθη που καθορίζουν τις παραμέτρους της κυματομορφής. Παράλληλα, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2, ιδίως ως προς ζητήματα αναπαραγωγιμότητας και επαναληψιμότητας των δοκιμών, και περιγράφονται οι βασικές προκλήσεις που αναμένεται να επιφέρει η πρόσφατη αναθεώρησή του, με ιδιαίτερη αναφορά στην εισαγωγή της νέας παραμέτρου διακρίβωσης I_{P2} , η οποία ενδέχεται να επηρεάσει τη συμμόρφωση ορισμένων γεννητριών.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μέθοδος αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, η οποία επιτρέπει την ανακατασκευή της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε περιπτώσεις όπου η μέτρηση πραγματοποιείται με ανιχνευτή ρεύματος τοποθετημένο γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας. Παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου σε διαφορετικούς τύπους γεννητριών και επίπεδα δοκιμής, όπως καθορίζονται στο Πρότυπο, και τεκμηριώνεται η δυνατότητα αξιοποίησής της χωρίς την ανάγκη εκ νέου ανάλυσης για κάθε είδος εξοπλισμού, καθιστώντας την ιδιαίτερως χρήσιμη τόσο για διακρίβωση όσο και κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών ατρωσίας. Παράλληλα, εξετάζονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων τεχνικά ζητήματα που αφορούν τη γεωμετρία και την ακρίβεια κατασκευής των ανιχνευτών ρεύματος και τη συμπεριφορά των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενώ αναλύεται το φαινόμενο φόρτωσης ανιχνευτή, το οποίο επηρεάζεται από γεωμετρικούς παράγοντες και μαγνητικές απώλειες των φερριτών.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι επιπτώσεις της πρόσφατης αναθεώρησης του Προτύπου IEC 61000-4-2, η οποία εισάγει τη νέα παράμετρο I_{P2} για την αξιολόγηση της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής εκφόρτισης, προκαλώντας ανησυχία ως προς τη δυνατότητα συμμόρφωσης υφιστάμενου εξοπλισμού. Αναλύονται οι τεχνικές και οικονομικές συνέπειες για διαπιστευμένα εργαστήρια και κατασκευαστές γεννητριών, καθώς η υπέρβαση των νέων κριτηρίων μπορεί να συνεπάγεται σημαντικό κόστος αντικατάστασης ή αναβάθμισης εξοπλισμού. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται η χρήση φερριτών αρπάγης τοποθετημένων στο καλώδιο γείωσης ως μη επεμβατική και οικονομικά αποδοτική λύση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς τροποποιήσεις στον βασικό σχεδιασμό των γεννητριών. Παράλληλα, παρουσιάζεται συστηματική κατάταξη

διαφορετικών τύπων φερριτών βάσει τεχνικών δεικτών, προσφέροντας χρήσιμα κριτήρια επιλογής τόσο για κατασκευαστές όσο και για εργαστήρια.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται εκτενής πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής ατρωσίας, καταδεικνύοντας τις αποκλίσεις που προκαλούνται στις κρίσιμες παραμέτρους και στο φασματικό περιεχόμενο της κυματομορφής. Η εργασία εξετάζει τη δυνατότητα προσομοίωσης αυτής της επίδρασης με τεχνικές παρεμβάσεις, όπως η χρήση φερριτών αρπάγης τοποθετημένων σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του καλωδίου γείωσης, με στόχο την αναπαραγωγή των μεταβολών που επιφέρει η ανθρώπινη παρουσία στη διαδρομή επιστροφής του ρεύματος, καθώς και τη βελτίωση της συμφωνίας με τα πρότυπα χαρακτηριστικά των κυματομορφών εκφόρτισης. Η ανάλυση επεκτείνεται στην αξιολόγηση διαφορετικών τύπων φερριτών και θέσεων τοποθέτησης, λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμικότητα της συμπεριφοράς, την εξάρτηση από το είδος της γεννήτριας και τη διάταξη του καλωδίου γείωσης. Εφαρμόζεται επιπλέον ανάλυση ευαισθησίας τύπου Monte Carlo, προκειμένου να εκτιμηθεί η σταθερότητα της προτεινόμενης μεθόδου υπό παραμετρικές διακυμάνσεις, ενισχύοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και τη γενίκευση της προσέγγισης.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η εφαρμογή μεταλλικών ρομποτικών βραχιόνων στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο στη συνθήκη γείωσης όσο και στη συνθήκη απομόνωσης από τη γείωση, με στόχο την αναπαραγωγή της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή. Εξετάζονται σενάρια με διαφορετικές τιμές αντίστασης στη σύνδεση γείωσης, αποτιμώντας τον βαθμό προσομοίωσης της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στη διαδρομή επιστροφής του ρεύματος. Παράλληλα, αναλύεται η χρήση φερριτών αρπάγης σε συνδυασμό με μεταλλικούς βραχίονες, καθώς και η επίδραση στις έμμεσες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως οι εκφορτίσεις προς το οριζόντιο και κάθετο επίπεδο σύζευξης. Ειδική αναφορά γίνεται στις επιδράσεις που παρατηρούνται στο επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση καλωδίων, όπως στο καλώδιο SpaceWire, και στις επιπτώσεις τους στη λειτουργία πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Επιπλέον, μελετάται η επίδραση εξοπλισμού προστασίας, όπως αντιστατικά γάντια και υποδήματα (ESD/HV), καθώς και η σημασία της διάταξης του καλωδίου γείωσης για την επίτευξη αναπαραγωγιμότητας στις μετρήσεις.

Κεφάλαιο 6: Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζεται η συμβολή της διατριβής, η οποία έγκειται στην τεκμηριωμένη ποσοτική ανάλυση της επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα και στην πρόταση τεχνικών λύσεων που διευκολύνουν τη συμμόρφωση με τις νέες απαιτήσεις του Προτύπου. Παράλληλα, επισημαίνονται οι δυνατότητες επέκτασης της έρευνας σε μελλοντικές εφαρμογές.

Σε αυτό το σημείο, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όσους συντέλεσαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα:

Τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ιωάννη Φ. Γκόννο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, την πολυετή συνεργασία μας σε επιστημονικό και επαγγελματικό επίπεδο, καθώς και για τη σταθερή καθοδήγηση και παρουσία του σε κάθε κρίσιμο βήμα της εργασίας. Η συμβολή του δεν περιορίστηκε σε εποπτικό ρόλο, αλλά επεκτάθηκε σε γόνιμο διάλογο,

επίλυση σύνθετων προβλημάτων και υποστήριξη στο σχεδιασμό και την υλοποίηση των πειραμάτων.

Τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή για τις τεκμηριωμένες και ουσιαστικές συμβουλές που μου παρείχε σε κρίσιμες φάσεις της έρευνας, καθώς και για τη συνεπή ενθάρρυνση και την αδιάλειπτη υποστήριξή του στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Χρήστο Α. Χριστοδούλου για τις εμπειριστατωμένες του προτάσεις που συνέβαλαν ουσιαστικά στη δομική οργάνωση και επιστημονική στόχευση της εργασίας, καθώς και για τα εύστοχα και καίρια σχόλιά του που συνέτειναν στη βελτίωση της επιστημονικής ακρίβειας και πληρότητας του περιεχομένου.

Την Καθηγήτρια κα. Ελευθερία Χ. Πυργιώτη για τη σταθερή παρακολούθηση της εξέλιξης της εργασίας, τις τεχνικές της παρεμβάσεις σε ζητήματα πειραματικού σχεδιασμού και τη θετική της ανταπόκριση στην πρόσκληση συμμετοχής στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο για τη συμβολή του στην επιστημονική υποδομή εντός της οποίας εκπονήθηκε η εργασία, καθώς και για την επίδραση των ερευνητικών του προσεγγίσεων στην εννοιολογική εστίαση και τον πειραματικό προσανατολισμό της παρούσας μελέτης.

Τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Ν. Κορρέ, μέλος της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, για τις ουσιαστικές τεχνικές επισημάνσεις του σε θέματα πειραματικής υλοποίησης, καθώς και για την ευγενική αποδοχή της πρόσκλησης να συμμετάσχει στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Τον Επίκουρο Καθηγητή Γεώργιο Δ. Πέππα, μέλος της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, για την τεκμηριωμένη επιστημονική του προσέγγιση σε τεχνικά ζητήματα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας, η οποία προσέφερε ένα χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο κατά την ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την υποστήριξη που προσέφεραν αθόρυβα αλλά ουσιαστικά σε όλη τη διάρκεια της διατριβής. Ειδικότερα, ευχαριστώ τον συνάδελφο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κ. Θεμιστοκλή Α. Αθανασιάδη για την ουσιαστική και αδιάκοπη συνεισφορά του στο τεχνικό και πειραματικό σκέλος της παρούσας διατριβής, τον κ. Γεώργιο Ε. Παντερή, πολύτιμο μέλος του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, για την ενεργή συμμετοχή του σε σημαντικό μέρος του πειραματικού πλαισίου της διατριβής, τον κ. Χρήστο Κ. Ηλία, ο οποίος με την πολυετή του εμπειρία και την τεχνική του αρτιότητα συνέβαλλε στην ουσιαστική αναβάθμιση της ποιότητας των πειραμάτων. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερως την κα. Νικολέτα Χ. Ηλία, υπεύθυνη του συστήματος ποιότητας του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, όχι μόνο για την άψογη συνεργασία μας τα τελευταία χρόνια, αλλά και για την ουσιαστική, ανθρώπινη και πολύτιμη υποστήριξή της σε όλες τις πτυχές της παρούσας προσπάθειας.

Κλείνοντας, νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά και να αναφέρω όλους τους φίλους και συναδέλφους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., οι οποίοι με την εκπόνηση των διπλωματικών τους εργασιών συνέβαλαν σημαντικά στην υλοποίηση της παρούσας διατριβής: Μαρία Ι. Τσορτανίδη, Ιωάννα Π. Κατσανάκη, Αγγελική Δ. Σπυροπούλου, Ιωάννη Ε. Καρυδά, Βασίλειο Γ. Κουτσοχέρα, Θεοδόσιο Κ. Λαμπρινό, Ευάγγελο Ηρακλή Α. Παλιάτσο.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract.....	iv
Πρόλογος.....	vi
Περιεχόμενα.....	x
Κεφάλαιο 1: Το φαινόμενο της Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης και το Πρότυπο IEC 61000-4-2.....	1
1.1. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση	1
1.1.1. Μηχανισμοί φόρτισης.....	1
1.1.1.1. Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο.....	1
1.1.1.2. Επαγωγική φόρτιση.....	4
1.1.2. Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	5
1.1.3. Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	7
1.2. Το Πρότυπο IEC 61000-4-2.....	10
1.2.1. Ιστορική αναδρομή	11
1.2.2. Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης	12
1.3. Μελέτες σχετικά με την αναπαραγωγικότητα των δοκιμών ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2.....	15
1.3.1. Επίδραση της διάταξης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας στην κυματομορφή ρεύματος	15
1.3.2. Διεργαστηριακή μελέτη της ESDA (ElectroStatic Discharge Association).....	20
1.3.3. Διεργαστηριακή μελέτη για τη βελτίωση της αναπαραγωγικότητας των δοκιμών σύμφωνα με το IEC 61000-4-2	22
1.3.4. Μελέτη της επίδρασης του καλωδίου επιστροφής στο φαινόμενο των ταλαντώσεων	24
1.3.5. Ανάλυση της αναπαραγωγικότητας κατά τη δοκιμή ESD σε προσομοιωτή ζεύξης SpaceWire	26
1.3.5.1. Μεθοδολογία Δοκιμών	27
1.3.5.2. Αποτελέσματα Κυματομορφών	29
1.3.5.3. Αποτελέσματα για τη σύνδεση SpaceWire	31
1.3.5.4. Συμπεράσματα	31
1.4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση προτάσεων βελτίωσης της αναπαραγωγικότητας δοκιμών ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2	32
1.4.1. Θέματα αναπαραγωγικότητας κατά το Industry Council White Paper 3	34

1.4.2. Φερρίτες αρπάγης ως καταστολείς των ταλαντώσεων στις κυματομορφές ESD	37
1.4.2.1. Επίδραση των φερριτών αρπαγής κατά μήκος του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ESD και της διάταξης του καλωδίου στις κυματομορφές ESD	38
1.4.2.2. Επίδραση φερριτών στο φαινόμενο ταλαντώσεων για δύο γεννήτριες ESD	40
1.4.3. Ρομποτικές δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.....	45
1.4.3.1. Πλεονεκτήματα της ρομποτικής διάταξης δοκιμών	46
1.4.3.2. Αυτοματοποιημένες δοκιμές και ρομποτικοί βραχίονες.....	47
1.5. Νέα Έκδοση του Προτύπου – IEC 61000-4-2 Ed. 3	48
1.5.1. Κύριες Αλλαγές στην Τρίτη Έκδοση	48
1.5.1.1. Κυματομορφή ρεύματος.....	49
1.5.1.2. Διάταξη διακρίβωσης.....	50
1.5.1.3. Διακρίβωση για εκφορτίσεις αέρος.....	51
1.5.1.4. Αλλαγές στα Παραρτήματα.....	52
1.6. Συμπεράσματα και εκκρεμότητες.....	52
Κεφάλαιο 2: Εργαστηριακός εξοπλισμός, ανάπτυξη μεθοδολογιών και μοντέλων προσομοίωσης ..	55
2.1. Εργαστηριακός Εξοπλισμός και Διατάξεις Μέτρησης	55
2.1.1. Εξοπλισμός εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων	55
2.1.1.1. Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	55
2.1.1.2. Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης και ομοαξονικό καλώδιο RF	58
2.1.1.3. Εξασθενητής.....	59
2.1.1.4. Παλμογράφος.....	59
2.1.1.5. Ανιχνευτής ρεύματος	60
2.2. Ανακατασκευή της κυματομορφής ρεύματος ESD με χρήση ανιχνευτή ρεύματος στο άκρο της γεννήτριας ESD	61
2.2.1. Εξοπλισμός και διάταξη μέτρησης.....	61
2.2.2. Διαδικασία αποσυνέλιξης	63
2.2.3. Βελτιστοποίηση της τιμής αφαίρεσης τάσης (detrend)	65
2.2.4. Μετρήσεις και αποτελέσματα	66
2.2.5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	72
2.2.5.1. Τιμές detrend και εφαρμοσιμότητά τους.....	72
2.2.5.2. Περιορισμοί λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης του ανιχνευτή ρεύματος	73
2.2.5.3. Περιορισμοί λόγω του φαινομένου φόρτωσης από τον ανιχνευτή	73
2.2.5.4. Συμπεράσματα και συμβολή	73

2.3. Προσομοίωση του RF ανιχνευτή ρεύματος F-65 της FCC.....	74
2.3.1. Φαινόμενα Διασποράς.....	74
2.3.1.1. Συντακτική σχέση σε μέσα με χρονική διασπορά	75
2.3.1.2. Μοντέλα Φαινομένων Διασποράς.....	76
2.3.1.3. Ανάλυση μαγνητικής διασποράς με χρήση του Debye 1 st Order Model.....	77
2.3.2. Συνοπτική παρουσίαση της έρευνας σχετικά με την προσομοίωση RF ανιχνευτών ρεύματος	79
2.3.2.1. Κυκλωματική Προσομοίωση με μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων.....	79
2.3.2.2. Ηλεκτρομαγνητική Προσομοίωση μέσω του CST Microwave Studio.....	80
2.3.2.3. Προσομοίωση Πλήρους Κυματικής Εξίσωσης	81
2.3.3. Προσομοίωση του RF ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65 στο περιβάλλον του CST Studio.....	82
2.3.3.1. Βασικά Στοιχεία της Δομής του Μοντέλου	82
2.3.3.2. Ορισμός Παραμέτρων και Μεταβλητών.....	83
2.3.3.3. Αποτελέσματα παραμετρικής σάρωσης.....	85
2.3.3.4. Αρχική εκτίμηση των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων	89
2.3.3.5. Διερεύνηση των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου για 4 γεννήτριες ESD.....	90
2.3.3.6. Ποσοτικοποίηση της τελικής ακρίβειας του μοντέλου	92
2.3.3.7. Συμβολή της συγκεκριμένης ενότητας	93
2.4. Προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito	93
2.4.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση προσπαθειών προσομοίωσης γεννητριών ESD	94
2.4.1.1. Κυκλωματική και αριθμητική προσομοίωση γεννητριών ESD	94
2.4.1.2. Μοντέλο πλήρους κύματος γεννήτριας ESD για προσομοίωση σύζευξης σε επίπεδο συστήματος	96
2.4.1.3. Μοντέλο πλήρους κύματος για την προσομοίωση της γεννήτριας ESD Noiseken ...	98
2.4.1.4. Αποδοτικό κυκλωματικό και αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος μιας γεννήτριας ESD.....	100
2.4.2. Προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito στο περιβάλλον CST Studio.....	102
2.4.2.1. Στοιχεία Προσομοίωσης Μοντέλου Γεννήτριας ESD	102
2.4.2.2. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του μοντέλου στην κυματομορφή ESD .	104
2.4.2.3. Προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito με επιλογή κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης...	107
2.5. Επίδραση ανιχνευτών ρεύματος στις κυματομορφές ESD: πειραματική ανάλυση και προσομοίωση	109
2.5.1. Πειραματική διάταξη	109

2.5.2. Διαδικασία μέτρησης	110
2.5.3. Αποτελέσματα μετρήσεων	111
2.5.3.1. Καταγεγραμμένες κυματομορφές και οπτικοποίηση φάσματος συχνοτήτων	111
2.5.3.2. Παράμετροι κυματομορφής ESD και σύγκριση φάσματος συχνοτήτων	112
2.5.3.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικές τιμές σύνθετης αντίστασης φορτίου	113
2.5.4. Διερεύνηση της επίδρασης του πυρήνα φερρίτη του ανιχνευτή ρεύματος	115
2.5.5. Συμπεράσματα	115
Κεφάλαιο 3: Βελτιστοποίηση της κυματομορφής έγχυσης γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση φερριτών αρπάγης	117
3.1. Συγκριτική ανάλυση της διαδικασίας διακρίβωσης μεταξύ της δεύτερης και τρίτης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2	117
3.1.1. Εξοπλισμός πειράματος και διαδικασία μέτρησης	118
3.1.2. Καταγεγραμμένες κυματομορφές και αποτελέσματα μετρήσεων	119
3.1.2.1. Καταγεγραμμένες κυματομορφές	119
3.1.2.2. Συγκριτικά αποτελέσματα μετρήσεων	121
3.1.3. Επέκταση της συγκριτικής διερεύνησης στις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων Teseq NSG 438 και Schaffner NSG 433	125
3.1.4. Συμπεράσματα και συζήτηση	126
3.2. Οι φερρίτες αρπάγης ως καταστολείς διαταραχών και εργαλεία βελτιστοποίησης των κυματομορφών ρεύματος έγχυσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	127
3.2.1. Οι φερρίτες αρπάγης ως καταστολείς διαταραχών	127
3.2.1.1. Χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης φερριτών αρπάγης	129
3.2.1.2. Χαρακτηριστικές σύνθετης αντίστασης φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής	130
3.2.2. Κορεσμός φερριτών και βρόχος υστέρησης	132
3.3. Βελτιστοποίηση της κυματομορφής εγχεόμενου ρεύματος γεννητριών ESD μέσω φερριτών αρπάγης	133
3.3.1. Ανάλυση διαδικασίας αξιολόγησης συμμόρφωσης και τροποποίησης	134
3.3.2. Υλοποίηση μεθοδολογικού πλαισίου	137
3.3.2.1. Εφαρμογή φερριτών και αξιολόγηση συμμόρφωσης (Φάση 1)	137
3.3.2.2. Κατάταξη φερριτών βάσει απόκλισης από την κυματομορφή του IEC 61000-4-2 (Φάση 2)	140
3.3.3. Εκτίμηση κορεσμού (Φάση 3)	142

3.3.4. Συμπεράσματα.....	147
Κεφάλαιο 4: Πειραματική αξιολόγηση της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και προσομοίωσή της μέσω φερριτών αρπάγης.....	149
4.1. Επίδραση του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ESD κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2	149
4.1.1. Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία	150
4.1.1.1. Τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης	150
4.1.1.2. Διάταξη δοκιμών	152
4.1.2. Καταγεγραμμένες κυματομορφές	153
4.1.2.1. Γεννήτρια EM Test Dito – Διάταξη διακρίβωσης	154
4.1.2.2. Γεννήτρια EM TEST Dito – Διάταξη δοκιμής	156
4.1.2.3. Γεννήτρια Schaffner NSG 433 – Διάταξη διακρίβωσης.....	158
4.1.2.4. Γεννήτρια Schaffner NSG 433 – Διάταξη δοκιμής.....	159
4.1.2.5. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – Διάταξη διακρίβωσης.....	160
4.1.2.6. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – Διάταξη δοκιμής.....	162
4.1.3. Στατιστική επεξεργασία κυματομορφών	163
4.1.3.1. Στατιστική ανάλυση κυματομορφών: ιστογράμματα, θεωρητικές κατανομές και αξιολόγηση προσαρμογής	163
4.1.4. Παρουσίαση συγκριτικής ανάλυσης ιστογραμμάτων και θεωρητικών κατανομών	165
4.1.4.1. Συγκριτική παρουσίαση ιστογραμμάτων και αποτελεσμάτων σύγκλισης για την 1 ^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση) για τις τρεις γεννήτριες ED.....	166
4.1.4.2. Συγκριτική παρουσίαση ιστογραμμάτων και αποτελεσμάτων σύγκλισης για τη 2 ^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) για τις τρεις γεννήτριες ESD	167
4.1.5. Σχολιασμός επί της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ESD.....	170
4.2. Προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή στη κυματομορφή ESD με χρήση φερριτών	171
4.2.1. Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία	171
4.2.2. Δείκτες σύγκλισης με την κυματομορφή αναφοράς με χειριστή και μεθοδολογία κατάταξης	174
4.2.2.1. Παρουσίαση των δεικτών σύγκλισης.....	174
4.2.2.2. Κατηγοριοποίηση των δεικτών σύγκλισης	177
4.2.3. Αποτελέσματα μετρήσεων	179
4.2.3.1. Γεννήτρια EM Test Dito – 1 ^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση).....	179
4.2.3.2. Γεννήτρια EM Test Dito – 2 ^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)	183
4.2.3.3. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – 1η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)	186

4.2.3.4. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – 2 ^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας).....	189
4.2.4. Επίδραση της θέσης τοποθέτησης του φερρίτη στην Κυματομορφή ESD	193
4.2.4.1. Πειραματική διερεύνηση της θέσης τοποθέτησης.....	193
4.2.4.2. Μηχανισμός δημιουργίας στάσιμων κυμάτων και συντονισμών	194
4.2.4.3. Επίδραση της θέσης τοποθέτησης στην αποτελεσματικότητα του φερρίτη	196
4.2.4.4. Συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες.....	196
4.2.5. Συμπεράσματα	197
4.2.5.1. Επίδραση των φερριτών στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	198
4.2.5.2. Σχόλια για τις φασματικές περιοχές επίδρασης των φερριτών	199
4.3. Προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή μέσω φερρίτη: διατάξεις καλωδίου γείωσης και γραμμικότητα.....	199
4.3.1. Διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων	201
4.3.1.1. Διάταξη μέτρησης	201
4.3.1.2. Διαδικασία αξιολόγησης για την προσομοίωση μέσω φερρίτη αρπάγης	202
4.3.1.3. Ανάλυση ευαισθησίας	204
4.3.2. Αποτελέσματα.....	205
4.3.2.1. Επίδραση του χειριστή για διαφορετικές διατάξεις γείωσης του καλωδίου της γεννήτριας ESD.....	205
4.3.2.2. Προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή με φερρίτες αρπάγης για διαφορετικές γεννήτριες ESD και διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου γείωσης	207
4.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα βάρη	210
4.3.3.1. Γραμμικότητα της επίδρασης του χειριστή και της προσομοίωσης μέσω φερρίτη ως προς το επίπεδο τάσης δοκιμής.....	214
4.3.4. Συμπεράσματα	217
Κεφάλαιο 5: Ρομποτικοί βραχίονες και ανθρώπινη επίδραση στις έμμεσες δοκιμές ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2	219
5.1. Ρομποτικοί βραχίονες και κυματομορφή ESD – προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή.....	219
5.1.1. Προσομοίωση ρομποτικού βραχίονα και μεθοδολογία μέτρησης	219
5.1.1.1. Χαρακτηριστικά κατασκευασμένου μεταλλικού χεριού και βραχίονα	220
5.1.1.2. Γενική διάταξη μέτρησης και μεθοδολογία.....	222
5.1.1.3. Μεθοδολογία αξιολόγησης αποτελεσμάτων βάσει σταθμισμένων υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής ESD	224
5.1.2. Μετρήσεις και αποτελέσματα αξιολόγησης.....	225
5.1.2.1. Διάταξη με γειωμένο μεταλλικό βραχίονα	225
5.1.2.2. Διάταξη μη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα	232

5.1.3. Συζήτηση	238
5.1.4. Συμπεράσματα	239
5.2. Ποσοτική ανάλυση της επίδρασης του χειριστή στις έμμεσες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και συστάσεις για ενισχυμένη αναπαραγωγικότητα	240
5.2.1. Μεθοδολογία	241
5.2.1.1. Μεθοδολογία μετρήσεων	241
5.2.1.2. Πειραματική διάταξη	243
5.2.2. Αποτελέσματα και παρατηρήσεις	246
5.2.2.1. Επίδραση του Χειριστή	246
5.2.2.2. Διάταξη του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ..	250
5.2.2.3. Μελέτη της αλληλεπίδρασης του φαινομένου επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ESD με προστατευτικό εξοπλισμό σώματος	253
5.2.3. Συμπεράσματα	256
Κεφάλαιο 6: Συμβολή – Πρωτοτυπία – Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	258
6.1. Συμβολή και Πρωτοτυπία	258
6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	261
Βιβλιογραφία	263
Δημοσιεύσεις	275
A. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά	275
B. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Διεθνών Συνεδρίων	275
Γ. Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Ελληνικών Συνεδρίων	276
Δ. Κεφάλαια Βιβλίων	277

Κεφάλαιο 1: Το φαινόμενο της Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης και το Πρότυπο IEC 61000-4-2

1.1. Ηλεκτροστατική εκφόρτιση

Η δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού ήταν ήδη γνωστή από το 600 π.Χ., όταν ο Θαλής ο Μιλήσιος παρατήρησε ότι η τριβή ενός κομματιού ήλεκτρου (κεχριμπάρι) μπορούσε να προκαλέσει την έλξη μικρών τεμαχίων, όπως χαρτί. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση συνιστά ένα από τα πλέον συνήθη φυσικά φαινόμενα και αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αιτίες πρόκλησης διαταραχών στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Πρόκειται για την αιφνίδια και στιγμιαία μεταφορά ηλεκτροστατικού φορτίου από μία επιφάνεια σε μία άλλη, η οποία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία υψηλών διαφορών δυναμικού. Η αντίστοιχη εκφόρτιση παράγει ρεύμα με απότομες χρονικές μεταβολές, ικανό να προκαλέσει φθορές και βλάβες σε ηλεκτρονικά συστήματα και συσκευές [1].

Με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη διαρκή σμίκρυνση των διαστάσεων των ηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες λειτουργούν πλέον σε χαμηλότερα δυναμικά και με υψηλότερες ταχύτητες χρονισμού, η ευαισθησία τους έναντι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αυξάνεται σημαντικά. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση συνιστά σοβαρό κίνδυνο για την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών διατάξεων, καθώς μπορεί να προκαλέσει είτε προσωρινές δυσλειτουργίες είτε μόνιμες βλάβες σε ευαίσθητα εξαρτήματα και συστήματα. Σημαντικά περιστατικά έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια, όπου η ηλεκτροστατική εκφόρτιση προκάλεσε εκρήξεις σε δεξαμενόπλοια κατά τον καθαρισμό των δεξαμενών τους, ζημιές και καταστροφή μικροκυκλωμάτων κατά τη μεταφορά, συναρμολόγηση και διακίνησή τους, εκρήξεις κατά την τροφοδοσία αεροσκαφών με καύσιμα, καθώς και βλάβες σε ηλεκτρονικά συστήματα οχημάτων. Επιπλέον, αναφέρονται περιστατικά σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις που εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της οδηγίας ATEX, όπου η ηλεκτροστατική εκφόρτιση αποτέλεσε πηγή ανάφλεξης σε εύφλεκτες ατμόσφαιρες, καθώς και βλάβες σε ηλεκτρονικές συσκευές σε οικιακά και επαγγελματικά περιβάλλοντα [2], [3].

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να προκληθεί μέσω δύο βασικών μηχανισμών. Ο πρώτος, γνωστός ως τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, λαμβάνει χώρα όταν δύο υλικά έρχονται σε επαφή και στη συνέχεια απομακρύνονται, με αποτέλεσμα ανταλλαγή ηλεκτρονίων και φόρτιση των επιφανειών τους με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Ο δεύτερος μηχανισμός, γνωστός ως φόρτιση εξ επαγωγής, παρατηρείται όταν ένα υλικό εκτίθεται σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, με συνέπεια να αποκτά περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας σε σχέση με το γειτονικό φορτισμένο σώμα [1].

1.1.1. Μηχανισμοί φόρτισης

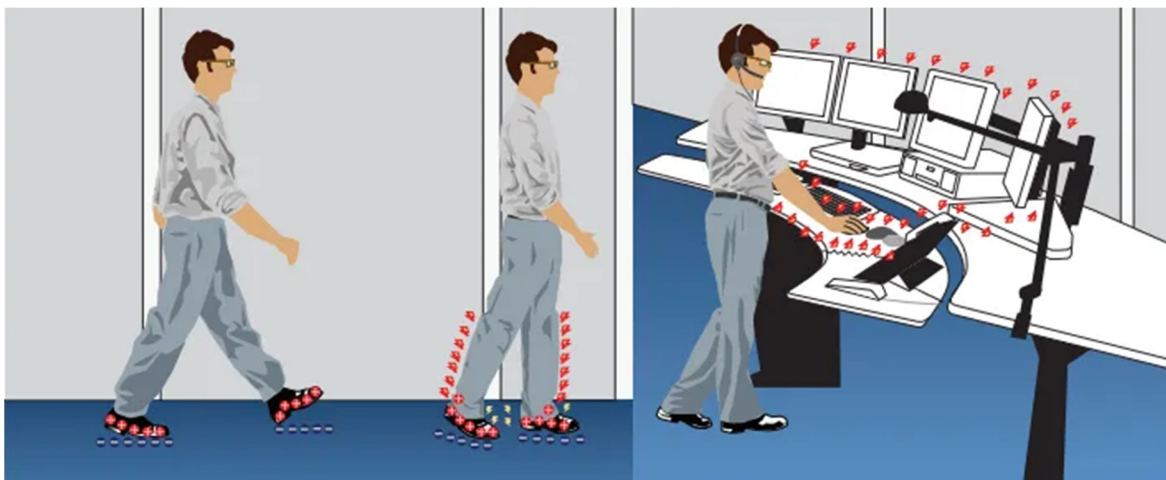
1.1.1.1. Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και υπάρξει σχετική κίνηση του ενός ως προς το άλλο (τριβή), κατά τον αποχωρισμό τους επέρχεται μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Αν και ο στατικός ηλεκτρισμός και, ειδικότερα, το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο συχνά συνδέονται με την ύπαρξη τριβής μεταξύ των υλικών, η τριβή αυτή δεν αποτελεί πάντοτε απαραίτητη προϋπόθεση. Ουσιαστικά, το

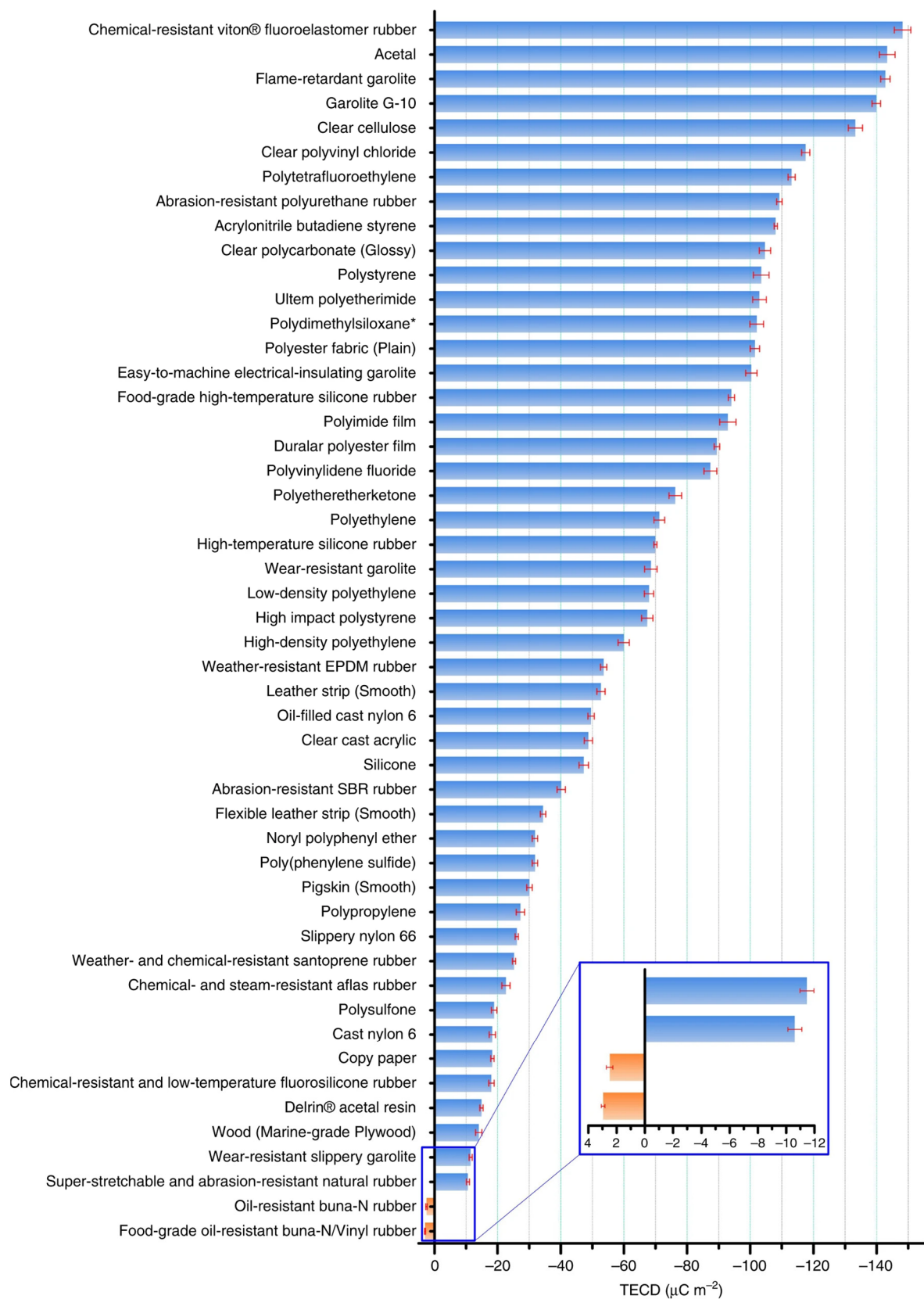
αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι ότι τα δύο υλικά φορτίζονται ηλεκτροστατικά με φορτία αντίθετης πολικότητας: το υλικό που χάνει ηλεκτρόνια αποκτά θετικό φορτίο, ενώ εκείνο που κερδίζει ηλεκτρόνια φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται, επομένως, στη φόρτιση που προκύπτει ως αποτέλεσμα επαφής και σχετικής κίνησης των επιφανειών των υλικών. Η φόρτιση αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών διαφορών δυναμικού, της τάξεως των 10–25 kV, συνοδευόμενη από αποθηκευμένη ενέργεια μερικών mJ. Κατά την εκφόρτιση, η διαφορά δυναμικού προκαλεί μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου και δημιουργία ρεύματος εκφόρτισης, του οποίου η κυματομορφή χαρακτηρίζεται από απότομες χρονικές μεταβολές, ικανές να επηρεάσουν σημαντικά τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό λόγω της μεταφερόμενης ενέργειας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η φόρτιση του ανθρώπινου σώματος κατά την κίνησή του πάνω σε μονωτικό δάπεδο. Όταν ένα άτομο, το οποίο αρχικά βρίσκεται σε ηλεκτρικά ουδέτερη κατάσταση, κινείται πάνω σε δάπεδο φορώντας υποδήματα κατασκευασμένα από συνθετικά μονωτικά υλικά, αυτά έρχονται σε τριβή με την επιφάνεια του δαπέδου, ανταλλάσσοντας ηλεκτρόνια. Το αποτέλεσμα είναι η αντίθετη ηλεκτροστατική φόρτιση δαπέδου και υποδημάτων και, δεδομένου ότι το ανθρώπινο σώμα είναι αγωγίμο, η φόρτιση μεταφέρεται και στον ίδιο τον άνθρωπο, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.1. Συνεπώς, δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού μεταξύ του σώματος του ανθρώπου και των γειτονικών αντικειμένων, καθιστώντας πιθανή την εκδήλωση ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [2].

Η ένταση του φαινομένου, καθώς και η πολικότητα του φορτίου που αποκτά ένα υλικό (θετική ή αρνητική), εξαρτώνται καθοριστικά από την ηλεκτραρνητικότητα των υλικών που εμπλέκονται. Στο Σχήμα 1.2 [4] παρουσιάζεται η ποσοτικοποιημένη τριβοηλεκτρική σειρά των υλικών, όπου αποτυπώνονται οι τιμές της πυκνότητας τριβοηλεκτρικού φορτίου (Triboelectric Charge Density - TECD) για πλήθος πολυμερών και άλλων υλικών. Τα υλικά που εμφανίζονται ψηλότερα στο διάγραμμα τείνουν να φορτίζονται θετικά, ενώ όσα βρίσκονται χαμηλότερα αποκτούν αρνητικό φορτίο μετά από επαφή με υδράργυρο, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως κοινό υλικό αναφοράς. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της μελέτης, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά TECD μεταξύ δύο υλικών, τόσο ισχυρότερη είναι η ανάπτυξη ηλεκτροστατικού φορτίου και, κατά συνέπεια, τόσο πιο έντονες είναι οι πιθανές ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Η νέα αυτή ποσοτική προσέγγιση επιτρέπει την ακριβέστερη επιλογή ζευγών υλικών για εφαρμογές, όπως οι νανογεννήτριες τριβοηλεκτρισμού ή η αποφυγή ηλεκτροστατικών κινδύνων.



Σχήμα 1.1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά τη βάδισή του πάνω σε δάπεδο [5]



Σχήμα 1.2: Ποσοτικοποιημένη τριβηλεκτρική σειρά υλικών βάσει TECD μετά από επαφή με υδράργυρο [4]

Πίνακας 1.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μίας φόρτισης [1]

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

Πίνακας 1.2: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV) συναρτήσει της υγρασίας [1]

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

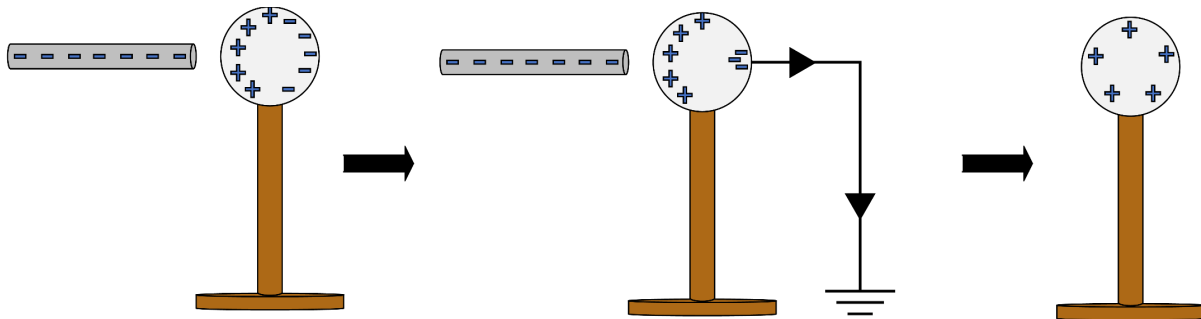
Επιπλέον, η μελέτη [4] αναδεικνύει τη σημασία παραμέτρων όπως η υγρασία και η τραχύτητα επιφανειών, οι οποίες μπορούν να τροποποιήσουν τις τιμές του TECD, προσδίδοντας πολυπλοκότητα στη διαχείριση του φαινομένου στην πράξη. Χαρακτηριστικά, η χρήση υγρού μετάλλου (υδραργύρου) ως υλικού επαφής αποτέλεσε κρίσιμο στοιχείο για τη μέτρηση ακριβών τιμών TECD, εξαιτίας της δυνατότητάς του να προσαρμόζεται στο σχήμα της επιφάνειας και να εξαλείφει ατέλειες στην επαφή [4].

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 1.1.

Σημειώνεται ότι η υγρασία του περιβάλλοντος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τη συχνότητα και το δυναμικό των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Υψηλή υγρασία στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται αυξημένη αγωγιμότητα του αέρα και, κατά συνέπεια, τα φορτία που δημιουργούνται διαρρέουν ευκολότερα προς τη γη, μειώνοντας την πιθανότητα συσσώρευσης στατικών φορτίων. Έτσι, οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις εμφανίζονται μεν συχνότερα, αλλά με μικρότερο δυναμικό. Αντιθέτως, ξηρή ατμόσφαιρα συνεπάγεται αυξημένη πιθανότητα συσσώρευσης ηλεκτροστατικών φορτίων, με αποτέλεσμα οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις να εκδηλώνονται σπανιότερα, αλλά να συνοδεύονται από υψηλότερο δυναμικό [6].

1.1.1.2. Επαγωγική φόρτιση

Όταν ένα φορτισμένο σώμα πλησιάσει ένα αρχικά αφόρτιστο σώμα, οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο της ίδιας πολικότητας με εκείνο του γειτονικού φορτισμένου σώματος θα διαρρεύσει, ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και την ύπαρξη αγώγιμης σύνδεσης. Συνεπώς, το αντικείμενο αποκτά μία περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας σε σχέση με το φορτισμένο σώμα και τελικά φορτίζεται, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3. Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις σε συνάρτηση με τη σχετική υγρασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.



Σχήμα 1.3: Στάδια ηλεκτροστατικής φόρτισης εξ' επαγωγής

Εκτός από τους δύο μηχανισμούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως (τριβοηλεκτρικό φαινόμενο και φόρτιση εξ' επαγωγής), υπάρχουν και άλλες δυναμικές πηγές δημιουργίας στατικών φορτίσεων, οι οποίες σχετίζονται με συγκεκριμένες φυσικές διεργασίες:

- **Δέσμη φορτισμένων ιόντων:** Τα ιόντα που παράγονται μέσω ιονισμού μεταφέρονται και προσκολλώνται σε επιφάνειες, μεταβάλλοντας το ηλεκτρικό τους δυναμικό.
- **Φόρτιση μέσω ψεκασμού (spray charging):** Σταγονίδια υγρού αποκτούν φορτίο κατά τη διέλευσή τους από ακροφύσια ή λόγω θραύσης της επιφάνειάς τους, με χαρακτηριστικές εφαρμογές σε βαφές, λιπαντικά και διαδικασίες επικάλυψης.
- **Φωτοηλεκτρική φόρτιση:** Φωτόνια επαρκούς ενέργειας προσκρούουν σε αγωγίμη ή ημιαγωγίμη επιφάνεια, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.
- **Φόρτιση τύπου Corona:** Τοπικά ισχυρά ηλεκτρικά πεδία προκαλούν ιονισμό του αέρα γύρω από αιχμηρές άκρες ή αγωγίμες προεξοχές.

Οι μηχανισμοί αυτοί είναι ικανοί να οδηγήσουν σε σημαντική συσσώρευση ηλεκτροστατικού φορτίου, το οποίο, ελλείψει οδού εκφόρτισης, μπορεί να παραμείνει αποθηκευμένο σε ένα αντικείμενο για μεγάλο χρονικό διάστημα, αυξάνοντας την πιθανότητα ανεπιθύμητων εκφορτίσεων.

1.1.2. Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Τα συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτελούν καθημερινό φαινόμενο, στο οποίο εμπλέκονται ποικίλα είδη σωμάτων και υλικών. Ανακύπτει, συνεπώς, η ανάγκη τα συμβάντα αυτά να κατηγοριοποιούνται σε διακριτές ομάδες και να μπορούν να μοντελοποιούνται ξεχωριστά, ώστε να εκτιμώνται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι επιδράσεις των εκφορτίσεων στην πράξη. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι τα εξής: [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 [7]:

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

όπου R_{ESD} είναι 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 (Equipment

Under Test - EUT), C_{ESD} η χωρητικότητα που είναι αρχικά φορτισμένη σε τάση V_{ESD} και L_s η αυτεπαγωγή της διαδρομής εκφόρτισης.

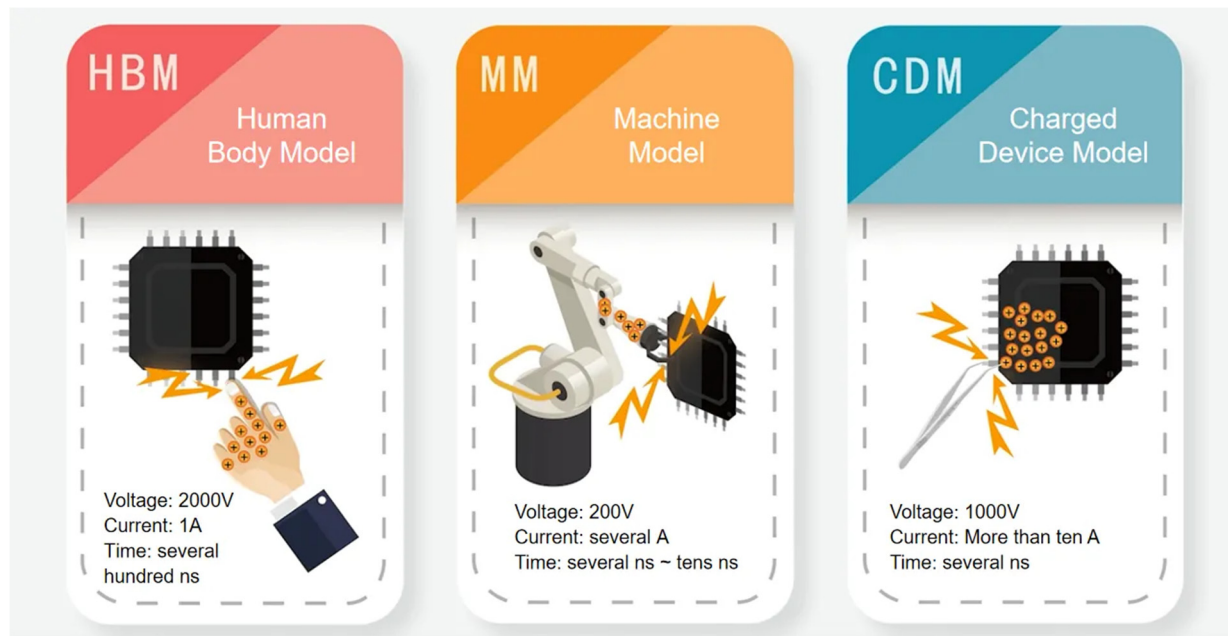
Τα τρία μοντέλα διαφοροποιούνται ουσιαστικά τόσο ως προς το φυσικό φαινόμενο που μοντελοποιούν, όσο και ως προς τις τιμές των παραμέτρων RLC που τα χαρακτηρίζουν. Τυπικές τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3.

Το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος αποτελεί το πλέον διαδεδομένο μοντέλο για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συσκευής και προσομοιώνει την εκφόρτιση ενός ανθρώπου σε ένα γειωμένο ηλεκτρονικό εξάρτημα. Αντίθετα, το μοντέλο της μηχανής προσομοιώνει την εκφόρτιση ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου προς μία συσκευή. Τέτοιο σενάριο συναντάται συχνά στην κατασκευή βιομηχανικών αυτοματισμών, κυρίως κατά την ενεργοποίηση μηχανημάτων, όπου τα μηχανήματα φορτίζονται ηλεκτρικά και στη συνέχεια εκφορτίζονται σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα μέσω επαφής.

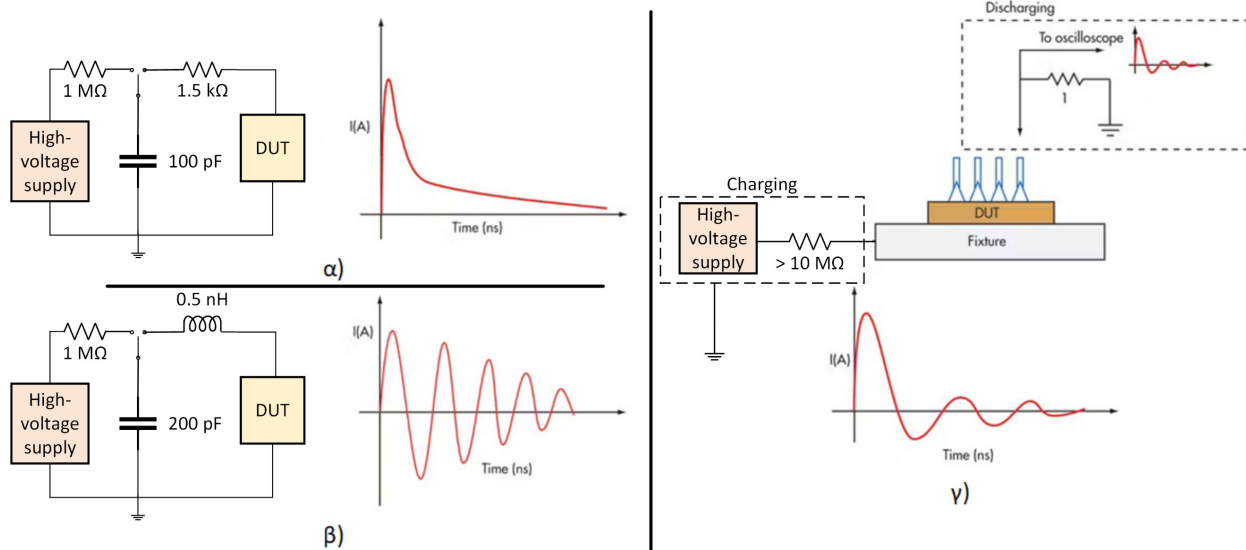
Πίνακας 1.3: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [2]

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 της φορτισμένης συσκευής διαφοροποιείται σημαντικά από τα δύο προηγούμενα, καθώς προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση από μία συσκευή και όχι προς μία συσκευή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο εξοπλισμός σε αυτοματοποιημένα περιβάλλοντα παραγωγής, όπου οι συσκευές λειτουργούν συνεχώς, με αποτέλεσμα τα ολοκληρωμένα κυκλώματά τους να φορτίζονται ηλεκτρικά με την πάροδο του χρόνου και να εκφορτίζονται τελικά όταν έρθουν σε επαφή με γειωμένο αγωγό [1], [2]. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται παραδείγματα χαρακτηριστικών σεναρίων εκφόρτισης ενώ στο Σχήμα 1.5 απεικονίζονται οι κυκλωματικές αναπαραστάσεις των τριών μοντέλων.



Σχήμα 1.4: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) [8]



Σχήμα 1.5: Η κυκλωματική αναπαράσταση με κυκλώματα RLC για τα τρία μοντέλα: α) HBM, β) MM, γ) CDM [9]

1.1.3. Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

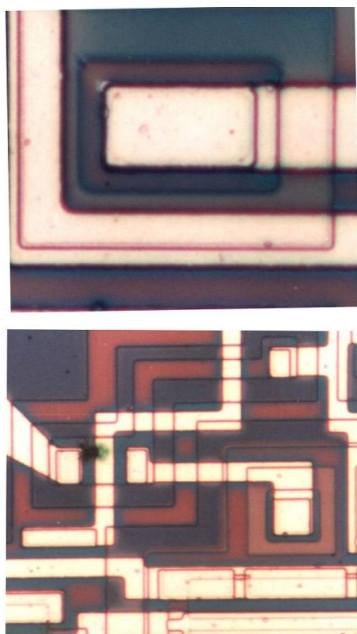
Σύμφωνα με το ESD ADV 1.0 [10], η ηλεκτροστατική βλάβη ορίζεται ως η αλλαγή σε ένα στοιχείο που προκαλείται από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, η οποία το καθιστά μη συμμορφούμενο με μία ή περισσότερες προδιαγραφές. Τα συμβάντα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στοχεύουν στην εξισορρόπηση της φόρτισης μεταξύ δύο αντικειμένων. Η μετακίνηση των φορτίων πραγματοποιείται με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υψηλά ρεύματα, τα οποία, σε συνδυασμό με τη σύνθετη αντίσταση του αντικειμένου, προκαλούν την ανάπτυξη τάσης και, κατά συνέπεια, ηλεκτρικού πεδίου.

Στον τομέα της ηλεκτρονικής βιομηχανίας, εξαρτήματα μικροσκοπικών διαστάσεων, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με τρανζίστορ, μπορεί να καταστραφούν από εκφορτίσεις τάξης μερικών δεκάδων Volt, προκαλώντας σοβαρές βλάβες στους ημιαγωγούς των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [11], [12], [13], [14]. Αυτό συμβαίνει λόγω τοπικής ανάπτυξης θερμότητας, υψηλών πυκνοτήτων ρεύματος και ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων. Οι βλάβες αυτές είναι δυνατό να εκδηλωθούν σε οποιοδήποτε στάδιο, από την κατασκευή έως και τη χρήση της συσκευής. Συγκεκριμένα, τα υψηλά ρεύματα που αναπτύσσονται λόγω του φαινομένου Joule παράγουν θερμότητα. Εφόσον ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας υπερβαίνει τον ρυθμό απαγωγής της, παρατηρείται θερμική διαρροή, η οποία ευθύνεται για την καταστροφή μεταλλικών διασυνδέσεων στα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Επιπλέον, οι υψηλές πυκνότητες ρεύματος μπορούν να οδηγήσουν σε διάσπαση ημιαγωγών, ενώ η υπέρβαση της διηλεκτρικής αντοχής των υλικών λόγω ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων επιφέρει καταστροφή των μονωτικών στρωμάτων. Εξάλλου, αν η αναπτυσσόμενη τάση υπερβεί τα όρια αντοχής των υλικών, επέρχεται διάσπαση των ημιαγωγών, προκαλώντας μη αναστρέψιμες βλάβες στα τρανζίστορ [13], [15].

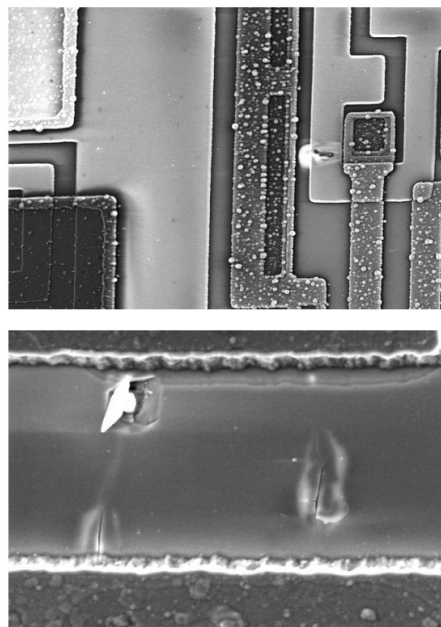
Η εκδήλωση φαινομένων καταστροφής λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι δυνατό να αποτυπωθεί οπτικά, εφόσον προηγηθεί αποσυσκευασία του εξαρτήματος και εφαρμογή οπτικής μικροσκοπίας. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα ίχνη καταστροφής, όπως ρωγμές, τήξη μετάλλων ή μαυρισμένες περιοχές, είναι ευδιάκριτα ακόμη και χωρίς προσφυγή σε τεχνικές υψηλότερης ανάλυσης. Το Σχήμα 1.6 παρουσιάζει ενδεικτικά παραδείγματα, όπου διακρίνεται (α) διάσπαση του διηλεκτρικού

στη γωνία παραθύρου επιμετάλλωσης και (β) φθορά στο κύκλωμα προστασίας εισόδου, λόγω υπέρβασης της διηλεκτρικής αντοχής ή αποτυχίας των στοιχείων περιορισμού τάσης.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο δεν επαρκεί για την επιβεβαίωση ή την εντοπισμένη ανάλυση της βλάβης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM), το οποίο προσφέρει υψηλή ανάλυση και δυνατότητα επιφανειακής μορφολογικής χαρτογράφησης. Σε συνδυασμό με τεχνικές όπως η εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων και το ρεύμα επαγόμενης δέσμης ηλεκτρονίων (Electron Beam Induced Current – EBIC), μπορεί να εντοπιστεί το ακριβές σημείο αστοχίας, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου το πρόβλημα εντοπίζεται εντός του πυρήνα του ημιαγωγού. Επιπλέον, η τεχνική EBIC καθιστά εφικτή την ανάλυση ενεργών περιοχών και μεταλλικών γραμμών με βάση τη χωρική κατανομή του συλλεγόμενου ρεύματος. Το Σχήμα 1.7 απεικονίζει δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα: (α) ολοκληρωμένο κύκλωμα CMOS το οποίο υπέστη ηλεκτροστατική εκφόρτιση τάσης δοκιμής 2 kV και (β) διπολικό κύκλωμα υπό ταυτόσημες συνθήκες καταπόνησης [16].



Σχήμα 1.6: Οπτική μικροσκοπική απεικόνιση βλαβών λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: (α) διάσπαση του διηλεκτρικού στην περιοχή γωνίας παραθύρου επιμετάλλωσης· (β) φθορά στο κύκλωμα προστασίας εισόδου [16]



Σχήμα 1.7: Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) σε εξαρτήματα που υπέστησαν ηλεκτροστατική εκφόρτιση με τάση δοκιμής 2 kV: (α) ολοκληρωμένο κύκλωμα CMOS· (β) διπολικό κύκλωμα [16]

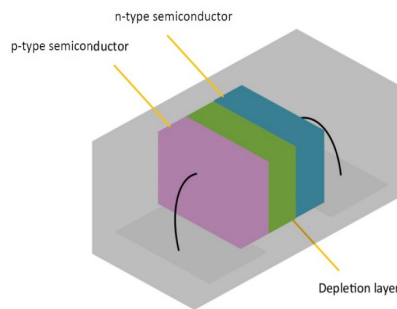
Πέραν του τομέα της ηλεκτρονικής, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση έχει σημαντικές επιπτώσεις και σε μακροσκοπικό επίπεδο, όπου ενδέχεται να προκαλέσει σοβαρά ζητήματα ασφαλείας, όπως σπινθήρες, αναφλέξεις ή ακόμα και εκρήξεις, σε κλάδους όπως η πετρελαϊκή, η χημική, η φαρμακευτική και η στρατιωτική βιομηχανία. Όταν ηλεκτροστατικά φορτία συσσωρεύονται σε επιφάνειες ή υλικά χωρίς κατάλληλη εκτόνωση, υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ηλεκτρικού σπινθήρα κατά την απότομη εκφόρτιση. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε περιβάλλοντα όπου υπάρχουν εύφλεκτα αέρια, σκόνες ή υγρά, καθώς ένας σπινθήρας μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη και, δυνητικά, έκρηξη.

Στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση αποτελεί σημαντικό κίνδυνο, καθώς κατά τις διεργασίες μεταφοράς, αποθήκευσης ή διύλισης πετρελαϊκών προϊόντων, δημιουργούνται ηλεκτροστατικά φορτία λόγω τριβής ή ροής υγρών. Αν αυτά τα φορτία δεν εκτονωθούν σωστά, μπορεί να προκληθούν σπινθήρες, οι οποίοι ενδέχεται να οδηγήσουν σε εκρήξεις σε δεξαμενές αποθήκευσης ή σε πλατφόρμες εξόρυξης. Σε χημικές και φαρμακευτικές εγκαταστάσεις, η παρουσία εύφλεκτων διαλυτών, σκονών και αερίων καθιστά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση κρίσιμο παράγοντα κινδύνου. Η συσσώρευση στατικού ηλεκτρισμού κατά τη διάρκεια ανάμειξης, επεξεργασίας ή αποθήκευσης αυτών των ουσιών μπορεί να προκαλέσει ανεξέλεγκτες χημικές αντιδράσεις, βλάβες στον εξοπλισμό και επικίνδυνες εκρήξεις. Στον στρατιωτικό και αμυντικό τομέα, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις διαχείρισης πυρομαχικών, εκρηκτικών ή καυσίμων. Ένα ανεξέλεγκτο ηλεκτροστατικό φορτίο μπορεί να προκαλέσει πρόωρη έκρηξη εκρηκτικών υλών ή πυρομαχικών, θέτοντας σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και υποδομές [3].

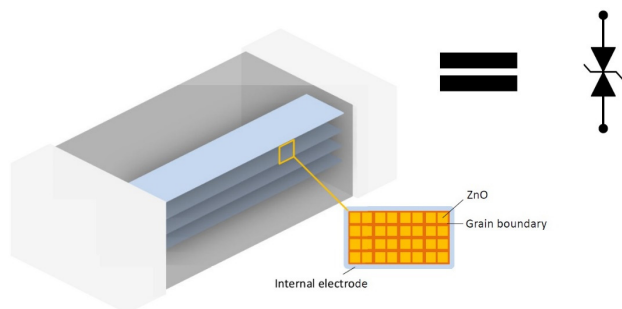
Ιδιαίτερα επικίνδυνα είναι και τα δευτερεύοντα ηλεκτρικά τόξα που μπορεί να δημιουργηθούν εντός του εξοπλισμού, πυροδοτώντας περαιτέρω φαινόμενα, όπως η διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων στα κυκλώματα, με πιθανότητα διατάραξης της κανονικής λειτουργίας τους [17], [18], [19]. Επιπλέον, η ηλεκτρική επαγωγή λόγω χωρητικής σύζευξης σε επιμέρους τμήματα του εξοπλισμού και η μαγνητική επαγωγή λόγω επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εγχεόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, συνιστούν σημαντικές πηγές παρεμβολών [2].

Για την προστασία του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού, είναι κρίσιμη η εφαρμογή προληπτικών μέτρων και η ανάπτυξη τεχνικών προστασίας, ώστε να περιοριστούν οι δυσμενείς συνέπειες των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Ένα βασικό προληπτικό μέτρο είναι η αποτροπή του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, το οποίο μπορεί να περιοριστεί με την επικάλυψη μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή με αγώγιμο στρώμα. Εξίσου χρήσιμα είναι τα αντιστατικά δάπεδα, τα οποία αποτελούνται από υλικά με μονωτικές ιδιότητες αλλά με επαρκώς χαμηλή αντίσταση, ώστε να διευκολύνουν την εκφόρτιση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων προς τη γη. Έρευνες δείχνουν ότι η αντίσταση των δαπέδων αυτών πρέπει να είναι μικρότερη από 10 MΩ, χωρίς όμως να είναι τόσο χαμηλή ώστε να τίθεται σε κίνδυνο η ασφάλεια των εργαζομένων [11]. Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχουν η πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού για την αποτροπή δευτερευουσών εκφορτίσεων, η θωράκιση και η γείωση των συσκευών ώστε να παρέχεται εναλλακτική διαδρομή στο ηλεκτρικό ρεύμα, η θωράκιση των κυκλωμάτων έναντι πεδίων επαγωγής, καθώς και η εγκατάσταση συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό [2], [20], [21].

Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει η εφαρμογή κατάλληλων διατάξεων προστασίας στο στάδιο σχεδιασμού, ώστε να παρεμποδίζεται η καταστροφική ροή ρεύματος προς ευαίσθητα κυκλώματα. Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων λύσεων συγκαταλέγονται οι διόδοι περιορισμού υπερτάσεων (TVS— Transient Voltage Suppression) και τα βαρίστορ (Metal-Oxide Varistor – MOV), τα οποία εγκαθίστανται παράλληλα με τα προστατευόμενα κυκλώματα και αναλαμβάνουν τον περιορισμό των υπερτάσεων σε ασφαλή επίπεδα. Οι TVS διόδοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε γραμμές σήματος υψηλής ταχύτητας και εξασφαλίζουν προστασία από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και μεταβατικά φαινόμενα, σύμφωνα με προδιαγραφές στο επίπεδο συστήματος. Αντίστοιχα, τα βαρίστορ παρέχουν διπολική προστασία και χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα όπου απαιτείται σταθερή και συμμετρική απόκριση, όπως σε γραμμές ισχύος ή γενικής χρήσης. Το Σχήμα 1.8 και το Σχήμα 1.9 παρουσιάζουν χαρακτηριστικά παραδείγματα TVS διόδου και chip varistor αντίστοιχα, όπως αποτυπώνονται σε τυπικές σχεδιάσεις προστασίας.



Σχήμα 1.8: Απλοποιημένη εσωτερική δομή διόδου TVS που βασίζεται σε PN επαφή και το φαινόμενο χιονοστιβάδας [22]



Σχήμα 1.9: Σχηματική αναπαράσταση chip varistor με κόκκους ZnO και ημιαγωγικά όρια μεταξύ των κόκκων [22]

Τέλος, όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο περίβλημα (enclosure), μπορούν να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Ωστόσο, προκειμένου τα περιβλήματα αυτά να είναι αποτελεσματικά, πρέπει να είναι συμπαγή, χωρίς οπές, αρμούς ή ανοίγματα, μέσα από τα οποία οι κύριες εκφορτίσεις θα μπορούσαν να επηρεάσουν είτε απευθείας τα εσωτερικά κυκλώματα είτε έμμεσα μέσω προεξοχών, διακοπών ή πλήκτρων που διαπερνούν το περίβλημα.

1.2. Το Πρότυπο IEC 61000-4-2

Όπως φάνηκε από τις προηγούμενες ενότητες, τα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορούν να προκαλέσουν πληθώρα προβλημάτων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, οδηγώντας τα σε αστοχίες ή ακόμη και σε ολική καταστροφή [23], [24], [25]. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα που διατίθενται στην αγορά είναι ικανά να λειτουργούν απρόσκοπτα, συνυπάρχοντας αρμονικά με τα υπόλοιπα συστήματα στο περιβάλλον λειτουργίας τους, έχουν αναπτυχθεί Πρότυπα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility, EMC).

Τα Πρότυπα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας καθορίζουν απαιτήσεις και μεθόδους δοκιμών, ορίζουν τα ελάχιστα επίπεδα δοκιμών καθώς και τα αποδεκτά όρια για τα αποτελέσματα αυτών, με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσο ένα ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό σύστημα διαθέτει επαρκή ηλεκτρομαγνητική ατρωσία. Επιπλέον, προσδιορίζουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος δοκιμών, τον εξοπλισμό που απαιτείται για την εκτέλεση τους, καθώς και τις τεχνικές προδιαγραφές του εξοπλισμού αυτού. Ο απώτερος στόχος των Προτύπων είναι οι δοκιμές να είναι επαναλήψιμες και αναπαραγώγιμες, εξασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

Τα Πρότυπα EMC είτε εκπονούνται και θεσπίζονται από διεθνείς, εθνικούς ή περιφερειακούς οργανισμούς και επιτροπές για λογαριασμό διοικητικών αρχών (όπως, για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Ένωση αναθέτει την κατάρτιση των Προτύπων EMC στην European Committee for Standardization (CEN) και στην European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)), είτε οι ίδιοι οι διοικητικοί ή/και ρυθμιστικοί φορείς θεσπίζουν απευθείας τα Πρότυπα και τους αντίστοιχους κανονισμούς EMC. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρότι τα πρότυπα σε γενικές γραμμές θεωρούνται προαιρετικής εφαρμογής, αυτά συνιστούν σχεδόν μονόδρομο υποχρεωτικής εφαρμογής στις περισσότερες χώρες. Ειδικά στην περίπτωση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η συμμόρφωση αποτελεί νομική απαίτηση για τη χορήγηση της σήμανσης CE (Conformité Européenne) και για τη νόμιμη κυκλοφορία του προϊόντος στην αγορά.

Το πλέον επικρατές Πρότυπο για την εκτέλεση δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχει εκπονηθεί από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission, IEC) και είναι το

Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27]. Το Πρότυπο αυτό αποτελεί το δεύτερο τμήμα του τετάρτου μέρους της σειράς IEC 61000:1995, η οποία αφορά στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Σκοπός του Προτύπου IEC 61000-4-2 είναι η παροχή τεχνικής καθοδήγησης για τη διεξαγωγή δοκιμών, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ένας εξοπλισμός ή σύστημα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί απρόσκοπτα τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά από ένα γεγονός ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, εξασφαλίζοντας παράλληλα την απαραίτητη επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων.

1.2.1. Ιστορική αναδρομή

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 διαθέτει μακρά ιστορία, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Ιστορική αναδρομή του Προτύπου IEC 61000-4-2 [28]

Πρότυπο	Έτος	Σχόλια
IEC pub. 801-2 Ed.1	1984	Πρώτη έκδοση του Προτύπου ESD: Μόνο μέθοδος εκφόρτισης αέρος
IEC pub. 801-2 Ed.2	1989	Μέθοδος εκφόρτισης επαφής
IEC 801-2	1991	Μικρή αναθεώρηση
IEC 1000-4-2	1995	Αναρίθμηση και μικρή αναθεώρηση
IEC 61000-4-2	1997	Αναρίθμηση
77B/378/CDV	2003	Η πρόταση αναθεωρημένης κυματομορφής απορρίφθηκε στη φάση CDV
IEC 61000-4-2 Ed.2	2008	Ισχύουσα έκδοση του Προτύπου
IEC 61000-4-2 Ed.3	2025	Σημαντική αναθεώρηση του Προτύπου

Η αρχική έκδοση του Προτύπου IEC 801-2 περιλάμβανε αποκλειστικά τη μέθοδο εκφόρτισης μέσω σπινθήρα στον αέρα (air discharge). Ωστόσο, λόγω της αστάθειας που χαρακτηρίζει την εκφόρτιση αέρος, αναπτύχθηκε το 1989 η μέθοδος εκφόρτισης επαφής (contact discharge). Η μέθοδος αυτή προσομοιώνει το ρεύμα εκφόρτισης από το φορτισμένο ανθρώπινο σώμα, αξιοποιώντας ρελέ υψηλής τάσης προκειμένου να επιτευχθεί βελτιωμένη επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών.

Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, διαπιστώθηκε ότι το επίπεδο δυσλειτουργίας των υπό δοκιμή διατάξεων επηρεάζεται σημαντικά από τις αποσβεννυμένες ταλαντώσεις (ringing), οι οποίες εμφανίζονται στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης που παράγεται κατά τη μέθοδο επαφής. Οι ταλαντώσεις αυτές παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ανάλογα με τον κατασκευαστή της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD generator), γεγονός που εγείρει ζητήματα σχετικά με τη συγκρισιμότητα των δοκιμών μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων και εξοπλισμών.

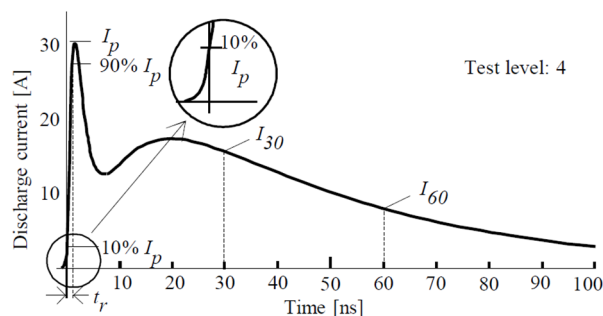
Κατά τη διαδικασία αναθεώρησης του Προτύπου, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς συζητήσεις αναφορικά με την ανάγκη καταστολής των ταλαντώσεων αυτών, χωρίς ωστόσο να καθοριστούν τελικά ικανοποιητικές ή οριστικές προδιαγραφές για το φαινόμενο. Παρότι η τρίτη έκδοση του Προτύπου έχει πλέον οριστικοποιηθεί, εισάγοντας μία νέα παράμετρο (I_{P2}) η οποία ρυθμίζει το μέγιστο ρεύμα της δεύτερης αιχμής στο χρονικό εύρος 10 ns – 40 ns από τη στιγμή που το ρεύμα έλαβε για πρώτη φορά τη τιμή του 10% της τιμής I_P , το ζήτημα των ταλαντώσεων εξακολουθεί να παραμένει άλυτο, συνιστώντας σημαντική πρόκληση για τη μελλοντική βελτίωση της αξιοπιστίας και της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, εξετάζεται η πρόοδος των αναθεωρήσεων του Προτύπου IEC 61000-4-2 για τις δοκιμές ατρωσίας σε επίπεδο συστήματος, καθώς και τα ζητήματα που συνεχίζουν να

ανακύπτουν στον τομέα αυτό, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων για περαιτέρω βελτίωση της μεθοδολογίας και της εφαρμογής των δοκιμών.

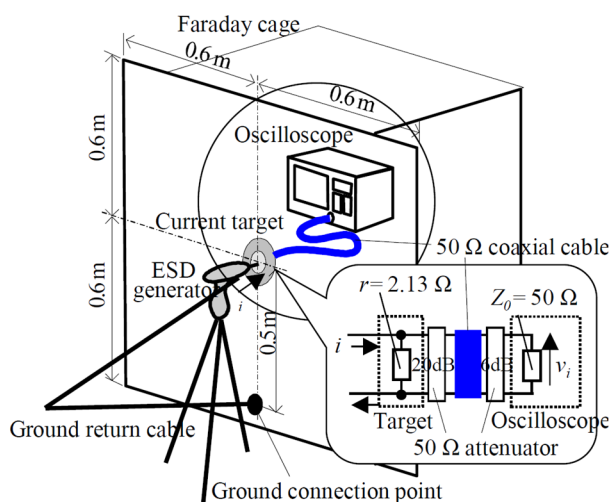
1.2.2. Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης

Το Σχήμα 1.10 απεικονίζει τις προδιαγραφές της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, όπως αυτές ορίζονται στη δεύτερη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 (2008) [26], ενώ η διάταξη διακρίβωσης αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.11.



Test level	Charge voltage kV	First peak Current I_p $\pm 15\%$ A	Rise time t_r $\pm 25\%$ ns	Current I_{30} at 30 ns $\pm 30\%$ A	Current I_{60} at 60 ns $\pm 30\%$ 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

Σχήμα 1.10: Τυπική κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής και οι προδιαγραφές της (2008) [28]



Σχήμα 1.11: Διάταξη μέτρησης για την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης (2008) [28]

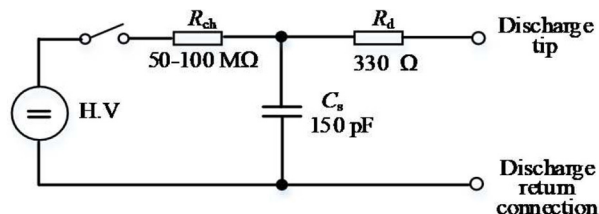
Συγκεκριμένα, η διάταξη διακρίβωσης πρέπει να περιλαμβάνει:

- παλμογράφο με αναλογικό εύρος ζώνης τουλάχιστον 2 GHz,
- σύστημα ανιχνευτή ρεύματος–εξασθενητή–ομοαξονικού καλωδίου,
- βολτόμετρο υψηλής τάσης ικανό να μετρήσει τουλάχιστον 15 kV· σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η χρήση ηλεκτροστατικού βολτομέτρου, ώστε να αποφεύγεται η φόρτωση της εξόδου,
- κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης με τοποθετημένο στο κέντρο του τον ανιχνευτή ρεύματος και ελάχιστη απόσταση 0,6 m από κάθε άκρο του επιπέδου,
- εξασθενητές επαρκούς ισχύος, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μέτρησης.

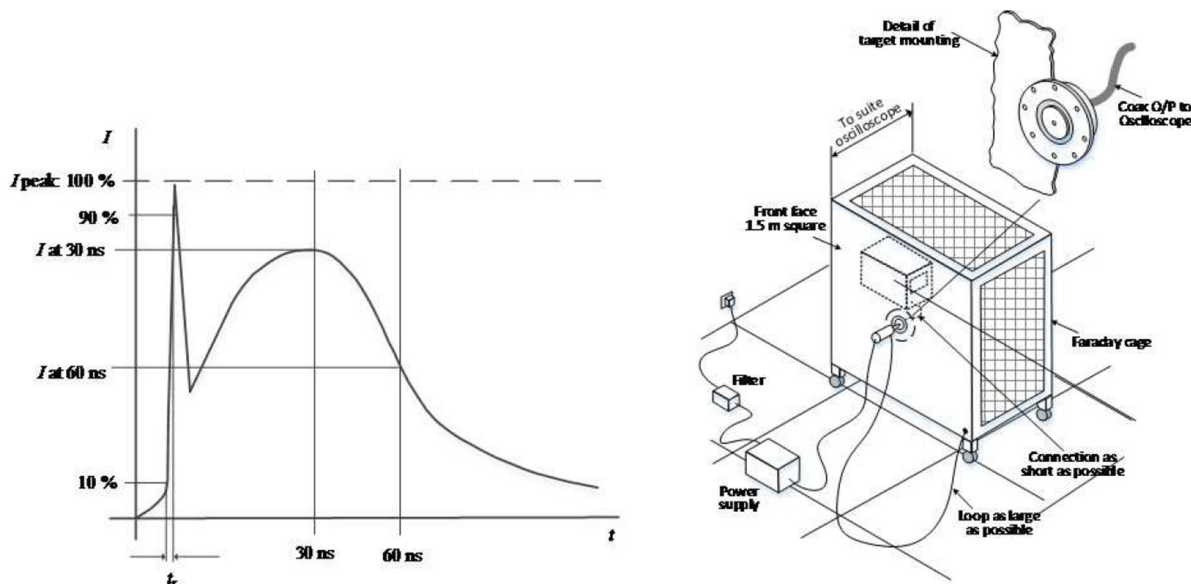
Σύμφωνα με τις οδηγίες διακρίβωσης του Προτύπου, ο ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) ρεύματος τοποθετείται στο κέντρο του κατακόρυφου επιπέδου, ενώ το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας συνδέεται 0,5 m κάτω από τον στόχο, στο κάτω κεντρικό σημείο του επιπέδου. Το καλώδιο πρέπει να διαμορφώνεται ώστε να σχηματίζει ισοσκελές τρίγωνο, με την αναδίπλωσή του να γίνεται από το μέσον του μήκους του. Κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης, δεν επιτρέπεται η επαφή του καλωδίου γείωσης με το δάπεδο. Η γεννήτρια τοποθετείται σε τρίποδο ή ισοδύναμη μη μεταλλική βάση χαμηλών απωλειών, ενώ η τροφοδοσία της οφείλει να γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που θα χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή.

Οι εν λόγω προδιαγραφές, καθώς και η διάταξη διακρίβωσης, δεν έχουν παρουσιάσει ουσιώδεις μεταβολές από το 1989, οπότε και καθορίστηκαν η αρχιτεκτονική του κυκλώματος της γεννήτριας

ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι προδιαγραφές της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, καθώς και η διαδικασία διακρίβωσης, όπως αποτυπώνονται στα Σχήματα 1.12 και 1.13.



Σχήμα 1.12: Απλοποιημένο διάγραμμα της διάταξης γεννήτριας ESD με μέθοδο εκφόρτισης επαφής (1989) [28]



Σχήμα 1.13: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής και διάταξη μέτρησης (1989) [28]

Περί το έτος 2000 εξετάστηκε πρόταση ορισμού της κυματομορφής εκφόρτισης, με στόχο τη μείωση των ταλαντώσεων. Η βασική ιδέα ήταν η επιβράδυνση της καθόδου της πρώτης αιχμής, ώστε να μετριάστούν οι ταλαντώσεις που παρατηρούνται στη δεύτερη αιχμή. Ειδικότερα, προτάθηκε ρυθμός μεταβολής περίπου 4,2 A/ns ανά 1 kV για την πτωτική φάση της πρώτης αιχμής. Η πρόταση απορρίφθηκε λόγω ανησυχιών ότι η υλοποίησή της ως προδιαγραφή του Προτύπου εξαρτάται από τη μετρολογική τεχνική και τις επιδόσεις του παλμογράφου. Ωστόσο, η ιδέα κρίθηκε εύλογη και εξετάστηκε η υιοθέτηση τυπικής κυματομορφής εκφόρτισης.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε πρόταση ορισμού της διάρκειας παλμού της πρώτης αιχμής, ως μέτρο περιορισμού των ταλαντώσεων της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Πραγματοποιήθηκαν διεργαστηριακές δοκιμές (Round Robin tests) από την Ιαπωνική και την Αμερικανική Εθνική Επιτροπή [29], [30], χρησιμοποιώντας γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τιμή διάρκειας παλμού πρώτης αιχμής 60 % του I_p , επεκτεινόμενη μεταξύ 1,5 ns και 3,5 ns, σε συνδυασμό με πολλαπλές διατάξεις υπό δοκιμή (EUT). Η συμβολή της εν λόγω προδιαγραφής στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας επιβεβαιώθηκε πειραματικά. Παρά τη θετική επίδραση που διαπιστώθηκε στην αναπαραγωγιμότητα, η βελτίωση δεν κρίθηκε επαρκής ώστε να ενσωματωθεί ως επίσημη προδιαγραφή στο Πρότυπο. Παρ' όλα αυτά, ορίστηκε μία ιδανική κυματομορφή με διευρυμένη πρώτη αιχμή ως αναφορά, η οποία περιγράφεται με τη χρήση της εξίσωσης του Heidler [31]:

$$I(t) = \frac{I_1}{k_1} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} * \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)^n + \frac{I_2}{k_2} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} * \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right)^n \quad (2)$$

όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right) \quad (3)$$

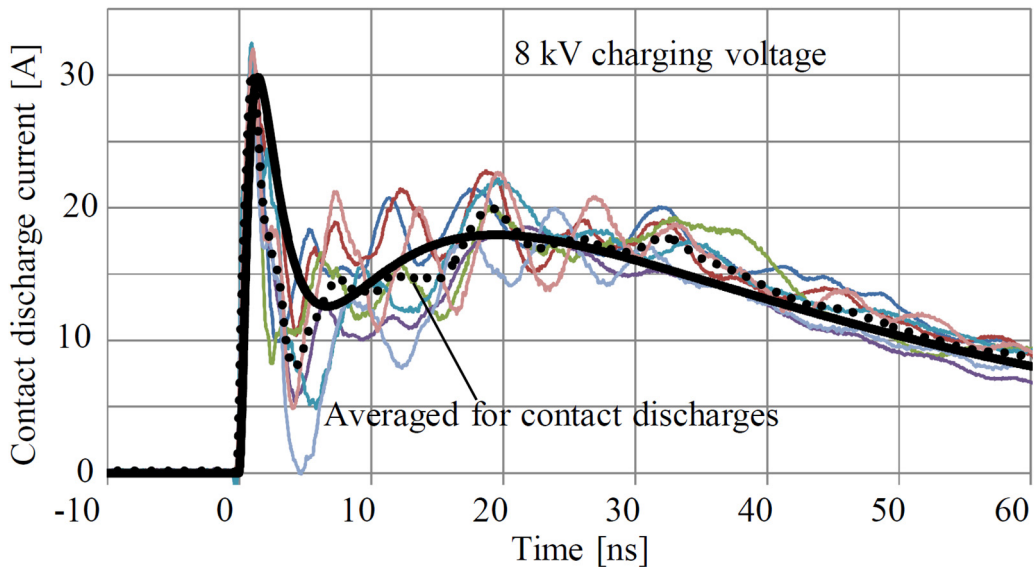
$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right) \quad (4)$$

και

$$\tau_1 = 1,1 \text{ ns}; \tau_2 = 2,0 \text{ ns}; \tau_3 = 12,0 \text{ ns}; \tau_4 = 37,0 \text{ ns}; I_1 = 16,6 \text{ A (at 4 kV)}; I_2 = 9,3 \text{ A (at 4 kV)}; n = 1,8$$

Η ιδανική κυματομορφή περιγράφεται μόνο μέσω τεσσάρων παραμέτρων: το μέγιστο της πρώτης αιχμής (I_p), οι τιμές ρεύματος 30 ns 60 ns αντίστοιχα από τη στιγμή που το ρεύμα έλαβε για πρώτη φορά τη τιμή 10% του μέγιστου ρεύματος (I_{30} , I_{60}) και ο χρόνος ανόδου της πρώτης αιχμής (t_r), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.13.

Παρά τον ορισμό αυτής της ιδανικής κυματομορφής, η απουσία πρόσθετων περιορισμών οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών εκφόρτισης που παράγονται από διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπως ανέδειξε συγκριτική αντιπαραβολή εκφορτίσεων [32] από οκτώ διαφορετικά μοντέλα γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κατασκευασμένων σε διαφορετικές χώρες. Οι αποκλίσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στην περιοχή από την πρώτη έως τη δεύτερη αιχμή, όπου παρατηρείται έντονο φαινόμενο ταλάντωσης, το οποίο επηρεάζει τις τιμές των παραμέτρων I_p , t_r και I_{30} . Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 1.14, δημιουργώντας εύλογες ανησυχίες σχετικά με την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών [32].



Σχήμα 1.14: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής για διάφορες γεννήτριες ESD [28]

1.3. Μελέτες σχετικά με την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σειρά δημοσιεύσεων που πραγματεύονται διαφορετικές παραμέτρους οι οποίες επιδρούν στην παραγόμενη κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και ειδικότερα στο σκέλος που αφορά τη δεύτερη αιχμή της. Πολλοί μελετητές έχουν εκφράσει ανησυχίες αναφορικά με την αναπαραγωγιμότητα και την επαναληψιμότητα της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων βάσει του Προτύπου IEC 61000-4-2, τόσο για εκφορτίσεις επαφής όσο και για εκφορτίσεις αέρος. Ειδικότερα, η δεύτερη κορυφή της κυματομορφής του ρεύματος, η οποία περιγράφεται μέσω της παραμέτρου I_{P2} , φαίνεται να συγκεντρώνει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά και τις αντοχές των εξαρτημάτων κατά την εκφόρτιση.

Πέραν των ανησυχιών αυτών, αρκετοί ερευνητές έχουν επιχειρήσει τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας και της επαναληψιμότητας μέσω διαφόρων τεχνικών προσεγγίσεων, με στόχο τη σταθεροποίηση κρίσιμων παραμέτρων όπως το I_P , το t_r , το I_{P2} , το I_{30} και το I_{60} . Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τέσσερις χαρακτηριστικές μελέτες που αναδεικνύουν διαφορετικές πτυχές του ζητήματος και προτείνουν λύσεις για τη μείωση των αποκλίσεων που παρατηρούνται στις κυματομορφές της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

1.3.1. Επίδραση της διάταξης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας στην κυματομορφή ρεύματος

Στην μελέτη [33] διερευνώνται οι επιδράσεις μεταβολών στη διάταξη δοκιμής επί της κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με έμφαση στην περιοχή της δεύτερης αιχμής, η οποία αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26]. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι ακόλουθες παράμετροι:

- Το μήκος του καλωδίου επιστροφής (2 m έναντι 3 m),
- Η διαμόρφωση του βρόχου επιστροφής (τυπικός βρόχος έναντι τροποποιημένου),
- Το σημείο σύνδεσης του καλωδίου επιστροφής στη γειωμένη επιφάνεια.

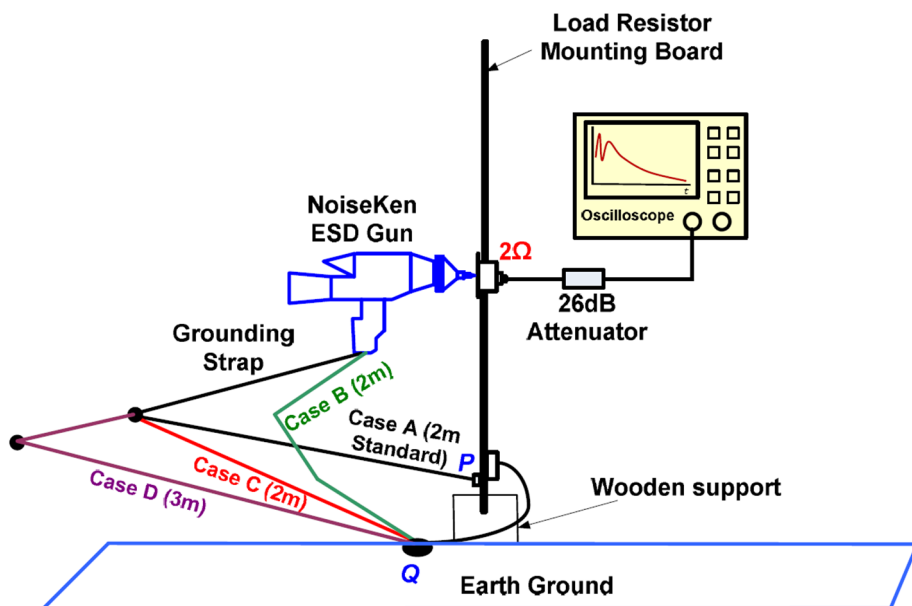
Η αλλαγή του μήκους του καλωδίου επιστροφής επηρεάζει τη συνολική επαγωγή του συστήματος, γεγονός που μπορεί να μεταβάλει τις ταλαντώσεις που παρατηρούνται μετά την πρώτη αιχμή της κυματομορφής. Η χρήση καλωδίου μήκους 3 m προκύπτει συχνά ως πρακτική ανάγκη κατά τις δοκιμές σε εξοπλισμό μεγάλου ύψους ή ειδικών διαστάσεων, καθώς το Πρότυπο επιτρέπει αυτή την επιμήκυνση στις περιπτώσεις δοκιμών επιτραπέζιου ή επιδαπέδιου εξοπλισμού. Παράλληλα, η διαμόρφωση του βρόχου επιστροφής, είτε ακολουθεί την τυπική συνδεσμολογία είτε μια τροποποιημένη διάταξη, επηρεάζει την επαγωγική και χωρητική σύζευξη μεταξύ του βρόχου και του περιβάλλοντος χώρου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις τόσο στο πλάτος της δεύτερης αιχμής, όσο και στη χρονική καθυστέρησή της σε σχέση με την πρώτη αιχμή.

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος αποδεικνύεται το σημείο σύνδεσης του καλωδίου επιστροφής στη γειωμένη επιφάνεια. Η θέση αυτή επηρεάζει τη διαδρομή επιστροφής του ρεύματος και καθορίζει τις συνθήκες κυματικής ανάκλασης, οι οποίες με τη σειρά τους μεταβάλλουν την κυματομορφή, ειδικά στο χρονικό παράθυρο μεταξύ 10 ns και 40 ns. Η περιοχή αυτή είναι καθοριστική, καθώς σύμφωνα με τη νεότερη έκδοση του Προτύπου [27], η τιμή της δεύτερης αιχμής πρέπει να ελέγχεται αυστηρά, ώστε να

περιορίζονται οι αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [34]. Στο πλαίσιο της μελέτης, παρουσιάζονται συγκριτικές κυματομορφές για τις ανωτέρω παραμέτρους, καθώς και ποσοτική αξιολόγηση των αποκλίσεων των δεικτών I_P , t_r , I_{30} και I_{60} σε σχέση με τη τυποποιημένη διάταξη του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26]. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν ότι ακόμη και μικρές μεταβολές στη διάταξη δοκιμής μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις στην παραγόμενη κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της αυστηρής τυποποίησης των συνθηκών διακρίβωσης για την εξασφάλιση επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας.

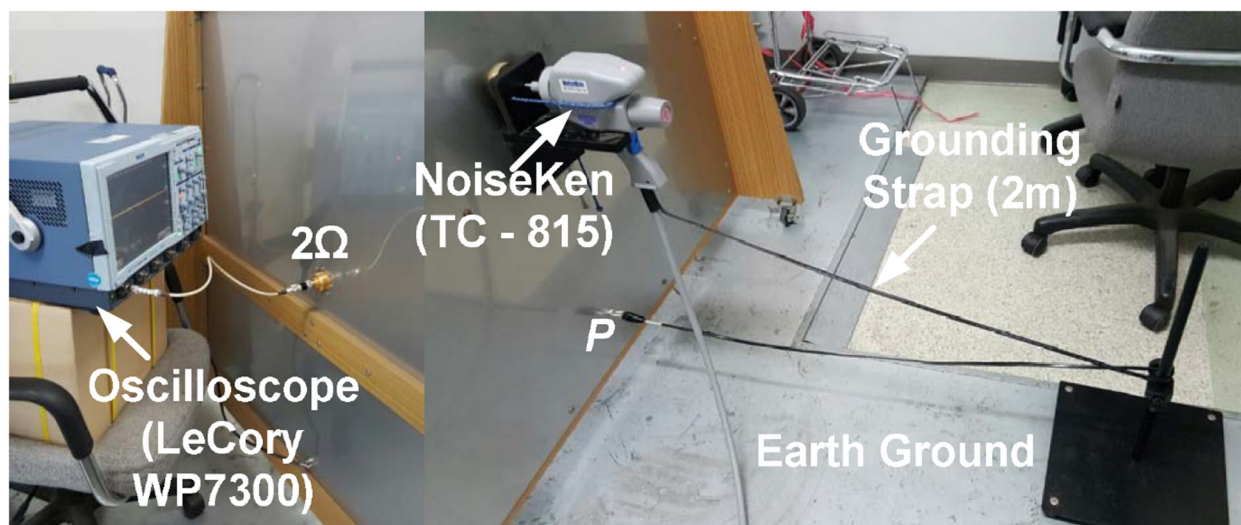
Διάταξη μετρήσεων

Η ενότητα αυτή περιγράφει αναλυτικά τη στρατηγική μετρήσεων και τη διάταξη μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε. Το Σχήμα 1.15 παρουσιάζει τη διάταξη μέτρησης για τις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν στη μελέτη.



Σχήμα 1.15: Διατάξεις μέτρησης κυματομορφής ESD [33]

Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εγχέεται στον πρότυπο στόχο 2.1 Ω (Pellegrini target) με εύρος ζώνης 4 GHz, χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια NoiseKen TC-815 σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής. Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μετράται πάνω στο φορτίο των 2.1 Ω (ανιχνευτής ρεύματος), το οποίο συνδέεται με τον παλμογράφο LeCroy WP7300 (εύρους ζώνης 3 GHz) μέσω εξασθενητή 26 dB για την προστασία του παλμογράφου. Η γείωση του παλμογράφου συνδέεται με τη γείωση της εγκατάστασης ώστε να εξασφαλιστεί κοινή γειωμένη αναφορά για τη διάταξη μέτρησης. Η κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μετρήθηκε για τέσσερις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής γείωσης της γεννήτριας. Η Περίπτωση A αντιστοιχεί στην πρότυπη διάταξη του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], στην οποία το καλώδιο επιστροφής μήκους 2 m εκτείνεται κατακόρυφα προς τα πίσω και στη συνέχεια συνδέεται στο σημείο P του γειωμένου επιπέδου της μεταλλικής πλάκας όπου προσαρτάται ο στόχος Pellegrini. Το Σχήμα 1.16 απεικονίζει την πειραματική διάταξη μέτρησης της Περίπτωσης A.



Σχήμα 1.16: Τυπική διάταξη μέτρησης κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Περίπτωση Α: Τυπική διάταξη βρόχου γείωσης 2 m) [33]

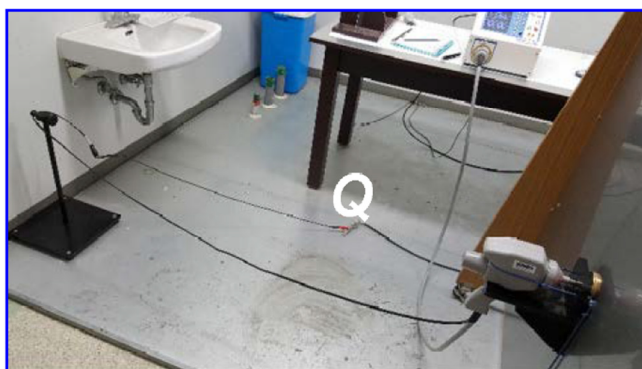
Στην Περίπτωση Β, το καλώδιο γείωσης εκτείνεται κατακόρυφα προς τα πίσω κατά τον συνήθη τρόπο, σχηματίζοντας μικρό βρόχο, και στη συνέχεια συνδέεται απευθείας στο σημείο Q της γείωσης του χώρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.16 και στο Σχήμα 1.17(a).



(a)



(b)



(c)

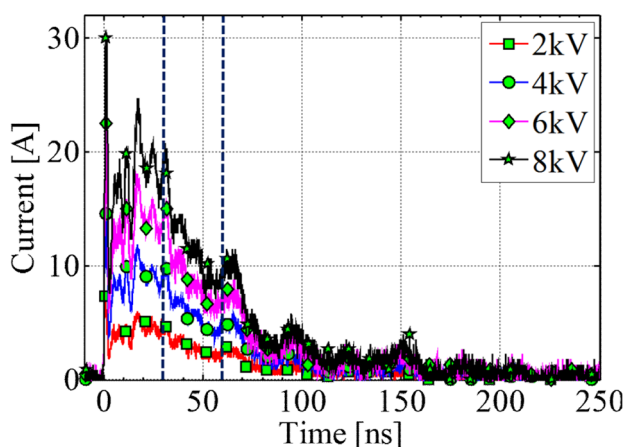
Σχήμα 1.17: Τροποποιημένες διατάξεις καλωδίου γείωσης, (a) Περίπτωση Β: κοντός βρόχος 2 m, (b) Περίπτωση C: κυκλικός βρόχος 2 m, (c) Περίπτωση D: μακρύς βρόχος 3 m [33]

Η Περίπτωση C είναι παρόμοια με την πρότυπη Περίπτωση A, με τη διαφορά ότι το καλώδιο γείωσης συνδέεται στο σημείο Q της γείωσης, σχηματίζοντας μεγαλύτερο βρόχο σε σχέση με την τυποποιημένη διάταξη (Σχήμα 1.17(b)). Το μήκος του καλωδίου γείωσης διατηρείται σταθερά στα 2 m και για τις τρεις περιπτώσεις A, B και C. Στην τελευταία διάταξη (Περίπτωση D), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15 και στο Σχήμα 1.17(c), το μήκος του καλωδίου γείωσης αυξάνεται σε 3 m και συνδέεται στο σημείο Q της γείωσης, εκτεινόμενο προς τα πίσω όπως στην Περίπτωση A. Η μεταλλική πλάκα με την αντίσταση φορτίου συνδέεται επίσης στο ίδιο σημείο Q. Το καλώδιο επιστροφής συνδέεται στη γείωση της εγκατάστασης, όπως συμβαίνει και στην πραγματική δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συστήματος και η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι επίσης συνδεδεμένη στη γείωση.

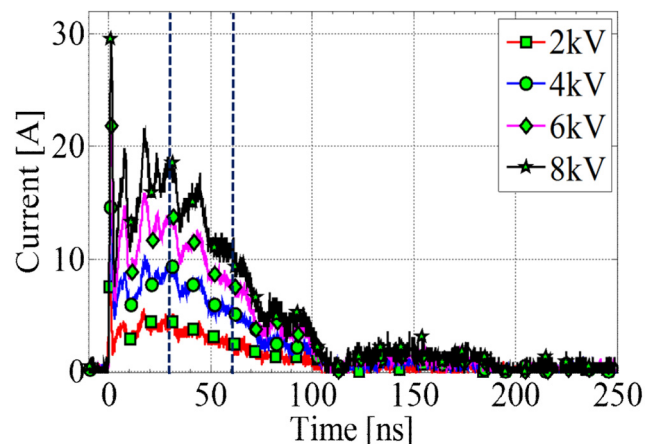
Σκοπός είναι η διερεύνηση της επίδρασης του σχηματιζόμενου μικρού βρόχου (στην Περίπτωση B) και των μεγαλύτερων βρόχων (στις Περιπτώσεις C και D) σε σύγκριση με τον πρότυπο βρόχο της Περίπτωσης A, ως προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος (I_p), τις ταλαντώσεις της κυματομορφής μετά την πρώτη αιχμή, τις τιμές ρεύματος στα 30 ns (I_{30}) και 60 ns (I_{60}), καθώς και τον χρόνο ανόδου (t_r) της κυματομορφής αναφοράς.

Αποτελέσματα μετρήσεων

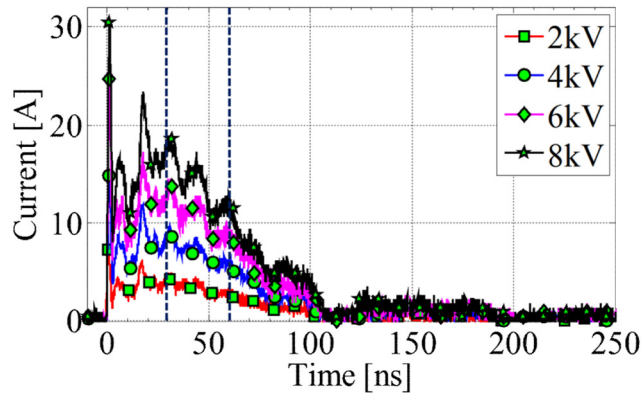
Οι κυματομορφές της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μετρήθηκαν για όλα τα επίπεδα δοκιμής του Προτύπου, δηλαδή 2 kV, 4 kV, 6 kV και 8 kV. Οι παράμετροι των κυματομορφών, δηλαδή η πρώτη αιχμή του ρεύματος (I_p), ο χρόνος ανόδου (t_r), καθώς και οι τιμές ρεύματος στα 30 ns (I_{30}) και 60 ns (I_{60}), συγκρίνονται με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της ιδανικής κυματομορφής που ορίζεται στο IEC 61000-4-2 [26]. Το Σχήμα 1.18 παρουσιάζει τα μετρούμενα αποτελέσματα για την πρότυπη διάταξη γείωσης (Περίπτωση A). Όπως προκύπτει από το Σχήμα 1.18, τα χαρακτηριστικά της μετρούμενης κυματομορφής για όλα τα επίπεδα τάσης εμπίπτουν εντός των καθορισμένων ορίων του Προτύπου. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.19, στο Σχήμα 1.20 και στο Σχήμα 1.21 η αλλαγή του σημείου γείωσης από τη κάθετη μεταλλική πλάκα στη γείωση της εγκατάστασης, στις Περιπτώσεις B (βρόχος γείωσης 2 m – μικρός), C (βρόχος γείωσης 2 m – μεγάλος) και D (βρόχος γείωσης 3 m – μεγάλος), οδηγεί σε απόκλιση της τιμής του ρεύματος στα 60 ns εκτός των επιτρεπτών ορίων του Προτύπου.



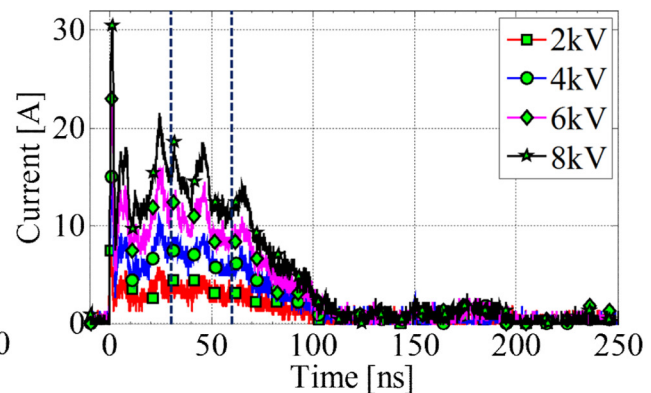
Σχήμα 1.18: Αποτελέσματα μετρούμενης κυματομορφής για την τυπική διάταξη βρόχου 2 m της Περίπτωσης A (Σχήμα 1.16) [33]



Σχήμα 1.19: Αποτελέσματα μετρούμενης κυματομορφής για τη διάταξη βραχέος βρόχου 2 m της Περίπτωσης B (Σχήμα 1.17(a)) [33]



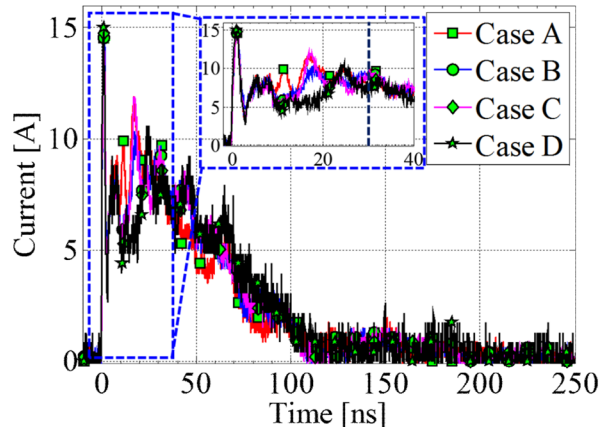
Σχήμα 1.20: Αποτελέσματα μετρούμενης κυματομορφής για τη διάταξη κυκλικού βρόχου 2 m της Περίπτωσης C (Σχήμα 1.17 (b)) [33]



Σχήμα 1.21: Αποτελέσματα μετρούμενης κυματομορφής για τη διάταξη μακρού βρόχου 3 m της Περίπτωσης D (Σχήμα 1.17(c)) [33]

Σχολιασμός

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τη σύγκριση των χαρακτηριστικών κυματομορφής για όλες τις περιπτώσεις σε σχέση με τις παραμέτρους της ιδανικής κυματομορφής. Το Σχήμα 1.22 απεικονίζει τη σύγκριση των κυματομορφών για το επίπεδο 4 kV και για τις τέσσερις περιπτώσεις. Οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων των κυματομορφών παρατίθενται στον Πίνακα 1.5. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1.5, για όλες τις τροποποιημένες διατάξεις γείωσης, οι τιμές των I_p , t_r και I_{30} βρίσκονται εντός των ιδανικών ορίων.



Σχήμα 1.22: Σύγκριση κυματομορφών για διαφορετικές διατάξεις γείωσης για τάση εκφόρτισης +4 kV [33]

Πίνακας 1.5: Σύγκριση παραμέτρων κυματομορφών 4 kV για διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου γείωσης [33]

	t_r	I_p	I_{30}	I_{60}
	[ns]	[A]	[A]	[A]
Ιδανική	0,8	15	8	4
Όρια	0,6 - 1	12,8 - 17,2	5,6 - 10,4	2,8 - 5,2
Περίπτωση A	0,7	14,6	9,3	4,9
Περίπτωση B	0,8	14,6	9,0	5,3
Περίπτωση C	0,7	14,8	9,3	5,5
Περίπτωση D	0,7	15,0	6,6	5,3

Ωστόσο, εμφανίζονται αποκλίσεις στις I_{60} τιμές του ρεύματος στις περιπτώσεις όπου το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας συνδέεται απευθείας στη γείωση της εγκατάστασης. Παρ' όλα αυτά, για τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής έως τις I_{30} τιμές του ρεύματος, τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν για τις διατάξεις με μεγαλύτερο βρόχο γείωσης, ήτοι την Περίπτωση D, όπου επίσης παρατηρείται η μικρότερη ταλάντωση της κυματομορφής μετά την πρώτη αιχμή σε σύγκριση με τις λοιπές περιπτώσεις. Η μικρή απόκλιση στις I_{60} τιμές του ρεύματος για την Περίπτωση D θα μπορούσε να

περιοριστεί αν το καλώδιο γείωσης συνδεόταν στο σημείο P της μεταλλικής πλάκας, όπως στην Περίπτωση A.

Η αύξηση του μήκους του βρόχου επιστροφής γείωσης συνεπάγεται αύξηση της επαγωγής γείωσης, η οποία μειώνει τις αποκλίσεις από τις ιδανικές τιμές. Η μείωση του φαινομένου ταλάντωσης της κυματομορφής μετά την πρώτη αιχμή στην Περίπτωση D αποτελεί αξιοσημείωτη παρατήρηση, καθώς η εξάλειψη του φαινομένου αυτού είναι εξαιρετικά δύσκολη σε όλες τις εμπορικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Συμπεράσματα

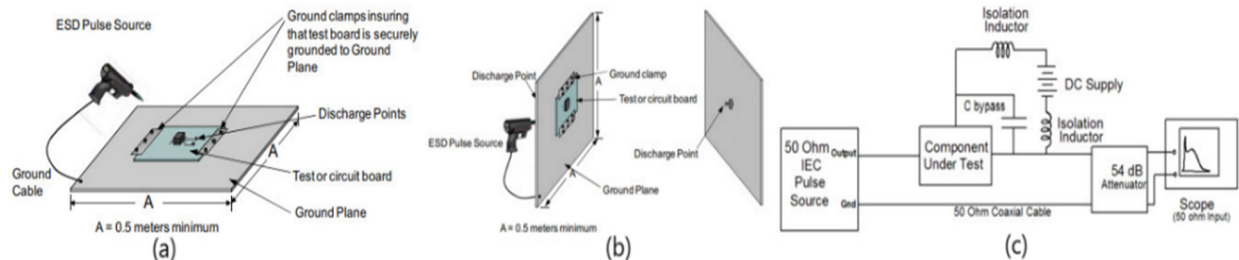
Η μελέτη [33] διερεύνησε την επίδραση των μεταβολών στη διάταξη του βρόχου γείωσης του καλωδίου επιστροφής της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα χαρακτηριστικά της κυματομορφής. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος, τη διαμόρφωση του βρόχου και το σημείο γείωσης του καλωδίου επιστροφής. Η αύξηση του μήκους και της περιοχής γείωσης του καλωδίου επιστροφής οδηγεί σε μείωση της ταλάντωσης της κυματομορφής μετά την πρώτη αιχμή και σε μικρότερες αποκλίσεις των παραμέτρων I_p , t_r , I_{30} και I_{60} από τις ιδανικές τιμές. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην αξιολόγηση της επίδρασης καλωδίου μήκους 3 m για γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαφορετικών κατασκευαστών.

1.3.2. Διεργαστηριακή μελέτη της ESDA (ElectroStatic Discharge Association)

Χαρακτηριστική μελέτη πάνω στο πρόβλημα της επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας αποτελεί το Round Robin Study (Μελέτη διεργαστηριακής σύγκρισης) της ομάδας 5.6 της ESDA [30], 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 [26]. Η μέθοδος HMM αποτελεί μία προσαρμογή της κυματομορφής IEC 61000-4-2 σε επίπεδο εξαρτημάτων (component level), με στόχο την προσομοίωση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από άνθρωπο που κρατά μεταλλικό αντικείμενο. Εφαρμόζεται ευρέως για τη δοκιμή εξαρτημάτων που εκτίθενται άμεσα σε φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

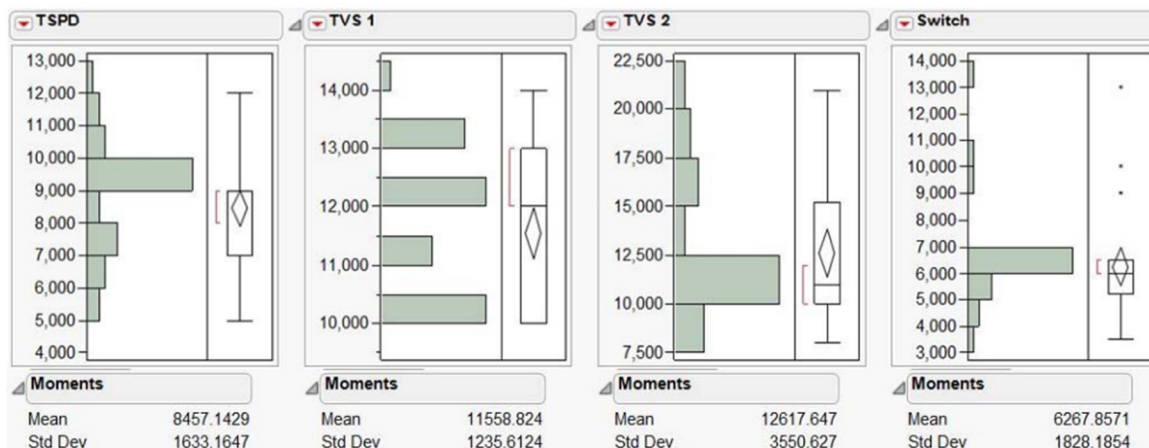
Η διεργαστηριακή σύγκριση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τριών διαφορετικών διατάξεων, όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.23. Η διάταξη A αφορά οριζόντια τοποθέτηση του υπό εξέταση εξοπλισμού σε μεταλλικό επίπεδο γείωσης με εμβαδόν 0,5 m², η διάταξη B έχει κάθετη διάταξη του μεταλλικού επιπέδου γείωσης, ώστε να περιορίζεται η επίδραση των πεδίων της γεννήτριας, 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 ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με χαρακτηριστική αντίσταση 330 Ω, γεννήτριες παλμών 50 Ω και ειδικές γεννήτριες παλμών δύο ακίδων (2-pin pulsers).

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



Σχήμα 1.23: Διατάξεις δοκιμών εξαρτημάτων που εφαρμόστηκαν στο Round Robin Study του HMM (a) Διάταξη A, (b) Διάταξη B, (c) Διάταξη C [30]

Το πλέον αξιοσημείωτο εύρημα της παρούσας μελέτης συνίσταται στο γεγονός ότι, παρά την τυποποιημένη διαδικασία δοκιμών, τα αποτελέσματα παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ των επιμέρους εργαστηρίων. Η αναπαραγωγιμότητα, δηλαδή η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, εμφάνισε αποκλίσεις στις τάσεις αστοχίας των εξεταζόμενων εξαρτημάτων, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις υπερέβησαν ακόμη και τα 6 kV. Ιδιαίτερα για τη δεύτερη διάταξη προστασίας τύπου TVS, παρατηρήθηκαν τάσεις αστοχίας που κυμάνθηκαν από 8 kV έως 21 kV, γεγονός που αναδεικνύει τη δυσχέρεια στον καθορισμό συγκεκριμένων ορίων αντοχής. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 1.24 παρουσιάζεται η ανάλυση των κατανομών των σχετικών δεδομένων.



Σχήμα 1.24: Ανάλυση κατανομών δεδομένων από Round Robin Study του HMM [30]

Αντιθέτως, η επαναληψιμότητα, δηλαδή η ικανότητα ενός εργαστηρίου να επαναλαμβάνει με συνέπεια τα αποτελέσματά του, παρουσίασε αισθητά καλύτερη συμπεριφορά. Τα περισσότερα εργαστήρια κατέγραψαν μικρή ή ακόμη και μηδενική διακύμανση, όταν χρησιμοποιούσαν τα ίδια εξαρτήματα και τον ίδιο εξοπλισμό. Ωστόσο, η διαπίστωση αυτή δεν επαρκεί από μόνη της, εφόσον ο τελικός στόχος συνίσταται στη διασφάλιση της αναπαραγωγιμότητας των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών οργανισμών ή εργαστηρίων.

Η στατιστική ανάλυση που εφαρμόστηκε — βασισμένη κυρίως στο πρότυπο ASTM E691-99 [35] — ανέδειξε ότι οι διεθνώς χρησιμοποιούμενοι δείκτες, όπως οι στατιστικές h και k , δεν επαρκούν πάντοτε για να αποκαλύψουν το πλήρες εύρος του προβλήματος. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ύπαρξη υψηλής τυπικής απόκλισης συχνά «καλύπτει» ακραίες τιμές, με συνέπεια να εμφανίζεται τεχνητά σταθερό ένα σύνολο δεδομένων το οποίο στην πραγματικότητα παρουσιάζει σοβαρά

προβλήματα αξιοπιστίας. Επιπροσθέτως, ο υπολογισμός του ορίου επαναληψιμότητας (Reproducibility Limit – R) ανέδειξε ιδιαίτερα υψηλές τιμές, γεγονός που καταδεικνύει τη δυσκολία εφαρμογής της μεθόδου HMM με την απαιτούμενη ακρίβεια, όταν στόχος είναι ο καθορισμός αξιόπιστων ορίων αστοχίας (fail thresholds). Η κατάσταση αυτή επιτείνεται περαιτέρω λόγω της δεύτερης αιχμής του ρεύματος της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η οποία συνοδεύεται από σημαντική αβεβαιότητα, επηρεάζοντας καθοριστικά τα αποτελέσματα. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας για το συγκεκριμένο ζήτημα είναι πλήρως δικαιολογημένο.

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτήν μελέτη είναι ότι η μέθοδος HMM, στην παρούσα της μορφή, δεν επαρκεί για τον ασφαλή χαρακτηρισμό αστοχίας με ακρίβεια ± 1 kV. Η σημαντική μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων καταδεικνύει επιτακτικά την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης, τη βελτίωση των προδιαγραφών της κυματομορφής και, ενδεχομένως, την ανάπτυξη νέων μεθόδων προσαρμοσμένων σε επίπεδο εξαρτήματος.

1.3.3. Διεργαστηριακή μελέτη για τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών σύμφωνα με το IEC 61000-4-2

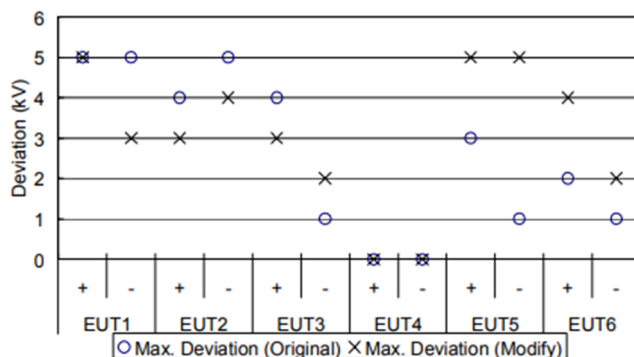
Με αφορμή τη διαπίστωση των σημαντικών αποκλίσεων, που παρατηρούνται στα αποτελέσματα δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή της γεννήτριας, γεγονός που επηρεάζει αισθητά την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων, οι Masayuki Hirata, Takehiro Takahashi και Noboru Schibuya [29] διεξήγαγαν διεργαστηριακή μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία, τη Γερμανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Στόχος της μελέτης ήταν η διατύπωση αυστηρότερων προδιαγραφών για την κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], με σκοπό τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας και γενικότερα των αποκλίσεων που παρατηρούνται κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών.

Η μελέτη εκκίνησε από τη διαπίστωση ότι, ακόμη και όταν εφαρμόζεται το ίδιο Πρότυπο, διαφορετικοί τύποι γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παράγουν κυματομορφές με σημαντικές αποκλίσεις. Οι αποκλίσεις αυτές αφορούν κυρίως παραμέτρους όπως ο χρόνος ανόδου (t_r), το πλάτος της πρώτης αιχμής (I_p), η φασματική συμπεριφορά και οι μετα-ταλαντώσεις της κυματομορφής. Για την αντιμετώπιση των διαφορών αυτών και προς ενίσχυση της αναπαραγωγιμότητας, εξετάστηκε η δυνατότητα περιορισμού του χρόνου καθόδου της πρώτης αιχμής (falling time restriction) ως μέτρο σταθεροποίησης της απόκρισης των δοκιμών (EUTs).

Η φάση της μελέτης που παρουσιάζεται στο συγκεκριμένο έργο επικεντρώνεται στα πειράματα που διεξήχθησαν στην Ιαπωνία. Συμμετείχαν οκτώ γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο συμβατικές όσο και τροποποιημένες, με τις τελευταίες να έχουν σχεδιαστεί ώστε να ανταποκρίνονται στις προτεινόμενες απαιτήσεις περιορισμού του χρόνου καθόδου. Οι τροποποιήσεις υλοποιήθηκαν από τους ίδιους τους κατασκευαστές, με σκοπό την εξομάλυνση της απότομης μείωσης του ρεύματος μετά την πρώτη αιχμή. Ως συσκευές υπό δοκιμή επιλέχθηκαν έξι διαφορετικά δοκίμια, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονταν υπολογιστές, εκτυπωτές και συσκευές δικτυακής δρομολόγησης. Σε κάθε επίπεδο δοκιμής πραγματοποιήθηκαν εκατό εκφορτίσεις ανά πολικότητα. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 1.25, παρουσιάζεται η μέγιστη απόκλιση τάσης μεταξύ των γεννητριών, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις υπερβαίνει τα 4 έως 5 kV, γεγονός ιδιαίτερα κρίσιμο αν αναλογιστεί κανείς την ευαισθησία των σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων. Η σύγκριση μεταξύ συμβατικών και τροποποιημένων μοντέλων

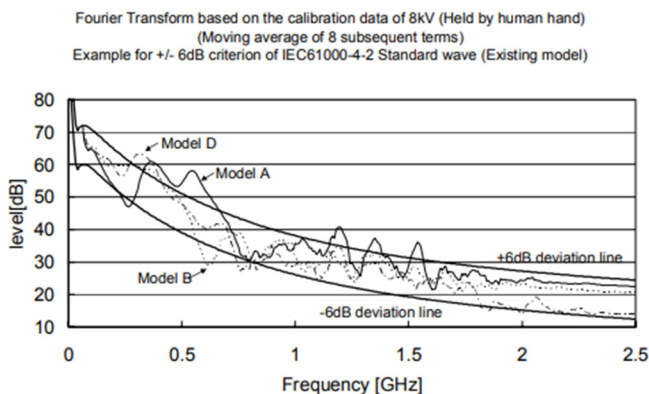
καταδεικνύει σαφώς μειωμένη μεταβλητότητα στα τροποποιημένα μοντέλα, υποδεικνύοντας ότι ο περιορισμός του χρόνου καθόδου συμβάλλει θετικά στην επαναληψιμότητα της δοκιμής.

Ωστόσο, η βελτίωση δεν ήταν καθολική. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για το δοκίμιο 5, το οποίο είχε σχεδιαστεί σκοπίμως με υψηλή ευαισθησία, αλλά και για το δοκίμιο 6, όπου η εκφόρτιση εφαρμόστηκε πλησίον της μεταλλικής ψύκτρας ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC), η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων παρέμεινε περιορισμένη. Διαπιστώθηκε ότι παράγοντες, όπως η εσωτερική χωρητικότητα της συσκευής, η τοπολογία του κυκλώματος και η ακριβής θέση εφαρμογής της εκφόρτισης επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την απόκριση του συστήματος.



Σχήμα 1.25: Μέγιστη απόκλιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής ESD [29]

Η φασματική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μετασχηματισμού Fourier επιβεβαίωσε τις προαναφερθείσες διαπιστώσεις. Οι συμβατικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρήγαγαν ισχυρότερες φασματικές συνιστώσες στις υψηλές συχνότητες, συχνά υπερβαίνοντας τα επιτρεπτά όρια που θέτει το Πρότυπο. Αντίθετα, οι τροποποιημένες γεννήτριες παρουσίασαν σημαντικά πιο ελεγχόμενη φασματική συμπεριφορά, ιδιαίτερα κάτω από τα 800 MHz, γεγονός που συνέβαλε στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των αποτελεσμάτων. Το Σχήμα 1.26 απεικονίζει τη φασματική σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων γεννητριών και του προτύπου φάσματος, όπως αυτό ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26]. Είναι εμφανές ότι μόνο οι τροποποιημένες γεννήτριες διατηρούν το φάσμα τους εντός του αποδεκτού εύρους ± 6 dB, στοιχείο το οποίο συνιστά κρίσιμο κριτήριο για την αξιοπιστία των δοκιμών.



Σχήμα 1.26: Μετασχηματισμός Fourier (Επίπεδο τάσης 8kV) [29]

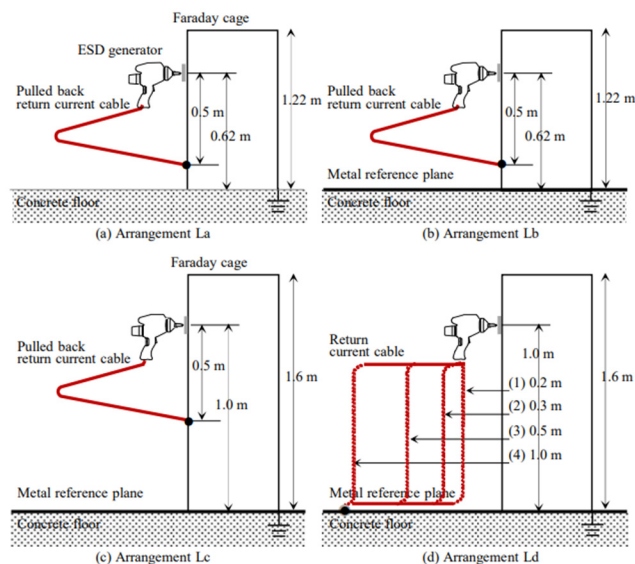
Συμπερασματικά, το πείραμα ανέδειξε τη χρησιμότητα του περιορισμού του χρόνου καθόδου ως παράγοντα βελτίωσης της συνέπειας στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Παρ' όλα αυτά, οι

συγγραφείς επισημαίνουν ότι η πλήρης εξάλειψη των αποκλίσεων απαιτεί παράλληλες βελτιώσεις και σε άλλες παραμέτρους, όπως ο χρόνος ανόδου (t_r) και τα φασματικά χαρακτηριστικά της κυματομορφής. Προτείνεται επίσης η υιοθέτηση αυστηρότερων ορίων για το φάσμα, μειώνοντας το αποδεκτό εύρος από ± 6 dB σε ± 3 dB, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερος βαθμός αναπαραγωγιμότητας μεταξύ των αποτελεσμάτων δοκιμών. Η μελέτη των Hirata et al. συνιστά σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης της αξιοπιστίας και της διεθνούς συγκρισιμότητας των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

1.3.4. Μελέτη της επίδρασης του καλωδίου επιστροφής στο φαινόμενο των ταλαντώσεων

Στη μελέτη τους οι Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jiaqing Wang και Osamu Fujiwara [36] 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 ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε εκφορτίσεις επαφής. Η εργασία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς η δεύτερη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26] ορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις για την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, χωρίς ωστόσο να καθορίζει περιορισμούς αναφορικά με το φαινόμενο των αποσβεννυόμενων ταλαντώσεων, οι οποίες εμφανίζονται μετά την πρώτη αιχμή της κυματομορφής.

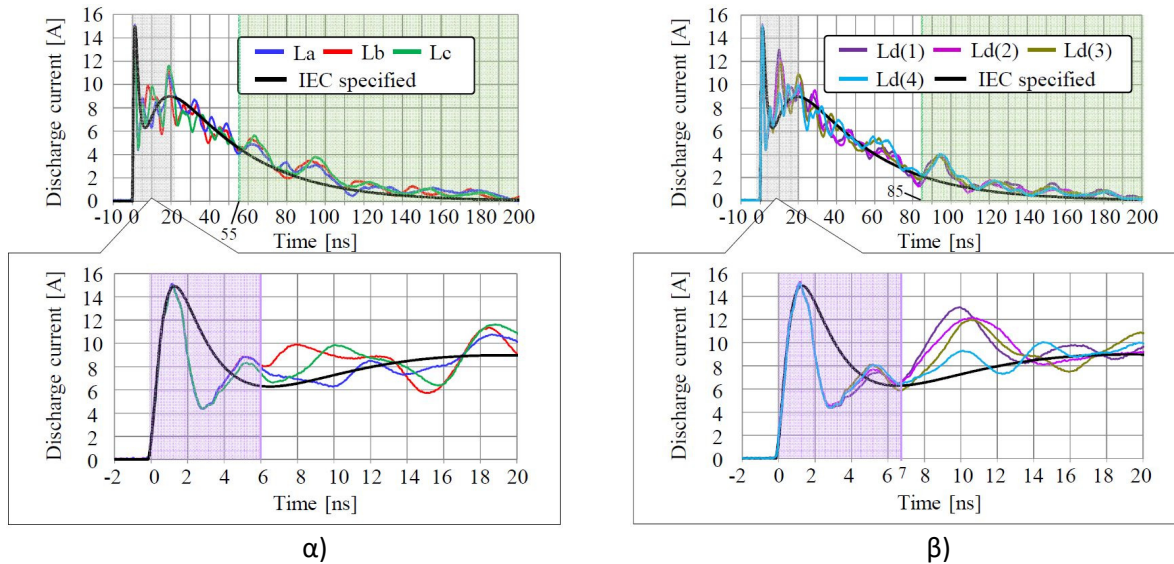
Στο πλαίσιο της μελέτης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διακρίβωσης επαφής με χρήση γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα 4 kV, εφαρμόζοντας διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής ρεύματος σε ποικίλα περιβάλλοντα μέτρησης. Το μήκος του καλωδίου διατηρήθηκε σε όλες τις δοκιμές στα 2 m, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου. Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, καταγράφηκαν οι κυματομορφές του ρεύματος και αναλύθηκαν τα φασματικά χαρακτηριστικά τους μέσω μετασχηματισμού Fourier, με στόχο την εκτίμηση της συχνότητας και της έντασης των ταλαντώσεων που εμφανίζονται μετά την αιχμή του παλμού. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τέσσερις κύριες διατάξεις μέτρησης, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 1.27. 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.



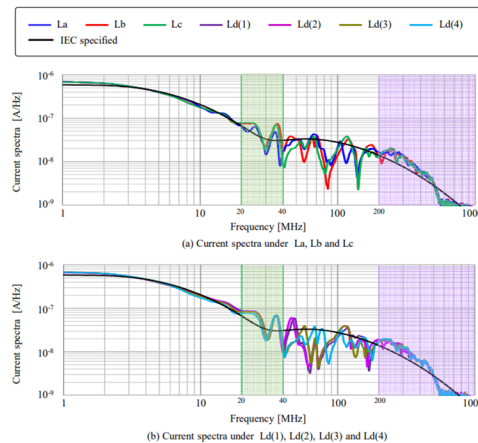
Σχήμα 1.27: Διατάξεις μέτρησης για τη μελέτη επίδρασης της διάταξης του καλωδίου επιστροφής στην κυματομορφή ρεύματος [36]

Οι μετρήσεις ανέδειξαν ότι οι κυματομορφές των διατάξεων La, Lb και Lc παρουσίαζαν παρόμοια συμπεριφορά για χρόνους μικρότερους των 6 ns και μεγαλύτερους των 55 ns. Ωστόσο, εντός του διαστήματος μεταξύ αυτών των χρονικών ορίων παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις, ιδιαίτερως στη ζώνη 6 – 55 ns, όπου το φαινόμενο των ταλαντώσεων καθίσταται ιδιαίτερα έντονο.

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης, εξετάστηκε διεξοδικότερα η διάταξη Ld, η οποία υποβλήθηκε σε δοκιμές υπό τέσσερις επιμέρους διατάξεις (Ld1 έως Ld4), διαφοροποιούμενες αποκλειστικά ως προς τον τρόπο ανάρτησης και την απόσταση του καλωδίου από τα τοιχώματα του κλωβού. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι σε ορισμένες υποδιατάξεις, συγκεκριμένα στις Ld3 και Ld4, οι τιμές του I_{60} υπερέβησαν τα ανώτατα όρια που θέτει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], γεγονός το οποίο υπογραμμίζει την καθοριστική επίδραση της ελεύθερης διάταξης του καλωδίου στην ένταση των ταλαντώσεων. Σε γενικές γραμμές, πάντως, οι κυματομορφές των διαφόρων υποδιατάξεων εμφάνισαν ομοειδή συμπεριφορά για χρόνους μικρότερους των 7 ns και μεγαλύτερους των 85 ns. Ενδεικτικά κυματομορφές που προέκυψαν από τα ως άνω σενάρια παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.28.



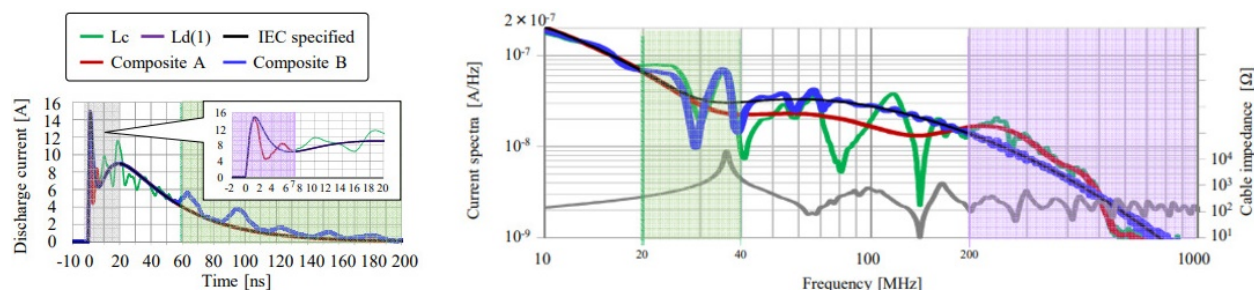
Σχήμα 1.28: Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής: α) Διατάξεις La, Lb, Lc β) Διατάξεις Ld1 – Ld4 [36]



Σχήμα 1.29: Σύγκριση φασματικών περιεχομένων των κυματομορφών ρεύματος για τις διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου επιστροφής [36]

Αποκλίσεις καταγράφηκαν και στο φασματικό περιεχόμενο των κυματομορφών. Οι φασματικές αναλύσεις αποκάλυψαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην περιοχή συχνοτήτων 40 MHz έως 200 MHz, γεγονός που καταδεικνύει ότι η διάταξη του καλωδίου και το περιβάλλον μέτρησης επηρεάζουν κυρίως το συγκεκριμένο φασματικό εύρος (Σχήμα 1.29). Για την πληρέστερη κατανόηση των φασματικών ιδιοτήτων των κυματομορφών, οι ερευνητές ανέπτυξαν συνθετικές κυματομορφές (Composite Waveforms), προκύπτουσες από τον συνδυασμό μετρούμενων κυματομορφών και της ιδανικής κυματομορφής που ορίζεται στο Πρότυπο. Δημιουργήθηκαν δύο τύποι συνθετικών κυματομορφών: η Συνθετική A, η οποία ακολουθεί τη μετρούμενη κυματομορφή έως τα 7 ns και στη συνέχεια προσαρμόζεται στην ιδανική κυματομορφή του Προτύπου, και η Συνθετική B, η οποία ταυτίζεται αρχικά με την ιδανική κυματομορφή έως τα 60 ns ή 85 ns και κατόπιν συνεχίζει με τη μετρούμενη.

Η φασματική ανάλυση των συνθετικών κυματομορφών κατέδειξε ότι οι ζώνες συχνοτήτων κάτω των 40 MHz και άνω των 200 MHz παραμένουν ανεπηρέαστες από τη διάταξη του καλωδίου ή τις συνθήκες μέτρησης. Αντιθέτως, η περιοχή 40–200 MHz εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους εν λόγω παράγοντες, στοιχείο που δικαιολογεί τις παρατηρούμενες αποκλίσεις και το φαινόμενο των ταλαντώσεων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το φάσμα κάτω των 40 MHz αντιστοιχεί κυρίως στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μετά τα 60 ns ή τα 85 ns, ενώ το φάσμα άνω των 200 MHz συνδέεται με το αρχικό χρονικό διάστημα των πρώτων 7 ns του παλμού, κατά το οποίο κυριαρχεί η απότομη ανύψωση, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.30 για τη Συνθετική A της διάταξης Lc.



Σχήμα 1.30: Σύγκριση κυματομορφών και φασμάτων για την Σύνθετη A κυματομορφή της Lc διάταξης του καλωδίου επιστροφής [36]

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 [26] ως προς τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της κυματομορφής (I_P , I_{30} , I_{60}), το φαινόμενο των ταλαντώσεων δεν δύναται να παραβλεφθεί. Αντιθέτως, αναδεικνύεται ως άμεση συνέπεια της διάταξης του καλωδίου επιστροφής και της μεθοδολογίας μέτρησης, επιφέροντας ουσιώδεις επιδράσεις στο φάσμα συχνοτήτων και, κατ' επέκταση, στη συμπεριφορά των εξαρτημάτων ή συστημάτων υπό δοκιμή.

Η μελέτη [36] αναδεικνύει τη σημασία της λεπτομερούς περιγραφής και της τυποποίησης της διάταξης του καλωδίου στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με σκοπό τη διασφάλιση υψηλότερου επιπέδου αναπαραγωγιμότητας και αξιοπιστίας στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

1.3.5. Ανάλυση της αναπαραγωγιμότητας κατά τη δοκιμή ESD σε προσομοιωτή ζεύξης SpaceWire

Όπως αναφέρθηκε σύντομα στις εισαγωγικές ενότητες της διατριβής, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση αποτελεί μία από τις συχνότερες μεταβατικές διαταραχές στις οποίες ενδέχεται να εκτεθεί ένα

ηλεκτρονικό σύστημα κατά τη διάρκεια της κανονικής του λειτουργίας. Οι υψηλές τιμές ρεύματος (συνήθως άνω των 10 A), σε συνδυασμό με τον πολύ μικρό χρόνο ανόδου (< 1 ns) του παλμού, ενδέχεται να επηρεάσουν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και υποσυστήματα. Η επίδραση αυτή μπορεί να είναι άμεση, προκαλώντας καταστροφή ευαίσθητων κυκλωμάτων λόγω της υψηλής μεταφερόμενης ενέργειας [11], [37], ή έμμεση, μέσω επαγωγής τάσεων συγκρίσιμων ή και υψηλότερων από εκείνες που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες χαμηλής τάσης αρχιτεκτονικές, οδηγώντας σε ανεπιθύμητες μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων λειτουργίας (π.χ. latch-up) υπομονάδων υψηλής συχνότητας [14], [38], [39].

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συστήματος αποτελεί, όπως έχει συζητηθεί εκτενώς στο παρόν κεφάλαιο, η αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων [30], [40], [41], [42], [43]. Συχνά παρατηρείται το φαινόμενο όπου μία συσκευή που υποβάλλεται σε δοκιμή με γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης συμβατή με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27] και εντός τυποποιημένης διάταξης, αποτυγχάνει, ενώ ο ίδιος εξοπλισμός επιτυγχάνει σε άλλο εργαστήριο, παρότι χρησιμοποιούνται πανομοιότυπος εξοπλισμός και διάταξη.

Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί, μεταξύ άλλων, στην ανεπαρκή τυποποίηση παραμέτρων της διάταξης, όπως η όδευση του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει αισθητά τη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής [33]. Δεδομένης της εισαγωγής της παραμέτρου I_{P2} , η οποία όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια αναφέρεται στη μέγιστη τιμή του ρεύματος στο διάστημα 10 ns – 40 ns από τη στιγμή που το ρεύμα έλαβε το 10% της μέγιστης τιμής του για πρώτη φορά, στην πρόσφατη αναθεώρηση του Προτύπου [27] και της επίδρασής της τόσο στις δοκιμές όσο και στη διαδικασία διακρίβωσης [44], η παρούσα ενότητα της διατριβής αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας αναπαραγωγικότητας μεταξύ διαφορετικών χειριστών και διατάξεων δοκιμής κατά την εφαρμογή του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] σε σύνδεσμο προσομοίωσης SpaceWire.

Στόχος είναι η συσχέτιση της αναπαραγωγικότητας με τα αποτελέσματα της δοκιμής, παρέχοντας εποικοδομητική τεκμηρίωση για την παράμετρο I_{P2} και προτείνοντας πιθανά αντισταθμιστικά μέτρα βελτίωσης.

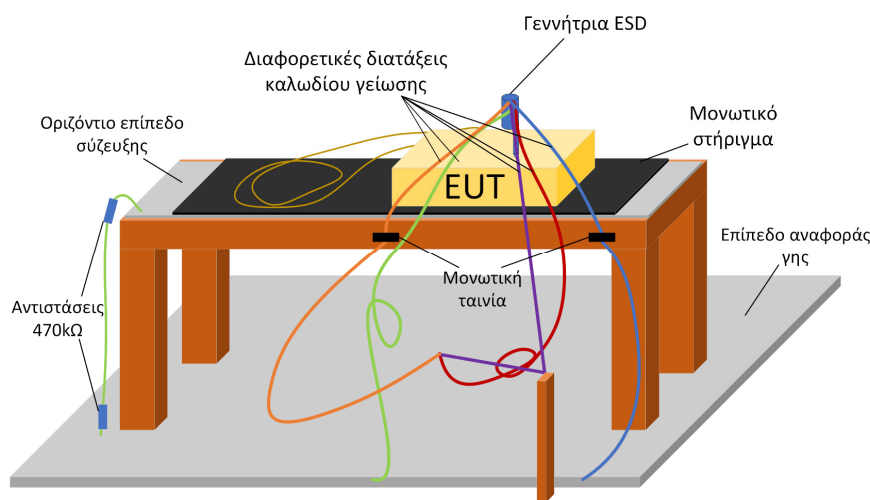
1.3.5.1. Μεθοδολογία Δοκιμών

Η διάταξη των δοκιμών που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Ε.Μ.Π. βασίστηκε αυστηρά στις οδηγίες του IEC 61000-4-2 [27] (§7.3 και §8.3.3.2) για εκφορτίσεις επαφής και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.31. Το Πρότυπο καθορίζει λεπτομερείς απαιτήσεις για τη διάταξη δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, διασφαλίζοντας ενιαίες συνθήκες μεταξύ εργαστηρίων. Το επίπεδο αναφοράς γης (Reference Ground Plane – RGP) κατασκευάζεται από φύλλο χαλκού ή αλουμινίου πάχους τουλάχιστον 0,25 mm· σε περίπτωση άλλων μεταλλικών υλικών, απαιτείται πάχος τουλάχιστον 0,65 mm (φύλλο αλουμινίου πάχους 0,5 mm στην περίπτωση των συγκεκριμένων πειραμάτων). Το RGP πρέπει να προεξέχει τουλάχιστον 0,5 m από το δοκίμιο και το οριζόντιο επίπεδο σύζευξης σε όλες τις πλευρές (0,8 m στη συγκεκριμένη περίπτωση) και να συνδέεται στο σύστημα γείωσης προστασίας με χαμηλή σύνθετη αντίσταση ($< 0,1 \Omega$) μέσω μηχανικών σφιγκτήρων ή ισοδύναμων συνδέσεων. Εξασφαλίζεται ελάχιστη απόσταση 0,8 m από τα τοιχώματα του εργαστηρίου και άλλες μεταλλικές κατασκευές (1 m στα συγκεκριμένα πειράματα).

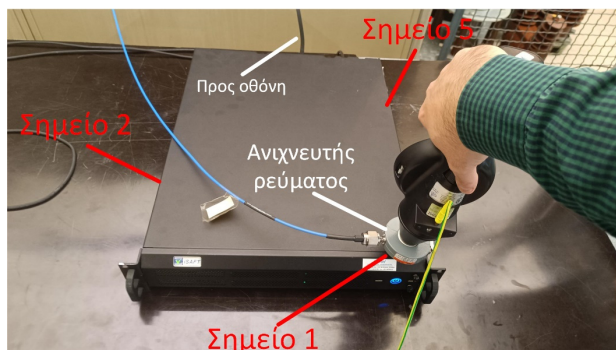
Το δοκίμιο και η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, συμπεριλαμβανομένης της εξωτερικής τροφοδοσίας της, γειώνονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές εγκατάστασης: δεν επιτρέπονται πρόσθετες συνδέσεις γείωσης. Η τροφοδοσία τοποθετείται επί του RGP, ενώ το καλώδιο επιστροφής της γεννήτριας συνδέεται απευθείας στο RGP. Αν το μήκος του υπερβαίνει το απαιτούμενο για την εφαρμογή των εκφορτίσεων, το πλεονάζον τμήμα διατηρείται εκτός RGP και παραμένει σε απόσταση άνω των 0,1 m από αγωγίμα στοιχεία της διάταξης.

Το οριζόντιο επίπεδο σύζευξης τοποθετείται σε μονωτικό τραπέζι ύψους 0,8 m και διαχωρίζεται από το δοκίμιο με μονωτικό φύλλο πάχους 0,5 mm. Έχει ελάχιστη επιφάνεια 1,23 m² και συνδέεται στο RGP μέσω καλωδίου με δύο αντιστάσεις 470 kΩ τοποθετημένες έως 10 cm από κάθε άκρο. Το κάθετο επίπεδο σύζευξης, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, είναι τετραγωνικής μορφής 0,5 m, τοποθετείται σε απόσταση 0,1 m από το EUT και συνδέεται αντίστοιχα με το RGP.

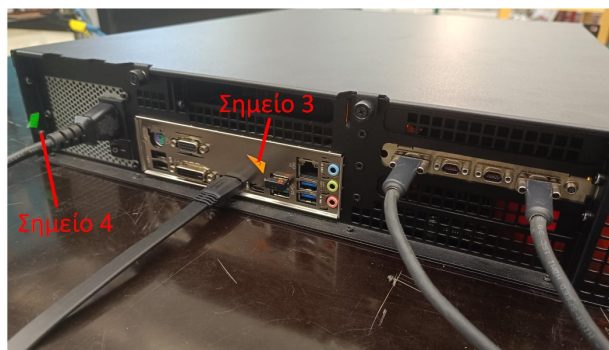
Οι εκφορτίσεις επαφής εφαρμόζονται σε όλα τα αγωγίμα σημεία προσβάσιμα από το χρήστη κατά τη τυπική λειτουργία του δοκιμίου: σε κάθε σημείο εφαρμόζονται δέκα παλμοί ανά πολικότητα, με ελάχιστο διάστημα ενός δευτερολέπτου μεταξύ διαδοχικών εκφορτίσεων. Ως δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ένας προσομοιωτής ζεύξης SpaceWire, ο οποίος λειτουργούσε στα 200 Mbps μέσω καλωδίου μήκους 3 μέτρων, καθιστώντας τον ιδιαίτερα ευαίσθητο σε θόρυβο υψηλών συχνοτήτων και σε φαινόμενα, όπως αυτό των ταλαντώσεων της δεύτερης αιχμής. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για πέντε διαφορετικά σημεία εφαρμογής των παλμών, οι οποίες απεικονίζονται στα παρακάτω Σχήματα 1.32 και 1.33:



Σχήμα 1.31: Διάταξη δοκιμής ατρωσίας σε ESD για διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης



Σχήμα 1.32: Άνω όψη της διάταξης δοκιμής ατρωσίας και των σημείων εφαρμογής 1, 2 και 5 [45]



Σχήμα 1.33: Οπίσθια όψη του δοκιμίου και των σημείων εφαρμογής 3 και 4 [45]

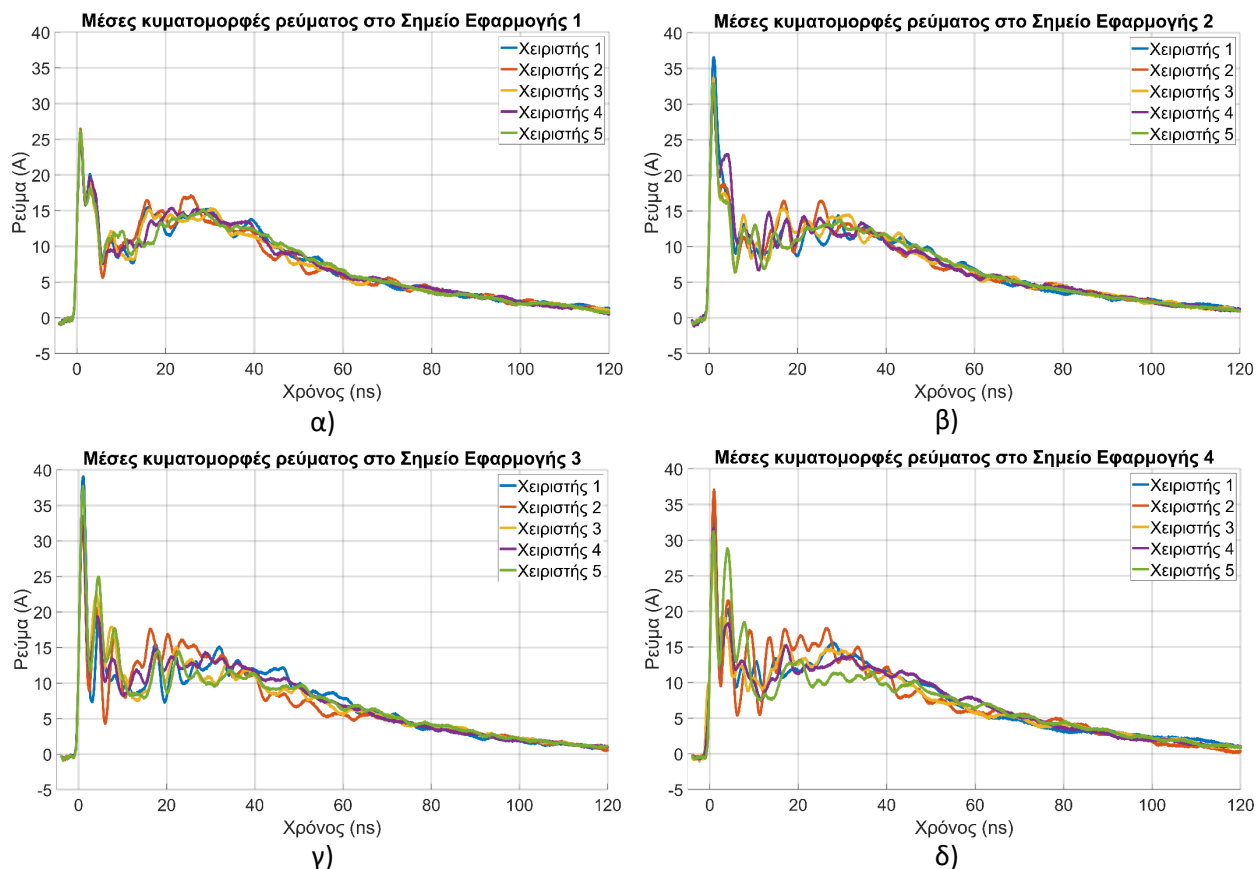
Το επίπεδο τάσης δοκιμής που επιλέχθηκε και στο οποίο ρυθμίστηκε η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ήταν τα 8 kV και εκτελέστηκαν δέκα εκφορτίσεις ανά σημείο και χειριστή. Η μέτρηση των ρευμάτων πραγματοποιήθηκε με τον ανιχνευτή FCC F-65, ο οποίος προσφέρει υψηλή ακρίβεια και εύρος συχνοτήτων έως 1 GHz. Για την ακριβέστερη ανάλυση εφαρμόστηκε η μέθοδος αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, η οποία θα περιγραφεί εκτενώς στην Ενότητα 2.2.

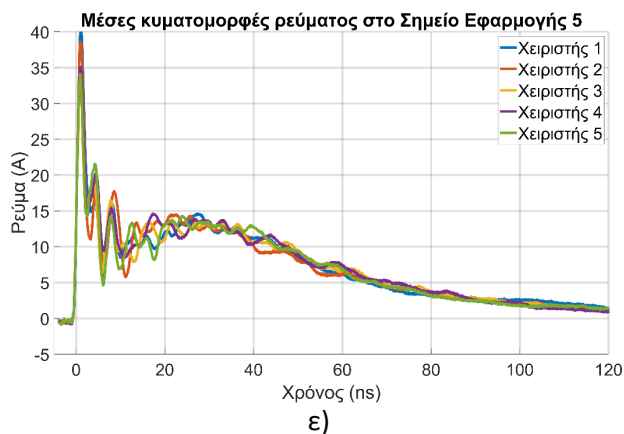
Συμμετείχαν πέντε χειριστές, καθένας από τους οποίους επέλεξε διαφορετική διάταξη για το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας, όπως παρουσιάζεται στο (Σχήμα 1.31) ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση της διαφορετικής διάταξης. Καταγράφηκαν αναλυτικά οι εξής παράμετροι της κυματομορφής: I_p , t_r , I_{p2} , I_{30} , I_{60} . Επιπλέον, παρακολουθήθηκε η λειτουργική συμπεριφορά του δοκιμίου, με μέτρηση παραμέτρων όπως:

- Disconnects (αποσυνδέσεις)
- Parity Errors (σφάλματα ισοτιμίας)
- Error Received Packets (σφάλματα στα ληφθέντα πακέτα)

1.3.5.2. Αποτελέσματα Κυματομορφών

Οι μέσες κυματομορφές του ρεύματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.34, όπου διαφαίνεται ότι η δεύτερη αιχμή και οι ταλαντώσεις αποτελούν τις πλέον ευμετάβλητες περιοχές. Η πρώτη αιχμή (I_p) παραμένει σχετικά σταθερή ανεξαρτήτως χειριστή, ενώ η παράμετρος I_{p2} εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση.





Σχήμα 1.34: Μέσες κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο: α) σημείο εφαρμογής 1, β) σημείο εφαρμογής 2, γ) σημείο εφαρμογής 3, δ) σημείο εφαρμογής 4 και ε) σημείο εφαρμογής 5

Τα αναλυτικά αριθμητικά αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1.6. Η αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας επιβεβαιώνει τις οπτικές παρατηρήσεις του Σχήματος 1.34. Οι τιμές αβεβαιότητας για τις παραμέτρους I_p και t_r παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών σημείων εφαρμογής. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με το θεμελιώδες χαρακτηριστικό της πρώτης αιχμής της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η οποία παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη από τη διάταξη του καλωδίου γείωσης. Ως εκ τούτου, η παρατηρούμενη αβεβαιότητα αποδίδεται κυρίως στον προσανατολισμό της γεννήτριας και στις μικρές διακυμάνσεις των παρασιτικών χωρητικότητων γύρω από την ακίδα της, εξαιτίας μικρών γεωμετρικών μεταβολών στη διάταξη. Αντιθέτως, οι τιμές αβεβαιότητας αναπαραγωγιμότητας που σχετίζονται με τη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής είναι σημαντικά υψηλότερες και παρουσιάζουν εντονότερες αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών σημείων εφαρμογής, αναδεικνύοντας την επίδραση της διάταξης του καλωδίου γείωσης στις συγκεκριμένες παραμέτρους.

Πίνακας 1.6: Παράμετροι κυματομορφής και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για κάθε χειριστή στο: α) σημείο εφαρμογής 1, β) σημείο εφαρμογής 2, γ) σημείο εφαρμογής 3, δ) σημείο εφαρμογής 4 και ε) σημείο εφαρμογής 5

Χειριστής	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
1	26,08	1,046	15,42	15,19	5,879
2	26,47	1,056	17,13	13,43	5,470
3	25,60	1,054	15,28	15,15	6,223
4	25,29	1,044	15,40	14,60	6,054
5	26,23	1,053	15,22	14,31	6,569
Αβεβαιότητα (%)	0,831	0,219	2,304	2,220	3,020

α)

Χειριστής	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
1	36,54	1,067	14,39	13,22	6,880
2	33,07	1,020	16,43	12,91	6,003
3	33,66	1,034	15,33	14,13	5,977
4	31,52	1,050	14,89	11,52	5,979
5	32,94	1,029	13,72	13,53	6,715
Αβεβαιότητα (%)	2,461	0,798	3,053	3,329	3,178

β)

Χειριστής	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
1	39,07	1,030	15,46	12,72	7,780
2	33,37	1,004	17,64	13,35	5,473
3	32,36	0,996	15,09	10,60	5,724
4	33,53	1,020	14,74	13,38	6,806
5	37,74	1,019	14,59	9,822	6,198
Αβεβαιότητα (%)	3,788	0,597	3,574	6,174	6,470

γ)

Χειριστής	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
1	34,02	0,999	15,59	13,81	5,734
2	37,08	0,999	17,62	13,45	5,972
3	30,29	1,014	15,28	14,40	5,803
4	31,60	1,013	15,26	13,54	7,606
5	31,24	0,962	13,20	11,14	6,432
Αβεβαιότητα (%)	3,728	0,945	4,557	4,205	5,487

δ)

Χειριστής	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
1	40,16	1,053	14,63	12,73	6,225
2	38,63	1,045	14,51	12,75	6,210
3	33,31	1,026	13,72	13,05	6,541
4	35,06	1,020	14,58	13,41	7,476
5	34,12	1,050	14,28	13,16	6,871
Αβεβαιότητα (%)	3,675	0,644	1,170	0,983	3,545

ε)

1.3.5.3. Αποτελέσματα για τη σύνδεση SpaceWire

Η λειτουργία του δοκιμίου SpaceWire αξιολογήθηκε μέσω καταγραφής των σφαλμάτων επικοινωνίας κατά τις εκφορτίσεις. Τα δεδομένα συνοψίζονται στον Πίνακα 1.7. Κύρια ευρήματα:

- Οι περισσότερες αποσυνδέσεις (Disconnects) σημειώθηκαν στα σημεία εφαρμογής 2 και 3, με τον Χειριστή 2 να εμφανίζει σημαντική ευαισθησία, γεγονός που συνδέει άμεσα τη λειτουργική αστοχία με το αυξημένο πλάτος των ταλαντώσεων της δεύτερης αιχμής (I_{p2}).
- Τα σφάλματα ισοτιμίας (Parity Errors) ήταν επίσης αυξημένα στα σημεία εφαρμογής 2 και 3.
- Το σημείο εφαρμογής 1 παρουσίασε τη μικρότερη επίδραση, με σχεδόν μηδενικά σφάλματα, αναδεικνύοντας τη σημασία της γεωμετρίας και της όδευσης του καλωδίου γείωσης.

Πίνακας 1.7: Αποτελέσματα παρακολούθησης της ζεύξης SpaceWire για τα σημεία εφαρμογής 1, 2 και 3

Χειριστής	Σημείο 1			Σημείο 2			Σημείο 3			Σημείο 4			Σημείο 5		
	Error received packets	Disconnects	Parity errors	Error received packets	Disconnects	Parity errors	Error received packets	Disconnects	Parity errors	Error received packets	Disconnects	Parity errors	Error received packets	Disconnects	Parity errors
1	0	0	0	2	12	8	8	18	10	1	11	2	0	11	4
2	0	0	0	1	11	5	1	13	10	0	8	4	2	8	0
3	0	0	0	0	10	5	3	10	8	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	3	10	9	1	9	5	0	2	1	0	0	0
5	0	0	0	1	10	2	8	14	8	1	9	8	0	0	0

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η εμφάνιση σφαλμάτων επικοινωνίας δεν συσχετίζεται αποκλειστικά με υψηλές τιμές της πρώτης αιχμής (I_p), αλλά επηρεάζεται σημαντικά και από τη συμπεριφορά του δεύτερου σκέλους της κυματομορφής. Ιδίως σε ευαίσθητα συστήματα υψηλών ταχυτήτων, όπως το SpaceWire, ακόμη και μικρές διαφοροποιήσεις στη δεύτερη αιχμή (I_{p2}) μπορούν να επηρεάσουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του πρωτοκόλλου.

1.3.5.4. Συμπεράσματα

Τα πειράματα που διεξήχθησαν στην παρούσα ενότητα της διατριβής κατέδειξαν ότι η αναπαραγωγικότητα της δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παραμένει πρόκληση, ακόμη και εντός του ίδιου εργαστηρίου, όταν μεταβάλλεται ο χειριστής ή η διάταξη του καλωδίου γείωσης. Συγκεκριμένα:

- Η πρώτη αιχμή (I_p) εμφανίζει ικανοποιητική επαναληψιμότητα, με σφάλματα κάτω του 4 %.
- Η δεύτερη αιχμή (I_{p2}) και οι παράμετροι I_{30} , I_{60} επηρεάζονται εντονότερα από τον χειριστή και τη διάταξη, παρουσιάζοντας αποκλίσεις άνω του 6 %.
- Οι λειτουργικές αποτυχίες (Errors, Disconnects) του δοκιμίου SpaceWire συνδέθηκαν άμεσα με τη μεταβλητότητα της δεύτερης αιχμής (I_{p2}).
- Η γεωμετρία της διάταξης, η θέση μέτρησης και ο χειριστής αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την επαναληψιμότητα και θα πρέπει να τυποποιηθούν στο πρότυπο.
- Η εισαγωγή της παραμέτρου I_{p2} στο IEC 61000-4-2 Ed.3 επιβεβαιώνεται ως απαραίτητη, καθώς σχετίζεται άμεσα με την πραγματική λειτουργική ατρωσία ευαίσθητων συστημάτων.
- Η εργασία καταλήγει στην ανάγκη τυποποίησης των γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων της διάταξης δοκιμής και στην αξιολόγηση τεχνικών αποσυζεύξεων (όπως οι φερρίτες), με στόχο τη βελτίωση της σταθερότητας των μετρήσεων.

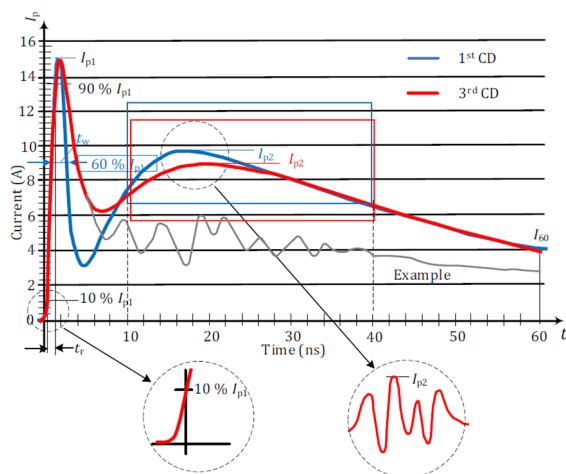
Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρούσα ενότητα εισφέρει σημαντική καινοτομία, καθώς αποτελεί μία από τις λίγες μελέτες που συσχετίζουν συστηματικά τις καταγεγραμμένες κυματομορφές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτές εκδηλώνονται υπό πραγματικές συνθήκες δοκιμών, με την εμφάνιση αστοχιών ή δυσλειτουργιών στον υπό δοκιμή εξοπλισμό. Επιπλέον, η συνολική ανάλυση ανέδειξε ότι, ακόμη και με αυστηρή τήρηση του προτύπου IEC 61000-4-2 [27], εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικές αποκλίσεις στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, λόγω του ανθρώπινου παράγοντα και των γεωμετρικών ιδιοτεροτήτων της διάταξης. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη δεύτερη αιχμή (I_{p2}), η οποία παρουσιάζει έως 6,5 % μεταβλητότητα, ενώ ακόμη και η πρώτη αιχμή (I_p), παρότι θεωρείται πιο σταθερή, ενδέχεται να εμφανίσει διακυμάνσεις έως 3,8 %. Οι αποκλίσεις αυτές συνδέθηκαν άμεσα με αποκλίνουσες αξιολογήσεις της δοκιμής.

Συνεπώς, κρίνεται επιτακτική η περαιτέρω διερεύνηση και ενδεχόμενη τυποποίηση γεωμετρικών παραμέτρων, ιδιαίτερα της όδευσης του καλωδίου γείωσης, ώστε να περιοριστεί η αβεβαιότητα και να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ευαίσθητα συστήματα όπως ο σύνδεσμος SpaceWire.

1.4. Βιβλιογραφική ανασκόπηση προτάσεων βελτίωσης της αναπαραγωγιμότητας δοκιμών ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2

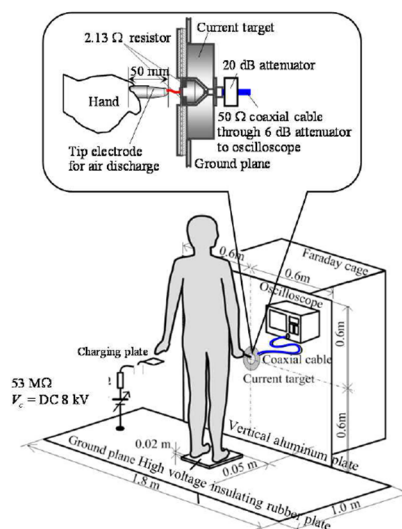
Κατά τη διαδικασία της αναθεώρησης για την 3^η έκδοση του Προτύπου προέκυψαν τέσσερα προσχέδια (Committee Draft - CD) της αναθεώρησης.

Στο πλαίσιο του πρώτου προσχεδίου, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης επαφής από γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαφόρων κατασκευαστών, έπειτα από πρωτοβουλία των εθνικών επιτροπών στην Ευρώπη. Βάσει των δεδομένων αυτών, προτάθηκε νέα κυματομορφή αναφοράς, η οποία βασίζεται στον μέσο όρο των καταγεγραμμένων κυματομορφών. Η κυματομορφή του 1ου CD (Σχήμα 1.35) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της προσέγγισης αυτής.

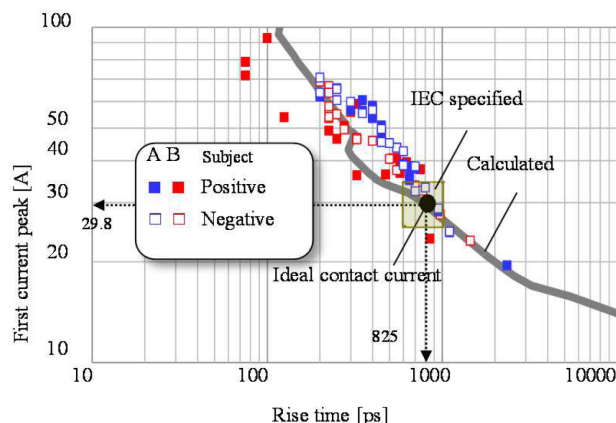


Σχήμα 1.35: Προτεινόμενες προδιαγραφές της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης επαφής στο 1^ο προσχέδιο της 3^{ης} έκδοσης [28]

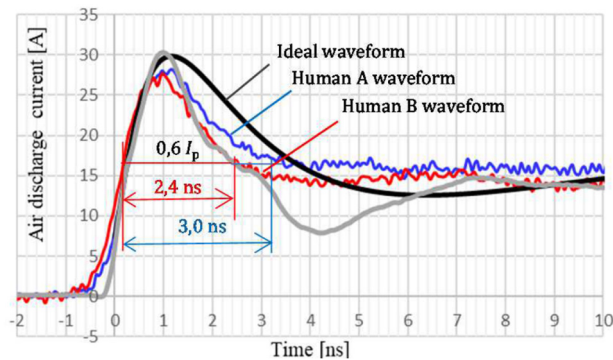
Η διάρκεια παλμού της πρώτης αιχμής στο 60 % της τιμής αιχμής (I_p) ορίζεται σε 1,7 ns, ενώ η πτωτική φάση της πρώτης αιχμής παρουσιάζεται εντονότερη. Δεδομένου ότι οι ταλαντώσεις εκδηλώνονται μεταξύ 10 ns και 40 ns, γύρω από τη δεύτερη αιχμή, προτάθηκε η μέγιστη τιμή του I_{p2} εντός του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος να περιορίζεται στο $\pm 30\%$ της τιμής αιχμής της κυματομορφής αναφοράς, ήτοι στα 9,7 A (για παλμό 4 kV). Επιπλέον, η προδιαγραφή του ρεύματος I_{30} στη χρονική στιγμή των 30 ns, η οποία περιλαμβανόταν στο υφιστάμενο Πρότυπο, καταργήθηκε. Η Ιαπωνική Εθνική Επιτροπή (JNC) εξέφρασε την αντίθεσή της στην προσέγγιση αυτή, υποστηρίζοντας ότι η κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης της μεθόδου επαφής θα πρέπει να βασίζεται σε πραγματικά μετρούμενα δεδομένα από εκφόρτιση αέρος δύο διαφορετικών φορτισμένων ατόμων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.36, και όχι σε υπολογισμένο μέσο όρο κυματομορφών από υφιστάμενες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι μετρήσεις ρεύματος πραγματοποιήθηκαν είκοσι φορές για κάθε επίπεδο τάσης δοκιμής (2 kV, 4 kV, 6 kV και 8 kV) και για τις δύο πολικότητες. Η απεικόνιση των τιμών I_p σε συνάρτηση με τον χρόνο ανόδου t_r ανέδειξε την τάση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.37 [28].



Σχήμα 1.36: Διάταξη μέτρησης για το ρεύμα εκφόρτισης αέρος μέσω φορητού ηλεκτροδίου, από φορτισμένο άνθρωπο [28]



Σχήμα 1.37: Συσχέτιση μεταξύ του χρόνου ανόδου και της πρώτης αιχμής ρεύματος της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης αέρος στα ± 8 kV [28]



Σχήμα 1.38: Κυματομορφή ρεύματος ανθρώπινης εκφόρτισης αέρος κοντά στις προδιαγραφές εκφόρτισης επαφής των 8 kV [28]

Παρατηρήθηκε ότι, για επίπεδο δοκιμής 8 kV, υπήρχε σημείο με $I_p = 30$ A και $t_r = 0,8$ ns, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Προτύπου. Τη χρονική στιγμή εκείνη, η διάρκεια παλμού της πρώτης αιχμής I_p ήταν 2,4 ns, ενώ η διάρκεια στο 60 % της τιμής I_p ήταν 3,0 ns (Σχήμα 1.38). Η αντίστοιχη τιμή για την ιδανική κυματομορφή που καθορίζεται στο Πρότυπο είναι 3,1 ns, γεγονός που υποδηλώνει ότι η πρώτη αιχμή της ιδανικής κυματομορφής βρίσκεται σε εξαιρετικά καλή συμφωνία με την κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης από το ανθρώπινο σώμα.

Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, η ιδανική κυματομορφή και οι αντίστοιχες μετρούμενες παράμετροι επανήλθαν στο ισχύον Πρότυπο στο πλαίσιο του 2^{ου} CD. Ωστόσο, διατυπώθηκαν σχόλια ότι οι υφιστάμενες προδιαγραφές δεν βελτιώνουν την καταστολή των ταλαντώσεων. Στο 3^ο CD, διατηρήθηκε η ιδανική κυματομορφή, ενώ η παράμετρος I_{30} αφαιρέθηκε επισήμως. Αντ' αυτής, εισήχθη εκ νέου η παράμετρος I_{p2} , με αναφορά στη μέγιστη τιμή της δεύτερης αιχμής μεταξύ 10 ns και 40 ns, όπως είχε αρχικά προταθεί στο 1^ο CD. Η ανοχή του I_{p2} καθορίστηκε σε ± 30 %, με βάση μέγιστη τιμή αναφοράς 9 A στα 20 ns, σύμφωνα με την ιδανική κυματομορφή (3^ο CD στο Σχήμα 1.35).

Η δεύτερη αιχμή της κυματομορφής εκφόρτισης στη μέθοδο επαφής δημιουργείται από το αποθηκευμένο φορτίο στον πυκνωτή (τυπική τιμή: 150 pF) και την αντίσταση εκφόρτισης (τυπική τιμή: 330 Ω) της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 1.35, οι κυματομορφές από πραγματικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης περιλαμβάνουν ταλαντώσεις με αιχμές μεταξύ 10 ns και 40 ns. Στις περιπτώσεις όπου η χωρητικότητα είναι μειωμένη και η αντίσταση εκφόρτισης αυξημένη, η κυματομορφή ενδέχεται να αξιολογηθεί ως αποδεκτή, καθώς δεν υφίσταται πλέον η απαίτηση για την παράμετρο I_{30} . Ωστόσο, αν προδιαγράφεται μόνο η I_{p2} χωρίς την I_{30} , είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί ως συμμορφούμενη μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές απαιτήσεις του Προτύπου, δημιουργώντας ένα σημαντικό πρόβλημα που παραμένει άλυτο. Οι συγκεκριμένοι προβληματισμοί ελήφθησαν υπόψη για την τελική έκδοση του αναθεωρημένου Προτύπου και η προδιαγραφή για την παράμετρο I_{30} διατηρήθηκε και συμπληρώθηκε από την προδιαγραφή για την παράμετρο I_{p2} .

1.4.1. Θέματα αναπαραγωγιμότητας κατά το Industry Council White Paper 3

Το White Paper 3 – System Level ESD – Part III [46] της Industry Council συνιστά ένα από τα πλέον θεμελιώδη τεχνικά κείμενα για την εις βάθος κατανόηση και αξιολόγηση της ατρωσίας ηλεκτρονικών

συστημάτων έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων κατά την πραγματική λειτουργία. Σε συνέχεια των δύο προηγούμενων εγγράφων της ίδιας σειράς, το τρίτο μέρος μετατοπίζει την έμφαση από την προστασία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στο επίπεδο chip (IC level) στην εκτίμηση της συνολικής συστημικής συμπεριφοράς. Στο έγγραφο τεκμηριώνεται η ανάγκη απομάκρυνσης από τα παραδοσιακά πρότυπα HBM και CDM, τα οποία, μολονότι προσφέρουν ένα ελάχιστο επίπεδο προστασίας στο επίπεδο του ολοκληρωμένου κυκλώματος, δεν αντανakλούν με ακρίβεια τις πολύπλοκες συνθήκες που επικρατούν σε ένα πλήρες προϊόν κατά τη χρήση του από τον τελικό χρήστη [20], [47], [48], [49].

Ορίζεται με σαφήνεια η έννοια της «συστημικής ηλεκτροστατικής ατρωσίας» ως η ικανότητα ενός πλήρους συστήματος να διαχειρίζεται ή να απορροφά παλμούς ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χωρίς να υφίσταται λειτουργικές ή μόνιμες βλάβες – είτε πρόκειται για ήπιες αστοχίες (soft failures), όπως προσωρινές δυσλειτουργίες, είτε για μόνιμες αστοχίες (hard failures), όπως η καταστροφή εξαρτημάτων. Το White Paper επισημαίνει ότι η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από μία πληθώρα παραγόντων, πέραν των χαρακτηριστικών των ICs. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν η τοπολογία της πλακέτας (PCB), οι διαδρομές επιστροφής ρεύματος, οι χωρητικότητες σύζευξης μεταξύ στοιχείων και περιβάλλοντος, η παρουσία καλωδιώσεων, οι θωρακίσεις και οι εξωτερικές μεταλλικές επιφάνειες.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα του εγγράφου είναι η διαπίστωση ότι η μεταβλητότητα στις μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων αποτελεί ένα συστηματικό και σοβαρό ζήτημα. Ακόμη και όταν εφαρμόζονται τα ίδια Πρότυπα και διαδικασίες, μικρές διαφοροποιήσεις στον εξοπλισμό, στην τοποθέτηση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, στο μήκος και τη διαδρομή του καλωδίου επιστροφής ή στη γείωση, οδηγούν σε αξιοσημείωτες αποκλίσεις στις κυματομορφές των παλμών και στα αποτελέσματα των δοκιμών. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η ίδια συσκευή μπορεί να χαρακτηριστεί ως «συμμορφούμενη» σε ένα εργαστήριο και «μη συμμορφούμενη» σε ένα άλλο, περιορίζοντας δραστικά τη δυνατότητα εξαγωγής αξιόπιστων και συγκρίσιμων συμπερασμάτων.

Για την αντιμετώπιση αυτής της ασυνέπειας, η Industry Council προτείνει την αυστηρή και λεπτομερή τεκμηρίωση όλων των κρίσιμων παραμέτρων της κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως ο χρόνος ανόδου, το μέγιστο ρεύμα (I_p), 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 τόσο τη διαφάνεια όσο και την αναπαραγωγικότητα των πειραμάτων. Για παράδειγμα, ένας παλμός με ταχύτερο χρόνο ανόδου μεταφέρει υψηλότερη ενέργεια σε μικρότερο χρονικό διάστημα, προκαλώντας ισχυρότερες επαγωγικές συζεύξεις και αυξημένο κίνδυνο αστοχίας για ευαίσθητα κυκλώματα. Αντίστοιχα, μικρές διαφοροποιήσεις στο μέγιστο ρεύμα μπορεί να μεταβάλουν το όριο αντοχής μίας συσκευής και να οδηγήσει σε διαφορετική απόκριση. Το White Paper 3 [46] αναγνωρίζει επίσης την αδυναμία των υφιστάμενων Προτύπων να καθορίσουν με ακρίβεια τις επιτρεπόμενες αποκλίσεις στις ανωτέρω παραμέτρους. Για παράδειγμα, το IEC 61000-4-2 προβλέπει εύρος τιμών για τον χρόνο ανόδου και το μέγιστο ρεύμα, χωρίς ωστόσο να προσδιορίζει επαρκώς τις συνέπειες αυτών των διαφοροποιήσεων στα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών διατάξεων μέτρησης και αποτελεί βασική αιτία της ενδοεργαστηριακής και δια-εργαστηριακής μεταβλητότητας.

Μία από τις κρίσιμότερες προτάσεις του White Paper 3 είναι η ενσωμάτωση 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 και οι

συντελεστές διασποράς, επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της μεταβλητότητας και την ανίχνευση συστημικών σφαλμάτων στον εξοπλισμό ή στη μεθοδολογία. Ενδεικτικά, το έγγραφο παραθέτει παράδειγμα περίπτωσης, όπου μία μικρή αύξηση του χρόνου ανόδου κατά 10 % προκάλεσε την εξαφάνιση μίας ήπιας αστοχίας, γεγονός που υποδεικνύει τη σημασία της ακριβούς μέτρησης και της τεκμηρίωσης ακόμη και «δευτερευουσών» παραμέτρων.

Σε αυτό το πλαίσιο, το White Paper 3 προτείνει επίσης πιο ρεαλιστικά μοντέλα δοκιμών, όπως το Human Metal Model (HMM) και το Extended-HMM, τα οποία λαμβάνουν υπόψη την πλήρη φυσική διάσταση ενός ανθρώπου που κρατά μία συσκευή. Οι χωρητικότητες σύζευξης με το περιβάλλον, τα μονοπάτια επιστροφής του ρεύματος και η σύνθετη γεωμετρία του ανθρώπινου 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 δίδεται και στις στρατηγικές σχεδίασης για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του συστήματος. Για παράδειγμα, η προσεκτική και στρατηγική τοποθέτηση των διατάξεων αρπάγης (clamp devices) πολύ κοντά στα σημεία εισόδου του σήματος συντελεί στο να απορροφάται άμεσα η ενέργεια μίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, πριν αυτή προλάβει να φτάσει σε ευαίσθητα κυκλώματα. Εξίσου σημαντική είναι και η ορθή επιλογή διόδων περιορισμού υπερτάσεων (Transient Voltage Suppressors – TVS), με κριτήρια όπως η ηλεκτρική χωρητικότητα, ο χρόνος απόκρισης και το μέγιστο επίπεδο ενέργειας που δύνανται να απορροφήσουν. Εφόσον το TVS δεν έχει επιλεγεί ορθά, είτε μπορεί να ενεργοποιηθεί καθυστερημένα, είτε να επηρεάσει τη λειτουργία γραμμών υψηλής ταχύτητας, επιφέροντας προβλήματα στο ίδιο το κύκλωμα.

Η μείωση της αυτεπαγωγής και των φαινομένων σύζευξης μεταξύ γραμμών σήματος και επιστροφής αποτελεί επίσης κρίσιμη πρακτική. Υψηλή αυτεπαγωγή οδηγεί σε αύξηση των υπερτάσεων κατά τη διέλευση παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με συνέπεια την υπέρβαση των ορίων λειτουργίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Επιπλέον, η αποφυγή κυκλωμάτων με κοινή γείωση αποτρέπει τη διασπορά του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε περιοχές που δεν σχετίζονται άμεσα με το σημείο εκφόρτισης, περιορίζοντας τον κίνδυνο απρόβλεπτων αστοχιών. Στο ίδιο πνεύμα, το έγγραφο υπογραμμίζει τη σπουδαιότητα της βελτιστοποίησης της κατασκευής των τυπωμένων πλακετών (PCB), τόσο ως προς τη διάταξη (layout) των εξαρτημάτων και των διαδρομών, όσο και ως προς τη διαστρωμάτωση των επιπέδων (stack-up). Η ενσωμάτωση συνεχόμενων επιπέδων γείωσης, η αποφυγή ασυνεχειών στις διαδρομές επιστροφής του ρεύματος, καθώς και η προσεκτική τοποθέτηση των διαμπερών οπών (vias), συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση της σύνθετης αντίστασης και στην αύξηση της ανθεκτικότητας του κυκλώματος απέναντι σε φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Επιπλέον, τονίζεται η ανάγκη περιορισμού των διαδρομών σύζευξης, δηλαδή των ανεπιθύμητων μονοπατιών μέσω των οποίων δύναται να μεταδοθεί η παλμική ενέργεια. Ο περιορισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης τοπολογίας και επαρκών αποστάσεων μεταξύ των στοιχείων. Όταν ευαίσθητα κυκλώματα τοποθετούνται σε μεγαλύτερη απόσταση από περιοχές ισχυρών διαταραχών, η πιθανότητα εμφάνισης ανεπιθύμητων παρεμβολών ή βλαβών λόγω μεταφοράς ενέργειας από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μειώνεται σημαντικά.

Συνοψίζοντας, το White Paper 3 παρέχει ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο για την κατανόηση και τη διαχείριση της συστημικής ανθεκτικότητας έναντι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αναδεικνύει τη σημασία της στατιστικής τεκμηρίωσης, της ακριβούς μέτρησης κρίσιμων παραμέτρων, της ενσωμάτωσης ρεαλιστικών μοντέλων προσομοίωσης και της εφαρμογής στοχευμένων σχεδιαστικών

πρακτικών. Η συμβολή του στη βαθύτερη κατανόηση της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας στις δοκιμές είναι καθοριστική για τη διασφάλιση αξιόπιστων και συγκρίσιμων αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό, το συγκεκριμένο υλικό συνιστά βασικό πυλώνα της παρούσας ενότητας, τόσο για τη θεμελίωση της μεθοδολογικής προσέγγισης όσο και για την ανάδειξη των βέλτιστων πρακτικών αξιολόγησης των φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

- Διακρίβωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης
 - ✓ Επαλήθευση κυματομορφής εκφόρτισης επαφής με φορτία διαφορετικά από χαμηλής σύνθετης αντίστασης ωμικά φορτία [50]
 - ✓ Εισαγωγή μεθόδου διακρίβωσης για λειτουργία εκφορτίσεων αέρος χωρίς τις αβεβαιότητες που επιφέρει η ίδια η εκφόρτιση αέρα
 - ✓ Μέτρηση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένου του φάσματος ισχύος ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF) [51], [52]
- Μέθοδοι βελτίωσης της επαναληψιμότητας του τόξου στην εκφόρτιση αέρος [53], [54]
 - ✓ Ιονισμός για σταθεροποίηση του μήκους του τόξου
 - ✓ Διαφορετικά υλικά για τις άκρες εκφόρτισης αέρα
 - ✓ Βελτιώσεις στον έλεγχο θερμοκρασίας και υγρασίας
 - ✓ Τεχνικές εξουδετέρωσης υπολοίπου φορτίου
 - ✓ Χρήση ρομποτικών διατάξεων για βελτίωση του ελέγχου της ταχύτητας προσέγγισης
- ... Βελτιώσεις στις διαδικασίες δοκιμών
 - ✓ Σύσταση για αύξηση του αριθμού των παλμών σε κάθε σημείο δοκιμής για καλύτερη ανίχνευση αστοχιών τύπου soft-fail
 - ✓ Καλύτερη κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ τάσης εκφόρτισης ESD και υγρασίας [55], [56], [57]
 - ✓ Χρήση ρομποτικών συστημάτων για βελτίωση της επαναληψιμότητας των δοκιμών [58], [59]
 - ✓ Βελτιώσεις στην τεκμηρίωση των εφαρμοζόμενων διαδικασιών, συμπεριλαμβανομένης της καταγραφής με βίντεο

Τέλος, το White Paper 3 παρουσιάζει επίσης μεθόδους προσομοίωσης, οι οποίες δύνανται να ενισχύσουν την κατανόηση των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συστήματος και να συμβάλλουν στον σχεδιασμό συστημάτων με αυξημένη αντοχή έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων:

- ✓ Μοντέλα επιπέδου SPICE για τις γεννήτριες ESD [50], [60], [61], [62]
- ✓ Τρισδιάστατα μοντέλα γεννητριών ESD και διατάξεων συστήματος

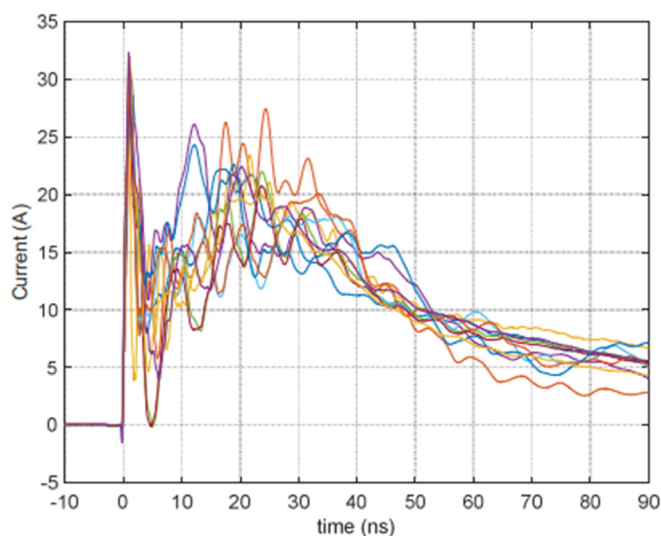
1.4.2. Φερρίτες αρπάγης ως καταστολείς των ταλαντώσεων στις κυματομορφές ESD

Στο πλαίσιο της διερεύνησης τεχνικών περιορισμού του φαινομένου των αποσβεννυόμενων ταλαντώσεων, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μελέτες που εξετάζουν την εφαρμογή φερριτών αρπάγης και τη διάταξη του καλωδίου γείωσης κατά τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

1.4.2.1. Επίδραση των φερριτών αρπάγης κατά μήκος του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ESD και της διάταξης του καλωδίου στις κυματομορφές ESD

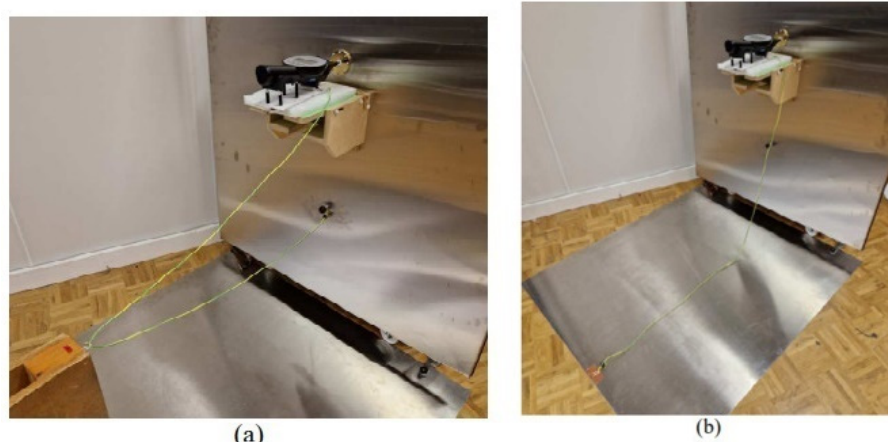
Οι Carlo Carobbi, Alain Burger και Spartaco Caniggia στην εργασία τους [63] εξετάζουν την επίδραση που έχει τόσο η διάταξη του καλωδίου γείωσης όσο και η εισαγωγή φερρίτη αρπάγης κατά μήκος του καλωδίου αυτού, στη μορφή της κυματομορφής εκφόρτισης κατά τη διαδικασία διακρίβωσης με εκφορτίσεις επαφής γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το κεντρικό πρόβλημα που μελετάται είναι το φαινόμενο των αποσβεννυμένων ταλαντώσεων, το οποίο εμφανίζεται κυρίως μεταξύ 10 ns και 40 ns μετά την πρώτη αιχμή της κυματομορφής.

Η μελέτη βασίστηκε σε προηγούμενη διερεύνηση, που πραγματοποιήθηκε το 2019, στην οποία συμμετείχαν έντεκα διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 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 τις παραμέτρους I_p , t_r , I_{30} και I_{60} , το φαινόμενο των ταλαντώσεων που παρατηρήθηκε ήταν ιδιαίτερα έντονο και διαφοροποιούνταν σημαντικά από μοντέλο σε μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.39.



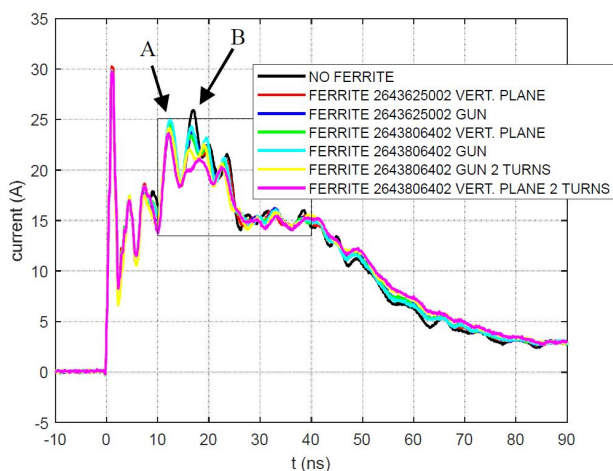
Σχήμα 1.39: Κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης 11 γεννητριών ESD για εκφορτίσεις επαφής των 8kV [63]

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 πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι η τυποποιημένη διάταξη διακρίβωσης που περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], με την προσθήκη ενός οριζοντίου επιπέδου γείωσης συνδεδεμένου 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 γείωσης συνδέεται με τη γείωση και στο σημείο όπου το καλώδιο γείωσης συνδέεται με τη γεννήτρια. Παράλληλα, εξετάστηκαν διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου, όπως η «τριγωνική» διάταξη διακρίβωσης που ορίζει το Πρότυπο, η «πραγματική» που προσομοιάζει την πραγματική διάταξη δοκιμών και η «απομονωμένη πραγματική», η οποία είναι πανομοιότυπη με την «πραγματική», ανυψώνοντας όμως ένα τμήμα του καλωδίου, ώστε να απομονωθεί από τη γείωση. Οι δύο πρώτες διατάξεις απεικονίζονται στο Σχήμα 1.40.

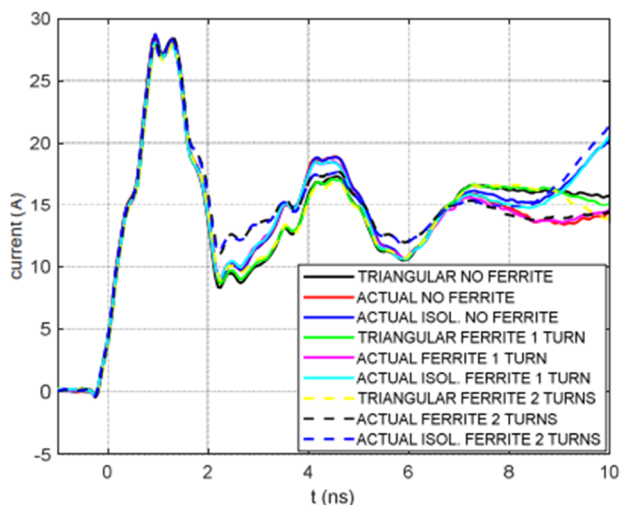


Σχήμα 1.40: "Τριγωνική" (a) και "πραγματική" (b) διάταξη του καλωδίου επιστροφής [63]

Στον πρώτο γύρο μετρήσεων διερευνήθηκε η «τριγωνική» διάταξη του καλωδίου γείωσης. Μελετήθηκαν και οι δύο φερρίτες στις δύο διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικό αριθμό περιελίξεων γύρω από τον πυρήνα. Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η εισαγωγή του φερρίτη είναι αποτελεσματική κυρίως στην καταστολή των ταλαντώσεων στην περιοχή των 20 ns. Αντίθετα, οι παράμετροι t_r , I_p και I_{60} σπάνια επηρεάζονται από την εισαγωγή φερριτών. Παρατηρήθηκε ακόμη ότι ο φερρίτης προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα, όταν τοποθετείται 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 1.41 είναι ευδιάκριτη η μικρή μείωση της αιχμής A με την εισαγωγή του φερρίτη, ενώ η αιχμή B παρουσιάζει έντονη εξασθένηση. Η κυματομορφή B χωρίς φερρίτη βρίσκεται εκτός προδιαγραφών της νέας έκδοσης του Προτύπου για χρόνους μεταξύ των 10 ns και 40 ns. Τα όρια των προδιαγραφών απεικονίζονται με το παραλληλόγραμμο μεταξύ 10 ns και 40 ns.



Σχήμα 1.41: Αποτελέσματα πρώτου γύρου μετρήσεων [63]



Σχήμα 1.42: Αποτελέσματα δεύτερου γύρου μετρήσεων [63]

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δεύτερος γύρος μετρήσεων, όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο ο φερρίτης με κωδικό 2643625002 σε όλες τις διατάξεις του καλωδίου γείωσης. 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 ταλαντώσεων και διασφαλίζει καλύτερη συμμόρφωση της γεννήτριας με τις νέες απαιτήσεις της τρίτης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 αναφορικά με τη δεύτερη αιχμή του παλμού, ενώ η αιχμή Α δεν επηρεάζεται από την εφαρμογή φερριτών. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.42.

Συμπερασματικά, η εργασία [63] αποδεικνύει ότι η σωστή επιλογή διάταξης καλωδίου γείωσης και η στρατηγική τοποθέτηση κατάλληλου φερρίτη μπορούν να μειώσουν σημαντικά το πρόβλημα του φαινομένου ταλαντώσεων στις κυματομορφές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων επαφής. Ακόμη συμπεραίνεται ότι η εφαρμογή φερρίτη και η διάταξη του καλωδίου δεν επηρεάζουν την πρώτη αιχμή και τον χρόνο ανόδου, καθώς και ότι ο φερρίτης πρέπει να τοποθετείται επί του καλωδίου γείωσης κοντά στο άκρο στο οποίο πραγματοποιείται η σύνδεση με τη γείωση.

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

1.4.2.2. Επίδραση φερριτών στο φαινόμενο ταλαντώσεων για δύο γεννήτριες ESD

Οι Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jianqing Wang και Osamu Fujiwara στην έρευνα τους [64] εξετάζουν τη δυνατότητα καταστολής του φαινομένου ταλαντώσεων στην κυματομορφή εκφόρτισης επαφής δύο διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μέσω της χρήσης φερριτών επί του καλωδίου γείωσης. Συγκεκριμένα, διερευνάται κατά πόσο μπορεί να επιτευχθεί η καταστολή των ταλαντώσεων στις κυματομορφές εκφόρτισης επαφής κατά τη διαδικασία διακρίβωσης, με τη χρήση καλωδίου γείωσης μήκους 2 m, τόσο με όσο και χωρίς προσάρτηση φερρίτη, σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά συντονισμού της σύνθετης αντίστασης των καλωδίων.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνές τους [36], [65], [66] έχει διαπιστωθεί ότι το φαινόμενο ταλαντώσεων στις κυματομορφές εκφόρτισης επαφής οφείλεται κυρίως σε συντονιστικά φαινόμενα του καλωδίου γείωσης. Οι φασματικές διακυμάνσεις που απορρέουν από το φαινόμενο αυτό 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 ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και δεν επηρεάζονται από τη διάταξη του καλωδίου ή το περιβάλλον μέτρησης. Επιπροσθέτως, από έρευνες που επικεντρώνονται στη διάταξη του καλωδίου φόρτισης της γεννήτριας, προκύπτει ότι όταν το καλώδιο φόρτισης αιωρείται πάνω από τη μεταλλική επιφάνεια γείωσης, το φαινόμενο ταλαντώσεων καταστέλλεται αποτελεσματικότερα συγκριτικά με την περίπτωση κατά την οποία το καλώδιο εφάπτεται στην επιφάνεια αυτή. Παρ' όλα αυτά, δεδομένα από προηγούμενες μελέτες, όπου χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπαταρίας με εργοστασιακά ενσωματωμένο φερρίτη στο καλώδιο γείωσης, ανέδειξαν ότι το φαινόμενο ταλαντώσεων εξακολουθεί να εμφανίζεται, γεγονός που καθιστά αβέβαιο το κατά πόσο η προσθήκη φερρίτη, από μόνη της, αρκεί για την πλήρη εξάλειψη του.

Για τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης [64] χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: μία τύπου μπαταρίας και μία εναλλασόμενου ρεύματος. Στον Πίνακα 1.8

παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των δύο γεννητριών, καθώς και των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

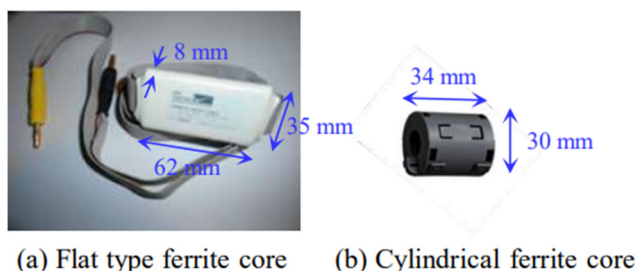
Πίνακας 1.8: Χαρακτηριστικά των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις [64]

Γεννήτρια	Κατασκευαστής	Χώρα	Μέγιστη Τάσης Φόρτισης	Παρατηρήσεις
B	a	Japan	30,5 kV	Με τροφοδοσία
D*	c	Switzerland	16,0 kV	Με μπαταρία

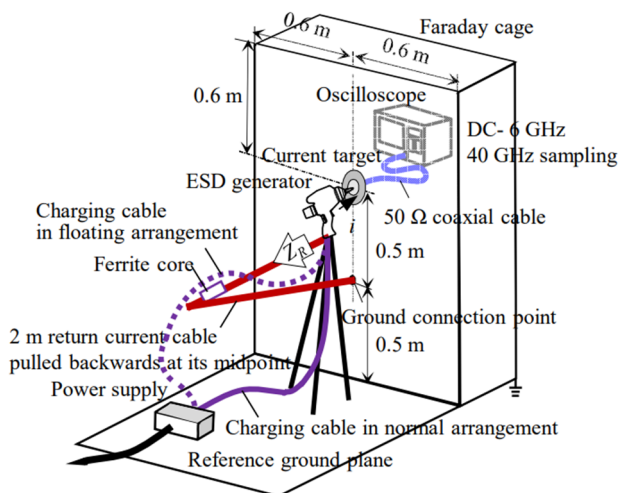
*D: καλώδιο επιστροφής ρεύματος με επίπεδο φερρίτη τοποθετημένο στο μέσο του

Η γεννήτρια “D” τροφοδοτείται από μπαταρία και, κατά συνέπεια, δεν διαθέτει καλώδιο φόρτισης. Το καλώδιο γείωσης που χρησιμοποιείται για τη γεννήτρια “B” θα αναφέρεται ως «καλώδιο B», ενώ εκείνο για τη γεννήτρια “D” ως «καλώδιο D». Στο καλώδιο D είναι προσαρτημένος από τον κατασκευαστή ένας επίπεδος φερρίτης — όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 1.43 (a) — του οποίου, ωστόσο, οι τεχνικές προδιαγραφές δεν έχουν δημοσιευτεί. Για λόγους συγκρισιμότητας, τοποθετήθηκε σε αντίστοιχη θέση επί του καλωδίου της γεννήτριας B ένας κοινά διαθέσιμος κυλινδρικός φερρίτης (ZCAT3035-1330), προκειμένου να εκτιμηθεί κατά πόσο επηρεάζει το φαινόμενο ταλαντώσεων υπό παρόμοιες συνθήκες.

Η διάταξη και οι συνθήκες διακρίβωσης, καθώς και η μεθοδολογία μέτρησης των κυματομορφών εκφόρτισης επαφής διακρίβωσης, ακολουθήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.44:



Σχήμα 1.43: (a) Επίπεδος φερρίτης προσαρτημένος στο καλώδιο D (b) Κυλινδρικός φερρίτης που χρησιμοποιείται για το καλώδιο B σε αντιπαράβολή με το καλώδιο D [64]

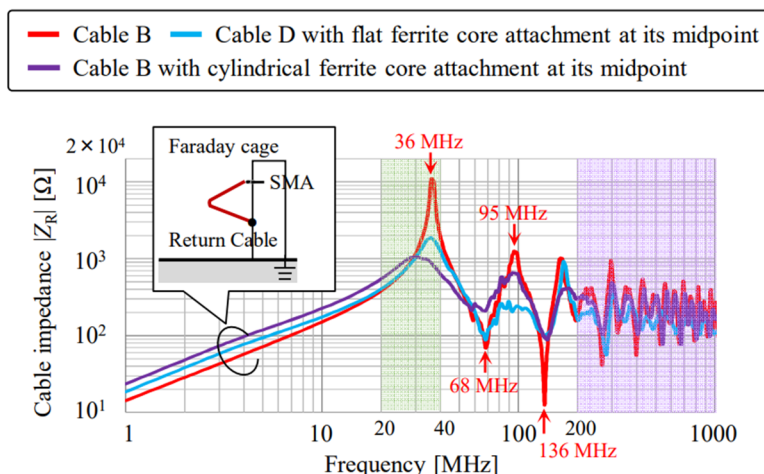


Σχήμα 1.44: Διάταξη μέτρησης για διακρίβωση γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] [64]

Το ηλεκτρόδιο της γεννήτριας βρίσκεται σε επαφή με το κεντρικό ηλεκτρόδιο ενός ομοαξονικού προσαρμογέα (ανιχνευτή) ρεύματος (ή στόχος ρεύματος) που είναι τοποθετημένος στο κέντρο ενός γειωμένου κλωβού Faraday. Το καλώδιο επιστροφής θα πρέπει να είναι $(2 \pm 0,05)$ m σε μήκος. Το καλώδιο επηρεάζει το φαινόμενο των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων που λαμβάνει χώρα μετά την κάθοδο του πρώτου μεγίστου της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής και γι' αυτό το Πρότυπο ορίζει διάταξη ισοσκελούς τριγώνου με το κέντρο του να είναι τραβηγμένο προς τα πίσω και γειώνεται 50 cm κάτω από τον στόχο ρεύματος. Ενώ, σύμφωνα με το Σχήμα 1.44, Z_R είναι η σύνθετη αντίσταση του καλωδίου γείωσης, το οποίο είναι γειωμένο στο ένα άκρο και το οποίο «βλέπει» η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Όσον αφορά το καλώδιο φόρτισης υψηλής τάσης της γεννήτριας που λειτουργεί με τροφοδοσία (τύπου B), το μήκος του είναι περίπου 2 m και το Πρότυπο δεν καθορίζει συγκεκριμένες προδιαγραφές για το μήκος ή την τοποθέτησή του. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα, το εν λόγω καλώδιο τοποθετήθηκε παράλληλα προς το κατακόρυφο μεταλλικό επίπεδο (vertical metal plane) και συνδέθηκε με την παροχή ισχύος κατά μήκος ενός οριζόντιου μεταλλικού επιπέδου (horizontal metal plane) στο δάπεδο. Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση στο φαινόμενο ταλαντώσεων της διαφοράς μεταξύ της τυπικής διάταξης (normal arrangement, όπως αναφέρεται και στο Σχήμα 1.45) που περιγράφηκε και της διάταξης, όπου το καλώδιο φόρτισης είναι απομονωμένο από τα κατακόρυφα και οριζόντια μεταλλικά επίπεδα – ελεύθερης διάταξης (floating arrangement, όπως αναφέρεται και στο Σχήμα 1.45).

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας, στην επιστημονική εργασία [64] περιλαμβάνονται δεδομένα που αφορούν την σύνθετη αντίσταση των διαθέσιμων καλωδίων. Στο ακόλουθο Σχήμα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά συχνότητας της σύνθετης αντίστασης $|Z_R|$ ενός καλωδίου γείωσης (με γείωση στο ένα άκρο), τα οποία αντιστοιχούν στην σύνθετη αντίσταση που «βλέπει» η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σύμφωνα με τη διάταξη καλωδίου σε περιβάλλον διακρίβωσης όπως ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 και στο Σχήμα 1.45. Τα χαρακτηριστικά συχνότητας της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου γείωσης για συχνότητες άνω των 200 MHz δεν επηρεάζουν το φάσμα της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής. Η κόκκινη γραμμή παρουσιάζει τα αποτελέσματα μέτρησης για το καλώδιο B, η γαλάζια για το καλώδιο D και η μωβ για το καλώδιο B με προσαρτημένο τον κυλινδρικό φερρίτη στο κέντρο του.



Σχήμα 1.45: Σύνθετη αντίσταση καλωδίου που «βλέπει» η γεννήτρια για καλώδια 2 m ρεύματος επιστροφής γειωμένων από το ένα άκρο [64]

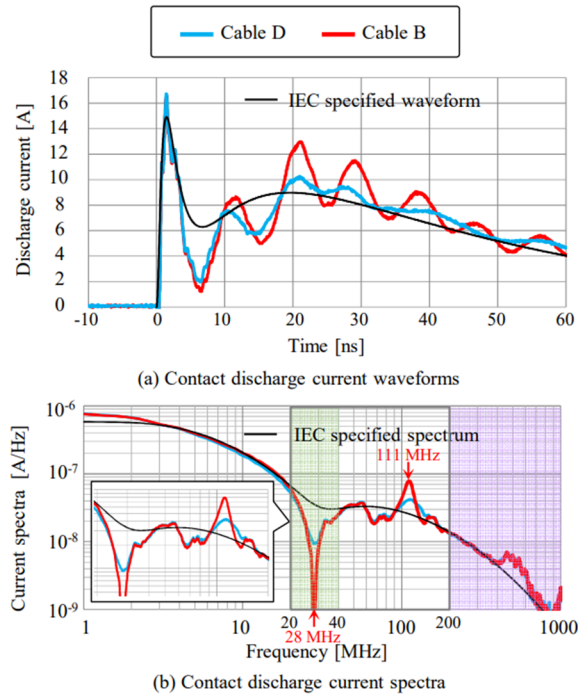
Η σύνθετη αντίσταση των καλωδίων μετρήθηκε ως εξής: Στη διάταξη καλωδίων υπό συνθήκες διακρίβωσης, το ένα άκρο του καλωδίου γείωσης αποσυνδέθηκε από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και συνδέθηκε στην υποδοχή του SMA ακροδέκτη που είναι τοποθετημένος στον στόχο ρεύματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.45. Η έξοδος SMA συνδέθηκε σε αναλυτή δικτύου (network analyzer Rohde & Schwarz ZNB8, 9 kHz – 8,5 GHz), μέσω ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω, για τη μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης S_{11} στις συχνότητες από 1 MHz έως 8,5 GHz, με βήμα 1 MHz. Με τον τρόπο αυτό, η σύνθετη αντίσταση του καλωδίου γείωσης υπολογίσθηκε με χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$Z_R = |Z_R|e^{i\varphi} = \frac{(1 + S_{11})}{1 - S_{11}} * Z_0 \quad (5)$$

όπου: $Z_0 = 50\Omega$

Με βάση το Σχήμα 1.45 παρατηρούνται τα ακόλουθα. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο συντονισμός των καλωδίων γείωσης αρχίζει να εκδηλώνεται σε συχνότητες άνω των 30 MHz έως 40 MHz. Όπου χρησιμοποιήθηκε φερρίτης, διαπιστώνεται σαφής μείωση των αιχμών συντονισμού γύρω στα 40 MHz και στα 100 MHz, γεγονός που συνεπάγεται και μείωση της τιμής του συντελεστή ποιότητας Q .

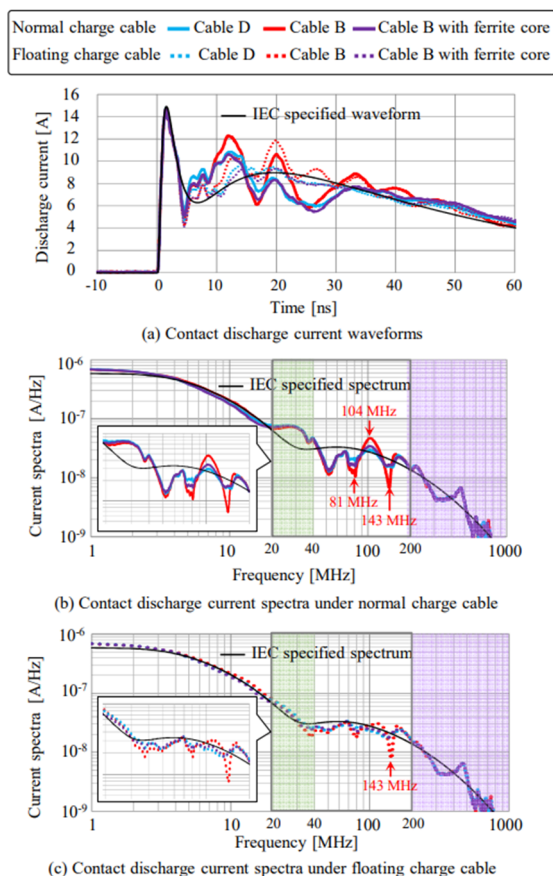
Επιπλέον, συγκρίνοντας το καλώδιο B με προσαρτημένο φερρίτη και το καλώδιο D (αντιστοιχούν στη μωβ και τη γαλάζια γραμμή αντίστοιχα), παρατηρείται ότι η πρώτη κορυφή συντονισμού, καθώς και η πρώτη βύθιση (τοπικό ελάχιστο) του καλωδίου B, είναι χαμηλότερες και λιγότερο έντονες σε σχέση με εκείνες του καλωδίου D. Όσον αφορά τη δεύτερη αιχμή συντονισμού, αυτή εμφανίζεται υψηλότερη για το καλώδιο B συγκριτικά με το καλώδιο D, ενώ οι βυθίσεις δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων.



Σχήμα 1.46: (a) Κυματομορφές ρευμάτων εκφόρτισης επαφής στα 4 kV από την ESD γεννήτρια D και ιδανική κυματομορφή IEC μαζί με (b) τα φάσματα του ρεύματος και το ιδανικό φάσμα IEC [64]

Στην πρώτη φάση της μελέτης [64] εξετάστηκε η γεννήτρια D, η οποία λειτουργεί με τροφοδοσία μπαταρίας και δεν διαθέτει καλώδιο φόρτισης. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV, καθώς και φασματική ανάλυση στο εύρος 20 MHz έως 200 MHz. Οι δοκιμές συγκέντρωσαν δεδομένα για το καλώδιο D (με ενσωματωμένο φερρίτη) και για το καλώδιο B, το οποίο τοποθετήθηκε στη θέση του καλωδίου D για λόγους σύγκρισης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.46, το καλώδιο D με τον ενσωματωμένο φερρίτη καταστέλλει αισθητά το φαινόμενο ταλαντώσεων που ακολουθεί την πρώτη αιχμή. Στο φασματικό πεδίο, παρατηρήθηκαν μικρότερη κορυφή στα 111 MHz και πιο ήπια βύθιση στα 28 MHz σε σχέση με το καλώδιο B. Αυτές οι διαφορές σχετίζονται με τη χαμηλότερη κορυφή συντονισμού στα 36 MHz και την πιο «ρηχή» βύθιση στα 136 MHz της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου B, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.45. Συμπεραίνεται ότι η αποτελεσματικότητα του φερρίτη εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή ποιότητας Q του καλωδίου γείωσης.

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι φασματικές συχνότητες συντονισμού της κυματομορφής εκφόρτισης δεν ταυτίζονται απολύτως με τις συχνότητες συντονισμού των καλωδίων, πιθανώς λόγω των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που παρεμβάλλει ο κατασκευαστής μεταξύ καλωδίου γείωσης και πυκνωτή εκφόρτισης στη γεννήτρια D. Επιπλέον, η φασματική κορυφή στην περιοχή 400 - 500 MHz αποδίδεται σε φαινόμενα συντονισμού κατανεμημένων παραμέτρων μεταξύ του ηλεκτροδίου εκφόρτισης και του στόχου ρεύματος, τα οποία δεν περιλαμβάνονται στην ιδανική κυματομορφή του IEC 61000-4-2.



Σχήμα 1.47: (α) Κυματομορφές ρευμάτων εκφόρτισης επαφής στα 4 kV από την ESD γεννήτρια B και η ιδανική κυματομορφή IEC μαζί με (β) και (γ) τα φάσματα του ρεύματος για τυπική και ελεύθερη διάταξη του καλωδίου φόρτισης αντίστοιχα [64]

Στη δεύτερη φάση, εξετάστηκε η γεννήτρια Β (τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος). Μετρήθηκαν κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης επαφής στα 4 kV και φάσματα από 20 MHz έως 200 MHz, τόσο με το καλώδιο Β (χωρίς και με φερρίτη), όσο και με το καλώδιο D προσαρμοσμένο στη γεννήτρια Β. Οι μετρήσεις έγιναν σε δύο διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου φόρτισης: τυπική (normal arrangement) και ελεύθερη (floating arrangement). Στο Σχήμα 1.47 απεικονίζονται οι αντίστοιχες κυματομορφές και τα φασματικά αποτελέσματα συγκρινόμενα με την ιδανική κυματομορφή του Προτύπου.

Η ανάλυση αποδεικνύει ότι η χρήση φερρίτη τόσο στο καλώδιο D όσο και στο καλώδιο Β μειώνει σημαντικά το φαινόμενο ταλαντώσεων. Η βελτίωση αυτή ενισχύεται περαιτέρω, όταν το καλώδιο φόρτισης βρίσκεται σε ελεύθερη διάταξη. Στο φάσμα του ρεύματος (Σχήμα 1.47 (b)), η χρήση φερρίτη περιορίζει αισθητά τις βυθίσεις συντονισμού στα 81 MHz και 143 MHz, καθώς και την αιχμή στα 104 MHz. Παράλληλα, οι φασματικές συχνότητες συντονισμού δεν ταυτίζονται πλήρως με εκείνες της σύνθετης αντίστασης των καλωδίων γείωσης, λόγω της παράλληλης επίδρασης του καλωδίου φόρτισης και των χαρακτηριστικών εμπέδισής του.

Με την επιλογή ελεύθερης διάταξης του καλωδίου φόρτισης παρατηρείται, στο φάσμα ρεύματος (Σχήμα 1.47 (c)), αισθητή μείωση του φαινομένου ταλαντώσεων ακόμη και για το καλώδιο Β χωρίς φερρίτη, με εξαίρεση μια βύθιση στα 143 MHz. Η καταστολή είναι ακόμη μεγαλύτερη στα καλώδια γείωσης με προσάρτηση φερρίτη, με αποτέλεσμα οι κυματομορφές να προσεγγίζουν περισσότερο την ιδανική κυματομορφή IEC. Πρόσφατες μελέτες [67], [68] επιβεβαιώνουν ότι η ελεύθερη διάταξη καλωδίου φόρτισης πάνω από μεταλλικό επίπεδο τείνει να περιορίζει το φαινόμενο ταλαντώσεων πιο αποτελεσματικά από τη διάταξη κατά μήκος του μεταλλικού επιπέδου (τυπική διάταξη). Οι παρατηρούμενες συχνότητες μεταβολής στο φάσμα σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά συντονισμού της παράλληλης σύνθετης αντίστασης του καλωδίου γείωσης και του καλωδίου φόρτισης.

Συνολικά, η έρευνα [64] αποδεικνύει ότι, και για τις δύο γεννήτριες ESD, η φασματική διακύμανση γύρω στα 100 MHz, που σχετίζεται με τον συντονισμό του καλωδίου γείωσης, καταστέλλεται σημαντικά με την τοποθέτηση φερρίτη στο κέντρο του καλωδίου. Η επίδραση αυτή συνδέεται άμεσα με τη μείωση των τιμών Q από τα χαρακτηριστικά συχνότητας της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου. Ιδιαίτερα για τη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, η χρήση ελεύθερης διάταξης του καλωδίου φόρτισης μειώνει αισθητά το φαινόμενο ταλαντώσεων σε ολόκληρο το εύρος των 20 MHz έως 200 MHz. Οι κυματομορφές, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, προσεγγίζουν πλέον σημαντικά την ιδανική κυματομορφή IEC, βελτιώνοντας τη συμμόρφωση των γεννητριών με τις απαιτήσεις του προτύπου και περιορίζοντας την αβεβαιότητα στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

1.4.3. Ρομποτικές δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

Οι δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορούν να υλοποιούνται είτε χειροκίνητα, είτε με ρομποτική υποστήριξη, είτε μέσω πλήρους αυτοματοποίησης [46]. Στη χειροκίνητη εκτέλεση, ο χειριστής εφαρμόζει τα πλήγματα της εκφόρτισης και επιτηρεί το δοκίμιο για τυχόν ενδείξεις αστοχίας. Στις ρομποτικά υποστηριζόμενες δοκιμές, η εφαρμογή των παλμών πραγματοποιείται από ρομποτικό βραχίονα, ενώ η παρακολούθηση του δοκιμίου ως προς ενδεχόμενες αστοχίες παραμένει ευθύνη του χειριστή. Αντιθέτως, στην πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία δοκιμών, το ρομποτικό σύστημα αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου την εφαρμογή των παλμών, την επιτήρηση, την επανεκκίνηση και τη συνολική διαχείριση του δοκιμίου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.48.



Σχήμα 1.48: Ρομποτικό σύστημα δοκιμών κατά IEC 61000-4-2 (www.amberpi.com)

1.4.3.1. Πλεονεκτήματα της ρομποτικής διάταξης δοκιμών

Επαναληψιμότητα

Η δοκιμή εκφόρτισης αέρος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος του τόξου, το οποίο παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις ακόμη και στο ίδιο σημείο εφαρμογής και για την ίδια τάση δοκιμής. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται εν μέρει σε στατιστικούς παράγοντες, αλλά και στον τρόπο προσέγγισης της κεφαλής εκφόρτισης. Σε υψηλότερες ταχύτητες προσέγγισης, η ταχύτητα ανόδου μειώνεται, με αποτέλεσμα η κορυφή του ρεύματος να αυξάνεται κατά μέσο όρο. Στην πράξη, παρατηρείται ότι ορισμένοι χρήστες, λόγω μη προσεκτικής χρήσης, σύρουν την κεφαλή αέρα πάνω στην επιφάνεια του προϊόντος, προκαλώντας εκφόρτιση κατά την επαφή με την πλαστική επιφάνεια. Η πρακτική αυτή θεωρείται εξαιρετικά επικίνδυνη, καθώς οδηγεί σε μη ρεαλιστικά χαμηλή ταχύτητα ανόδου. Καθίσταται επομένως απαραίτητος ο ακριβής έλεγχος τόσο της ταχύτητας προσέγγισης απευθείας στο σημείο εκφόρτισης όσο και της γωνίας κρατήματος της γεννήτριας. Η χρήση ρομποτικού συστήματος προσφέρει τον απαιτούμενο έλεγχο και τη δυνατότητα επαναληψιμότητας όλων των κρίσιμων παραμέτρων, όπως η ταχύτητα προσέγγισης, η γωνία και η ακριβής θέση εφαρμογής.

Επάρκεια δοκιμής

Το πλεονέκτημα ως προς την επάρκεια της δοκιμής έγκειται κυρίως στη δυνατότητα εφαρμογής μεγάλου αριθμού συνεπών εκφορτίσεων. Σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27], προβλέπεται η εφαρμογή δέκα παλμών ανά σημείο δοκιμής. Ωστόσο, υπάρχουν χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το δοκίμιο παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία σε εκφορτίσεις, με αποτέλεσμα δέκα παλμοί να αποτελούν ανεπαρκές πλήθος για την ανίχνευση σπάνιων αστοχιών, οι οποίες εμφανίζονται μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (γνωστές ως «παράθυρα ευκαιρίας»). Η εφαρμογή μεγαλύτερου αριθμού παλμών, π.χ. εκατό, με υψηλή επαναληψιμότητα, εξασφαλίζει πιο αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα. Το δοκίμιο παρακολουθείται συνήθως από εξωτερικό σύστημα που το οδηγεί σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Τα ρομποτικά αυτοματοποιημένα συστήματα επιτρέπουν τη διεξαγωγή της δοκιμής σε πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, χωρίς διακοπές ή παραλείψεις, οι οποίες συχνά παρατηρούνται σε χειροκίνητες δοκιμές. Επιπλέον, η τάση δοκιμής εφαρμόζεται συχνά σε μεγάλα

βήματα (π.χ. 2, 4 και 8 kV) και αξιολογείται απλώς ως επιτυχία ή αποτυχία. Παρά τη σημασία της τελικής ετυμηγορίας, εξίσου σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του ακριβούς επιπέδου αστοχίας. Για παράδειγμα, αν η πραγματική τάση αστοχίας ενός δοκιμίου ανέρχεται στα 8010 V, μπορεί σε ένα εργαστήριο να θεωρηθεί επιτυχής η δοκιμή, ενώ σε άλλο να χαρακτηριστεί ως αποτυχία.

Τεκμηρίωση

Όλες οι ενέργειες που εκτελούνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής μπορούν να καταγράφονται αυτόματα και να ανακαλούνται όποτε απαιτείται. Η δυνατότητα αυτή διευκολύνει την ανάλυση της συσχέτισης ανάμεσα στις αστοχίες και στις παραμέτρους της δοκιμής, όπως είναι οι κυματομορφές του ρεύματος. Η επαλήθευση της κυματομορφής της γεννήτριας μπορεί να ενσωματωθεί στη διαδικασία δοκιμής, ενώ τυχόν αποκλίσεις είναι δυνατόν να ανιχνευθούν μέσω μακροχρόνιας παρακολούθησης. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα καταγραφής του ρεύματος κατά την εκφόρτιση, ώστε κάθε παλμός να συνοδεύεται από την αντίστοιχη κυματομορφή και να συσχετίζεται με ενδεχόμενες αστοχίες.

Ταχύτητα δοκιμής

Το πλεονέκτημα της ταχύτητας καθίσταται ιδιαίτερος σημαντικός, όταν η δοκιμή περιλαμβάνει πολύπλοκες διαδικασίες, πολυάριθμα σημεία εφαρμογής ή μεγάλο αριθμό δειγμάτων του ίδιου τύπου.

1.4.3.2. Αυτοματοποιημένες δοκιμές και ρομποτικοί βραχίονες

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

Ενδεικτικά, το σύστημα της εταιρίας Teseq NSG 439 [69], το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 1.49, αποτελεί έναν προηγμένο εξομοιωτή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ειδικά σχεδιασμένο για αυτοματοποιημένες δοκιμές σε περιβάλλοντα ρομποτικής εφαρμογής.



Σχήμα 1.49: NSG 439 ESD Simulator – Πλήρως αυτοματοποιημένο ρομποτικό σύστημα δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [69]

Το NSG 439 αντιμετωπίζει τα προβλήματα που σχετίζονται με δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με εκφορτίσεις αέρος, τα οποία αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μέσω ενός καινοτόμου προσαρτήματος για εκφορτίσεις αέρος, το οποίο καθοδηγεί ορθά το τόξο εκφόρτισης. Επιπλέον, προσφέρει δυνατότητα προγραμματισμού της ταχύτητας προσέγγισης, στοιχείο κρίσιμο για τη σωστή αναπαραγωγή της δοκιμής.

Η χρήση ρομποτικής διάταξης σε συνδυασμό με το σύστημα NSG 439 επιτρέπει την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας δοκιμών, περιορίζοντας σημαντικά τα σφάλματα που συνήθως προκύπτουν από χειροκίνητους χειρισμούς. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται 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 δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε πλήρως αυτοματοποιημένες εφαρμογές.

Οι αυτοματοποιημένες δοκιμές με ρομποτικούς βραχίονες έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμες για την ανίχνευση και κατηγοριοποίηση ήπιων αστοχιών (soft failures) που δεν προκαλούν μόνιμες βλάβες σε ηλεκτρονικές συσκευές κατά τη διάρκεια δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αναδεικνύουν οι Izadi, Meiguni, Araki, Shumiya και Pommerenke στην εργασία τους [58]. Η μελέτη προτείνει τη χρήση ρομποτικού βραχίονα έξι αξόνων για την αυτοματοποιημένη εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε διάφορα σημεία της διάταξης υπό δοκιμή, ενισχύοντας έτσι την επαναληψιμότητα και την ακρίβεια των πειραμάτων.

Η καινοτομία της προσέγγισης έγκειται στην αξιοποίηση τεχνικών επεξεργασίας εικόνας και ήχου, με στόχο την ανίχνευση αστοχιών, όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από τον τελικό χρήστη και όχι αποκλειστικά μέσω ηλεκτρικών μετρήσεων. Συνολικά, η εργασία [58] 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 προσομοιώνει ρεαλιστικά την εμπειρία του χρήστη, επιτρέποντας την αντικειμενική καταγραφή και κατηγοριοποίηση των αποτυχιών με υψηλή ακρίβεια και χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση σε κάθε στάδιο της διαδικασίας.

1.5. Νέα Έκδοση του Προτύπου – IEC 61000-4-2 Ed. 3

Τον Μάρτιο του 2023 προτάθηκε από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή η αναθεώρηση της δεύτερης έκδοσης του τέταρτου μέρους του Προτύπου IEC 61000, με αποτέλεσμα τη δημοσίευση της τρίτης έκδοσης IEC 61000-4-2 Ed. 3 [27] το έτος 2025. Η τρίτη έκδοση εισάγει σημαντικές αλλαγές που επηρεάζουν ουσιαστικά τόσο τις διαδικασίες διακρίβωσης όσο και τις διαδικασίες δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, στοχεύοντας στη βελτίωση της επαναληψιμότητας και της αναπαραγωγιμότητας μεταξύ εργαστηρίων δοκιμών.

1.5.1. Κύριες Αλλαγές στην Τρίτη Έκδοση

Οι βασικότερες αλλαγές που εισάγει η τρίτη έκδοση συνοψίζονται ως εξής:

- Εισαγωγή της νέας παραμέτρου I_{p2} ως νέα παράμετρο κυματομορφής προς διακρίβωση.
- Υποχρεωτική διακρίβωση και για το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης αέρος.

- Τροποποιήσεις στη διάταξη διακρίβωσης και στις γεωμετρικές απαιτήσεις.
- Αλλαγές και επεκτάσεις στα Παραρτήματα του Προτύπου.

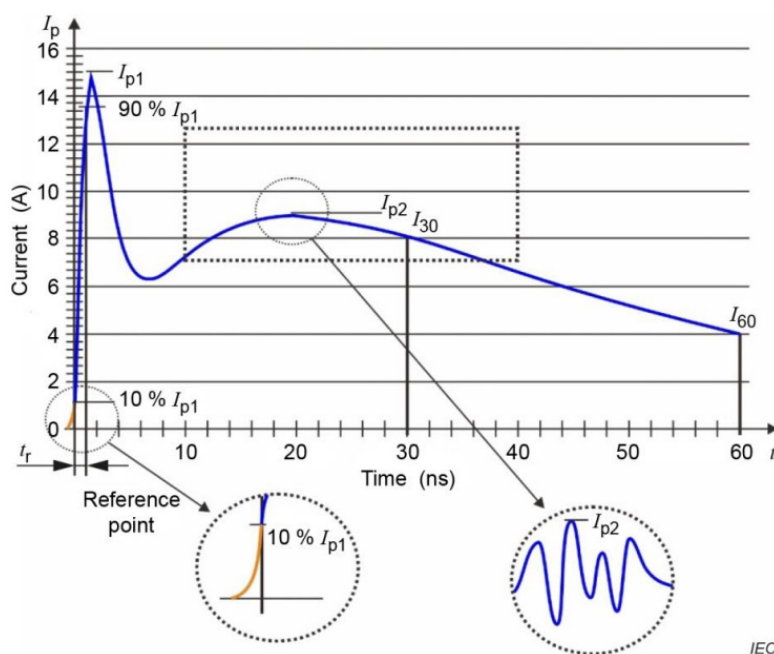
1.5.1.1. Κυματομορφή ρεύματος

Η τρίτη έκδοση του Προτύπου εισάγει τη νέα παράμετρο I_{p2} , η οποία ορίζεται ως η μέγιστη τιμή του ρεύματος που καταγράφεται στο χρονικό διάστημα από 10 ns έως 40 ns, αμέσως μετά τη χρονική στιγμή κατά την οποία η τιμή του ρεύματος έχει λάβει το 10 % της μέγιστης τιμής της πρώτης αιχμής (I_{p1}). Η προσθήκη της I_{p2} κρίθηκε επιβεβλημένη, δεδομένου ότι, όπως έχει τεκμηριωθεί εκτενώς στο παρόν κεφάλαιο, το φαινόμενο των ταλαντώσεων εκδηλώνεται με ακανόνιστο τρόπο στις κυματομορφές ρεύματος που παράγουν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι ταλαντώσεις αυτές έχουν άμεσο αντίκτυπο τόσο στο ενεργειακό περιεχόμενο του παλμού όσο και στην ηλεκτρομαγνητική απόκριση των δοκιμαζόμενων συστημάτων, προκαλώντας διακυμάνσεις, οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να εντοπιστούν ή να ελεγχθούν επαρκώς με τις παραμέτρους των προηγούμενων εκδόσεων του Προτύπου.

Η θέσπιση της I_{p2} στοχεύει στη θέσπιση αυστηρότερων κριτηρίων συμμόρφωσης για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, περιορίζοντας την αβεβαιότητα των μετρήσεων και ενισχύοντας τη συγκρισιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, αν και η γενική μορφή της κυματομορφής του ρεύματος παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση —χαρακτηριζόμενη από μία έντονη αρχική αιχμή, ταχεία ανύψωση και σταδιακή εξασθένηση— η εισαγωγή της παραμέτρου I_{p2} καθιστά πλέον αναγκαία την ιδιαίτερη παρακολούθηση του δεύτερου τοπικού μεγίστου που μπορεί να εμφανιστεί στο χρονικό διάστημα 10 ns έως 40 ns.

Η ιδανική κυματομορφή για εκφόρτιση επαφής, σε επίπεδο δοκιμής 4 kV, απεικονίζεται στο Σχήμα 1.50, ενώ τα χαρακτηριστικά και τα όρια των τιμών, στα οποία οφείλει να συμμορφώνεται η κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης επαφής, παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 1.9:



Σχήμα 1.50: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής σε επίπεδο τάσης 4 kV σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed. 3 [27]

Πίνακας 1.9: Παράμετροι του ρεύματος εκφόρτισης επαφής σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed. 3 [27]

Τάση Φόρτισης (kV)	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	±15%	±25%	-20%/+40%	±30%	±30%
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
2	7,5	0,8	4,5	4,0	2,0
4	15,0	0,8	9,0	8,0	4,0
6	22,5	0,8	13,5	12,0	6,0
8	30,0	0,8	18,0	16,0	8,0

1.5.1.2. Διάταξη διακρίβωσης

Η διάταξη διακρίβωσης υφίσταται σημαντικές τροποποιήσεις στη νέα έκδοση του Προτύπου, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Οι κυριότερες αλλαγές συνοψίζονται ως εξής:

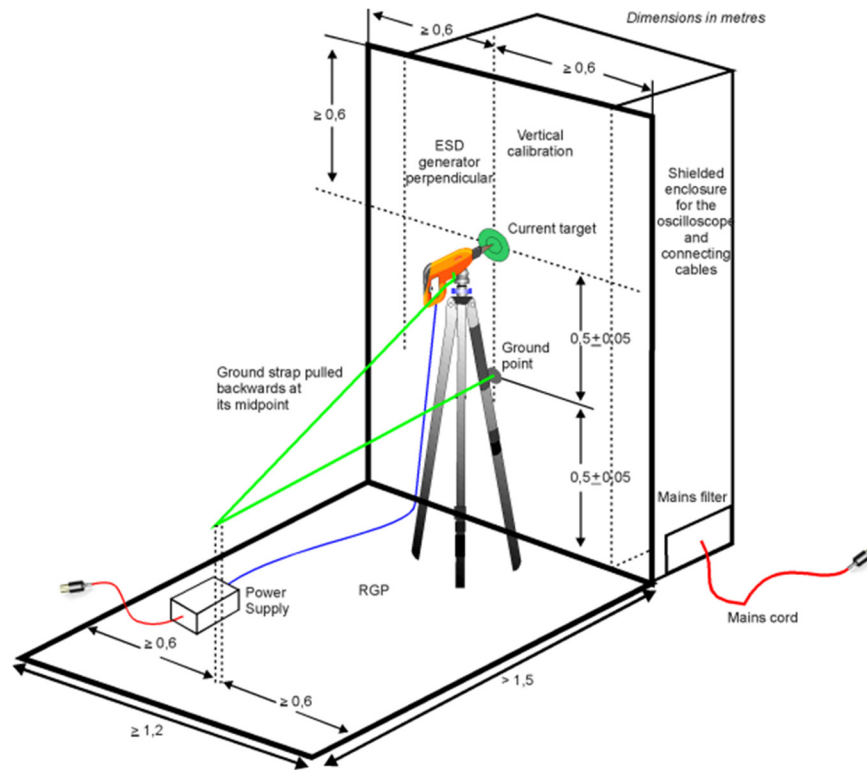
- Το κατακόρυφο επίπεδο στο οποίο τοποθετείται ο ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) ρεύματος καθορίζεται πλέον να έχει ελάχιστες διαστάσεις 1,2 m × 1,6 m, εξασφαλίζοντας επαρκή επιφάνεια για την αναπαράσταση πραγματικών συνθηκών δοκιμής.
- Το επίπεδο αναφοράς γης αυξάνεται σε ελάχιστες διαστάσεις 1,5 m × 1,2 m, με στόχο τη διαμόρφωση πιο αναπαραγωγίσιμης διαδρομής επιστροφής του ρεύματος και τη μείωση της αβεβαιότητας των μετρήσεων.
- Ο ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) ρεύματος τοποθετείται σε ύψος 1 m από το επίπεδο εδάφους (αντί 0,5 m στην προηγούμενη έκδοση), βελτιώνοντας τη συσχέτιση των μετρήσεων με τις πραγματικές διατάξεις δοκιμών σε περιβάλλον συστήματος.
- Το σημείο γείωσης καθορίζεται να τοποθετείται 0,5 m μακριά από το επίπεδο αναφοράς γείωσης, ώστε να διασφαλίζεται καλύτερος έλεγχος των φαινομένων σύζευξης και να περιορίζονται οι ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις.

Πέραν των ανωτέρω, θεσπίζονται πρόσθετες τεχνικές απαιτήσεις:

- Υποχρεωτική χρήση ενιαίου επιπέδου αναφοράς κάτω από ολόκληρη τη διάταξη διακρίβωσης, διασφαλίζοντας ομοιομορφία στη διαδρομή επιστροφής και μειώνοντας την επίδραση γεωμετρικών αποκλίσεων.
- Σαφής καθορισμός θέσης και ευθυγράμμισης του ανιχνευτή μέτρησης ρεύματος (συνήθως ομοαξονικού τύπου), ώστε η απόστασή του από το άκρο εκφόρτισης να παραμένει αυστηρά σταθερή και προκαθορισμένη.
- Αυστηρές προδιαγραφές δρομολόγησης για το καλώδιο επιστροφής, το οποίο οφείλει να οδεύει με τρόπο που ελαχιστοποιεί την επαγωγή και να μην προσεγγίζει άλλα αγωγίμα στοιχεία σε απόσταση μικρότερη των 0,2 m, αποτρέποντας φαινόμενα παρεμβολών ή ανεπιθύμητης σύζευξης που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν την κυματομορφή.
- Απαίτηση διακρίβωσης για την ακίδα εκφόρτισης αέρος, ειδικότερα όταν περιλαμβάνει ηλεκτρονικά ή παθητικά στοιχεία που ενδέχεται να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του παλμού.
- Υποχρεωτική μέτρηση της παραμέτρου I_{p2} , σύμφωνα με τις νέες απαιτήσεις που αναλύθηκαν σε προηγούμενες ενότητες, για τον πληρέστερο χαρακτηρισμό της κυματομορφής εκφόρτισης επαφής.

- Ισχυρή σύσταση ώστε το καλώδιο επιστροφής να μην κρατείται από τον χειριστή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, προκειμένου να περιοριστεί η αβεβαιότητα και να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα της διάταξης.

Η τυπική διάταξη διακρίβωσης που ενσωματώνει τις ανωτέρω προδιαγραφές απεικονίζεται στο Σχήμα 1.51.



Σχήμα 1.51: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed. 3 [27]

1.5.1.3. Διακρίβωση για εκφορτίσεις αέρος

Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες της τρίτης έκδοσης είναι η απαίτηση για διακρίβωση και για τις εκφορτίσεις αέρος. Στις προηγούμενες εκδόσεις, η διακρίβωση περιοριζόταν αποκλειστικά στην εκφόρτιση επαφής, καθώς η εκφόρτιση αέρος θεωρούνταν εξαιρετικά ευαίσθητη σε εξωτερικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα προσέγγισης, η υγρασία και η γεωμετρία της ακίδας εκφόρτισης, καθιστώντας την αναπαραγωγιμότητά της εξαιρετικά δύσκολη.

Όπως αναλύεται στο White Paper 3 [46] της ESDA και στο απόσπασμα που εξετάστηκε, πραγματοποιήθηκαν διεργαστηριακές δοκιμές σε γεννήτριες διαφόρων κατασκευαστών. Οι δοκιμές έδειξαν ότι, εφόσον η διακρίβωση γίνεται σε λειτουργία επαφής και η ακίδα εκφόρτισης δεν περιλαμβάνει παθητικά ή ενεργά στοιχεία, η κυματομορφή του ρεύματος παραμένει πρακτικά ανεξάρτητη από τον τύπο της ακίδας (είτε για εκφόρτιση επαφής είτε για εκφόρτιση αέρος). Το εύρημα αυτό οδήγησε τη νέα έκδοση να περιορίσει την απαίτηση διακρίβωσης της εκφόρτισης αέρος στη

μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος στην ακίδα εκφόρτισης αέρος στη μέγιστη τάση δοκιμής, χρησιμοποιώντας διαιρέτη υψηλής τάσης.

Ωστόσο, αν η ακίδα εκφόρτισης αέρος περιλαμβάνει παθητικά ή ενεργά εξαρτήματα, απαιτείται πρόσθετη διακρίβωση της κυματομορφής του ρεύματος. Η δοκιμή αυτή εκτελείται σε λειτουργία επαφής, αλλά με τοποθετημένη την ακίδα εκφόρτισης αέρος στη γεννήτρια. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) ρεύματος αντίστασης 2.1 Ω (Pellegrini target) και η δοκιμή εκτελείται σε επίπεδα τάσης από 2 kV έως 15 kV. Η απαίτηση αυτή εξασφαλίζει ότι τυχόν επιδράσεις λόγω της γεωμετρίας ή των επιμέρους εξαρτημάτων της ακίδας εντοπίζονται και ελέγχονται, μειώνοντας τον κίνδυνο απρόβλεπτων παραμορφώσεων στην κυματομορφή.

1.5.1.4. Αλλαγές στα Παραρτήματα

Αλλαγές περιλαμβάνονται επίσης στα Παραρτήματα του Προτύπου, με το Παράρτημα F να παρέχει πλέον καθοδήγηση για την επιλογή σημείων δοκιμής και τον αριθμό παλμών που πρέπει να εφαρμόζονται, μειώνοντας την υποκειμενικότητα στις δοκιμές. Το Παράρτημα G εμπλουτίζεται με παραδείγματα υπολογισμού αβεβαιοτήτων, υποστηρίζοντας καλύτερη ποσοτικοποίηση και βελτιώνοντας την αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων σε διαφορετικά εργαστήρια.

Συνοψίζοντας, οι βελτιώσεις της τρίτης έκδοσης [27], όπως προκύπτουν και από την ανάλυση του White Paper 3 (βλ. Ενότητα 1.4.1), εστιάζουν στην αύξηση της αξιοπιστίας και της αναπαραγωγικότητας των δοκιμών, προσεγγίζοντας πλέον το Πρότυπο όχι μόνο ως εργαλείο μετρήσεων, αλλά και ως κανονιστικό πλαίσιο για την ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ διαφόρων κατασκευαστών εξοπλισμού και εργαστηρίων δοκιμών.

1.6. Συμπεράσματα και εκκρεμότητες

Η νέα έκδοση του Προτύπου [27] εστιάζει στη βελτίωση της κυματομορφής εκφόρτισης, η οποία συμβάλλει καθοριστικά στην ενίσχυση της αναπαραγωγικότητας των δοκιμών — ένα χρόνιο και ιδιαίτερα απαιτητικό πρόβλημα στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Παρά τις σημαντικές αυτές προσπάθειες, μέχρι σήμερα δεν έχει επιτευχθεί αναθεώρηση που να επιτρέπει την αποτελεσματική καταστολή του φαινομένου των ταλαντώσεων στην κυματομορφή εκφόρτισης.

Η εξέλιξη των προσχεδίων αναθεώρησης καταδεικνύει ότι, σε αρκετές περιπτώσεις, παραγκωνίστηκαν ουσιαστικές τεχνικές προτάσεις βελτίωσης, γεγονός που αποδίδεται αφενός σε ανεπαρκή κατανόηση του ιστορικού πλαισίου και αφετέρου σε ελλιπή γνώση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τη συμπεριφορά των ρευμάτων εκφόρτισης στη μέθοδο επαφής. Η κυματομορφή εκφόρτισης επαφής που παράγεται από μία γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων δύναται να επηρεάζεται σημαντικά από φαινόμενα συντονισμού και ανάκλασης, τα οποία συνδέονται με την κατανεμημένη παρασιτική χωρητικότητα του καλωδίου γείωσης — φαινόμενα που δεν εμφανίζονται κατά την εκφόρτιση αέρος, η οποία πραγματοποιείται στο ανθρώπινο σώμα χωρίς τη μεσολάβηση καλωδίου επιστροφής. Δεδομένου ότι τα φαινόμενα συντονισμού και ανάκλασης που σχετίζονται με το καλώδιο γείωσης είναι πρακτικά αδύνατον να εξαλειφθούν πλήρως [36], καθίσταται επιτακτική η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης και ενδεχόμενης αναθεώρησης της αρχιτεκτονικής σχεδίασης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στο μέλλον.

Τα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής επικεντρώνονται ακριβώς σε αυτές τις ανοιχτές τεχνικές και επιστημονικές εκκρεμότητες, παραθέτοντας πειραματική τεκμηρίωση, αποτελέσματα προσομοιώσεων και νέες προτάσεις που στοχεύουν στην επίλυση των θεμελιωδών ζητημάτων που εξακολουθούν να υφίστανται. Στόχος είναι η ανάπτυξη πρακτικών και αξιόπιστων λύσεων, οι οποίες θα συμβάλουν τόσο στη βελτίωση της συμμόρφωσης με το Πρότυπο όσο και της αναπαραγωγιμότητας, μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων και συστημάτων υπό δοκιμή.

Κεφάλαιο 2: Εργαστηριακός εξοπλισμός, ανάπτυξη μεθοδολογιών και μοντέλων προσομοίωσης

2.1. Εργαστηριακός Εξοπλισμός και Διατάξεις Μέτρησης

Η πειραματική ανάλυση της παρούσας διατριβής βασίζεται στη λεπτομερή μέτρηση και αξιολόγηση των κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτές ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2. Η αξιοπιστία των μετρήσεων και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, τόσο για τη δημιουργία των παλμών εκφόρτισης όσο και για την καταγραφή τους. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά ο εργαστηριακός εξοπλισμός και οι διατάξεις μέτρησης που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, περιλαμβάνοντας τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τα συστήματα μέτρησης και τις συσκευές καταγραφής των κυματομορφών. Η περιγραφή αυτή αποτελεί απαραίτητο υπόβαθρο για την κατανόηση των μεθόδων και των αποτελεσμάτων που αναπτύσσονται στα επόμενα υποκεφάλαια.

2.1.1. Εξοπλισμός εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός παραγωγής και μέτρησης παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, διαθέσιμος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του ΕΜΠ. Ο εξοπλισμός αυτός συνοπτικά περιλαμβάνει:

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

2.1.1.1. Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, οι οποίες καλύπτουν ευρύ φάσμα τεχνικών χαρακτηριστικών και λειτουργικών δυνατοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν οι εξής συσκευές:

- NSG 433 της εταιρίας Schaffner [70],
- NSG 438 της εταιρίας Teseq [71],
- Dito της εταιρίας EM Test [72],
- Transient 3000 της εταιρίας EMC Partner [73]

Γεννήτρια Schaffner NSG 433

Η γεννήτρια NSG 433 δύναται να παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σε περιοχή τάσεων από -18 kV έως $+18\text{ kV}$, με χρόνο ανόδου μικρότερο του 1 ns . Διαθέτει ενσωματωμένο ψηφιακό βολτόμετρο

στο «πιστόλι» της, προσφέροντας ένδειξη της τάσης φόρτισης σε πραγματικό χρόνο, καθώς και διακόπτη για την εναλλαγή πολικότητας. Η συσκευή λειτουργεί με τροφοδοτικό που περιλαμβάνει ενσωματωμένο μετρητή εκφορτίσεων, προσφέροντας ακριβή παρακολούθηση του πλήθους των παλμών κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπλέον, περιλαμβάνει προσαρμοστή εκφόρτισης επαφής (contact discharge adapter), ο οποίος συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιρροών, όπως θερμοκρασία, υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση, διασφαλίζοντας σταθερότητα και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Η γεννήτρια απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.

Γεννήτρια Teseq NSG 438

Η γεννήτρια NSG 438 έχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε περιοχή τάσεων από -30 kV έως $+30\text{ kV}$. Διαθέτει οθόνη αφής για τη ρύθμιση όλων των λειτουργικών παραμέτρων και χαρακτηρίζεται από αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει:

- Τη βασική μονάδα, η οποία ενσωματώνει τη μπαταρία τροφοδοσίας, τη γεννήτρια και τον ρυθμιστή υψηλής τάσης.
- Το «πιστόλι» εκφόρτισης, όπου βρίσκονται οι ακίδες εκφόρτισης (για δοκιμές αέρος και επαφής) και η σκανδάλη ενεργοποίησης.
- Το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος (DC power supply), με είσοδο $100\text{--}250\text{ Vac}$, $50\text{--}60\text{ Hz}$, 1 A , που παρέχει στη βασική μονάδα έξοδο 24 Vdc , $2,3\text{ A}$.

Η γεννήτρια απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

Γεννήτρια EM Test Dito

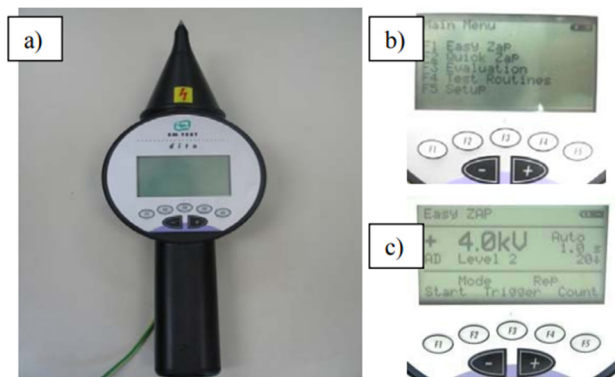
Η γεννήτρια DITO παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις στην περιοχή τάσεων από $-16,5\text{ kV}$ έως $+16,5\text{ kV}$. Ξεχωρίζει για την υψηλή εργονομία της, καθώς πρόκειται για αυτόνομη, φορητή συσκευή που δεν απαιτεί πρόσθετα περιφερειακά για τη λειτουργία της. Η τροφοδοσία της πραγματοποιείται μέσω επαναφορτιζόμενων μπαταριών, ενώ προϋποτίθεται σταθερή γείωση. Όλες οι ενδείξεις και οι πληροφορίες εμφανίζονται στην ενσωματωμένη οθόνη, συμπεριλαμβανομένων του τύπου εκφόρτισης (δοκιμή επαφής ή αέρος), του αριθμού παλμών και του επιπέδου τάσης δοκιμής. Η γεννήτρια απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3, μαζί με ενδεικτικές οθόνες λειτουργίας.



Σχήμα 2.1: Η γεννήτρια Schaffner NSG 433 [2]



Σχήμα 2.2: Η γεννήτρια Teseq NSG 438 [2]



Σχήμα 2.3: Η γεννήτρια EM Test Dito a) γενική άποψη της γεννήτριας, b) οθόνη επιλογής προγράμματος λειτουργίας, c) οθόνη κατά τη διάρκεια λειτουργίας [2]



Σχήμα 2.4: Η γεννήτρια Transient 3000 της EMC Partner [2]

Γεννήτρια EMC Partner Transient 3000

Η γεννήτρια Transient 3000 της EMC Partner προορίζεται για την παραγωγή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε περιοχή τάσεων από -16 kV έως $+16 \text{ kV}$. Διαθέτει σύγχρονο σύστημα ελέγχου με οθόνη αφής, προσφέροντας δυνατότητα προγραμματισμού διαφορετικών σεναρίων δοκιμών. Ενσωματώνει επίσης λειτουργίες καταγραφής των παραμέτρων δοκιμής και παρέχει δυνατότητα ελέγχου τόσο για εκφορτίσεις επαφής όσο και για εκφορτίσεις αέρος. Η γεννήτρια απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.

Σύγκριση των γεννητριών και παρουσίαση χαρακτηριστικών

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται συγκριτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας.

Πίνακας 2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ [74]

Τεχνικά χαρακτηριστικά		Γεννήτρια ESD			
		NSG 433	NSG 438	Dito	Transient 3000
Πυκνωτής εκκένωσης C _s		150 pF ± 10%			
Αντίσταση εκκένωσης R _d		330 Ω ± 10%			
Αντίσταση φόρτισης R _c		100 MΩ	50 MΩ	-	-
Τάση εξόδου V ₀	Εκφορτίσεις αέρος	2÷18 kV	200 V÷30 kV	500V÷16,5 kV	200 V – 16 kV ± 5 %
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	2÷9 kV			200 V – 10 kV ± 5 %
Πολικότητα τάσης εξόδου		Θετική/αρνητική			
Χρόνος διατήρησης του 90% της τάσης φόρτισης (90% V ₀)		>5 s			
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (t _r)	Εκφορτίσεις αέρος	< 1 ns (για τάσεις ≤ 8 kV)	< 1 ns (για τάσεις ≤ 8 kV)	-	-
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	0,7÷1 ns	0,7÷1 ns	0,7÷1 ns	0,8 ± 25 %

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%			
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240 Vac, 50÷60 Hz	100/120/220/240 Vac, 50÷60 Hz	Battery NiCd 12V	10 x AA μπαταρίες ή AC δίκτυο (95 – 250 V (50/60 Hz))
Κατανάλωση	25 VA	25 VA	-	<20 VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5÷40 °C	5÷40 °C	10÷35 °C	15÷35 °C
Υγρασία λειτουργίας	20%÷80%	20%÷80%	20%÷80%	30 – 60 %

2.1.1.2. Ομοαξονικός προσαρμογέας μέτρησης και ομοαξονικό καλώδιο RF

Ο ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) μέτρησης αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της διατάξεως μέτρησης, λειτουργώντας ως μετατροπέας ρεύματος (current transducer), ο οποίος επιτρέπει την ακριβή καταγραφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στη διεθνή βιβλιογραφία απαντάται συχνά με την ονομασία στόχος Pellegrini (Pellegrini target), αποδίδοντας την αρχική σχεδιάσή του για τον σκοπό της διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε ο προσαρμογέας τύπου MD 103 της εταιρείας Teseq [75], ο οποίος διακρίνεται για την ευρεία του απόκριση συχνότητας και την υψηλή γραμμικότητα, χαρακτηριστικά απαραίτητα για την αποτύπωση παλμών διάρκειας λίγων ns, ενώ η τιμή της απώλειας παρεμβολής του (insertion loss) είναι < 0,5dB έως τα 6 GHz.

Περαιτέρω, τα ομοαξονικά καλώδια αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της διατάξεως, δεδομένου ότι αναλαμβάνουν τη μεταφορά των παλμών υψηλής συχνότητας από τον στόχο μέτρησης προς τα συστήματα καταγραφής. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση συνιστά φαινόμενο με εξαιρετικά απότομη μεταβολή και πολύ μικρή χρονική διάρκεια (τάξεως μερικών ns), γεγονός που συνεπάγεται ότι το φάσμα συχνοτήτων που απαιτείται να μεταφερθεί εκτείνεται συχνά σε περιοχές της τάξης των GHz. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επελέγη το ομοαξονικό καλώδιο τύπου SUCOFLEX 106, λόγω της εξαιρετικής απόκρισης συχνότητας και των πολύ χαμηλών απωλειών μετάδοσης που το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής πιστότητας στη μέτρηση παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η συνολική διάταξη μέτρησης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη MD 103 [2]

2.1.1.3. Εξασθενητής

Ο εξασθενητής (attenuator) αποτελεί κρίσιμο στοιχείο στη διάταξη μέτρησης, καθώς προστατεύει το κανάλι εισόδου του παλμογράφου από πιθανή καταστροφή λόγω υπερβολικά υψηλής στάθμης σήματος που προκαλείται από τις υψηλές τιμές ρεύματος κατά την εκφόρτιση. Τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού εισόδου του παλμογράφου, μειώνοντας την ισχύ του σήματος κατά προκαθορισμένο λόγο απόσβεσης (π.χ. 10:1 ή 20:1), ώστε τα σήματα να εισέρχονται στο όργανο μέτρησης σε ασφαλή επίπεδα τάσης και ισχύος.

Ο ομοαξονικός προσαρμογέας MD 103 της εταιρείας Teseq ενσωματώνει εξασθενητή, με εύρος ζώνης που υπερβαίνει τα 6 GHz, καθιστώντας τον ιδιαιτέρως κατάλληλο για τη μέτρηση ταχύτατων παροδικών φαινομένων, όπως οι παλμοί ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η συσκευή εμφανίζει υψηλή γραμμικότητα και εξαιρετική ακρίβεια, ακόμη και σε επίπεδα κορυφής ρεύματος έως 40 A, με απόκλιση μικρότερη του $\pm 3\%$.

Επιπλέον, το ομοαξονικό καλώδιο τύπου SUCOFLEX 106 και ο προσαρμογέας MD 103 έχουν κατασκευαστεί και διακριβωθεί ως ενιαίο σύστημα, διασφαλίζοντας εξαιρετική αντιστοίχιση χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης και ελάχιστες απώλειες σήματος. Αυτό επιτρέπει τη μέτρηση του ρεύματος των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με υψηλή πιστότητα και αξιοπιστία, ακόμη και για σήματα με συχνοτικά περιεχόμενα που εκτείνονται μέχρι την περιοχή των GHz [45]. Ο εξασθενητής 011-0059-03 της Tektronix, που χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά στη διάταξη μέτρησης για πρόσθετη προστασία του παλμογράφου και για προσαρμογή στάθμης σήματος, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Ο εξασθενητής 011-0059-03 της Tektronix [74]

2.1.1.4. Παλμογράφος

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο TDS 7254B της εταιρείας Tektronix [76], ο οποίος διαθέτει εύρος ζώνης 2,5 GHz, πληρώντας πλήρως τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2.

Η συσκευή διαθέτει τέσσερα ανεξάρτητα κανάλια εισόδου, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αποτύπωση πολλαπλών σημάτων. Επιπλέον, ενσωματώνει λειτουργικό σύστημα Windows 2000, το οποίο διευκολύνει τη διαχείριση των μετρήσεων και την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Η αποθήκευση των καταγεγραμμένων κυματομορφών πραγματοποιείται είτε τοπικά στον ενσωματωμένο σκληρό δίσκο είτε μέσω φορητής αποθηκευτικής μονάδας USB, διευκολύνοντας την εξαγωγή και τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου παρατίθενται στον Πίνακα 2.2, ενώ απεικόνιση της συσκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.

Πίνακας 2.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου TDS 7254B [74]

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 50 Ω	2 mV/div έως 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	<1 VRMS για $r < 100\text{mV/div}$, <5 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 2.7: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B [74]

2.1.1.5. Ανιχνευτής ρεύματος

Ο ανιχνευτής ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ο FCC F-65 [77] της εταιρείας Fischer Custom Communications και αποτελεί όργανο υψηλής ακρίβειας, κατάλληλο για μετρήσεις παλμικών και RF ρευμάτων σε εφαρμογές Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (ΗΜΣ).

Καλύπτει ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 10 kHz έως 1 GHz, ενώ διαθέτει σταθερή σύνθετη αντίσταση μεταφοράς (transfer impedance) ίση με 1 Ω για συχνότητες άνω του 1 MHz, διασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια στη μετατροπή του ρεύματος σε τάση μέτρησης. Ο ανιχνευτής είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για την καταγραφή κυματομορφών Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (ESD), όπως αυτές που απαιτούνται στις δοκιμές βάσει του Προτύπου IEC 61000-4-2.

Επιπλέον, ο ανιχνευτής υποστηρίζει μέγιστο παλμικό ρεύμα έως 100 A και προσφέρει εξαιρετικά ταχεία απόκριση, με χρόνο ανόδου μόλις 200 ps, γεγονός που τον καθιστά ιδανικό για την ακριβή αποτύπωση φαινομένων ταχείας μεταβολής. Η συσκευή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8.



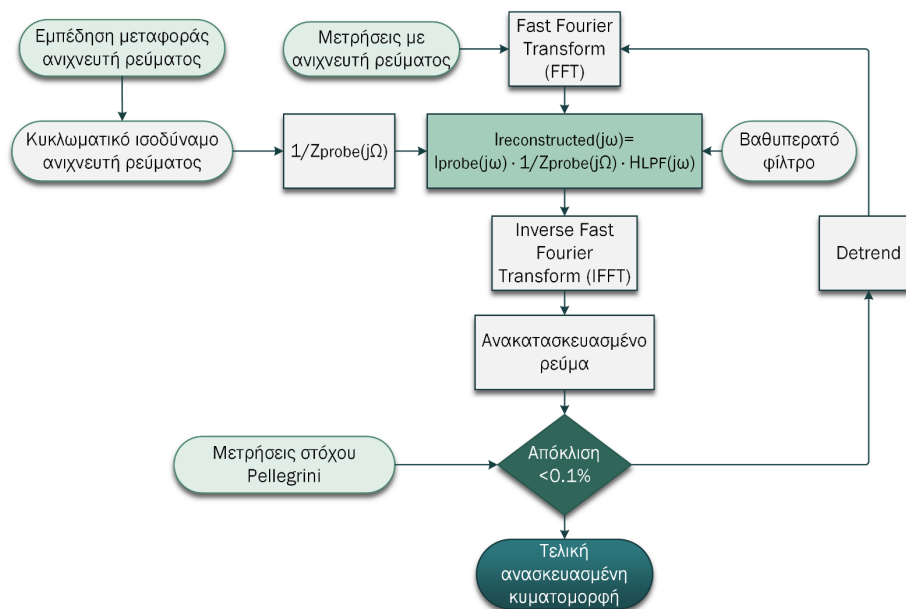
Σχήμα 2.8: Ο ανιχνευτής ρεύματος FCC F-65 [74]

2.2. Ανακατασκευή της κυματομορφής ρεύματος ESD με χρήση ανιχνευτή ρεύματος στο άκρο της γεννήτριας ESD

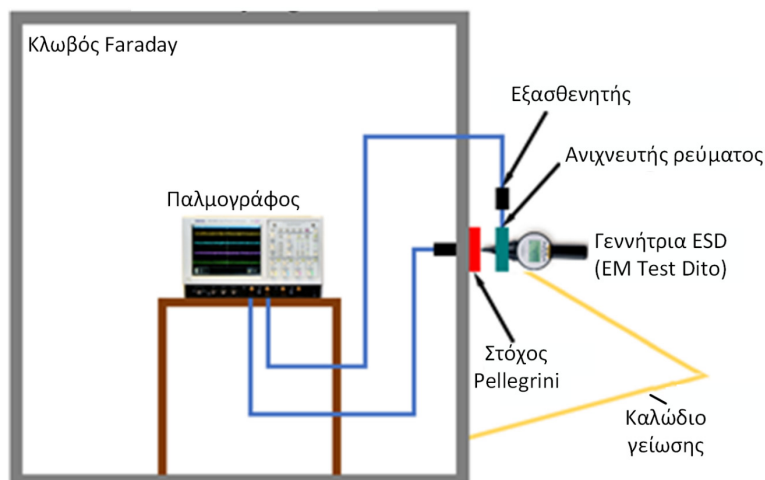
Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η επαναληψιμότητα και η αναπαραγωγικότητα των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παραμένουν σημαντικές προκλήσεις, καθώς ακόμη και όταν οι παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος, όπως η πρώτη αιχμή I_p , ο χρόνος ανόδου t_r , οι τιμές ρεύματος I_{30} και I_{60} , βρίσκονται εντός των ορίων του Προτύπου IEC 61000-4-2, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της δοκιμής σε όρους «Επιτυχίας» ή «Αποτυχίας» (Pass/Fail). Το ζήτημα αυτό επιβεβαιώθηκε και από διεργαστηριακές δοκιμές που διεξήχθησαν στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία το 2006, όπως καταγράφεται στις [29] και [40], οι οποίες ανέδειξαν ότι η τυπική συμμόρφωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τις προδιαγραφές του προτύπου δεν αρκεί για την πλήρη εξασφάλιση ομοιομορφίας στα αποτελέσματα των δοκιμών. Στο πλαίσιο αυτό, η ερευνητική κοινότητα έχει στραφεί στην αναλυτική καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά τη διάρκεια των δοκιμών [58], επιδιώκοντας όχι μόνο τον επαναπροσδιορισμό των ορίων ανοχής των παραμέτρων I_p , t_r , I_{30} , I_{60} και Q , αλλά και την ανάδειξη νέων δεικτών που συσχετίζονται άμεσα με την έκβαση των δοκιμών. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μέθοδο ανακατασκευής της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω ανιχνευτή ρεύματος και τεχνικών αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, όπως περιγράφεται στις [78], [79], διερευνώντας την εφαρμογή της σε τέσσερα θετικά επίπεδα δοκιμής (από +2 kV έως +8 kV) και σε τέσσερις διαφορετικές εμπορικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.9, με στόχο την ανάδειξη τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των περιορισμών της μεθόδου, αλλά και την τεκμηρίωση κρίσιμων παραμέτρων βελτιστοποίησης που δύνανται να ενισχύσουν τη γενικευσιμότητά της σε διαφορετικά εργαστηριακά περιβάλλοντα και εξοπλισμούς.

2.2.1. Εξοπλισμός και διάταξη μέτρησης

Η πειραματική διαδικασία συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις διακρίβωσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], το οποίο καθορίζει τα χαρακτηριστικά του στόχου ρεύματος των 2,1 Ω που χρησιμοποιείται για την εκφόρτιση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και τη συνολική διάταξη της δοκιμής (θέση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όδευση καλωδίων κ.λπ.). Η διάταξη μέτρησης, η οποία περιλαμβάνει τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τον ανιχνευτή ρεύματος τύπου αρπάγης, τον στόχο Pellegrini, τον παλμογράφο εντός κλωβού Faraday, καθώς και τους απαραίτητους εξασθενητές για την προστασία του παλμογράφου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10. Ο ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) ρεύματος που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις είναι ο MD 103 της εταιρίας Teseq [75].



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροής της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, το οποίο περιλαμβάνει τη διαδικασία βελτιστοποίησης της τιμής detrend



Σχήμα 2.10: Διάταξη μέτρησης για την καταγραφή κυματομορφών της γεννήτριας EM Test Dito μέσω του ανιχνευτή ρεύματος F-65 και του στόχου Pellegrini

Ένας κρίσιμος παράγοντας κατά τη διενέργεια μετρήσεων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτελεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης του μετρητικού εξοπλισμού. Αν και το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26] ορίζει ελάχιστο εύρος ζώνης 2 GHz για τον παλμογράφο, η βιβλιογραφία ([80]) επισημαίνει ότι για την αξιόπιστη καταγραφή των κυματομορφών και τη μείωση της αβεβαιότητας απαιτούνται ακόμη υψηλότερες προδιαγραφές. Στην παρούσα εργασία, αξιοποιήθηκε ο παλμογράφος TDS 7254B της εταιρίας Tektronix ([57]), με εύρος ζώνης 2,5 GHz και ρυθμό δειγματοληψίας 20 GS/s, καθώς και ανιχνευτής ρεύματος τύπου αρπάγης τοποθετημένος στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Παρά την πληθώρα διαθέσιμων ανιχνευτών ρεύματος στην αγορά, μοντέλα όπως η σειρά CT της εταιρίας Tektronix [81], περιορίζονται σε εφαρμογές γύρω από αγωγούς μικρής διατομής και δεν είναι κατάλληλα για τοποθέτηση στο άκρο

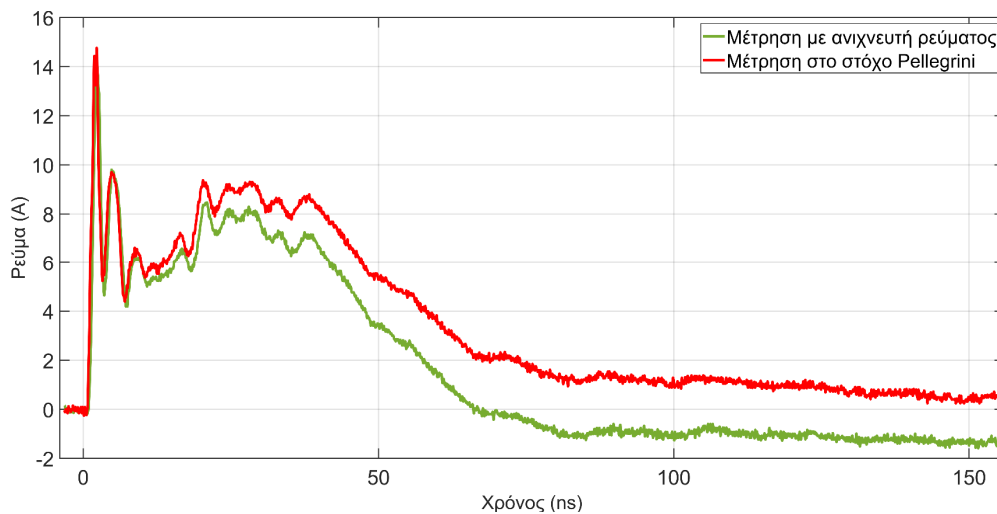
γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για τον σκοπό αυτό, προτιμήθηκε στην παρούσα μελέτη ο ανιχνευτής F-65 της εταιρίας Fischer Custom Communications [77] , ο οποίος, παρά τον περιορισμό του σε εύρος ζώνης 1 GHz, διαθέτει επαρκή εσωτερική διάμετρο για την τοποθέτησή του στη συγκεκριμένη διάταξη μέτρησης.

Το χρονικό παράθυρο καταγραφής ορίστηκε από -4 ns έως 156 ns, καλύπτοντας το σύνολο της κυματομορφής και επιτρέποντας τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου που εγχέεται από τη γεννήτρια στον στόχο ρεύματος. Το χρονικό βήμα δειγματοληψίας ορίστηκε σε 40 ps και ο συνολικός αριθμός των καταγεγραμμένων τιμών ήταν 4000.

2.2.2. Διαδικασία αποσυνέλιξης

Η αποσυνέλιξη (deconvolution) ορίζεται ως η διαδικασία φιλτραρίσματος ενός σήματος, με σκοπό την αντιστάθμιση μιας ανεπιθύμητης συνέλιξης. Στην περίπτωση της προαναφερθείσας διαδικασίας μέτρησης, η ανεπιθύμητη συνέλιξη οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος στις χαμηλές συχνότητες, λόγω της μη σταθερής σύνθετης αντίστασης του ανιχνευτή ρεύματος.

Η παραμόρφωση που προκαλείται από αυτήν τη συνέλιξη καθίσταται εμφανής μέσω της σύγκρισης των δύο κυματομορφών που καταγράφηκαν, προτού εφαρμοστεί οποιαδήποτε μέθοδος αντιστάθμισης. Η κυματομορφή που καταγράφηκε από τον στόχο Pellegrini και η αρχική κυματομορφή που μετρήθηκε με τον ανιχνευτή ρεύματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Η κυματομορφή ESD που καταγράφηκε από τον στόχο Pellegrini (πορτοκαλί), καθώς και η αρχικά καταγεγραμμένη κυματομορφή μέσω του ανιχνευτή ρεύματος χωρίς την εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας (πράσινη)

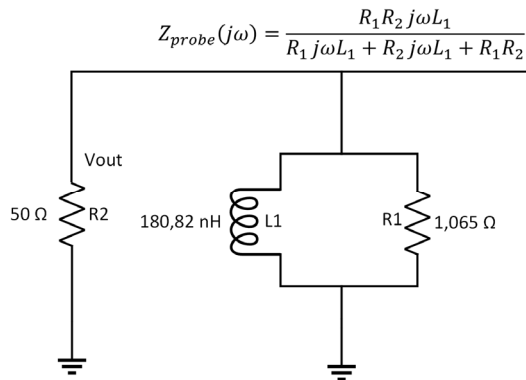
Η διαδικασία αποσυνέλιξης συνοψίζεται στην Εξίσωση (6):

$$I_{reconstructed}(j\omega) = I_{probe}(j\omega) \cdot \frac{1}{Z_{probe}(j\omega)} \cdot H_{LPF}(j\omega) \quad (6)$$

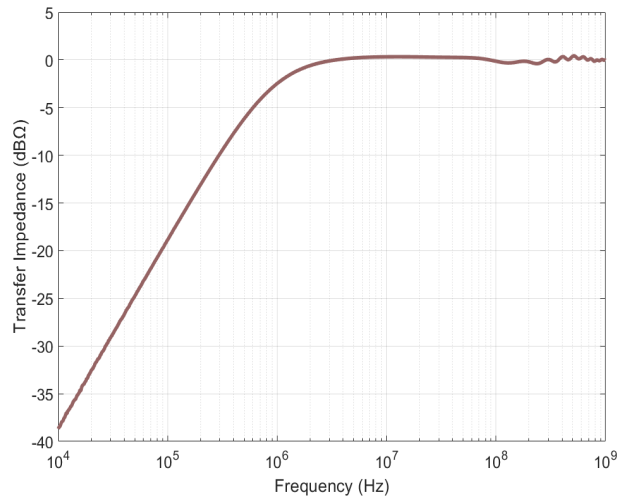
όπου: ο όρος $I_{probe}(j\omega)$ προκύπτει από τον Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform) της κυματομορφής ρεύματος που καταγράφηκε με τον ανιχνευτή ρεύματος, ο όρος $Z_{probe}(j\omega)$ μπορεί να υπολογιστεί από το ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας διακρίβωσης του ανιχνευτή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12, όταν το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταφοράς είναι διαθέσιμο από

το τεχνικό εγχειρίδιο του κατασκευαστή [77] (βλ. Σχήμα 2.13) και ο όρος $H_{LPF}(j\omega)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς ενός βαθυπερατού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής ίση με το εύρος ζώνης του ανιχνευτή. Στην περίπτωση του ανιχνευτή F-65, η τιμή αυτή είναι 1 GHz. Ο σκοπός αυτού του φίλτρου είναι να ενσωματώσει τον περιορισμό εύρους ζώνης του ανιχνευτή.

Το ανακατασκευασμένο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο πεδίο του χρόνου μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας τον Αντίστροφο Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Inverse FFT) στο $I_{reconstructed}(j\omega)$.



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο κύκλωμα της διαδικασίας διακρίβωσης του ανιχνευτή ρεύματος F-65 [79]



Σχήμα 2.13: Μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταφοράς του ανιχνευτή ρεύματος F-65

Θα πρέπει, καταρχάς, να διευκρινιστεί ότι το κύκλωμα του Σχήματος 2.12 δεν αποτελεί το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του ανιχνευτή ρεύματος, στο οποίο θα περιλαμβάνονταν όλα τα παρασιτικά χαρακτηριστικά του, αλλά συνιστά μία απλοποιημένη ισοδύναμη αναπαράσταση της διαδικασίας διακρίβωσης του ανιχνευτή. Η συγκεκριμένη προσέγγιση υιοθετείται με σκοπό την επίτευξη προσαρμογής στο διάγραμμα μέτρησης του μέτρου της σύνθετης αντίστασης μεταφοράς του ανιχνευτή, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.13, όπου ο ανιχνευτής προσεγγίζεται ως επαγωγικό στοιχείο.

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται εκτενώς στο [79], στην περίπτωση ανιχνευτών ρεύματος των οποίων το διάγραμμα σύνθετης αντίστασης μεταφοράς εμφανίζει μία εκτεταμένη επίπεδη περιοχή, όπως συμβαίνει με τον ανιχνευτή F-65, η ρεαλιστική προσομοίωση της ηλεκτρικής τους συμπεριφοράς καθίσταται εφικτή μόνον μέσω της εισαγωγής στοιχείων τύπου RL στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Επιπροσθέτως, στην εργασία [79] αναδεικνύεται η σημασία της ύπαρξης μετρήσεων φάσης στην αναφορά διακρίβωσης, καθώς αυτές αποτελούν αναγκαία προϋπόθεση για την ορθή μοντελοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος. Οι συγγραφείς της εργασίας [79], λαμβάνοντας υπόψη την απλουστευμένη δομή των ανιχνευτών ρεύματος ως καθαρούς όρους καθυστέρησης (pure delay terms), υποστηρίζουν ότι το ισοδύναμο κύκλωμα δύναται να θεωρηθεί ως σύστημα ελάχιστης φάσης (minimum phase system).

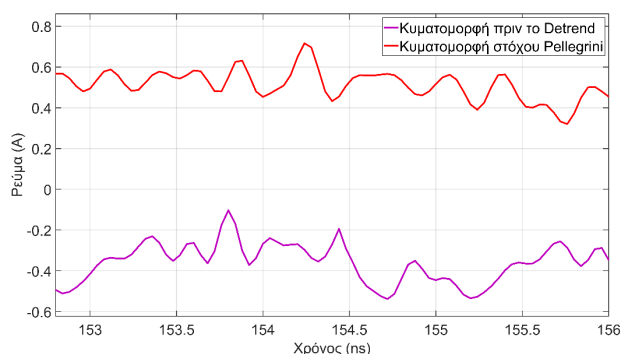
Περαιτέρω, κατά τη διαδικασία αυτή, υιοθετείται η παραδοχή της γραμμικότητας, ήτοι ότι τα επίπεδα του ρεύματος παραμένουν εντός ορίων τέτοιων, ώστε να μην επέρχεται κορεσμός στον πυρήνα του ανιχνευτή. Η ορθότητα των ανωτέρω παραδοχών και απλοποιήσεων τεκμηριώνεται από τα αποτελέσματα μετρήσεων και μοντελοποίησης που παρουσιάζονται στην εργασία [79], όπου

παρατίθεται σύγκριση μεταξύ των υπολογιζόμενων και των πειραματικά προσδιορισμένων τιμών της σύνθετης αντίστασης μεταφοράς του ανιχνευτή.

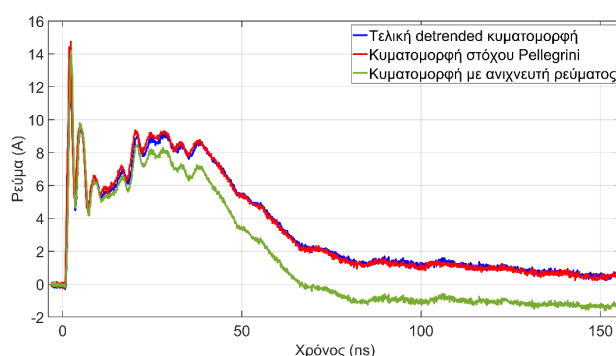
2.2.3. Βελτιστοποίηση της τιμής αφαίρεσης τάσης (detrend)

Η μετατόπιση συνεχούς τάσης (DC offset) ενός παλμογράφου ορίζεται ως η ανεπιθύμητη συνεχής τάση η οποία εμφανίζεται στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή του παλμογράφου και επικαλύπτει το επιθυμητό σήμα. Σε γενικές γραμμές, η μετατόπιση συνεχούς τάσης δεν αλλοιώνει σημαντικά το αρχικό σήμα. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιείται ανιχνευτής ρεύματος για τη μέτρηση ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, παρατηρείται σημαντική παραμόρφωση στο τελευταίο τμήμα της λαμβανόμενης κυματομορφής. Η παραμόρφωση αυτή αποδίδεται στη σωρευτική (ολοκληρωτική) φύση λειτουργίας του ανιχνευτή ρεύματος και δύναται να αντισταθμιστεί μέσω της διαδικασίας αφαίρεσης τάσης (detrending) της αρχικά καταγεγραμμένης κυματομορφής, δηλαδή με την προσθαφαίρεση μιας σταθερής τιμής συνεχούς τάσης σε όλο το χρονικό εύρος της κυματομορφής, προκειμένου η αποσβεσμένη κυματομορφή να τείνει στο μηδέν κατά τρόπο αντίστοιχο προς την κυματομορφή αναφοράς, η οποία έχει ληφθεί στον πρότυπο στόχο Pellegrini.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία αποτυπώνεται και στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.9, περιλαμβάνει τη σύγκριση της μη αποσβεσμένης και αποσυνελιγμένης (deconvoluted) κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς στο στόχο. Συγκεκριμένα, οι τιμές του ρεύματος για τα τελευταία 80 σημεία μέτρησης της ανακατασκευασμένης και μη αποσβεσμένης κυματομορφής (Σχήμα 2.14) συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές της κυματομορφής αναφοράς και υπολογίζεται η σχετική απόκλιση τους. Εφόσον η απόκλιση αυτή υπερβαίνει την τιμή του 0,1%, η τιμή απόσβεσης που έχει εφαρμοστεί στην αρχική κυματομορφή του ανιχνευτή ρεύματος απαιτείται να αναπροσαρμοστεί και να εφαρμοστεί εκ νέου η μέθοδος αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας στο σύνολό της. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζονται η αρχική κυματομορφή που ελήφθη από τον ανιχνευτή ρεύματος, η κυματομορφή αναφοράς, καθώς και η τελική αποσβεσμένη (με τιμή απόσβεσης 0,87) και αποσυνελιγμένη κυματομορφή για παλμό +4 kV, όπως προκύπτει μέσω της προαναφερθείσας μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας.



Σχήμα 2.14: Σύγκριση των τιμών ρεύματος της κυματομορφής πριν εφαρμοστεί η διαδικασία detrending με την κυματομορφή αναφοράς για τα τελευταία 80 σημεία μέτρησης



Σχήμα 2.15: Σύγκριση της κυματομορφής του στόχου Pellegrini (αναφοράς), της αρχικά καταγεγραμμένης κυματομορφής μέσω του ανιχνευτή ρεύματος και της τελικής ανακατασκευασμένης κυματομορφής για παλμό +4 kV με τη γεννήτρια EM Test Dito

2.2.4. Μετρήσεις και αποτελέσματα

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τη διάταξη που αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.10. Για κάθε επίπεδο δοκιμής και για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, διεξήχθησαν πέντε διαδοχικές μετρήσεις, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], με σκοπό τη μείωση της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τις μέσες τιμές detrend, όπως προέκυψαν από τη μέθοδο αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, η οποία περιγράφεται στην Ενότητα 2.2.2, για τα επίπεδα δοκιμής +2 kV, +4 kV, +6 kV και +8 kV, καθώς και για τέσσερις εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (EM Test Dito, Schaffner NSG 433, Schaffner NSG 438 και EMC Partner Transient 3000), καθώς και οι αντίστοιχες ρυθμίσεις κατακόρυφης διακριτικής ικανότητας του παλμογράφου (vertical resolution - Volt/div), παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Τιμές detrend για διαφορετικά επίπεδα δοκιμής και γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Επίπεδο τάσης [kV]	I_p [A]	mV/div	Τιμές 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

Ο Πίνακας 2.4 παρουσιάζει τις μέσες τιμές των παραμέτρων I_p , t_r , I_{30} , I_{60} και του μεταφερόμενου φορτίου, όπως προέκυψαν από πέντε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις για κάθε επίπεδο δοκιμής και για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Πίνακας 2.4: Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος για τις ανακατασκευασμένες κυματομορφές (Probe) και τις κυματομορφές αναφοράς (Pellegrini) για τις γεννήτριες: α) EM Test Dito, β) Schaffner NSG 433, γ) TESEQ NSG 438 και δ) EMC Partner Transient 3000

Επίπεδο τάσης [kV]		Dito					Επίπεδο τάσης [kV]		NSG 433				
		I_p [A]	t_r [ns]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	Charge [nC]			I_p [A]	t_r [ns]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	Charge [nC]
2	Probe	7,260	0,927	3,852	1,872	236,2	2	Probe	7,028	0,843	4,260	2,244	247,5
	Pellegrini	7,581	0,853	4,059	1,839	245,3		Pellegrini	8,261	0,774	4,391	2,196	252,7
4	Probe	13,76	0,961	8,125	3,326	440,2	4	Probe	13,36	0,876	8,290	4,730	487,8
	Pellegrini	14,76	0,893	8,085	3,291	481,2		Pellegrini	16,12	0,781	8,596	4,828	505,3
6	Probe	21,10	0,928	13,30	5,183	697,0	6	Probe	20,27	0,886	12,28	7,553	702,6
	Pellegrini	23,10	0,903	13,43	5,166	675,1		Pellegrini	24,57	0,780	13,00	7,394	672,8
8	Probe	28,14	0,934	17,65	6,532	1022	8	Probe	26,55	0,878	16,82	9,380	927,5
	Pellegrini	31,20	0,893	17,81	6,788	952,5		Pellegrini	33,00	0,803	16,93	9,811	962,4

α)

β)

Επίπεδο τάσης [kV]		NSG 438					Επίπεδο τάσης [kV]		Transient 3000				
		I_p [A]	t_r [ns]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	Charge [nC]			I_p [A]	t_r [ns]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	Charge [nC]
2	Probe	6,845	0,992	3,750	1,826	235,4	2	Probe	7,428	0,847	3,426	2,383	192,0
	Pellegrini	7,240	0,880	3,812	1,992	210,5		Pellegrini	7,686	0,804	3,547	2,347	211,4
4	Probe	13,45	0,992	7,858	3,929	443,4	4	Probe	14,91	0,848	6,593	4,537	396,9
	Pellegrini	14,60	0,940	7,999	3,891	445,1		Pellegrini	15,84	0,819	7,007	4,668	397,4
6	Probe	20,30	0,978	11,35	5,327	699,5	6	Probe	21,21	0,847	9,689	6,216	546,8
	Pellegrini	22,08	0,935	11,63	6,417	750,6		Pellegrini	22,65	0,822	10,09	6,415	637,4
8	Probe	26,87	0,997	15,44	8,366	859,5	8	Probe	30,19	0,847	13,62	7,761	805,6
	Pellegrini	29,38	0,898	15,57	8,510	920,9		Pellegrini	32,80	0,829	14,03	7,998	817,4

γ)

δ)

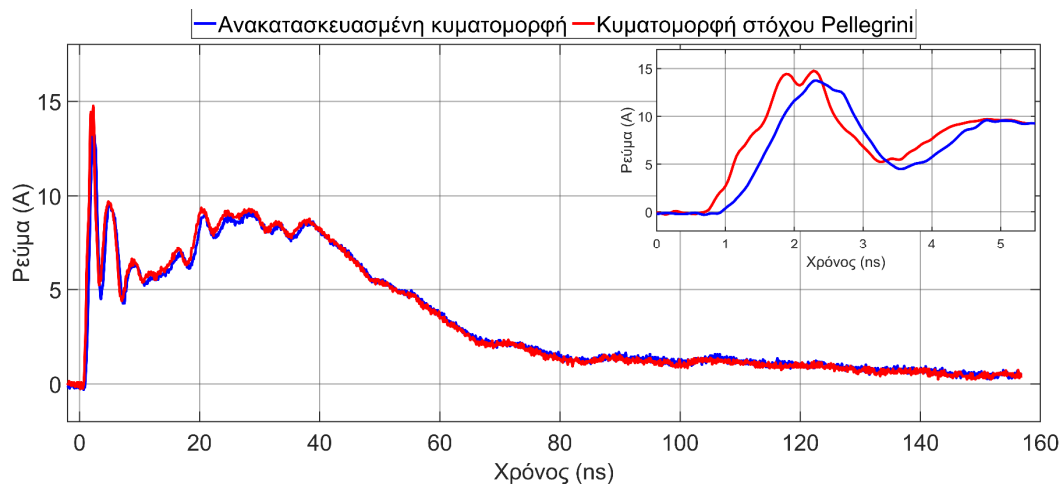
Για κάθε επίπεδο δοκιμής και για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, παρουσιάζονται δύο σύνολα αποτελεσμάτων:

- οι παράμετροι ρεύματος της ανακατασκευασμένης κυματομορφής, όπως προέκυψε μέσω της διαδικασίας detrending και της αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, και
- οι αντίστοιχες παράμετροι της κυματομορφής αναφοράς, η οποία μετρήθηκε απευθείας από τον στόχο Pellegrini.

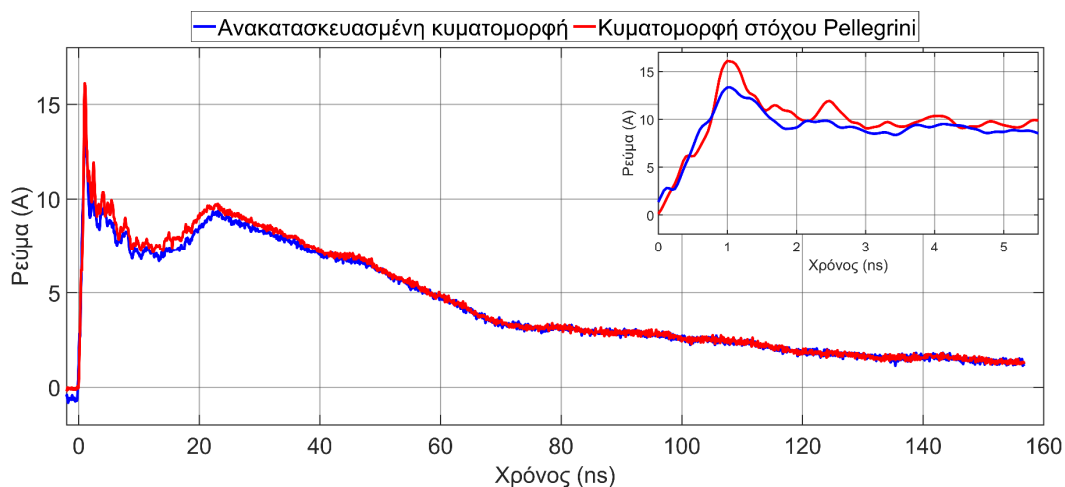
Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ικανοποιητική προσέγγιση των περισσότερων παραμέτρων μέσω της μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, για όλα τα επίπεδα δοκιμής και για όλες τις χρησιμοποιούμενες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η απόκλιση που παρατηρείται στις παραμέτρους I_p και t_r , μεταξύ των κυματομορφών που προέκυψαν από τον ανιχνευτή ρεύματος (current probe) και εκείνων που καταγράφηκαν απευθείας από τον στόχο αναφοράς Pellegrini, αποδίδεται αφενός στο περιορισμένο εύρος ζώνης του χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή και αφετέρου στο ανεπιθύμητο φαινόμενο φόρτωσης (loading effect) που επιφέρει ο ίδιος ο ανιχνευτής.

Τα Σχήματα 2.16 - 2.19 παρουσιάζουν την κυματομορφή του ανακατασκευασμένου ρεύματος, όπως προκύπτει από τη μέθοδο αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, καθώς και την αντίστοιχη κυματομορφή αναφοράς για κάθε μία από τις εξεταζόμενες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι κυματομορφές που απεικονίζονται αντιστοιχούν σε μία εκ των πέντε καταγεγραμμένων παλμών για το επίπεδο δοκιμής +4 kV.

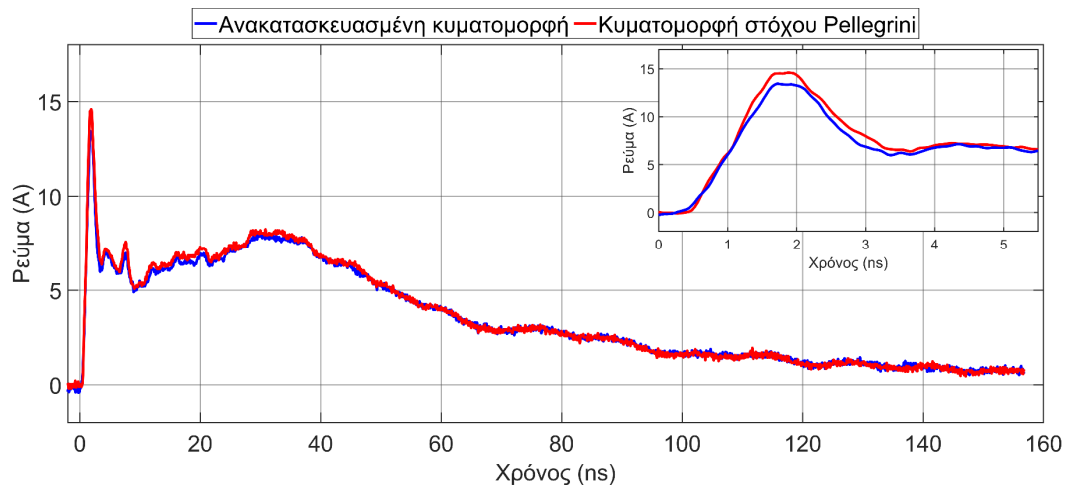
Όλες οι κυματομορφές εμφανίζουν ικανοποιητική σύγκλιση, ιδιαίτερα στο δεύτερο τμήμα του παλμού, το οποίο σχετίζεται με τις παραμέτρους I_{30} , I_{60} και το μεταφερόμενο φορτίο. Η αναμενόμενη απόκλιση στην αρχική αιχμή, η οποία αφορά τις παραμέτρους I_p και t_r , καθίσταται εμφανής στις μεγενθυμένες (zoomed-in) απεικονίσεις που συνοδεύουν κάθε Σχήμα. Οι δύο κυματομορφές για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζουν πλήρη σύγκλιση μετά το χρονικό διάστημα των 5–6 ns και καθ' όλη τη διάρκεια του υπολοίπου παλμού.



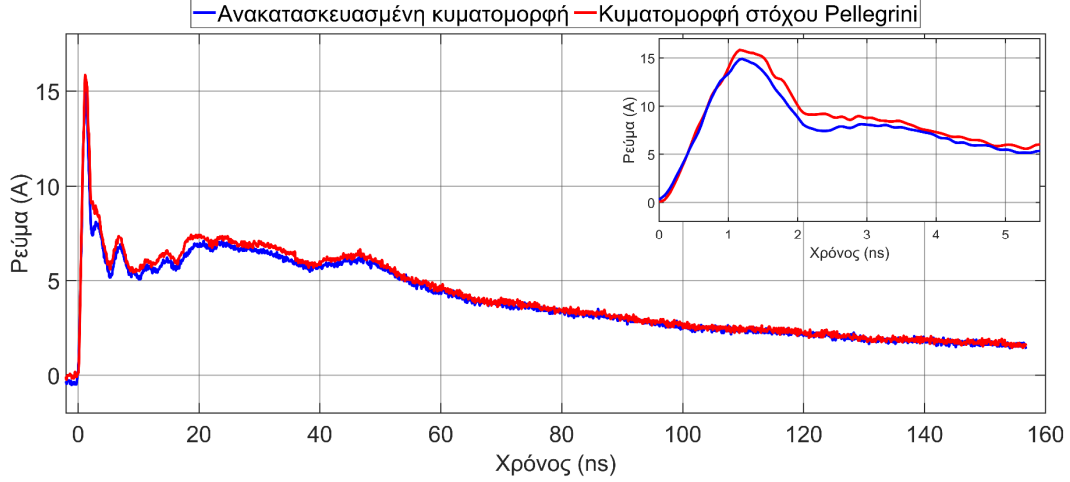
Σχήμα 2.16: Σύγκριση της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς στο στόχο Pellegrini για παλμό +4 kV από τη γεννήτρια EM Test Dito, - μεγεθυμένη απεικόνιση της 1^{ης} αιχμής



Σχήμα 2.17: Σύγκριση της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς στο στόχο Pellegrini για παλμό +4 kV από τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 - μεγεθυμένη απεικόνιση της 1^{ης} αιχμής



Σχήμα 2.18: Σύγκριση της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς στο στόχο Pellegrini για παλμό +4 kV από τη γεννήτρια Teseq NSG 438, - μεγεθυμένη απεικόνιση της 1^{ης} αιχμής



Σχήμα 2.19: Σύγκριση της ανακατασκευασμένης κυματομορφής με την κυματομορφή αναφοράς στο στόχο Pellegrini για παλμό +4 kV από τη γεννήτρια EMC Partner Transient 3000 - μεγεθυμένη απεικόνιση της 1^{ης} αιχμής

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 2.4 καταδεικνύουν σαφώς τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τους περιορισμούς της μεθοδολογίας ανακατασκευής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μέσω μετρήσεων με ανιχνευτή ρεύματος και εφαρμογής της μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας. Το χαμηλής συχνότητας περιεχόμενο της κυματομορφής, το οποίο περιλαμβάνει τις παραμέτρους I_{30} , I_{60} και το μεταφερόμενο φορτίο, προσεγγίζεται σε ιδιαίτερα ικανοποιητικό βαθμό από τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, γεγονός που αποτυπώνεται και στο δεύτερο τμήμα των κυματομορφών που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.16 - 2.19.

Ωστόσο, όπως προκύπτει από τις εστιασμένες (zoomed-in) προβολές της αρχικής αιχμής στα ίδια Σχήματα, η μεθοδολογία δεν επιτυγχάνει αντίστοιχα υψηλό επίπεδο ακρίβειας στην ανακατασκευή του υψηλής συχνότητας περιεχομένου, το οποίο αφορά τις παραμέτρους I_p και t_r . Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητος ο υπολογισμός της ποσοστιαίας απόκλισης των εν λόγω παραμέτρων μεταξύ της ανακατασκευασμένης κυματομορφής και της κυματομορφής αναφοράς. Οι ποσοστιαίες αυτές αποκλίσεις προσδιορίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις (7) και (8), ενώ τα αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 2.5 και 2.6:

$$I_{p, deviation} = \frac{I_{p, Reconstructed} - I_{p, Pellegrini}}{I_{p, Pellegrini}} \cdot 100\% \quad (7)$$

$$t_{r, deviation} = \frac{t_{r, Reconstructed} - t_{r, Pellegrini}}{t_{r, Pellegrini}} \cdot 100\% \quad (8)$$

όπου: το $I_{p, Pellegrini}$ και το $t_{r, Pellegrini}$ είναι οι τιμές των παραμέτρων I_p και t_r αντίστοιχα, όπως μετρήθηκαν από τον στόχο αναφοράς Pellegrini, ενώ τα $I_{p, Reconstructed}$ και $t_{r, Reconstructed}$ είναι οι αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν από την ανακατασκευασμένη κυματομορφή.

Πίνακας 2.5: Απόκλιση I_p για διαφορετικά επίπεδα δοκιμής και γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Επίπεδο τάσης [kV]	mV/div	$I_{p,deviation}$ [%]			
		Dito	NSG 433	NSG 438	Transient 3000
2	100	4,42	17,54	5,77	3,47
4	200	7,29	20,64	8,54	6,23
6	500	9,47	21,21	8,76	6,77
8	500	10,89	24,29	9,34	8,63

Πίνακας 2.6: Απόκλιση t_r για διαφορετικά επίπεδα δοκιμής και γεννήτριες ESD

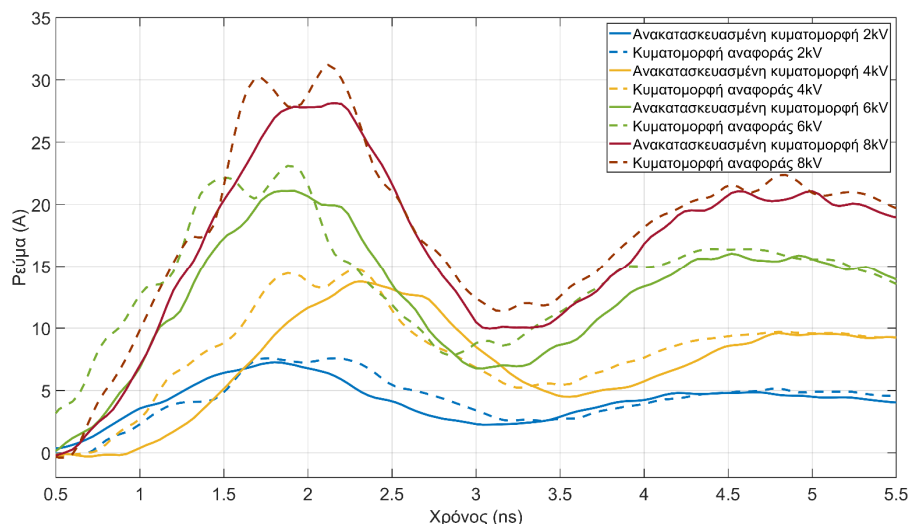
Επίπεδο τάσης [kV]	mv/div	$t_{r,deviation}$ [%]			
		Dito	NSG 433	NSG 438	Transient 3000
2	100	7,98	8,19	11,29	5,08
4	200	7,08	10,84	5,24	3,42
6	500	2,69	11,96	4,40	2,95
8	500	4,39	8,54	9,93	2,13

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.5:

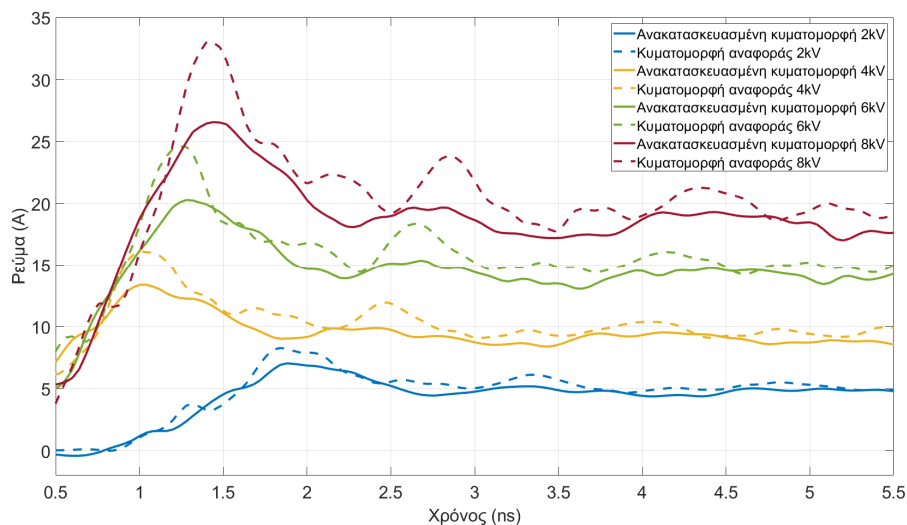
- Η απόκλιση της τιμής I_p αυξάνεται με την άνοδο του επιπέδου τάσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στις τέσσερις εξεταζόμενες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ειδικότερα, για το επίπεδο δοκιμής +4 kV, το οποίο συνιστά το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο επίπεδο τάσης για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], καταγράφονται τιμές απόκλισης που κυμαίνονται μεταξύ 6 % και σχεδόν 21 %. Αξιοσημείωτο είναι ότι η αποδεκτή τιμή απόκλισης, όπως καθορίζεται στο ίδιο Πρότυπο, ανέρχεται σε 15 %. Επομένως, είναι πιθανό μία γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η οποία εμφανίζει παραμέτρους ρεύματος εντός των καθορισμένων ορίων του Προτύπου, να αποδώσει μετρήσεις μέσω ανιχνευτή ρεύματος οι οποίες δεν θεωρούνται αποδεκτές βάσει των ίδιων κριτηρίων.
- Η απόκλιση της παραμέτρου I_p παρουσιάζει σημαντική διακύμανση μεταξύ διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, γεγονός το οποίο περιορίζει την καθολικότητα της μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας και αναδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης πριν από την εφαρμογή της σε συγκεκριμένο μοντέλο γεννήτριας. Η διαδικασία επαλήθευσης περιγράφεται στη παρούσα εργασία και συνίσταται στη σύγκριση των μετρήσεων από τον ανιχνευτή ρεύματος με τις μετρήσεις αναφοράς από τον στόχο Pellegrini.
- Οι διαφορές που παρατηρούνται στη συμπεριφορά της μεθόδου αντιστάθμισης, μεταξύ των τεσσάρων διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ως προς τις παραμέτρους της αρχικής αιχμής, αποδίδονται κυρίως στις περιορισμένες δυνατότητες αναπαραγωγής της αρχικής αιχμής από τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης του ανιχνευτή ρεύματος (1 GHz). Το εύρος αυτό δεν επαρκεί για την ανακατασκευή της αρχικής αιχμής λόγω της ανεπιθύμητης εξασθένησης του υψίσυχνου περιεχομένου. Επιπροσθέτως, δευτερεύοντα, αλλά σημαντικά αίτια που επηρεάζουν την ακρίβεια της ανακατασκευής της αρχικής αιχμής, αποτελούν οι διαφοροποιήσεις στη θέση τοποθέτησης του ανιχνευτή ρεύματος γύρω από την άκρη κάθε γεννήτριας. Λόγω κατασκευαστικών διαφορών στον σχεδιασμό των γεννητριών, η ακριβής επανάληψη της θέσης τοποθέτησης του ανιχνευτή δεν είναι δυνατή σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός που εισάγει δυνητικά σημαντική αβεβαιότητα στις μετρήσεις.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.6 αναδεικνύουν, επίσης, τη μεταβολή της απόκλισης της παραμέτρου t_r μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων δοκιμής και των διαφόρων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην περίπτωση αυτή, δεν παρατηρείται σαφές μοτίβο μεταβολής ως προς τα επίπεδα δοκιμής. Αντιθέτως, καθίσταται επιτακτική η υιοθέτηση προσέγγισης κατά περίπτωση και η εφαρμογή της ανωτέρω διαδικασίας επαλήθευσης, ιδίως λόγω της παρατηρούμενης διακύμανσης της απόκλισης μεταξύ διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

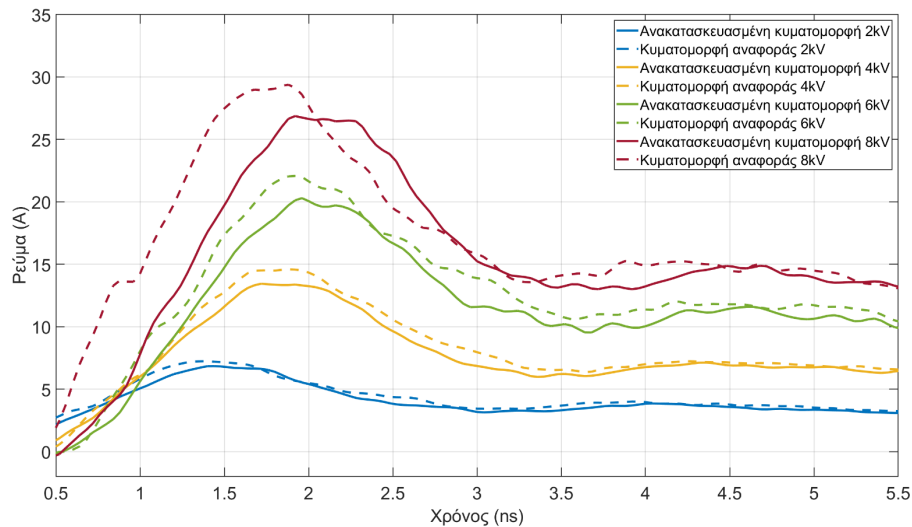
Τέλος, τα Σχήματα 2.20 – 2.23 παρουσιάζουν γραφικά την αρχική αιχμή των κυματομορφών αναφοράς και των ανακατασκευασμένων κυματομορφών για όλα τα επίπεδα δοκιμής και για κάθε μία από τις τέσσερις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αποτυπώνοντας με σαφήνεια τις προαναφερθείσες αποκλίσεις.



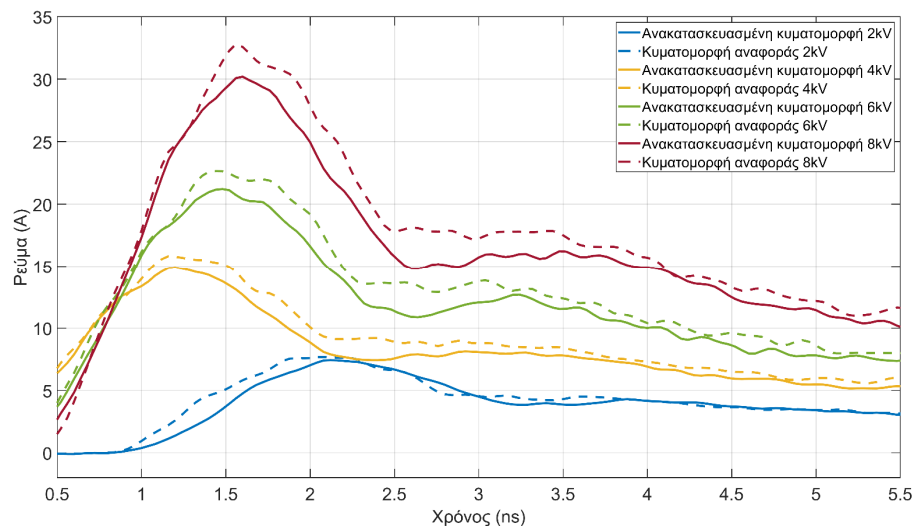
Σχήμα 2.20: Σύγκριση της αρχικής αιχμής της ανακατασκευασμένης κυματομορφής (συνεχείς γραμμές) με την κυματομορφή αναφοράς του στόχου Pellegrini (διακεκομμένες γραμμές) για παλμούς +2 kV (μπλε), +4 kV (κίτρινο), +6 kV (πράσινο) και +8 kV (κόκκινο) της γεννήτριας EM Test Dito



Σχήμα 2.21: Σύγκριση της αρχικής αιχμής της ανακατασκευασμένης κυματομορφής (συνεχείς γραμμές) με την κυματομορφή αναφοράς του στόχου Pellegrini (διακεκομμένες γραμμές) για παλμούς +2 kV (μπλε), +4 kV (κίτρινο), +6 kV (πράσινο) και +8 kV (κόκκινο) της γεννήτριας Schaffner NSG 433



Σχήμα 2.22: Σύγκριση της αρχικής αιχμής της ανακατασκευασμένης κυματομορφής (συνεχείς γραμμές) με την κυματομορφή αναφοράς του στόχου Pellegrini (διακεκομμένες γραμμές) για παλμούς +2 kV (μπλε), +4 kV (κίτρινο), +6 kV (πράσινο) και +8 kV (κόκκινο) της γεννήτριας Teseq NSG 438



Σχήμα 2.23: Σύγκριση της αρχικής αιχμής της ανακατασκευασμένης κυματομορφής (συνεχείς γραμμές) με την κυματομορφή αναφοράς του στόχου Pellegrini (διακεκομμένες γραμμές) για παλμούς +2 kV (μπλε), +4 kV (κίτρινο), +6 kV (πράσινο) και +8 kV (κόκκινο) της γεννήτριας EMC Partner Transient 3000

2.2.5. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

2.2.5.1. Τιμές detrend και εφαρμοσιμότητά τους

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.3 καταδεικνύουν σαφώς τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των τιμών detrend και του επιπέδου τάσης, γεγονός που παρατηρείται σε όλες τις εξεταζόμενες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η κατακόρυφη διακριτική ικανότητα του παλμογράφου δεν επηρεάζει αισθητά τις τιμές, όπως προκύπτει από τα επίπεδα +6 kV και +8 kV, όπου χρησιμοποιήθηκε η ίδια ρύθμιση. Οι αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών γεννητριών είναι μικρές, γεγονός που ενισχύει τη γενική

εφαρμοσιμότητα της μεθόδου, ιδιαιτέρως αν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο σκέλος της δεύτερης αιχμής και δεν απαιτείται αντιστάθμιση της πρώτης αιχμής.

Ο ακριβής υπολογισμός των τιμών απόσβεσης (detrend) μπορεί να επηρεάζεται από παραμέτρους, όπως η συχνότητα δειγματοληψίας στους μετασχηματισμούς Fast Fourier και Inverse Fast Fourier ή τα χαρακτηριστικά του βαθυπερατού φίλτρου που προσομοιώνει την αποκοπή συχνοτήτων άνω της μέγιστης συχνότητας λειτουργίας του ανιχνευτή F-65 (1 GHz). Παρά τις διαφοροποιήσεις, η γραμμικότητα παραμένει σταθερή, ανεξαρτήτως της απόλυτης τιμής detrend.

2.2.5.2. Περιορισμοί λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης του ανιχνευτή ρεύματος

Το εύρος ζώνης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μέτρηση κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Σύμφωνα με τον εμπειρικό κανόνα, πρέπει να είναι τουλάχιστον πενταπλάσιο του εύρους ζώνης του σήματος, δηλαδή περίπου 2,2 GHz για κυματομορφές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, βάσει του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], [27]. Ο ανιχνευτής F-65 (1 GHz) δεν επαρκεί για την πλήρη αποτύπωση του υψηλής συχνότητας περιεχομένου, ιδίως στην αρχική αιχμή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια γρήγορων αιχμών και περιορισμένη ακρίβεια στην ανακατασκευή της κυματομορφής. Η αδυναμία συνδυασμού μεγάλου εύρους ζώνης και κατάλληλων φυσικών διαστάσεων για τοποθέτηση γύρω από την άκρη της γεννήτριας αποτελεί περιορισμό της μεθόδου.

Η μέθοδος διατηρεί τη δυνατότητα μελλοντικής προσαρμογής μέσω ρύθμισης της συχνότητας αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου, παρότι η άγνωστη συμπεριφορά του ανιχνευτή σε υψηλές συχνότητες περιορίζει τη χρήση τους λόγω φαινομένων χωρητικής και επαγωγικής σύζευξης.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4 το χαμηλής συχνότητας μέρος της κυματομορφής ανακατασκευάζεται με υψηλή ακρίβεια, όπως φαίνεται από τις παραμέτρους I_{30} και I_{60} . Αντιθέτως, οι παράμετροι I_p και t_r παρουσιάζουν μέγιστες αποκλίσεις έως περίπου 24 % και 12 % αντίστοιχα, γεγονός που επιβεβαιώνεται στους Πίνακες 2.5 και 2.6. Συνεπώς, απαιτείται επαλήθευση της μεθόδου για κάθε γεννήτρια, πριν από την εφαρμογή της σε δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

2.2.5.3. Περιορισμοί λόγω του φαινομένου φόρτωσης από τον ανιχνευτή

Τα Σχήματα 2.20 - 2.23 παρουσιάζουν τη συμπεριφορά της αρχικής αιχμής του ανακατασκευασμένου ρεύματος. Εκτός από το περιορισμένο εύρος ζώνης, παρατηρείται και το φαινόμενο «φόρτωσης» (loading) από τον ανιχνευτή F-65, ο οποίος εισάγει αντίσταση στο κύκλωμα, προκαλώντας εξασθένηση πλάτους, αύξηση χρόνου ανόδου και πιθανή μετατόπιση φάσης. Λεπτομέρειες για τη μοντελοποίηση του φαινομένου παρέχονται στις εργασίες [82] και [83].

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10, απαιτεί τοποθέτηση του ανιχνευτή γύρω από το άκρο της γεννήτριας, γεγονός που επιφέρει παραμορφώσεις στο υψηλής συχνότητας περιεχόμενο της κυματομορφής. Η έρευνα πλέον προσανατολίζεται προς μετρήσεις γύρω από το καλώδιο γείωσης, όπως παρουσιάζεται στην [82], και τη μοντελοποίηση του φαινομένου φόρτωσης μέσω ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης [84].

2.2.5.4. Συμπεράσματα και συμβολή

Η σημαντικότερη τεχνική συμβολή αυτής της διερεύνησης έγκειται στη συστηματική μελέτη και ποσοτική καταγραφή των τιμών απόσβεσης (detrend), οι οποίες αποδείχθηκαν εξαρτώμενες τόσο από τη γεννήτρια όσο και από το επίπεδο δοκιμής. Η τεκμηρίωση αυτή καθιστά τη μέθοδο πρακτικά

εφαρμόσιμη από κάθε εργαστήριο, μειώνοντας την ανάγκη για εκ νέου ανάλυση σε κάθε νέα διάταξη μέτρησης, διευκολύνοντας τη χρήση της και σε εφαρμογές πέραν της διακρίβωσης, όπως δοκιμές σε μεταλλικούς κλωβούς ή στα επίπεδα ζεύξης (έμμεσες εκφορτίσεις σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26]). Πρόκειται για την πρώτη φορά που η μέθοδος αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας μελετάται συστηματικά και συγκριτικά σε τόσο μεγάλη κλίμακα εξοπλισμού και συνθηκών.

Η μεθοδολογία επέδειξε υψηλή ακρίβεια στην ανακατασκευή του χαμηλόσυχνου μέρους της κυματομορφής, ανεξαρτήτως γεννήτριας ή επιπέδου τάσης. Αντιθέτως, η ανακατασκευή της αρχικής αιχμής παρουσίασε αποκλίσεις που υπερβαίνουν το 10 % σε υψηλά επίπεδα τάσης (+6 kV και +8 kV). Παρ' όλα αυτά, η προτεινόμενη προσέγγιση αποτελεί μη επεμβατική τεχνική, συμβατή με το Πρότυπο, η οποία επιτρέπει την πλήρη καταγραφή της κυματομορφής χωρίς τροποποιήσεις στον εξοπλισμό δοκιμών.

2.3. Προσομοίωση του RF ανιχνευτή ρεύματος F-65 της FCC

Οι ανιχνευτές ρεύματος (current probes) αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για τη μέτρηση μεταβατικών ρευμάτων σε εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, όπως οι δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Χάρη στη μη παρεμβατική τους λειτουργία, επιτρέπουν την παρακολούθηση του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό, χωρίς να επηρεάζεται το κύκλωμα. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον μετασχηματιστή ρεύματος, με την απόκρισή τους να εξαρτάται καθοριστικά από το φερριτικό υλικό του πυρήνα.

Η φυσική ιδιότητα του φερρίτη διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη συμπεριφορά του ανιχνευτή. Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από τον αγωγό προκαλεί μαγνήτιση στον πυρήνα, η οποία καθορίζει την ηλεκτρική έξοδο του ανιχνευτή. Ωστόσο, σε υψηλές συχνότητες, όπως αυτές που χαρακτηρίζουν την αρχική αιχμή των παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η απόκριση του φερρίτη παύει να είναι στιγμιαία και ιδανική. Το μαγνητικό υλικό δεν ανταποκρίνεται πλέον άμεσα στην εξωτερική διέγερση, αλλά εμφανίζει καθυστέρηση και εξασθένηση, φαινόμενα τα οποία συνδέονται με χρονική και φασματική διασπορά. Αυτή η συμπεριφορά εκδηλώνεται με τη συχνοεξαρτώμενη φύση της μαγνητικής διαπερατότητας του φερρίτη, η οποία παύει να είναι σταθερή και εμφανίζει πολύπλοκη συχνοτική μεταβολή, επηρεάζοντας άμεσα τη σύνθετη αντίσταση μεταφοράς του ανιχνευτή. Το αποτέλεσμα είναι η πιθανή παραμόρφωση ή υποεκτίμηση της πραγματικής κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως στα κρίσιμα χρονικά διαστήματα της αρχικής αιχμής.

Για την ακριβή αποτύπωση της απόκρισης του ανιχνευτή απαιτείται σε βάθος κατανόηση της μαγνητικής συμπεριφοράς του φερρίτη μέσω κατάλληλων μοντέλων διασποράς. Η εφαρμογή μοντέλων χρονικής και φασματικής διασποράς καθιστά δυνατή την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμβάλλοντας τόσο στην ανακατασκευή της πραγματικής κυματομορφής όσο και στη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων.

2.3.1. Φαινόμενα Διασποράς

Οι συντακτικές σχέσεις (Constitutive Relations) του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες διατυπώνονται συνήθως υπό την παραδοχή σταθερής μαγνητικής διαπερατότητας μ , ισχύουν αυστηρά μόνο στην στατική περίπτωση και, κατά προσέγγιση, σε πεδία χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωση ταχέως μεταβαλλόμενων πεδίων, η μαγνητική επαγωγή B δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της έντασης

του μαγνητικού πεδίου H σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, αλλά και από το ιστορικό της χρονικής μεταβολής της, δηλαδή από τις τιμές που είχαν οι ίδιες ποσότητες σε προηγούμενα χρονικά διαστήματα [85].

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη χρονική στιγμή t , η τιμή του $B(t)$ επηρεάζεται όχι μόνο από την τρέχουσα τιμή του $H(t)$, αλλά και από το φαινόμενο της χρονικής διασποράς, το οποίο περιγράφει την εξάρτηση της απόκρισης από το χρονικό ιστορικό της διέγερσης. Επιπλέον, υπάρχουν μέσα για τα οποία η τιμή του B σε μία συγκεκριμένη χωρική θέση (x, y, z) εξαρτάται όχι μόνο από την τιμή του H στην ίδια θέση, αλλά και από τις τιμές του πεδίου σε γειτονικές χωρικές περιοχές. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως χωρική διασπορά.

Πέραν αυτών, εμφανίζονται φαινόμενα διασποράς που συνδέονται με άλλες φυσικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η οποία δύναται να επηρεάσει τη μαγνητική απόκριση των υλικών μέσω θερμομαγνητικής διασποράς. Δεδομένου ότι τα φαινόμενα χρονικής διασποράς απαντώνται σε πλήθος υλικών και τεχνολογικών εφαρμογών, καθίσταται αναγκαία η ενδελεχής μελέτη τους. Για λόγους αναλυτικής ευκολίας και υπολογιστικής απλοποίησης, η μελέτη αυτή πραγματοποιείται, κατά προτίμηση, στο φασματικό πεδίο, όπου οι σχέσεις αποκτούν μορφή αλγεβρικών συναρτήσεων.

Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιαστεί η εξειδικευμένη μορφή των συντακτικών σχέσεων, όπως προκύπτουν από την ανάλυση στο φασματικό πεδίο, με στόχο την ακριβέστερη περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς των μέσων υπό την επίδραση φαινομένων διασποράς.

2.3.1.1. Συντακτική σχέση σε μέσα με χρονική διασπορά

Έστω ένα απλό μέσο, το οποίο δύναται να είναι ακόμη και ανομοιογενές, με χρονοσταθερή μαγνητική διαπερατότητα μ . Για τους φασιθέτες της μαγνητικής επαγωγής B και της έντασης του μαγνητικού πεδίου H , ισχύει:

$$\bar{B} = \text{Re}\{B(r) \cdot e^{j\omega t}\} = \text{Re}\{\mu \cdot H(r) \cdot e^{j\omega t}\} = \mu \cdot \text{Re}\{H(r) \cdot e^{j\omega t}\} = \mu \cdot \bar{H} \quad (9)$$

Όταν, όμως, το μέσο εμφανίζει χρονική διασπορά, η παραπάνω πολλαπλασιαστική σχέση δεν είναι εφαρμόσιμη. Επειδή όμως το παραπάνω αποτέλεσμα έχει την μορφή ενός γινομένου μετασχηματισμών Fourier, αυτό σημαίνει πως η συντακτική σχέση στο πεδίο του χρόνου για μέσο με χρονική διασπορά θα προκύψει από την πράξη της συνέλιξης. Πιο συγκεκριμένα:

$$B(r, t) = \int_{-\infty}^t \hat{\mu}(r, t - t') \cdot H(r, t') dt' \quad (10)$$

όπου $\hat{\mu}$ η πραγματική χρονική συνάρτηση του χρόνου της μαγνητικής διαπερατότητας η οποία στο πεδίο συχνότητας θα δίνεται από την σχέση:

$$\mu(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \hat{\mu}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει η σχέση που μας δίνει την σύνθετη μαγνητική διαπερατότητα η οποία θα έχει την παρακάτω μορφή [86]:

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) - j \cdot \mu''(\omega) \quad (12)$$

2.3.1.2. Μοντέλα Φαινομένων Διασποράς

Παρακάτω αναγράφονται διάφορα φαινόμενα διασποράς που έχουν χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση διαφόρων εφαρμογών, ταξινομημένα σε τρεις κατηγορίες [87]:

Χρονική Διασπορά (Temporal Dispersion):

Ο όρος χρονική διασπορά αναφέρεται στη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά της απόκρισης ενός συστήματος ή υλικού κατόπιν εφαρμογής παροδικής διέγερσης. Η διασπορά αυτή εκδηλώνεται είτε ως καθυστέρηση είτε ως σταδιακή εξασθένηση της απόκρισης, εξαιτίας εσωτερικών μηχανισμών χαλάρωσης ή ιστορικής εξάρτησης του συστήματος (memory effects). Η μελέτη της χρονικής διασποράς είναι ουσιώδης για την κατανόηση μεταβατικών φαινομένων και τη διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς των υλικών υπό μη μόνιμες συνθήκες λειτουργίας.

Ενδεικτικά μοντέλα που περιγράφουν τη χρονική διασπορά περιλαμβάνουν:

- Χαλαρωτική Διασπορά (Relaxation Dispersion): Περιγράφει την αργή αποκατάσταση της κατάστασης ισορροπίας του υλικού μετά την άρση της διέγερσης, λόγω εσωτερικών μηχανισμών επαναφοράς.
- Διασπορά Μεταβατικής Κατάστασης (Transient-State Dispersion): Εστιάζει στη χρονική συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια μεταβατικών φάσεων, πριν την επίτευξη σταθερής κατάστασης.
- Μη Γραμμική Χρονική Διασπορά (Nonlinear Temporal Dispersion): Περιγράφει περιπτώσεις όπου η χρονική απόκριση εξαρτάται μη γραμμικά από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης (πλάτος, διάρκεια, μορφή).
- Επαναληπτική Διασπορά (Recurrent Dispersion): Μοντελοποιεί την εκ νέου εμφάνιση φαινομένων διασποράς υπό κυκλικές ή ειδικές συνθήκες διεγέρσεων, όπως φαινόμενα υστέρησης ή δομικής ανάδρασης.

Φασματική Διασπορά (Spectral Dispersion):

Η φασματική διασπορά περιγράφει τη συχνοεξαρτώμενη συμπεριφορά των ιδιοτήτων ενός υλικού ή συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, αφορά στη μεταβολή παραμέτρων όπως η μαγνητική επιδεκτικότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ή η διηλεκτρική σταθερά, συναρτήσει της συχνότητας της εφαρμοζόμενης διέγερσης. Η φασματική διασπορά είναι καίριας σημασίας για τη μελέτη της απόκρισης υλικών σε ευρείες ζώνες συχνοτήτων, ιδίως σε εφαρμογές ραδιοσυχνοτήτων (RF) και κυμάτων υψηλής ενέργειας.

Ενδεικτικά μοντέλα φασματικής διασποράς περιλαμβάνουν:

- Διασπορά τύπου Debye: Περιγράφει τη διηλεκτρική χαλάρωση πολωτικών υλικών, με χαρακτηριστική συχνότητα χαλάρωσης και ενιαία χρονική σταθερά.
- Διασπορά τύπου Lorentz (Lorentzian Dispersion): Μοντελοποιεί φαινόμενα συντονιστικής απορρόφησης, συχνά σε υψηλές συχνότητες, λαμβάνοντας υπόψη τη μάζα και το φαινόμενο πλάτος του συντονισμού.
- Επαγωγική Διασπορά (Inductive Dispersion): Περιγράφει τη συχνο-εξαρτώμενη συμπεριφορά που απορρέει από επαγωγικά φαινόμενα σε κυκλώματα ή υλικά.
- Συντονιζόμενη Διασπορά (Resonant Dispersion): Αναφέρεται σε διασπορά που προκαλείται από επιμέρους αντηχητικά (resonant) χαρακτηριστικά του συστήματος ή της δομής.

- Διασπορά Γραμμικής Απόκρισης (Linear Response Dispersion): Μοντελοποιεί την εξάρτηση της φασματικής απόκρισης ως γραμμική συνάρτηση της συχνότητας ή του πεδίου διέγερσης.
- Θερμομαγνητική Διασπορά (Thermomagnetic Dispersion): Περιγράφει τη μεταβολή της μαγνητικής συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα σε υλικά με εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία φάσεις.
- Διασπορά Λανθάνουσας Αντίδρασης (Latent Response Dispersion): Αφορά φαινόμενα, όπου η φασματική απόκριση επηρεάζεται από λανθάνοντες μηχανισμούς που ενεργοποιούνται υπό ειδικές ή οριακές συνθήκες λειτουργίας.

Μαγνητοκρυσταλλική Ανισοτροπία (Magnetocrystalline Anisotropy):

Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία αναφέρεται στην κατευθυντικά εξαρτώμενη μαγνητική απόκριση ενός υλικού, η οποία προκύπτει από τη συμμετρική ή ασύμμετρη κατανομή των ατόμων εντός του κρυσταλλικού του πλέγματος. Η φαινόμενη ενεργειακή διαφορά μεταξύ διαφόρων διευθύνσεων μαγνήτισης οδηγεί σε προτιμώμενους άξονες ευθυγράμμισης της μαγνητικής ροπής. Η ανάλυση της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας είναι καθοριστική για τη σχεδίαση και την κατανόηση της συμπεριφοράς μαγνητικών υλικών σε μικροδομικό επίπεδο. Ενδεικτικά μοντέλα περιλαμβάνουν:

- Επιφανειακή Ανισοτροπία (Surface Anisotropy): Περιγράφει ανισοτροπικές ιδιότητες που προκύπτουν λόγω διαταραχής της συμμετρίας στα όρια ή στις επιφάνειες του υλικού.
- Χωρική Ανισοτροπία (Spatial Anisotropy): Αναφέρεται στην κατευθυντική εξάρτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων στο εσωτερικό του όγκου του υλικού.
- Θερμοκρασιακή Ανισοτροπία (Thermal Anisotropy): Μοντελοποιεί τη μεταβολή των μαγνητικών ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία και την επίδραση της θερμικής ενέργειας στην κατευθυντική σταθερότητα της μαγνήτισης.

2.3.1.3. Ανάλυση μαγνητικής διασποράς με χρήση του Debye 1st Order Model

Ο Peter Debye, εξέχουσα μορφή της φυσικής του 20^{ου} αιώνα, ανέπτυξε ένα θεμελιώδες θεωρητικό πρότυπο για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς των κρυσταλλικών στερεών. Το μοντέλο Debye, αν και αρχικά σχεδιάστηκε με σκοπό τη μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων και, κυρίως, της ειδικής θερμότητας των κρυστάλλων, επέδειξε ιδιαίτερη ευελιξία, καθιστώντας δυνατή την εφαρμογή του και σε άλλους τομείς της φυσικής, όπως η μαγνητική θεωρία. Στο πλαίσιο της μαγνητικής απόκρισης, η διασπορά τύπου Debye χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της εξάρτησης της μαγνητικής διαπερατότητας ενός υλικού από τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική διαπερατότητα μ εκφράζει την ικανότητα του υλικού να μαγνητίζεται και αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο για την περιγραφή της συμπεριφοράς μαγνητικών υλικών υπό περιοδικές διεγέρσεις [88].

Η εξίσωση που περιγράφει τη σύνθετη συχνο-εξαρτώμενη μαγνητική διαπερατότητα είναι:

$$\mu(\omega) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_s - \mu_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (13)$$

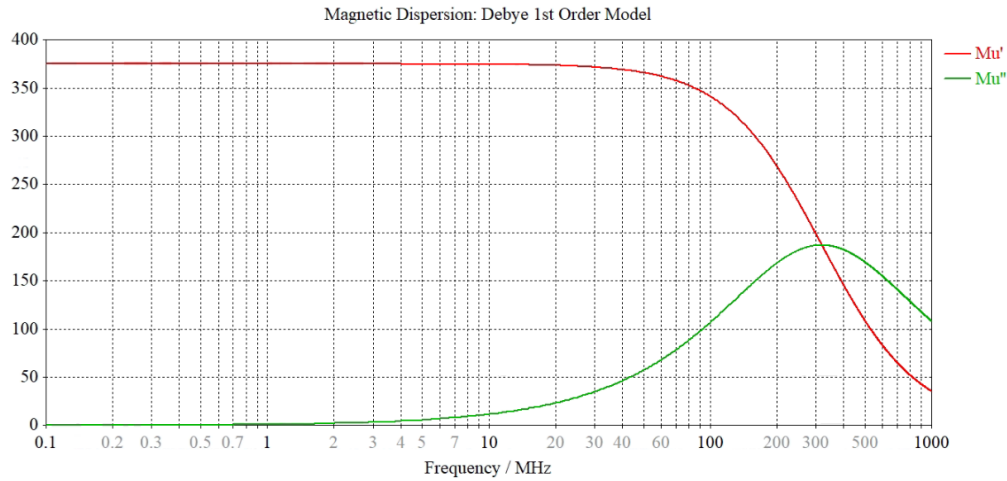
όπου: $\mu(\omega)$: η συχνο-εξαρτώμενη μαγνητική διαπερατότητα, μ_s : η στατική μαγνητική διαπερατότητα (για $\omega = 0$), μ_{∞} : είναι η μαγνητική διαπερατότητα σε πολύ υψηλές συχνότητες (για $\omega \rightarrow \infty$), τ : ο χρόνος χαλάρωσης (dispersion time)

Για την εις βάθος κατανόηση της συχνοεξαρτώμενης συμπεριφοράς της μαγνητικής διαπερατότητας, η $\mu(\omega)$ αναλύεται στο πραγματικό και το φανταστικό της μέρος.

$$\text{Re}\{\mu(\omega)\} = \mu'(\omega) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_s - \mu_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (14)$$

$$\text{Im}\{\mu(\omega)\} = \mu''(\omega) = \frac{(\mu_s - \mu_{\infty})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (15)$$

όπου: $\mu'(\omega)$: το πραγματικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας το οποίο αντιπροσωπεύει την αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας στο υλικό και $\mu''(\omega)$: το φανταστικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας το οποίο αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας λόγω της μαγνήτισης.



Σχήμα 2.24: Μαγνητική διασπορά - Debye 1st Order Model

Ο χρόνος χαλάρωσης τ αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα για τη δυναμική της μαγνητικής απόκρισης, καθώς καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο το υλικό ανταποκρίνεται σε μεταβολές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η τιμή του τ σχετίζεται άμεσα με τη θέση της κορυφής της φανταστικής συνιστώσας της μαγνητικής διαπερατότητας, $\mu''(\omega)$, η οποία αντανακλά το μέγιστο των μαγνητικών απωλειών λόγω χαλάρωσης. Συνεπώς, για την εκτίμηση του χρόνου χαλάρωσης, αναλύεται η κορυφή της καμπύλης $\mu''(\omega)$, όπως αυτή απεικονίζεται με πράσινη γραμμή στο Σχήμα 2.24.:

$$\frac{d(\mu''(\omega))}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left[\frac{(\mu_s - \mu_{\infty})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right] = \frac{(\mu_s - \mu_{\infty})\tau}{1 + (\omega\tau)^2} [1 - (\omega\tau)^2]$$



$$\frac{d(\mu''(\omega))}{d\omega} = 0 \Rightarrow 1 - (\omega\tau)^2 = 0$$



$$\tau = \frac{1}{\omega_{peak}} \quad (16)$$

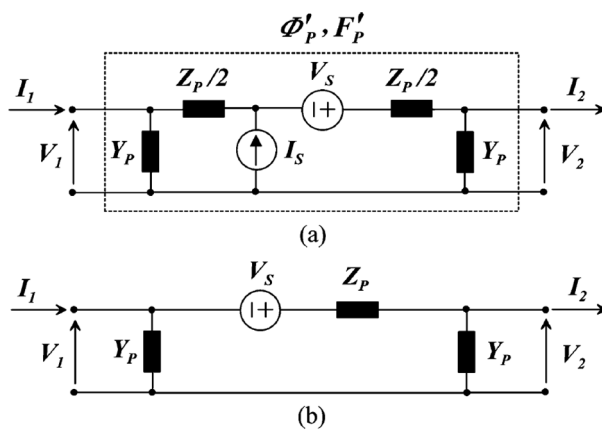
όπου ω_{peak} : η γωνιακή συχνότητα στην κορυφή της $\mu''(\omega)$.

2.3.2. Συνοπτική παρουσίαση της έρευνας σχετικά με την προσομοίωση RF ανιχνευτών ρεύματος

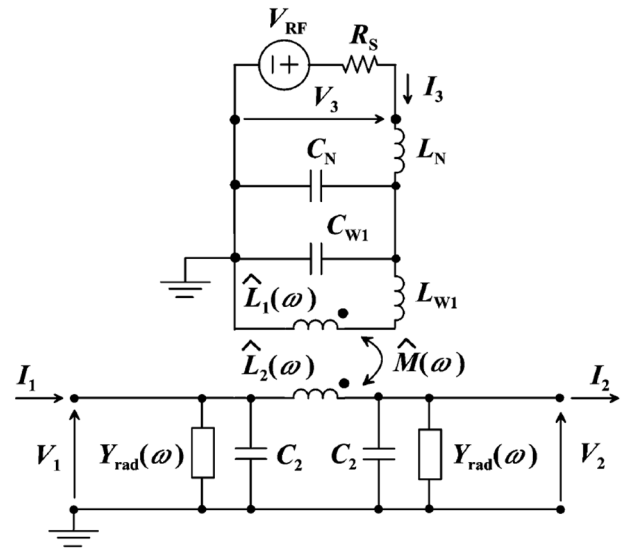
Η βιβλιογραφία περιλαμβάνει τρεις κύριες προσεγγίσεις προσομοίωσης των ανιχνευτών ρεύματος: (α) κυκλωματική μοντελοποίηση με χρήση συγκεντρωμένων παραμέτρων (lumped-parameter), (β) ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση μέσω λογισμικού όπως το CST Microwave Studio, και (γ) προσομοίωση πλήρους κυματικής εξίσωσης (full-wave modeling) για πολύπλοκες γεωμετρίες με δέσμες (bundles) πολλαπλών αγωγών. Οι προσεγγίσεις αυτές παρουσιάζονται διεξοδικά στις εργασίες [87], [89] και [90].

2.3.2.1. Κυκλωματική Προσομοίωση με μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων

Η εργασία των Grassi et al. [89] επικεντρώνεται στη θεωρητική και πειραματική μοντελοποίηση του εξοπλισμού έγχυσης ρεύματος (current injection probes) μέσω δύο διακριτών κυκλωματικών προσεγγίσεων με συγκεντρωμένες παραμέτρους, της αφανούς (implicit - Σχήμα 2.25) και της εμφανούς (explicit - Σχήμα 2.26) προσέγγισης.



Σχήμα 2.25: Implicit μοντέλο του probe έγχυσης: (α): Αρχική κυκλωματική αναπαράσταση που υιοθετήθηκε για την προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα, (β): Μοντέλο Lumped-Πι που προέκυψε από τη διαδικασία προσαρμογής [89]



Σχήμα 2.26: Explicit κυκλωματικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων του probe έγχυσης, τοποθετημένο γύρω από τον αγωγό υπό δοκιμή [89]

Η αφανής προσέγγιση βασίζεται σε μετρήσεις παραμέτρων σκέδασης (S-parameters), οι οποίες πραγματοποιούνται με κατάλληλη διάταξη διακρίβωσης. Η μέθοδος αυτή υιοθετεί μία θεώρηση «μαύρου κουτιού» (black-box) για το probe, αναπαριστώντας τον μέσω απλοποιημένου κυκλωματικού ισοδυνάμου τύπου π-δομής (lumped-Π). Στόχος της προσέγγισης αυτής είναι η περιγραφή της συνολικής συμπεριφοράς του probe, χωρίς να αναλύονται οι επιμέρους φυσικοί μηχανισμοί σύζευξης.

Αντίθετα, η εμφανής προσέγγιση επιδιώκει την αναλυτική περιγραφή του φαινομένου σύζευξης, αξιοποιώντας τη θεωρία των μαγνητικών κυκλωμάτων και λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες φυσικές παραμέτρους, όπως τη μαγνητική επιτρεπτότητα του φερρίτη, τις χωρητικότητες που σχετίζονται με τη γεωμετρία και τους ακροδέκτες (connectors), καθώς και τις παρασιτικές επαγωγές της κατασκευής. Στο πλαίσιο της εμφανούς προσέγγισης, πραγματοποιείται μέτρηση της σύνθετης αντίστασης εισόδου του probe, η οποία μοντελοποιείται ως σύνθετη, συχνοεξαρτώμενη επαγωγή. Η επαγωγή αυτή συσχετίζεται άμεσα με την ενεργή μαγνητική επιτρεπτότητα του φερρίτη, σύμφωνα με τη γενική σχέση [91]:

$$L(\omega) = \mu_r(\omega) \cdot \mathcal{R}_0^{-1} \cdot N^2 \quad (17)$$

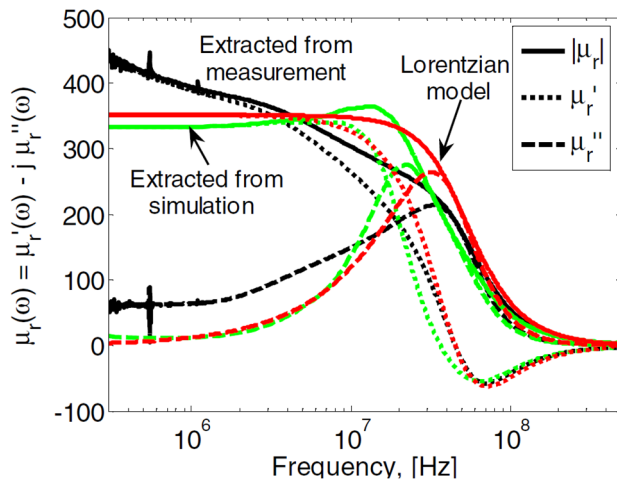
όπου $\mathcal{R}_0^{-1}$ είναι η σχετική μαγνητική αντίσταση του πυρήνα και N ο αριθμός περιελίξεων.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο προσεγγίσεων συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται σε πρότυπες διατάξεις δοκιμών. Η σύγκριση αυτή καταδεικνύει ότι τα αναπτυγμένα μοντέλα παρουσιάζουν υψηλή ακρίβεια καθ' όλο το εξεταζόμενο φάσμα συχνοτήτων έως τα 400 MHz, εύρος το οποίο κρίνεται επαρκές για τις απαιτήσεις της πλειονότητας των εφαρμογών που απαιτείται χρήση ανιχνευτών ρεύματος, συμπεριλαμβανομένης και της μέτρησης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

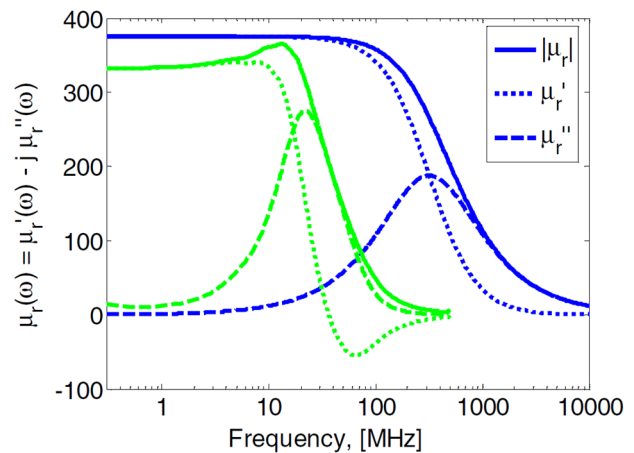
2.3.2.2. Ηλεκτρομαγνητική Προσομοίωση μέσω του CST Microwave Studio

Η εργασία της Grassi [87] συνιστά εξέλιξη της προγενέστερης μελέτης και εισάγει μία συνδυαστική προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει τόσο κυκλωματική προσομοίωση σε περιβάλλον SPICE, όσο και τρισδιάστατη ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση σε περιβάλλον CST Microwave Studio (MWS). Κεντρικό στοιχείο της μεθοδολογίας αποτελεί η αναπαράσταση της μαγνητικής επιτρεπτότητας του φερρίτη, είτε μέσω εμπειρικής καμπύλης (lookup table), είτε μέσω αναλυτικών μοντέλων τύπου Lorentzian (Σχήμα 2.27) και Debye (Σχήμα 2.28).

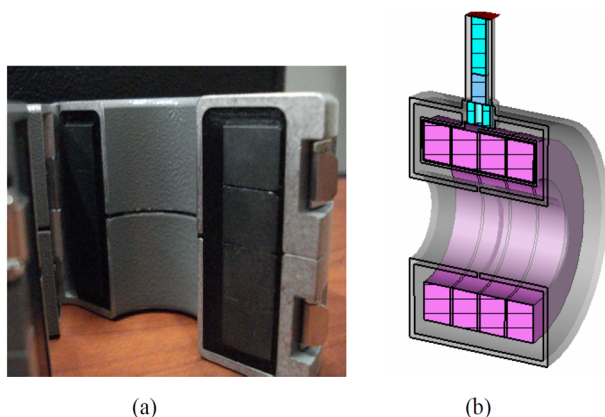
Η προσομοίωση πραγματοποιείται με λεπτομερή αποτύπωση της γεωμετρίας του ανιχνευτή, συμπεριλαμβανομένων του μεταλλικού πλαισίου, του φερρίτη και των συνδέσμων (Σχήμα 2.29). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μοντελοποίηση των μεταβατικών περιοχών της διάταξης και στην αξιοπιστία των παραμέτρων των υλικών, με κυριότερες τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα και τις μαγνητικές απώλειες. Η συχνότητα συντονισμού του φερριτικού πυρήνα τύπου FCC F-130A, η οποία εντοπίζεται περί τα ~30 MHz, καταγράφεται με σαφήνεια και επαληθεύεται μέσω μετρήσεων σύνθετης αντίστασης.



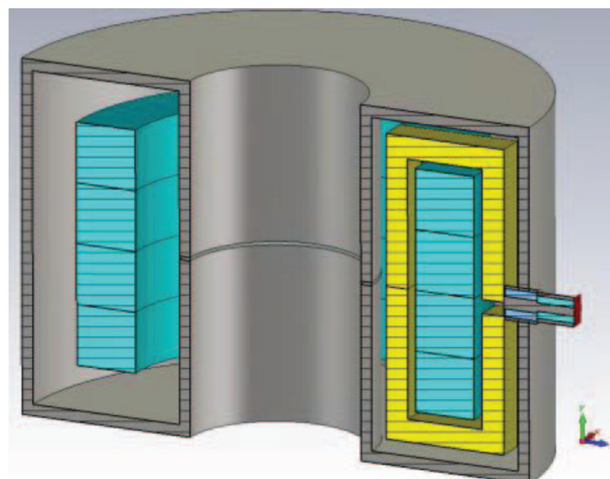
Σχήμα 2.27: Φάσματα αποτελεσματικής μαγνητικής διαπερατότητας του πυρήνα του ανιχνευτή, όπως προέκυψαν από μέτρηση σύνθετης αντίστασης εισόδου (μαύρη καμπύλη), από προσαρμογή με το μοντέλο Lorentz (κόκκινη καμπύλη) και από προσομοιώσεις MWS (πράσινη καμπύλη) [87]



Σχήμα 2.28: Φάσματα εσωτερικής μαγνητικής διαπερατότητας (μπλε) όπως προέκυψαν από το μοντέλο Debye, και φάσματα αποτελεσματικής μαγνητικής διαπερατότητας (πράσινα) όπως εξήχθησαν από τις επακόλουθες προσομοιώσεις MWS που αξιοποίησαν το εν λόγω μοντέλο [87]



Σχήμα 2.29: (a): Φωτογραφία του probe έγχυσης FCC F-130A και (b): εγκάρσια τομή του μοντέλου του σε MWS [87]



Σχήμα 2.30: Διατομή μοντέλου BCI probe F-130A [90]

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πραγματοποιείται μέσω συγκρίσεων της μαγνητικής επιτρεπτότητας, όπως αυτή προσδιορίζεται από τις πειραματικές μετρήσεις, το μοντέλο Lorentzian, καθώς και το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο που αναπτύσσεται στο περιβάλλον του CST. Σημαντικό εύρημα της μελέτης αποτελεί η διαπίστωση ότι το μοντέλο Lorentzian αναπαριστά με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του φερρίτη στην περιοχή του συντονισμού, εμφανίζει όμως περιορισμούς στις χαμηλότερες συχνότητες, όπου κυριαρχούν φαινόμενα χρονικής διασποράς και απωλειών. Αντιθέτως, το μοντέλο Debye, το οποίο εφαρμόζεται στο περιβάλλον του CST, παρουσιάζει υψηλό βαθμό συμφωνίας με τα πειραματικά δεδομένα σε ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων, ιδίως όταν η ενδογενής μαγνητική επιτρεπτότητα εισάγεται στο μοντέλο ως παραμετρική συνάρτηση.

Η εγκυρότητα της προτεινόμενης προσέγγισης τεκμηριώνεται περαιτέρω μέσω της ανάλυσης των S-παραμέτρων σε ειδικά σχεδιασμένο validation fixture, όπου οι συγκρίσεις μεταξύ προσομοιώσεων και μετρήσεων επιβεβαιώνουν την ακρίβεια του μοντέλου έως και τα 400 MHz. Η συνδυαστική αυτή μεθοδολογία προσφέρει πολύτιμη ακρίβεια και φυσική διορατικότητα, ιδίως για την κατανόηση φαινομένων, όπως οι διαστασιακοί συντονισμοί και οι απώλειες πυρήνα, συμβάλλοντας σημαντικά στην αξιόπιστη μοντελοποίηση των probe έγχυσης σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων.

2.3.2.3. Προσομοίωση Πλήρους Κυματικής Εξίσωσης

Στην εργασία [90] εφαρμόζεται προσομοίωση πλήρους κυματικής εξίσωσης (Σχήμα 2.30), αξιοποιώντας, ενδεικτικά, μεθοδολογίες τύπου FDTD (Finite-Difference Time-Domain), για την ανάλυση της σύζευξης μεταξύ του BCI (Bulk Current Injection) probe και καλωδιακών διατάξεων πολλαπλών αγωγών. Σε αντίθεση με προηγούμενα έργα της βιβλιογραφίας [89], τα οποία στηρίζονται σε απλοποιημένα μοντέλα μονού αγωγού (single-wire models) ή σε προσεγγίσεις βασισμένες αποκλειστικά σε μετρημένες τιμές μαγνητικής επιτρεπτότητας, η παρούσα προσομοίωση επιτυγχάνει υψηλότερη ακρίβεια, καθώς αποτυπώνει λεπτομερώς τόσο τη γεωμετρία των καλωδίων και του ανιχνευτή, όσο και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του συστήματος, περιλαμβανομένων στοιχείων όπως τα θωρακισμένα περιβλήματα και οι διατάξεις γείωσης.

2.3.3. Προσομοίωση του RF ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65 στο περιβάλλον του CST Studio

Ο ανιχνευτής F-65 της εταιρίας Fisher Custom Communications αποτελεί τυποποιημένο ανιχνευτή ρεύματος, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σε μετρήσεις κατά τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει ευρύ φάσμα συχνοτήτων, φθάνοντας έως και το 1 GHz, διαθέτει διαχωρισμένο πυρήνα (split-core) για εύκολη τοποθέτηση σε καλωδιακές διατάξεις και συνοδεύεται από διακριβωμένες μετρήσεις της συνάρτησης μεταφοράς του, γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστο για πειραματικές εφαρμογές.

Η αναλυτική προσομοίωση του ανιχνευτή, καθώς και η διερεύνηση της ευαισθησίας του σε κρίσιμες παραμέτρους αποτελεί αναγκαίο βήμα για την ακριβή περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής του απόκρισης και, κατά συνέπεια, για τη βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων σε δοκιμές υψηλών συχνοτήτων.

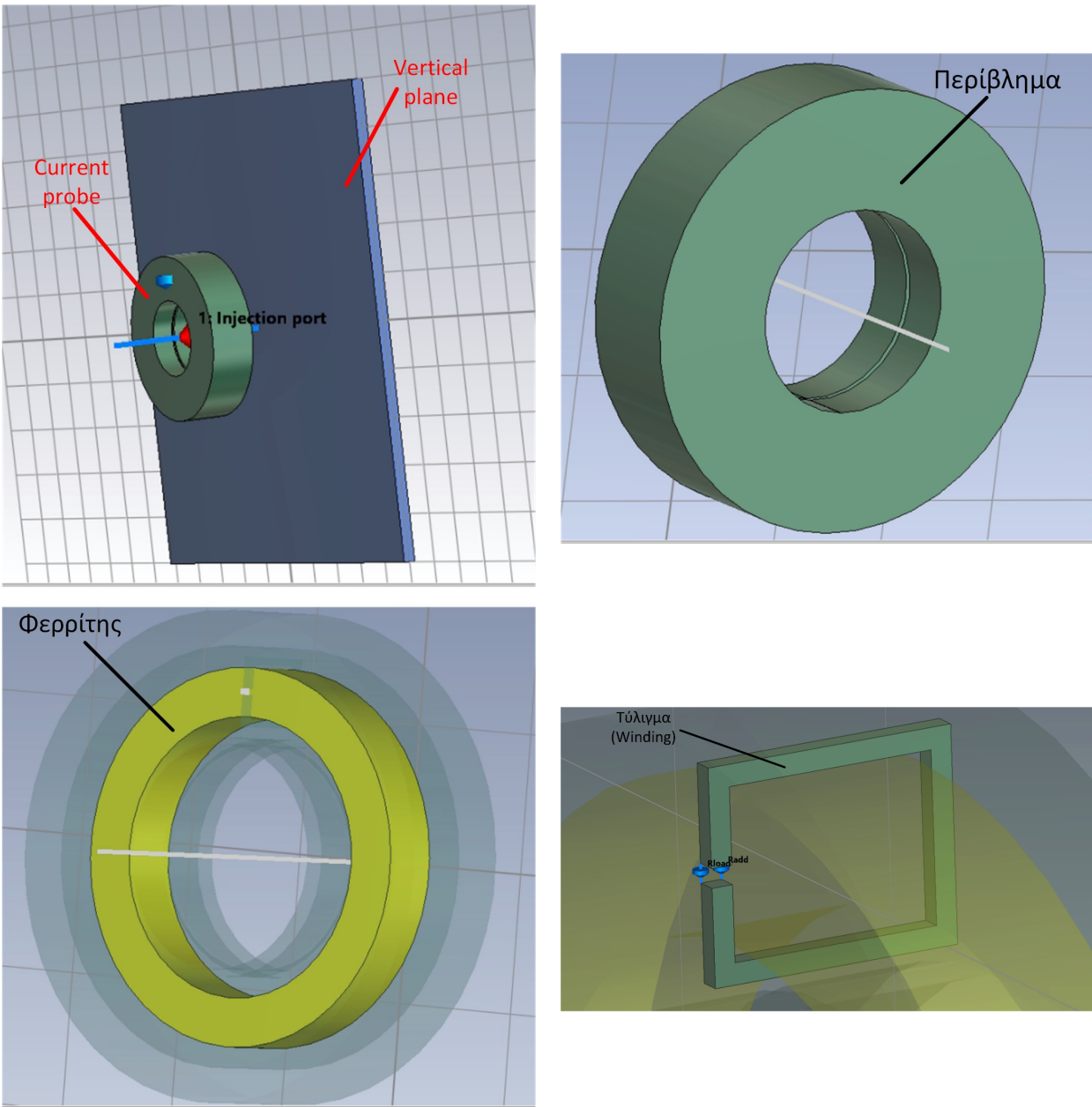
Η διαδικασία προσομοίωσης υλοποιήθηκε στο περιβάλλον CST Studio Suite 2024, το οποίο προσφέρει ολοκληρωμένα εργαλεία ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, καλύπτοντας ευρύ φάσμα συχνοτήτων και γεωμετρικών διατάξεων. Στόχος της προσομοίωσης ήταν η ρεαλιστική αναπαράσταση τόσο της γεωμετρίας όσο και της λειτουργίας του ανιχνευτή, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση κρίσιμων παραμέτρων στην ηλεκτρομαγνητική του απόκριση. Η μοντελοποίηση βασίσθηκε σε πραγματικές γεωμετρικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του ανιχνευτή, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα. Η φιλοσοφία σχεδίασης επικεντρώθηκε στη δυνατότητα παραμετρικής ανάλυσης, επιτρέποντας λεπτομερή διερεύνηση της συμπεριφοράς του ανιχνευτή υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και τιμές παραμέτρων με έμφαση στη διάταξη διακρίβωσης σύμφωνα με το IEC 61000-4-2 [26] που περιεγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1. Απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι η μελέτη του φαινομένου φόρτωσης του ανιχνευτή στο συγκεκριμένο σενάριο μέτρησης.

2.3.3.1. Βασικά Στοιχεία της Δομής του Μοντέλου

Στο περιβάλλον του CST Studio, το μοντέλο του ανιχνευτή υλοποιήθηκε μέσω δύο κύριων δομικών στοιχείων. Το πρώτο δομικό στοιχείο αναπαριστά την κάθετη μεταλλική πλάκα, όπως αυτή ορίζεται στη διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, η οποία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αλληλεπίδραση με το υπό δοκιμή αντικείμενο, ενώ το δεύτερο αφορά τον ίδιο τον ανιχνευτή FCC F-65.

Το δομικό στοιχείο που αφορά τον ανιχνευτή περιλαμβάνει τον φερριτικό πυρήνα, ο οποίος προσομοιώνεται είτε ως συμπαγές σώμα κυλινδρικής είτε παραλληλεπίπεδης μορφής, ώστε να εξεταστούν εναλλακτικές γεωμετρικές εκδοχές. Στο εσωτερικό του πυρήνα τοποθετείται το εσωτερικό τύλιγμα, το οποίο αναπαριστά το δευτερεύον πηνίο του ανιχνευτή και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ηλεκτρομαγνητική σύζευξη. Η διάταξη περιβάλλεται από εξωτερικό μεταλλικό περίβλημα, το οποίο παρέχει ηλεκτρομαγνητική θωράκιση και καθορίζει τα όρια της περιοχής ανάλυσης.

Επιπλέον, ορίστηκε η θύρα διέγερσης, μέσω της οποίας εφαρμόζεται η παλμική διέγερση που προσομοιώνει τις συνθήκες μέτρησης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η πλήρης οπτική απεικόνιση όλων των ανωτέρω δομικών στοιχείων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.31, όπου αποτυπώνεται λεπτομερώς η συνολική γεωμετρία του ανιχνευτή, όπως αυτή σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του CST Studio Suite.



Σχήμα 2.31: Δομικά στοιχεία του μοντέλου προσομοίωσης του ανιχνευτή FCC F-65 στο CST Studio Suite

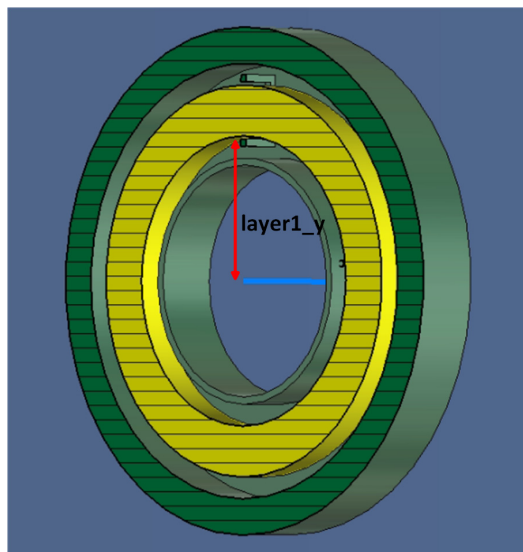
2.3.3.2. Ορισμός Παραμέτρων και Μεταβλητών

Η ευελιξία του αναπτυγμένου μοντέλου επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής παραμετρικά ελεγχόμενων μεταβλητών, οι οποίες σχετίζονται τόσο με τη γεωμετρία του ανιχνευτή όσο και με τα ηλεκτρικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά του. Οι σημαντικότερες από αυτές περιλαμβάνουν:

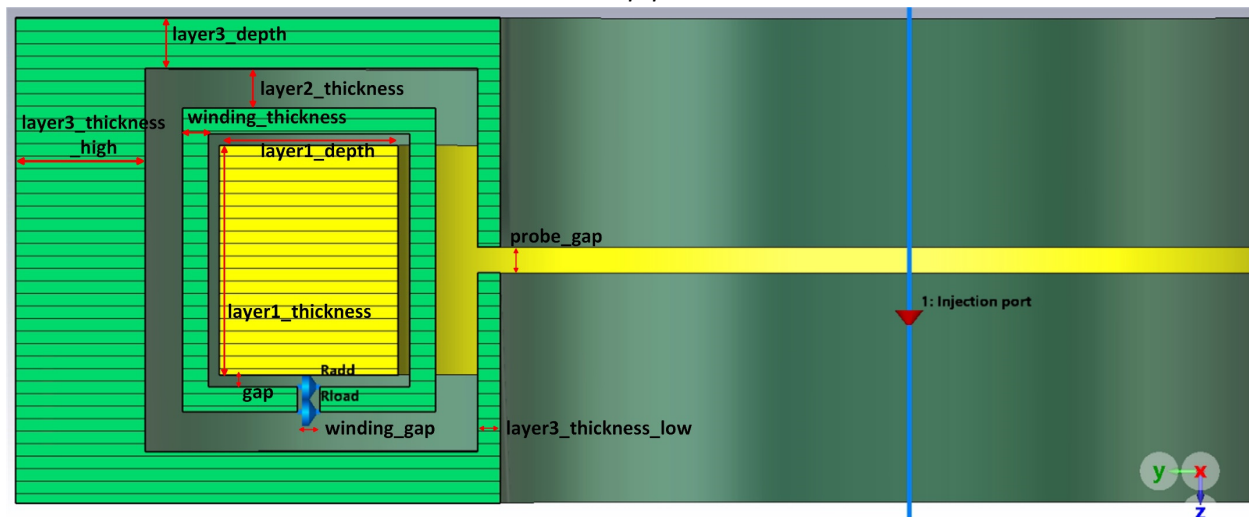
- *gap*: το διάκενο μεταξύ του φερρίτη και του εσωτερικού τυλίγματος,
- *winding gap*: την απόσταση μεταξύ των δύο άκρων του εσωτερικού τυλίγματος,
- *winding thickness*: το πάχος του τυλίγματος,

- μ_{static} και $dispersion_time$: παραμέτρους που καθορίζουν τη μαγνητική διαπερατότητα του φερρίτη και τη φασματική του διασπορά,
- R_{load} : την τερματική αντίσταση στην έξοδο του μοντέλου,
- R_{add} : πρόσθετη παράλληλη αντίσταση, η οποία επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του μοντέλου, ιδίως στις χαμηλές συχνότητες.

Οι συγκεκριμένες παράμετροι καθορίζουν κρίσιμα τόσο το πλάτος όσο και το φασματικό περιεχόμενο της απόκρισης του ανιχνευτή, επηρεάζοντας τη συνολική ακρίβεια της προσομοίωσης. Η οπτική αναπαράσταση των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.32, όπου παρουσιάζεται μία τομή του ανιχνευτή και αποτυπώνεται η θέση των μεταβλητών gap , $winding\ gap$ και $winding\ thickness$ εντός του μοντέλου, παρέχοντας σαφή εικόνα της γεωμετρικής τους σημασίας και της επίδρασής τους στη συμπεριφορά του ανιχνευτή.



Τομή



Τομή 2

Σχήμα 2.32: Τομή και απεικόνιση των παραμέτρων του μοντέλου του ανιχνευτή FCC F-65 στο CST Studio Suite

Η αριθμητική δήλωση των παραμέτρων και η παραμετρική διαχείρισή τους γίνεται μέσω του παραθύρου “Parameter List” του CST Studio. Εκεί καθορίζονται οι αρχικές τιμές, τα όρια μεταβολής και οι σχέσεις μεταξύ παραμέτρων. Ο Πίνακας 2.7 παρουσιάζει τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης από τις οποίες ένας αριθμός παραμέτρων είναι προκαθορισμένος (βάσει μετρήσιμων χαρακτηριστικών του ανιχνευτή) και ένας αριθμός τίθεται υπό διερεύνηση:

Πίνακας 2.7: Προκαθορισμένοι και υπό διερεύνηση παράμετροι του μοντέλου

Προκαθορισμένες παράμετροι	Τιμή	Υπό διερεύνηση παράμετροι
layer1_depth	9 mm	
layer1_length	100,4 mm	
layer1_thickness	7 mm	gap
layer1_y	20 mm	winding_gap
layer2_thickness	3 mm	winding_thickness
layer3_depth	2 mm	dispersion_time
layer3_thickness_high	5 mm	Mu_static
layer3_thickness_low	1 mm	Radd
probe_gap	1 mm	
Rload	50 Ω	

2.3.3.3. Αποτελέσματα παραμετρικής σάρωσης

Το μοντέλο κατασκευάστηκε με γνώμονα τη δυνατότητα αυτόματης τροποποίησης των παραμέτρων, προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας. Μέσω της λειτουργίας “Parameter Sweep” που παρέχεται από το περιβάλλον του CST Studio, είναι δυνατή η εκτέλεση πλήρων παραμετρικών σαρώσεων για κάθε μεταβλητή, επιτρέποντας την εκτίμηση της ευαισθησίας της απόκρισης του μοντέλου ως προς αυτές τις παραμέτρους.

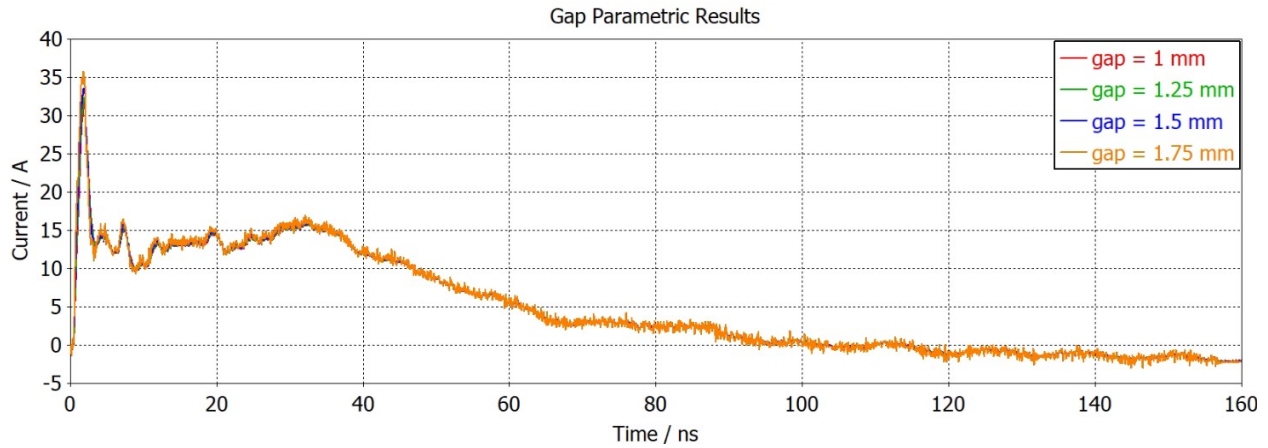
Η δυνατότητα αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα κρίσιμη στη διαδικασία επαλήθευσης και ρύθμισης του μοντέλου, καθώς παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης της προσομοιωμένης κυματομορφής με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, αξιολογώντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία της μοντελοποίησης. Τα αποτελέσματα της εν λόγω σύγκρισης παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα και περιλαμβάνουν μόνο τις παραμέτρους που εμφάνισαν τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα και επίδραση στην κυματομορφή της μετρούμενης τάσης/ρεύματος με έμφαση στο δεύτερο σκέλος (δεύτερη αιχμή) της κυματομορφής. Αναλυτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην [92].

Διερεύνηση της παραμέτρου «gap» (διάκενο μεταξύ εσωτερικού τυλίγματος και φερρίτη)

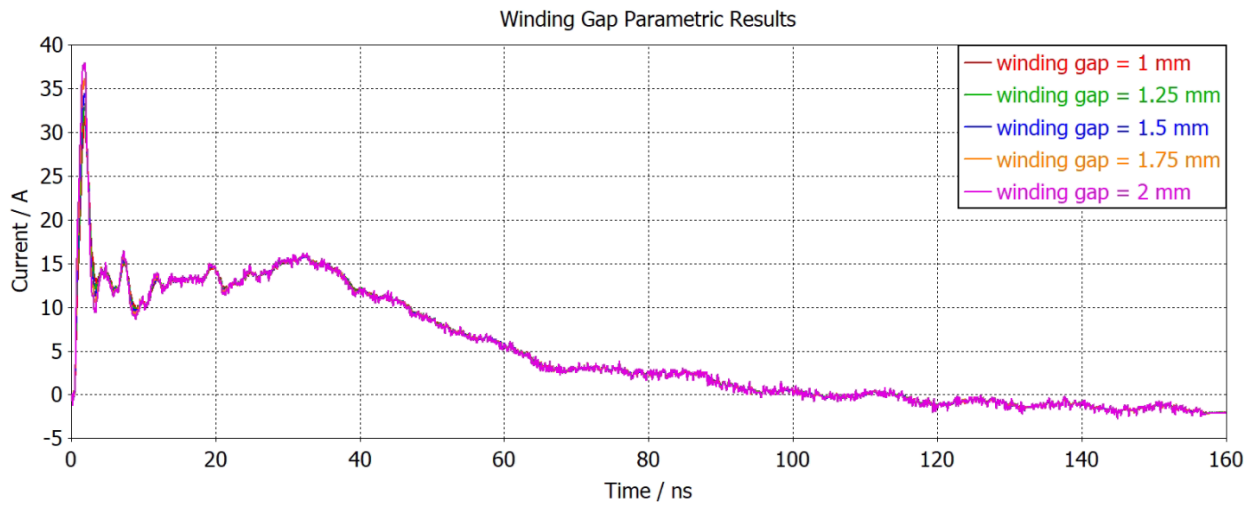
Στο Σχήμα 2.33 παρουσιάζονται τα παραμετρικά αποτελέσματα για τιμές της παραμέτρου gap στο εύρος 1 mm < gap < 2 mm. Οι μεταβολές της κυματομορφής παρατηρούνται μικρές, χωρίς ωστόσο να θεωρούνται πλήρως αμελητέες. Παρατηρείται ότι η αύξηση των τιμών της παραμέτρου οδηγεί σε ελαφρά αύξηση της μέγιστης τιμής του ρεύματος της πρώτης αιχμής, χωρίς να επηρεάζει ουσιαστικά τη μορφή του υπόλοιπου παλμού, πέραν της εμφάνισης αμελητέου θορύβου. Η παρατήρηση αυτή καταδεικνύει ότι η μέγιστη τιμή της πρώτης αιχμής μπορεί να ελεγχθεί, σε περιορισμένο βαθμό, μέσω μικρών μεταβολών της συγκεκριμένης παραμέτρου.

Διερεύνηση των παραμέτρων του διακένου «winding gap» και του πάχους «winding thickness» του εσωτερικού τυλίγματος του ανιχνευτή

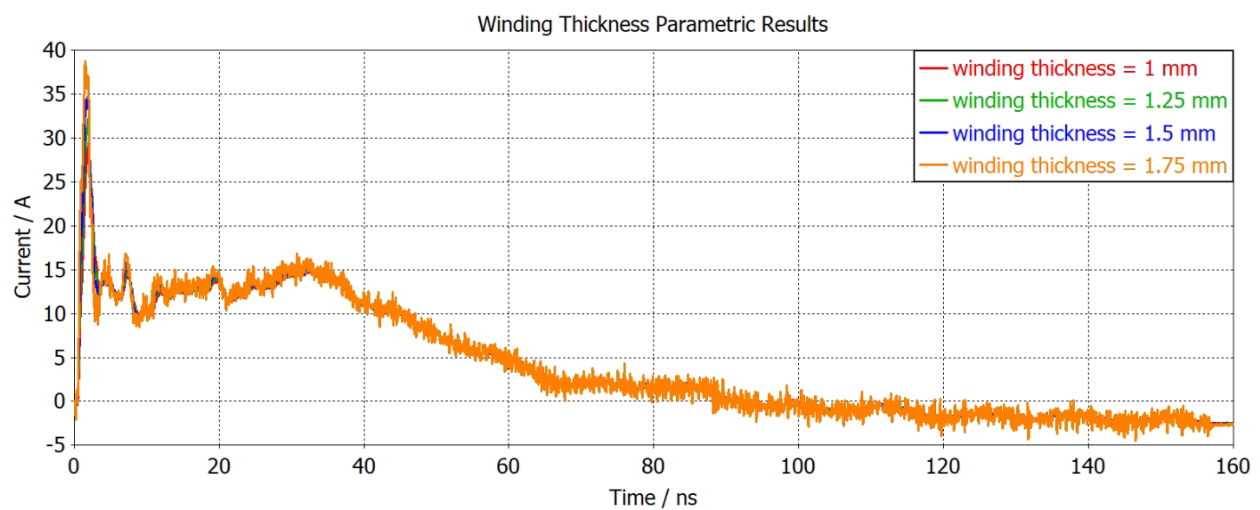
Στο Σχήμα 2.34 παρουσιάζονται τα παραμετρικά αποτελέσματα για τιμές 1 mm – 2 mm του διακένου του εσωτερικού τυλίγματος (Σχήμα 2.34a) και για τιμές 1 mm – 1.75 mm του πάχους του (Σχήμα 2.34b).



Σχήμα 2.33: Παραμετρικά αποτελέσματα για την παράμετρο gap η οποία αναφέρεται στο διάκενο μεταξύ εσωτερικού τυλίγματος και φερρίτη



(a)



(b)

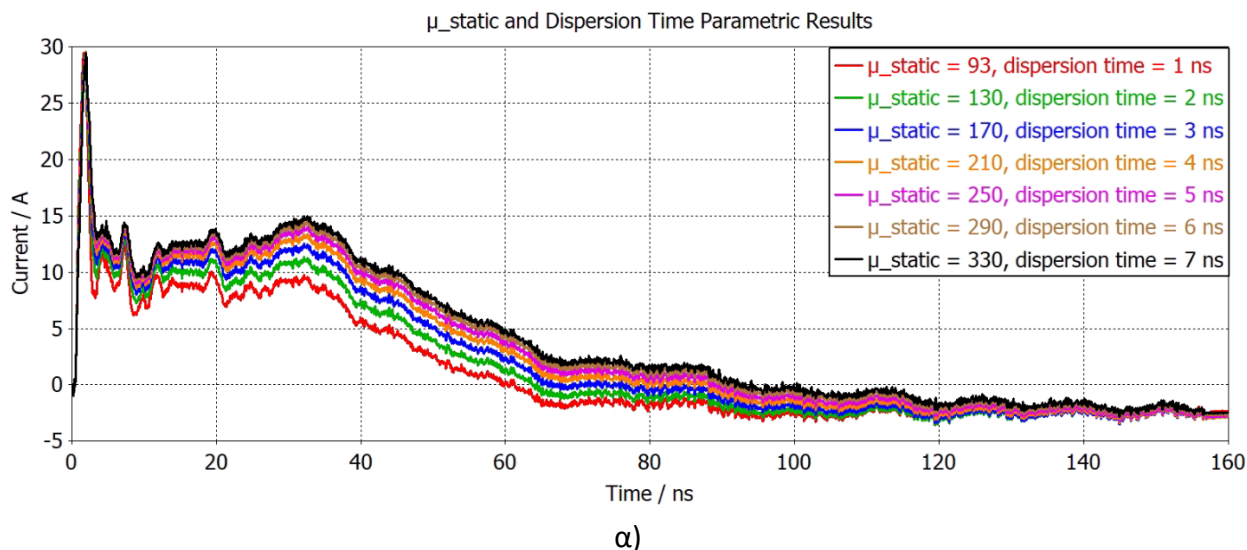
Σχήμα 2.34: Παραμετρικά αποτελέσματα για (a) $1 \leq \text{winding_gap} \leq 2$ και (b) $1 \leq \text{winding_thickness} \leq 1.75$

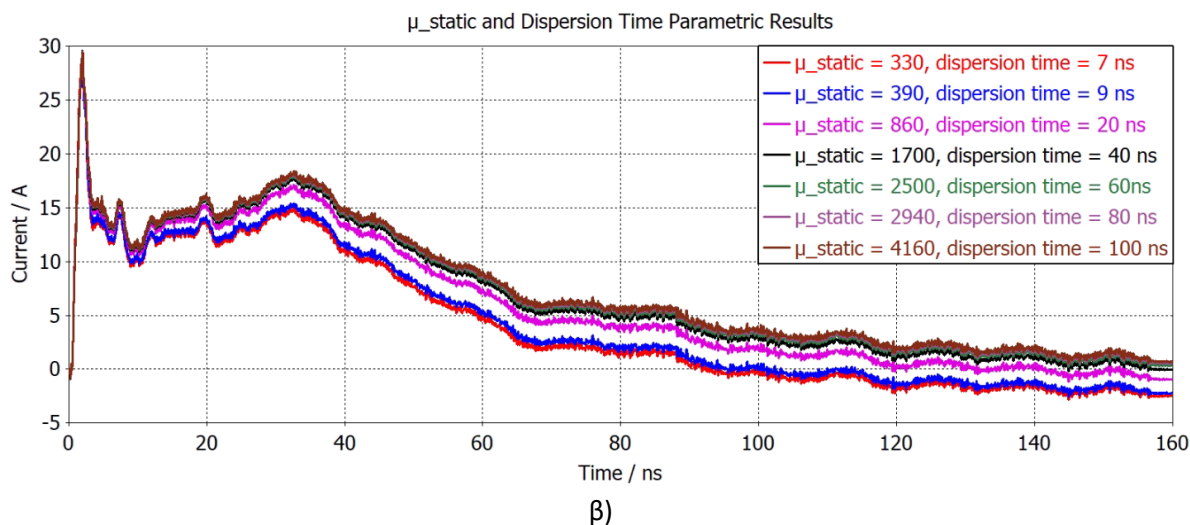
Από τη διερεύνηση της παραμέτρου «winding_gap» στο εύρος 1 mm έως 2 mm, προκύπτει ότι η μεταβολή της ασκεί σημαντική επίδραση στη μέγιστη τιμή του ρεύματος της πρώτης αιχμής (I_p) της κυματομορφής εξόδου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση ή μείωση της αιχμής ανάλογα με την τιμή του διακένου, γεγονός που καθιστά την παράμετρο αυτή ιδιαίτερα κρίσιμη για τη ρύθμιση της απόκρισης του ανιχνευτή. Παρόλο που το κύριο μέρος της κυματομορφής παραμένει σε γενικές γραμμές σταθερό και απαλλαγμένο από αυξημένο θόρυβο, ένα αξιοσημείωτο φαινόμενο εντοπίζεται αμέσως μετά το πέρας της πρώτης κορυφής, όπου εμφανίζεται μία αιφνίδια βύθιση της τιμής του ρεύματος. Η ένταση της βύθισης αυτής αυξάνεται με την αύξηση του «winding_gap», υποδηλώνοντας ότι η παράμετρος δεν επηρεάζει μόνο το ύψος της κορυφής αλλά και τη μορφή της κυματομορφής στη μεταβατική περιοχή που ακολουθεί.

Σε ό,τι αφορά τη διερεύνηση του πάχους του εσωτερικού τυλίγματος (winding_thickness) στο διάστημα 1 mm έως 1,75 mm, παρατηρείται επίσης επίδραση στη μέγιστη τιμή του ρεύματος, ωστόσο η αύξηση του πάχους συνοδεύεται από έντονο θόρυβο σε ολόκληρη την κυματομορφή. Το γεγονός αυτό καθιστά τη μεταβολή του «winding_thickness» λιγότερο επιθυμητή ως μέσο βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι μπορεί να προκαλέσει γενικευμένη αποσταθεροποίηση της απόκρισης του ανιχνευτή. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο η τιμή του winding_thickness να παραμείνει σταθερή στην αρχικά ορισμένη τιμή του 1 mm, καθώς παρόμοια ρύθμιση της πρώτης αιχμής μπορεί να επιτευχθεί πιο ελεγχόμενα μέσω άλλων παραμέτρων, όπως το gap ή το winding_gap.

Διερεύνηση των παραμέτρων της στατικής μαγνητικής διαπερατότητας « μ_{static} » και του χρόνου διασποράς «dispersion time»

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης διερευνώνται οι παράμετροι που σχετίζονται με τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του φερρίτη, δηλαδή η στατική μαγνητική διαπερατότητα (μ_{static}) και ο χρόνος διασποράς (dispersion_time). Οι δύο αυτές παράμετροι εμφανίζουν μεταξύ τους αλληλεξάρτηση, η οποία συχνά είναι πολύπλοκη και μη γραμμική. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόστηκε μία συστηματική μεθοδολογία, με στόχο την αποτύπωση της συσχέτισής τους και της επίδρασής τους στη συμπεριφορά του ανιχνευτή.





Σχήμα 2.35: Παραμετρικά αποτελέσματα για διαφορετικούς συνδυασμούς των τιμών των παραμέτρων της στατικής μαγνητικής διαπερατότητας (α) και του χρόνου διασποράς (β)

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διερεύνηση των παραμέτρων της στατικής μαγνητικής διαπερατότητας και του χρόνου διασποράς, καθίσταται σαφές ότι η πρώτη ασκεί καθοριστική επίδραση στην ενίσχυση ολόκληρης της κυματομορφής εξόδου, χωρίς ωστόσο η επίδραση αυτή να είναι γραμμική. Παρατηρείται ότι, καθώς η τιμή της στατικής μαγνητικής διαπερατότητας αυξάνεται, ενισχύεται τόσο το πλάτος όσο και η συνολική ενέργεια της κυματομορφής, έως το σημείο όπου, για χρόνους διασποράς μεγαλύτερους από 10 ns και για στατική μαγνητική διαπερατότητα άνω των 450, αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο κορεσμού, πέραν του οποίου περαιτέρω αύξηση δεν αποφέρει αντίστοιχη βελτίωση στην απόκριση. Επιπλέον, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν μία σαφή αλληλεξάρτηση μεταξύ των δύο παραμέτρων. Συγκεκριμένα, μικροί χρόνοι διασποράς συσχετίζονται με χαμηλές τιμές στατικής μαγνητικής διαπερατότητας, ενώ υψηλότερες τιμές του πρώτου απαιτούν αντίστοιχα υψηλότερες τιμές της δεύτερης, προκειμένου να διατηρηθούν οι τιμές της παραμέτρου I_p στην πρώτη αιχμή της κυματομορφής. Το εύρημα αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι ο χρόνος διασποράς εκφράζει την ταχύτητα απόκρισης του μαγνητικού υλικού· όσο μικρότερος είναι, τόσο ταχύτερη η απόκριση του φερρίτη και, συνεπώς, απαιτείται μικρότερη στατική μαγνητική διαπερατότητα για την επίτευξη της επιθυμητής αιχμής στην κυματομορφή, και αντιστρόφως.

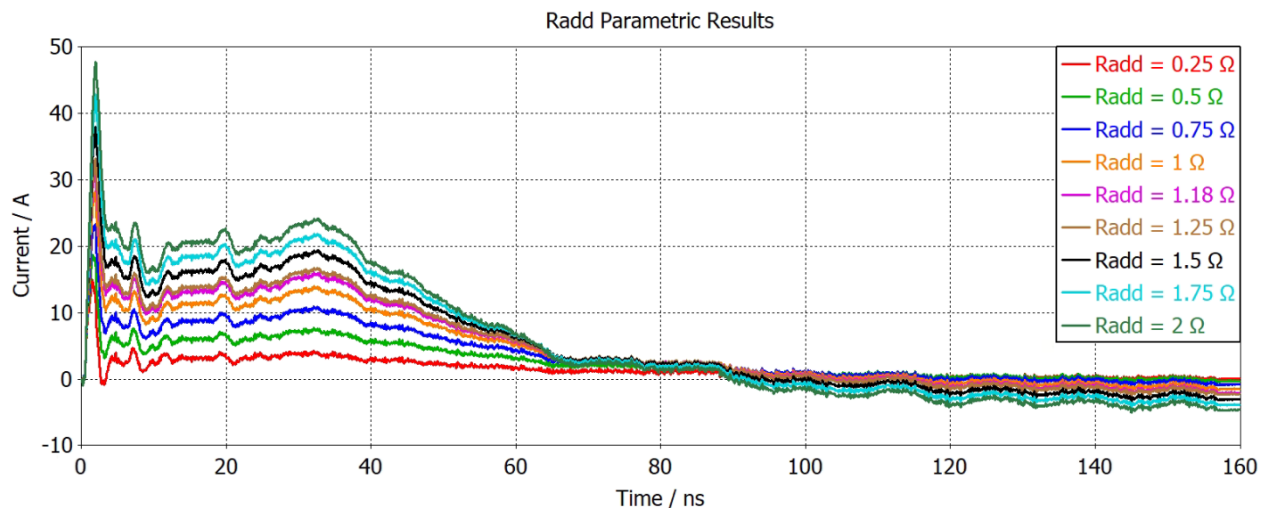
Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η διερεύνηση ανέδειξε πως ο χρόνος διασποράς πρέπει να κυμαίνεται εντός του διαστήματος 1 ns έως 100 ns, προκειμένου η προσομοίωση να παραμένει αξιόπιστη. Για τιμές μικρότερες από 1 ns, η κυματομορφή εμφανίζει έντονα φαινόμενα ταλαντώσεων, τα οποία δεν εξομαλύνονται ακόμη και με χαμηλότερες τιμές στατικής μαγνητικής διαπερατότητας. Αντίθετα, για χρόνους διασποράς άνω των 100 ns, το μοντέλο αδυνατεί να αποδώσει ικανοποιητικά την απόκριση στις υψηλές συχνότητες του ρεύματος, ακόμη και με αυξημένες τιμές στατικής μαγνητικής διαπερατότητας.

Σημαντικότερο εύρημα των δοκιμών αποτελεί η διαπίστωση ότι δεν υφίστανται πολλαπλοί συνδυασμοί τιμών των δύο παραμέτρων που να οδηγούν στο ίδιο ακριβές αποτέλεσμα. Για διαφορετικούς συνδυασμούς παρατηρείται αδυναμία επίτευξης ακριβούς αναπαραγωγής της πρώτης αιχμής της κυματομορφής, χωρίς ταυτόχρονη μετατόπιση της υπόλοιπης κυματομορφής είτε προς θετικές είτε προς αρνητικές τιμές. Συνεπώς, ο επιδιωκόμενος συνδυασμός τιμών των παραμέτρων πρέπει να είναι μοναδικός, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια στην προσομοίωση.

Διερεύνηση της παραμέτρου της αντίστασης μοντελοποίησης της μη γραμμικής απόκρισης χαμηλών συχνοτήτων « R_{add} »

Ολοκληρώνοντας τη διερεύνηση και στοχεύοντας στην αναγνώριση μοτίβων που αναδεικνύονται από τις προσομοιώσεις, εξετάστηκε η επίδραση της παραμέτρου R_{add} , για την οποία δεν υφίσταται περιορισμός ως προς το εύρος των τιμών της.

Η χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου αποσκοπεί στη μοντελοποίηση της μη γραμμικής απόκρισης του ανιχνευτή στις χαμηλές συχνότητες, φαινόμενο που παρατηρείται στον πραγματικό ανιχνευτή ρεύματος F-65. Από την ανάλυση (Σχήμα 2.36) προκύπτει ότι η R_{add} επηρεάζει αναλογικά το ύψος ολόκληρης της κυματομορφής, χωρίς να επιφέρει ουσιαστική μεταβολή στη μορφή της. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς υποδηλώνει ότι η παράμετρος δρα περισσότερο ως συντελεστής κλίμακας (scaling factor) παρά ως παράμετρος που αλλοιώνει τη δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου. Συνεπώς, αρκεί να προσδιοριστεί η τιμή της R_{add} η οποία εξασφαλίζει τον κατάλληλο λόγο απόκρισης, ώστε η ρύθμιση αυτή να διατηρείται σταθερή για κάθε πιθανή είσοδο ρεύματος, χωρίς να απαιτούνται περαιτέρω προσαρμογές. Μετά από σειρά δοκιμών, η τιμή που επελέγη ως τελική και η οποία προσφέρει τη βέλτιστη αντιστοιχία με τα πειραματικά δεδομένα, καθορίστηκε σε $R_{add} = 1,18 \Omega$.

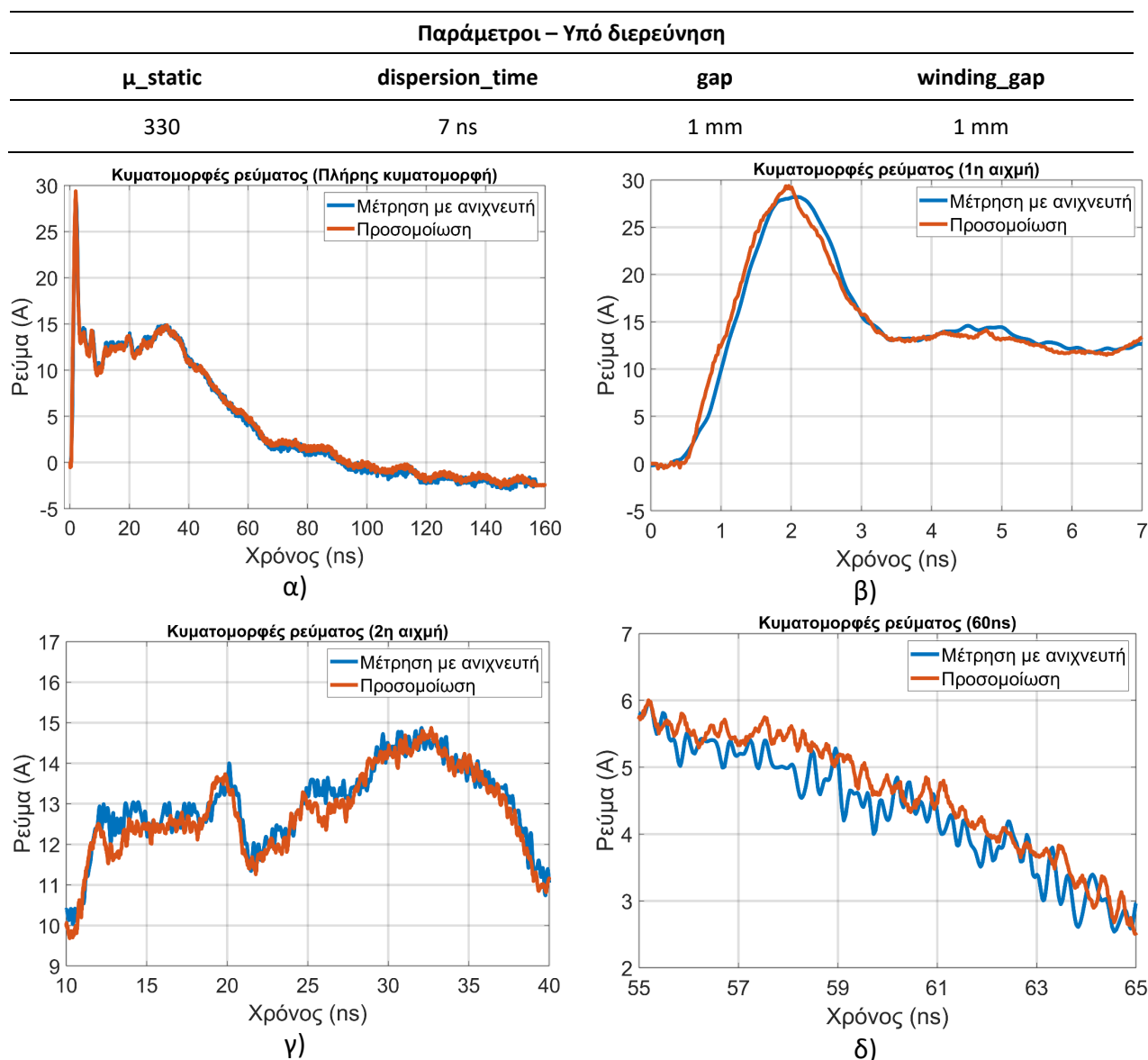


Σχήμα 2.36: Παραμετρικά αποτελέσματα για την αντίσταση R_{add}

2.3.3.4. Αρχική εκτίμηση των τιμών των υπό διερεύνηση παραμέτρων

Η αρχική διαδικασία προσδιορισμού των υπό διερεύνηση παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για συνθήκες εισόδου ρεύματος, όπου η κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης προερχόταν αποκλειστικά από τη γεννήτρια Teseq NSG 438 σε επίπεδο τάσης +8 kV. Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων του μοντέλου στη μετρούμενη κυματομορφή, όπως αυτές αναδείχθηκαν από τη διαδικασία προσομοίωσης, καθορίστηκε ένα αρχικό σύνολο τιμών που κρίθηκε οπτικά καταλληλότερο για τις συγκεκριμένες παραμέτρους. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για την αρχική αυτή εκτίμηση παρατίθενται στον Πίνακα 2.8, ενώ στο Σχήμα 2.37 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της προσομοίωσης και των πειραματικών μετρήσεων για τη συγκεκριμένη γεννήτρια, σύμφωνα με την αρχική αυτή εκτίμηση τιμών.

Πίνακας 2.8: Τιμές υπό διερεύνηση παραμέτρων (1^η Δοκιμή - Αρχική εκτίμηση)



Σχήμα 2.37: Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με χρήση των τιμών των (υπό διερεύνηση) παραμέτρων του Πίνακα 2.8 (NSG 438 – 8kV) με τις πειραματικές μετρήσεις: α) συνολική κυματομορφή, β) πρώτη αιχμή, γ) δεύτερη αιχμή και δ) διάστημα 55 ns - 65 ns

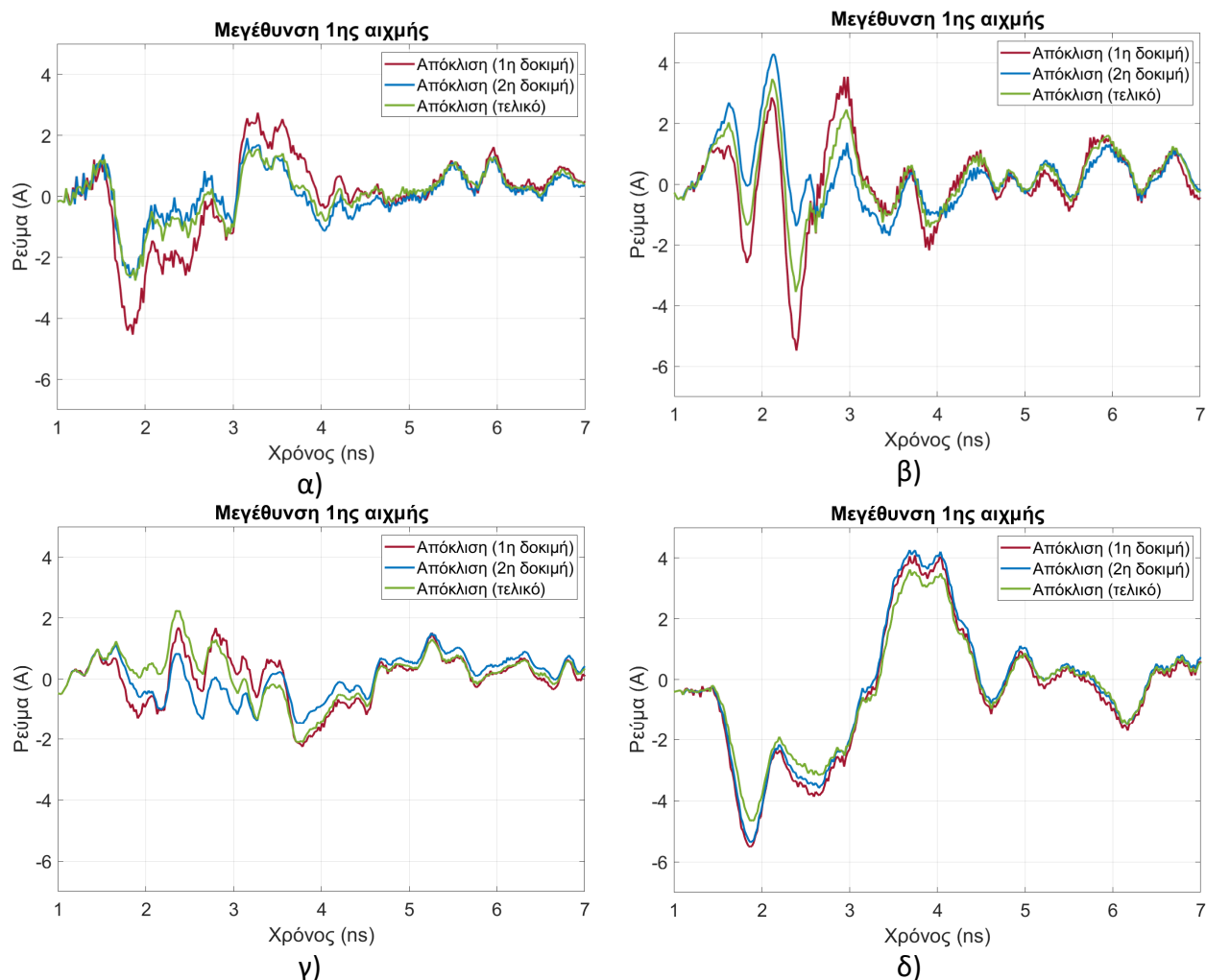
2.3.3.5. Διερεύνηση των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου για 4 γεννήτριες ESD

Στη συνέχεια, και με βάση τις τιμές των παραμέτρων της αρχικής εκτίμησης (Πίνακας 2.8), εξετάστηκε η επάρκεια του μοντέλου και για τρεις ακόμη διαφορετικές εισόδους ρεύματος, προερχόμενες από γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, συγκεκριμένα από τις Schaffner NSG 433, EMC Partner Transient 3000 και EM Test Dito, όλες σε επίπεδο τάσης +8 kV. Οι κυματομορφές αυτές αντιστοιχούν σε πραγματικές κυματομορφές εκφόρτισης, όπως παράγονται από τις αντίστοιχες γεννήτριες, επιτρέποντας τη διερεύνηση της γενικευσιμότητας του μοντέλου και την αξιολόγηση της ικανότητάς του να αποδίδει με ακρίβεια διαφορετικά σενάρια δοκιμών.

Τα σχετικά αποτελέσματα, που παρουσιάζονται αναλυτικά στην [92], καταδεικνύουν αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τις πειραματικές μετρήσεις και οδήγησαν στο επόμενο στάδιο της διερεύνησης (2^η Δοκιμή), κατά το οποίο για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ανευρεθήκαν οι ιδανικότερες, μετά από οπτική επαλήθευση, τιμές (Πίνακας 2.9).

Πίνακας 2.9: Παράμετροι μοντέλου για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (2^η Δοκιμή)

Γεννήτρια	μ_{static}	dispersion_time	gap	winding_gap
	-	[ns]	[mm]	[mm]
Teseq NSG 438	330	6	0,85	0,75
Schaffner NSG 433	330	5	0,5	0,6
EMC Partner Transient 3000	330	5,3	0,2	1
EM Test Dito	330	6,5	0,25	1,2
Μέσος όρος (Τελική λύση)	330	5,7	0,45	0,8875



Σχήμα 2.38: Απόκλιση κάθε σταδίου διερεύνησης στο χρονικό εύρος 0 ns – 7 ns για τις γεννήτριες: α) Teseq NSG 438, β) Schaffner NSG 433, γ) EMC Partner Transient 300 και δ) EM Test Dito

Για τη σύγκριση και τον οπτικό έλεγχο της ακρίβειας του μοντέλου, δημιουργήθηκε διαδικασία η οποία επιτρέπει την απεικόνιση, στο ίδιο γράφημα, των αποκλίσεων (deviation) για κάθε δοκιμή. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε διαφορετική είσοδο ρεύματος (γεννήτρια), ώστε να

αξιολογηθεί η συνολική συμπεριφορά του μοντέλου (Σχήμα 2.38). Δεδομένου ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται στην περιοχή γύρω από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος της πρώτης κορυφής, για όλα τα γραφήματα επελέγη η ίδια χρονική διάρκεια από 0 ns έως 7 ns, ώστε να εστιάζει η αξιολόγηση στην κρίσιμη αυτή περιοχή της κυματομορφής. Στον Πίνακα 2.9 έχει προστεθεί ο μέσος όρος των τιμών για κάθε παράμετρο, ο οποίος αποτελεί και τον τελικό συνδυασμό, ο οποίος θα συνοδεύει το μοντέλο και θα αποτελεί μια γενικευμένη λύση ικανοποιητικής προσομοιωτικής προσέγγισης του ανιχνευτή F-65.

2.3.3.6. Ποσοτικοποίηση της τελικής ακρίβειας του μοντέλου

Για την εκτίμηση της ακρίβειας του ανεπτυγμένου μοντέλου, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των κυματομορφών που προέκυψαν από μετρήσεις (Clamp Measurement) και εκείνων που προέκυψαν από προσομοιώσεις (Simulation) για τιμές των παραμέτρων του μοντέλου σύμφωνα με την προτεινόμενη τελική λύση (μέσος όρος). Η αξιολόγηση βασίζεται στις χαρακτηριστικές παραμέτρους της κυματομορφής, όπως ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 (2008), ήτοι: I_p , t_r , I_{30} και I_{60} . Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες (Πίνακας 2.10 – Πίνακας 2.13) που περιλαμβάνουν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για τον σκοπό αυτό για τις τέσσερις υπό εξέταση γεννήτριες.

Πίνακας 2.10: Ποσοτική σύγκριση του τελικού αποτελέσματος προσομοίωσης (τελική λύση) με τις πειραματικές μετρήσεις για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 σε επίπεδο τάσης +8kV

Κυματομορφή	Teseq NSG 438 /+8kV			
	I_p	t_r	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]
Μέτρηση	28,20	0,99	14,77	4,46
Προσομοίωση	29,37	1,01	14,00	4,51
Ποσοστιαία Απόκλιση	-4,15%	-2,02%	5,21%	-1,12%

Πίνακας 2.11: Ποσοτική σύγκριση του τελικού αποτελέσματος προσομοίωσης (τελική λύση) με τις πειραματικές μετρήσεις για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 σε επίπεδο τάσης +8kV

Κυματομορφή	Schaffner NSG 433/+8kV			
	I_p	t_r	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]
Μέτρηση	29,03	0,82	14,45	5,51
Προσομοίωση	30,09	0,78	14,29	5,44
Ποσοστιαία Απόκλιση	-3,65%	4,88%	1,11%	1,27%

Πίνακας 2.12: Ποσοτική σύγκριση του τελικού αποτελέσματος προσομοίωσης (τελική λύση) με τις πειραματικές μετρήσεις για τη γεννήτρια EMC Partner Transient 3000 σε επίπεδο τάσης +8kV

Κυματομορφή	EMC Partner Transient 3000 /+8kV			
	I_p	t_r	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]
Μέτρηση	31,64	0,85	11,67	4,09
Προσομοίωση	30,55	0,82	11,70	4,30
Ποσοστιαία Απόκλιση	3,45%	3,53%	-0,26%	-5,13%

Πίνακας 2.13: Ποσοτική σύγκριση του τελικού αποτελέσματος προσομοίωσης (τελική λύση) με τις πειραματικές μετρήσεις για τη γεννήτρια EM Test Dito σε επίπεδο τάσης +8kV

Κυματομορφή	EM Test Dito /+8kV			
	I_p	t_r	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]
Μέτρηση	27,28	1,20	13,06	7,80
Προσομοίωση	28,05	1,20	12,35	7,38
Ποσοστιαία Απόκλιση	-2,82%	0,00%	5,44%	5,38 %

2.3.3.7. Συμβολή της συγκεκριμένης ενότητας

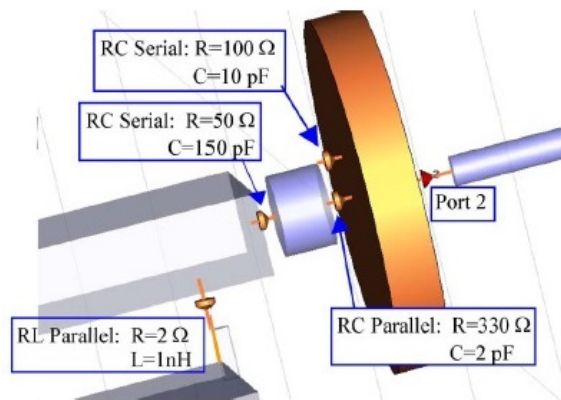
Συνεπώς, από τις ανωτέρω ποσοστιαίες αποκλίσεις μπορεί να συναχθεί η εκτίμηση ότι το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζει, στη δυσμενέστερη περίπτωση, απόκλιση της τάξεως του 5,44 %. Η ποσοτική αυτή εκτίμηση, αν και δεν αποτυπώνει την απόλυτη ακρίβεια του μοντέλου, επιβεβαιώνει τόσο αριθμητικά όσο και οπτικά ότι η αναπτυχθείσα προσομοίωση επιτυγχάνει μία ιδιαίτερα ικανοποιητική και αξιόπιστη προσέγγιση της μετρητικής συμπεριφοράς του ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65.

Η σημαντική συμβολή της παρούσας εργασίας έγκειται στο ότι για πρώτη φορά αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό εργαλείο, ικανό να περιγράψει με υψηλή ακρίβεια την ηλεκτρομαγνητική απόκριση του ανιχνευτή και να καταστήσει δυνατή τη διερεύνηση κρίσιμων φαινομένων, όπως το φαινόμενο φόρτωσης. Το εργαλείο αυτό ενισχύει τη μεθοδολογία αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, προσφέροντας τη δυνατότητα ανάλυσης και ποσοτικοποίησης των περιορισμών που επιβάλλουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, και συμβάλλει καθοριστικά στη βελτίωση της ακρίβειας και αξιοπιστίας των μετρήσεων σε δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

2.4. Προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito

Η προσομοίωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την κατανόηση και τον ακριβή έλεγχο των μεταβατικών φαινομένων που εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια δοκιμών ατρωσίας ηλεκτρονικών συστημάτων. Η φύση των παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με εξαιρετικά απότομες μεταβολές ρεύματος και υψίσυχνες συνιστώσες, δημιουργεί σοβαρές προκλήσεις τόσο για τη σχεδίαση προστατευτικών διατάξεων όσο και για τη διασφάλιση της επαναληψιμότητας/αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Μέσω κυκλωματικών και αριθμητικών μοντέλων, καθίσταται δυνατή η αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεννητριών, η διερεύνηση παρασιτικών φαινομένων και η αξιολόγηση της επίδρασης παραμέτρων, όπως η γεωμετρία και η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των δοκιμών.

Η παρούσα εργασία επεκτείνει τις υφιστάμενες προσεγγίσεις, καθώς υλοποιείται μία πλήρους κυματικής (Full-Wave) ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση της εμπορικής γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EM Test Dito, με στόχο την όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαραγωγή της μετρούμενης κυματομορφής εξόδου. Παράλληλα, πραγματοποιείται συστηματική διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου, με ιδιαίτερη έμφαση στο φαινόμενο των ταλαντώσεων, το οποίο εμφανίζεται στην αρχική περιοχή του παλμού.



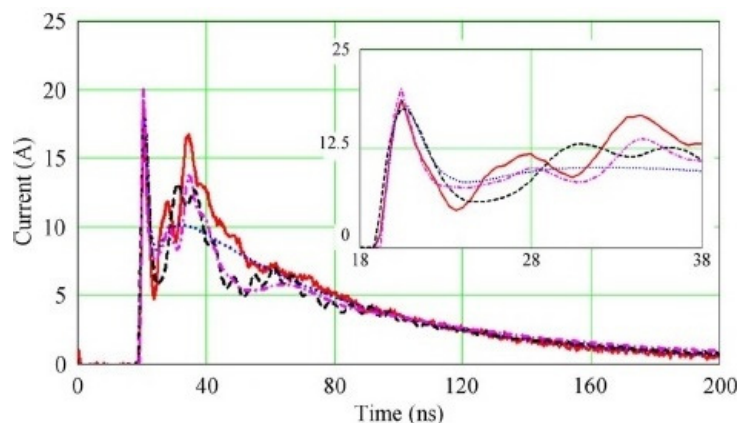
Σχήμα 2.40: Στοιχεία κυκλώματος για την αναπαραγωγή της φυσικής μορφής μιας γεννήτριας ESD και του προτεινόμενου ρεύματος εκφόρτισης αναφοράς [93]

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται σε τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση, η οποία υλοποιείται με το εμπορικό λογισμικό CST Microwave Studio (MWS) και αξιοποιεί την τεχνική της πεπερασμένης ολοκλήρωσης (Finite Integration Technique – FIT). Στο Σχήμα 2.40 παρουσιάζονται τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος που ενσωματώνονται στο αριθμητικό μοντέλο, περιλαμβάνοντας μεταλλικά και διηλεκτρικά μέρη, καθώς και ενεργά κυκλωματικά στοιχεία.

Η διέγερση του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω ιδανικής πηγής ρεύματος, με χαρακτηριστική αντίσταση $25\ \Omega$ και χρόνο ανόδου $1\ \text{ns}$, προσομοιώνοντας τη διαδικασία φόρτισης, μεταγωγής και εκφόρτισης που παρατηρείται στις πραγματικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η αξιολόγηση της ακρίβειας των μοντέλων πραγματοποιείται μέσω συγκριτικής ανάλυσης των μετρούμενων κυματομορφών εκφόρτισης με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στο Σχήμα 2.41 παρουσιάζεται η σύγκριση της μετρούμενης κυματομορφής του ρεύματος στην άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας με τις κυματομορφές που προκύπτουν από το ισοδύναμο κύκλωμα SPICE και το μοντέλο MWS.

Διαπιστώνεται ότι τόσο το I_p όσο και το t_r προσομοιώνονται με υψηλή ακρίβεια, ενώ μικρές αποκλίσεις παρατηρούνται στη συμπεριφορά της κυματομορφής μετά την πρώτη αιχμή. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται κυρίως σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καλωδίου γείωσης και στη χωρητική σύζευξη με το περιβάλλον, τα οποία επηρεάζουν το φαινόμενο ταλαντώσεων που εμφανίζεται στην περιοχή μετά την αρχική αιχμή του παλμού.



Σχήμα 2.41: Ρεύμα εκφόρτισης: μέτρηση (συνεχής γραμμή), Πρότυπο IEC (γραμμή με κουκίδες), ισοδύναμο κύκλωμα SPICE (διακεκομμένη γραμμή) και μοντέλο MWS (διακεκομμένη και κουκίδες γραμμή) [93]

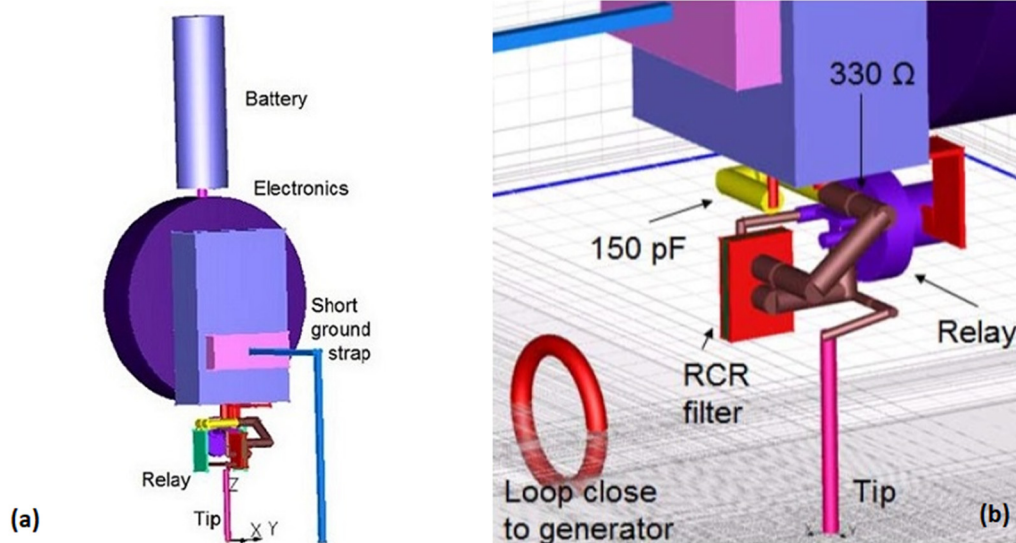
Η εργασία [93] καταλήγει στο συμπέρασμα ότι αμφότερες οι προσεγγίσεις —κυκλωματική και αριθμητική— προσφέρουν υψηλό βαθμό ακρίβειας, με το μοντέλο MWS να παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη προσαρμογή στις λεπτομέρειες της κυματομορφής εκφόρτισης. Οι αποκλίσεις περιορίζονται γενικά κάτω από 10 % στην περιοχή της πρώτης αιχμής, ενώ στη δεύτερη αιχμή φθάνουν έως και το 20 %. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη σημαντική συνεισφορά της ακριβούς προσομοίωσης στην ερμηνεία και αξιολόγηση της συμπεριφοράς εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε σχέση με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26].

2.4.1.2. Μοντέλο πλήρους κύματος γεννήτριας ESD για προσομοίωση σύζευξης σε επίπεδο συστήματος

Η δεύτερη εργασία, των Qing et al. [94], επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός πλήρους κύματος αριθμητικού μοντέλου για γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με σκοπό την ακριβέστερη προσομοίωση της σύζευξης του πεδίου που παρατηρείται σε πραγματικά συστήματα. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η σύζευξη πεδίου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την πρόβλεψη των soft errors τα οποία συχνά προκαλούνται από τις υψίσυχνες συνιστώσες των παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως σε συχνότητες που υπερβαίνουν το 1 GHz.

Κριτική ασκείται σε προγενέστερο μοντέλο της βιβλιογραφίας [95], το οποίο, αν και κατάλληλο για λογισμικά όπως το CST Microwave Studio και το FlowEMC (Microstrips), αδυνατεί να αναπαραστήσει την ταχεία κατάρρευση της τάσης που συμβαίνει στους διακόπτες υψηλής τάσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί διέγερση βηματικής συνάρτησης με χρόνο ανόδου περίπου 1 ns, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται στη φυσική πραγματικότητα, όπου οι διακόπτες υψηλής τάσης εμφανίζουν χρόνους ανόδου της τάξεως των 50–100 ps. Το αποτέλεσμα είναι η προσομοιωμένη κυματομορφή να εμφανίζεται αισθητά πιο «ομαλή» σε σύγκριση με τις μετρήσεις, περιορίζοντας την ικανότητα πρόβλεψης των υψίσυχνων φαινομένων που συνοδεύουν την εκφόρτιση.

Προς αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών, οι συγγραφείς [94] προτείνουν την ανάπτυξη λεπτομερούς πλήρους κύματος αριθμητικού μοντέλου, ικανού να προσομοιώσει τη σύζευξη του πεδίου έως και τουλάχιστον τα 2 GHz, χωρίς όμως να απαιτεί υπερβολικούς χρόνους υπολογισμού. Για την υλοποίηση της μελέτης χρησιμοποιείται το λογισμικό Microstrips, το οποίο προσφέρει υψηλή ανάλυση στη χωρική απεικόνιση των δομών και ικανοποιητική ακρίβεια στη συχνотική περιοχή ενδιαφέροντος. Στο Σχήμα 2.42(a) απεικονίζεται η συνολική γεωμετρική διαμόρφωση του προτεινόμενου μοντέλου της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η οποία περιλαμβάνει όλες τις κρίσιμες δομικές περιοχές, από τη θύρα εκφόρτισης έως το κύκλωμα παραγωγής παλμού. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.42(b) παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες των επιμέρους τμημάτων σχηματισμού παλμών, επιτρέποντας την ακριβή προσομοίωση των μηχανισμών που συνθέτουν την κυματομορφή εκφόρτισης.



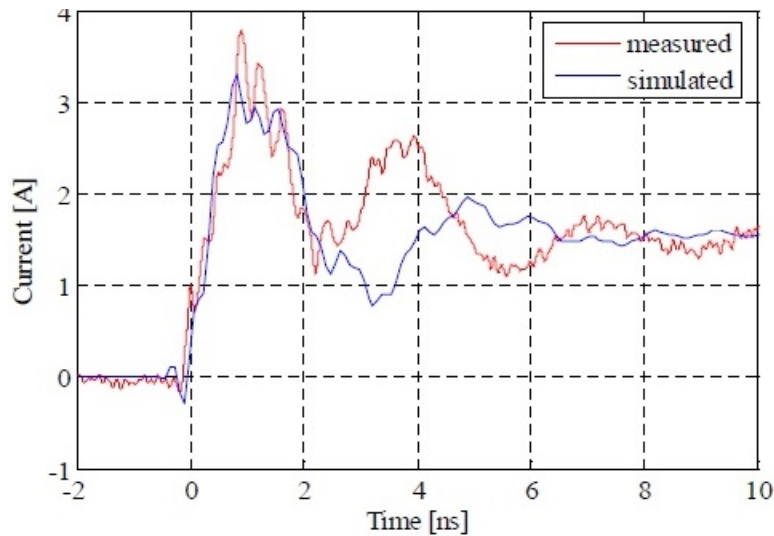
Σχήμα 2.42: Γεννήτρια ESD πλήρους κύματος (a) Ανασκόπηση μοντέλου γεννήτριας ESD πλήρους κύματος, (b) Λεπτομέρειες των τμημάτων σχηματισμού παλμών [94]

Το προτεινόμενο μοντέλο περιλαμβάνει:

- ... Πηγή τάσης, η οποία προσομοιώνεται με βηματική συνάρτηση τύπου Gauss, με χρόνο ανόδου περίπου 200 ps, προκειμένου να εξασφαλίζεται ομαλή άνοδος του παλμού και να αποδίδεται πιστά το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων της γεννήτριας.
- ... Φίλτρο βαθυπερατής διάταξης τύπου R–C–R, το οποίο καθορίζει τη συχνотική συμπεριφορά της γεννήτριας και επιδρά στον χρονισμό της εκφόρτισης.
- ... Στοιχεία RC, τα οποία υλοποιούν τη βασική χρονική σταθερά των 330 Ω/150 pF, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2.
- ... Άκρο εκφόρτισης, μοντελοποιημένο ως μεταλλική προέκταση.
- ... Καλώδιο γείωσης, το οποίο, εκτός από τη λειτουργία επιστροφής για χαμηλόσυχνες συνιστώσες, συμμετέχει και στη διάδοση υψίσυχνων συνιστωσών, λόγω της μη πλήρους απομόνωσης των δομικών τμημάτων της γεννήτριας.

Η αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε μέσω πειραματικής μέτρησης του εγχεόμενου ρεύματος στο επίπεδο γείωσης, με τη χρήση στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ο οποίος διαθέτει εύρος ζώνης μεγαλύτερο των 4 GHz και παλμογράφου δειγματοληψίας 20 GS/s. Στο Σχήμα 2.43 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης, όπου διαπιστώνεται εξαιρετική αντιστοίχιση μεταξύ της μετρούμενης κυματομορφής του ρεύματος (κόκκινη γραμμή) και της προσομοιωμένης (μπλε γραμμή) κατά τα πρώτα 10 ns της κυματομορφής εκφόρτισης.

Παρά το γεγονός ότι η προσομοίωση εμφανίζει μικρότερη ένταση στο φαινόμενο ταλαντώσεων σε σύγκριση με τις μετρήσεις, η απόκλιση αυτή θεωρείται αποδεκτή, δεδομένου ότι, από την άποψη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και του επαγόμενου θορύβου, ο αρχικός παλμός αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα που καθορίζει την απόκριση του δοκιμίου.



Σχήμα 2.43: Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: μέτρηση (κόκκινο) και προσομοίωση (μπλε), για τα πρώτα 10 ns [94]

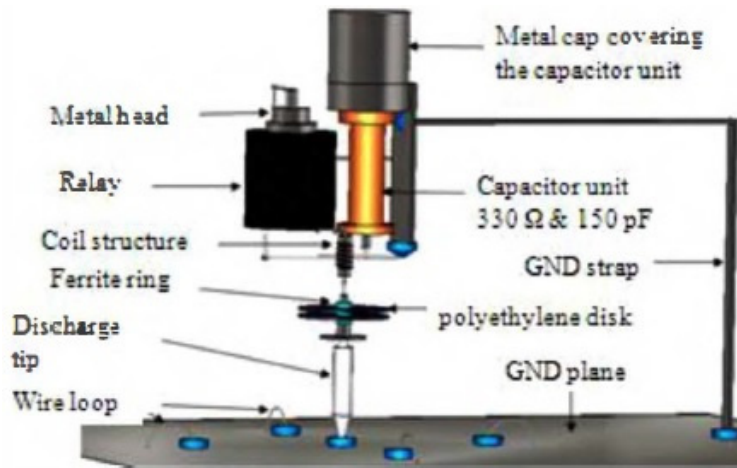
Η εργασία [94] αποδεικνύει ότι η λεπτομερής μοντελοποίηση φυσικών χαρακτηριστικών, όπως η ταχεία κατάρρευση της τάσης και τα φίλτρα βαθυπερατής διάταξης, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αξιόπιστη αναπαραγωγή των κυματομορφών εκφόρτισης και των συνοδευτικών φαινομένων που επηρεάζουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.

2.4.1.3. Μοντέλο πλήρους κύματος για την προσομοίωση της γεννήτριας ESD Noiseken

Η εργασία, των Liu et al. [96], εστιάζει στην ανάπτυξη μοντέλου πλήρους κύματος για την προσομοίωση τόσο του ρεύματος εκφόρτισης όσο και του μεταβατικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργεί μία γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι, ενώ τα κυκλωματικά μοντέλα επαρκούν για την αναπαράσταση της κυματομορφής εκφόρτισης, δεν είναι κατάλληλα για τη μελέτη του μεταβατικού πεδίου, το οποίο μπορεί να επηρεάσει ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα μέσω ακτινοβολίας και να προκαλέσει φαινόμενα όπως τα soft errors.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στο λογισμικό CST Microwave Studio (MWS) και αξιοποιεί αριθμητική προσομοίωση πλήρους κύματος. Κάθε επιμέρους εξάρτημα της γεννήτριας Noiseken (ESS-2000) μοντελοποιείται λεπτομερώς, επικυρώνεται με πειραματικά δεδομένα και εν συνεχεία συνδυάζεται σε ένα ενιαίο μοντέλο, το οποίο αποτυπώνει με υψηλή ακρίβεια τη συνολική λειτουργία της γεννήτριας.

Η γεωμετρία της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αποτυπώνεται στο ολοκληρωμένο μοντέλο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.44. Στην αναπαράσταση αυτή περιλαμβάνονται τόσο ο κύριος πυκνωτής εκφόρτισης (150 pF), όσο και τα μεταλλικά μέρη της γεννήτριας, τα οποία μοντελοποιούνται ως τέλειοι αγωγοί (Perfect Electric Conductor – PEC). Η μοντελοποίηση στηρίζεται σε λεπτομερή απεικόνιση όλων των δομικών στοιχείων, καθώς ακόμη και μικρές γεωμετρικές διαφοροποιήσεις δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της γεννήτριας και κατ' επέκταση, το μεταβατικό πεδίο που αυτή εκπέμπει.

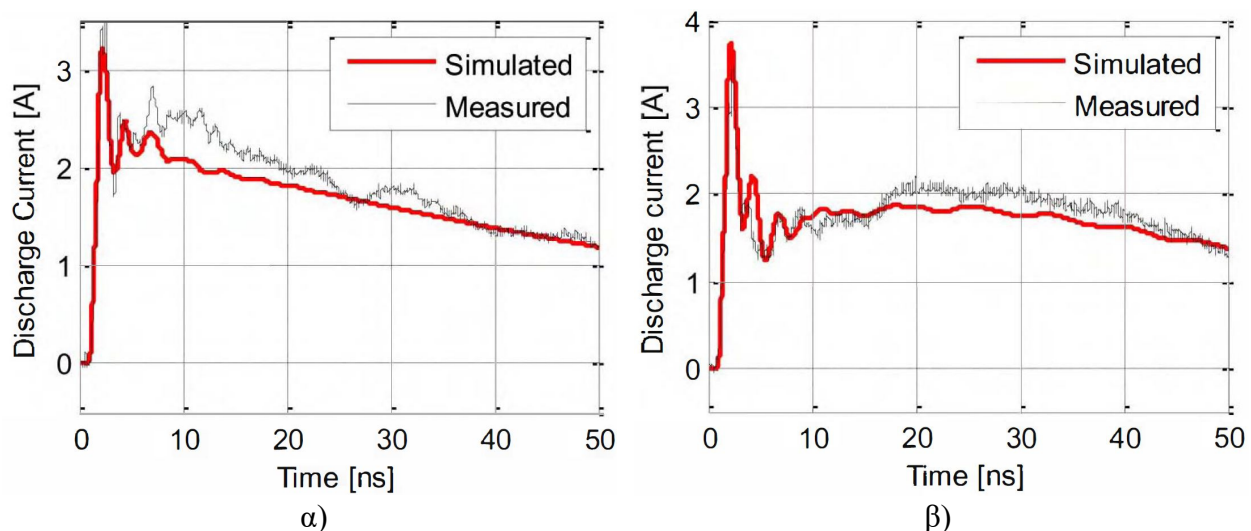


Σχήμα 2.44: Γεωμετρία της γεννήτριας ESD σε προσομοίωση πλήρους κύματος [96]

Ένα σημαντικό στοιχείο της μελέτης [96] αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης του καλωδίου γείωσης στη μορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Οι συγγραφείς μοντελοποίησαν δύο σενάρια: το πρώτο με κοντό καλώδιο γείωσης και το δεύτερο με μακρύ καλώδιο. Όπως επισημαίνεται, το μήκος του καλωδίου γείωσης δεν επηρεάζει τη μέγιστη τιμή του ρεύματος της πρώτης αιχμής (I_p), επηρεάζει όμως σημαντικά τόσο τη χρονική θέση όσο και το πλάτος της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής εκφόρτισης, λόγω της κατανεμημένης αυτεπαγωγής καθ' όλο το μήκος του καλωδίου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις στο Σχήμα 2.45, το οποίο παρουσιάζει την κυματομορφή εκφόρτισης τόσο για τη διάταξη με κοντό καλώδιο γείωσης (Σχήμα 2.45(a)) όσο και για εκείνη με μακρύ καλώδιο (Σχήμα 2.45(b)).

Η σύγκριση αναδεικνύει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρούμενων δεδομένων, επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του προτεινόμενου μοντέλου. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται στη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής εκφόρτισης οφείλονται κυρίως στην αδυναμία πλήρους μοντελοποίησης όλων των λεπτομερειών των παρασιτικών παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά της γεννήτριας στην υψίσυχνη περιοχή.



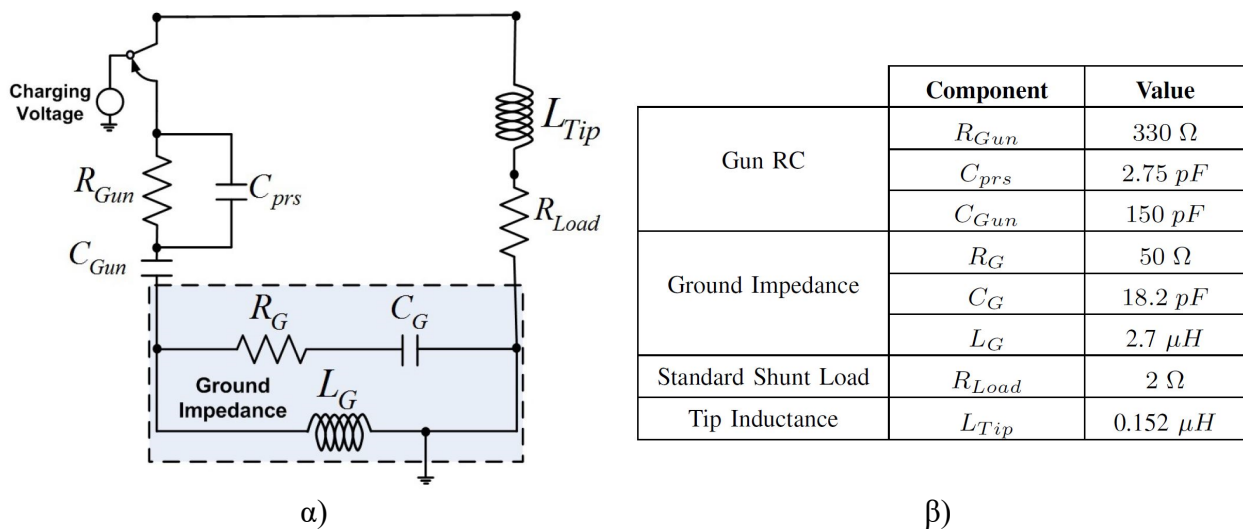
Σχήμα 2.45: Σύγκριση προσομοιούμενου και μετρούμενου ρεύματος εκφόρτισης με (α) κοντό καλώδιο γείωσης, (β) μακρύ καλώδιο γείωσης [96]

Οι συγγραφείς [96] καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο πλήρους κύματος της γεννήτριας Noiseken (ESS-2000), όπως αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε, προσφέρει μία αξιόπιστη πλατφόρμα για την προσομοίωση τόσο της κυματομορφής εκφόρτισης όσο και του μεταβατικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, διευκολύνοντας την εις βάθος κατανόηση των επιδράσεων της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτρονικά προϊόντα. Το μοντέλο αυτό αποτελεί πολύτιμο εργαλείο τόσο για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όσο και για την ενίσχυση της αξιοπιστίας ηλεκτρονικών συστημάτων έναντι φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

2.4.1.4. Αποδοτικό κυκλωματικό και αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος μιας γεννήτριας ESD

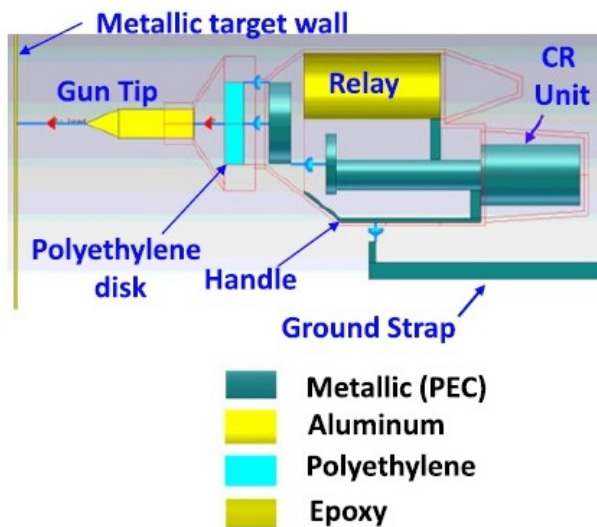
Η εργασία των Yousaf et al [97], επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός απλού, ταχέως υπολογίσιμου και αποτελεσματικού μοντέλου για την προσομοίωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η προσέγγιση των συγγραφέων συνδυάζει ισοδύναμη κυκλωματική μοντελοποίηση με αριθμητική προσομοίωση πλήρους κύματος, με στόχο την αποτύπωση, με υψηλή ακρίβεια, της συμπεριφοράς μίας εμπορικής γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NoiseKen TC-815, τόσο στον χρονικό όσο και στον συχνοτικό τομέα.

Το προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.46(α), αποτελεί ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει κρίσιμα στοιχεία, όπως την αντίσταση του πιστολιού εκφόρτισης (R_{Gun}), χωρητικότητες (C_{prs} και C_{Gun}), τη σύνθετη αντίσταση γείωσης (C_G , L_G και R_G), το φορτίο του στόχου διακρίβωσης (R_{Load}), καθώς και την επαγωγή του άκρου του ηλεκτροδίου (L_{Tip}). Στο Σχήμα 2.46(β) αποτυπώνονται οι αριθμητικές τιμές των επιμέρους στοιχείων του κυκλώματος, όπως υπολογίστηκαν από τους συγγραφείς βάσει μετρήσεων και προσαρμογής στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26].

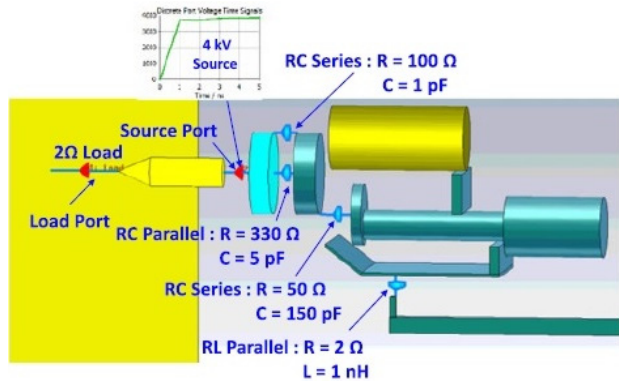


Σχήμα 2.46: (α) Ισοδύναμο προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο, (β) Τιμές στοιχείων ισοδύναμου προτεινόμενου κυκλωματικού μοντέλου [97]

Η κυματομορφή αναφοράς για τη λειτουργία εκφόρτισης επαφής μετρήθηκε με τυπική διάταξη, σύμφωνα με τη 2^η έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26]. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ της κυκλωματικής προσομοίωσης και των μετρούμενων δεδομένων καταδεικνύουν πολύ καλή συμφωνία, τόσο ως προς την I_p , όσο και ως προς τον t_r και τις τιμές I_{30} και I_{60} .



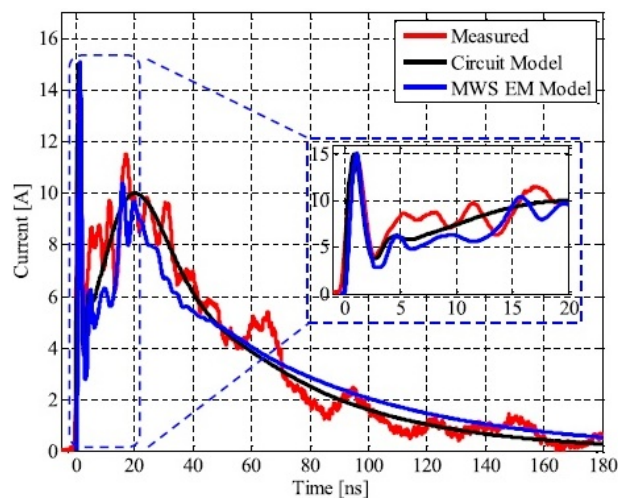
Σχήμα 2.47: Λεπτομέρειες υλικών αριθμητικού μοντέλου MWS [97]



Σχήμα 2.48: Περιγραφή στοιχείων αριθμητικού μοντέλου MWS [97]

Πέραν της κυκλωματικής προσέγγισης, οι συγγραφείς [97] αναπτύσσουν και ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος, το οποίο υλοποιείται στο λογισμικό CST Microwave Studio (MWS). Το μοντέλο αυτό, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.47, περιλαμβάνει γεωμετρικά ακριβείς αναπαραστάσεις των επιμέρους στοιχείων της γεννήτριας, όπως το σώμα του πυκνωτή, τα μεταλλικά τμήματα, καθώς και τον μεταλλικό τοίχο γείωσης. Η ακρίβεια στην επιλογή των υλικών και των διαστάσεων είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς ακόμη και μικρές γεωμετρικές αποκλίσεις δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά την υψίσυχνη απόκριση της γεννήτριας.

Στο Σχήμα 2.48, παρουσιάζονται οι επιμέρους δομές που συνθέτουν το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο, περιλαμβανομένης της πηγής βηματικής τάσης 4 kV με χρόνο ανόδου 1 ns και εσωτερική σύνθετη αντίσταση 25 Ω. Η συγκεκριμένη πηγή αναπαριστά το φυσικό φαινόμενο της ταχείας κατάρρευσης τάσης στο ρελέ της γεννήτριας και την επακόλουθη εκφόρτιση, όπως παρατηρείται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Το παραγόμενο ρεύμα οδηγείται προς αντίσταση φορτίου 2 Ω, προσομοιώνοντας τις συνθήκες της πρότυπης δοκιμής.



Σχήμα 2.49: Σύγκριση προσομοιωμένης κυκλωματικής (μαύρο), μετρούμενης (κόκκινο) και προσομοιωμένης σε MWS αριθμητικής κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (μπλε) για το επίπεδο τάσης +4KV [97]

Η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου επαληθεύεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πειραματικές μετρήσεις. Στο Σχήμα 2.49, αποτυπώνεται η κυματομορφή που προκύπτει από το κυκλωματικό μοντέλο, η μετρούμενη κυματομορφή και η αντίστοιχη κυματομορφή που εξάγεται από το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος στο MWS. Όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, οι τρεις κυματομορφές παρουσιάζουν εξαιρετική συμφωνία μεταξύ τους. Οι παράμετροι I_p και t_r εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημες τιμές, ενώ και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κυματομορφής βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2 [26].

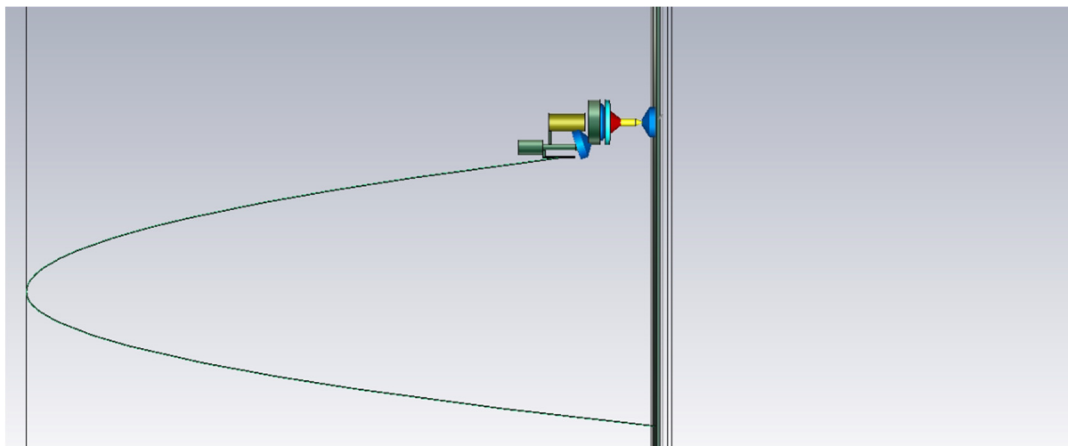
Το σημαντικότερο συμπέρασμα της εργασίας [97] είναι ότι η ακριβής αναπαραγωγή της κυματομορφής ρεύματος μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξαρτάται άμεσα από τη λεπτομερή μοντελοποίηση τόσο των ηλεκτρικών παραμέτρων όσο και της τρισδιάστατης γεωμετρίας της συσκευής. Η συνδυασμένη χρήση κυκλωματικών και αριθμητικών μοντέλων παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της αξιοπιστίας των συστημάτων έναντι φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

2.4.2. Προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito στο περιβάλλον CST Studio

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η επίδραση των παραμέτρων ενός προσομοιωμένου μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εντός του περιβάλλοντος του λογισμικού προσομοίωσης CST Studio Suite. Το CST Studio Suite αποτελεί προηγμένο λογισμικό τρισδιάστατης ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών εξαρτημάτων και συστημάτων [38].

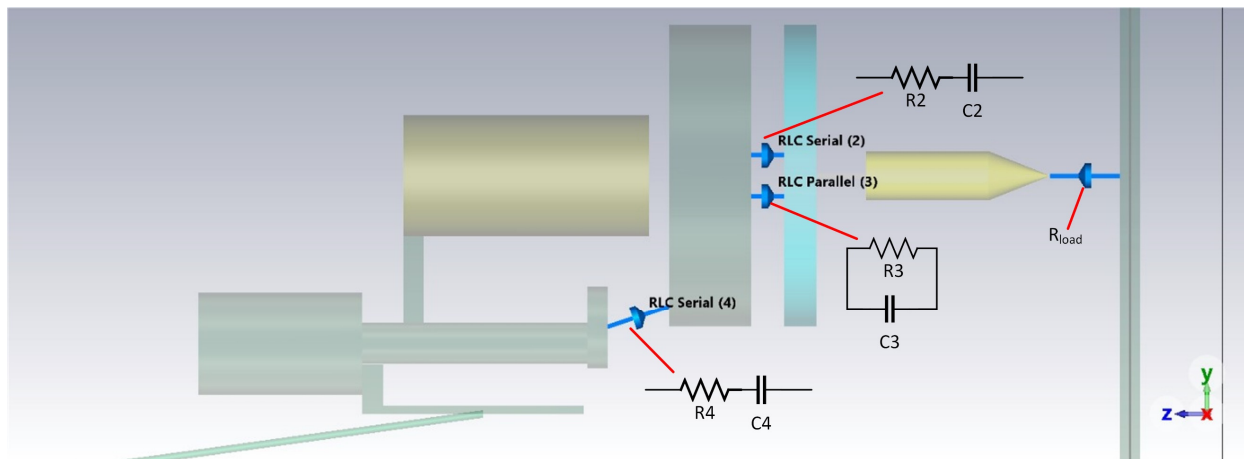
2.4.2.1. Στοιχεία Προσομοίωσης Μοντέλου Γεννήτριας ESD

Η προσομοίωση του μοντέλου της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό CST Studio Suite, του οποίου το περιβάλλον απεικονίζεται στο Σχήμα 2.50. Το περιβάλλον του λογισμικού προσφέρει τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας, γραμμή εργαλείων και εντολών, καθώς και δομή διαχείρισης για τα επιμέρους στοιχεία του μοντέλου. Επιπλέον, περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για οπτικοποίηση και ανάλυση οποιασδήποτε γεωμετρικής διάταξης, λαμβάνοντας υπόψη καθορισμένες υλικές ιδιότητες και ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά.

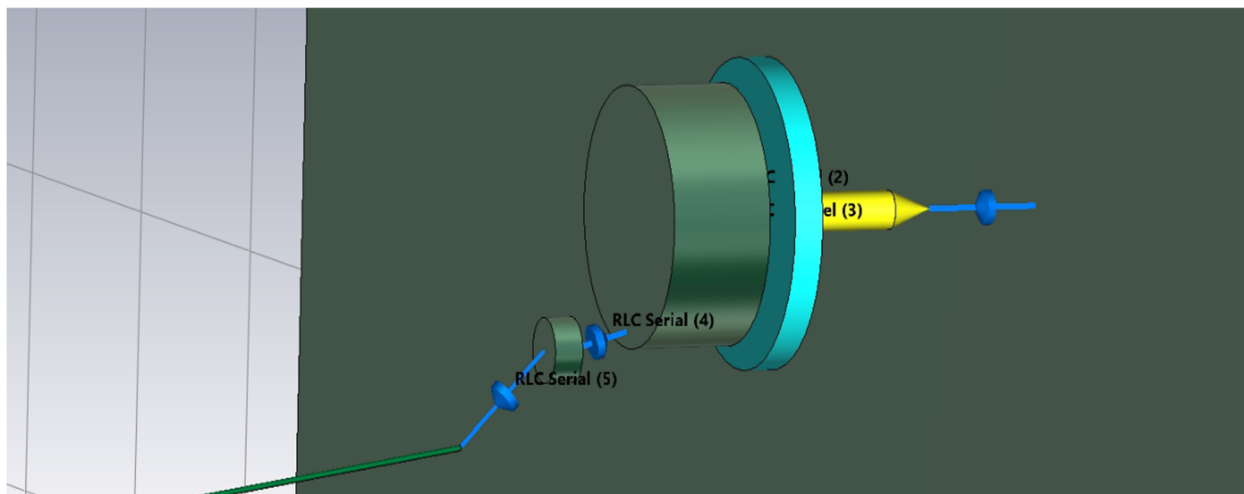


Σχήμα 2.50: Αρχικό μοντέλο προσομοίωσης της γεννήτριας ESD στο περιβάλλον CST Studio Suite

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για επίπεδο τάσης +4 kV, τα οποία βασίστηκαν στη μελέτη των Yousaf et al., όπως παρουσιάζεται στην εργασία τους [25]. Το πρώτο μοντέλο προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.51, ενώ το δεύτερο μοντέλο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.52.



Σχήμα 2.51: Κοντινή απεικόνιση του πρώτου μοντέλου προσομοίωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και ανάλυση κυκλωματικών διατάξεων



Σχήμα 2.52: Κοντινή απεικόνιση του δεύτερου μοντέλου προσομοίωσης της γεννήτριας ESD

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το πρώτο μοντέλο για την εκτέλεση των προσομοιώσεων. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και οι εκτεταμένοι υπολογιστικοί πόροι που απαιτούνταν οδήγησαν σε σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις κατά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων. Το γεγονός αυτό κατέστησε αναγκαία την ανάπτυξη ενός ισοδύναμου, απλοποιημένου μοντέλου, ικανού να παρέχει συγκρίσιμα αποτελέσματα σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Το δεύτερο μοντέλο συνιστά απλοποιημένη εκδοχή του πρώτου, καθώς αφαιρέθηκαν στοιχεία τα οποία διαπιστώθηκε ότι δεν επηρέαζαν ουσιαστικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Μέσω αυτής της βελτιστοποίησης, οι χρόνοι υπολογισμού μειώθηκαν αισθητά, επιτρέποντας τη λήψη αποτελεσμάτων έως και τα 160 ns, σε αντίθεση με το πρώτο μοντέλο, του οποίου τα αποτελέσματα περιοριζόνταν έως τα 60 ns.

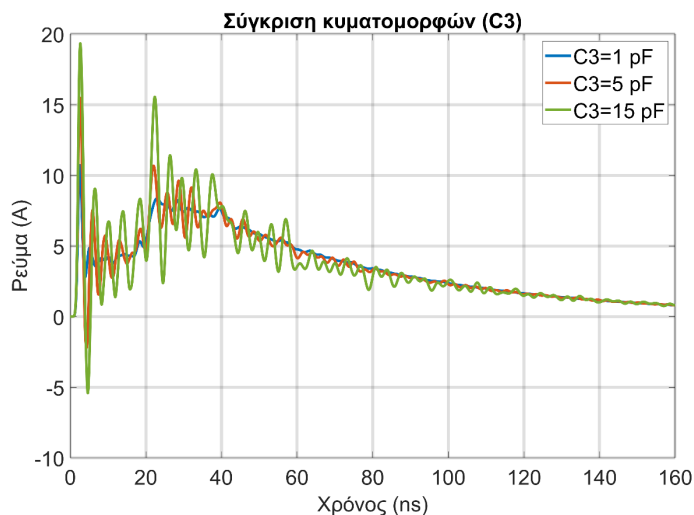
Για την εξαγωγή παρατηρήσεων σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της προσομοιωμένης γεννήτριας, χρησιμοποιήθηκε τελικώς το δεύτερο, απλοποιημένο μοντέλο, τα επιμέρους χαρακτηριστικά του οποίου αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

2.4.2.2. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του μοντέλου στην κυματομορφή ESD

Στην διπλωματική εργασία [98] παρουσιάζεται αναλυτικά η διερεύνηση της επίδρασης όλων των παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης. Από το σύνολο αυτών, ένας περιορισμένος αριθμός αναγνωρίστηκε ως κρίσιμες παράμετροι, με τη μεγαλύτερη επίδραση στη μορφή της παραγόμενης κυματομορφής. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα παραμετρικά αποτελέσματα για τις εν λόγω παραμέτρους, τόσο υπό μορφή συγκριτικών διαγραμμάτων όσο και σε πίνακες, στους οποίους παρουσιάζονται οι υπολογισμένες παράμετροι της κυματομορφής, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27].

Χωρητικότητα C3 (5 pF στο Σχήμα 2.48), παράλληλη στην αντίσταση που προσομοιώνει την αντίσταση του μονοπατιού εκφόρτισης (ανθρώπινο σώμα + μεταλλικό αντικείμενο = 330 Ω)

Από το Σχήμα 2.53 και τον Πίνακα 2.14, διαπιστώνεται η σημαντική επίδραση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου C3 στη μορφή της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή της χωρητικότητας C3 οδηγεί στην εμφάνιση της μικρότερης τιμής του I_p . Αντιθέτως, με την αύξηση της C3, παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση της τιμής του I_p . Επιπλέον, οι αποσβεννυμένες ταλαντώσεις που εμφανίζονται στο δεύτερο τμήμα της κυματομορφής, δηλαδή μετά την πρώτη αιχμή, καθίστανται εντονότερες όσο αυξάνεται η τιμή της χωρητικότητας C3.



Σχήμα 2.53: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C3

Πίνακας 2.14: Σύγκριση των υπολογισμένων παραμέτρων της κυματομορφής εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C3

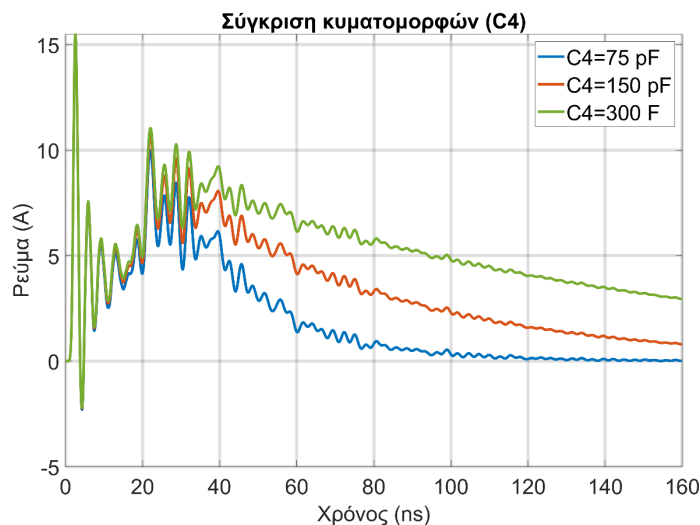
C3	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
[pF]	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
1	10,70	0,782	8,362	7,656	4,596
5	15,48	0,783	10,67	8,349	4,570
15	19,33	0,814	15,55	4,886	3,512

Η παρατηρούμενη αυτή συμπεριφορά αποδίδεται στο γεγονός ότι η αύξηση της χωρητικότητας C3 επηρεάζει τον ρυθμό εκφόρτισης του αποθηκευμένου φορτίου, καθώς και την απόκριση του συνολικού κυκλώματος στις υψίσυχνες συνιστώσες. Μεγαλύτερη τιμή της C3 συνεπάγεται αυξημένη ενέργεια διαθέσιμη για εκφόρτιση κατά την πρώτη αιχμή, οδηγώντας σε υψηλότερες τιμές του της παραμέτρου I_p και σε εντονότερο φαινόμενο ταλαντώσεων, λόγω ισχυρότερης σύζευξης μεταξύ των επαγωγικών και

χωρητικών στοιχείων του συστήματος. Συνολικά, οι μεταβολές στη χωρητικότητα C3 συνιστούν κρίσιμο παράγοντα για τη διαμόρφωση τόσο της αρχικής αιχμής όσο και της φασματικής συμπεριφοράς του παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, γεγονός που καθιστά την ακριβή επιλογή της ιδιαίτερως σημαντική για τη ρεαλιστική προσομοίωση των φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Χωρητικότητα C4 (150 pF στο Σχήμα 2.48), η οποία προσομοιώνει την χωρητικότητα του ανθρωπίνου σώματος

Από το Σχήμα 2.54 και τον Πίνακα 2.15 προκύπτει ότι η μεταβολή της τιμής της χωρητικότητας C4 δεν επιδρά στη μέγιστη τιμή του ρεύματος της πρώτης αιχμής (I_P). Η μορφή των κυματομορφών εμφανίζει παρόμοια χαρακτηριστικά ως προς τον αριθμό, το πλάτος και τη διάρκεια του φαινομένου ταλαντώσεων. Ωστόσο, μετά το χρονικό σημείο των 20 ns, η αύξηση της τιμής της C4 οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος στο δεύτερο σκέλος της κυματομορφής και κατά συνέπεια σε αύξηση των τιμών των παραμέτρων I_{30} και I_{60} . Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τον Πίνακα 2.15, σύμφωνα με τον οποίο η τιμή του ρεύματος I_{60} αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της χωρητικότητας C4. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χωρητικότητα C4 επηρεάζει κυρίως το χαμηλόσυχο τμήμα της κυματομορφής, συμβάλλοντας στην ενεργειακή παραμονή του παλμού για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια και καθιστώντας την επιλογή της κρίσιμη για εφαρμογές, όπου η συμπεριφορά μετά την αρχική αιχμή είναι καθοριστική.



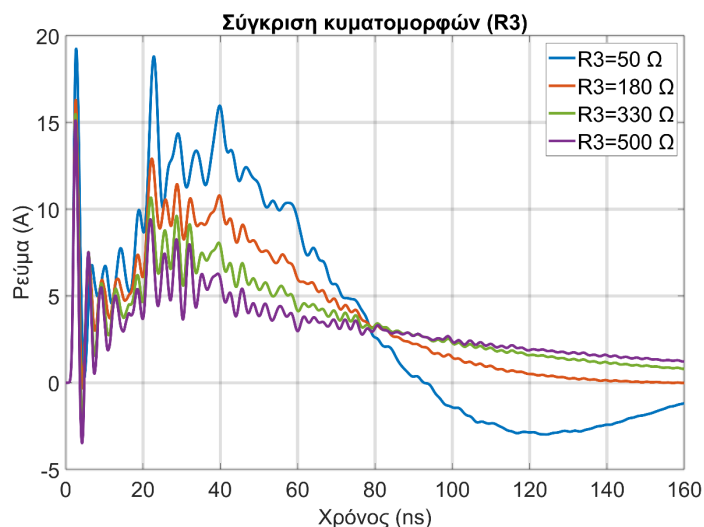
Πίνακας 2.15: Σύγκριση των υπολογισμένων παραμέτρων της κυματομορφής εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C4

C4 [pF]	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
75	15,48	0,783	10,00	7,027	1,824
150	15,48	0,783	10,67	8,349	4,570
300	15,48	0,783	11,04	9,113	6,617

Σχήμα 2.54: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C4

Αντίσταση R3 (330 Ω στο Σχήμα 2.48), η οποία προσομοιώνει την αντίσταση του μονοπατιού εκφόρτισης (ανθρώπινο σώμα + μεταλλικό αντικείμενο = 330 Ω)

Από το Σχήμα 2.55 και τον Πίνακα 2.16 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της R3 επιδρά αισθητά στη μορφή της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Συγκεκριμένα, η αύξηση της τιμής της R3 επιφέρει μείωση της τιμής του ρεύματος πρώτης αιχμής (I_P) καθώς και μείωση της διάρκειας του πρώτου παλμού. Μετά την πρώτη κορυφή, η κυματομορφή εμφανίζει έντονες ταλαντώσεις, το πλάτος των οποίων επηρεάζεται από τις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου R3.



Σχήμα 2.55: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου R3

Πίνακας 2.16: Σύγκριση των υπολογισμένων παραμέτρων της κυματομορφής εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου R3

R3 [Ω]	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
50	19,25	18,80	0,841	11,37	7,847
180	16,30	12,91	0,797	9,802	5,814
330	15,48	10,67	0,783	8,349	4,570
500	15,12	9,414	0,776	7,186	3,803

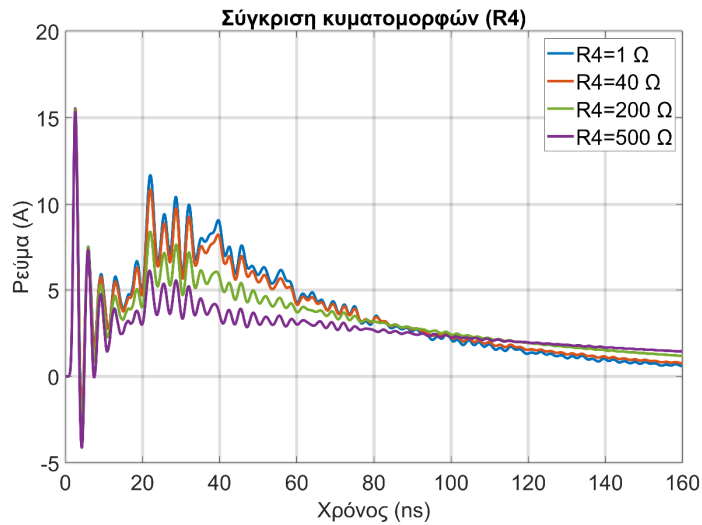
Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με την επίδραση της αντίστασης R3 στον ρυθμό εκφόρτισης και στην αποθήκευση ενέργειας στο κύκλωμα, καθιστώντας την κρίσιμη παράμετρο για τον έλεγχο τόσο του υψίσυχνου περιεχομένου του παλμού όσο και της φασματικής του κατανομής. Ως εκ τούτου, η κατάλληλη επιλογή της R3 είναι καθοριστική για την ακριβή αναπαράσταση των φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά τις δοκιμές συμμόρφωσης.

Αντίσταση R4 (50 Ω στο Σχήμα 2.48), εν σειρά με τον πυκνωτή C4 η), η οποία προσομοιώνει την χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος

Στο Σχήμα 2.56 και στον Πίνακα 2.17 παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της R4 δεν επιδρά ουσιαστικά στην παράμετρο I_p , η οποία παραμένει σχεδόν σταθερή ανεξαρτήτως της μεταβολής της αντίστασης. Η σταθερότητα αυτή υποδηλώνει ότι η αντίσταση R4 δεν επηρεάζει το αρχικό μέτωπο του παλμού εκφόρτισης, γεγονός που την καθιστά λιγότερο κρίσιμη παράμετρο για τον καθορισμό της μέγιστης τιμής του ρεύματος κατά την πρώτη αιχμή της κυματομορφής.

Ωστόσο, σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις για την R3, μετά την πρώτη αιχμή η κυματομορφή παρουσιάζει ταλαντώσεις, το πλάτος των οποίων μειώνεται με την αύξηση των τιμών της R4. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ενισχυμένη απώλεια ενέργειας που επιφέρει η υψηλότερη αντίσταση στη διαδρομή εκφόρτισης, περιορίζοντας τις συντονιστικές συμπεριφορές του κυκλώματος.

Παράλληλα, παρατηρείται μικρή αύξηση της περιόδου ταλάντωσης για χαμηλότερες τιμές της R4, γεγονός που αποδίδεται στη μικρότερη εξασθένηση και κατά συνέπεια στη μεγαλύτερη διάρκεια των ταλαντώσεων. Η συμπεριφορά αυτή καταδεικνύει ότι η R4 επιδρά κυρίως στον βαθμό εξασθένησης της κυματομορφής, επηρεάζοντας λιγότερο την παράμετρο I_p αλλά περισσότερο τη φασματική σύνθεση και τη διάρκεια των ταλαντώσεων μετά την πρώτη αιχμή. Συνεπώς, η ορθή επιλογή της τιμής της R4 είναι κρίσιμη για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως αναφορικά με τα φαινόμενα μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που ακολουθούν την εκφόρτιση.



Σχήμα 2.56: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου R4

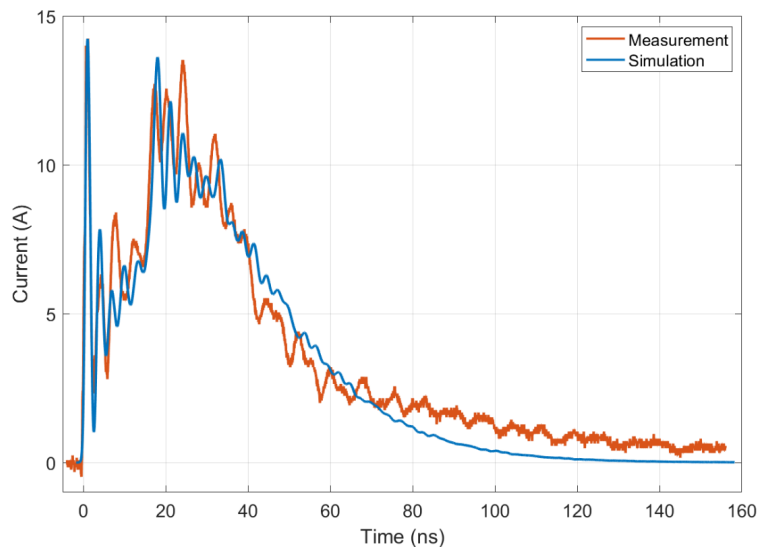
Πίνακας 2.17: Σύγκριση των υπολογισμένων παραμέτρων της κυματομορφής εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου R4

R4	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
[Ω]	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
1	15,55	11,69	0,785	9,162	4,792
40	15,49	10,86	0,783	8,502	4,613
200	15,39	8,423	0,780	6,660	4,019
500	15,33	6,117	0,778	4,908	3,248

2.4.2.3. Προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito με επιλογή κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου προσομοίωσης

Έπειτα από τη διεξοδική ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων προσομοίωσης στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, αξιοποιήθηκαν οι σχετικές παρατηρήσεις για την ανάπτυξη ενός αριθμητικού μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το μοντέλο αυτό διαμορφώθηκε με κατάλληλες τιμές παραμέτρων, προκειμένου η παραγόμενη κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης να προσεγγίζει με υψηλή ακρίβεια την πραγματική κυματομορφή της γεννήτριας EM Test Dito, όπως αυτή μετρήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο Σχήμα 2.57 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης κυματομορφής και της προσομοιωμένης κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης.



Σχήμα 2.57: Σύγκριση μετρημένης κυματομορφής και αποτελέσματος της προσομοίωσης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito [98]

Οι αριθμητικές τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, τόσο για τη μετρούμενη γεννήτρια EM Test Dito όσο και για την προσομοιωμένη γεννήτρια, παρατίθενται στον Πίνακα 2.18.

Πίνακας 2.18: Σύγκριση των υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής του ρεύματος μεταξύ της μετρημένης κυματομορφής και του αποτελέσματος της προσομοίωσης

	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
Μετρήσεις EM Test Dito	14,24	0,854	13,52	8,620	3,180
Μοντέλο προσομοίωσης	14,23	0,859	13,61	9,625	3,147
Απόκλιση	-0,07%	0,59%	0,67%	11,66%	-1,04%

Από το Σχήμα 2.57 και τον Πίνακα 2.18 διαπιστώνεται πολύ καλή αντιστοιχία μεταξύ της μετρημένης και της προσομοιωμένης κυματομορφής, τόσο ως προς τη μορφή όσο και ως προς τις βασικές παραμέτρους του ρεύματος εκφόρτισης. Ειδικότερα, η παράμετρος I_p εμφανίζει εξαιρετικά μικρή απόκλιση (0,07%), ενώ οι παράμετροι t_r και I_{p2} παρουσιάζουν απόκλιση 0,59% και 0,67% αντίστοιχα.

Ωστόσο, οι παράμετροι I_{30} και I_{60} εμφανίζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις (11,66% και 1,04% αντίστοιχα). Πρέπει να τονιστεί ότι οι παράμετροι αυτοί, αν και καθορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 για τη σύγκριση κυματομορφών, αναφέρονται σε απολύτως συγκεκριμένα χρονικά σημεία. Λόγω της φύσης των εξασθενημένων ταλαντώσεων που ακολουθούν την πρώτη αιχμή, οι στιγμιαίες αυτές τιμές ενδέχεται να επηρεάζονται δυσανάλογα από μικρές χρονικές μετατοπίσεις ή φαινόμενα ταλαντώσεων, τα οποία δεν αποτυπώνονται εξίσου έντονα στο προσομοιωμένο μοντέλο. Συνεπώς, οι αποκλίσεις στις παραμέτρους I_{30} και I_{60} δεν συνιστούν απόλυτη ένδειξη μειωμένης ακρίβειας του μοντέλου, καθώς δύνανται να υποτιμούν τη συνολική του απόδοση. Η γενική συμφωνία των κυματομορφών παραμένει εξαιρετική, με το προσομοιωμένο μοντέλο να αναπαράγει με ακρίβεια τόσο τη μορφή όσο και το δυναμικό εύρος της κυματομορφής εκφόρτισης.

Παρά τη συνολική επιτυχία, πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι ο παλμός περί τα 7 ns, ο οποίος παρατηρείται στη μετρημένη κυματομορφή, δεν προέκυψε σε κανέναν συνδυασμό παραμέτρων κατά την προσομοίωση. Επιπλέον, το φαινόμενο ταλαντώσεων που καταγράφεται στην ουρά της μετρούμενης κυματομορφής δεν αποτυπώθηκε με την ίδια ένταση στο προσομοιωμένο μοντέλο. Παρά τα ανωτέρω, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρίνονται απολύτως ικανοποιητικά και θεωρούνται επαρκή για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και ταχύτατου μοντέλου προσομοίωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Dito, ικανού να αξιοποιηθεί σε μελέτες και εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Επιπλέον, η επιτυχής προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις καταδεικνύει ότι είναι δυνατή η λεπτομερής αναπαράσταση τόσο των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών όσο και της γεωμετρίας της γεννήτριας, στοιχείο που συνιστά σημαντική τεχνική συνεισφορά της παρούσας διατριβής. Η προσέγγιση αυτή εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο της διατριβής, το οποίο επιδιώκει να παρέχει εργαλεία προσομοίωσης υψηλής ακρίβειας για την κατανόηση και αντιστάθμιση φαινομένων όπως το φαινόμενο της φόρτωσης από έναν ανιχνευτή ρεύματος και οι παρασιτικές ταλαντώσεις, διευκολύνοντας έτσι την αξιόπιστη εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, ακόμη και σε σύνθετες δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

2.5. Επίδραση ανιχνευτών ρεύματος στις κυματομορφές ESD: πειραματική ανάλυση και προσομοίωση

Οι ανιχνευτές ρεύματος χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, τόσο για την παρακολούθηση της λειτουργίας του δοκιμίου όσο και για την ακριβή διακρίβωση των εγχυόμενων διαταραχών. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση τέτοιων ανιχνευτών έχει επεκταθεί και στην καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σε διάφορες δοκιμές ατρωσίας ([18], [79], [99], [100], [101], [102]), υποστηρίζοντας τη μεθοδολογία System-Efficient ESD Design (SEED). Όπως περιγράφεται στα προαναφερθέντα έργα, ο ανιχνευτής τοποθετείται συνήθως γύρω από την άκρη της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με την καταγραφή του ρεύματος να πραγματοποιείται μέσω παλμογράφου. Ωστόσο, η τοποθέτηση αυτή έχει εγείρει ανησυχίες αναφορικά με την πιθανή επίδραση του ανιχνευτή στην κυματομορφή του ρεύματος, λόγω του φαινομένου φόρτωσης ανιχνευτή, οδηγώντας τους ερευνητές στη διερεύνηση εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης [78].

Το φαινόμενο φόρτωσης ανιχνευτή — το οποίο συνδέεται άμεσα με την σύνθετη αντίσταση παρεμβολής (insertion impedance) των ανιχνευτών ρεύματος — έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης σε προηγούμενα έργα [82], [103], παρέχοντας τόσο θεωρητικές όσο και πειραματικές γνώσεις σχετικά με τις παραμορφώσεις που ενδέχεται να προκαλέσουν οι ανιχνευτές τύπου μετασχηματιστή στις μετρήσεις RF ρευμάτων. Το θέμα αυτό έχει επανεξεταστεί προσφάτως μέσω διεθνών διεργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες εστίασαν στη μεθοδολογία μέτρησης της σύνθετης αντίστασης παρεμβολής των ανιχνευτών αυτών [104].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η σύνθετη αντίσταση παρεμβολής (insertion impedance) — ιδίως σε υψίσυχνες περιοχές — μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη μέτρηση, είναι η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στο ευρύ φάσμα συχνοτήτων των γεγονότων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο εκτείνεται συχνά έως αρκετά GHz.

Η παρούσα ενότητα αξιοποιεί τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.2, καθώς και τα αριθμητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 2.3 και 2.4, προκειμένου να διερευνηθεί πειραματικά και υπολογιστικά η επίδραση του φαινομένου φόρτωσης ανιχνευτή στην καταγεγραμμένη κυματομορφή ρεύματος. Στόχος της ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί κατά πόσον το φαινόμενο φόρτωσης ανιχνευτή μπορεί να αλλοιώσει σε τέτοιο βαθμό τα μετρούμενα χαρακτηριστικά, ώστε να επηρεαστεί η ορθή εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2 και να υπονομευθεί η ακρίβεια της ανακατασκευής της πραγματικής κυματομορφής εκφόρτισης.

Για την εξασφάλιση αξιόπιστης και ολοκληρωμένης αξιολόγησης, απαλλαγμένης από την αβεβαιότητα επαναληψιμότητας των μετρήσεων, αναπτύχθηκε ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τη διάταξη του πειράματος. Το μοντέλο αυτό αξιοποιείται περαιτέρω για την ανάλυση των φαινομένων φόρτωσης ανιχνευτή υπό διαφορετικά σενάρια σύνθετης αντίστασης φορτίου, επεκτείνοντας τα συμπεράσματα πέρα από τα στενά όρια των πειραματικών συνθηκών και υποστηρίζοντας τη γενίκευση των πορισμάτων που αντλήθηκαν από τις προηγούμενες ενότητες.

2.5.1. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη βασίσθηκε στη διαδικασία διακρίβωσης που τροποποιεί η αναθεωρημένη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2 (2025) [27] και περιεγράφηκε αναλυτικά στην Ενότητα 1.5.

Για την παραγωγή των κυματομορφών ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια EM Test Dito, ενώ ο ανιχνευτής ρεύματος F-65 της εταιρίας FCC τοποθετήθηκε γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.58, με την έξοδο του να οδηγείται στο πρώτο κανάλι του παλμογράφου (Tektronix TDS 7254B) μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω.



Σχήμα 2.58: Διάταξη μέτρησης σύμφωνα με την τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης της αναθεωρημένης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 (2025) [27]

2.5.2. Διαδικασία μέτρησης

Το επίπεδο δοκιμής που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή της μελέτης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2, ήταν τα +4 kV, καθώς αποτελεί το συνηθέστερα εφαρμοζόμενο επίπεδο τάσης στις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, πραγματοποιήθηκαν δύο σύνολα μετρήσεων. Το πρώτο περιλάμβανε την καταγραφή 100 κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από τη γεννήτρια χωρίς τον ανιχνευτή τοποθετημένο στο άκρο εκφόρτισης της. Στο δεύτερο σύνολο εκτελέστηκαν επίσης 100 μετρήσεις, αυτή τη φορά με τον ανιχνευτή τοποθετημένο στο άκρο εκφόρτισης.

Η επιλογή τόσο μεγάλου αριθμού επαναλήψεων κρίθηκε αναγκαία για τον περιορισμό της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας, καθώς η αναμενόμενη επίδραση του φαινομένου φόρτωσης ανιχνευτή στην κυματομορφή του ρεύματος θεωρείται σχετικά μικρή. Η ελαχιστοποίηση της πειραματικής αβεβαιότητας θεωρήθηκε καθοριστική για την αξιόπιστη εξαγωγή συμπερασμάτων. Η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας υπολογίστηκε ως ποσοστό επί της μέσης τιμής, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Repeatability (\%)} = 100 \times \frac{\frac{\sigma}{\sqrt{N}}}{\text{average value}} \quad (18)$$

όπου: σ είναι η τυπική απόκλιση της εκάστοτε μετρούμενης παραμέτρου, N είναι ο αριθμός των επαναλήψεων (ίσος με 100 και για τις δύο περιπτώσεις), *average value* είναι η μέση τιμή της παραμέτρου που μετράται για κάθε σύνολο μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης της αβεβαιότητας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.19. Οι παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν:

... Τη μέγιστη τιμή του αρχικού ρεύματος αιχμής (I_P)

- Τον χρόνο ανόδου (t_r) του αρχικού ρεύματος αιχμής
- Τη μέγιστη τιμή του ρεύματος στο χρονικό παράθυρο μεταξύ 10 ns και 40 ns από τη στιγμή που το ρεύμα φτάνει για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του (I_{p2})
- Την τιμή του ρεύματος στα 30 ns από τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έφθασε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του (I_{30})
- Την τιμή του ρεύματος στα 60 ns από την ίδια χρονική στιγμή (I_{60})

Πίνακας 2.19: Αβεβαιότητα επαναληψιμότητας για τα δύο σενάρια μετρήσεων

Σενάριο μέτρησης	Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης				
	I_p [%]	t_r [%]	I_{p2} [%]	I_{30} [%]	I_{60} [%]
Χωρίς ανιχνευτή	0,13	0,11	0,06	0,08	0,25
Με ανιχνευτή	0,14	0,15	0,04	0,08	0,24

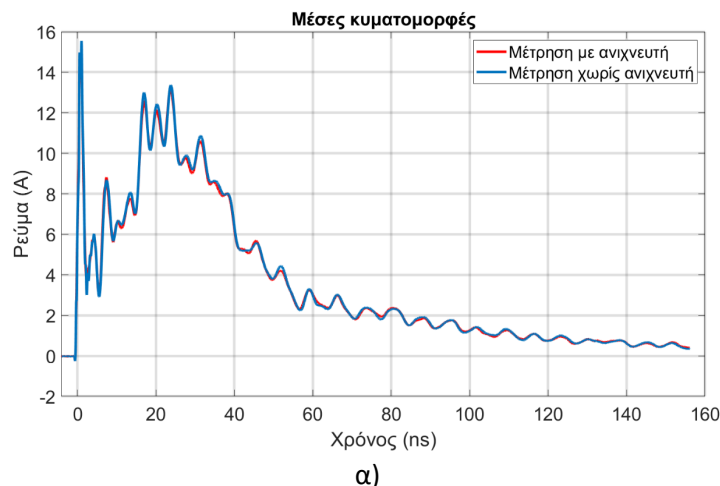
Οι υπολογισθείσες τιμές επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη και επιθυμητή χαμηλή αβεβαιότητα επαναληψιμότητας, η οποία παραμένει κάτω του 0,5% για όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους.

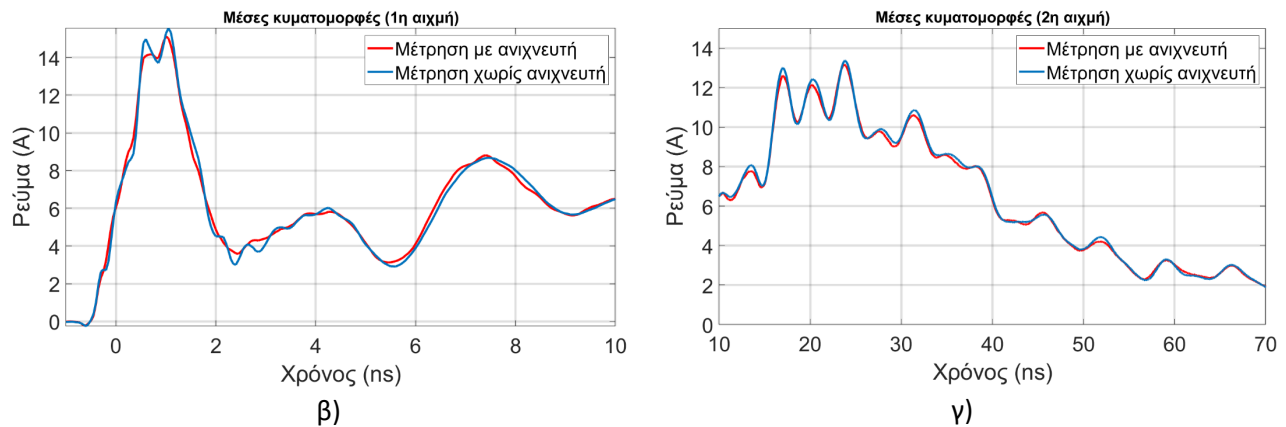
2.5.3. Αποτελέσματα μετρήσεων

2.5.3.1. Καταγεγραμμένες κυματομορφές και οπτικοποίηση φάσματος συχνοτήτων

Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει τις μέσες κυματομορφές του ρεύματος για τα δύο σενάρια μέτρησης. Στο Σχήμα 2.59(α) παρουσιάζεται ολόκληρος ο καταγεγραμμένος παλμός, παρέχοντας συνολική ανασκόπηση της κυματομορφής. Τα Σχήμα 2.59(α) και 2.59(β) περιλαμβάνουν μεγεθυμένες απεικονίσεις, εστιάζοντας στο αρχικό τμήμα της κυματομορφής (έως 10 ns) και στο μεταγενέστερο τμήμα (από 10 ns έως 70 ns), αντίστοιχα.

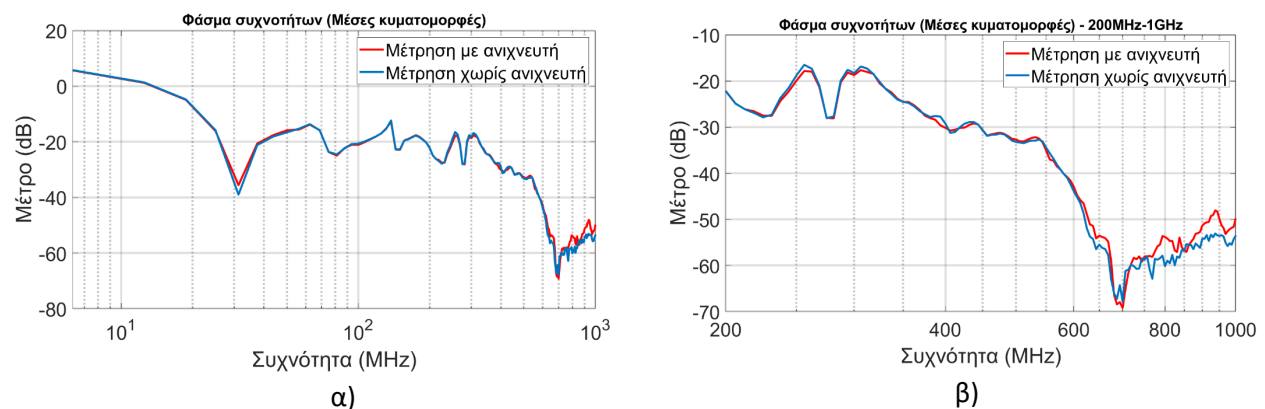
Η απόκλιση μεταξύ των δύο κυματομορφών είναι σχεδόν αμελητέα στη συνολική απεικόνιση του παλμού, καθίσταται όμως εμφανής στις περιοχές μεγέθυνσης, κυρίως γύρω από τις δύο κύριες αιχμές. Το επηρεαζόμενο τμήμα της κυματομορφής εκτείνεται έως περίπου τα 35 ns, διάστημα το οποίο συνδέεται με το υψίσυχο φασματικό περιεχόμενο (>20 MHz). Τα ευρήματα αυτά συνάδουν με προηγούμενες μελέτες [82], [103], [104], οι οποίες εξετάζουν την επίδραση της σύνθετης αντίστασης παρεμβολής των ανιχνευτών ρεύματος στη συμπεριφορά τους σε υψίσυχνες περιοχές.





Σχήμα 2.59: Μέσες κυματομορφές ρεύματος για τα δύο σενάρια μέτρησης: α) συνολική κυματομορφή, β) περιοχή 1^{ης} αιχμής και γ) περιοχή 2^{ης} αιχμής

Τα επόμενα σχήματα παρουσιάζουν το υπολογισμένο φάσμα συχνοτήτων και για τα δύο σενάρια μέτρησης. Το Σχήμα 2.60 αναδεικνύει τις περιοχές ενδιαφέροντος στο φάσμα, και συγκεκριμένα τη ζώνη γύρω από τη βασική συχνότητα συντονισμού του καλωδίου γείωσης (31,25 MHz), καθώς και την περιοχή από 200 MHz έως 1 GHz.



Σχήμα 2.60: Φάσμα συχνοτήτων για τις μέσες κυματομορφές ρεύματος α) συνολικό εύρος (6,25 MHz - 1GHz) και β) εύρος 200 MHz – 1GHz

Το Σχήμα 2.60(β) παρέχει λεπτομερή απεικόνιση της περιοχής από 200 MHz έως 1 GHz, στην οποία η απόκλιση μεταξύ των δύο σεναρίων μέτρησης καθίσταται περισσότερο εμφανής. Παρότι καταγράφεται αξιοσημείωτη απόκλιση στο εύρος συχνοτήτων από 600 MHz έως 1 GHz, το φασματικό περιεχόμενο σε αυτή τη ζώνη παραμένει σημαντικά χαμηλό (κάτω από -50 dB), γεγονός που καθιστά απίθανη τη συσχέτισή του με τις παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις στις κυματομορφές του ρεύματος. Αντιθέτως, η μειωμένη φασματική πυκνότητα που παρατηρείται στην περιοχή μεταξύ περίπου 220 MHz και 400 MHz συνιστά πιθανότερη αιτία για τις διαπιστωθείσες αποκλίσεις στις κυματομορφές.

2.5.3.2. Παράμετροι κυματομορφής ESD και σύγκριση φάσματος συχνοτήτων

Ο Πίνακας 2.20 παρουσιάζει συγκριτικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το συνολικό εγχεόμενο φορτίο και το ποσοστό φασματικού περιεχομένου σε δύο εύρη συχνοτήτων (6,25 MHz – 300 MHz και 300 MHz – 1GHz).

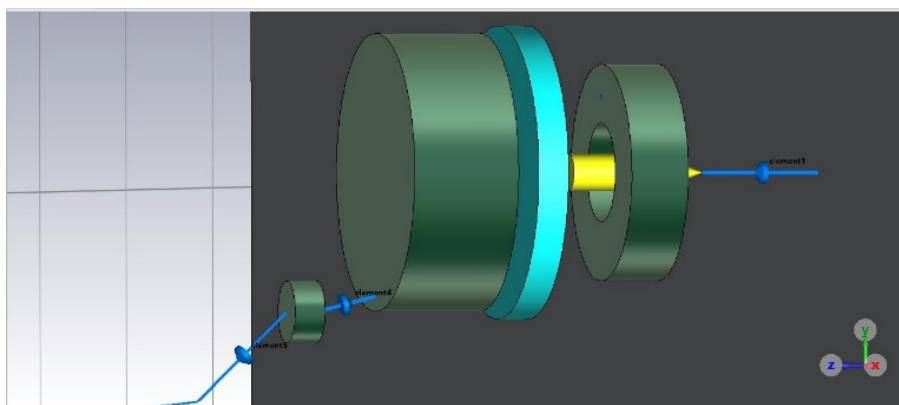
Πίνακας 2.20: Σύγκριση των υπολογισμένων παραμέτρων της κυματομορφής ρεύματος και του φάσματος συχνοτήτων για τα δύο σενάρια μέτρησης

Σενάριο μέτρησης	Παράμετροι κυματομορφής						Ποσοστό φασματικού περιεχομένου	
	I_p [%]	t_r [%]	I_{p2} [%]	I_{30} [%]	I_{60} [%]	Charge [nC]	6,25MHz – 300MHz [%]	300MHz-1GHz [%]
Χωρίς ανιχνευτή	15,55	0,888	13,36	9,26	3,19	562,02	65,27	1,43
Με ανιχνευτή	15,11	0,892	13,17	9,12	3,15	558,19	65,08	1,37
Απόκλιση [%]	-2,83	0,44	-1,42	-1,51	-1,25	-0,68	-0,19	-0,06

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν αξιοσημείωτες αποκλίσεις, οι οποίες εμφανίζονται κυρίως στις παραμέτρους που σχετίζονται με το μέγεθος του ρεύματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν μειώσεις στις τιμές των παραμέτρων, κυμαινόμενες από 1,25% έως 2,83%. Η εν λόγω μείωση, σε συνδυασμό με τη συνολική μείωση του ενεργειακού περιεχομένου της κυματομορφής, υπογραμμίζει τον απορροφητικό χαρακτήρα του φαινομένου φόρτωσης του ανιχνευτή, το οποίο δρα εξασθενητικά ως προς την ενέργεια του παλμού. Σημαντικό εύρημα αποτελεί η διαπίστωση ότι η μείωση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στο πλάτος των παλμών, αλλά επηρεάζει επίσης, έστω και ανεπαίσθητα τη φασματική σύσταση του σήματος, ενισχύοντας τις ενδείξεις για δυναμική αλληλεπίδραση του ανιχνευτή με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τα υπολογισμένα ποσοστά του φάσματος συχνοτήτων για τις δύο κύριες περιοχές συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν περαιτέρω τις ανωτέρω παρατηρήσεις σχετικά με την επίδραση του φαινομένου φόρτωσης του ανιχνευτή.

2.5.3.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικές τιμές σύνθετης αντίστασης φορτίου

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο βασικός στόχος της προσέγγισης μέσω προσομοίωσης ήταν η εξάλειψη της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρέχει παράλληλα τη δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων μέτρησης, τα οποία στην πράξη θα απαιτούσαν σημαντικό χρόνο και θα ήταν επιρρεπή σε ανεπιθύμητες αποκλίσεις. Στο πλαίσιο αυτό, ένα μοντέλο βασισμένο στις προσπάθειες μοντελοποίησης που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 2.3 και 2.4, αναπτύχθηκε (Σχήμα 2.61) και αξιοποιήθηκε για τη μελέτη του φαινομένου φόρτωσης του ανιχνευτή υπό ευρύ φάσμα συνθηκών φορτίου, πέραν της τυπικής τιμής των 2 Ω που ορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27].



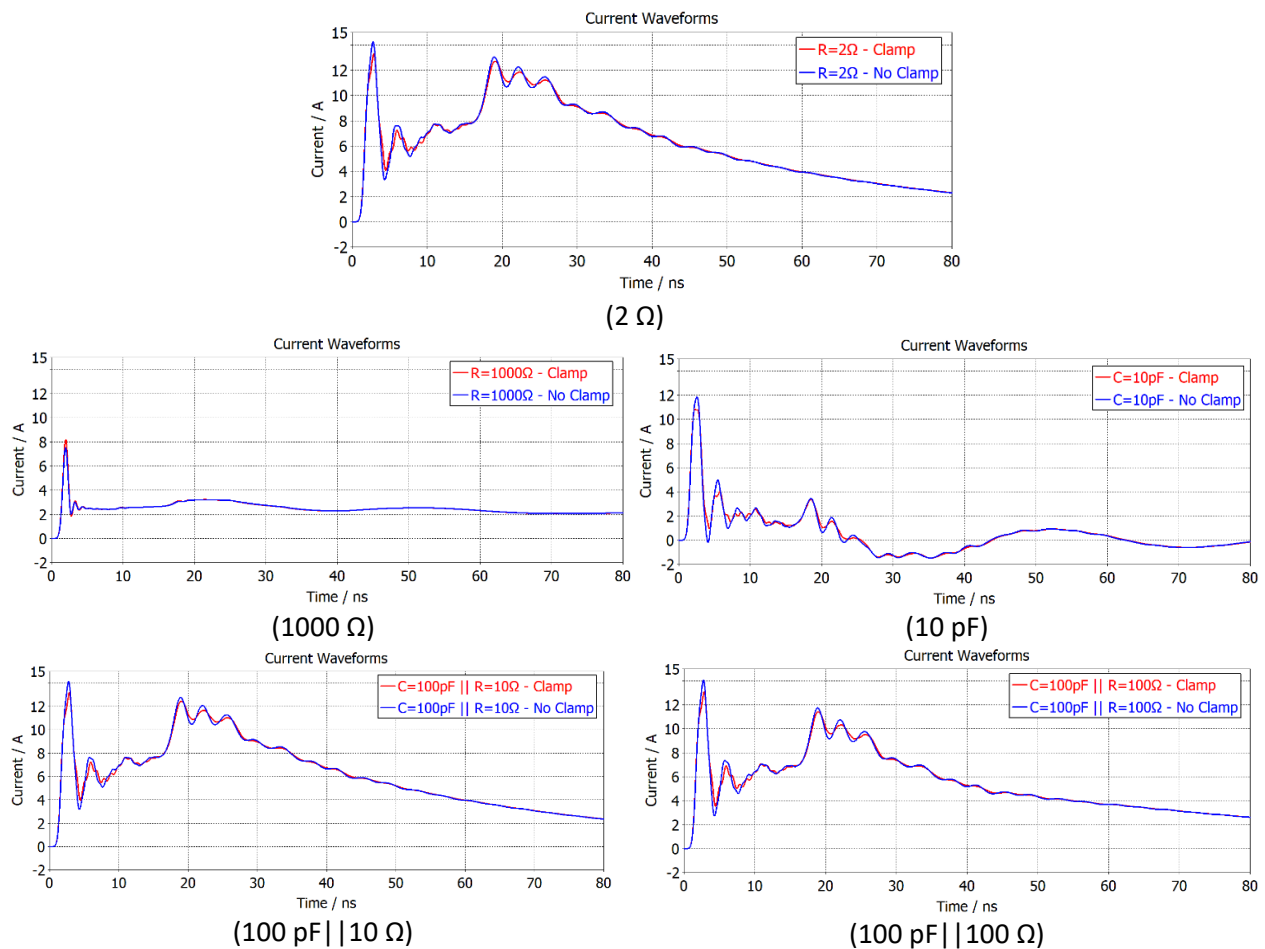
Σχήμα 2.61: Κοντινή απεικόνιση του μοντέλου προσομοίωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito και του ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην [50], εξετάστηκαν τέσσερις επιπλέον τιμές σύνθετης αντίστασης φορτίου:

- $R = 1000 \Omega$
- $C = 10 \text{ pF}$
- $100 \text{ pF} \parallel 10 \Omega$
- $100 \text{ pF} \parallel 100 \Omega$

Οι τιμές αυτές επελέγησαν ως αντιπροσωπευτικές ρεαλιστικών συνθηκών που είναι πιθανό να προκύψουν κατά τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για κάθε διαμόρφωση εκτελέστηκαν δύο προσομοιώσεις: (α) με τον ανιχνευτή ρεύματος τοποθετημένο γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας και (β) χωρίς την παρουσία του ανιχνευτή.

Τα αποτελέσματα (Σχήμα 2.62) ανέδειξαν σαφή επίδραση του ανιχνευτή στην παράμετρο I_p της κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως κατά το πρώτο χρονικό διάστημα έως τα 10 ns, καθώς και διακριτή επιρροή στο μεσαίο τμήμα του παλμού μεταξύ 15 ns και 30 ns. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν τη σημασία της εμπειριστατωμένης αξιολόγησης του φαινομένου φόρτωσης ανιχνευτή, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψίσυχνων δοκιμών, όπου ακόμη και μικρές αποκλίσεις ενδέχεται να επηρεάσουν κρίσιμες παραμέτρους και να επιφέρουν σφάλματα στην εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς των υπό δοκιμή συστημάτων.

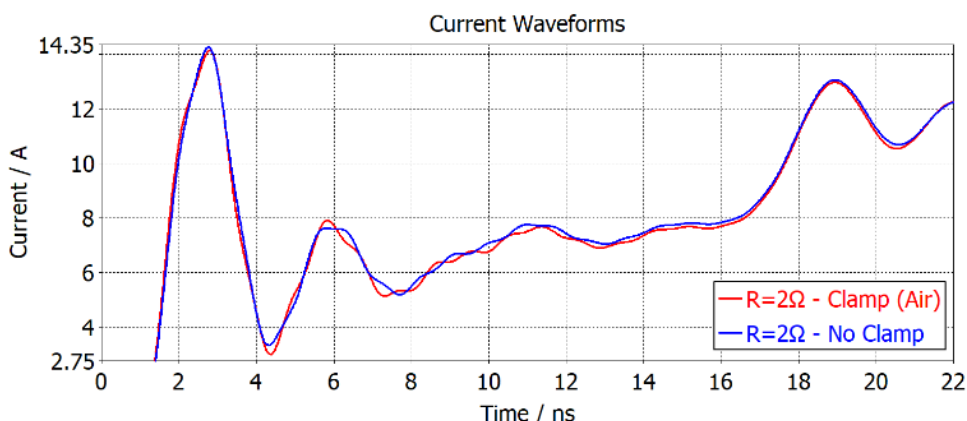


Σχήμα 2.62: Αποτελέσματα προσομοίωσης για διαφορετικά είδη σύνθετης αντίστασης φορτίου

2.5.4. Διερεύνηση της επίδρασης του πυρήνα φερρίτη του ανιχνευτή ρεύματος

Για την ακριβέστερη διάκριση μεταξύ της επίδρασης του φερρίτη του ανιχνευτή και της ενδεχόμενης γεωμετρικής επίδρασης που μπορεί να προκαλεί η παρουσία του ανιχνευτή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το υλικό του φερρίτη αντικαταστάθηκε στην προσομοίωση με αέρα. Η κυματομορφή που προέκυψε από αυτή την τροποποιημένη προσομοίωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.63.

Η παρατηρούμενη επίδραση μειώθηκε αισθητά και περιορίστηκε χρονικά στο διάστημα από 4 ns έως 12 ns, γεγονός που επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι ο κύριος παράγοντας παραμόρφωσης της κυματομορφής είναι ο φερρίτης και η ενεργειακά απορροφητική συμπεριφορά του στις υψίσυχνες συνιστώσες του παλμού.



Σχήμα 2.63: Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά την αντικατάσταση του υλικού του φερρίτη με αέρα

2.5.5. Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα τεκμηριώνει πειραματικά την επίδραση του φαινομένου φόρτωσης ανιχνευτή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όταν ανιχνευτής ρεύματος τοποθετείται γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας. Από την ανάλυση 100 επαναλήψεων για κάθε σενάριο μέτρησης, επιβεβαιώθηκε ότι η παρουσία του ανιχνευτή επιφέρει μικρές αποκλίσεις, οι οποίες εμφανίζονται κυρίως στην παράμετρο I_p με μείωση περίπου 3%, ενώ στα μεταγενέστερα τμήματα της κυματομορφής η επίδραση περιορίζεται γύρω στο 1,5%.

Η μείωση στο μεταφερόμενο φορτίο και στην ισχύ του φάσματος συχνοτήτων συνάδει με προηγούμενες έρευνες, οι οποίες περιγράφουν τον ανιχνευτή ως στοιχείο με απορροφητική συμπεριφορά, λόγω των μαγνητικών απωλειών του φερρίτη σε συχνότητες άνω των 150 MHz. Οι ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις κατέδειξαν ότι η κύρια αιτία παραμόρφωσης της κυματομορφής προέρχεται κυρίως από τις μαγνητικές ιδιότητες του φερρίτη και όχι από τη γεωμετρική παρουσία του ανιχνευτή. Η ποσοτική αξιολόγηση του φαινομένου φόρτωσης μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη στρατηγικών αντιστάθμισης, όπως η ρύθμιση του επιπέδου δοκιμής, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μικρές ενεργειακές απώλειες που εισάγει ο ανιχνευτής. Μελλοντικές εργασίες μπορούν να επεκταθούν σε διαφορετικές γεννήτριες και ανιχνευτές για τη διερεύνηση της καθολικότητας του φαινομένου και τη βελτίωση των μεθόδων αντιστάθμισης.

Η συμβολή της παρούσας ενότητας στη συγκεκριμένη διατριβή είναι καθοριστική, καθώς τεκμηριώνει με πειραματικά και υπολογιστικά δεδομένα ότι, παρά το φαινόμενο φόρτωσης ανιχνευτή, οι αποκλίσεις

που παρατηρούνται είναι περιορισμένες και διαχειρίσιμες. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της μεθοδολογίας αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, η οποία αναπτύχθηκε στην Ενότητα 2.2, χωρίς σημαντικό κίνδυνο σφάλματος λόγω της παρουσίας του ανιχνευτή, αξιοποιώντας τα αριθμητικά μοντέλα και τις γνώσεις που αποκτήθηκαν στις Ενότητες 2.3 και 2.4.

Κεφάλαιο 3: Βελτιστοποίηση της κυματομορφής έγχυσης γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση φερριτών αρπάγης

Το Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής πραγματεύεται μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες της μελέτης, εστιάζοντας στις επιπτώσεις της αναθεωρημένης Έκδοσης 3 (2025) του προτύπου IEC 61000-4-2 [27], η οποία εισάγει αυστηρότερες απαιτήσεις για την κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με κύρια καινοτομία την παράμετρο I_{p2} . Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιείται πειραματική σύγκριση μεταξύ των δύο εκδόσεων του Προτύπου και διερευνάται κατά πόσο οι υφιστάμενες γεννήτριες συμμορφώνονται με τις νέες προδιαγραφές. Παράλληλα, το κεφάλαιο παρουσιάζει μία καινοτόμο προσέγγιση περιορισμού των αποκλίσεων μέσω της χρήσης φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης, αναλύοντας συστηματικά την αποτελεσματικότητά τους και προτείνοντας μεθοδολογία επιλογής κατάλληλου φερρίτη για κάθε εφαρμογή.

3.1. Συγκριτική ανάλυση της διαδικασίας διακρίβωσης μεταξύ της δεύτερης και τρίτης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2

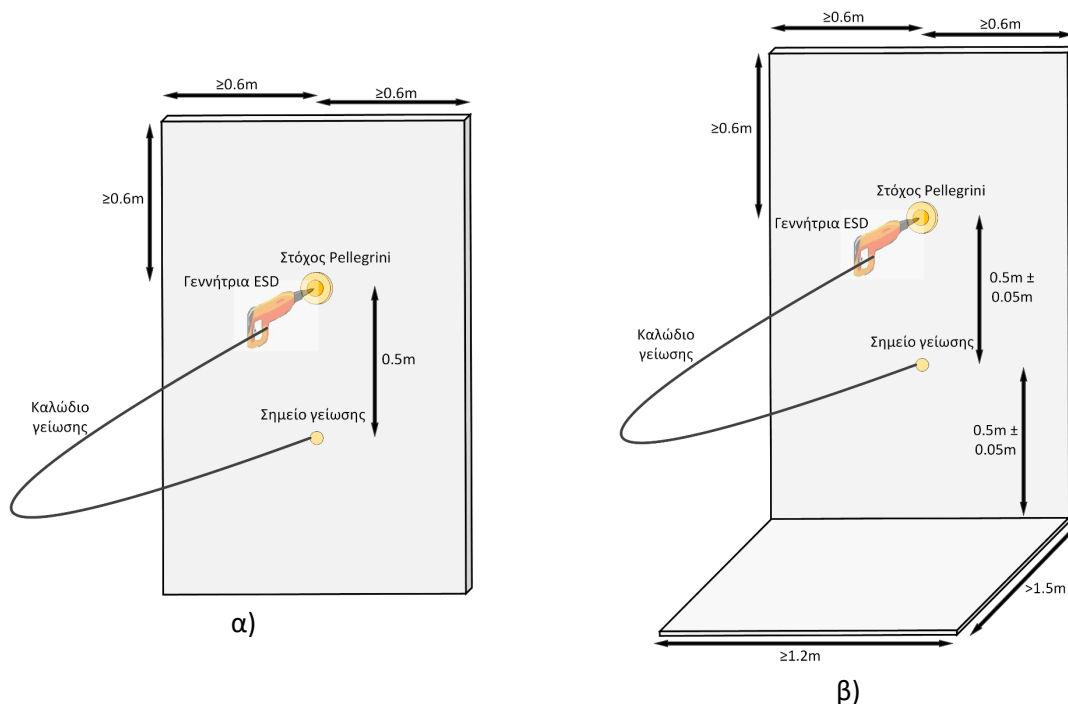
Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκε αναλυτικά η δεύτερη έκδοση (2008) του προτύπου IEC 61000-4-2 [26], καθώς και οι ουσιαστικές τροποποιήσεις που εισήχθησαν με την οριστικοποιημένη πλέον τρίτη έκδοση 3 (2025). Οι αλλαγές αυτές αφορούν κυρίως τη διαδικασία διακρίβωσης και στοχεύουν στη βελτίωση της επαναληψιμότητας και της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ιδίως σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων που επηρεάζουν καθοριστικά τη συμπεριφορά των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Μεταξύ των σημαντικότερων διαφοροποιήσεων της νέας έκδοσης περιλαμβάνονται η απαίτηση ύπαρξης οριζόντιου επιπέδου γης με καθορισμένες διαστάσεις και προσδιορισμένη απόσταση σύνδεσης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας, γεγονός που αφενός μεταβάλλει ουσιαστικά τη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης και αφετέρου βελτιώνει την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών. Παράλληλα, εισάγεται η υποχρέωση η διακρίβωση να πραγματοποιείται με τοποθετημένο το άκρο εκφόρτισης αέρα, ακόμη και όταν η γεννήτρια λειτουργεί σε καθεστώς εκφόρτισης επαφής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές στη γεωμετρία και στις ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ διαφορετικών γεννητριών. Επιπλέον, καθιερώνεται η νέα παράμετρος I_{p2} , η οποία αφορά τη μέγιστη τιμή του ρεύματος εντός του χρονικού παραθύρου από 10 ns έως 40 ns, με στόχο τον αναλυτικότερο χαρακτηρισμό της περιοχής μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης αιχμής, περιοχή στην οποία συχνά εντοπίζονται κρίσιμες διαφοροποιήσεις μεταξύ διαφορετικών γεννητριών.

Στόχος της παρούσας ενότητας είναι η πειραματική και ποσοτική σύγκριση ανάμεσα στις δύο εκδόσεις του προτύπου, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των νέων απαιτήσεων τόσο στη διαδικασία διακρίβωσης όσο και στα μετρούμενα χαρακτηριστικά της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η ανάλυση επικεντρώνεται σε εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, με σκοπό να διερευνηθεί κατά πόσο οι αποκλίσεις που καταγράφονται

δύνανται να προκαλέσουν προβλήματα συμμόρφωσης με τη νέα Έκδοση 3, γεγονός που θα έχει ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργία διαπιστευμένων εργαστηρίων και την αναπαραγωγιμότητα των δοκιμών, καθώς ενδέχεται να απαιτηθεί είτε αντικατάσταση των γεννητριών είτε εκτεταμένη τροποποίησή τους, με αντίστοιχη σημαντική οικονομική επιβάρυνση για κάθε εργαστήριο.

Για την υλοποίηση της συγκριτικής μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ακολουθώντας πιστά τις δύο διαφορετικές διατάξεις διακρίβωσης που ορίζονται στο Πρότυπο και οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Διάταξη διακρίβωσης σύμφωνα με την: α) Έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26] και β) Έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]

3.1.1. Εξοπλισμός πειράματος και διαδικασία μέτρησης

Σε πρώτο στάδιο, οι μετρήσεις υλοποιήθηκαν με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων EM Test Dito, χρησιμοποιώντας τον παλμογράφο Tektronix TDS 7254B και τον ομοαξονικό προσαρμογέα Teseq MD 103. Όλος ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είχε διακριβωθεί εντός του τρέχοντος έτους. Η τάση δοκιμής καθορίστηκε στα 4 kV , ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις δύο πολικότητες της εκφόρτισης (θετική και αρνητική), με στόχο τη διερεύνηση ενδεχόμενων διαφορών στη συμπεριφορά της γεννήτριας. Στο πλαίσιο της διακρίβωσης, εκτελέστηκαν τρεις διακριτές σειρές μετρήσεων, ενώ για κάθε σειρά μετρήσεων καταγράφηκαν συνολικά 20 κυματομορφές, κατανεμημένες ισόποσα στις δύο πολικότητες, προκειμένου να διασφαλιστεί η στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.:

- Σειρά (α): Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής, με άκρο επαφής, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της προηγούμενης Έκδοσης 2 του προτύπου (Σχήμα 3.2α)
- Σειρά (β): Η γεννήτρια σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής, επίσης με άκρο επαφής, αλλά διακριβωμένη σύμφωνα με τις απαιτήσεις της νέας Έκδοσης 3 (Σχήμα 3.2β)

- Σειρά (γ): Η γεννήτρια σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής, με τοποθετημένο το άκρο εκφόρτισης αέρα, όπως ορίζει η νέα έκδοση του Προτύπου (Σχήμα 3.3)



α)



β)

Σχήμα 3.2: Πειραματική διάταξη μέτρησης σύμφωνα με την: α) Έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26] και β) Έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]

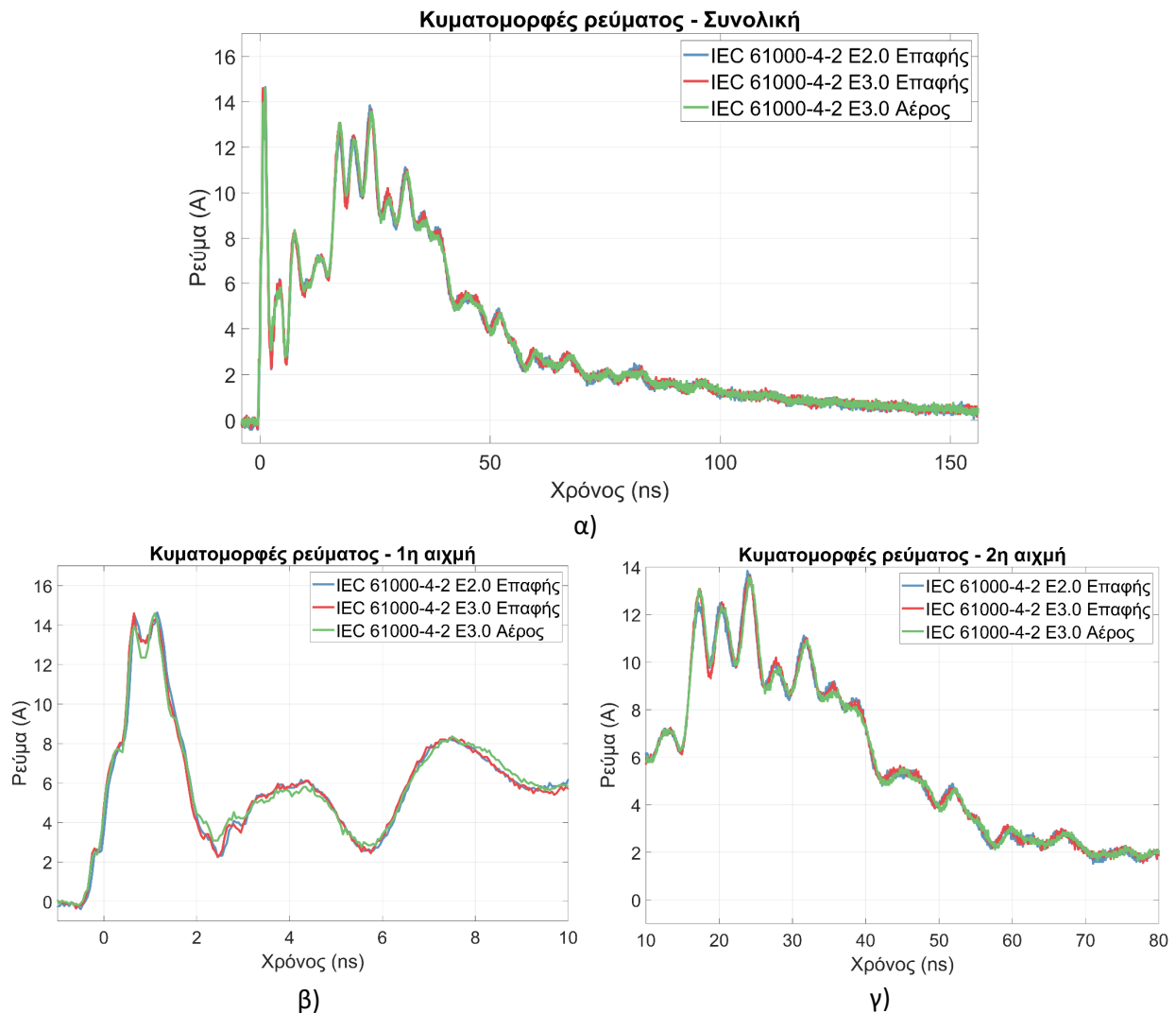


Σχήμα 3.3: Διακρίβωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με το άκρο εκφόρτισης αέρος

3.1.2. Καταγεγραμμένες κυματομορφές και αποτελέσματα μετρήσεων

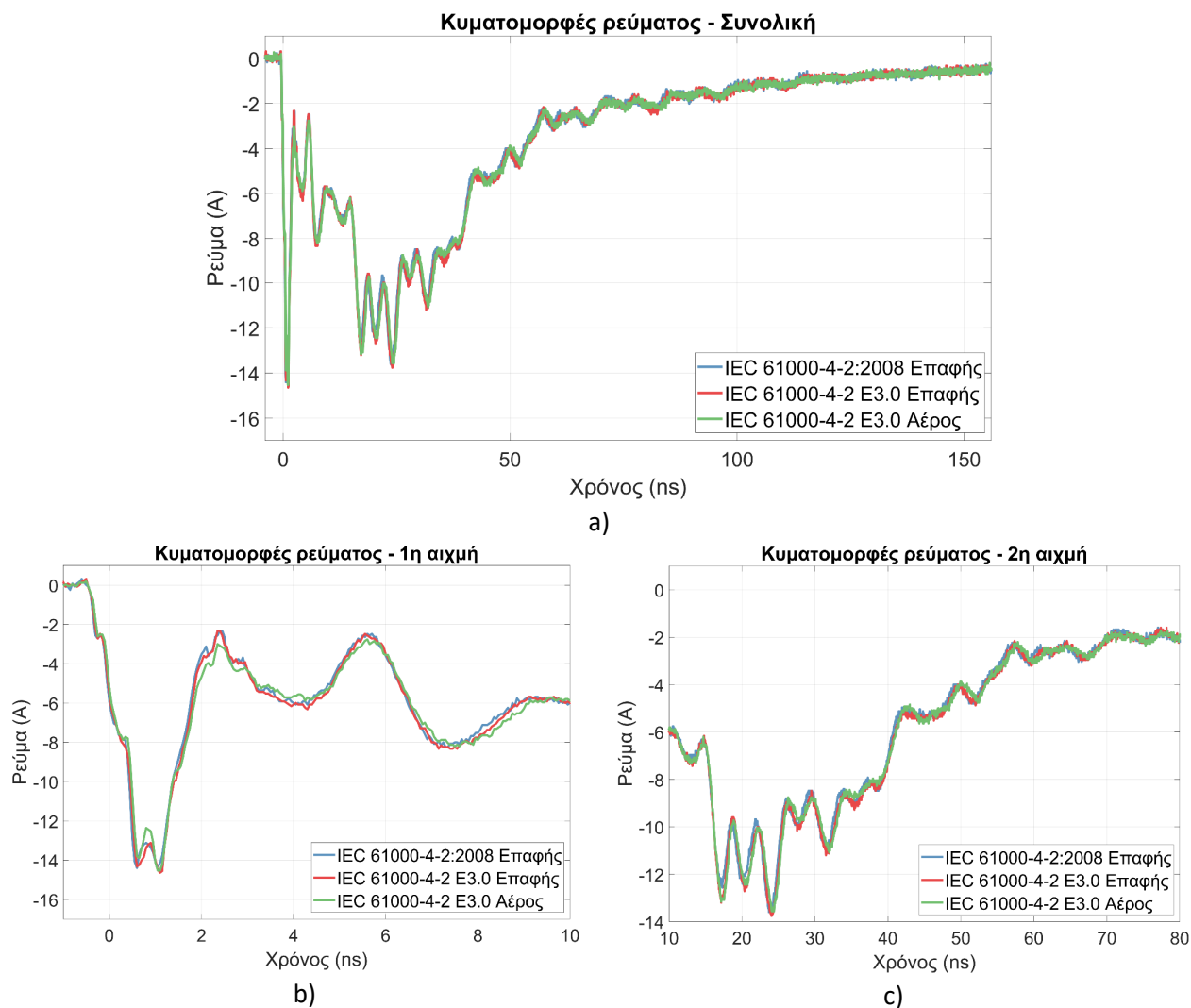
3.1.2.1. Καταγεγραμμένες κυματομορφές

Στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζονται ενδεικτικές καταγεγραμμένες κυματομορφές από κάθε σειρά μετρήσεων. Το Σχήμα 3.4α απεικονίζει το πλήρες χρονικό εύρος της καταγραφής για το επίπεδο τάσης δοκιμής +4 kV, ενώ τα Σχήματα 3.4β και 3.4γ παρουσιάζουν μεγεθυσμένες προβολές των κυματομορφών, εστιάζοντας αντίστοιχα στο αρχικό τμήμα του παλμού (συμπεριλαμβανομένης της πρώτης αιχμής) και στο τελικό τμήμα (συμπεριλαμβανομένης της δεύτερης αιχμής).



Σχήμα 3.4: Καταγεγραμμένες κυματομορφές ρεύματος για το επίπεδο δοκιμής +4 kV: (α) πλήρες χρονικό εύρος (-4 ns έως 156 ns), (β) πρώτο τμήμα της κυματομορφής (έως 10 ns), (γ) δεύτερο τμήμα της κυματομορφής (10 ns έως 80 ns) για τη Σειρά (α) [μπλε γραμμή], τη Σειρά (β) [κόκκινη γραμμή] και τη Σειρά (γ) [πράσινη γραμμή].

Όπως διαφαίνεται από τις μεγεθυμένες απεικονίσεις, παρατηρούνται αποκλίσεις, κυρίως μεταξύ των παλμών που παράγονται με το άκρο επαφής και εκείνων με το άκρο εκφόρτισης αέρα. Επιπλέον, εντοπίζονται διαφορές μεταξύ των Σειρών (α) και (β) στο χρονικό διάστημα περίπου μεταξύ 17 ns και 25 ns. Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει αντίστοιχα τις καταγεγραμμένες κυματομορφές και τις μεγεθυμένες προβολές για παλμούς αρνητικής πολικότητας από κάθε σειρά μετρήσεων. Και σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ των τριών κυματομορφών, υποδηλώνοντας τη δυνητική επίδραση των διαφοροποιήσεων που εισάγονται από τις νέες απαιτήσεις του Προτύπου.



Σχήμα 3.5: Καταγεγραμμένες κυματομορφές ρεύματος για το επίπεδο δοκιμής -4 kV: (α) πλήρες χρονικό εύρος (-4 ns έως 156 ns), (β) πρώτο τμήμα της κυματομορφής (έως 10 ns), (c) δεύτερο τμήμα της κυματομορφής (10 ns έως 80 ns) για τη Σειρά (α) [μπλε γραμμή], τη Σειρά (β) [κόκκινη γραμμή] και τη Σειρά (γ) [πράσινη γραμμή].

3.1.2.2. Συγκριτικά αποτελέσματα μετρήσεων

Οι επόμενοι Πίνακες παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις παραμέτρους της κυματομορφής εκφόρτισης, όπως αυτές καθορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Ειδικότερα, παρατίθενται οι τιμές τόσο για τις παραμέτρους που ισχύουν στην υφιστάμενη Έκδοση 2 (I_P , t_r , I_{30} , I_{60}), όσο και για τη παράμετρο I_{P2} που εισήχθη στη Έκδοση 3.

Σε κάθε Πίνακα περιλαμβάνονται: (α) οι οριακές τιμές και οι επιτρεπτές αποκλίσεις που καθορίζονται από το Πρότυπο για κάθε κυματομορφική παράμετρο, (β) η μετρούμενη τιμή, δηλαδή ο μέσος όρος από τις δέκα επαναλήψεις, (γ) η απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την ιδανική τιμή που ορίζει το Πρότυπο, και (δ) η τιμή της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας για κάθε σύνολο μετρήσεων, όπως υπολογίστηκε μέσω της Εξίσωσης (18).

Μέγιστο ρεύμα 1^{ης} αιχμής (I_p)

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.1 καταδεικνύουν ότι δεν παρατηρείται ουσιώδης μεταβολή στην απόκλιση από την ιδανική τιμή που καθορίζει το Πρότυπο ($15 \text{ A} \pm 15\%$ στα 4 kV), τόσο για παλμούς θετικής όσο και αρνητικής πολικότητας. Επιπλέον, η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας παραμένει σταθερή και εντός αποδεκτών ορίων και για τις τρεις περιπτώσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της διαδικασίας διακρίβωσης και τη συνέπεια των μετρήσεων, ανεξαρτήτως της εκάστοτε διάταξης σύμφωνα με το Πρότυπο.

Πίνακας 3.1: Συγκριτικά αποτελέσματα των υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής: μέγιστο ρεύμα 1^{ης} αιχμής

+4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	12,75 - 17,25	14,57	-2,88	0,49
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	12,75 - 17,25	14,53	-3,15	0,36
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	12,75 - 17,25	14,42	-3,89	0,25
-4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	-17,25 - -12,75	-14,46	-3,57	-0,35
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	-17,25 - -12,75	-14,66	-2,24	-0,26
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	-17,25 - -12,75	-14,54	-3,04	-0,22

Χρόνος ανόδου 1^{ης} αιχμής (t_r)

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.2 αναδεικνύουν μία μικρή αύξηση στην απόκλιση από την ιδανική τιμή ($0,8 \text{ ns} \pm 25\%$ στα 4 kV) στις εκφορτίσεις που πραγματοποιούνται με τον ακροδέκτη εκφόρτισης αέρα, ενώ η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας παραμένει πρακτικά αμετάβλητη και εντός αποδεκτών ορίων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί αφενός στη διαφοροποιημένη γεωμετρία του ηλεκτροδίου εκφόρτισης και αφετέρου στη μη ιδανική σύνδεση μεταξύ του ηλεκτροδίου και του στόχου ρεύματος τύπου Pellegrini. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4, η σύνδεση του ακροδέκτη εκφόρτισης αέρα εμφανίζει μειωμένη μηχανική σταθερότητα και είναι περισσότερο ευαίσθητη σε μικρομετατοπίσεις, συγκριτικά με τον ακροδέκτη επαφής.

Πίνακας 3.2: Συγκριτικά αποτελέσματα των υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής: χρόνος ανόδου πρώτης αιχμής

+4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[ns]	[ns]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	0,600 - 1,000	0,869	8,65	0,24
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	0,600 - 1,000	0,865	8,11	0,28
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	0,600 - 1,000	0,881	10,11	0,18

-4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[ns]	[ns]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	0,600 - 1,000	0,872	8,97	0,29
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	0,600 - 1,000	0,873	9,13	0,28
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	0,600 - 1,000	0,884	10,56	0,36

Μέγιστο ρεύμα μεταξύ 10 ns και 40 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έλαβε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του (I_{p2})

Τα αποτελέσματα για τη νέα αυτή παράμετρο (9 A -20%/+40% στα 4 kV), η οποία εισάγεται στην Έκδοση 3 του Προτύπου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τιμή της δεν επηρεάζεται από την προσθήκη του οριζόντιου επιπέδου αναφοράς γης, όταν χρησιμοποιείται ο ακροδέκτης επαφής. Ωστόσο, παρατηρείται μικρή μείωση στην μετρούμενη τιμή όταν χρησιμοποιείται ο ακροδέκτης εκφόρτισης αέρα.

Πίνακας 3.3: Συγκριτικά αποτελέσματα των υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής: μέγιστο ρεύμα μεταξύ 10 ns και 40 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έλαβε για πρώτη φορά το 10 % της μέγιστης τιμής του

+4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	7,20 - 12,60	13,82	53,60	0,14
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	7,20 - 12,60	13,70	52,18	0,21
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	7,20 - 12,60	13,53	50,31	0,16

-4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	-12,60 - -7,20	-13,72	52,44	-0,18
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	-12,60 - -7,20	-13,75	52,80	-0,20
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	-12,60 - -7,20	-13,52	50,22	-0,20

Το σημαντικότερο εύρημα, όπως καταδεικνύεται από τον Πίνακα 3.3, αφορά τη σημαντική απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την ιδανική τιμή που καθορίζει το Πρότυπο. Οι αποκλίσεις αυτές υπερβαίνουν αισθητά τα όρια ανοχής (+40 %), τόσο για παλμούς θετικής όσο και αρνητικής πολικότητας. Το γεγονός αυτό εγείρει σοβαρές ανησυχίες, καθώς ενδέχεται να οδηγήσει σε αποτυχία συμμόρφωσης κατά τη διακρίβωση σύμφωνα με τη νέα έκδοση του Προτύπου. Παρά τις υψηλές αποκλίσεις, η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας παραμένει και για την παράμετρο αυτή σε αποδεκτά επίπεδα.

Ρεύμα στα 30 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έφτασε για πρώτη φορά το 10 % της μέγιστης τιμής του (I_{30})

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.4, δεν διαπιστώνεται ουσιώδης μεταβολή στις μετρούμενες τιμές για τις τρεις περιπτώσεις μετρήσεων αναφορικά με παλμούς θετικής πολικότητας, σε

σχέση με την ιδανική τιμή των 8 A ($\pm 30\%$) που ορίζει το Πρότυπο. Αντιθέτως, στους παλμούς αρνητικής πολικότητας καταγράφεται μικρή αύξηση (σε απόλυτες τιμές) στην Έκδοση 3 του Προτύπου, τόσο κατά τη χρήση ακροδέκτη επαφής όσο και ακροδέκτη αέρα. Οι τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας παραμένουν χαμηλές ($< 1\%$) και δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών μέτρησης.

Πίνακας 3.4: Συγκριτικά αποτελέσματα των υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής: ρεύμα στα 30 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έλαβε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του

+4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	5,60 - 10,40	8,64	8,04	0,21
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	5,60 - 10,40	8,69	8,66	0,27
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	5,60 - 10,40	8,67	8,40	0,37
-4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	-10,40 - -5,60	-8,64	8,02	-0,19
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	-10,40 - -5,60	-8,81	10,12	-0,33
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	-10,40 - -5,60	-8,79	9,85	-0,34

Ρεύμα στα 60 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έφτασε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του (I_{60})

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.5, η συγκεκριμένη παράμετρος επηρεάζεται αισθητά από την προσθήκη του οριζόντιου επιπέδου γης που εισάγεται στη νέα έκδοση του Προτύπου. Καταγράφεται αύξηση της τάξης του 4–5 % (σε απόλυτες τιμές) τόσο για παλμούς θετικής όσο και αρνητικής πολικότητας, σε σχέση με την ιδανική τιμή των 4 A ($\pm 30\%$) που ορίζει το Πρότυπο. Η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας εμφανίζει μόνο οριακές μεταβολές και παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων, επιβεβαιώνοντας τη σταθερότητα της διαδικασίας διακρίβωσης υπό τις νέες συνθήκες.

Πίνακας 3.5: Συγκριτικά αποτελέσματα των υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής: ρεύμα στα 60 ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα έλαβε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του

+4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	2,80 - 5,20	2,84	-29,04	0,21
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	2,80 - 5,20	3,01	-24,63	0,72
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	2,80 - 5,20	3,00	-24,98	0,95

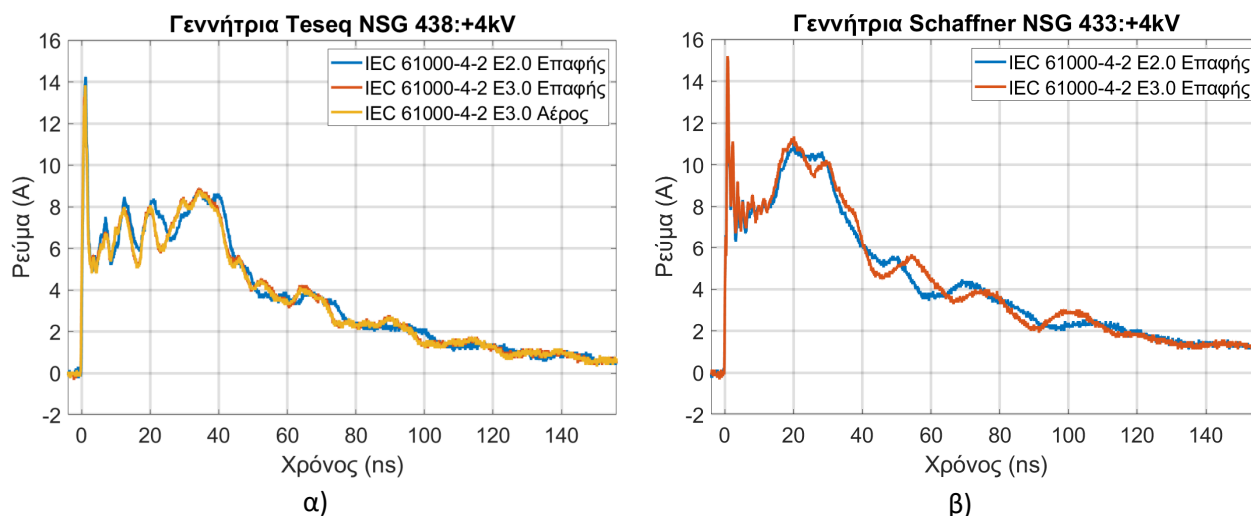
-4kV				
Διάταξη διακρίβωσης	Οριακές Τιμές Προτύπου	Μετρούμενη Τιμή	Απόκλιση από την Ιδανική Τιμή	Αβεβαιότητα Επαναληψιμότητας
	[A]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 E2.0 Επαφής	-5,20 - -2,80	-2,88	-27,89	-1,18
IEC 61000-4-2 E3.0 Επαφής	-5,20 - -2,80	-3,10	-22,56	-0,56
IEC 61000-4-2 E3.0 Αέρος	-5,20 - -2,80	-3,07	-23,35	-0,53

3.1.3. Επέκταση της συγκριτικής διερεύνησης στις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων Teseq NSG 438 και Schaffner NSG 433

Στο πλαίσιο της διεύρυνσης της συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ της τρέχουσας Έκδοσης 2 και της νέας Έκδοσης 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον πειραματικές μετρήσεις σε δύο ακόμη γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που διαθέτει το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων: (i) τη γεννήτρια Teseq NSG 438 και (ii) τη γεννήτρια Schaffner NSG 433.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν και για τα δύο σενάρια μέτρησης, με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά των συγκεκριμένων γεννητριών σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις και τις τροποποιήσεις της Έκδοσης 3. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος για εκφορτίσεις θετικής πολικότητας στο επίπεδο τάσης +4 kV (Σχήμα 3.7, παρέχοντας άμεση οπτική σύγκριση μεταξύ των δύο εκδόσεων του Προτύπου.

Παράλληλα, στους σχετικούς πίνακες (Πίνακας 3.6 και Πίνακας 3.7) παρατίθενται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα για δύο κρίσιμες παραμέτρους που αφορούν το φθίνον σκέλος της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής, συγκεκριμένα τις τιμές I_{30} (για τη γεννήτρια Teseq NSG 438) και I_{60} (για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433). Όπως καταδεικνύεται και από τα αντίστοιχα σχήματα, οι δύο αυτές παράμετροι εμφανίζουν αισθητές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο διατάξεων μέτρησης, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της αναθεώρησης του Προτύπου για την ακριβέστερη αποτύπωση της συμπεριφοράς των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.



Σχήμα 3.6: Σύγκριση κυματομορφών ρεύματος μεταξύ των δύο εκδόσεων του Προτύπου IEC 61000-4-2 για α) τη γεννήτρια Teseq NSG 438 και β) τη γεννήτρια Schaffner NSG 433

Πίνακας 3.6: Μέσες τιμές της παραμέτρου I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], [27] για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου	Έκδοση 2 (Επαφής)	Έκδοση 3 (Επαφής)	Απόκλιση (Επαφής)	Έκδοση 3 (Αέρος)	Απόκλιση (Αέρος)
[kV]	[A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]
+2	2,80 – 5,20	3,712	4,019	8,309	3,991	7,544
-2	-5,20 – -2,80	-3,814	-4,190	-9,872	-4,307	-12,94
+4	5,60 – 10,40	7,557	8,203	8,554	8,325	10,16
-4	-10,40 – -5,60	-7,637	-8,416	-10,218	-8,555	-12,04
+6	8,40 – 15,60	11,64	12,79	9,962	12,86	10,58
-6	-15,60 – -8,40	-11,72	-12,46	-6,316	-13,00	-10,97
+8	11,20 – 20,80	15,56	17,08	9,753	17,17	10,32
-8	-20,80 – -11,20	-15,83	-17,38	-9,832	-17,46	-10,34

Πίνακας 3.7: Μέσες τιμές της παραμέτρου I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], [27] για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου	Έκδοση 2 (Επαφής)	Έκδοση 3 (Επαφής)	Απόκλιση (Επαφής)
[kV]	[A]	[A]	[A]	[%]
+2	1,40 – 2,60	1,722	1,947	13,17
-2	-2,60 – -1,40	-1,960	-2,226	-14,16
+4	2,80 – 5,20	3,694	4,260	15,33
-4	-5,20 – -2,80	-3,826	-4,676	-22,26
+6	4,20 – 7,80	5,822	6,839	17,57
-6	-7,80 – -4,20	-6,002	-7,182	-19,73
+8	5,60 – 10,40	7,639	8,703	13,97
-8	-10,40 – -5,60	-7,678	-8,767	-14,22

Από την ανάλυση των Πινάκων 3.6 και 3.7 προκύπτει ότι οι τιμές της παραμέτρου I_{30} και της παραμέτρου I_{60} εμφανίζουν συστηματικά υψηλότερες τιμές στη νέα Έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27], σε σύγκριση με την προηγούμενη Έκδοση 2 [26]. Οι αποκλίσεις κυμαίνονται γύρω στο 8 – 10% για την παράμετρο I_{30} , ενώ για την παράμετρο I_{60} παρατηρούνται ακόμη μεγαλύτερες διαφορές, οι οποίες φθάνουν ή και υπερβαίνουν το 20% σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδίως για τις αρνητικές πολικότητες.

Τα ευρήματα αυτά υποδεικνύουν ότι οι αλλαγές στη νέα έκδοση, όπως η προσθήκη του οριζόντιου επιπέδου γης και οι νέες απαιτήσεις βαθμονόμησης, επηρεάζουν κυρίως το φθίνον σκέλος της κυματομορφής, επιδρώντας στην σύνθετη αντίσταση του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας και κατά συνέπεια στις ταλαντώσεις του δεύτερου σκέλους της κυματομορφής. Παρότι οι τιμές παραμένουν εντός των ορίων ανοχής του Προτύπου, οι αποκλίσεις αυτές εγείρουν ανησυχίες, καθώς ενδέχεται ορισμένες εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες που συμμορφώνονται με την Έκδοση 2 να μην πληρούν πλήρως τις αυστηρότερες απαιτήσεις της Έκδοσης 3, επηρεάζοντας έτσι την αναπαραγωγικότητα των δοκιμών.

3.1.4. Συμπεράσματα και συζήτηση

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής καταγράφηκαν κυματομορφές κατά τη διαδικασία διακρίβωσης για επίπεδο τάσης δοκιμής ± 4 kV, σύμφωνα τόσο με την προηγούμενη Έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26] όσο και με τη νέα Έκδοση 3 [27], οδηγώντας σε συγκριτική ανάλυση των υπολογισθέντων παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τα

αποτελέσματα ανέδειξαν ότι εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες συμμορφώνονται πλήρως με τις απαιτήσεις της προηγούμενης Έκδοσης 2 του Προτύπου [26], ενδέχεται να μην συμμορφώνονται με τη νέα Έκδοση 3 [27] και ειδικότερα ως προς τις παραμέτρους I_{P2} και I_{60} .

Η προσθήκη του οριζοντίου επιπέδου γης στη νέα έκδοση δεν φαίνεται να επηρεάζει ουσιωδώς την πρώτη αιχμή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενδέχεται όμως να προκαλεί διαφοροποιήσεις στο φθίνον σκέλος της κυματομορφής, δηλαδή μετά τα 30 ns.

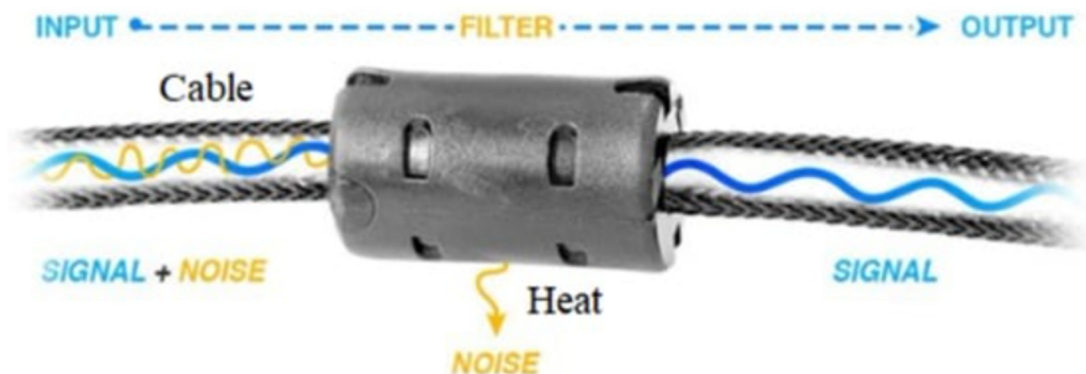
Επιπλέον, διερευνήθηκε η απαίτηση της Έκδοσης 3 [27] για διακρίβωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με το άκρο εκφόρτισης αέρα προσαρτημένο, ακόμη και όταν η γεννήτρια λειτουργεί σε καθεστώς εκφόρτισης επαφής. Διαπιστώθηκε σημαντική απόκλιση στον χρόνο ανόδου της πρώτης αιχμής, χωρίς ωστόσο να σημειώνεται υπέρβαση των ορίων ανοχής που θέτει το Πρότυπο. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται κυρίως στη διαφορετική γεωμετρία του ακροδέκτη εκφόρτισης αέρα και στη μη ιδανική ηλεκτρική σύνδεσή του με τον στόχο ρεύματος τύπου Pellegrini.

Ως μελλοντική εργασία προτείνεται η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα δεδομένα από άλλες εμπορικά διαθέσιμες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με στόχο την επαλήθευση της γενικότητας των παρατηρούμενων αποκλίσεων. Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση αναφορικά με πιθανές τεχνικές τροποποιήσεις των γεννητριών, ώστε να αντιμετωπιστούν τα καταγεγραμμένα ζητήματα και να διασφαλιστεί η αναπαραγωγικότητα των δοκιμών.

3.2. Οι φερρίτες αρπάγης ως καταστολείς διαταραχών και εργαλεία βελτιστοποίησης των κυματομορφών ρεύματος έγχυσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

3.2.1. Οι φερρίτες αρπάγης ως καταστολείς διαταραχών

Κατά τη διάρκεια δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, ανακύπτει συχνά η ανάγκη θωράκισης καλωδίων ή εντοπίζονται μη αναμενόμενες πηγές παρεμβολών, ιδίως όταν οι συσκευές συνδέονται με εξωτερικές μονάδες [92]. Σε περιπτώσεις όπου τα καλώδια μετατρέπονται σε πηγή ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών, γεγονός που ενδέχεται να οδηγήσει σε αποτυχία κατά τις δοκιμές εκπομπών, είτε αγωγίμων είτε ακτινοβολούμενων, μία από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές αντιμετώπισης είναι η χρήση φερριτών αρπάγης (Σχήμα 3.7), οι οποίοι περιορίζουν αποτελεσματικά αυτές τις εκπομπές [105].



Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας του φερρίτη ως φίλτρο θορύβου [106]

Η αποτελεσματικότητα των φερριτών ως προς την καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών εξαρτάται από την ικανότητά τους να αυξάνουν την πυκνότητα της μαγνητικής ροής για δεδομένη ένταση μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από τον αγωγό. Η παρουσία ρευμάτων θορύβου σε έναν αγωγό δημιουργεί ανεπιθύμητα μαγνητικά πεδία, τα οποία μπορεί να αποτελέσουν πηγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [107]. Όταν ένας φερρίτης αρπάγης τοποθετείται περιμετρικά γύρω από τον αγωγό, το μαγνητικό πεδίο εγκλωβίζεται ως μαγνητική ροή στο εσωτερικό του φερρίτη, εξαιτίας της υψηλότερης μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού συγκριτικά με τον αέρα. Το γεγονός αυτό συμβάλλει στη μείωση των ρευμάτων θορύβου και, κατ' επέκταση, στην εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [108]. Τα ρεύματα που διαρρέουν καλώδια διακρίνονται σε ρεύματα διαφορικού τρόπου (Differential Mode) και σε ρεύματα κοινού τρόπου (Common Mode), ανάλογα με τη φορά ροής τους [109]. Αν και τα ρεύματα διαφορικού τρόπου είναι συνήθως υψηλότερης έντασης, οι σημαντικότερες ακτινοβολούμενες παρεμβολές αποδίδονται συχνά στα ρεύματα κοινού τρόπου που διαρρέουν τα καλώδια [110], [111]. Ακόμη και πολύ μικρές εντάσεις ρευμάτων κοινού τρόπου, της τάξεως των μA , αρκούν για να προκαλέσουν αποτυχία στις δοκιμές εκπομπών, γεγονός που καθιστά τον περιορισμό τους κρίσιμο για την επιτυχία των δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [105].

Η χρήση φερριτών, ιδίως τύπου αρπάγης (snap/clamp-on ferrites), αποτελεί ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδο καταστολής των ρευμάτων κοινού τρόπου. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7, όταν ο φερρίτης τοποθετείται περιμετρικά και στους δύο αγωγούς (αγωγό σήματος και αγωγό γείωσης), τα common mode ρεύματα που ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση παράγουν μαγνητικές ροές που αθροίζονται, ενισχύοντας τη δράση φιλτραρίσματος. Αντιθέτως, τα differential mode ρεύματα, τα οποία διαρρέουν τους δύο αγωγούς σε αντίθετες κατευθύνσεις, αλληλοαναιρούνται μαγνητικά, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται από την παρουσία του φερρίτη. Το χαρακτηριστικό αυτό συνιστά σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς διασφαλίζει ότι η λειτουργία του συστήματος παραμένει ανεπηρέαστη [112], [113].

Οι φερρίτες αρπάγης αποτελούνται από δύο ημικυκλικά τμήματα που ενώνονται μέσω μηχανισμού κουμπώματος (snap-on mechanism), γεγονός που διευκολύνει σημαντικά την εγκατάστασή τους ακόμη και στο τελικό στάδιο παραγωγής [114]. Ωστόσο, η απόδοση των φερριτών αρπάγης είναι συχνά χαμηλότερη σε σχέση με τους συμπαγείς πυρήνες ίδιου υλικού και διαστάσεων, λόγω της παρουσίας διακένου αέρα (air gap) μεταξύ των δύο τμημάτων του διαχωρισμένου πυρήνα. Το διάκενο αέρα οδηγεί σε μείωση της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και, κατά συνέπεια, σε χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση [115], [116]. Παρά ταύτα, η ύπαρξη ελεγχόμενου διακένου αέρα μπορεί να αποτελέσει πλεονέκτημα σε ορισμένες εφαρμογές, καθώς επιτρέπει τη διέλευση υψηλότερων συνεχών ρευμάτων χωρίς τον κίνδυνο κορεσμού του πυρήνα, γεγονός ιδιαίτερος σημαντικό σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως τροφοδοτικά και οδηγοί κινητήρων [117], [118].

Οι κατασκευαστές διαθέτουν ευρεία γκάμα φερριτών αρπάγης, τόσο ως προς τα υλικά όσο και ως προς τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, με συνηθέστερες επιλογές τους πυρήνες μαγγανιούχου-ψευδαργυρικού (MnZn) και νικελιούχου-ψευδαργυρικού (NiZn) φερρίτη [107], [119]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι νανοκρυσταλλικοί πυρήνες (nanocrystalline, NC), οι οποίοι χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Αν και παραδοσιακά η κατασκευή διαχωριζόμενων πυρήνων από νανοκρυσταλλικό υλικό ήταν τεχνικά δύσκολη λόγω της εύθραυστης δομής τους, πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις κατέστησαν δυνατή την παραγωγή τους μέσω εξειδικευμένων τεχνικών κοπής και συναρμολόγησης, ανοίγοντας νέες προοπτικές για τη χρήση τους ως snap ferrites [118], [120], [121].

Παρά τα ενδεχόμενα μειονεκτήματα κόστους ή πολυπλοκότητας στην παραγωγή, οι φερρίτες αρπάγης αποτελούν εξαιρετικά αποδοτική λύση για την αντιμετώπιση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς επιτρέπουν τον περιορισμό των παρεμβολών χωρίς την ανάγκη επανασχεδίασης των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η ορθή επιλογή τους, τόσο ως προς το υλικό όσο και ως προς τη γεωμετρία τους, οφείλει να βασίζεται σε ενδελεχή ανάλυση του φάσματος των παρεμβολών που καλούνται να κατασταλούν, καθώς και στις ειδικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής [107], [109].

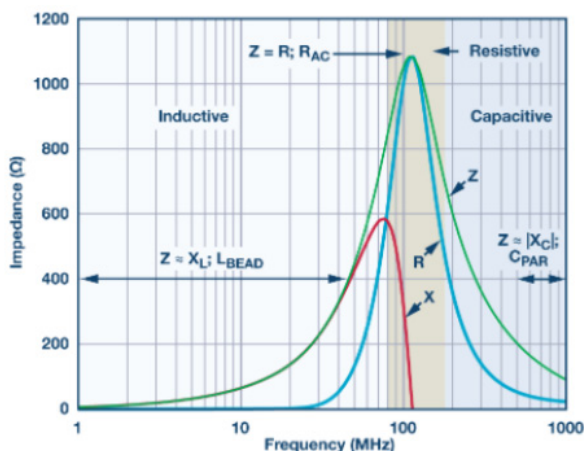
3.2.1.1. Χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης φερριτών αρπάγης

Μέχρι το σημείο αυτό αναλύθηκαν οι φυσικές ιδιότητες των φερριτών ως υλικών, με έμφαση στη μαγνητική διαπερατότητα. Προκειμένου να περιγραφεί η λειτουργία των φερριτών ως καταστολέων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, απαιτείται η σύνδεση των ιδιοτήτων αυτών με ηλεκτρικά μεγέθη, όπως η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση. Η σημαντικότερη παράμετρος για την αξιολόγηση της ικανότητας καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών είναι η σύνθετη αντίσταση Z , η οποία εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα. Ορίζεται ως:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (19)$$

όπου: R είναι η ισοδύναμη αντίσταση και X_L η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση.

Στις χαμηλόσυχνες περιοχές, η αντίσταση R εμφανίζεται μικρή σε σχέση με την επαγωγική αντίδραση X_L , η οποία κυριαρχεί και καθορίζει τη συνολική τιμή της σύνθετης αντίστασης. Στην εν λόγω συχνотική περιοχή, η καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της επαγωγικής αντίδρασης. Ωστόσο, καθώς η συχνότητα αυξάνεται, η μαγνητική διαπερατότητα του φερρίτη μειώνεται απότομα (γεγονός που αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.8), με συνέπεια τη μείωση της επαγωγικής αντίδρασης X_L και την ταυτόχρονη αύξηση της αντίστασης R . Κατά συνέπεια, στις υψίσυχνες περιοχές, η καταστολή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών επιτυγχάνεται κυρίως μέσω απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα εξαιτίας των μαγνητικών απωλειών εντός του φερρίτη.



Σχήμα 3.8: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη της σύνθετης αντίστασης Z , καθώς και των επιμέρους συνιστωσών της, δηλαδή της ωμικής αντίστασης R και της επαγωγικής ή χωρητικής αντίδρασης X_L , για φερρίτη αρπάγης [122]

Η επιλογή του κατάλληλου φερρίτη βασίζεται στη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης της σύνθετης αντίστασής του και, ειδικότερα, στην περιοχή συχνοτήτων στην οποία η τιμή της σύνθετης αντίστασης μεγιστοποιείται. Η ταύτιση της περιοχής αυτής με το φάσμα συχνοτήτων του θορύβου ή της διαταραχής που χρήζει καταστολής συνιστά καθοριστικό παράγοντα για την ορθή επιλογή του κατάλληλου τύπου φερρίτη [117].

Κάθε φερρίτης αρπάγης, ανάλογα με το υλικό κατασκευής του, διαθέτει μία χαρακτηριστική καμπύλη που περιγράφει τη συσχέτιση μεταξύ της R , X_L και της Z σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Η καμπύλη αυτή υποδεικνύει το εύρος συχνοτήτων εντός του οποίου η σύνθετη αντίσταση αποκτά σημαντικές τιμές, καθιστώντας τον φερρίτη αρπάγης ικανό να λειτουργεί ως φίλτρο σημάτων θορύβου για τις αντίστοιχες συχνότητες.

Οι φερρίτες αρπάγης εμφανίζουν τρεις διακριτές περιοχές απόκρισης: την επαγωγική περιοχή, την ωμική περιοχή και τη χωρητική περιοχή, όπως παρουσιάζεται στο σχετικό σχήμα. Οι περιοχές αυτές μπορούν να αναγνωριστούν μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης των Z , R και X_L σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Για την αποτελεσματική καταστολή θορύβου υψηλής συχνότητας, ο φερρίτης αρπάγης θα πρέπει να λειτουργεί εντός της αντιστατικής περιοχής. Στην περιοχή αυτή, το στοιχείο παρουσιάζει κυρίως ωμική συμπεριφορά, λειτουργώντας ως αντίσταση που εμποδίζει τη διέλευση σημάτων υψηλής συχνότητας και μετατρέπει την ανεπιθύμητη ενέργεια σε θερμότητα. Η ωμική περιοχή ορίζεται μεταξύ της συχνότητας στην οποία ισχύει η συνθήκη $X = R$, και της συχνότητας όπου ξεκινά η χωρητική περιοχή. Η χωρητική περιοχή αρχίζει από τη συχνότητα στην οποία ισχύει η σχέση $-X = R$, δηλαδή όταν η αντίδραση λαμβάνει αρνητική τιμή. Η περιοχή συχνοτήτων πριν από την ωμική χαρακτηρίζεται ως επαγωγική, όπου η συμπεριφορά του φερρίτη κυριαρχείται από την αυτεπαγωγή [122].

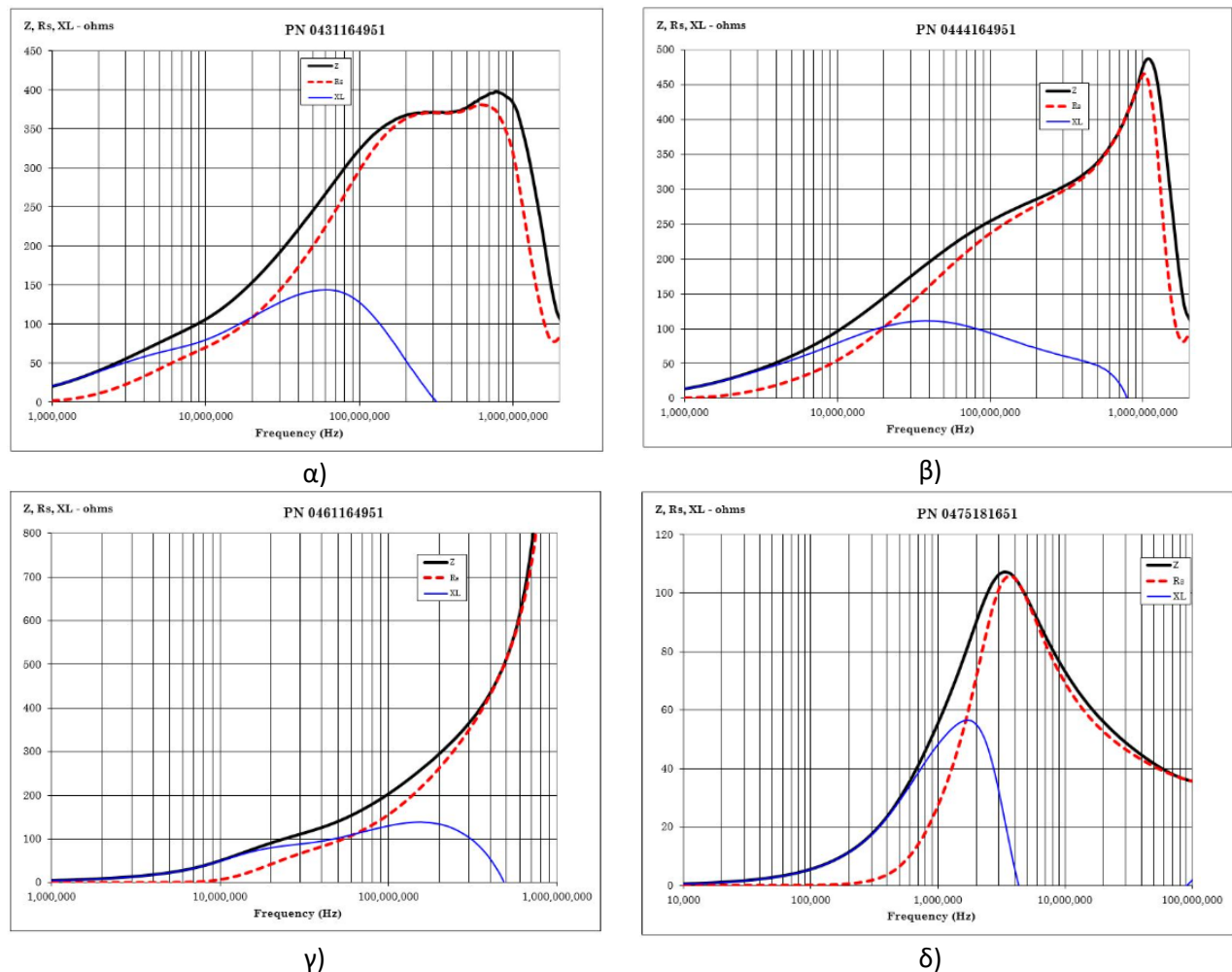
3.2.1.2. Χαρακτηριστικές σύνθετης αντίστασης φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής

Στην παρούσα εργασία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν φερρίτες αρπάγης κατασκευασμένοι από τέσσερα διαφορετικά υλικά της εταιρείας Fair-Rite. Τα υλικά αυτά είναι ειδικά σχεδιασμένα για την καταστολή ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών και παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στο φάσμα συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνουν: [123]

- 31 Material: Φερρίτης τύπου MnZn, σχεδιασμένος για εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην περιοχή συχνοτήτων από 1 MHz έως 300 MHz
- 44 Material: Φερρίτης τύπου NiZn, ο οποίος αναπτύχθηκε ώστε να προσφέρει υψηλή απόδοση καταστολής στην περιοχή συχνοτήτων από 25 MHz έως 300 MHz
- 61 Material: Φερρίτης τύπου NiZn υψηλής συχνότητας, κατάλληλος για την καταστολή θορύβου σε συχνότητες άνω των 200 MHz έως και 1 GHz
- 75 Material: Φερρίτης τύπου MnZn με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, προορισμένος για εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στην περιοχή από 150 kHz έως 10 MHz

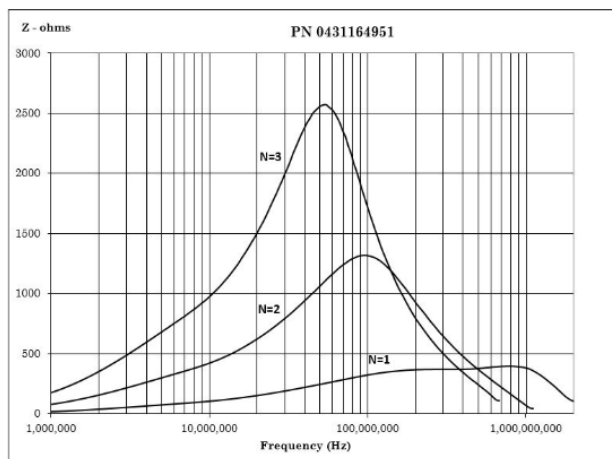
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα εξαιρετικά σημαντικό χαρακτηριστικό των φερριτών αρπάγης αποτελεί η χαρακτηριστική καμπύλη της σύνθετης αντίστασής τους (Z) σε συνάρτηση με τη συχνότητα λειτουργίας. Η σύνθετη αυτή αντίσταση προσδιορίζεται μέσω εξειδικευμένων οργάνων ανάλυσης υψηλής ακρίβειας, ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες παρατίθενται στα τεχνικά φυλλάδια (datasheets) που παρέχουν οι κατασκευαστές των υλικών φερριτών, διευκολύνοντας έτσι την επιλογή

του καταλληλότερου φερρίτη για κάθε εφαρμογή. Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες σύνθετης αντίστασης για φερρίτες αρπάγης με ίδια εσωτερική διάμετρο, για καθένα από τα τέσσερα υλικά που εξετάστηκαν προηγουμένως.

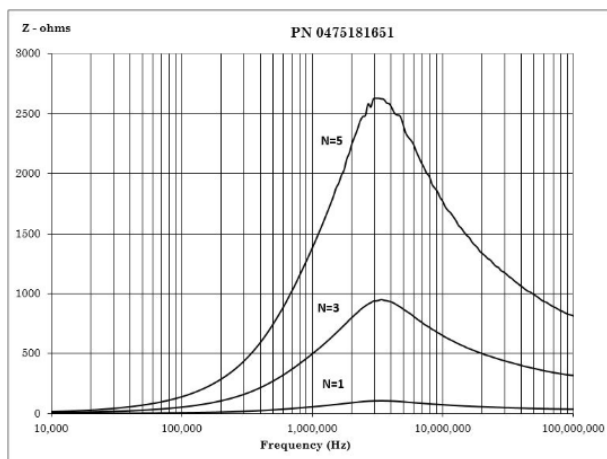


Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης για φερρίτη αρπάγης υλικού: α) 31 Material (1 MHz – 300MHz), β) 44 Material (25 MHz – 300 MHz), γ) 61 Material (200 MHz – 1GHz) και δ) 75 Material (150 kHz – 10 MHz) [123]

Η τιμή της σύνθετης αντίστασης επηρεάζεται επίσης από τον αριθμό των περιελίξεων (σπειρών) του καλωδίου γύρω από τον πυρήνα του φερρίτη. Η αύξηση του αριθμού των σπειρών επιφέρει ποικίλες μεταβολές, όπως τη μετατόπιση των περιοχών λειτουργίας προς χαμηλότερες συχνότητες, καθώς και την αύξηση της μέγιστης τιμής της σύνθετης αντίστασης, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην αντιστατική περιοχή λειτουργίας. Συχνά, οι κατασκευαστές περιλαμβάνουν στα τεχνικά τους φυλλάδια διαγράμματα σύνθετης αντίστασης (Σχήμα 3.10) με καμπύλες που απεικονίζουν τόσο τη συμπεριφορά για μονή περιέλιξη όσο και για πολλαπλές σπείρες, διευκολύνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ορθή επιλογή του κατάλληλου φερρίτη αρπάγης για κάθε εφαρμογή.



α)

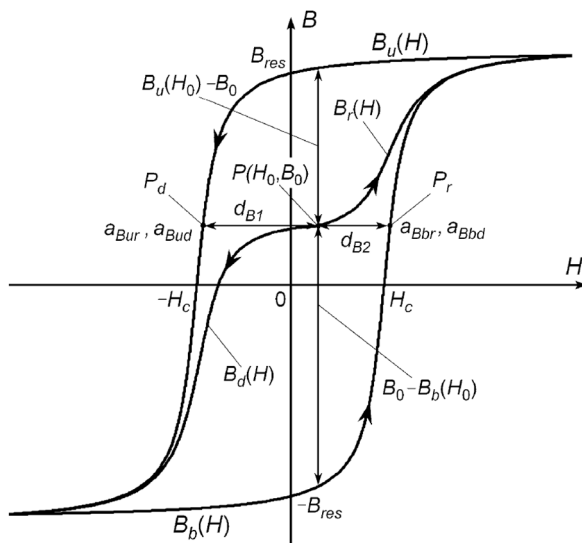


β)

Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστική σύνθετης αντίστασης για διαφορετικές περιτυλίξεις ενός καλωδίου στο εσωτερικό ενός φερρίτη αρπάγης υλικού: α) 31 Material και β) 75 Material [123]

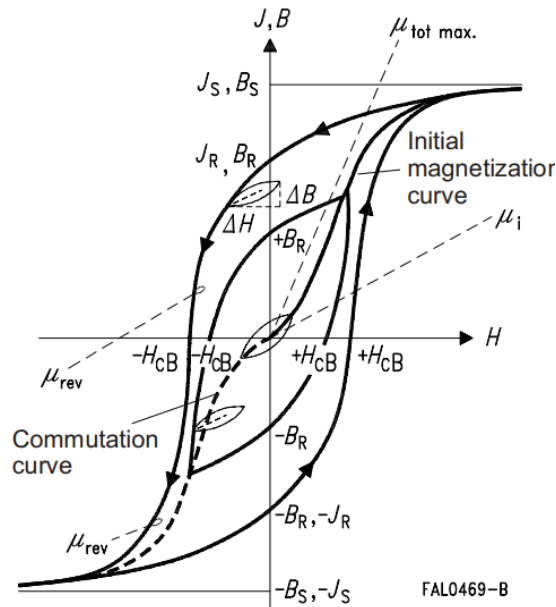
3.2.2. Κορεσμός φερριτών και βρόχος υστέρησης

Οι φερρίτες, ως μαγνητικά υλικά, παρουσιάζουν μη γραμμική μαγνητική συμπεριφορά, η οποία περιγράφεται από τον βρόχο υστέρησης, όπως απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3.11. Ο βρόχος υστέρησης καταγράφει τη σχέση μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής (B) και της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H) και αποκαλύπτει βασικά χαρακτηριστικά της μαγνητικής συμπεριφοράς των υλικών, όπως ο κορεσμός, η παραμένουσα μαγνήτιση και η απομαγνήτιση.



Σχήμα 3.11: Αρχική καμπύλη μαγνήτισης και βρόχος υστέρησης [124]

Η διαδικασία σχηματισμού του βρόχου υστέρησης ξεκινά από την πλήρη απομαγνήτιση του υλικού. Με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σταθερής κατεύθυνσης και σταδιακά αυξανόμενης έντασης, τα μαγνητικά τοιχώματα εντός του φερρίτη μετακινούνται, επεκτείνοντας τις περιοχές που είναι ομόρροπες προς το πεδίο. Καθώς το πεδίο αυξάνεται, οι μαγνητικές περιοχές εξαπλώνονται σε όλο το υλικό, οδηγώντας τελικά στην κατάσταση κορεσμού, όπου η μαγνητική επαγωγή φθάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή της (B_s), όπως περιγράφεται στην καμπύλη αρχικής μαγνήτισης (Σχήμα 3.12) [117], [125].



Σχήμα 3.12: Καμπύλη μαγνήτισης και βρόχος υστέρησης [125]

Εάν το εξωτερικό πεδίο αποσυρθεί πριν την επίτευξη κορεσμού, το υλικό παραμένει μερικώς μαγνητισμένο. Όταν στη συνέχεια υποβληθεί σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, δημιουργείται ένας μικρότερος βρόχος, γνωστός ως υποβρόχος υστέρησης, του οποίου το σχήμα και το εμβαδόν διαφέρουν από τον πλήρη βρόχο κορεσμού.

Η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) αποτελεί δείκτη του βαθμού παραμένουσας μαγνήτισης που διατηρείται όταν το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί. Αντίστοιχα, το πεδίο απομαγνήτισης (H_c) είναι η τιμή του αντίστροφου πεδίου που απαιτείται ώστε η μαγνητική επαγωγή να μηδενιστεί πλήρως [125]. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά των φερριτών σε εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, διότι η είσοδος του φερρίτη σε κατάσταση κορεσμού συνεπάγεται απότομη μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας (μ_r). Ως αποτέλεσμα, η επαγωγική αντίδραση (X_L) μειώνεται, περιορίζοντας τη σύνθετη αντίσταση (Z) του φερρίτη και καθιστώντας τον λιγότερο αποτελεσματικό ως φίλτρο παρεμβολών, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες.

Συνεπώς, για εφαρμογές καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, ιδίως σε κυκλώματα υψηλής ισχύος ή σε περιβάλλοντα με υψηλά ρεύματα, είναι κρίσιμη η επιλογή φερριτών με κατάλληλα χαρακτηριστικά κορεσμού και χαμηλές μαγνητικές απώλειες. Η διερεύνηση του βρόχου υστέρησης και των σχετικών παραμέτρων αποτελεί καθοριστικό εργαλείο για την εκτίμηση της απόδοσης των φερριτών και τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας τους στη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [117], [125].

3.3. Βελτιστοποίηση της κυματομορφής εγχεόμενου ρεύματος γεννητριών ESD μέσω φερριτών αρπάγης

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, εξετάζεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης της κυματομορφής του εγχεόμενου ρεύματος που παράγουν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μέσω της χρήσης φερριτών αρπάγης τοποθετημένων στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας. Η χρήση φερριτών για την εξασθένιση μεταβατικών φαινομένων υψηλών συχνοτήτων, όπως οι παλμοί ηλεκτροστατικής

εκφόρτισης, αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης βιβλιογραφίας [126], [127], [128], [129], [130] και τα τελευταία έτη επανέρχεται στο προσκήνιο ως πρακτική λύση για τη βελτίωση της κυματομορφής που παράγεται σύμφωνα με το IEC 61000-4-2 [63], [64]. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη φυσική ιδιότητα των φερριτών να εισάγουν συχνοεξαρτώμενη σύνθετη αντίσταση μεταφοράς, επιδρώντας κατά κύριο λόγο στο δεύτερο σκέλος της κυματομορφής και στις υψηλότερες συχνοτικές συνιστώσες που σχετίζονται με το φαινόμενο ταλαντώσεων. Όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 3.2, οι φερρίτες αρπάγης παρουσιάζουν διακριτή συμπεριφορά ανάλογα με το υλικό τους και την περιοχή συχνοτήτων στην οποία μεγιστοποιείται η σύνθετη αντίστασή τους. Η επιλεκτική χρήση κατάλληλων φερριτών επιτρέπει τη στοχευμένη εξασθένηση συγκεκριμένων συχνοτικών περιοχών της κυματομορφής εκφόρτισης, γεγονός που ενδέχεται να αποδειχθεί καθοριστικό για την επίτευξη συμμόρφωσης με τις αυστηρότερες απαιτήσεις της νέας Έκδοσης 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27], ειδικότερα για τις παραμέτρους I_{p2} και I_{60} . Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής περιλαμβάνει συστηματική πειραματική αξιολόγηση φερριτών διαφόρων τύπων και υλικών, με σκοπό την ποσοτική εκτίμηση της επίδρασής τους στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και την ενδεχόμενη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη μίας συστηματικής μεθοδολογίας, η οποία περιλαμβάνει τόσο την αξιολόγηση όσο και την κατάταξη των διαθέσιμων λύσεων φερρίτη. Αξιοσημείωτο είναι ότι η μεθοδολογία δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην περίπτωση μη συμμορφούμενων γεννητριών, αλλά δύναται να αξιοποιηθεί και για τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της δεύτερης αιχμής, επιδιώκοντας τη μέγιστη δυνατή προσέγγιση προς την ιδανική κυματομορφή, όπως ορίζεται από το IEC 61000-4-2 [27].

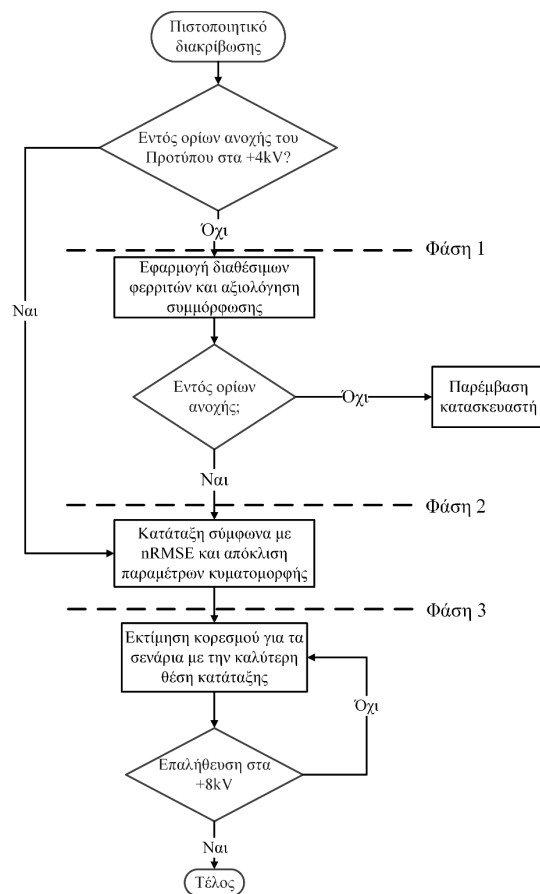
Η προτεινόμενη διαδικασία περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

- 1) την αρχική φάση, κατά την οποία, κατόπιν διακρίβωσης της γεννήτριας, εντοπίζεται η μη συμμορφούμενη παράμετρος και δοκιμάζονται διαφορετικοί συνδυασμοί φερριτών,
- 2) τη φάση αξιολόγησης και κατάταξης, κατά την οποία οι φερρίτες κατατάσσονται βάσει της απόκλισης των παραμετρικών χαρακτηριστικών της κυματομορφής από τα πρότυπα όρια, καθώς και βάσει της ποιότητας προσαρμογής της κυματομορφής,
- 3) τη φάση διερεύνησης κορεσμού, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία, καθώς η έκθεση των φερριτικών πυρήνων σε υψηλά παροδικά ρεύματα δύναται να προκαλέσει μαγνητικό κορεσμό, με συνέπεια την απώλεια των επαγωγικών ιδιοτήτων τους, τη μείωση της σύνθετης αντίστασης και, τελικά, την υποβάθμιση της ικανότητας απόσβεσης [131], [132].

Το φαινόμενο κορεσμού κρίνεται ιδιαίτερος κρίσιμο για το τμήμα της κυματομορφής που αντιστοιχεί στη δεύτερη αιχμή, καθώς σχετίζεται με το χαμηλής συχνότητας φασματικό περιεχόμενο του παλμού, το οποίο μπορεί να εμφανίζει τιμές ρεύματος που υπερβαίνουν τα 25 A. Συνεπώς, η προσεκτική διερεύνηση του κορεσμού συνιστά αναγκαία προϋπόθεση για την αποτελεσματική χρήση φερριτών στην επίτευξη συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του IEC 61000-4-2 [27].

3.3.1. Ανάλυση διαδικασίας αξιολόγησης συμμόρφωσης και τροποποίησης

Ολόκληρο το μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας ενότητας συνοψίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.13.



Σχήμα 3.13: Σχηματική απεικόνιση της προτεινόμενης ροής εργασίας

Η μεθοδολογία βασίζεται στην παραδοχή ότι σημαντικός αριθμός γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενδέχεται να χαρακτηριστούν ως μη συμμορφούμενες ως προς τη νέα παράμετρο I_{P2} , η οποία εισάγεται στη νέα Έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27], όπως μελετήθηκε αναλυτικά στην Ενότητα 3.1. Ως εκ τούτου, κάθε εργαστήριο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας καλείται να επιλέξει ανάμεσα σε δύο ιδιαίτερα δαπανηρές λύσεις: είτε να προβεί στην αντικατάσταση της γεννήτριας, διαδικασία που προϋποθέτει σημαντική επένδυση, είτε να αποστείλει τη γεννήτρια στον κατασκευαστή για τις απαραίτητες τροποποιήσεις. Η δεύτερη επιλογή, ακόμη και αν είναι τεχνικά εφικτή — λαμβάνοντας υπόψη ότι πολλές γεννήτριες είναι πλέον μοντέλα εκτός παραγωγής — παραμένει σχεδόν εξίσου δαπανηρή και σαφώς πιο χρονοβόρα.

Η διαδικασία εκκινεί από το πιστοποιητικό διακρίβωσης που εκδίδεται από διαπιστευμένο εργαστήριο και περιλαμβάνει τα αποτελέσματα βάσει των οποίων κρίνεται ότι η συγκεκριμένη γεννήτρια δεν συμμορφώνεται με τις νέες απαιτήσεις. Οι Πίνακες 3.8 και 3.9 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα διακρίβωσης για μία τέτοια γεννήτρια (EM Test Dito). Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σαφώς ότι η γεννήτρια υπερβαίνει το αποδεκτό όριο για την παράμετρο I_{P2} (επισημασμένο με κόκκινο χρώμα) σε 3 από τα 4 επίπεδα δοκιμών και, κατά συνέπεια, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμές συμμόρφωσης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27].

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα διακρίβωσης για τα θετικά επίπεδα δοκιμής της γεννήτριας EM Test Dito (παραμέτροι 1^{ης} αιχμής)

Επίπεδο δοκιμής [kV]	I_p		t_r	
	[A]		[ns]	
	Ανοχή ±15%	Μέτρηση	Ανοχή ±25%	Μέτρηση
+2	6,375 – 8,625	7,364	0,600 - 1,000	0,874
+4	12,75 – 17,25	14,32	0,600 - 1,000	0,870
+6	19,125 - 25,875	23,62	0,600 - 1,000	0,898
+8	25,50 - 34,50	31,30	0,600 - 1,000	0,903

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα διακρίβωσης για τα θετικά επίπεδα δοκιμής της γεννήτριας EM Test Dito (παραμέτροι 2^{ης} αιχμής)

Επίπεδο δοκιμής [kV]	I_{p2}		I_{30}		I_{60}	
	[A]		[A]		[A]	
	Ανοχή -20%/+40%	Μέτρηση	Ανοχή ±30%	Μέτρηση	Ανοχή ±30%	Μέτρηση
+2	3,60 – 6,30	6,292	2,80 - 5,20	4,320	1,40 - 2,60	1,730
+4	7,20 – 12,60	13,28	5,60 - 10,40	8,260	2,80 - 5,20	2,990
+6	10,80 – 18,90	21,00	8,40 - 15,60	14,56	4,20 - 7,80	4,660
+8	14,40 – 25,20	27,84	11,20 - 20,80	19,37	5,60 - 10,40	5,640

Βάσει των ανωτέρω, το εργαστήριο καλείται να καθορίσει την καταλληλότερη πορεία δράσης. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία προτείνει μία εναλλακτική λύση, σημαντικά οικονομικότερη έναντι της αντικατάστασης ή της εργοστασιακής τροποποίησης της γεννήτριας από τον κατασκευαστή. Η προτεινόμενη λύση βασίζεται στην προμήθεια ευρέως διαθέσιμων εμπορικών στοιχείων, συγκεκριμένα φερριτών αρπάγης και στην εφαρμογή τους στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας, κατά τρόπο απλό και μη επεμβατικό.

Σε περίπτωση που, μετά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής (Σχήμα 3.13 – Φάση 1), οι παράμετροι της κυματομορφής της γεννήτριας εξακολουθούν να παραμένουν εκτός των επιτρεπόμενων ορίων, η γεννήτρια θα πρέπει να αντικατασταθεί ή να υποβληθεί σε εργοστασιακή τροποποίηση. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου η συμμόρφωση επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης φερριτών αρπάγης, προτείνεται η περαιτέρω υλοποίηση μίας διαδικασίας αξιολόγησης και κατάταξης (Σχήμα 3.13 – Φάση 2), με σκοπό την ανάδειξη της βέλτιστης λύσης ως προς την ελαχιστοποίηση της απόκλισης των παραμέτρων από τις ιδανικές τιμές που καθορίζει το Πρότυπο. Η εν λόγω φάση μπορεί να εκτελεστεί ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η γεννήτρια έχει εξ αρχής χαρακτηριστεί ως συμμορφούμενη, παρέχοντας στο εργαστήριο τη δυνατότητα περαιτέρω βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών της, ώστε να προσεγγίζουν ακόμη περισσότερο την ιδανική κυματομορφή.

Η τελική φάση της προτεινόμενης διαδικασίας (Σχήμα 3.13 – Φάση 3) περιλαμβάνει τη διερεύνηση ενδεχόμενων φαινομένων μαγνητικού κορεσμού, τα οποία δύναται να προκύψουν κατά την εφαρμογή των φερριτών σε υψηλότερα επίπεδα τάσης δοκιμής, παρέχοντας επιπλέον καθοδήγηση για τη βέλτιστη προσέγγιση που οφείλει να ακολουθηθεί από το εργαστήριο.

3.3.2. Υλοποίηση μεθοδολογικού πλαισίου

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται εκτενώς οι τρεις φάσεις της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Σχήμα 3.13). Κάθε φάση εξετάζεται ξεχωριστά, με στόχο την πλήρη τεκμηρίωση των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για την αξιολόγηση, την τροποποίηση και την τελική συμμόρφωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αναθεωρημένης έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27].

3.3.2.1. Εφαρμογή φερριτών και αξιολόγηση συμμόρφωσης (Φάση 1)

Οι φερρίτες, σε όλες τους τις μορφές — είτε ως δακτύλιοι είτε ως φερρίτες αρπάγης (clamp-on) — αποτελούν διαχρονικά μία από τις πλέον αποδοτικές και οικονομικά συμφέρουσες λύσεις για την εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που διαδίδονται μέσω καλωδίων. Η αρχή λειτουργίας τους έχει αναλυθεί εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία [129] και επανέρχεται τα τελευταία έτη στο προσκήνιο ως υποσχόμενη προσέγγιση για την τροποποίηση της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται διάφοροι εμπορικά διαθέσιμοι φερρίτες αρπάγης, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται βάσει:

- του φασματικού εύρους λειτουργίας τους, δηλαδή της περιοχής συχνοτήτων εντός της οποίας επιτυγχάνεται η μέγιστη εξασθένιση, καθώς και
- της φυσικής διαμέτρου του πυρήνα τους, η οποία καθορίζει τη μέγιστη διάμετρο του καλωδίου που δύνανται να περιβάλουν.

Οι φερρίτες μεγαλύτερων διαστάσεων επιτρέπουν την τοποθέτηση επιπλέον σπειρών του καλωδίου που αποτελεί πηγή θορύβου, ενισχύοντας την ικανότητα εξασθένησης. Κάθε φερρίτης φέρει κωδικοποίηση βάσει του υλικού κατασκευής του και των διαστάσεών του.

Πίνακας 3.10: Κωδικοποίηση φερριτών και χαρακτηριστικά υλικού – καλωδίου

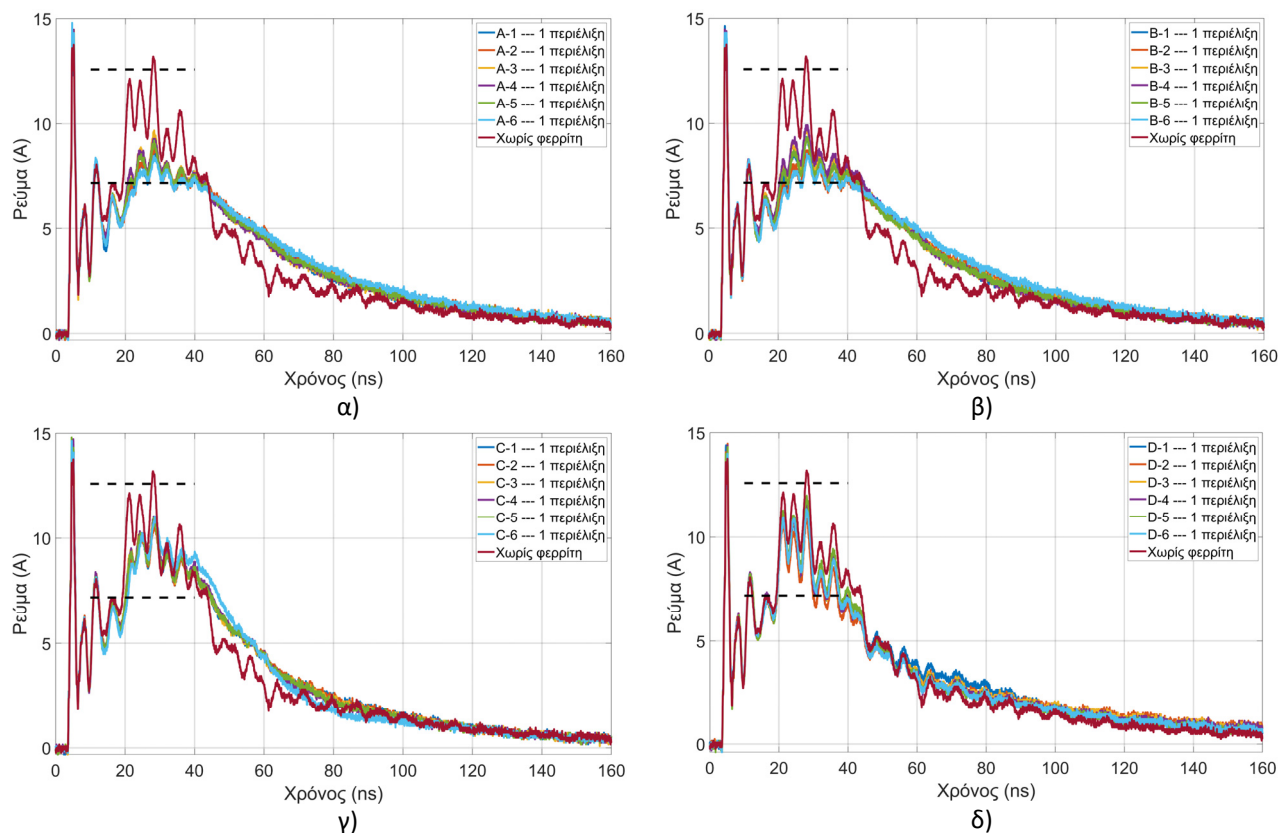
Υλικό	Κωδικός	Μέγιστη διάμετρος καλωδίου [mm]	Υλικό	Κωδικός	Μέγιστη διάμετρος καλωδίου [mm]
A (31 Material) (1MHz – 300MHz)	A-1	4,90	C (61 Material) (200MHz – 1GHz)	C-1	4,90
	A-2	6,30		C-2	6,30
	A-3	8,70		C-3	8,70
	A-4	9,85		C-4	9,85
	A-5	12,75		C-5	12,75
	A-6	18,0		C-6	18,0
B (44 Material) (25MHz – 300MHz)	B-1	4,90	D (75 Material) (150kHz – 10MHz)	D-1	4,90
	B-2	6,30		D-2	6,30
	B-3	8,70		D-3	8,70
	B-4	9,85		D-4	9,85
	B-5	12,75		D-5	12,75
	B-6	18,0		D-6	18,0

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης φάσης, κάθε φερρίτης τοποθετήθηκε επί του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EM Test Dito, σε θέση πλησίον της σύνδεσης με το κατακόρυφο επίπεδο, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις που παρέχονται στις [63], [64] και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διακρίβωσης ακολουθώντας τη μεθοδολογία καταγραφής κυματομορφών στη διάταξη διακρίβωσης.

Τα σενάρια μετρήσεων περιλάμβαναν:

- μία περιέλιξη (turn) του καλωδίου γύρω από τον πυρήνα του φερρίτη, καθώς και
- δύο ή τρεις περιελίξεις, όπου η εσωτερική διάμετρος του φερρίτη το επέτρεπε

Η τάση δοκιμής ορίστηκε σε +4 kV και, για κάθε σενάριο, πραγματοποιήθηκαν δέκα επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14 στο οποίο απεικονίζεται η μέση κυματομορφή του ρεύματος για κάθε υλικό φερρίτη, στην περίπτωση χρήσης μίας περιέλιξης καλωδίου. Η κυματομορφή αναφοράς (χωρίς την παρουσία φερρίτη) αποδίδεται με σκούρα κόκκινη γραμμή, ενώ οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές στις στάθμες $\gamma = 7,2$ A και $\gamma = 12,6$ A υποδηλώνουν τα όρια ανοχής της παραμέτρου I_{P2} , όπως καθορίζονται από το Πρότυπο [27]. Η επίδραση κάθε υλικού φερρίτη επί της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής αποτυπώνεται με σαφήνεια.



Σχήμα 3.14: Κυματομορφές ρεύματος χωρίς φερρίτη και με εφαρμογή φερρίτη για διαφορετικά υλικά: (α) Υλικό A, (β) Υλικό B, (γ) Υλικό C, (δ) Υλικό D

Αναλυτικότερα:

- Το Υλικό D, με φασματικό εύρος λειτουργίας από 150 kHz έως 10 MHz, εμφανίζει περιορισμένη επίδραση επί της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής και αδυνατεί να επιφέρει ουσιαστική εξασθένηση στις υψίσυχνες ταλαντώσεις. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η φασματική επικάλυψη του συγκεκριμένου υλικού με το κύριο φασματικό περιεχόμενο της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής, το οποίο εντοπίζεται στην περιοχή 6 MHz έως 30 MHz, είναι ελάχιστη (αφορά μόνο την περιοχή από 6 έως 10 MHz), οδηγώντας σε περιορισμένη μείωση της παραμέτρου I_{P2} .

- Τα Υλικά Α και Β παρουσιάζουν παρεμφερή συμπεριφορά, δεδομένου ότι καλύπτουν παρόμοιες φασματικές περιοχές. Αμφότερα επιτυγχάνουν σημαντική εξασθένηση των υψίσυχνων ταλαντώσεων, συμβάλλοντας στην ομαλοποίηση του τελικού τμήματος της δεύτερης αιχμής και επιτυγχάνοντας καλύτερη προσαρμογή της κυματομορφής προς την ιδανική μορφή, όπως αυτή καθορίζεται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Υλικό Α, το οποίο καλύπτει χαμηλότερες συχνότητες (1 MHz έως 25 MHz), επιδρώντας επίσης και στο μη ταλαντούμενο τμήμα της δεύτερης αιχμής και επιτυγχάνοντας σημαντικότερη μείωση της παραμέτρου I_{P2} .
- Ο Φερρίτης τύπου C, διαθέτοντας το ευρύτερο φάσμα αποτελεσματικής απόκρισης συχνότητας μεταξύ των τεσσάρων υλικών, καταφέρνει επίσης να μειώσει τις υψηλότερες συχνοτικές ταλαντώσεις, αν και σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τους τύπους Α και Β. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι το φασματικό περιεχόμενο του παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μειώνεται σημαντικά πέραν των 300 MHz (βλ. Σχήμα 3.14β). Αντίστοιχα με το Υλικό Β, η μείωση της παραμέτρου I_{P2} επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της εξασθένησης των υψηλότερων συχνοτήτων και όχι μέσω σημαντικής επίδρασης επί του κύριου φασματικού περιεχομένου της δεύτερης αιχμής, το οποίο εντοπίζεται κάτω από τα 30 MHz.

Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων για όλους τους φερρίτες που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.10, υπό διάφορους συνδυασμούς αριθμού περιελίξεων του καλωδίου γύρω από τον πυρήνα. Ο πίνακας περιλαμβάνει τις τιμές εξασθένησης για όλες τις παραμέτρους που καθορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Αρνητικές τιμές εξασθένησης υποδηλώνουν μείωση της αντίστοιχης παραμέτρου, ενώ θετικές τιμές αντιστοιχούν σε αύξησή της. Οι λύσεις οι οποίες είτε αποτυγχάνουν να προσφέρουν επαρκή εξασθένηση είτε οδηγούν σε υπέρμετρη εξασθένηση, εκτός των ορίων ανοχής του Προτύπου [27], επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα και δεν θεωρούνται αποδεκτές. Οι παράμετροι της κυματομορφής αναφοράς έχουν επισημανθεί με γκρι σκίαση.

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα εξασθένησης για κάθε φερρίτη κατά τη Φάση 1

Υλικό	Φερρίτης	Turns	I_P	Εξασθένηση	t_r	Εξασθένηση	I_{P2}	Εξασθένηση	I_{30}	Εξασθένηση	I_{60}	Εξασθένηση
			[A]	[%]	[ns]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]
Χωρίς φερρίτη (αναφορά)			14,32	-	0,870	-	13,280	-	8,260	-	2,990	-
A	A-1	n=1	14,09	-1,606	0,871	0,115	8,768	-33,98	7,044	-14,72	4,060	35,79
	A-2	n=1	14,30	-0,140	0,869	-0,115	8,776	-33,92	7,013	-15,10	4,343	45,25
		n=2	14,34	0,140	0,869	-0,115	11,22	-15,51	8,788	6,392	3,822	27,83
	A-3	n=1	14,14	-1,257	0,865	-0,575	9,408	-29,16	7,230	-12,47	4,005	33,95
		n=2	14,16	-1,117	0,870	0,000	7,464	-43,80	6,300	-23,73	5,470	82,94
	A-4	n=1	14,22	-0,698	0,867	-0,345	9,280	-30,12	7,201	-12,82	3,993	33,55
		n=2	14,07	-1,746	0,871	0,115	5,856	-55,90	4,670	-43,46	4,941	65,25
	A-5	n=1	14,20	-0,838	0,868	-0,230	9,024	-32,05	7,213	-12,68	4,065	35,95
		n=2	14,06	-1,816	0,870	0,000	5,736	-56,81	4,742	-42,59	4,620	54,52
		n=3	14,06	-1,816	0,867	-0,345	5,296	-60,12	3,523	-57,35	3,572	19,46
	A-6	n=1	14,42	0,698	0,868	-0,230	8,442	-36,43	6,971	-15,61	4,443	48,60
		n=2	14,43	0,768	0,869	-0,115	5,872	-55,78	4,487	-45,68	4,346	45,35
		n=3	14,52	1,397	0,871	0,115	5,442	-59,02	3,339	-59,58	3,050	2,007
B	B-1	n=1	14,23	-0,628	0,873	0,345	9,368	-29,46	7,471	-9,552	4,137	38,36
	B-2	n=1	14,12	-1,397	0,869	-0,115	8,656	-34,82	6,980	-15,50	4,251	42,17
		n=2	14,10	-1,536	0,863	-0,805	10,82	-18,52	8,582	3,90	3,780	26,42
	B-3	n=1	14,41	0,628	0,871	0,115	9,648	-27,35	7,520	-8,959	4,120	37,79
		n=2	13,98	-2,374	0,864	-0,690	6,176	-53,49	5,098	-38,28	5,289	76,89
	B-4	n=1	14,58	1,816	0,872	0,230	9,808	-26,14	7,661	-7,252	4,102	37,19
		n=2	14,36	0,279	0,870	0,000	6,480	-51,20	5,476	-33,70	5,366	79,46
	B-5	n=1	13,97	-2,444	0,864	-0,690	9,232	-30,48	7,416	-10,22	4,108	37,39

		n=2	14,07	-1,746	0,869	-0,115	6,408	-51,75	5,239	-36,57	4,829	61,51
		n=3	14,50	1,257	0,864	-0,690	5,442	-59,02	3,769	-54,37	4,350	45,48
	B-6	n=1	14,47	1,047	0,866	-0,460	8,600	-35,24	7,156	-13,37	4,601	53,88
		n=2	14,41	0,628	0,862	-0,920	5,488	-58,67	4,402	-46,71	4,545	52,01
		n=3	14,51	1,327	0,869	-0,115	5,168	-61,08	3,219	-61,03	3,171	6,054
C	C-1	n=1	14,38	0,419	0,871	0,115	10,80	-18,67	8,122	-1,671	3,701	23,78
	C-2	n=1	14,40	0,559	0,871	0,115	10,74	-19,13	8,165	-1,150	3,811	27,46
		n=2	14,38	0,419	0,866	-0,460	11,57	-12,88	8,913	7,906	3,130	4,682
	C-3	n=1	14,32	0,000	0,869	-0,115	11,01	-17,09	8,259	-0,012	3,708	24,01
		n=2	14,26	-0,419	0,867	-0,345	8,224	-38,07	6,705	-18,83	4,988	66,82
	C-4	n=1	14,42	0,698	0,870	0,000	11,05	-16,79	8,398	1,671	3,650	22,07
		n=2	14,42	0,698	0,870	0,000	8,112	-38,92	6,799	-17,69	5,199	73,88
	C-5	n=1	14,25	-0,489	0,869	-0,115	10,82	-18,52	8,143	-1,416	3,722	24,48
		n=2	14,36	0,279	0,871	0,115	7,856	-40,84	6,477	-21,59	5,259	75,89
		n=3	14,45	0,908	0,870	0,000	6,152	-53,67	5,252	-36,42	5,432	81,67
	C-6	n=1	14,41	0,628	0,870	0,000	10,86	-18,22	8,930	8,111	3,645	21,91
		n=2	14,26	-0,419	0,866	-0,460	8,296	-37,53	7,258	-12,13	6,222	108,09
		n=3	14,38	0,419	0,875	0,575	10,70	-19,43	8,823	6,816	3,772	26,15
	D-1	n=1	14,39	0,489	0,870	0,000	11,43	-13,93	7,158	-13,34	3,810	27,42
	D-2	n=1	14,45	0,908	0,867	-0,345	10,90	-17,92	6,694	-18,96	3,402	13,78
		n=2	14,44	0,838	0,867	-0,345	7,344	-44,70	5,609	-32,09	4,864	62,68
	D-3	n=1	14,22	-0,698	0,865	-0,575	11,50	-13,40	7,095	-14,10	3,374	12,84
		n=2	14,46	0,978	0,873	0,345	7,896	-40,54	4,958	-39,98	3,289	10,00
D	D-4	n=1	14,35	0,209	0,871	0,115	11,37	-14,38	7,171	-13,18	3,215	7,525
		n=2	14,42	0,698	0,868	-0,230	8,096	-39,04	4,942	-40,17	3,133	4,783
		n=1	14,26	-0,419	0,869	-0,115	11,91	-10,32	7,418	-10,19	3,201	7,057
	D-5	n=2	14,40	0,559	0,872	0,230	8,840	-33,43	5,506	-33,34	3,096	3,545
		n=3	14,34	0,140	0,869	-0,115	6,416	-51,69	4,022	-51,31	2,786	-6,823
	D-6	n=1	14,22	-0,698	0,871	0,115	11,44	-13,86	7,118	-13,83	3,088	3,278
		n=2	14,14	-1,257	0,869	-0,115	8,064	-39,28	4,887	-40,84	2,944	-1,538
		n=3	14,30	-0,140	0,869	-0,115	6,248	-52,95	3,253	-60,62	2,411	-19,36

3.3.2.2. Κατάταξη φερριτών βάσει απόκλισης από την κυματομορφή του IEC 61000-4-2 (Φάση 2)

Κατά τη δεύτερη φάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, όλες οι αποδεκτές λύσεις του Πίνακα 3.11 κατατάσσονται βάσει της απόκλισής τους από τις τιμές των παραμέτρων της ιδανικής κυματομορφής (Πίνακας 3.12), όπως αυτές καθορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13. Με γκρι σκίαση έχουν επισημανθεί οι τιμές των παραμέτρων της ιδανικής κυματομορφής.

Πίνακας 3.12: Αποκλίσεις παραμέτρων της κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από την ιδανική κυματομορφή του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]

Υλικό	Φερριτής	Περιελίξεις	I_p	Απόκλιση από το Πρότυπο	t_r	Απόκλιση από το Πρότυπο	I_{p2}	Απόκλιση από το Πρότυπο	I_{30}	Απόκλιση από το Πρότυπο	I_{60}	Απόκλιση από το Πρότυπο	nRMSE
			[A]	[%]	[ns]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[%]
IEC 61000-4-2 (αναφορά)			15,00	-	0,800	-	9,000	-	8,000	-	4,000	-	-
A	A-1	n=1	14,09	-6,067	0,871	8,875	8,768	-2,578	7,044	-11,95	4,060	1,500	7,819
	A-2	n=1	14,30	-4,667	0,869	8,625	8,776	-2,489	7,013	-12,34	4,343	8,575	7,668
	A-2	n=2	14,34	-4,400	0,869	8,625	11,22	24,67	8,788	9,850	3,822	-4,450	8,959
	A-3	n=1	14,14	-5,733	0,865	8,125	9,408	4,533	7,23	-9,625	4,005	0,125	7,302
	A-4	n=1	14,22	-5,200	0,867	8,375	9,28	3,111	7,201	-9,988	3,993	-0,175	7,256
	A-5	n=1	14,20	-5,333	0,868	8,500	9,024	0,267	7,213	-9,838	4,065	1,625	7,478
B	A-6	n=1	14,42	-3,867	0,868	8,500	8,442	-6,200	6,971	-12,86	4,443	11,08	7,917
	B-1	n=1	14,23	-5,133	0,873	9,125	9,368	4,089	7,471	-6,613	4,137	3,425	7,517
	B-2	n=1	14,12	-5,867	0,869	8,625	8,656	-3,822	6,98	-12,75	4,251	6,275	7,810
	B-2	n=2	14,1	-6,000	0,863	7,875	10,82	20,22	8,582	7,275	3,78	-5,500	8,948
	B-3	n=1	14,41	-3,933	0,871	8,875	9,648	7,200	7,52	-6,000	4,12	3,000	7,099
	B-4	n=1	14,58	-2,800	0,872	9,000	9,808	8,978	7,661	-4,238	4,102	2,550	7,033
	B-5	n=1	13,97	-6,867	0,864	8,000	9,232	2,578	7,416	-7,300	4,108	2,700	7,445

	B-6	n=1	14,47	-3,533	0,866	8,250	8,6	-4,444	7,156	-10,55	4,601	15,03	8,114
C	C-1	n=1	14,38	-4,133	0,871	8,875	10,8	20,00	8,122	1,525	3,701	-7,475	7,247
	C-2	n=1	14,4	-4,000	0,871	8,875	10,74	19,33	8,165	2,062	3,811	-4,725	7,297
	C-2	n=2	14,38	-4,133	0,866	8,250	11,57	28,56	8,913	11,41	3,13	-21,75	8,769
	C-3	n=1	14,32	-4,533	0,869	8,625	11,01	22,333	8,259	3,238	3,708	-7,300	7,303
	C-3	n=2	14,26	-4,933	0,867	8,375	8,224	-8,622	6,705	-16,19	4,988	24,70	9,517
	C-4	n=1	14,42	-3,867	0,87	8,750	11,05	22,78	8,398	4,975	3,650	-8,750	7,482
	C-4	n=2	14,42	-3,867	0,87	8,750	8,112	-9,867	6,799	-15,01	5,199	29,98	10,04
	C-5	n=1	14,25	-5,000	0,869	8,625	10,82	20,22	8,143	1,788	3,722	-6,950	7,330
	C-6	n=1	14,41	-3,933	0,87	8,750	10,86	20,67	8,93	11,63	3,645	-8,875	8,240
	C-6	n=3	14,38	-4,133	0,875	9,375	10,7	18,89	8,823	10,29	3,772	-5,700	8,206
D	D-1	n=1	14,39	-4,067	0,87	8,750	11,43	27,00	7,158	-10,53	3,810	-4,750	7,641
	D-2	n=1	14,45	-3,667	0,867	8,375	10,9	21,11	6,694	-16,33	3,402	-14,95	7,890
	D-2	n=2	14,44	-3,733	0,867	8,375	7,344	-18,400	5,609	-29,89	4,864	21,60	10,42
	D-3	n=1	14,22	-5,200	0,865	8,125	11,5	27,78	7,095	-11,31	3,374	-15,65	7,325
	D-4	n=1	14,35	-4,333	0,871	8,875	11,37	26,33	7,171	-10,36	3,215	-19,63	7,771
	D-6	n=1	14,22	-5,200	0,871	8,875	11,44	27,11	7,118	-11,03	3,088	-22,80	7,749

Πίνακας 3.13: Τελική κατάταξη των φερριτών που επιτυγχάνουν συμμόρφωση

Φερρίτης	A-1 n=1	A-2 n=1	A-2 n=2	A-3 n=1	A-4 n=1	A-5 n=1	A-6 n=1	B-1 n=1	B-2 n=1	B-2 n=2	B-3 n=1	B-4 n=1	B-5 n=1	B-6 n=1	C-1 n=1	C-2 n=1	C-2 n=2	C-3 n=1	C-3 n=2	C-4 n=1	C-4 n=2	C-5 n=1	C-6 n=1	C-6 n=3	D-1 n=1	D-2 n=1	D-2 n=2	D-3 n=1	D-4 n=1	D-6 n=1
I_p	29	18	16	26	23	25	6	21	27	28	8,5	1	30	2	13	10	13	17	19	6	6	20	8,5	13	11	3	4	23	15	23
I_{p2}	3,5	2	25	9	5	1	10	7	6	19,5	11	13	3,5	8	18	17	30	23	12	24	14	19,5	21	16	27	22	15	29	26	28
t_r	24,5	15	15	3,5	8,5	11,5	11,5	29	15	1	24,5	28	2	5,5	24,5	24,5	5,5	15	8,5	19,5	19,5	15	19,5	30	19,5	8,5	8,5	3,5	24,5	24,5
I_{30}	23	24	13	11	14	12	26	8	25	9	7	5	10	18	1	3	21	4	28	6	27	2	22	15	17	29	30	20	16	19
I_{60}	3	18	9	1	2	4	21	8	14	12	7	5	6	23	17	10	27	16	29	19	30	15	20	13	11	22	26	24	25	28
nRMSE	19	15	27	6	4	11	21	13	18	26	2	1	10	22	3	5	25	7	28	12	29	9	24	23	14	20	30	8	17	16
Τελική κατάταξη	10	13	19	4	2	1	20	7	16	15	6	5	3	14	9	8	30	12	26	17	28	11	22	18	21	25	27	23	24	29

Προκειμένου να αποφευχθεί η επιλογή λύσεων που, αν και μειώνουν αποτελεσματικά συγκεκριμένες παραμέτρους, προκαλούν ταυτόχρονα σημαντικές παραμορφώσεις στο υπόλοιπο τμήμα της κυματομορφής, η διαδικασία αξιολόγησης περιλαμβάνει και μία επιπλέον παράμετρο προσαρμογής (fitting parameter). Πρόκειται για τη κανονικοποιημένη Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Normalized Root Mean Square Error – nRMSE), το οποίο εκτιμά την ομοιότητα των περιγραμμάτων (envelopes) των κυματομορφών. Ο υπολογισμός του γίνεται ως εξής:

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}}{\max(I) - \min(I)} \quad (20)$$

όπου N είναι το πλήθος των χρονικών σημείων, I_i οι τιμές του ρεύματος της κυματομορφής αναφοράς (IEC 61000-4-2 [27]), και $\hat{I}_i$ οι αντίστοιχες τιμές μετά την τροποποίηση με φερρίτη.

Η τελική κατάταξη προκύπτει από σταθμισμένο υπολογισμό που συνδυάζει τις αποκλίσεις κάθε παραμέτρου της κυματομορφής και τον δείκτη nRMSE. Οι συντελεστές βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.14:

Πίνακας 3.14: Ανάθεση βαρών για την τελική κατάταξη

	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}	nRMSE
Βάρος	0,2	0,2	1,2	1	1	0,5

Η επιλογή των συντελεστών βαρύτητας βασίστηκε στις εξής παρατηρήσεις:

- Οι παράμετροι της πρώτης αιχμής (I_p και t_r) έλαβαν χαμηλή βαρύτητα, καθώς η επίδραση των φερριτών σε αυτές είναι περιορισμένη.
- Στην παράμετρο I_{p2} αποδόθηκε η μεγαλύτερη βαρύτητα (1,2), δεδομένου ότι επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την προσθήκη φερριτών και παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία στη νέα Έκδοση 3 του Προτύπου [27].
- Στις παραμέτρους I_{30} και I_{60} αποδόθηκε υψηλή βαρύτητα (1,0), διότι επηρεάζονται αισθητά από τη χρήση φερριτών.
- Ο δείκτης nRMSE έλαβε μέτρια βαρύτητα (0,5), προκειμένου να αποφευχθεί η παραμόρφωση του συνολικού περιβλήματος της κυματομορφής.

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας κατάταξης οδηγούν σε κρίσιμα τεχνικά συμπεράσματα:

- Οι πέντε πρώτες θέσεις της κατάταξης καταλαμβάνονται αποκλειστικά από λύσεις που βασίζονται σε φερριτικά υλικά τύπου Α ή Β, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι, όταν απαιτείται ουσιαστική μείωση στην παράμετρο I_{p2} , τα φερριτικά υλικά με φασματικό εύρος εντός της περιοχής της δεύτερης αιχμής (6 MHz – 30 MHz) αποτελούν τις καταλληλότερες επιλογές.
- Οι διατάξεις με πολλαπλές περιελίξεις του καλωδίου γείωσης γύρω από τον φερρίτη δεν αποδείχθηκαν αποδοτικές. Κανένας συνδυασμός με δύο ή τρεις περιελίξεις δεν περιλαμβάνεται στις δέκα καλύτερες θέσεις της κατάταξης. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι οι επιπλέον περιελίξεις είτε οδηγούν σε υπερεξασθένηση της δεύτερης αιχμής (για υλικά τύπου Α και Β), είτε προκαλούν δυσμενή μεταβολή στις παραμέτρους I_{30} και I_{60} (για υλικά τύπου C και D).

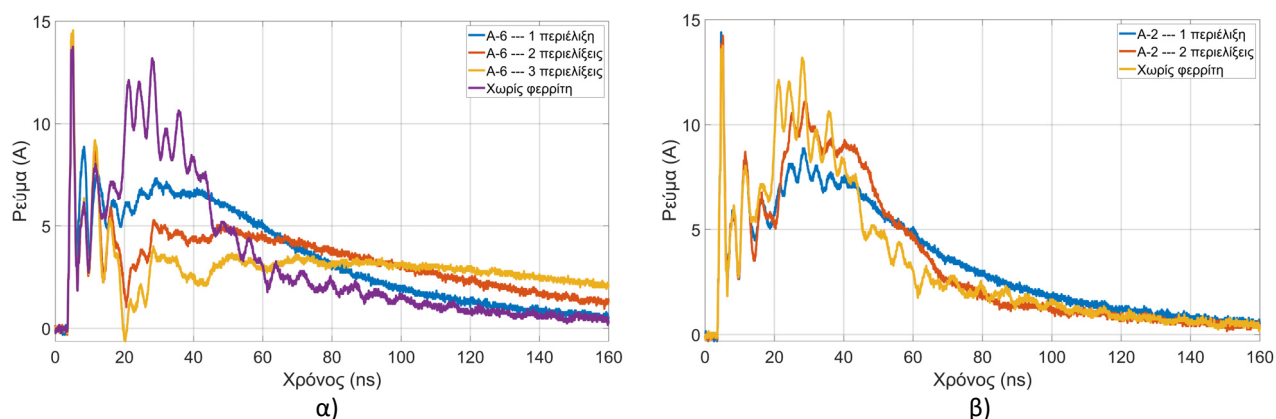
Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω συμπεράσματα εξαρτώνται άμεσα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση γεννήτριας και ισχύουν σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η παράμετρος I_{p2} υπερβαίνει αισθητά τα επιτρεπόμενα όρια του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]. Σε άλλους τύπους γεννητριών, η κατάταξη ενδέχεται να διαφοροποιηθεί σημαντικά. Παρά ταύτα, η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης διαθέτει καθολική εφαρμοσιμότητα, καθώς, με κατάλληλη προσαρμογή των συντελεστών βαρύτητας, μπορεί να αξιοποιηθεί για κάθε περίπτωση τροποποίησης ή βελτιστοποίησης της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η ίδια μεθοδολογία μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί για περαιτέρω βελτιστοποίηση της κυματομορφής γεννητριών που ήδη συμμορφώνονται με το Πρότυπο, με στόχο τη μείωση της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας, διασφαλίζοντας ότι τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της γεννήτριας προσεγγίζουν κατά το δυνατόν περισσότερο την ιδανική κυματομορφή αναφοράς.

3.3.3. Εκτίμηση κορεσμού (Φάση 3)

Τα φαινόμενα κορεσμού υπό μεταβατικές συνθήκες έχουν αναγνωριστεί ως καθοριστικός παράγοντας κατά την εφαρμογή φερριτών αρπάγης. Ο πυρήνας του φερρίτη διαρρέεται από ρεύματα υψηλού πλάτους και, λόγω της μη γραμμικής μαγνητικής του απόκρισης, δύναται να οδηγηθεί ταχέως στο κατώφλι κορεσμού, μειώνοντας σημαντικά την ικανότητά του για εξασθένηση.

Το φαινόμενο αυτό καταγράφηκε και στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, όταν παρατηρήθηκε κορεσμός κατά την αύξηση του αριθμού των περιελίξεων γύρω από τον φερρίτη, χωρίς αντίστοιχη αύξηση των διαστάσεών του. Το αποτέλεσμα ήταν ο διπλασιασμός ή ακόμη και ο τριπλασιασμός του μεταβατικού ρεύματος που διαρρέει τον πυρήνα. Στο Σχήμα 3.15α παρουσιάζεται χαρακτηριστική περίπτωση, στην οποία η αύξηση των περιελίξεων οδηγεί στα αναμενόμενα αποτελέσματα, δηλαδή σε περαιτέρω εξασθένηση της δεύτερης αιχμής χωρίς εμφάνιση κορεσμού. Αντιθέτως, στο Σχήμα 3.15β αποδίδεται σενάριο κατά το οποίο η αύξηση των περιελίξεων γύρω από φερρίτη μικρού μεγέθους (με μέγιστη διάμετρο καλωδίου 6,3 mm) προκαλεί σημαντική υποβάθμιση της εξασθένησης, αναδεικνύοντας τους ενδεχόμενους κινδύνους που ενέχει η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης του φαινομένου.

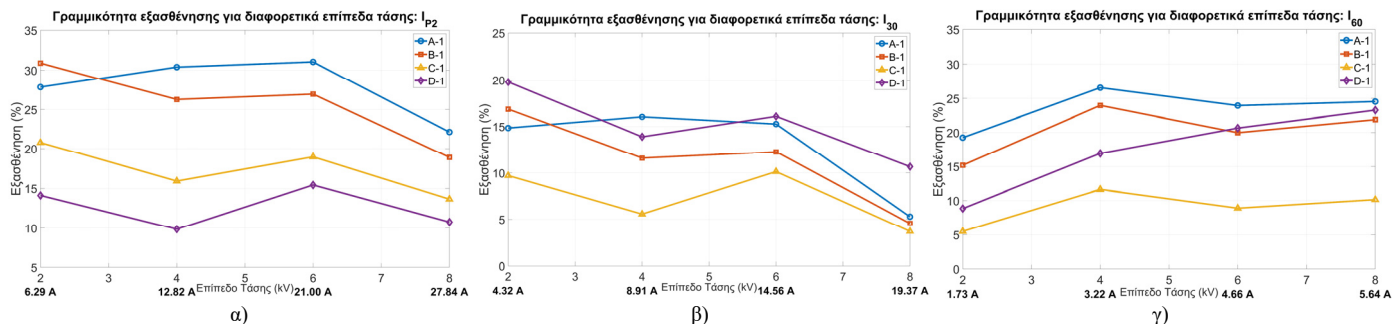


Σχήμα 3.15: Σύγκριση κυματομορφών για διαφορετικό αριθμό περιελίξεων του καλωδίου γείωσης γύρω από φερρίτη αρπάγης: (α) 1, 2 ή 3 περιελίξεις γύρω από τον φερρίτη A-6, (β) 1 και 2 περιελίξεις γύρω από τον φερρίτη A-2

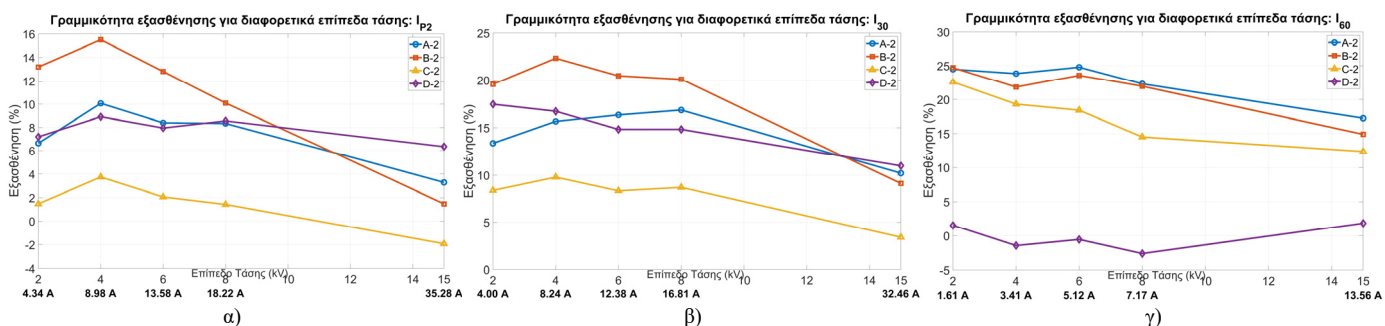
Η εκτίμηση φαινομένων κορεσμού κρίνεται κρίσιμη για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, καθώς η επιλεγείσα λύση οφείλει να παραμένει αποτελεσματική και κατά την εφαρμογή σε υψηλότερα επίπεδα τάσης δοκιμής, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν διπλασιασμό της έντασης του ρεύματος (π.χ. στο επίπεδο των 8 kV) ή και περαιτέρω αύξηση, σε περιπτώσεις ακραίων σεναρίων δοκιμής (π.χ. 15 kV).

Στο Σχήμα 3.16 αποτυπώνεται, ως παράδειγμα, η γραμμικότητα των ποσοστών εξασθένησης για τις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής (δηλαδή τις παραμέτρους I_{p2} , I_{30} και I_{60}), σε όλα τα επίπεδα τάσης δοκιμής που καθορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], για τα διαφορετικά υλικά φερρίτη (ίδια μέγιστη διάμετρος καλωδίου – 4,9 mm) με χρήση της γεννήτριας EM Test Dito. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων χωρίς την προσθήκη φερρίτη, παρέχοντας σαφή πληροφορία για τα εκάστοτε κατώφλια κορεσμού του ρεύματος ανά επίπεδο τάσης δοκιμής.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζονται με παρόμοιο τρόπο τα ποσοστά εξασθένησης για τις ίδιες τρεις παραμέτρους, με τη χρήση της γεννήτριας Teseq NSG 438, περιλαμβάνοντας και το επιπλέον επίπεδο δοκιμής των +15 kV. Οι αναλύσεις αυτές συμβάλλουν στην τεκμηρίωση της συμπεριφοράς των φερριτών υπό συνθήκες υψηλής διέγερσης και στη διαμόρφωση ασφαλών ορίων χρήσης, αποτρέποντας την εμφάνιση φαινομένων μαγνητικού κορεσμού κατά τη διάρκεια των δοκιμών.



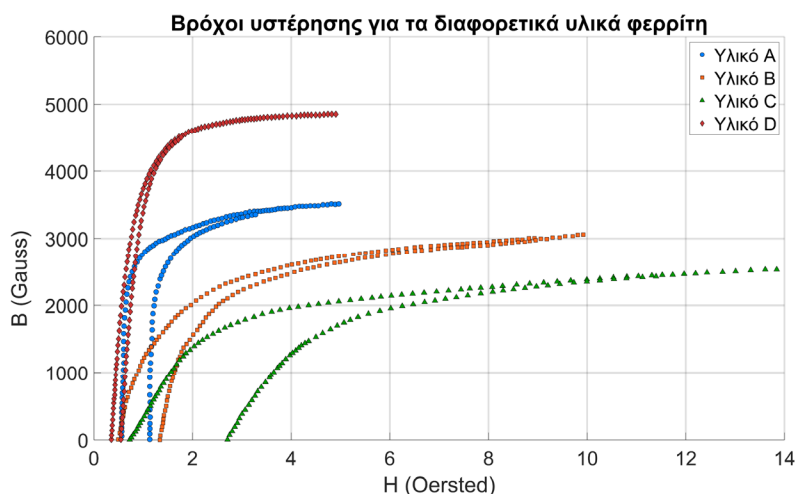
Σχήμα 3.16: Γραμμικότητα του ποσοστού εξασθένισης για τη γεννήτρια EM Test Dito για τις τρεις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής: (α): I_{P2} , (β): I_{30} , (γ): I_{60}



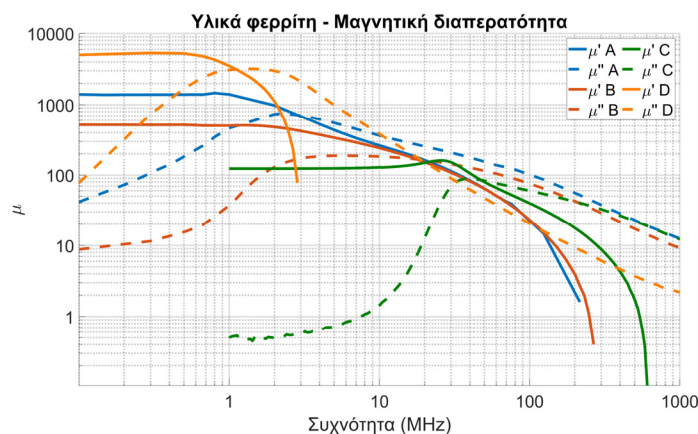
Σχήμα 3.17: Γραμμικότητα του ποσοστού εξασθένισης για τη γεννήτρια TESEQ NSG438 για τις τρεις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής: α): I_{P2} , β): I_{30} , γ): I_{60}

Λόγω διαφορών στις διατομές των καλωδίων γείωσης των δύο γεννητριών, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μεγέθη φερριτών. Ο κορεσμός του πυρήνα καθίσταται εμφανής και στις δύο περιπτώσεις, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω τη σημασία της συγκεκριμένης ανάλυσης, ιδίως για επίπεδα τάσης άνω των 6 kV και για τα δύο αυτά μεγέθη φερριτών.

Η τελική φάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας περιλαμβάνει τον υπολογισμό του αναμενόμενου ρεύματος κορεσμού για κάθε φερρίτη, με αξιοποίηση δεδομένων που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Ο υπολογισμός δύναται να πραγματοποιηθεί είτε μέσω του βρόχου υστέρησης (Σχήμα 3.18), είτε μέσω διαγράμματος της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη συχνότητα (Σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.18: Βρόχοι υστέρησης για τα τέσσερα διαφορετικά υλικά



Σχήμα 3.19: Τιμές μαγνητικής διαπερατότητας για τα τέσσερα διαφορετικά υλικά

Το ρεύμα κορεσμού εξαρτάται κυρίως από τις μαγνητικές ιδιότητες και τις διαστάσεις του φερρίτη και υπολογίζεται βάσει του νόμου του Ampere:

$$I_{\text{sat}} = \frac{B_{\text{sat}} \cdot A_{\text{core}}}{4 \cdot N \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot L} \quad (21)$$

όπου: B_{sat} η πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού (σε Tesla), η οποία παρέχεται από τον κατασκευαστή είτε ως αριθμητική τιμή είτε μέσω διαγράμματος υστέρησης, A_{core} η ενεργός εγκάρσια επιφάνεια του φερρίτη, N ο αριθμός περιελίξεων, μ_0 η διαπερατότητα του κενού, μ_r η σχετική διαπερατότητα υλικού για συγκεκριμένη συχνότητα, L το μήκος του φερρίτη.

Καθώς οι κατασκευαστές δεν παρέχουν πάντοτε συγκεκριμένα δεδομένα για την επιφάνεια A_{core} , γίνεται προσέγγιση μοντελοποιώντας τον φερρίτη ως κούλο κύλινδρο, οπότε η εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$I_{\text{sat}} = \frac{B_{\text{sat}} \cdot \pi(D_{\text{outer}}^2 - D_{\text{inner}}^2)}{4 \cdot N \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot L} \quad (22)$$

όπου: D_{outer} και D_{inner} είναι, αντίστοιχα, οι τιμές της εξωτερικής και της εσωτερικής διαμέτρου του πυρήνα του φερρίτη — τιμές που διατίθενται συνήθως στα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή.

Χρησιμοποιώντας τα Σχήματα 3.18 και 3.19, σε συνδυασμό με τα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή και την εξίσωση (22), υπολογίζονται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.15 δύο τιμές κορεσμού του ρεύματος για δύο διαφορετικές συχνότητες: 6 MHz και 30 MHz.

Πίνακας 3.15: Εκτίμηση ρεύματος κορεσμού για κάθε φερρίτη

Φερρίτης	Εσωτερική διάμετρος	Εξωτερική διάμετρος	Μήκος φερρίτη	B_{sat}	μ' 6MHz	μ' 30MHz	I_{sat} 6MHz	I_{sat} 30MHz
	[mm]	[mm]	[mm]	[T]	-	-	[A]	[A]
A-1	4,900	16,80	24,00	0,260	330	80	5,298	21,86
A-2	6,300	20,00	29,00	0,260	330	80	6,118	25,24
A-3	8,700	21,00	29,00	0,260	330	80	6,203	25,59
A-4	9,850	23,00	29,00	0,260	330	80	7,335	30,26
A-5	12,75	30,00	29,00	0,260	330	80	12,52	51,65
A-6	18,00	38,50	45,00	0,260	330	80	12,67	52,28
B-1	4,900	16,80	24,00	0,250	290	66	5,797	25,47
B-2	6,300	20,00	29,00	0,250	290	66	6,694	29,41
B-3	8,700	21,00	29,00	0,250	290	66	6,787	29,82

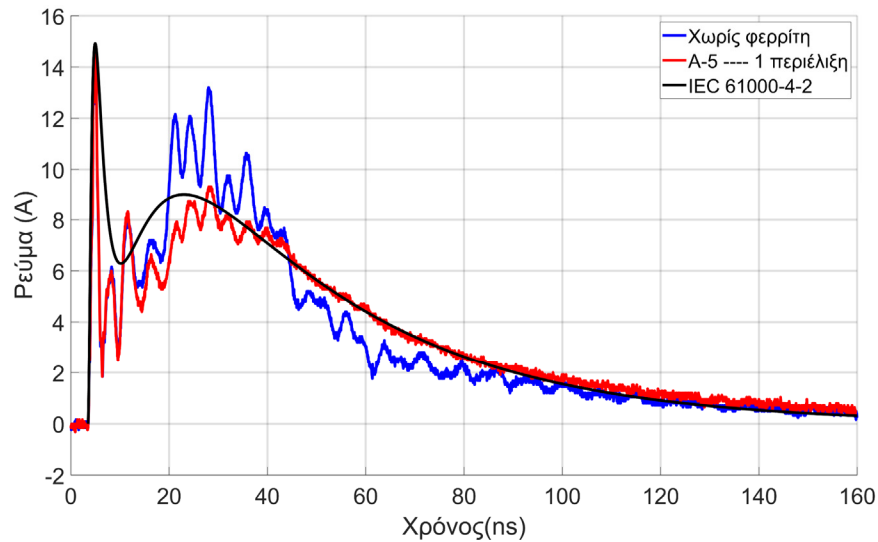
B-4	9,850	23,00	29,00	0,250	290	66	8,026	35,26
B-5	12,75	30,00	29,00	0,250	290	66	13,70	60,20
B-6	18,00	38,50	45,00	0,250	290	66	13,87	60,93
C-1	4,900	16,80	24,00	0,220	126	70	11,74	21,13
C-2	6,300	20,00	29,00	0,220	126	70	13,56	24,41
C-3	8,700	21,00	29,00	0,220	126	70	13,75	24,74
C-4	9,850	23,00	29,00	0,220	126	70	16,26	29,26
C-5	12,75	30,00	29,00	0,220	126	70	27,75	49,95
C-6	18,00	38,50	45,00	0,220	126	70	28,09	50,56
D-1	4,900	16,80	24,00	0,450	N/A	N/A	N/A	N/A
D-2	6,300	20,00	29,00	0,450	N/A	N/A	N/A	N/A
D-3	8,700	21,00	29,00	0,450	N/A	N/A	N/A	N/A
D-4	9,850	23,00	29,00	0,450	N/A	N/A	N/A	N/A
D-5	12,75	30,00	29,00	0,450	N/A	N/A	N/A	N/A
D-6	18,00	38,50	45,00	0,450	N/A	N/A	N/A	N/A

Οι συχνότητες αυτές αντιστοιχούν σε δύο διακριτές περιοχές του σκέλους της δεύτερης αιχμής. Συγκεκριμένα, η συχνότητα των 30 MHz επηρεάζει κυρίως το ανοδικό τμήμα και τη μέγιστη τιμή της δεύτερης αιχμής, ενώ η συχνότητα των 6 MHz σχετίζεται με το τμήμα καθόδου της. Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης, καθώς, όπως προκύπτει και από τα δεδομένα του Πίνακα 3.15 οι τιμές του ρεύματος κορεσμού (I_{sat}) διαφοροποιούνται σημαντικά σε συνάρτηση με τη συχνότητα, λόγω της μεταβολής της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας (μ_r) του φερρίτη, και αντιστοιχούν σε διαφορετικές παραμέτρους της κυματομορφής. Ειδικότερα, η τιμή του I_{sat} στα 30 MHz συνδέεται κυρίως με τις παραμέτρους I_{p2} και I_{30} , ενώ η τιμή στα 6 MHz σχετίζεται άμεσα με την παράμετρο I_{60} .

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές κορεσμού που παρατίθενται έχουν υπολογιστεί για μία περιτύλιξη ($N = 1$) του καλωδίου γείωσης γύρω από τον φερρίτη. Για μεγαλύτερες τιμές N (π.χ. δύο ή τρεις περιτυλίξεις), οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος κορεσμού μειώνονται αναλογικά, γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάγκη προσεκτικής επιλογής του πλήθους των περιελίξεων, προκειμένου να αποφευχθεί πρόωρος κορεσμός του πυρήνα.

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.15 με τα δεδομένα διακρίβωσης για διάφορα επίπεδα τάσης δοκιμής, το εργαστήριο μπορεί να αξιολογήσει την καταλληλότητα των φερριτών με την υψηλότερη κατάταξη — όπως αυτοί προέκυψαν από τη διαδικασία αξιολόγησης και κατάταξης που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα — και για υψηλότερα επίπεδα δοκιμών, επιλέγοντας τη βέλτιστη λύση σε κάθε περίπτωση. Για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, ο φερρίτης με την υψηλότερη κατάταξη (A-5) επισημαίνεται με έντονη γραφή στον Πίνακα 3.15. Για τον συγκεκριμένο φερρίτη, οι τιμές των $I_{sat@30MHz}$ και $I_{sat@6MHz}$ υπολογίστηκαν σε 51,65 A και 12,52 A αντίστοιχα, τιμές που υπερβαίνουν σημαντικά τις παραμέτρους I_{p2} , I_{30} και I_{60} για το επίπεδο δοκιμής +8 kV (Πίνακας 3.9), επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά του ακόμη και για υψηλότερα επίπεδα δοκιμής.

Το Σχήμα 3.20 παρουσιάζει την κυματομορφή του ρεύματος για επίπεδο δοκιμής +4 kV μετά την εφαρμογή του φερρίτη με την υψηλότερη κατάταξη, σε σύγκριση με την αρχική κυματομορφή (όπως καταγράφηκε στην αναφορά διακρίβωσης) και την κυματομορφή αναφοράς του Προτύπου IEC 61000-4-2, προσφέροντας οπτική επιβεβαίωση των ποσοτικών αποτελεσμάτων του Πίνακα 3.15 και αναδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας τροποποίησης του σκέλους της δεύτερης αιχμής.



Σχήμα 3.20: Σύγκριση μεταξύ της αρχικής κυματομορφής, της τροποποιημένης κυματομορφής με τον φερρίτη υψηλότερης κατάταξης και της κυματομορφής του προτύπου IEC 61000-4-2

3.3.4. Συμπεράσματα

Ένας από τους κύριους στόχους της παρούσας διατριβής ήταν η ανάδειξη των επιπτώσεων που επιφέρει η πρόσφατη αναθεώρηση του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] στον εξοπλισμό δοκιμών — και ειδικότερα στις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που βρίσκονται ήδη σε χρήση από διαπιστευμένα εργαστήρια — μέσω της εισαγωγής μιας νέας παραμέτρου κυματομορφής, η οποία ρυθμίζει τη μέγιστη τιμή ρεύματος του βραδύτερου σκέλους της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην Ενότητα 3.1 τεκμηριώθηκε ότι ένας σημαντικός αριθμός τέτοιων γεννητριών ενδέχεται να μην συμμορφώνεται με την παράμετρο I_{p2} . Για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού, συζητήθηκαν εναλλακτικές λύσεις, όπως η αντικατάσταση της γεννήτριας ή η αναβάθμισή της από τον κατασκευαστή, οι οποίες κρίθηκαν οικονομικά ασύμφωρες.

Ο βασικός στόχος της παρούσας ενότητας ήταν η πρόταση μιας σημαντικά πιο οικονομικής και πρακτικής εναλλακτικής λύσης, η οποία δεν απαιτεί καμία τροποποίηση στα βασικά εξαρτήματα της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα από οποιοδήποτε εργαστήριο. Η προτεινόμενη λύση αναπτύχθηκε υπό τη μορφή μίας μεθοδολογίας βασισμένης στη χρήση φερριτών αρπάγης. Πιο συγκεκριμένα, ευρύ φάσμα εμπορικά διαθέσιμων φερριτών αρπάγης — με διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες, φασματική περιοχή αποτελεσματικής απόκρισης και διαστάσεις — τοποθετήθηκαν σταδιακά στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διακρίβωσης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι διαφορετικοί φερρίτες επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό το σκέλος της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής, ανάλογα με τις φυσικές και μαγνητικές ιδιότητές τους. Παρουσιάζοντας λεπτομερώς τα αποτελέσματα για όλες τις κρίσιμες παραμέτρους της κυματομορφής, καθώς και σενάρια με επιπλέον περιτυλίξεις του καλωδίου γύρω από τον φερρίτη, προσδιορίστηκαν συγκεκριμένες λύσεις για τη γεννήτρια που εξετάστηκε. Οι λύσεις αυτές αξιολογήθηκαν και κατατάχθηκαν βάσει της απόκλισης των τροποποιημένων παραμέτρων της κυματομορφής από τις ιδανικές τιμές που καθορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], καθώς και βάσει της συνολικής προσαρμογής των κυματομορφών στην κυματομορφή αναφοράς, με στόχο την ταυτοποίηση της

καταλληλότερης λύσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης και κατάταξης μπορεί να εφαρμοστεί και σε γεννήτριες που ήδη συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις της αναθεωρημένης έκδοσης του Προτύπου. Μέσω της περαιτέρω βελτιστοποίησης της παραγόμενης κυματομορφής, τα εργαστήρια δοκιμών μπορούν να μειώσουν την αβεβαιότητα επαναληψιμότητας και αναπαραγωγιμότητας, διασφαλίζοντας ότι τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο την ιδανική κυματομορφή αναφοράς.

Το τελικό στάδιο της μελέτης εστίασε στα φαινόμενα κορεσμού που σχετίζονται με την προτεινόμενη μεθοδολογία με χρήση φερριτών αρπάγης, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για τις προκλήσεις που συνοδεύουν την εφαρμογή της και ενσωματώνοντάς τις στο προτεινόμενο πλαίσιο επιλογής και αξιολόγησης.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διατριβή συνεισφέρει ουσιαστικά στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, προτείνοντας στα εργαστήρια δοκιμών μία απλή, άμεσα εφαρμόσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για τη συμμόρφωση και τη βελτιστοποίηση των κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγονται από γεννήτριες σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] και ειδικότερα τη νέα, αναθεωρημένη έκδοσή του, η οποία τέθηκε σε ισχύ τον Μάρτιο του 2025. Η συμβολή της έγκειται όχι μόνο στην παροχή μίας πρακτικής τεχνικής λύσης, αλλά και στην ανάπτυξη μίας συστηματικής, επαναληψιμής μεθοδολογίας αξιολόγησης, η οποία μπορεί να προσαρμοστεί στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε γεννήτριας και να υποστηρίξει τη μείωση των αβεβαιοτήτων στις δοκιμές συμμόρφωσης. Παρά τις επιμέρους τεχνικές προκλήσεις, τα αποτελέσματα της μελέτης αποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση αποτελεί μία ισχυρή και αποτελεσματική επιλογή για τη διατήρηση της συμμόρφωσης με το Πρότυπο, ακόμη και για υπάρχοντα εργαστηριακά συστήματα.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική αξιολόγηση της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και προσομοίωσή της μέσω φερριτών αρπάγης

4.1. Επίδραση του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ESD κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2

Όπως αναπτύχθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 2, η διαδικασία διακρίβωσης και οι δοκιμές ατρωσίας έναντι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενέχουν πολλαπλές πηγές αβεβαιότητας, οι οποίες δύνανται να επηρεάσουν τη μορφή της κυματομορφής του ρεύματος και να επιφέρουν, σε αρκετές περιπτώσεις, αποκλίσεις εκτός των ορίων που καθορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27].

Σημαντική εξέλιξη συνιστά η σταδιακή υιοθέτηση πλήρως αυτοματοποιημένων διαδικασιών διακρίβωσης και δοκιμών, μέσω της αξιοποίησης ρομποτικών βραχιόνων, χωρίς την παρουσία ανθρώπινου χειριστή. Η μετάβαση αυτή συνδέεται με ζητήματα ακρίβειας και επαναληψιμότητας, καθώς η απουσία του ανθρώπινου παράγοντα ενδέχεται να διαφοροποιεί κρίσιμα χαρακτηριστικά της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Παράλληλα, προκύπτει η ανάγκη επανεκτίμησης των υφιστάμενων ορίων διακρίβωσης, όπως αυτά προσδιορίζονται στην ισχύουσα έκδοση (3) του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27], ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσο ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες δοκιμών, όπου η ανθρώπινη παρουσία αποτελεί σταθερή παράμετρο.

Επιπλέον, υφίσταται το ενδεχόμενο τα καθορισμένα όρια να μην αντανακλούν πλέον με ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες, όταν εφαρμόζονται σε αυτοματοποιημένες διατάξεις με ρομποτικό βραχίονα, γεγονός που ενδέχεται να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά της κυματομορφής.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω πηγών αβεβαιότητας και ιδίως εκείνων που άπτονται της διαδικασίας εκφόρτισης αέρος, η αυτοματοποιημένη υλοποίηση δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχει προσελκύσει έντονο ερευνητικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον [58]. Στην αγορά διατίθενται ήδη εμπορικές λύσεις [69], [133] ενώ βρίσκονται σε εξέλιξη πιο προηγμένα συστήματα, τα οποία αξιοποιούν τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) [134]. Παρόλα αυτά, πέραν των υφιστάμενων τεχνικών περιορισμών των ρομποτικών υλοποιήσεων [46], παρατηρείται πιθανότητα εμφάνισης διαφορών μεταξύ των δοκιμών που διενεργούνται με την παρέμβαση ανθρώπινου χειριστή και εκείνων που εκτελούνται αυτοματοποιημένα, εξαιτίας της απουσίας της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στις δεύτερες. Αν και το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27] προέβλεψε την αντικατάσταση του ανθρώπινου χειριστή με τρίποδο κατά το στάδιο της διακρίβωσης, με σκοπό τη βελτίωση της επαναληψιμότητας, οι επιδράσεις του ανθρώπινου σώματος, καθώς και της δύναμης συγκράτησης επί της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες υφίστανται κατά τις δοκιμές ατρωσίας, δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται αφενός στη διερεύνηση της επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και αφετέρου στην αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης φερριτών αρπάγης για την προσομοίωση των εν λόγω επιδράσεων. Πρόσφατα ευρήματα ([36], [63], [64]), καθώς και τα αποτελέσματα της Ενότητας 3.3, καταδεικνύουν ότι οι φερρίτες αρπάγης, τοποθετημένοι επί του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, δύνανται να τροποποιήσουν την κυματομορφή του ρεύματος κατά τρόπο ώστε αυτή να συμμορφώνεται προς τις απαιτήσεις του Προτύπου, και ιδιαιτέρως προς την παράμετρο I_{p2} . Η εν λόγω προσέγγιση επιδιώκει να προσφέρει στους κατασκευαστές γεννητριών τη δυνατότητα καθορισμού συγκεκριμένου φερρίτη, ο οποίος θα χρησιμοποιείται είτε κατά το στάδιο της διακρίβωσης είτε κατά τη διενέργεια αυτοματοποιημένων δοκιμών, με σκοπό την αναπαραγωγή της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος και τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

Για τη συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων φερριτών αξιοποιούνται γενικοί δείκτες σύγκρισης κυματομορφών, όπως η Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE), η διασυσχέτιση (cross-correlation) και η απόσταση Dynamic Time Warping (DTW). Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη δείκτες απόκλισης των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης καθώς και του φασματικού περιεχομένου, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιδράσεις διαφορετικών τύπων φερριτών και των θέσεων τοποθέτησής τους. Η συγκριτική αυτή ανάλυση εκπονείται έναντι κυματομορφής αναφοράς, η οποία καταγράφηκε με τον χειριστή να κρατά τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με στόχο τον εντοπισμό της βέλτιστης διάταξης που επιτυγχάνει την πιστότερη αναπαραγωγή της ανθρώπινης επίδρασης.

4.1.1. Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στις κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και για την ποσοτικοποίηση της σχετικής αβεβαιότητας, σχεδιάστηκαν δύο ελεγχόμενα σενάρια μετρήσεων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]. Το πρώτο σενάριο αφορά τη διαδικασία διακρίβωσης, ενώ το δεύτερο επικεντρώνεται στη διαδικασία δοκιμών ατρωσίας.

Στο πλαίσιο κάθε σεναρίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από δέκα διαφορετικούς ανθρώπινους χειριστές, οι οποίες στη συνέχεια συγκρίθηκαν, με σκοπό την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων ως προς τον αντίκτυπο της ανθρώπινης παρουσίας στις παραμέτρους της κυματομορφής.

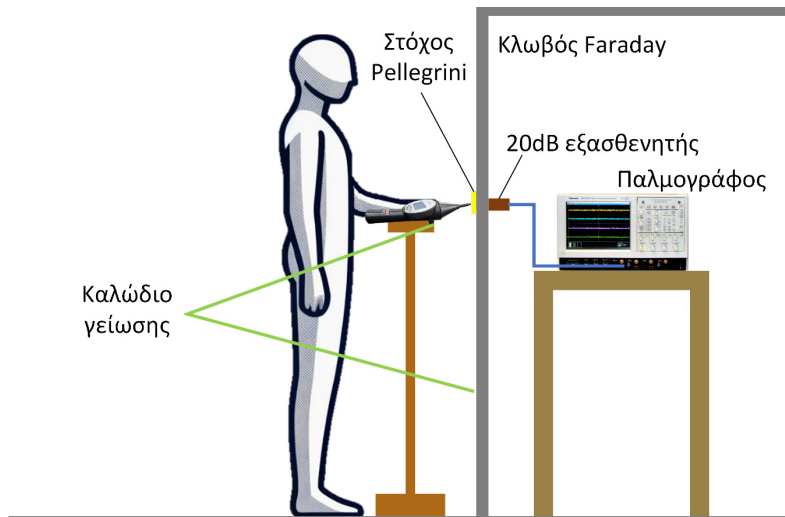
4.1.1.1. Τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης

Το πρώτο σενάριο επικεντρώνεται σε τροποποιημένη εκδοχή της τυποποιημένης διάταξης διακρίβωσης, όπως αυτή περιγράφεται στο νέο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Στη διάταξη αυτή, η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξακολουθεί να τοποθετείται επί ξύλινου τριπόδου, ενώ ταυτόχρονα συγκρατείται από ανθρώπινο χειριστή. Ο χειριστής κρατά τη γεννήτρια από τη λαβή και ακουμπά τη σκανδάλη, προσομοιώνοντας τη φυσική στάση και τον τρόπο χειρισμού που εφαρμόζεται κατά τις δοκιμές ατρωσίας.

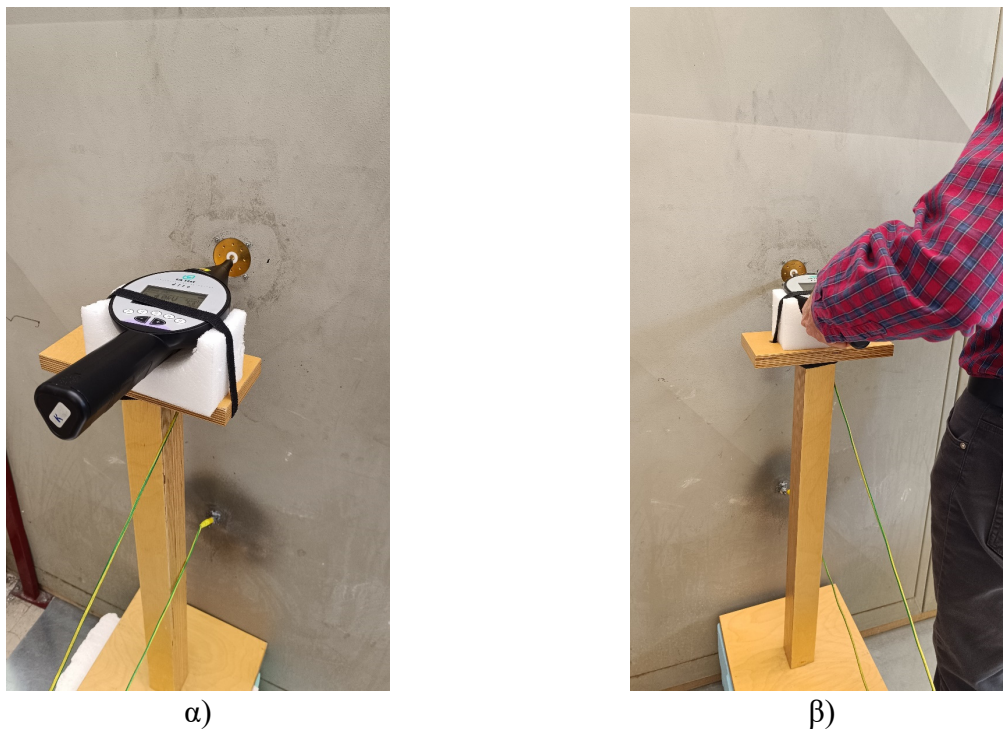
Στη βάση της διάταξης, κάτω από τον χειριστή και τον εξοπλισμό, τοποθετείται το επίπεδο αναφοράς γης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της τρίτης έκδοσης του Προτύπου [27]. Το επίπεδο αποτελείται από μεταλλική πλάκα, η οποία συνδέεται με το σύστημα γείωσης του εργαστηρίου. Το καλώδιο γείωσης της

γεννήτριας τοποθετείται με διάταξη ισοσκελούς τριγώνου, όπως προβλέπεται από το Πρότυπο, χωρίς να συγκρατείται από τον χειριστή.

Η σχηματική απεικόνιση της διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1, ενώ φωτογραφικό στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια της τροποποιημένης διακρίβωσης περιλαμβάνεται στο Σχήμα 4.2. Η εν λόγω τροποποιημένη διάταξη διασφαλίζει τη γεωμετρική συνέπεια του περιβάλλοντος διακρίβωσης και, ταυτόχρονα, επιτρέπει τη φυσική αλληλεπίδραση του χειριστή με το σύστημα, διευκολύνοντας τη διερεύνηση της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στα χαρακτηριστικά της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της τροποποιημένης διάταξης διακρίβωσης με την παρουσία χειριστή



Σχήμα 4.2: Φωτογραφική απεικόνιση των διατάξεων διακρίβωσης: α) χωρίς χειριστή (διάταξη του Προτύπου) και β) με χειριστή

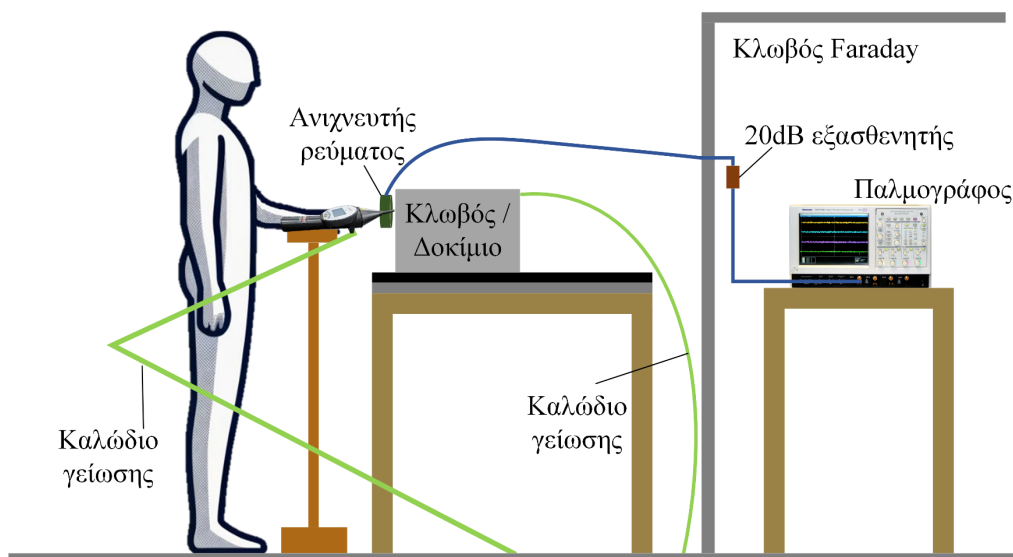
Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε την εκτέλεση δέκα εκφορτίσεων επαφής, τάσης +4 kV, από δέκα (10) διαφορετικούς χειριστές, με σκοπό την εξέταση της επίδρασης της ανθρώπινης παρουσίας στην κυματομορφή του ρεύματος. Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, η διάταξη παρέμεινε αμετάβλητη, προκειμένου να διασφαλιστεί η βελτιστοποίηση της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε χωριστά για καθεμία από τις τρεις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που διαθέτει το εργαστήριο (EM Test Dito, Schaffner NSG 433 και Teseq NSG 438), εξασφαλίζοντας την αναπαραγωγικότητα των μετρήσεων μεταξύ διαφορετικών τύπων εξοπλισμού.

4.1.1.2. Διάταξη δοκιμών

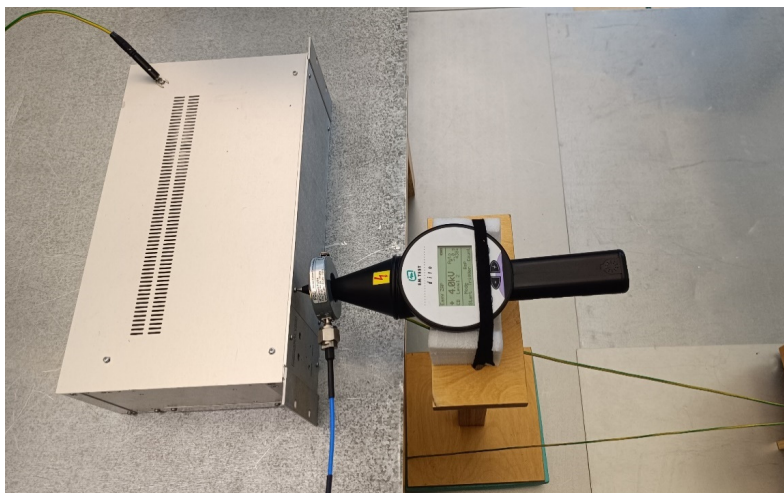
Το δεύτερο σενάριο σχεδιάστηκε με σκοπό την προσομοίωση συνθηκών ενός τυπικού περιβάλλοντος δοκιμών ατρωσίας, κατά το οποίο οι εκφορτίσεις πραγματοποιούνται απευθείας επάνω σε γειωμένο μεταλλικό κλωβό, ο οποίος λειτουργεί ως προσομοίωση του μεταλλικού περιβλήματος ενός δοκιμίου. Στο συγκεκριμένο πείραμα, η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χειριζόταν από χειριστή, χωρίς ωστόσο ο χειριστής να έρχεται σε επαφή με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο της διάταξης, προκειμένου να απομονώνεται η επίδρασή του στην κυματομορφή του ρεύματος.

Η διάταξη δοκιμής βασίστηκε στις προδιαγραφές του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27], με ορισμένες μικρές προσαρμογές. Όπως και στο σενάριο διακρίβωσης, τόσο η συνολική διάταξη όσο και ο χειριστής τοποθετήθηκαν επάνω στο επίπεδο αναφοράς γης. Επιπλέον, το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας τοποθετήθηκε σε διάταξη ισοσκελούς τριγώνου, αποφεύγοντας να παραμένει ελεύθερο (με τυχαίο τρόπο) στο δάπεδο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου.

Σε αντίθεση με τη διαδικασία διακρίβωσης, όπου οι εκφορτίσεις πραγματοποιούνται στον στόχο Pellegrini, στο παρόν σενάριο η εκφόρτιση εφαρμόστηκε απευθείας επάνω στον μεταλλικό κλωβό. Για την ακριβή καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος στον παλμογράφο κρίθηκε αναγκαία η χρήση ανιχνευτή ρεύματος, ο οποίος τοποθετήθηκε γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας. Η διάταξη απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 4.3, ενώ φωτογραφικό στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρατίθεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοκιμών (με παρουσία χειριστή)



Σχήμα 4.4: Φωτογραφία της διάταξης δοκιμής ατρωσίας (χωρίς παρουσία χειριστή)

Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με εκείνη του σεναρίου διακρίβωσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από δέκα διαφορετικούς χειριστές, καθένας εκ των οποίων εκτέλεσε δέκα εκφορτίσεις επαφής, όλες με τάση +4 kV. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για καθεμία από τις τρεις διαθέσιμες γεννήτριες του εργαστηρίου (EM Test Dito, Schaffner NSG 433 και Teseq NSG 438), διασφαλίζοντας τη συλλογή εκτενούς και αντιπροσωπευτικού συνόλου δεδομένων.

Το πλήθος των μετρήσεων επιτρέπει την αξιόπιστη στατιστική επεξεργασία και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών χειριστών.

4.1.2. Καταγεγραμμένες κυματομορφές

Στα επόμενα Σχήματα παρουσιάζονται, ξεχωριστά για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και για κάθε διάταξη μέτρησης — τόσο για την τροποποιημένη διάταξη διακρίβωσης όσο και για τη διάταξη δοκιμών — οι μέσες κυματομορφές που προέκυψαν από τις μετρήσεις των δέκα χειριστών, καθώς και η μέση κυματομορφή αναφοράς, η οποία καταγράφηκε χωρίς την παρουσία χειριστή. Παράλληλα, παρατίθενται Πίνακες, στους οποίους καταγράφονται οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων της κυματομορφής, όπως καθορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], δηλαδή οι παράμετροι I_P , t_r , I_{P2} , I_{30} και I_{60} .

Για τις κυματομορφές που καταγράφηκαν στο πλαίσιο του δεύτερου σεναρίου μέτρησης — δηλαδή κατά την προσομοίωση πραγματικών δοκιμών με χρήση ανιχνευτή ρεύματος — εφαρμόστηκε η μέθοδος αντιστάθμισης που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.1. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε συνδυασμό γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και διάταξης μέτρησης, παρουσιάζεται αρχικά διάγραμμα που απεικονίζει ολόκληρη την κυματομορφή στο χρονικό εύρος από -1 ns έως 120 ns. Ακολουθούν δύο μεγεθύνσεις του διαγράμματος: η πρώτη καλύπτει το διάστημα από -1 ns έως 10 ns και η δεύτερη το διάστημα από 10 ns έως 80 ns, ώστε να αναδεικνύονται ευκρινώς οι δύο αιχμές της κυματομορφής και να επιτρέπεται αρχική οπτική σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων και της επίδρασης του χειριστή.

Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται σε Πίνακα, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η σύγκρισή τους με την κυματομορφή αναφοράς (χωρίς χειριστή). Στη συνέχεια, για κάθε παράμετρο υπολογίζεται η μέση

τιμή για κάθε περίπτωση χειριστή, καθώς και η εκατοστιαία απόκλιση της από την αντίστοιχη τιμή της κυματομορφής αναφοράς, σύμφωνα με τον εξής τύπο:

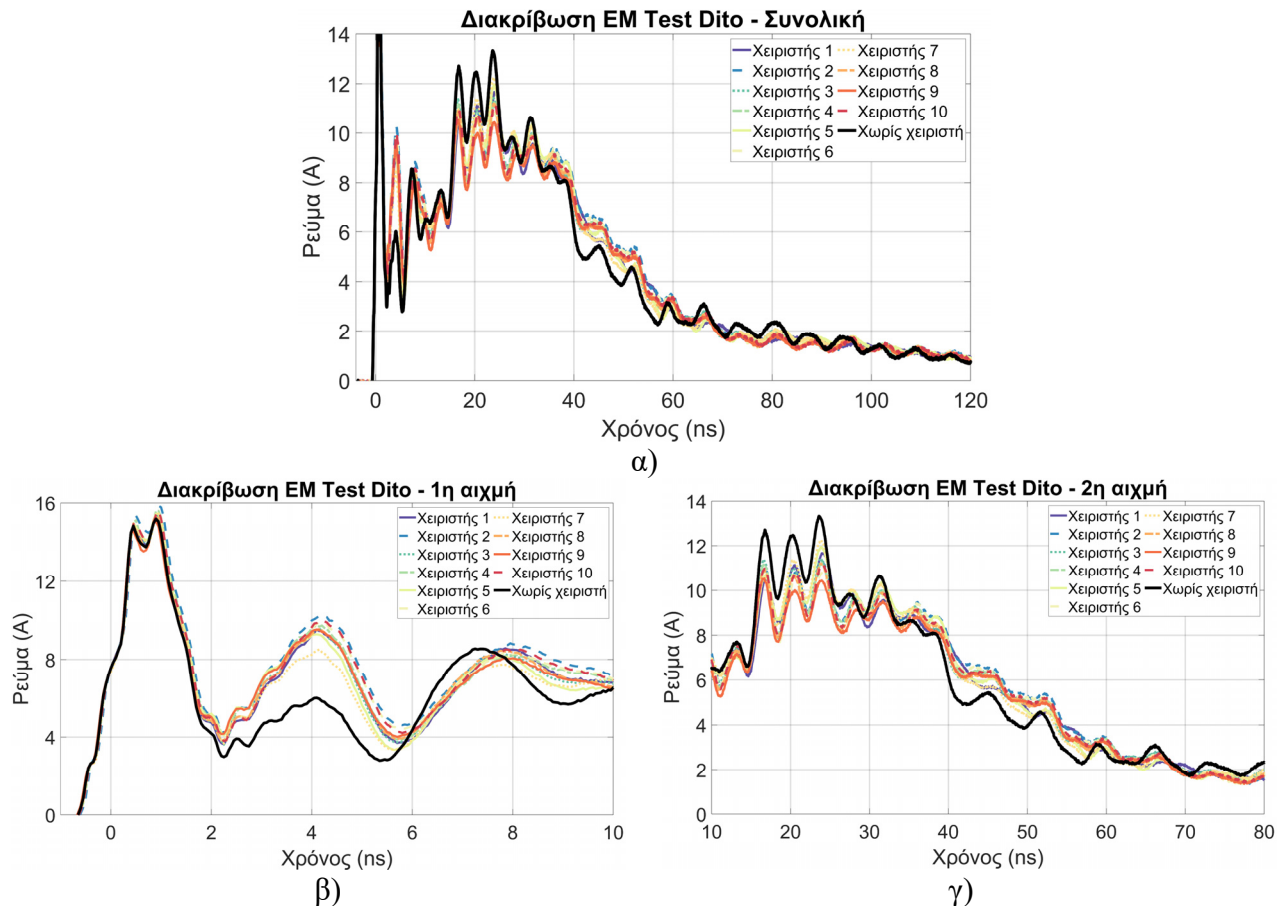
$$Deviation (\%) = \frac{Mean \text{ value between 10 operators} - Reference \text{ value (no operator)}}{Reference \text{ value (no operator)}} \cdot 100\% \quad (23)$$

Για κάθε παράμετρο υπολογίζεται ακόμα η αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας μεταξύ των 10 χειριστών:

$$Αβεβαιότητα \text{ αναπαραγωγιμότητας } (\%) = \frac{\sigma_{αν}}{\sqrt{N_{αν}} \cdot \mu_{αν}} \cdot 100\% \quad (24)$$

όπου: $\sigma_{αν}$ η τυπική απόκλιση των μετρήσεων της κάθε παραμέτρου για τους διαφορετικούς ανθρώπινους χειριστές, $N_{αν}$ το πλήθος των διαφορετικών χειριστών (στη συγκεκριμένη περίπτωση $N=10$) και $\mu_{αν}$ η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου για τους διαφορετικούς χειριστές.

4.1.2.1. Γεννήτρια EM Test Dito – Διάταξη διακρίβωσης



Σχήμα 4.5: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών χειριστών και για την περίπτωση απουσίας χειριστή για τη γεννήτρια EM Test Dito στην 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση): α) συνολική κυματομορφή, β) σκέλος 1^{ης} αιχμής, γ) σκέλος 2^{ης} αιχμής

Πίνακας 4.1: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τη γεννήτρια EM Test Dito στην 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Χειριστής	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[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 χειριστή καθίσταται εμφανής από τα παρουσιάζομενα σχήματα. Αν και η πρώτη αιχμή στο Σχήμα 4.5 φαίνεται να επηρεάζεται περιορισμένα, παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών των διαφόρων χειριστών και της κυματομορφής αναφοράς μετά το χρονικό σημείο των 2 ns. Παρόμοια ευρήματα προκύπτουν και από το Σχήμα 4.5, το οποίο αναδεικνύει αξιοσημείωτες διακυμάνσεις στα χρονικά διαστήματα 15 ns έως 30 ns και 40 ns έως 60 ns, καταδεικνύοντας τη σημαντική επίδραση του χειριστή στο ταλαντούμενο σκέλος της 2^{ης} αιχμής της κυματομορφής (εξασθένιση της παραμέτρου I_{P2} κατά 14.85%).

Οι υπολογισμένες αβεβαιότητες, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 4.1, υπογραμμίζουν τη σημασία των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ των διαφορετικών χειριστών. Συγκεκριμένα, οι χαμηλότερες τιμές αναπαραγωγιμότητας για τις παραμέτρους που σχετίζονται με την πρώτη αιχμή της κυματομορφής επιβεβαιώνουν τις προηγούμενες ποιοτικές παρατηρήσεις, σύμφωνα με τις οποίες ο χειριστής ασκεί περιορισμένη επίδραση στο αρχικό σκέλος του παλμού. Αντιθέτως, οι παράμετροι που αφορούν τη δεύτερη αιχμή εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές αναπαραγωγιμότητας, καταδεικνύοντας την έντονη επίδραση του χειριστή στο μεταγενέστερο σκέλος της κυματομορφής — επίδραση η οποία ενδέχεται να μην είναι αμέσως ορατή μέσω των μικρών αποκλίσεων στις μέσες τιμές του Πίνακα 4.1.

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της αναπαραγωγιμότητας, αυτά συγκρίθηκαν με την ενδογενή αβεβαιότητα επαναληψιμότητας της συγκεκριμένης γεννήτριας (Πίνακας 4.2), όπως αυτή προέκυψε από 100 διαδοχικές αυτοματοποιημένες εκφορτίσεις χωρίς την παρουσία χειριστή με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\text{Αβεβαιότητα επαναληψιμότητας (\%)} = \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{\sqrt{N_{\varepsilon\pi}} \cdot \mu_{\varepsilon\pi}} \cdot 100\% \quad (25)$$

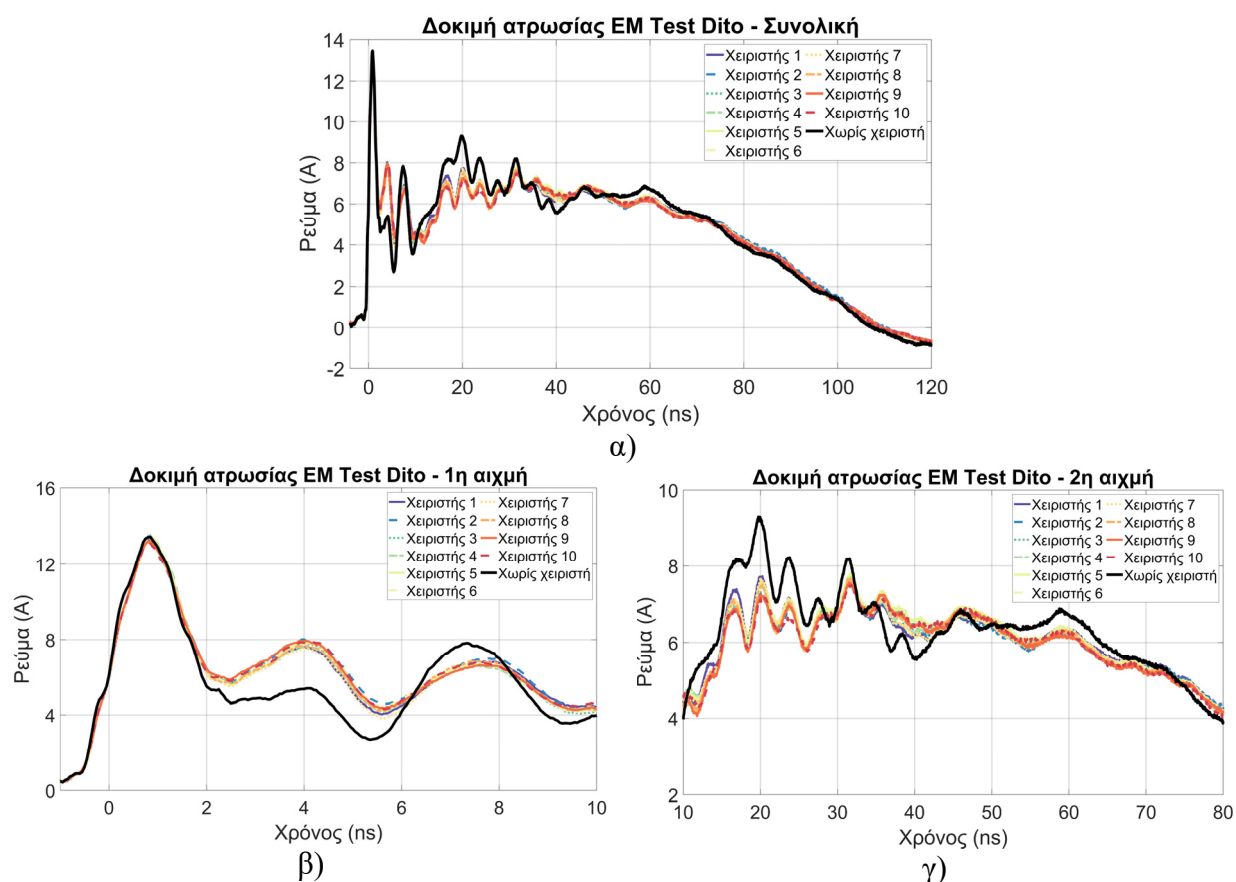
όπου: $\sigma_{\varepsilon\pi}$ η τυπική απόκλιση των μετρήσεων της κάθε παραμέτρου, $N_{\varepsilon\pi}$ το πλήθος των διαδοχικών εκφορτίσεων (στη συγκεκριμένη περίπτωση $N=100$) και $\mu_{\varepsilon\pi}$ η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου

Πίνακας 4.2: Σύγκριση αβεβαιότητας αναπαραγωγιμότητας και επαναληψιμότητας για τη γεννήτρια EM Test Dito στη 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Αβεβαιότητα	I_p [%]	t_r [ns]	I_{p2} [%]	I_{30} [%]	I_{60} [%]
Αναπαραγωγιμότητα (10 χειριστές x 10 επαναλήψεις)	0,461	0,071	1,400	0,840	1,939
Επαναληψιμότητα (100 επαναλήψεις- χωρίς χειριστή, σε auto mode σύμφωνα με το πρότυπο)	0,134	0,110	0,059	0,078	0,246

Η σύγκριση των τιμών αβεβαιότητας αναπαραγωγιμότητας με την ενδογενή αβεβαιότητα επαναληψιμότητας της γεννήτριας EM Test Dito (Πίνακας 4.2) αναδεικνύει με σαφήνεια τη σημαντική επίδραση του χειριστή στη μέτρηση των παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ειδικότερα, οι παράμετροι που σχετίζονται με το φθίνον σκέλος της δεύτερης αιχμής, δηλαδή οι παράμετροι I_{p2} , I_{30} και I_{60} , εμφανίζουν αβεβαιότητες αναπαραγωγιμότητας πολλαπλάσιες εκείνων της επαναληψιμότητας, με την παράμετρο I_{p2} να φθάνει το 1,4 %, έναντι μόλις 0,059 % στην αυτόματη δοκιμή. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η παρέμβαση του χειριστή ενισχύει τις διακυμάνσεις, ιδιαίτερα στο μεταγενέστερο τμήμα της κυματομορφής.

4.1.2.2. Γεννήτρια EM TEST Dito – Διάταξη δοκιμής



Σχήμα 4.6: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών χειριστών και για την περίπτωση απουσίας χειριστή για τη γεννήτρια EM Test Dito στη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας): α) συνολική κυματομορφή, β) σκέλος 1^{ης} αιχμής, γ) σκέλος 2^{ης} αιχμής

Πίνακας 4.3: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τη γεννήτρια EM Test Dito στη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

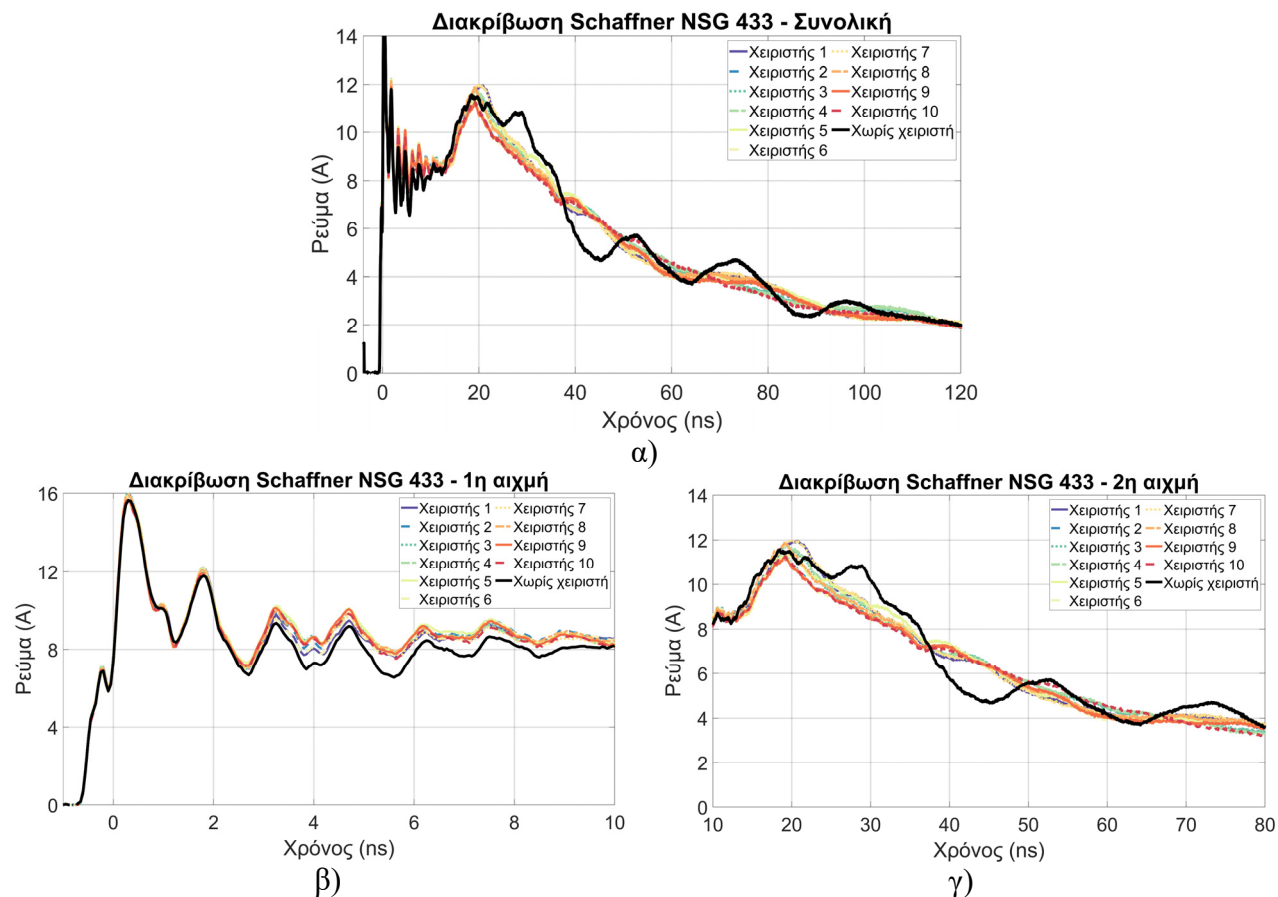
Χειριστής	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
1	13,28	1,056	7,730	6,565	6,359
2	13,52	1,067	7,662	6,673	6,215
3	13,27	1,052	7,738	6,719	6,189
4	13,19	1,060	7,562	6,608	6,362
5	13,49	1,057	7,801	6,753	6,378
6	13,21	1,057	7,629	6,625	6,230
7	13,33	1,089	7,706	6,561	6,284
8	13,17	1,068	7,685	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 της δοκιμής ατρωσίας, αν και η μορφή της κυματομορφής μεταβάλλεται, η συσχέτιση μεταξύ των κυματομορφών των χειριστών και της κυματομορφής αναφοράς παρουσιάζει αντίστοιχες αποκλίσεις με εκείνες που παρατηρήθηκαν στη διακρίβωση. Η επίδραση του χειριστή παραμένει εμφανής, με εξασθένηση της παραμέτρου I_{p2} κατά -13,35 %, καθώς η μέση τιμή μειώθηκε από 9,306 A σε 7,657 A. Η πρώτη αιχμή (I_p) εξακολουθεί να επηρεάζεται περιορισμένα, παρουσιάζοντας απόκλιση μόλις -1,920 %, ενώ ο χρόνος ανόδου (t_r) διατηρείται σχεδόν αμετάβλητος με απόκλιση -0,468 %. Αντίθετα, το φθίνον σκέλος εμφανίζει διαφοροποιήσεις, με την παράμετρο I_{60} να παρουσιάζει μείωση κατά -6,486 %, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η δεύτερη αιχμή παραμένει το πιο ευαίσθητο τμήμα της κυματομορφής έναντι της ανθρώπινης επίδρασης.

Παρομοίως, το Σχήμα 4.6 αναδεικνύει σημαντικές διακυμάνσεις στα χρονικά διαστήματα 10 ns έως 30 ns και 50 ns έως 70 ns, οι οποίες αποδίδονται σε μεταβολές του φαινομένου ταλαντώσεων και του μεταβατικού τμήματος της κυματομορφής λόγω διαφορετικών χωρητικών και επαγωγικών φορτίσεων που εισάγει ο κάθε χειριστής. Οι υπολογισμένες αβεβαιότητες, που παρατίθενται στον Πίνακα 4.5, παραμένουν σχετικά χαμηλές, κυμαινόμενες για την παράμετρο I_{p2} στο 0,391 %, ωστόσο οι αποκλίσεις που καταγράφηκαν, ιδίως στο φθίνον σκέλος, αποδεικνύουν ότι οι διακυμάνσεις μεταξύ χειριστών είναι σημαντικές. Επιπλέον, ακόμη και οι μικρές αποκλίσεις της τάξης του -0,435 % για την παράμετρο I_{30} επισημαίνουν ότι η επίδραση του χειριστή δεν περιορίζεται μόνο στο σκέλος της δεύτερης αιχμής, αλλά δύναται να επηρεάσει και τα μεταγενέστερα τμήματα της κυματομορφής.

Συνεπώς, η ενσωμάτωση της ανθρώπινης επίδρασης στον συνολικό προϋπολογισμό αβεβαιότητας κρίνεται απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως σε περιβάλλοντα δοκιμών, όπου οι υψίσυχνες συνιστώσες και οι ταλαντώσεις ενδέχεται να εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις λόγω ανθρώπινης αλληλεπίδρασης.

4.1.2.3. Γεννήτρια Schaffner NSG 433 – Διάταξη διακρίβωσης



Σχήμα 4.7: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών χειριστών και για την περίπτωση απουσίας χειριστή για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 στην 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση): α) συνολική κυματομορφή, β) σκέλος 1^{ης} αιχμής, γ) σκέλος 2^{ης} αιχμής

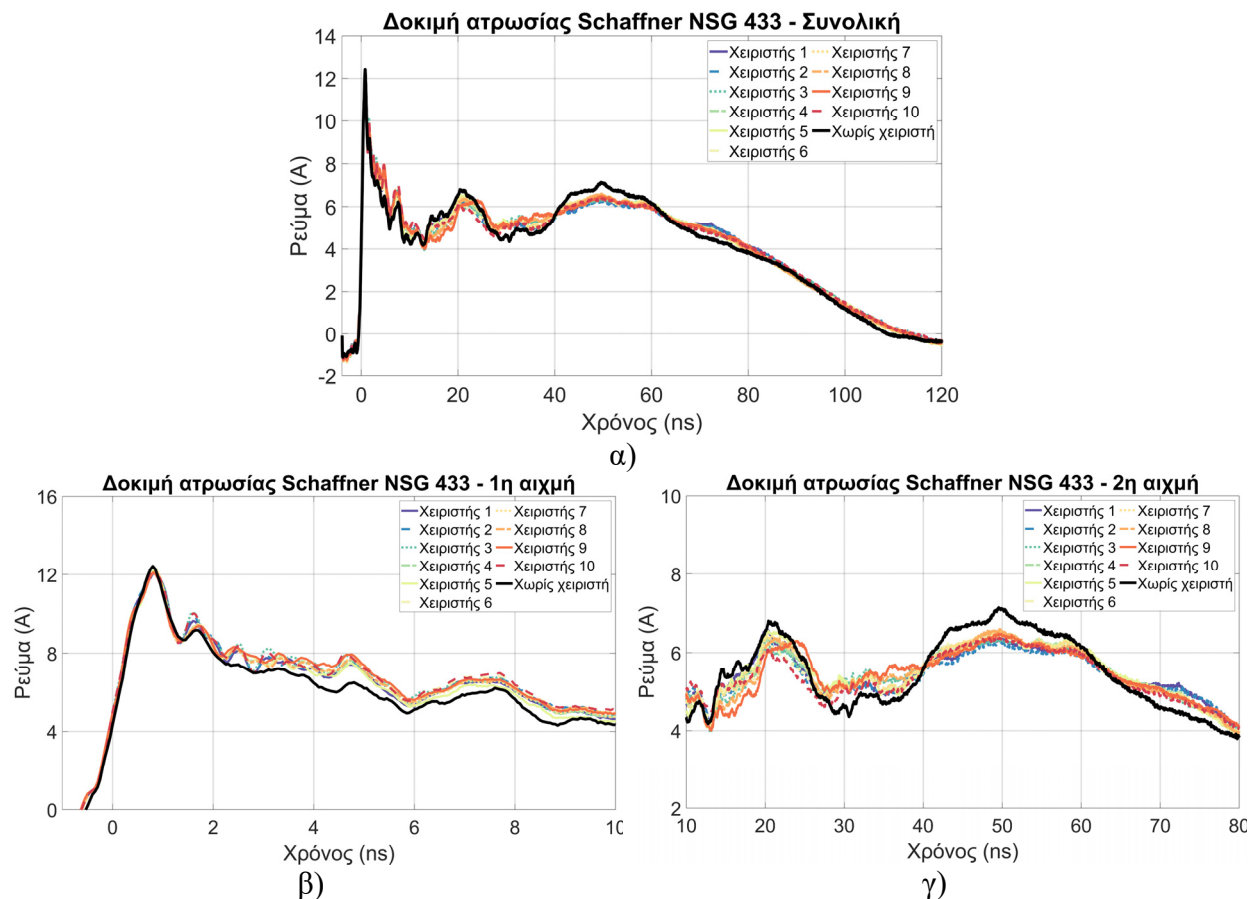
Πίνακας 4.4: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 στην 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Χειριστής	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[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

Η ανάλυση των Πινάκων 4.3 και 4.4 αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την επίδραση του χειριστή στη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στη γεννήτρια EM Test Dito (Πίνακας 4.3), η παράμετρος I_{p2} , η οποία χαρακτηρίζει το φθίνον σκέλος της δεύτερης αιχμής, παρουσιάζει αισθητή εξασθένηση της τάξης του -13,35 %, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η ανθρώπινη αλληλεπίδραση επηρεάζει ουσιαστικά το μέγιστο ρεύμα του βραδύτερου αυτού τμήματος της κυματομορφής.

Αντιθέτως, στη γεννήτρια Schaffner NSG 433 (Πίνακας 4.4), η παράμετρος I_{p2} παραμένει σχεδόν αμετάβλητη (-0,516 %), καταδεικνύοντας περιορισμένη ευαισθησία ως προς το μέγιστο ρεύμα στη δεύτερη αιχμή. Ωστόσο, η ίδια γεννήτρια εμφανίζει σημαντική μείωση κατά -16,96 % στην παράμετρο I_{30} , η οποία αφορά το φθίνον σκέλος της δεύτερης αιχμής, αναδεικνύοντας ότι η επίδραση του χειριστή μπορεί να εκδηλώνεται σε επιμέρους τμήματα της κυματομορφής, ακόμη και σε γεννήτριες με συνολικά χαμηλότερη ευαισθησία. Επιπλέον, και στις δύο γεννήτριες, οι αβεβαιότητες αναπαραγωγιμότητας των παραμέτρων που σχετίζονται με τη δεύτερη αιχμή εμφανίζονται αισθητά υψηλότερες συγκριτικά με εκείνες της πρώτης αιχμής, γεγονός που υπογραμμίζει τη μεγαλύτερη αστάθεια του δεύτερου σκέλους της κυματομορφής έναντι της επίδρασης του χειριστή.

4.1.2.4. Γεννήτρια Schaffner NSG 433 – Διάταξη δοκιμής



Σχήμα 4.8: Σύγκριση κυματομορφών εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών χειριστών και για την περίπτωση απουσίας χειριστή για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 στη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας): α) συνολική κυματομορφή, β) σκέλος 1^{ης} αιχμής, γ) σκέλος 2^{ης} αιχμής

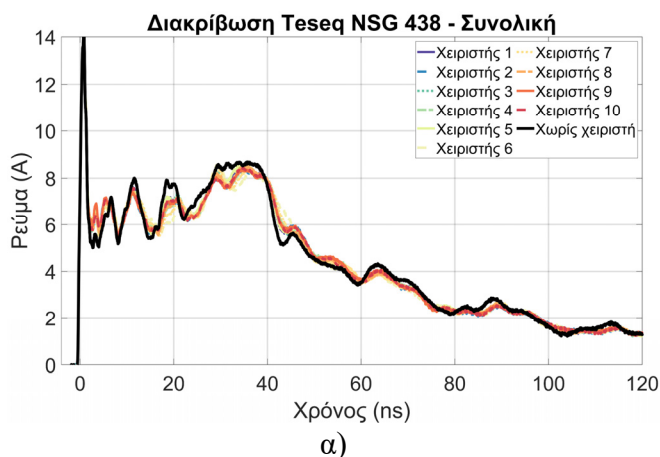
Πίνακας 4.5: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 στη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

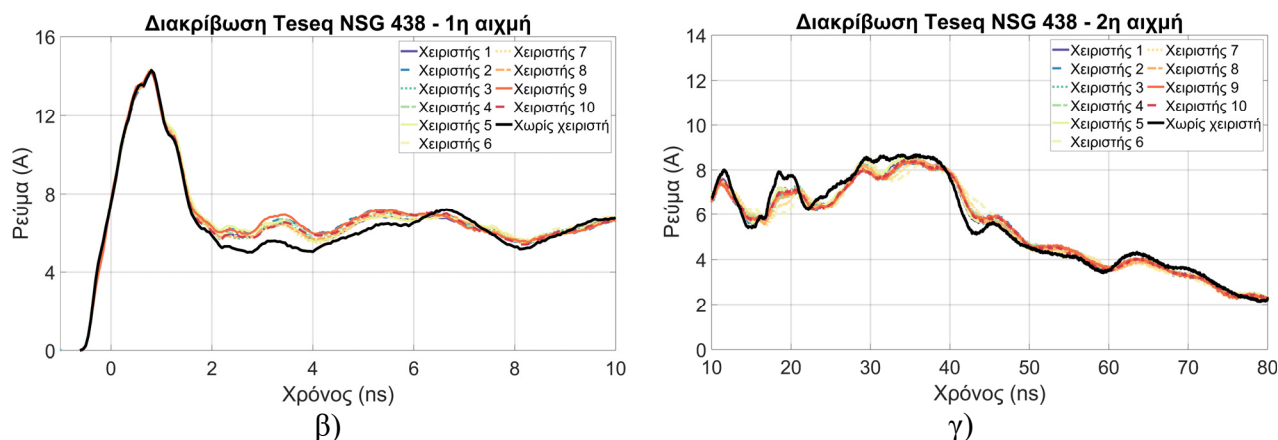
Χειριστής	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
1	12,04	0,865	6,595	5,232	5,996
2	12,07	0,839	6,356	5,120	5,941
3	12,17	0,888	6,161	5,227	6,076
4	12,33	0,930	6,373	5,205	6,093
5	12,17	0,936	6,554	5,287	6,180
6	12,34	0,946	6,211	5,037	6,044
7	12,20	0,911	6,455	5,138	6,129
8	12,17	0,915	6,370	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

Στον Πίνακα 4.5 αποτυπώνεται η συμπεριφορά της γεννήτριας Schaffner NSG 433 στη δεύτερη διάταξη μέτρησης, δηλαδή στο σενάριο δοκιμής ατρωσίας. Παρατηρείται αισθητή μείωση της παραμέτρου I_{p2} , η οποία παρουσιάζει απόκλιση -7,829 % σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς, γεγονός που καταδεικνύει ότι το σκέλος της δεύτερης αιχμής επηρεάζεται σημαντικά και στο περιβάλλον δοκιμών ατρωσίας — μάλιστα σε εντονότερο βαθμό συγκριτικά με τη διαδικασία διακρίβωσης (Πίνακας 4.4). Αντιθέτως, η παράμετρος I_{30} εμφανίζει θετική απόκλιση (+12,55 %).

Παρά τη μικρότερη διασπορά που παρατηρείται στις περισσότερες παραμέτρους, η αναπαραγωγιμότητα εξακολουθεί να παρουσιάζει υψηλότερη αβεβαιότητα στις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την παράμετρο I_{p2} , η οποία εμφανίζει αβεβαιότητα 0,814 %, με εξαίρεση το τυχαίο εύρημα της μειωμένης αβεβαιότητας στον χρόνο ανόδου. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι επιδράσεις του χειριστή δεν εξαλείφονται πλήρως, ακόμη και στο περιβάλλον δοκιμών. Συνολικά, η δεύτερη αιχμή της κυματομορφής αναδεικνύεται ως το πλέον ευαίσθητο τμήμα στις επιδράσεις του χειριστή.

4.1.2.5. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – Διάταξη διακρίβωσης





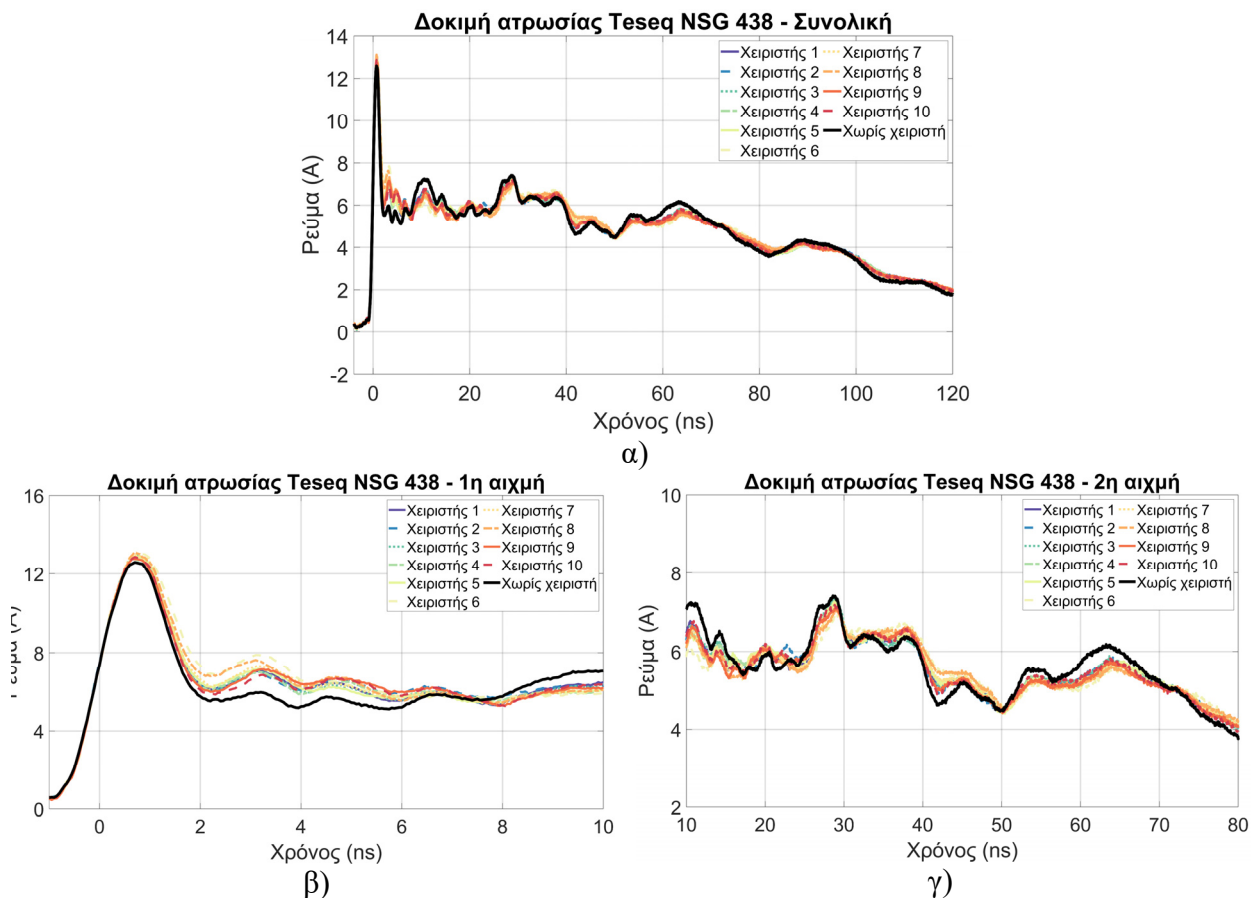
Σχήμα 4.9: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών χειριστών και για την περίπτωση απουσίας χειριστή για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 στην 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση): α) συνολική κυματομορφή, β) σκέλος 1^{ης} αιχμής, γ) σκέλος 2^{ης} αιχμής

Πίνακας 4.6: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 στην 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Χειριστής	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[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

Στην περίπτωση της γεννήτριας Schaffner NSG 433, διαπιστώνεται γενικά περιορισμένη επίδραση του χειριστή στις κυματομορφές, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στην ηπιότερη ένταση ταλαντώσεων και το μειωμένο φασματικό περιεχόμενο χαμηλών συχνοτήτων που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη γεννήτρια. Παρά την πιο σταθερή συμπεριφορά της, διαφοροποιήσεις εξακολουθούν να καταγράφονται, κυρίως στα χρονικά διαστήματα από 2 ns έως 6 ns και 10 ns έως 45 ns, υποδηλώνοντας ότι το ανθρώπινο σώμα επηρεάζει και εδώ το φθίνον σκέλος της δεύτερης αιχμής. Οι τιμές αναπαραγωγιμότητας παραμένουν σχετικά χαμηλές για την παράμετρο I_P , ενώ αυξάνονται για τις παραμέτρους που σχετίζονται με το μεταγενέστερο τμήμα της κυματομορφής, ιδίως για το I_{30} , επιβεβαιώνοντας το γενικό μοτίβο που καταγράφηκε και στις άλλες γεννήτριες. Οι αποκλίσεις μεταξύ των μέσων τιμών των κυματομορφών με χειριστή και της αντίστοιχης κυματομορφής αναφοράς είναι υπαρκτές, αλλά συνολικά μικρότερες σε μέγεθος σε σύγκριση με εκείνες που παρατηρήθηκαν στις υπόλοιπες γεννήτριες.

4.1.2.6. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – Διάταξη δοκιμής



Σχήμα 4.10: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεταξύ διαφορετικών χειριστών και για την περίπτωση απουσίας χειριστή για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 στη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας): α) συνολική κυματομορφή, β) σκέλος 1^{ης} αιχμής, γ) σκέλος 2^{ης} αιχμής

Πίνακας 4.7: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, απόκλιση και αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 στη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Χειριστής	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[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

Στη γεννήτρια Teseq NSG 438 κατά τη δοκιμή ατρωσίας, η επίδραση του χειριστή εξακολουθεί να υφίσταται, αλλά εμφανίζεται περιορισμένη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες γεννήτριες, καθώς η απόκλιση στην παράμετρο I_{p2} φθάνει μόλις το -4,96 %, τιμή αισθητά χαμηλότερη από το -13,35 % που παρατηρήθηκε στη γεννήτρια EM Test Dito. Αντίθετα, η παράμετρος I_{60} παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση, της τάξης του -7,6 %, επιβεβαιώνοντας ότι και στην Teseq NSG 438 το φθίνον σκέλος της δεύτερης αιχμής παραμένει ευάλωτο στην ανθρώπινη επίδραση, παρά το γεγονός ότι οι ταλαντώσεις της κυματομορφής εμφανίζονται ηπιότερες σε σχέση με τις άλλες γεννήτριες.

Η αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας κινείται σε χαμηλά επίπεδα, κυμαινόμενη κάτω από το 0,5 % για τις περισσότερες παραμέτρους, αν και παραμένει ελαφρώς αυξημένη για τις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής, στοιχείο που ακολουθεί το γενικό μοτίβο των υπολοίπων γεννητριών. Σημαντικό είναι ότι η πρώτη αιχμή (I_p) και ο χρόνος ανόδου (t_r) παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις, γεγονός που αποδίδεται στη σταθερότερη ηλεκτρική συμπεριφορά της γεννήτριας και στη μειωμένη επίδραση της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης στις αρχικές φάσεις της εκφόρτισης. Συνολικά, η γεννήτρια Teseq NSG 438 καταγράφει πιο σταθερή συμπεριφορά και μικρότερες διακυμάνσεις στις μετρήσεις, γεγονός που την καθιστά ενδεχομένως καταλληλότερη για εφαρμογές, όπου απαιτείται υψηλή αναπαραγωγιμότητα και μειωμένη ανθρώπινη επίδραση.

4.1.3. Στατιστική επεξεργασία κυματομορφών

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.1, στις κυματομορφές που συλλέχθηκαν κατά το δεύτερο σενάριο μέτρησης — δηλαδή κατά την προσομοίωση πραγματικών δοκιμών με καταγραφή μέσω ανιχνευτή ρεύματος — ακολούθησε λεπτομερής στατιστική ανάλυση για καθένα από τα εξεταζόμενα σενάρια. Στόχος της ανάλυσης ήταν η διερεύνηση του κατά πόσο η αβεβαιότητα που εισάγεται λόγω της παρέμβασης του χειριστή μπορεί να περιγραφεί μέσω κάποιας γνωστής κατανομής πιθανότητας, γεγονός που θα συνέβαλε στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των μετρήσεων, μέσω της ενσωμάτωσής της στο ισοζύγιο αβεβαιότητας (uncertainty budget) ως τυποποιημένη πηγή αβεβαιότητας.

Η στατιστική μοντελοποίηση παρέχει τη δυνατότητα ακριβέστερης εκτίμησης τόσο της μέσης τιμής όσο και της διασποράς κάθε παραμέτρου, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την ενσωμάτωση της επίδρασης του χειριστή στον συνολικό υπολογισμό της αβεβαιότητας. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου με χρήση του λογισμικού Matlab.

4.1.3.1. Στατιστική ανάλυση κυματομορφών: ιστογράμματα, θεωρητικές κατανομές και αξιολόγηση προσαρμογής

Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης επιδιώκεται η αναγνώριση της καταλληλότερης πιθανής κατανομής για κάθε παράμετρο της κυματομορφής, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η αναπαραγωγιμότητα που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Η μοντελοποίηση της στατιστικής συμπεριφοράς των παραμέτρων μέσω κατάλληλης κατανομής είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση τόσο της διασποράς όσο και της μέσης τιμής τους, ενώ καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας που οφείλεται στον χειριστή στον συνολικό υπολογισμό της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία δοκιμών αποκτά μεγαλύτερη αντιπροσωπευτικότητα, λαμβάνοντας υπόψη συνθήκες που προσομοιώνουν τις πραγματικές δοκιμές πεδίου.

Η οπτικοποίηση των δεδομένων πραγματοποιείται αρχικά μέσω ιστογράμματος. Για κάθε παράμετρο, όπως η μέγιστη τιμή του ρεύματος ή ο χρόνος ανόδου, συγκεντρώνονται οι αντίστοιχες τιμές από όλους τους χειριστές σε ένα διάνυσμα τύπου πίνακα. Στη συνέχεια, δημιουργείται ιστόγραμμα με πέντε ισομεγέθη διαστήματα (bins), τα οποία εκτείνονται από την ελάχιστη έως τη μέγιστη τιμή των δεδομένων. Το ιστόγραμμα κανονικοποιείται έτσι ώστε το συνολικό του εμβαδόν να ισούται με τη μονάδα, προσφέροντας μια εμπειρική εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – PDF). Με τον τρόπο αυτό, απεικονίζεται ο τρόπος κατανομής των τιμών της παραμέτρου μεταξύ των διαφορετικών χειριστών.

Για την περαιτέρω ανάλυση εξετάστηκαν τέσσερις θεωρητικές κατανομές, οι οποίες προσαρμόστηκαν στα πειραματικά δεδομένα:

- Κανονική κατανομή (Normal Distribution), η οποία περιγράφει συμμετρικές διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή και θεωρείται κατάλληλη για μικρές αποκλίσεις που αποδίδονται είτε σε ήπιες διαφοροποιήσεις μεταξύ χειριστών είτε σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- Λογαριθμοκανονική κατανομή (Log-Normal Distribution), χρήσιμη για δεδομένα με θετική ασυμμετρία, όπως ο χρόνος ανόδου, όπου οι τιμές επηρεάζονται από πολλαπλασιαστικούς παράγοντες, όπως η θέση του χεριού, η πίεση συγκράτησης ή η ποιότητα της επαφής.
- Κατανομή Gamma (Gamma Distribution), η οποία εφαρμόζεται σε μη αρνητικά, ασύμμετρα και δεξιά κεκλιμένα δεδομένα, όπως η διάρκεια παλμών, ενσωματώνοντας στοχαστικές φυσιολογικές μεταβλητότητες που συνδέονται με το ανθρώπινο σώμα.
- Κατανομή Weibull (Weibull Distribution), η οποία συχνά χρησιμοποιείται για χαρακτηριστικά που σχετίζονται με κατώφλια, όπως η χωρητικότητα επαφής που προκαλείται από τη λαβή, αποδίδοντας με ακρίβεια τόσο τη μεταβλητότητα όσο και την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων περιπτώσεων.

Η προσαρμογή των κατανομών στα πειραματικά δεδομένα πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο μεγίστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation – MLE), μέσω της οποίας προσδιορίζονται οι παράμετροι της κάθε κατανομής που μεγιστοποιούν την πιθανότητα παρατήρησης των δεδομένων. Η μαθηματική έκφραση της μεθόδου δίνεται από τη σχέση:

$$l(\theta) = \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i|\theta) \quad (26)$$

όπου $f(x_i|\theta)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για κάθε παρατήρηση x_i και σύνολο παραμέτρων θ . Για την Κανονική και τη Λογαριθμοκανονική κατανομή, 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 αξιολόγηση της ποιότητας κάθε στατιστικής προσαρμογής πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού της Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE), η οποία εκφράζει τη μέση απόσταση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των θεωρητικών τιμών της προσαρμοσμένης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Πιο συγκεκριμένα, το RMSE υπολογίζεται στα κέντρα των διαστημάτων (bins) του ιστογράμματος, συγκρίνοντας τις παρατηρούμενες συχνότητες με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Η χαμηλότερη τιμή του RMSE

υποδηλώνει καλύτερη προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα και, κατά συνέπεια, μεγαλύτερη αξιοπιστία στη στατιστική περιγραφή της συμπεριφοράς της αντίστοιχης παραμέτρου της κυματομορφής.

Για να εξαλειφθεί η εξάρτηση του RMSE από την κλίμακα των δεδομένων και να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων ή κατανομών, χρησιμοποιείται ο κανονικοποιημένος δείκτης RMSE (nRMSE), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\max(y) - \min(y)} \quad (27)$$

όπου y_i είναι οι πειραματικές τιμές, $\hat{y}_i$ οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές της συνάρτησης, N ο αριθμός των σημείων και $\max(y) - \min(y)$ το εύρος των δεδομένων. Η χρήση του κανονικοποιημένου δείκτη RMSE παρέχει ένα αντικειμενικό και ενιαίο κριτήριο σύγκρισης, ανεξάρτητα από το εύρος ή τη φύση των δεδομένων.

Στην πράξη, τιμές του κανονικοποιημένου δείκτη RMSE κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν άριστη προσαρμογή, καθώς οι διαφορές μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των θεωρητικών κατανομών είναι αμελητέες. Τιμές κάτω από 0,1 θεωρούνται εξαιρετικές, ενώ τιμές μεταξύ 0,1 και 0,3 χαρακτηρίζονται αποδεκτές για τις περισσότερες εφαρμογές. Αντιθέτως, τιμές άνω του 0,3 μαρτυρούν ανεπαρκή προσαρμογή και ενδεχομένως την ανάγκη επιλογής διαφορετικού μοντέλου ή βελτιωμένης στατιστικής περιγραφής των δεδομένων.

Η εφαρμογή του κανονικοποιημένου δείκτη RMSE στο πλαίσιο της στατιστικής ανάλυσης των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης προσφέρει μια αυστηρή και ποσοτική μέθοδο αξιολόγησης κάθε υποψήφιας θεωρητικής κατανομής (Κανονικής, Λογαριθμοκανονικής, Gamma, Weibull). Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η επιλογή της καταλληλότερης μαθηματικής προσέγγισης για την περιγραφή της μεταβλητότητας που προκαλεί η παρουσία του χειριστή στις παραμέτρους της κυματομορφής. Τέλος, υπολογίζονται και παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τιμές του κανονικοποιημένου δείκτη RMSE για όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους και κατανομές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τόσο οπτικά, μέσω διαγραμμάτων, όσο και αριθμητικά, μέσω πινάκων, προσφέροντας μία ισχυρή βάση για τη διατύπωση τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με το ποιο στατιστικό μοντέλο περιγράφει με τη μεγαλύτερη ακρίβεια τη διασπορά των μετρούμενων δεδομένων και την επίδραση του χειριστή στις κυματομορφές.

4.1.4. Παρουσίαση συγκριτικής ανάλυσης ιστογραμμάτων και θεωρητικών κατανομών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τις βασικές παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα κανονικοποιημένα ιστογράμματα των πειραματικών δεδομένων για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο, τα οποία συγκρίνονται με τις θεωρητικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που προσαρμόστηκαν στα δεδομένα.

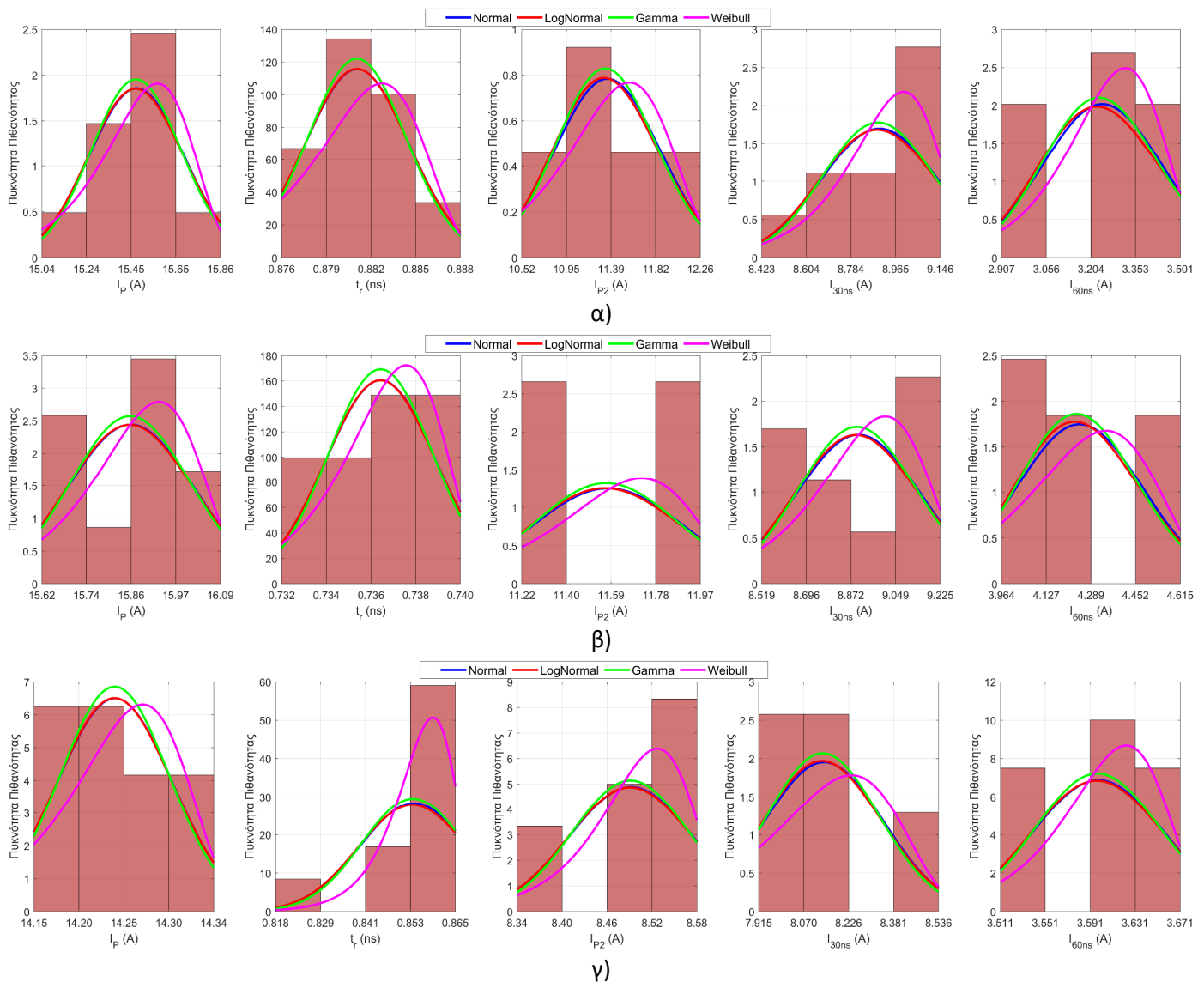
Παράλληλα, παρατίθενται σε συγκεντρωτικούς πίνακες οι τιμές του nRMSE για κάθε κατανομή, παρέχοντας έτσι μία αντικειμενική και ποσοτική αξιολόγηση της ποιότητας της στατιστικής προσαρμογής. Μέσω της συγκεκριμένης ανάλυσης αναδεικνύονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των παραμέτρων της κυματομορφής, ενώ καθίσταται εφικτός ο εντοπισμός των

θεωρητικών μοντέλων που περιγράφουν με τη μεγαλύτερη ακρίβεια τη μεταβλητότητα που οφείλεται στην παρουσία και στις επιδράσεις του χειριστή.

Η προσέγγιση αυτή συνεισφέρει ουσιαστικά στη βελτίωση της εκτίμησης της συνολικής αβεβαιότητας των μετρήσεων και ενισχύει τη δυνατότητα ποσοτικής ενσωμάτωσης της επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα στη διαδικασία αξιολόγησης της συμμόρφωσης με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27].

4.1.4.1. Συγκριτική παρουσίαση ιστογραμμάτων και αποτελεσμάτων σύγκλισης για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση) για τις τρεις γεννήτριες ED

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τις τρεις γεννήτριες στη διάταξη διακρίβωσης. Τα ιστογράμματα και οι τιμές nRMSE επιτρέπουν την οπτική και ποσοτική σύγκριση, αναδεικνύοντας ποιες κατανομές περιγράφουν καλύτερα τη μεταβλητότητα των παραμέτρων λόγω της επίδρασης του χειριστή.



Σχήμα 4.11: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση) για τη γεννήτριες α) EM Test Dito, β) Schaffner NSG 433, γ) Teseq NSG 438

Πίνακας 4.8: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση) για τη γεννήτρια EM Test Dito

Παράμετρος	Κανονικοποιημένο RMSE			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
I_p	0,199	0,202	0,181	0,207
t_r	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 4.9: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση) για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433

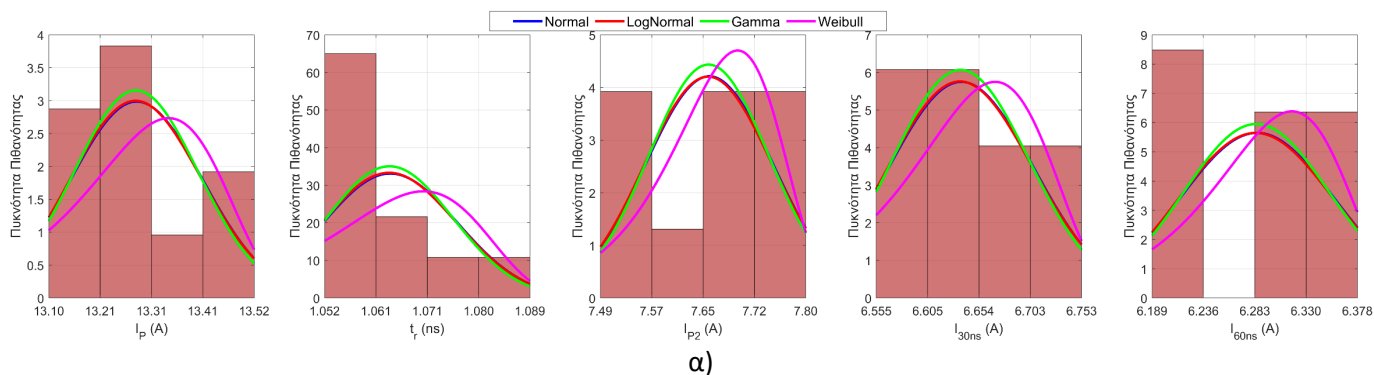
Παράμετρος	Κανονικοποιημένο RMSE			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
I_p	0,430	0,432	0,437	0,395
t_r	0,775	0,778	0,833	0,581
I_{p2}	0,578	0,577	0,584	0,576
I_{30}	0,551	0,552	0,571	0,546
I_{60}	0,456	0,447	0,458	0,498

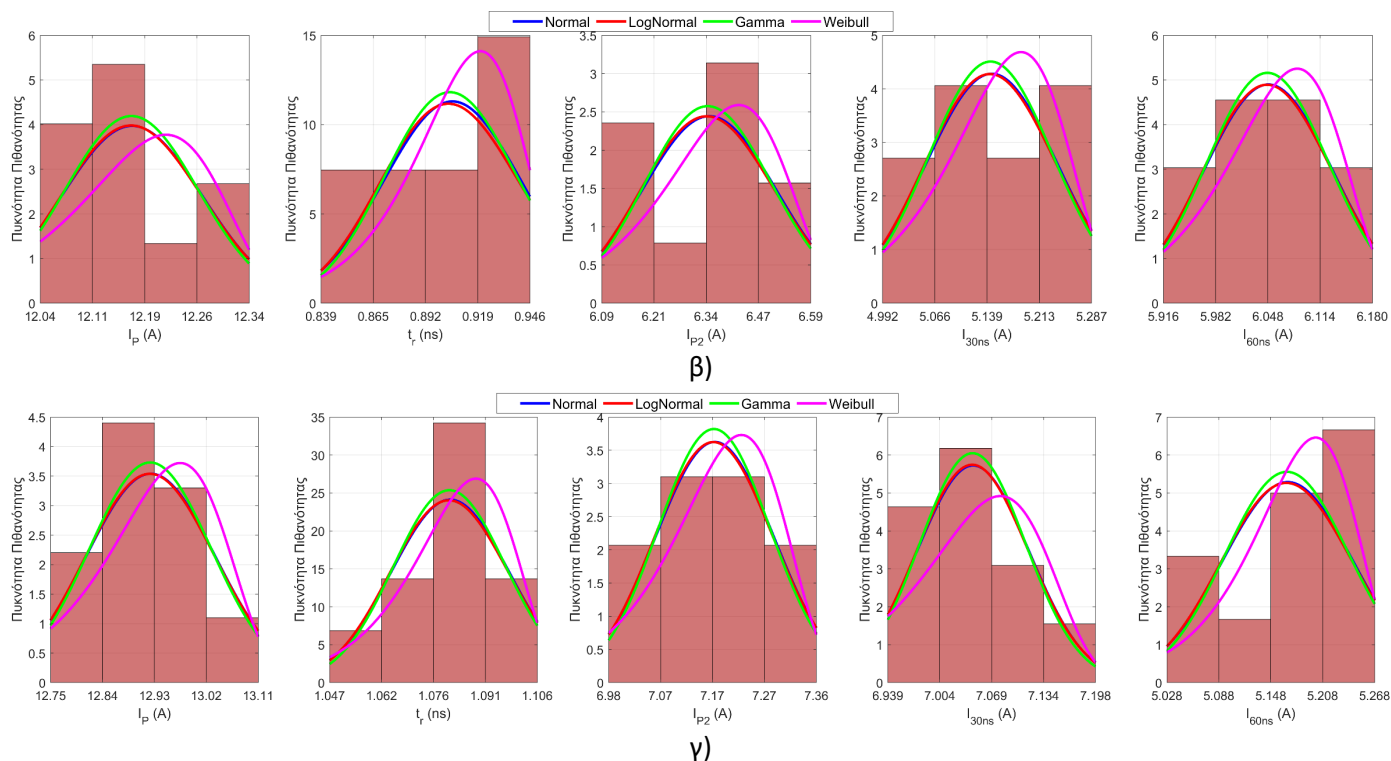
Πίνακας 4.10: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση) για τη γεννήτρια Teseq NSG 438

Παράμετρος	Κανονικοποιημένο RMSE			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
I_p	0,430	0,432	0,437	0,395
t_r	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

4.1.4.2. Συγκριτική παρουσίαση ιστογραμμάτων και αποτελεσμάτων σύγκλισης για τη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) για τις τρεις γεννήτριες ESD

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αντίστοιχα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τις τρεις γεννήτριες στη διάταξη διεξαγωγής της δοκιμής.





Σχήμα 4.12: Πυκνότητα πιθανότητας για τις παραμέτρους κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) για τις γεννήτριες α) EM Test Dito, β) Schaffner NSG 433, γ) Teseq NSG 438

Πίνακας 4.11: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) για τη γεννήτρια EM Test Dito

Παράμετρος	Κανονικοποιημένο RMSE			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
I_P	0,374	0,370	0,375	0,482
t_r	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 4.12: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433

Παράμετρος	Κανονικοποιημένο RMSE			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
I_P	0,382	0,380	0,382	0,491
t_r	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 4.13: Κανονικοποιημένες τιμές RMSE για τις κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) για τη γεννήτρια Teseq NSG 438

Παράμετρος	Κανονικοποιημένο RMSE			
	Normal	Log-normal	Gamma	Weibull
I_p	0,187	0,185	0,163	0,328
t_r	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

Η ανασκόπηση των διαγραμμάτων καταδεικνύει ήδη από μια πρώτη οπτική παρατήρηση ότι καμία από τις συνήθως χρησιμοποιούμενες κατανομές πιθανότητας δεν περιγράφει επαρκώς την αβεβαιότητα που εισάγεται από τον χειριστή. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και ποσοτικά μέσω των τιμών του nRMSE, ο οποίος προσφέρει αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας της στατιστικής προσαρμογής. Όπως προκύπτει από τους πίνακες, αν και το nRMSE μπορεί να λαμβάνει ικανοποιητικές τιμές ($\leq 0,3$) για ορισμένες παραμέτρους, καμία κατανομή δεν επιτυγχάνει ταυτόχρονα καλή προσαρμογή για το σύνολο των παραμέτρων της κυματομορφής.

Η γεννήτρια EM Test Dito εμφανίζει τις χαμηλότερες, αν και όχι πάντοτε αποδεκτές, τιμές nRMSE, παρά το γεγονός ότι οπτικά παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις, τόσο στη μορφή της κυματομορφής όσο και στις αποκλίσεις σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς χωρίς χειριστή. Ιδιαίτερα στη διάταξη διακρίβωσης και για τις παραμέτρους της πρώτης αιχμής (I_p και t_r), καταγράφεται καλή προσαρμογή και προς τις τέσσερις εξεταζόμενες κατανομές, με τις βέλτιστες τιμές να παρατηρούνται στην κατανομή Gamma (π.χ. $nRMSE_{I_p} = 0,181$ και $nRMSE_{t_r} = 0,080$). Αντιθέτως, για τις υπόλοιπες παραμέτρους, καμία από τις δοκιμαζόμενες κατανομές δεν επιτυγχάνει αποδεκτή προσαρμογή, καθώς οι τιμές nRMSE υπερβαίνουν συχνά το 0,35.

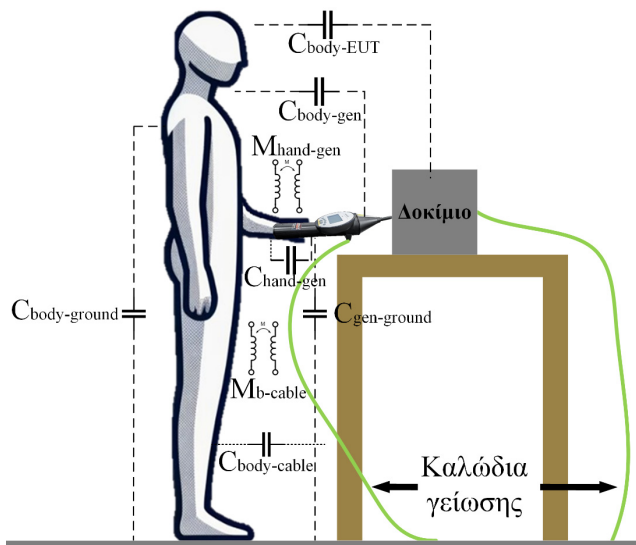
Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν και για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, όπου η κατανομή Gamma αποδίδει επίσης καλύτερα τις παραμέτρους της πρώτης αιχμής. Αξιοσημείωτο είναι ότι στην ίδια γεννήτρια παρατηρούνται χαμηλές τιμές nRMSE και για την παράμετρο I_{30} , με τη λογαριθμοκανονική κατανομή να εμφανίζει ελαφρώς βελτιωμένη προσαρμογή. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις διατάξεων και γεννητριών, οι κατανομές πυκνότητας πιθανότητας δεν ευθυγραμμίζονται ικανοποιητικά με καμία από τις δοκιμαζόμενες θεωρητικές κατανομές. Οι τιμές nRMSE υπερβαίνουν συχνά το 0,3, ενώ σε ορισμένα σενάρια προσεγγίζουν ακόμη και το 1,009, όπως καταγράφεται για την παράμετρο I_p με την κατανομή Weibull κατά τη διακρίβωση της NSG 438.

Συνολικά, δεν αναδεικνύεται κάποιο σαφές μοτίβο προσαρμογής. Καμία κατανομή δεν παρουσιάζει συστηματικά καλύτερη απόδοση για όλες τις παραμέτρους, ούτε παρατηρείται σταθερά βελτιωμένη προσαρμογή συγκεκριμένων παραμέτρων ανεξαρτήτως της επιλεγείσας κατανομής. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν την πολυπλοκότητα της ανθρώπινης επίδρασης στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη καταλληλότερων στατιστικών μοντέλων.

4.1.5. Σχολιασμός επί της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ESD

Η παρούσα ενότητα ανέδειξε με σαφήνεια ότι η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης υφίσταται σημαντικές μεταβολές υπό την επίδραση του χειριστή, κυρίως πέραν της πρώτης αιχμής. Αν και οι παράμετροι I_p και t_r παραμένουν, κατά κανόνα, εντός των ορίων του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] (± 15 % και ± 25 % αντίστοιχα), οι αποκλίσεις που καταγράφηκαν στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπερβαίνουν το $\pm 2,5$ % για την παράμετρο I_p και το $\pm 0,5$ % για τον t_r , γεγονός που καταδεικνύει περιορισμένη επίδραση στην πρώτη αιχμή της κυματομορφής.

Στο διάστημα 2 ns έως 10 ns, το οποίο ακολουθεί την πρώτη αιχμή της κυματομορφής, προέκυψαν ποιοτικά συμπεράσματα, καθώς σε όλες τις γεννήτριες και στα δύο σενάρια μέτρησης παρατηρείται σαφής ενίσχυση της κυματομορφής λόγω της παρουσίας του χειριστή. Το φαινόμενο αποδίδεται κυρίως στις παρασιτικές χωρητικότητες [135], [136] που εισάγει το ανθρώπινο σώμα, οι οποίες τροποποιούν τις υψίσυχνες συνθήκες εκφόρτισης (Σχήμα 4.13). Σημειώνεται ότι το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] δεν καθορίζει όρια για το συγκεκριμένο χρονικό εύρος, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη να εξεταστεί η θέσπιση ορίων ή προδιαγραφών, ώστε να διασφαλιστεί η αναπαραγωγιμότητα και η αξιοπιστία των δοκιμών σε αυτό το κρίσιμο τμήμα της κυματομορφής.



Σχήμα 4.13: Παρασιτικές χωρητικότητες και αμοιβαίες επαγωγές που δημιουργεί ο άνθρωπος με τη διάταξη δοκιμών

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διακυμάνσεις στο σκέλος της δεύτερης αιχμής και στην ουρά της κυματομορφής. Στο διάστημα 10 ns – 40 ns, οι κυματομορφές αναφοράς καταγράφουν υψηλότερες τιμές ρεύματος σε σύγκριση με εκείνες με ανθρώπινη παρουσία, τάση που αντιστρέφεται στο διάστημα 40 ns – 60 ns. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στις γεννήτριες EM Test Dito και Teseq NSG 438. Στη γεννήτρια EM Test Dito, η παράμετρος I_{p2} παρουσιάζει εξασθένηση της τάξης του -14,85 % κατά τη διακρίβωση και -13,35 % κατά τη δοκιμή ατρωσίας, ενώ η I_{60} εμφανίζει μεταβολές έως +3,051 % στη διακρίβωση και -6,486 % στη δοκιμή. Αντίστοιχα, στη Teseq NSG 438 οι αποκλίσεις στην παράμετρο I_{p2} παραμένουν περιορισμένες (έως -4,96 %), με την I_{60} να φθάνει στο -7,6 % στη δοκιμή. Στη Schaffner NSG 433, η παράμετρος I_{p2} παραμένει σχεδόν αμετάβλητη στη διακρίβωση (-0,516 %), όμως καταγράφονται υψηλές αποκλίσεις στην I_{30} , έως -16,96 % στη διακρίβωση και +12,55 % στη δοκιμή ατρωσίας, γεγονός

που καταδεικνύει αστάθεια στην περιοχή της δεύτερης αιχμής. Αν και οι παραπάνω αποκλίσεις βρίσκονται εντός των ορίων του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] ($\pm 30\%$ για την παράμετρο I_{p2}), το μέγεθος τους είναι τέτοιο που δύναται να επηρεάσει την αναπαραγωγικότητα των δοκιμών μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

Η στατιστική ανάλυση της αβεβαιότητας αναπαραγωγικότητας έδειξε συχνά τιμές άνω του 1% , στοιχείο που επιβεβαιώνει τη μεταβλητότητα που εισάγει ο ανθρώπινος παράγοντας. Η μοντελοποίηση με κλασικές στατιστικές κατανομές (Κανονική, Λογαριθμοκανονική, Gamma, Weibull) δεν πέτυχε συνολικά επαρκή προσαρμογή, καθώς οι χαμηλές τιμές nRMSE περιορίστηκαν κυρίως στις παραμέτρους I_p και t_r , ενώ οι παράμετροι I_{p2} , I_{30} και I_{60} εμφάνισαν συχνά nRMSE άνω του $0,35$ και σε ορισμένες περιπτώσεις έφτασαν το $1,009$. Δεν προέκυψε σταθερό μοτίβο κατανομής, γεγονός που καταδεικνύει ότι η στοχαστική συμπεριφορά του χειριστή δεν περιγράφεται από απλά ή καθολικά αποδεκτά μαθηματικά μοντέλα συνεπώς δεν μπορεί να ενταχθεί ως τυποποιημένη πηγή αβεβαιότητας στο ισοζύγιο αβεβαιότητας (uncertainty budget) της δοκιμής ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, δημιουργώντας προβληματισμό για τη αναπαραγωγικότητα μεταξύ χειροκίνητων και αυτοματοποιημένων δοκιμών.

4.2. Προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή στη κυματομορφή ESD με χρήση φερριτών

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στη διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω της χρήσης φερριτών αρπάγης. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1, προγενέστερες μελέτες [36], [63] έχουν δείξει ότι η τοποθέτηση φερριτών γύρω από το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας επιφέρει μεταβολές κυρίως στο τμήμα χαμηλών συχνοτήτων της κυματομορφής, δηλαδή μετά το χρονικό όριο των 10 ns . Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από τη χρήση τεσσάρων διαφορετικών τύπων φερριτών αρπάγης, καθένας εκ των οποίων έχει σχεδιαστεί για συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Οι φερρίτες τοποθετήθηκαν στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας και τα πειράματα εκτελέστηκαν για δύο διαφορετικές γεννήτριες, τόσο υπό συνθήκες διακρίβωσης όσο και σε συνθήκες προσομοίωσης δοκιμής ατρωσίας. Στη συνέχεια, επιχειρείται η κατάταξη των φερριτών ως προς την αποτελεσματικότητά τους να προσαρμόζουν την κυματομορφή χωρίς χειριστή, ώστε να προσεγγίζει τη μορφή που προκύπτει παρουσία χειριστή. Η παρούσα μελέτη ακολουθεί κλιμακωτή ροή: εκκίνηση στη διάταξη διακρίβωσης του IEC 61000-4-2 [27], μεταφορά των συμπερασμάτων στη διάταξη δοκιμής, διεύρυνση με μεταβολές της διάταξης του καλωδίου γείωσης και, τέλος, μελέτη ευαισθησίας για τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία κατάταξης των εναλλακτικών. Έτσι, το τελικό συμπέρασμα προκύπτει στατιστικά ισχυρό και όχι μονοσήμαντο.

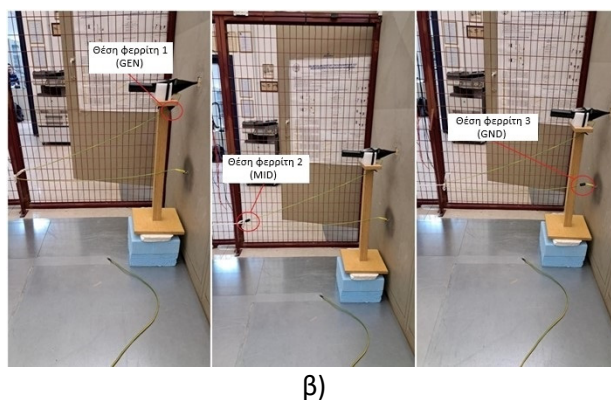
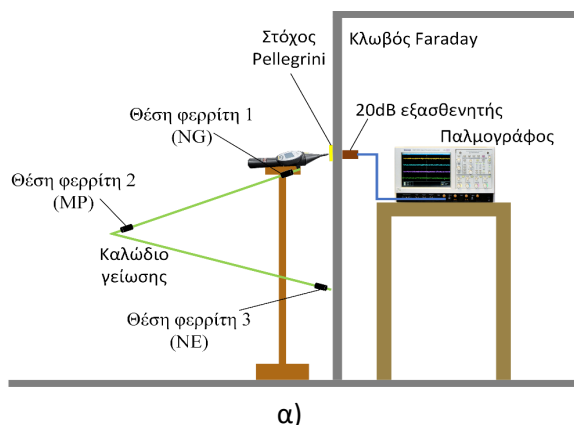
4.2.1. Πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία

Οι πειραματικές διατάξεις, η διαδικασία καταγραφής, καθώς και η εφαρμογή της μεθόδου αντιστάθμισης, όπου απαιτείται, ακολουθούν πιστά τις διαδικασίες που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η μοναδική διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι, στην παρούσα ενότητα, τοποθετήθηκε κάθε φορά ένας φερρίτης αρπάγης σε διαφορετική θέση κατά μήκος του καλωδίου γείωσης. Η επιλογή τοποθέτησης του φερρίτη στο καλώδιο γείωσης βασίζεται στο συμπέρασμα της

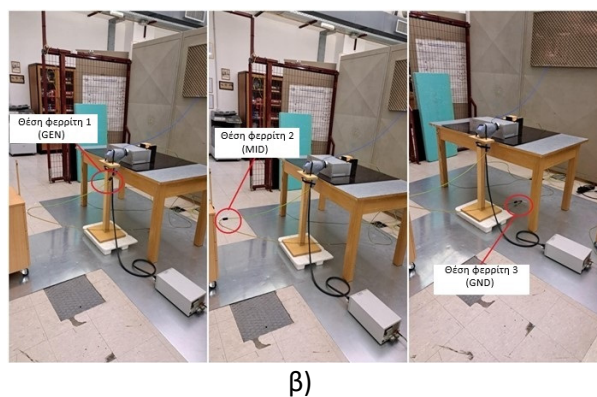
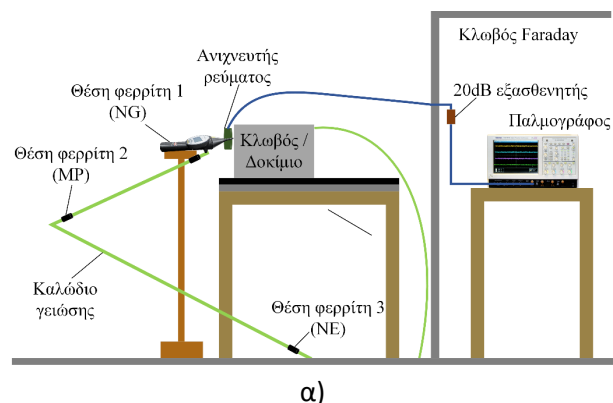
Ενότητας 4.1, σύμφωνα με το οποίο ο χειριστής επιδρά κυρίως στο τμήμα της κυματομορφής που ακολουθεί την πρώτη αιχμή. Επιπλέον, σύμφωνα με άλλες μελέτες [36], [65], κατά τη διάρκεια της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής, το ρεύμα διέρχεται κατά κύριο λόγο μέσω του καλωδίου γείωσης. Συνεπώς, η τοποθέτηση φερρίτη σε αυτό το σημείο κρίθηκε σκόπιμη, προκειμένου να προσομοιωθεί η επίδραση του χειριστή με τον πλέον ρεαλιστικό και πρακτικό τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε φερρίτης τοποθετήθηκε σε τρεις διακριτές θέσεις πάνω στο καλώδιο γείωσης: στο άκρο του καλωδίου πλησίον της γεννήτριας (Θέση φερρίτη 1 – GEN), στο μέσο του καλωδίου (Θέση φερρίτη 2 – MID) και στο άκρο του καλωδίου πλησίον της σύνδεσής του με το γειωμένο επίπεδο αναφοράς (Θέση φερρίτη 3 – GND).

Το πρώτο στάδιο επικεντρώνεται στην εφαρμογή φερριτών αρπάγης στη διάταξη διακρίβωσης, με σκοπό την αποτίμηση της ικανότητάς τους να αναπαράγουν τις μεταβολές της κυματομορφής που προκαλεί η παρουσία χειριστή. Τα αποτελέσματα του σταδίου αυτού αξιοποιούνται ως αφετηρία για το επόμενο στάδιο, όπου η ίδια επιλογή φερριτών εφαρμόζεται στη διάταξη δοκιμής, επιτρέποντας την επαλήθευση της απόδοσής τους σε συνθήκες πλησιέστερες προς το πραγματικό περιβάλλον δοκιμών. Σχηματική απεικόνιση των δύο πειραματικών διατάξεων, καθώς και φωτογραφικό υλικό από την υλοποίησή τους στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.14 και 4.15.



Σχήμα 4.14: Σχηματική αναπαράσταση (α) και φωτογραφική απεικόνιση (β) της 1^{ης} διάταξης μέτρησης (διακρίβωση) καταδεικνύοντας τις θέσεις εφαρμογής των φερριτών



Σχήμα 4.15: Σχηματική αναπαράσταση (α) και φωτογραφική απεικόνιση (β) της 2^{ης} διάταξης μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας) καταδεικνύοντας τις θέσεις εφαρμογής των φερριτών

Προκειμένου να εξεταστεί σε ποιον βαθμό η προσθήκη φερρίτη αρπάγης στη διάταξη μπορεί να επιφέρει αλλοιώσεις στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανάλογες με εκείνες που παρατηρούνται λόγω της παρουσίας χειριστή, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των καταγεγραμμένων κυματομορφών. Συγκεκριμένα, οι κυματομορφές που προέκυψαν από τις δοκιμές με χρήση φερριτών συγκρίθηκαν με τις κυματομορφές αναφοράς, οι οποίες είχαν καταγραφεί υπό συνθήκες παρουσίας χειριστή.

Στόχος της ανάλυσης ήταν, μεταξύ άλλων, η κατάταξη των φερριτών ως προς την αποτελεσματικότητά τους να προσομοιώνουν την ανθρώπινη επίδραση, λαμβάνοντας υπόψη και τη θέση τοποθέτησής τους στο καλώδιο γείωσης. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιδιώχθηκε ο εντοπισμός των βέλτιστων συνδυασμών τύπου και θέσης φερρίτη, οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είτε κατά τη διακρίβωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είτε σε αυτοματοποιημένες δοκιμές ατρωσίας.

Πίνακας 4.14: Κωδικοποίηση και βασικά χαρακτηριστικά των φερριτών αρπάγης που χρησιμοποιήθηκαν με τη γεννήτρια EM Test Dito

EM Test Dito				
Κωδικός	P.N. Φερρίτη	Θέση εφαρμογής	Υλικό	Συχνότητα λειτουργίας
Φερρίτης 1	0431164951	1 - GEN	31	1 MHz - 300 MHz
Φερρίτης 2	0431164951	2 - MID		
Φερρίτης 3	0431164951	3 - GND		
Φερρίτης 4	0444164951	1 - GEN	44	25 MHz - 300 MHz
Φερρίτης 5	0444164951	2 - MID		
Φερρίτης 6	0444164951	3 - GND		
Φερρίτης 7	0461164951	1 - GEN	61	200 MHz - 1 GHz
Φερρίτης 8	0461164951	2 - MID		
Φερρίτης 9	0461164951	3 - GND		
Φερρίτης 10	0475181651	1 - GEN	75	150 kHz - 30 MHz
Φερρίτης 11	0475181651	2 - MID		
Φερρίτης 12	0475181651	3 - GND		

Πίνακας 4.15: Κωδικοποίηση και βασικά χαρακτηριστικά των φερριτών αρπάγης που χρησιμοποιήθηκαν με τη γεννήτρια Teseq NSG 438

Teseq NSG 438				
Κωδικός	P.N. Φερρίτη	Θέση εφαρμογής	Υλικό	Συχνότητα λειτουργίας
Φερρίτης 1	0431164281	1 - GEN	31	1 MHz - 300 MHz
Φερρίτης 2	0431164281	2 - MID		
Φερρίτης 3	0431164281	3 - GND		
Φερρίτης 4	0444164281	1 - GEN	44	25 MHz - 300 MHz
Φερρίτης 5	0444164281	2 - MID		
Φερρίτης 6	0444164281	3 - GND		
Φερρίτης 7	0461164281	1 - GEN	61	200 MHz - 1 GHz
Φερρίτης 8	0461164281	2 - MID		
Φερρίτης 9	0461164281	3 - GND		
Φερρίτης 10	0475178281	1 - GEN	75	150 kHz - 30 MHz
Φερρίτης 11	0475178281	2 - MID		
Φερρίτης 12	0475178281	3 - GND		

Η κωδικοποίηση των φερριτών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως το υλικό κατασκευής, το Product Number (P.N.) και η περιοχή συχνότητας λειτουργίας, παρουσιάζονται αναλυτικά παραπάνω για τη γεννήτρια EM Test Dito στον Πίνακα 4.14 και για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 στον Πίνακα 4.15 Σημειώνεται ότι για τη γεννήτρια EM Test Dito χρησιμοποιήθηκαν φερρίτες αρπάγης με εσωτερική διάμετρο 4,9 mm, ενώ για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 χρησιμοποιήθηκαν φερρίτες με εσωτερική διάμετρο 6,3 mm, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή τους, δεδομένων των διαφορετικών διαμέτρων των καλωδίων γείωσης των δύο γεννητριών.

4.2.2. Δείκτες σύγκλισης με την κυματομορφή αναφοράς με χειριστή και μεθοδολογία κατάταξης

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση του κατά πόσον η προσθήκη φερρίτη αρπάγης στις διατάξεις διακρίβωσης και δοκιμών μπορεί να επιφέρει επίδραση στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αντίστοιχη με εκείνη που προκαλεί η παρουσία χειριστή κατά τη διαδικασία δοκιμής ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Για την ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε κατάταξη των φερριτών με βάση έντεκα (11) παραμέτρους, οι οποίες συνοπτικά αναφέρονται ως δείκτες και είναι οι εξής:

4.2.2.1. Παρουσίαση των δεικτών σύγκλισης

RMSE (Root Mean Square Error):

Το RMSE χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει τη μέση τετραγωνική διαφορά μεταξύ δύο κυματομορφών, υπολογίζοντας τη ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόστασης ανά σημείο. Όσο μικρότερη η τιμή του RMSE, τόσο μεγαλύτερη η ομοιότητα των δύο κυματομορφών. Στην παρούσα ενότητα υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i}{\max(y)} - \frac{\hat{y}_i}{\max(\hat{y})} \right)^2} \quad (28)$$

όπου: y είναι οι τιμές ρεύματος της μέσης κυματομορφής αναφοράς με χειριστή και $\hat{y}$, οι τιμές ρεύματος της κυματομορφής με φερρίτη ή χωρίς χειριστή. Για τον υπολογισμό, η μέση κυματομορφή αναφοράς συγκρίνεται ξεχωριστά με καθεμία από τις δέκα επαναλήψεις της εκάστοτε περίπτωσης και η τελική τιμή λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των δέκα RMSE.

Διασυσχέτιση (Cross-Correlation):

Η διασυσχέτιση αποτελεί μέτρο ομοιότητας δύο σημάτων, λαμβάνοντας υπόψη πιθανή χρονική ολίσθηση. Αντίθετα με το RMSE που συγκρίνει σημείο προς σημείο, η διασυσχέτιση «ολισθαίνει» το ένα σήμα ως προς το άλλο, υπολογίζοντας κάθε φορά τον βαθμό σύμπτωσης. Υπολογίζεται η κανονικοποιημένη διασυσχέτιση μεταξύ της κυματομορφής του φερρίτη ή χωρίς χειριστή και της μέσης κυματομορφής αναφοράς με χειριστή. Ο τελικός δείκτης προκύπτει ως ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών διασυσχέτισης από τις δέκα επαναλήψεις κάθε περίπτωσης και υπολογίζεται ως:

$$R_{xy}[l] = \frac{1}{||x|| \cdot ||y||} \sum_{n=1}^N x[n] \cdot y[n - 1] \quad (29)$$

όπου $x[n]$ η μέση κυματομορφή αναφοράς με χειριστή, $y[n]$ η εξεταζόμενη κυματομορφή, και l η χρονική μετατόπιση. Η κανονικοποίηση εξασφαλίζει ότι οι τιμές κυμαίνονται από -1 έως +1: τιμή κοντά στο +1 δηλώνει πολύ μεγάλη ομοιότητα, κοντά στο 0 ελάχιστη ομοιότητα, ενώ κοντά στο -1 υποδηλώνει αντιστροφή φάσης. Η μέγιστη τιμή διασυσχέτισης αντιπροσωπεύει τον καλύτερο βαθμό ταύτισης μεταξύ των δύο κυματομορφών και χρησιμοποιείται ως ο δεύτερος δείκτης της ανάλυσης.

Απόσταση DTW (Dynamic Time Warping Distance):

Η απόσταση DTW [137] είναι ένας δείκτης που συγκρίνει δύο χρονικές κυματομορφές, ακόμη και όταν αυτές εμφανίζουν χρονικές μετατοπίσεις ή διαφορετικές διάρκειες. Σε αντίθεση με απλές μεθόδους σημείο-προς-σημείο, το DTW προσαρμόζει μη γραμμικά τον άξονα του χρόνου, ώστε να ευθυγραμμίσει κοινά χαρακτηριστικά των σημάτων, όπως αιχμές ή κλίσεις, ακόμη και αν εμφανίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της απόστασης DTW, τόσο μεγαλύτερη η ομοιότητα των δύο σημάτων. Ουσιαστικά, η μέθοδος δημιουργεί έναν πίνακα αποστάσεων $D(i,j)$, όπου κάθε στοιχείο αντιστοιχεί στη διαφορά ανάμεσα στο σημείο x_i του πρώτου σήματος και στο σημείο y_j του δεύτερου. Στη συνέχεια, αναζητά τη βέλτιστη διαδρομή (warping path) μέσα από αυτόν τον πίνακα — από την αρχή έως το τέλος — η οποία ακολουθεί την πορεία με το μικρότερο συνολικό κόστος ευθυγράμμισης. Το άθροισμα των αποστάσεων κατά μήκος αυτής της διαδρομής ορίζει την τελική τιμή της απόστασης DTW. Δεν υπάρχει ένας απλός, κλειστός μαθηματικός τύπος για το αποτέλεσμα, καθώς η διαδικασία προκύπτει από υπολογιστικούς αλγόριθμους δυναμικού προγραμματισμού [137], [138]. Η βασική ιδέα είναι ότι η μέθοδος DTW μπορεί να συμπύξει ή να εκτείνει χρονικά τμήματα των σημάτων, ώστε να επιτύχει την καλύτερη δυνατή αντιστοίχιση μεταξύ χαρακτηριστικών τους, όπως αιχμές ή διακυμάνσεις, ακόμη κι αν αυτές εμφανίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

$$DTW(x, y) = \min_{\text{όλες οι ευθυγραμμίσεις}} \sum_{(i,j) \text{ στο μονοπάτι}} |x_i - y_j| \quad (30)$$

Απόκλιση τιμών παραμέτρων από τις παραμέτρους αναφοράς:

Υπολογίζεται η μέση τιμή της παραμέτρου I_p από τις δέκα κυματομορφές της αναφοράς με χειριστή και συγκρίνεται με τη μέση αντίστοιχη τιμή κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης με φερρίτη ή χωρίς χειριστή. Ως τέταρτος δείκτης ορίζεται η απόλυτη διαφορά τους:

$$\text{Απόκλιση} = |\text{Τιμή παραμέτρου σεναρίου} - \text{Τιμή παραμέτρου σεναρίου με χειριστή}| \quad (31)$$

Η απόκλιση εκφράζεται σε απόλυτες μονάδες και όχι σε ποσοστό. Όσο μικρότερη η τιμή, τόσο μεγαλύτερη η ομοιότητα των δύο κυματομορφών στο συγκεκριμένο μέγεθος. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι δείκτες απόκλισης για τις υπόλοιπες παραμέτρους κυματομορφής που καθορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] (t_r , I_{p2} , I_{30} , I_{60}).

Απόκλιση του ολικού εγχεόμενου φορτίου:

Το ολικό εγχεόμενο φορτίο μιας κυματομορφής υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα της καμπύλης του ρεύματος ως προς τον χρόνο, δηλαδή ως το εμβαδό κάτω από την καμπύλη ρεύματος - χρόνου. Στην

πράξη, για διακριτά δεδομένα, το φορτίο προσεγγίζεται αριθμητικά μέσω του τραπεζοειδούς κανόνα, υπολογίζοντας το άθροισμα:

$$\text{Φορτίο} \approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{t_{i+1} - t_i}{2} (I_i + I_{i+1}) \quad (32)$$

όπου t_i τα χρονικά σημεία και I_i οι αντίστοιχες τιμές ρεύματος.

Για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, υπολογίζεται το μέσο ολικό φορτίο και συγκρίνεται με τη μέση τιμή της κυματομορφής αναφοράς με χειριστή. Ως δείκτης ορίζεται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των δύο τιμών φορτίου. Όσο μικρότερη η τιμή αυτής της διαφοράς, τόσο καλύτερα προσεγγίζει η εξεταζόμενη κυματομορφή την επίδραση του χειριστή ως προς την ενεργειακή συμπεριφορά.

Απόκλιση του φασματικού περιεχομένου στην περιοχή 6,25 – 200 MHz:

Το ποσοστό φασματικού περιεχομένου εκφράζει πόσο μέρος της ισχύος ενός σήματος συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων και αποτελεί σημαντικό δείκτη για τη σύγκριση κυματομορφών ως προς τις ηλεκτρομαγνητικές τους εκπομπές. Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η φασματική ενέργεια στο εύρος 6,25 – 200 MHz, προκειμένου να εκτιμηθεί πόσο η κυματομορφή με φερρίτη ή χωρίς χειριστή προσεγγίζει την κυματομορφή αναφοράς με χειριστή από πλευράς συχνοτικού περιεχομένου. Σημειώνεται ότι η επιλογή της συχνότητας 6,25 MHz προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{\text{Ρυθμός δειγματοληψίας παλμογράφου}}{\text{Αριθμός δειγμάτων}} = \frac{20 \text{ GS / s}}{3200} = 6,25 \text{ MHz} \quad (33)$$

Για τον υπολογισμό του φασματικού περιεχομένου, η κυματομορφή του ρεύματος μετασχηματίζεται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας μέσω της διακριτής μετασχηματιστικής τεχνικής Fourier. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η φασματική πυκνότητα ενέργειας ως το τετράγωνο του πλάτους του φάσματος, ενώ η συνολική ενέργεια σε κάθε εύρος συχνοτήτων προκύπτει με αριθμητική ολοκλήρωση. Για το εύρος 6,25 – 200 MHz, υπολογίζεται το ποσοστό της ενέργειας ως προς το σύνολο της φασματικής ενέργειας στο εύρος 6,25 MHz – 1 GHz, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{ποσοστό φάσματος} = 100 \times \frac{\text{φάσμα στο εύρος 6,25MHz – 200MHz}}{\text{συνολικό φάσμα}} \quad (34)$$

Η απόκλιση για τον συγκεκριμένο δείκτη ορίζεται ως η απόλυτη διαφορά, σε ποσοστό, μεταξύ του ποσοστού φασματικού περιεχομένου της κυματομορφής αναφοράς και εκείνου της συγκρινόμενης κυματομορφής. Μικρότερη απόκλιση δηλώνει μεγαλύτερη ομοιότητα ως προς τον φασματικό χαρακτήρα της εκφόρτισης.

Απόκλιση του φασματικού περιεχομένου στην περιοχή 200 MHz – 1 GHz:

Ο υπολογισμός για τον δείκτη αυτόν ακολουθεί την ίδια μεθοδολογία όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, με τη διαφορά ότι εξετάζεται το εύρος συχνοτήτων 200 MHz – 1 GHz. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το ποσοστό της φασματικής ενέργειας που εμπίπτει στη ζώνη αυτή ως προς το συνολικό φάσμα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{ποσοστό φάσματος} = 100 \times \frac{\text{φάσμα στο εύρος 200MHz – 1GHz}}{\text{συνολικό φάσμα}} \quad (35)$$

4.2.2.2. Κατηγοριοποίηση των δεικτών σύγκρισης

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, οι έντεκα (11) δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των κυματομορφών ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των πληροφοριών που παρέχουν:

- Δείκτες μορφολογικής σύγκρισης κυματομορφών και συνολική ενέργεια: Οι τρεις πρώτοι δείκτες (RMSE, διασυσχέτιση, απόσταση DTW) εκτιμούν τη γενική ομοιότητα σχήματος μεταξύ της κυματομορφής αναφοράς με χειριστή και κάθε συγκρινόμενης κυματομορφής. Το RMSE μετρά τη μέση τετραγωνική απόκλιση σημείο προς σημείο. Η διασυσχέτιση αξιολογεί τον βαθμό ταύτισης ακόμη και σε περιπτώσεις χρονικής μετατόπισης, ενώ η απόσταση DTW επιτρέπει μη γραμμική ευθυγράμμιση στον χρόνο, συγκρίνοντας κυματομορφές με παρόμοια μορφή, αλλά διαφορετική χρονική κατανομή. Τέλος το συνολικό φορτίο χαρακτηρίζει σωρευτικά τις κυματομορφές και αποτελεί επίσης δείκτη γενικότερης μορφολογικής σύγκρισης
- Δείκτες βασισμένοι στο Πρότυπο IEC 61000-4-2: Οι επόμενοι πέντε δείκτες (αποκλίσεις I_p , t_r , I_{p2} , I_{30} και I_{60}) περιγράφουν χαρακτηριστικά των κυματομορφών, όπως ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2.
- Φασματικά χαρακτηριστικά: Οι τελευταίοι δύο δείκτες αφορούν την κατανομή της ενέργειας στον συχνοτικό τομέα. Αξιολογείται το ποσοστό του φασματικού περιεχομένου στα εύρη συχνοτήτων 6,25–200 MHz και 200 MHz–1 GHz. Οι δείκτες αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της κυματομορφής, καθώς συνδέονται άμεσα με τις πιθανές εκπομπές που ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία ευαίσθητων ηλεκτρονικών συστημάτων.

Με βάση τους παραπάνω δείκτες πραγματοποιήθηκε η κατάταξη των δεκατριών (13) περιπτώσεων (τέσσερις τύποι φερριτών σε τρεις θέσεις και μία περίπτωση χωρίς χειριστή), προκειμένου να διαπιστωθεί ποιος συνδυασμός προσεγγίζει καλύτερα την επίδραση του χειριστή. Αρχικά, κάθε δείκτης υπολογίστηκε ξεχωριστά για όλες τις περιπτώσεις και καθορίστηκε η σχετική τους κατάταξη. Για τους περισσότερους δείκτες, μικρότερη τιμή δηλώνει καλύτερη προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης, με εξαίρεση τη διασυσχέτιση, όπου υψηλότερη τιμή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μορφολογική ομοιότητα. Η τελική κατάταξη προέκυψε μέσω της μεθόδου σταθμισμένων βαρών, κατά την οποία οι θέσεις κάθε περίπτωσης σε όλους τους δείκτες πολλαπλασιάστηκαν με τα αντίστοιχα βάρη τους και στη συνέχεια αθροίστηκαν. Τέλος, η συνολική βαθμολογία ταξινομήθηκε εκ νέου, διατηρώντας ισοβαθμίες όπου προέκυπταν. Τα βάρη που αποδόθηκαν σε κάθε δείκτη παρατίθενται στον Πίνακα 4.16.

Πίνακας 4.16: Τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της συνολικής κατάταξης

A/A	Δείκτης	Βάρος	A/A	Δείκτης	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 ολικού φορτίου	0,1
4	Απόκλιση I_p	0,1	10	Απόκλιση φασματικής περιεχομένου στο εύρος 6,25 - 200MHz	0,3
5	Απόκλιση t_r	0,1	11	Απόκλιση φασματικής περιεχομένου στο εύρος 200MHz -1GHz	0,1
6	Απόκλιση I_{p2}	0,5			

Τα βάρη που αποδόθηκαν στους έντεκα (11) δείκτες καθορίστηκαν με βάση τη συμβολή τους στην αποτύπωση της επίδρασης του χειριστή και τη σημασία τους για την αξιολόγηση της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης:

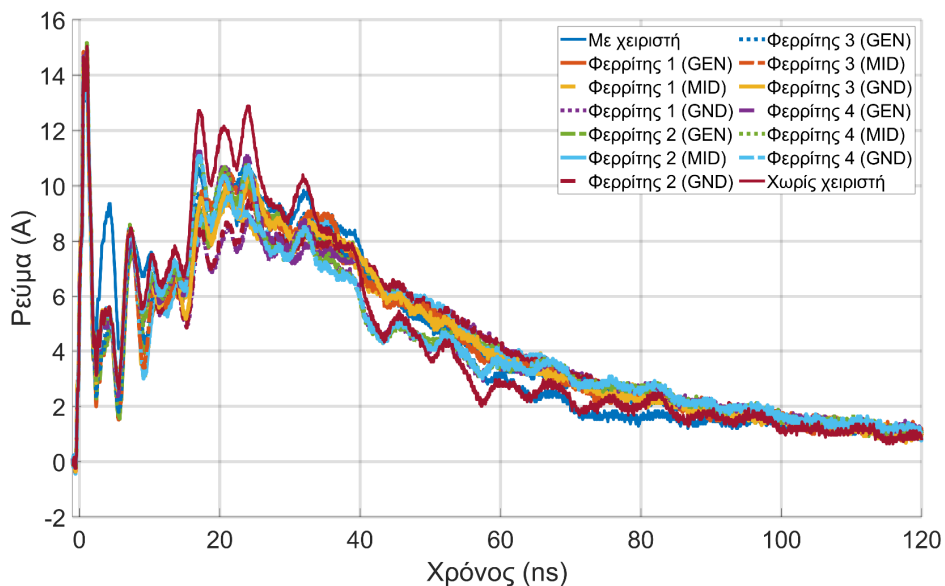
- Μικρό βάρος (0,1) αποδόθηκε σε δείκτες που αφορούν την πρώτη αιχμή της κυματομορφής (δείκτες 4 και 5 – I_p και t_r), δεδομένου ότι, όπως τεκμηριώνεται στα αποτελέσματα της Ενότητας 4.1, η ανθρώπινη παρουσία ασκεί περιορισμένη επίδραση σε αυτό το τμήμα, με πολύ μικρές αποκλίσεις και χαμηλή αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας. Χαμηλό βάρος δόθηκε επίσης στο φασματικό περιεχόμενο στο εύρος 200 MHz – 1 GHz (δείκτης 11), καθώς η περιοχή αυτή, που αντιστοιχεί κυρίως στο χρονικό διάστημα έως περίπου 7 ns, παραμένει ως επί το πλείστον ανεπηρέαστη από την ανθρώπινη παρουσία και παρουσιάζει περιορισμένη συνεισφορά στη διαμόρφωση της μορφής της κυματομορφής. Ομοίως, χαμηλό βάρος αποδόθηκε και στον δείκτη του συνολικού εγχεόμενου φορτίου (δείκτης 9), καθώς εμφανίζει μικρή μεταβλητότητα μεταξύ διαφορετικών συνθηκών μέτρησης.
- Μέτριο βάρος (0,3) αποδόθηκε στους τρεις πρώτους δείκτες, οι οποίοι αξιολογούν τη συνολική μορφολογική ομοιότητα μεταξύ της κυματομορφής αναφοράς και των συγκρινόμενων κυματομορφών. Η επιλογή αυτή αντικατοπτρίζει την ανάγκη για ισορροπημένη εκτίμηση της γενικής μορφής της κυματομορφής, αποφεύγοντας υπερβολική έμφαση σε επιμέρους παραμέτρους. Στην ίδια κατηγορία περιλαμβάνεται και ο δείκτης 10, που αφορά το φασματικό περιεχόμενο στο εύρος 6,25–200 MHz, το οποίο συνδέεται με το διάστημα έντονων ταλαντώσεων μεταξύ περίπου 7 ns και 60 ns και, όπως διαπιστώθηκε πειραματικά, επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία του χειριστή.
- Υψηλό βάρος (0,5) αποδόθηκε στους δείκτες 6 έως 8 (παράμετροι I_{p2} , I_{30} και I_{60}), καθώς αυτοί σχετίζονται με κρίσιμες παραμέτρους που ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 και περιγράφουν τη δεύτερη αιχμή καθώς και το κύριο σώμα της κυματομορφής. Οι εν λόγω παράμετροι εμφάνισαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των κυματομορφών με και χωρίς χειριστή, συνοδευόμενες από αυξημένη αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην παράμετρο I_{p2} , η οποία αναδείχθηκε ως καθοριστικής σημασίας λόγω της υψηλής διακύμανσής της και της έντονης επίδρασης που ασκεί η ανθρώπινη παρουσία.

Τα προαναφερόμενα βάρη είναι ενδεικτικά και δεν συνιστούν απόλυτη επιλογή, καθώς διαφορετικές στάθμισεις ενδέχεται να επηρεάσουν την τελική κατάταξη των φερριτών. Στόχος της παρούσας διατριβής δεν είναι να καθορίσει μία καθολικά βέλτιστη μεθοδολογία αξιολόγησης, αλλά να διερευνήσει σε ποιον βαθμό η χρήση φερρίτη αρπάγης δύναται να προσομοιώσει αποτελεσματικά την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Σε περίπτωση θετικής συνεισφοράς, η επιλογή του κατάλληλου τύπου φερρίτη και η βέλτιστη θέση τοποθέτησής του θα πρέπει να καθορίζονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

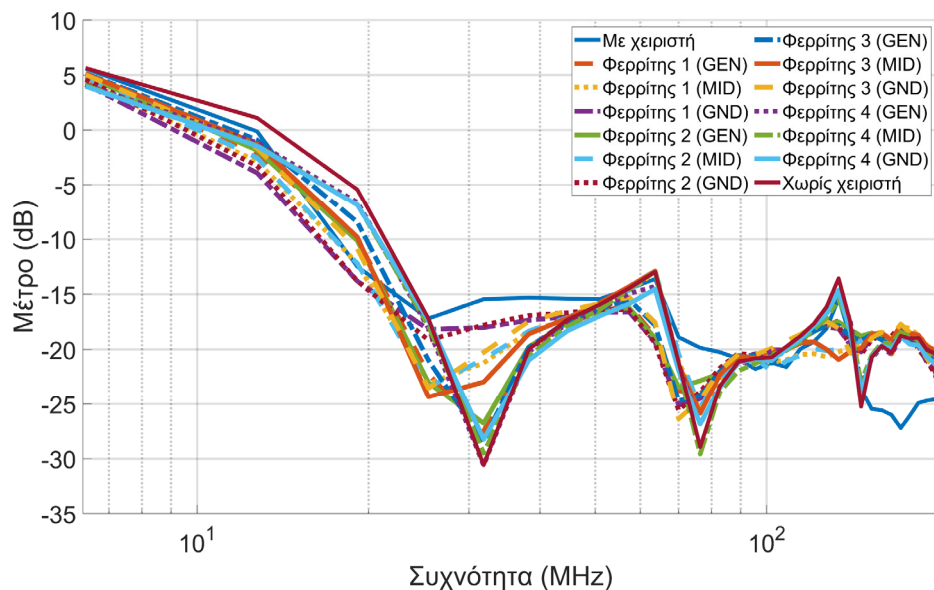
4.2.3. Αποτελέσματα μετρήσεων

4.2.3.1. Γεννήτρια EM Test Dito – 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Στα Σχήματα 4.16 και 4.17 παρουσιάζονται οι κυματομορφές και τα φάσματα του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τις 14 περιπτώσεις (12 με φερρίτες αρπάγης, 1 χωρίς χειριστή και 1 με χειριστή, η οποία αποτελεί τη κυματομορφή αναφοράς). Όπως προέκυψε ήδη στην ενότητα 4.1, η παρουσία χειριστή δεν επηρεάζει σημαντικά την πρώτη αιχμή της κυματομορφής, γεγονός που ισχύει και για τις δοκιμές με φερρίτες. Στο χρονικό διάστημα 2 ns – 6 ns, όπου η παρουσία χειριστή προκαλεί ενίσχυση της κυματομορφής, κανένας από τους φερρίτες δεν αναπαράγει επαρκώς την επίδραση αυτή.



Σχήμα 4.16: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για τη γεννήτρια EM Test Dito: με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)



Σχήμα 4.17: Σύγκριση φάσματος για τη γεννήτρια EM Test Dito, με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Στη θέση 1 (κοντά στη γεννήτρια), όλοι οι φερρίτες προκαλούν εξασθένηση του πλάτους της κυματομορφής σε σχέση με τη μέτρηση χωρίς χειριστή, ενώ στις άλλες θέσεις οι αποκλίσεις είναι μικρότερες. Στο διάστημα 6 ns – 8 ns, οι φερρίτες με P.N. 0431264951 και 0444164951 στη θέση 1 πλησιάζουν περισσότερο την επίδραση του χειριστή, ενώ γύρω στα 9 ns, όπου η κυματομορφή με χειριστή παρουσιάζει ενίσχυση, οι αντίστοιχες τιμές με φερρίτη παραμένουν εξασθενημένες.

Στο χρονικό διάστημα 15 ns – 30 ns, όπου η παρουσία χειριστή οδηγεί σε εξασθένηση του πλάτους της κυματομορφής, οι φερρίτες επιφέρουν ανάλογη επίδραση, αν και σε διαφορετικό βαθμό, χωρίς να αναδεικνύεται κάποιος ως βέλτιστη λύση. Στο διάστημα 30 ns – 35 ns, παρατηρείται περαιτέρω εξασθένηση της κυματομορφής λόγω των φερριτών, ενώ στο εύρος 40 ns – 55 ns οι περισσότεροι φερρίτες επιτυγχάνουν ικανοποιητική σύγκλιση με την κυματομορφή αναφοράς, με εξαίρεση τον φερρίτη με P.N. 0475181651, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις. Στο υπόλοιπο σκέλος της δεύτερης αιχμής, οι φερρίτες γενικά προκαλούν ενίσχυση της κυματομορφής σε σύγκριση τόσο με την κυματομορφή αναφοράς όσο και με εκείνη χωρίς χειριστή, γεγονός που υποδεικνύει περιορισμούς στην προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης σε αυτό το τμήμα.

Η φασματική ανάλυση εμφανίζει αντίστοιχες τάσεις. Έως περίπου 25 MHz, η παρουσία χειριστή και οι φερρίτες προκαλούν εξασθένηση σε σχέση με την περίπτωση χωρίς χειριστή. Στα φασματικά διαστήματα 25 MHz – 50 MHz και 70 MHz – 90 MHz, η παρουσία χειριστή οδηγεί σε ενίσχυση του φασματικού περιεχομένου, με ορισμένους φερρίτες, όπως εκείνους με P.N. 0444164951 και 0431164951 στη θέση 3, να προσεγγίζουν αυτή την ενίσχυση. Στις υψηλότερες συχνότητες (146 MHz – 200 MHz), η έντονη εξασθένηση που προκαλείται από την ανθρώπινη παρουσία δεν αναπαράγεται από κανέναν φερρίτη. Η αντιστοίχιση χρονικών και φασματικών περιοχών, όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία [36], επιβεβαιώνει τη συνοχή των παρατηρήσεων.

Πίνακας 4.17: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για τη γεννήτρια EM Test Dito για κάθε σενάριο μέτρησης – 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

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

Συνολικά, αν και κανένας φερρίτης δεν επιτυγχάνει πλήρη αναπαραγωγή της επίδρασης του χειριστή, προκύπτει ότι ορισμένοι τύποι και θέσεις τοποθέτησης μπορούν να προσεγγίσουν σε σημαντικό βαθμό τις μεταβολές της κυματομορφής που προκαλεί η ανθρώπινη παρουσία, προσφέροντας ελπιδοφόρες δυνατότητες για βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας.

Στον Πίνακα 4.17 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές τιμές των κυματομορφών για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις, καθώς και για την κυματομορφή αναφοράς με χειριστή, παρέχοντας τη δυνατότητα εκτίμησης των αποκλίσεων κάθε παραμέτρου σε σύγκριση με τη μέτρηση χωρίς χειριστή. Με κόκκινο έχει σημειωθεί η τιμή της παραμέτρου I_{p2} για την περίπτωση χωρίς χειριστή, η οποία υπερβαίνει το ανώτατο όριο που καθορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] (12,6 A).

Ειδικότερα, όσον αφορά τις τιμές που σχετίζονται με την πρώτη αιχμή, δηλαδή τις παραμέτρους I_p και t_r , τόσο η παρουσία του χειριστή όσο και η προσθήκη φερρίτη αρπάγης δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα, καθώς η μέγιστη παρατηρούμενη απόκλιση στην παράμετρο I_p δεν υπερβαίνει το -1,666 % και περιορίζεται σε μία μόνο περίπτωση, ενώ οι περισσότερες αποκλίσεις παραμένουν κάτω από το 1 %. Ακόμη μικρότερες είναι οι διαφορές στην παράμετρο t_r , με αποκλίσεις που δεν ξεπερνούν το 0,45 %. Αντίθετα, για την παράμετρο I_{30} οι αποκλίσεις είναι πιο αισθητές, χωρίς να παρατηρείται σταθερή τάση αύξησης ή μείωσης, τόσο λόγω της ανθρώπινης παρουσίας όσο και της επίδρασης των φερριτών αρπάγης.

Ιδιαίτερα ευδιάκριτα είναι τα αποτελέσματα στην παράμετρο I_{p2} , όπου τόσο ο χειριστής όσο και οι φερρίτες αρπάγης οδηγούν σε εξασθένηση της τιμής της. Αντιθέτως, στην παράμετρο I_{60} παρατηρείται τάση αύξησης, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι φερρίτες αρπάγης μπορούν πράγματι να προσομοιώσουν, σε έναν βαθμό, την επίδραση του χειριστή στην κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι παρατηρήσεις αυτές συμφωνούν πλήρως με τα ποιοτικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των κυματομορφών στις προηγούμενες ενότητες.

Πίνακας 4.18: Τιμές των δεικτών για τη γεννήτρια EM Test Dito για κάθε σενάριο μέτρησης – 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Σενάριο μέτρησης	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_p (A)	Dev t_r (ns)	Dev I_{p2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)
1 - GEN	0,0581	0,9844	31,91	0,160	0,0043	0,4960	0,6712	0,8966	4,1130	1,6400	1,4840
1 – MID	0,0606	0,9834	36,59	0,016	0,0045	1,1040	1,0320	0,7458	3,8340	1,4180	1,1820
1 - GND	0,0643	0,9821	38,90	0,128	0,0072	1,6640	1,2330	1,1480	4,4530	1,8910	1,7630
2 - GEN	0,0557	0,9852	31,16	0,232	0,0071	0,3600	0,2969	0,9423	6,0490	0,9559	0,8132
2 – MID	0,0566	0,9852	32,63	0,104	0,0011	0,9520	0,7100	0,8581	5,9630	0,7463	0,5476
2 - GND	0,0576	0,9844	34,22	0,360	0,0037	1,1760	0,9100	1,1580	6,6460	1,0860	0,9770
3 - GEN	0,0497	0,9882	30,34	0,184	0,0003	0,2000	0,1016	0,5800	4,7220	0,1539	0,0400
3 – MID	0,0485	0,9887	27,54	0,168	0,0076	0,0880	0,3548	0,5046	4,8140	0,0210	0,1954
3 - GND	0,0451	0,9905	25,90	0,200	0,0034	0,1040	0,4141	0,6116	4,7270	0,0235	0,0604
4 - GEN	0,0586	0,9840	32,49	0,168	0,0054	0,6320	1,0430	0,5405	1,9390	0,7448	0,5802
4 – MID	0,0589	0,9839	31,29	0,248	0,0040	0,4080	1,3950	0,4433	1,8900	0,7197	0,5519
4 - GND	0,0588	0,9841	29,98	0,280	0,0014	0,5200	1,4300	0,6132	1,7670	0,8791	0,7263
Χωρίς χειριστή	0,0541	0,9863	39,45	0,112	0,0038	2,2080	0,0288	0,2378	0,7088	1,3260	1,4210

Στον Πίνακα 4.18 παρατίθενται οι τιμές των έντεκα (11) δεικτών που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση και την κατάταξη των δεκατριών (13) εξεταζόμενων περιπτώσεων. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η τιμή ενός δείκτη, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η επίδραση του χειριστή, με εξαίρεση τον δείκτη διασυσχέτισης (cross-correlation), όπου υψηλότερη τιμή υποδηλώνει μεγαλύτερη μορφολογική ομοιότητα με την κυματομορφή αναφοράς.

Από τις τιμές που παρατίθενται προκύπτει ότι δεν υπάρχει φερρίτης αρπάγης που να υπερέχει ταυτόχρονα σε όλους τους δείκτες. Αντιθέτως, κάθε περίπτωση εμφανίζει καλύτερες επιδόσεις σε ορισμένους δείκτες και υστερεί σε άλλους, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της πολυπαραμετρικής αξιολόγησης. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η θέση τοποθέτησης του φερρίτη αρπάγης κατά μήκος του καλωδίου γείωσης επηρεάζει αισθητά τη συμπεριφορά του, χωρίς όμως να αναδεικνύεται κάποιο σαφές ή επαναλαμβανόμενο μοτίβο. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η αλληλεπίδραση εξαρτάται από την πολύπλοκη κατανομή των ρευμάτων και των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε κάθε συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.

Πίνακας 4.19: Κατάταξη των 13 σεναρίων μέτρησης για τη γεννήτρια EM Test Dito – 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Σενάριο μέτρησης	Κατάταξη											Τελική κατάταξη
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I _p (A)	Dev t _r (ns)	Dev I _{p2} (A)	Dev I ₃₀ (A)	Dev I ₆₀ (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25-200MHz (%)	Dev spectrum 0,2-1GHz (%)	
1 - GEN	8	7	7	5	8	6	6	10	6	12	12	9
1 - MID	12	11	11	1	9	10	9	8	5	11	10	11
1 - GND	13	13	12	4	12	12	11	12	7	13	13	13
2 - GEN	5	5	5	10	11	4	3	11	12	8	8	5
2 - MID	6	6	9	2	2	9	7	9	11	6	4	7
2 - GND	7	8	10	13	5	11	8	13	13	9	9	12
3 - GEN	3	3	4	8	1	3	2	5	8	3	1	3
3 - MID	2	2	2	6,5	13	1	4	3	10	1	3	1
3 - GND	1	1	1	9	4	2	5	6	9	2	2	2
4 - GEN	9	10	8	6,5	10	8	10	4	4	5	6	8
4 - MID	11	12	6	11	7	5	12	2	3	4	5	6
4 - GND	10	9	3	12	3	7	13	7	2	7	7	10
Χωρίς χειριστή	4	4	13	3	6	13	1	1	1	10	11	4

Στον Πίνακα 4.19 παρουσιάζεται η κατάταξη των 13 περιπτώσεων, τόσο για κάθε επιμέρους δείκτη όσο και συνολικά. Παρατηρείται ότι η θέση κάθε φερρίτη αρπάγης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το επιλεγμένο κριτήριο, γεγονός που καταδεικνύει ότι δεν υπάρχει μία απόλυτα κυρίαρχη λύση. Ενδεικτικό είναι ότι ακόμη και το σενάριο που κατατάσσεται συνολικά πρώτο (3 - MID) εμφανίζει κατατάξεις από την 1^η έως τη 13^η θέση στους επιμέρους δείκτες, αναδεικνύοντας τη σημασία της πολυπαραμετρικής προσέγγισης. Αξιοσημείωτο είναι ότι η κυματομορφή χωρίς χειριστή καταλαμβάνει σε ορισμένους δείκτες την υψηλότερη θέση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ανθρώπινη παρουσία ασκεί περιορισμένη επίδραση σε συγκεκριμένες παραμέτρους. Αντιθέτως, κάποιοι φερρίτες, παρότι στοχεύουν στην

προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης, ενδέχεται να προκαλέσουν μεγαλύτερες αποκλίσεις από την κυματομορφή αναφοράς.

Το σενάριο 3 - MID ξεχωρίζει, καθώς καταλαμβάνει την πρώτη θέση συνολικά, εμφανίζοντας κορυφαίες επιδόσεις σε δείκτες όπως το κανονικοποιημένο σφάλμα (nRMSE), η διασυσχέτιση (cross-correlation), η δυναμική ευθυγράμμιση (DTW), καθώς και στις αποκλίσεις της παραμέτρου I_{P2} και του φασματικού περιεχομένου στο εύρος 6,25–200 MHz. Παρά το γεγονός ότι εμφανίζει χαμηλότερες επιδόσεις σε συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως η απόκλιση του χρόνου ανόδου (t_r), η συνολική του συμπεριφορά κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Η εναλλακτική 3 - GND κατατάσσεται στη δεύτερη θέση, επιτυγχάνοντας πολύ καλές επιδόσεις στους δείκτες nRMSE, διασυσχέτιση, DTW, καθώς και στις παραμέτρους I_{P2} και φασματικής ενέργειας.

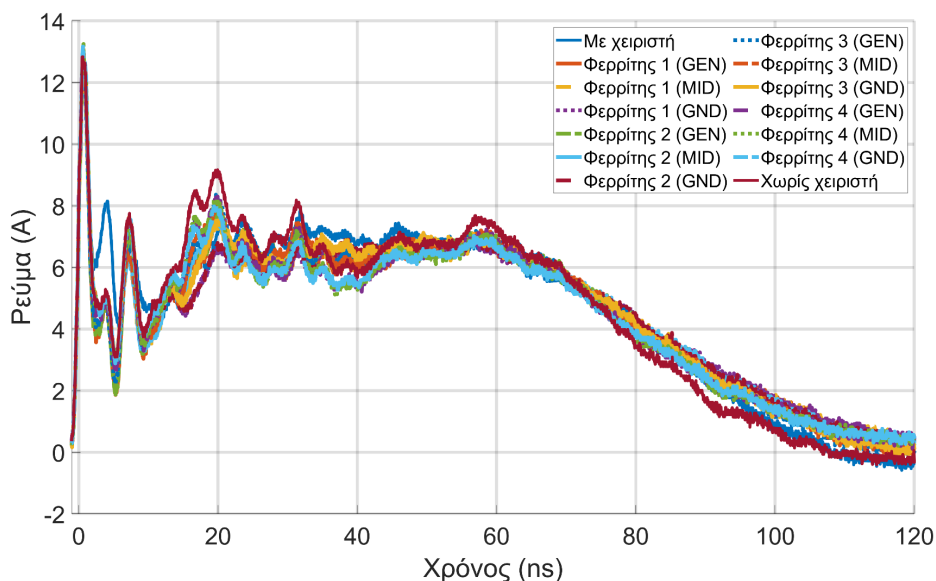
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση «Χωρίς χειριστή», η οποία κατατάσσεται τέταρτη συνολικά, αλλά βρίσκεται στην πρώτη θέση για δείκτες όπως οι αποκλίσεις στις παραμέτρους I_{30} , I_{60} και του συνολικού φορτίου. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι σε ορισμένες παραμέτρους η ανθρώπινη επίδραση είναι αμελητέα, ενώ η προσθήκη φερριτή μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να επιφέρει μεγαλύτερη μεταβολή στην κυματομορφή.

4.2.3.2. Γεννήτρια EM Test Dito – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

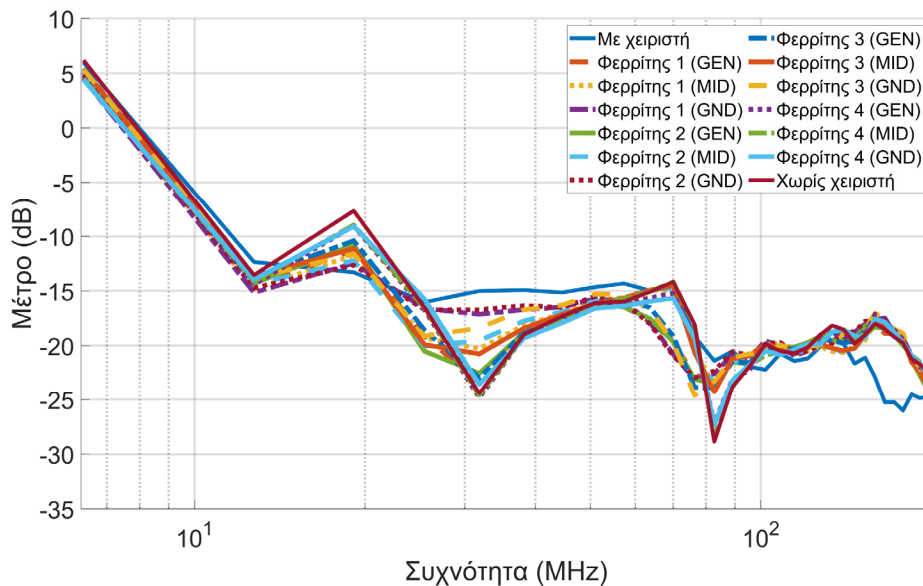
Στα Σχήματα 4.18 και 4.19 παρουσιάζονται οι κυματομορφές και τα φάσματά τους για τις δεκατρείς (13) περιπτώσεις, σε σύγκριση με την κυματομορφή αναφοράς με χειριστή και χωρίς χειριστή.

Η συμπεριφορά που παρατηρείται είναι γενικά παρόμοια με εκείνη που καταγράφηκε στη διάταξη της διακρίβωσης:

- Πρώτη αιχμή (0 – 8 ns): Η επίδραση του χειριστή και των φερριτών παραμένει περιορισμένη. Στο διάστημα 2 – 6 ns, η παρουσία του χειριστή ενισχύει την κυματομορφή, χωρίς ωστόσο κάποιος φερριτής να αναπαράγει πλήρως αυτό το φαινόμενο. Οι φερριτές τοποθετημένοι κοντά στη γεννήτρια (θέση 1) προκαλούν μείωση του πλάτους σε σύγκριση με την κυματομορφή χωρίς χειριστή.



Σχήμα 4.18: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για τη γεννήτρια EM Test Dito: με φερριτές, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)



Σχήμα 4.19: Σύγκριση φάσματος για τη γεννήτρια EM Test Dito, με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

- Σκέλος δεύτερης αιχμής (15 – 95 ns): Οι φερρίτες ακολουθούν τη μείωση πλάτους που επιφέρει η παρουσία του χειριστή, αν και σε διαφορετικό βαθμό. Στο διάστημα 30 – 35 ns, σε αντίθεση με τη διάταξη της διακρίβωσης, η κυματομορφή αναφοράς βρίσκεται υψηλότερα από εκείνη χωρίς χειριστή, με ορισμένους φερρίτες (2 – GEN, 3 - GEN, 3 – MID, 3 – GND και 4 - GND) να προσεγγίζουν αυτή την επίδραση. Μετά τα 40 ns, οι περισσότεροι φερρίτες επιτυγχάνουν ικανοποιητική προσέγγιση της κυματομορφής αναφοράς, αν και συνήθως ανυψώνουν ελαφρώς την κυματομορφή σε σύγκριση με εκείνη χωρίς χειριστή.

Στο φασματικό πεδίο παρατηρούνται επιμέρους διαφοροποιήσεις:

- Έως 12,5 MHz, η παρουσία του χειριστή προκαλεί μικρή ενίσχυση του φασματικού περιεχομένου, ενώ οι φερρίτες γενικά το μειώνουν.
- Στις περιοχές 12,5 – 60 MHz, οι φερρίτες με P.N. 0444164951 και 0431164951 στη θέση 3 (GND) προσεγγίζουν καλύτερα την επίδραση του χειριστή.
- Στις υψηλές συχνότητες (150 – 200 MHz), η έντονη εξασθένηση που προκαλεί η ανθρώπινη παρουσία δεν αναπαράγεται από κανέναν φερρίτη, όπως συνέβη και στη διάταξη της διακρίβωσης.

Συνολικά, οι φερρίτες αρπάγης προσεγγίζουν σε αρκετές χρονικές και φασματικές περιοχές την επίδραση του χειριστή, επιβεβαιώνοντας ότι μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, έστω και αν δεν επιτυγχάνεται πλήρης ταύτιση με την κυματομορφή αναφοράς.

Στη δεύτερη διάταξη μέτρησης, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις τάσεις που παρατηρήθηκαν στη διάταξη της διακρίβωσης. Οι παράμετροι I_P και t_r παραμένουν σταθερές μεταξύ των δεκατριών (13) σεναρίων, χωρίς ουσιαστικές διαφοροποιήσεις. Αντιθέτως, οι παράμετροι I_{P2} , I_{30} και I_{60} μειώνονται τόσο λόγω της ανθρώπινης παρουσίας όσο και με τη χρήση φερρίτη αρπάγης, δείχνοντας ότι οι φερρίτες μπορούν, σε έναν βαθμό, να προσομοιώσουν την ανθρώπινη επίδραση.

Στους Πίνακες 4.21 και 4.22 καταγράφεται η αξιολόγηση και η τελική κατάταξη, από όπου προκύπτει πως η απόδοση των φερριτών αρπάγης εξαρτάται έντονα από τον εκάστοτε δείκτη, χωρίς να υπάρχει απόλυτα κυρίαρχη λύση. Ξεχωρίζει η περίπτωση 3 - GND (φερρίτης με P.N. 0461164951 στη θέση 3), η οποία κατατάσσεται πρώτη συνολικά, εμφανίζοντας υψηλή συνέπεια στους περισσότερους δείκτες. Η θέση MID εμφανίζει συχνά καλή απόδοση, αν και χωρίς σταθερό μοτίβο για όλους τους φερρίτες.

Πίνακας 4.20: Τιμές παραμέτρων μέσων κυματομορφών για τη γεννήτρια EM Test Dito για κάθε σενάριο μέτρησης – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Σενάριο μέτρησης	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}	Φορτίο	Φάσμα 6,25-200MHz	Φάσμα 200MHz -1GHz
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]		[%]	[%]
1 - GEN	12,68	1,064	7,737	5,803	6,887	570,2	93,63	6,37
1 – MID	13,05	1,089	7,502	5,918	6,847	570,8	94,40	5,6
1 - GND	13,11	1,068	6,819	5,649	6,622	570,8	94,16	5,84
2 - GEN	12,64	1,073	7,868	6,021	6,891	569,3	94,16	5,84
2 – MID	12,91	1,065	7,580	6,186	6,895	569,5	94,79	5,21
2 - GND	12,94	1,059	6,956	5,872	6,671	570,2	94,65	5,35
3 - GEN	12,67	1,090	8,340	6,125	7,003	568,5	94,83	5,17
3 – MID	12,81	1,068	8,078	6,375	6,997	568,9	95,37	4,63
3 - GND	13,06	1,077	7,614	6,148	6,862	568,8	95,16	4,84
4 - GEN	12,87	1,066	8,308	6,086	6,998	565,8	94,19	5,81
4 – MID	13,03	1,081	8,240	5,940	6,943	565,8	94,26	5,74
4 - GND	13,07	1,084	8,023	5,869	6,748	566,4	94,18	5,82
Χωρίς χειριστή	12,98	1,076	9,167	6,897	7,479	563,5	95,69	4,31
Με χειριστή (Αναφορά)	13,11	1,077	7,779	6,732	6,865	564,2	95,01	4,99

Πίνακας 4.21: Τιμές των δεικτών για τη γεννήτρια EM Test Dito για κάθε σενάριο μέτρησης – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Σενάριο μέτρησης	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_p (A)	Dev t_r (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 (%)
1 - GEN	0,0537	0,9888	40,27	0,4303	0,0125	0,0420	0,9286	0,0216	5,9990	1,3830	1,3110
1 – MID	0,0504	0,9903	39,66	0,0625	0,0129	0,2768	0,8137	0,0181	6,6290	0,6126	0,5238
1 - GND	0,0535	0,9892	42,59	0,0010	0,0009	0,9593	1,0820	0,2432	6,6890	0,8538	0,7583
2 - GEN	0,0512	0,9902	35,19	0,4657	0,0032	0,0899	0,7105	0,0256	5,1030	0,8522	0,7920
2 – MID	0,0450	0,9921	32,15	0,2011	0,0112	0,1985	0,5459	0,0405	5,3900	0,2266	0,1509
2 - GND	0,0479	0,9911	34,90	0,1721	0,0172	0,8226	0,8592	0,1943	6,0430	0,3611	0,2776
3 - GEN	0,0468	0,9922	31,81	0,4350	0,0139	0,5609	0,6062	0,1380	4,3370	0,1833	0,1397
3 – MID	0,0405	0,9938	29,03	0,2954	0,0085	0,2998	0,3564	0,1324	4,7010	0,3621	0,4152
3 - GND	0,0401	0,9938	27,95	0,0511	0,0000	0,1642	0,5839	0,0132	4,6640	0,1448	0,2051
4 - GEN	0,0525	0,9895	45,12	0,2419	0,0106	0,5291	0,6458	0,1328	1,6350	0,8244	0,7054
4 – MID	0,0523	0,9898	47,52	0,0786	0,0044	0,4615	0,7920	0,0781	1,6650	0,7472	0,6120
4 - GND	0,0524	0,9899	47,46	0,0383	0,0077	0,2441	0,8630	0,1171	2,2150	0,8343	0,7008
Χωρίς χειριστή	0,0490	0,9916	33,55	0,1284	0,0005	1,3890	0,1648	0,6135	0,6681	0,6819	0,7619

Η κυματομορφή χωρίς χειριστή κατατάσσεται έβδομη συνολικά, γεγονός που δείχνει ότι σε ορισμένες παραμέτρους η ανθρώπινη επίδραση είναι περιορισμένη, ενώ σε άλλες η χρήση φερρίτη αρπάγης επιτυγχάνει σαφώς καλύτερη προσομοίωση. Συνολικά, για τη συγκεκριμένη γεννήτρια, οι φερρίτες αρπάγης αποδεικνύονται αποτελεσματικότεροι από την περίπτωση χωρίς χειριστή, επιβεβαιώνοντας ότι η προτεινόμενη προσέγγιση προσφέρει μία αναπαραγωγίσιμη λύση, μέσω της επιλογής κατάλληλου φερρίτη αρπάγης, για την προσομοίωση του φαινομένου της ανθρώπινης επίδρασης στις κυματομορφές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

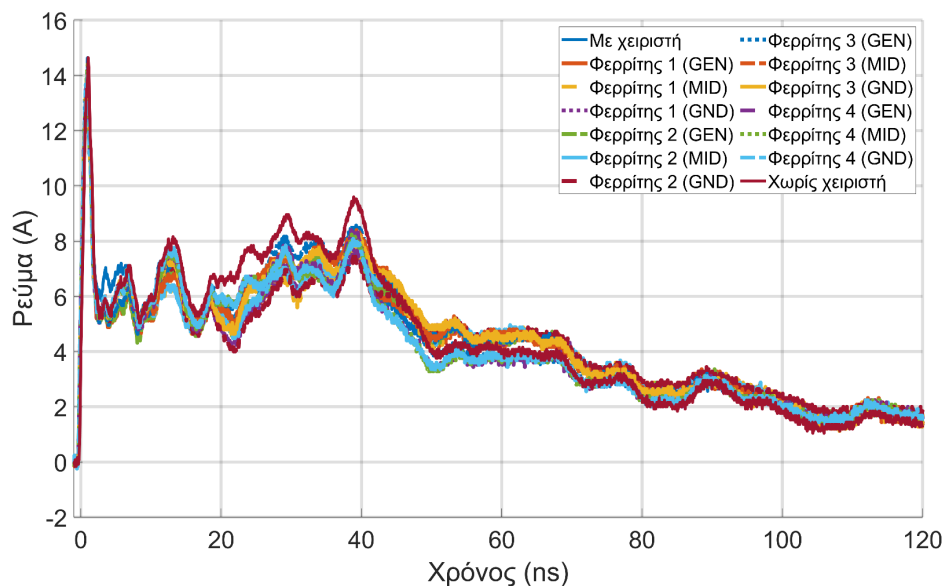
Πίνακας 4.22: Κατάταξη των 13 σεναρίων μέτρησης για τη γεννήτρια EM Test Dito – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Σενάριο μέτρησης	Κατάταξη											Τελική κατάταξη
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I _p (A)	Dev t _r (ns)	Dev I _{p2} (A)	Dev I ₃₀ (A)	Dev I ₆₀ (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)	
1 - GEN	13	13	9	11	10	1	12	3	10	13	13	11
1 – MID	7	7	8	4	11	6	9	2	12	6	6	5
1 - GND	12	12	10	1	7	12	13	12	13	12	10	13
2 - GEN	8	8	7	13	3	2	7	4	8	11	12	6
2 – MID	3	4	4	8	9	4	3	5	9	3	2	2
2 - GND	5	6	6	7	13	11	10	11	11	4	4	10
3 - GEN	4	3	3	12	12	10	5	10	5	2	1	4
3 – MID	2	1	2	10	6	7	2	8	7	5	6	3
3 - GND	1	2	1	3	1	3	4	1	6	1	3	1
4 - GEN	11	11	11	9	8	9	6	9	2	9	9	12
4 – MID	9	10	13	5	4	8	8	6	3	8	7	8
4 - GND	10	9	12	2	5	5	11	7	4	10	8	9
Χωρίς χειριστή	6	5	5	6	2	13	1	13	1	7	11	7

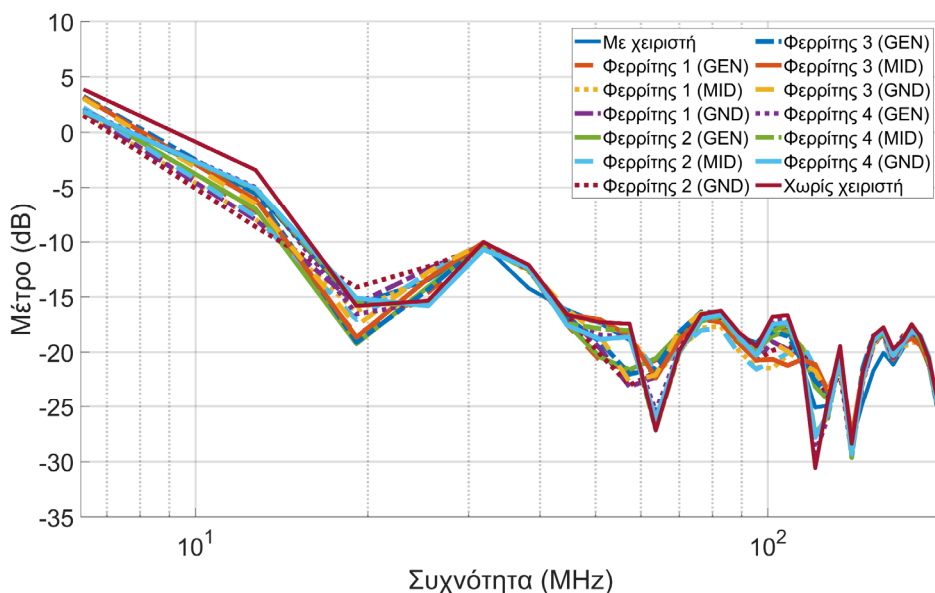
Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, με στόχο να διερευνηθεί κατά πόσο οι προηγούμενες παρατηρήσεις επαληθεύονται και σε γεννήτριες με εγγενώς λιγότερο ταλαντωτικό χαρακτήρα και μειωμένο φασματικό περιεχόμενο στις χαμηλές συχνότητες (<20 MHz), όπως έχει ήδη διαπιστωθεί για τη συγκεκριμένη γεννήτρια. Τα αποτελέσματα παρατίθενται συνοπτικά και σχολιάζονται συγκριτικά ως προς τη γεννήτρια EM Test Dito.

4.2.3.3. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – 1η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Στη διάταξη διακρίβωσης με τη γεννήτρια Teseq NSG 438 καταγράφονται συνολικά μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ της κυματομορφής με χειριστή και της κυματομορφής χωρίς χειριστή, συγκριτικά με τη γεννήτρια EM Test Dito, επιβεβαιώνοντας και τις παρατηρήσεις της Ενότητας 4.1. Στο διάστημα 7 – 40 ns, η κυματομορφή χωρίς χειριστή εμφανίζει υψηλότερες τιμές, ενώ οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στο σκέλος της δεύτερης αιχμής. Στην πρώτη αιχμή, ούτε η ανθρώπινη παρουσία ούτε οι φερρίτες αρπάγης επιφέρουν ουσιαστική επίδραση, γεγονός που συνάδει με τα αποτελέσματα των λοιπών γεννητριών.



Σχήμα 4.20: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για τη γεννήτρια Teseq NSG 438: με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)



Σχήμα 4.21: Σύγκριση φάσματος για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Στις χρονικές περιοχές όπου η παρουσία του χειριστή προκαλεί μείωση του πλάτους, όπως στο διάστημα 40 – 80 ns, ο φερρίτης αρπάγης με P.N. 0475181651 αναδεικνύεται σταθερά ως βέλτιστη επιλογή, παρουσιάζοντας υψηλή προσαρμογή ανεξαρτήτως θέσης. Η φασματική ανάλυση αναδεικνύει πιο έντονες διαφοροποιήσεις έναντι της γεννήτριας EM Test Dito. Στο φάσμα έως 20 MHz, όλοι οι φερρίτες επιφέρουν εξασθένηση παρόμοια με εκείνη που προκαλεί ο χειριστής, ενώ στο εύρος 115 – 130 MHz παρατηρείται ενίσχυση λόγω ανθρώπινης παρουσίας, με τους περισσότερους φερρίτες να εμφανίζουν υπερβολική ενίσχυση. Στα υπόλοιπα διαστήματα, η προσαρμογή κρίνεται ικανοποιητική.

Η σύγκριση των παραμέτρων επιβεβαιώνει εξαιρετικά χαμηλές αποκλίσεις στις παραμέτρους I_p και t_r . Αντιθέτως, οι παράμετροι I_{P2} , I_{30} και I_{60} εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά, αν και συχνά οι αποκλίσεις

περιορίζονται κάτω από 2 %, γεγονός που τεκμηριώνει τη δυνατότητα συγκεκριμένων φερριτών να προσομοιώνουν ικανοποιητικά την ανθρώπινη επίδραση.

Πίνακας 4.23: Τιμές παραμέτρων μέσω κυματομορφών για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 για κάθε σενάριο μέτρησης – 1η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Σενάριο μέτρησης	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}	Φορτίο	Φάσμα 6,25-200MHz	Φάσμα 200MHz -1GHz
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]	[nC]	[%]	[%]
1 - GEN	14,34	0,8777	8,016	7,235	4,470	567,6	90,85	9,15
1 – MID	14,22	0,8544	7,744	6,407	4,642	565,0	90,58	9,42
1 - GND	14,14	0,8586	7,648	6,803	4,449	564,3	91,03	8,97
2 - GEN	14,26	0,8592	8,208	7,333	4,420	566,7	91,17	8,83
2 – MID	14,21	0,8650	8,064	6,675	4,724	568,8	91,26	8,74
2 - GND	14,19	0,8522	7,424	6,528	4,564	568,3	90,40	9,60
3 - GEN	14,16	0,8487	8,624	7,874	4,422	566,3	92,66	7,34
3 – MID	14,26	0,8785	8,464	7,335	4,718	566,8	92,50	7,50
3 - GND	14,27	0,8492	8,384	7,520	4,573	571,4	92,38	7,62
4 - GEN	14,16	0,8568	8,352	7,624	3,692	546,3	91,55	8,45
4 – MID	14,34	0,8696	8,240	7,420	3,830	546,9	91,37	8,63
4 - GND	14,19	0,8512	8,080	7,430	3,840	547,1	91,48	8,52
Χωρίς χειριστή	14,54	0,9099	9,504	8,748	4,137	567,4	93,73	6,27
Με χειριστή (Αναφορά)	14,42	0,8708	7,568	7,205	3,684	552,2	91,27	8,73

Πίνακας 4.24: Τιμές των δεικτών για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 για κάθε σενάριο μέτρησης – 1^η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Σενάριο μέτρησης	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_P (A)	Dev t_r (ns)	Dev I_{P2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)
1 - GEN	0,0334	0,9938	29,00	0,0800	0,0069	0,4480	0,0295	0,7861	15,4200	0,4136	0,4203
1 – MID	0,0348	0,9932	26,72	0,1920	0,0165	0,1760	0,7980	0,9582	12,7900	0,6821	0,6595
1 - GND	0,0343	0,9938	23,79	0,2720	0,0122	0,0800	0,4024	0,7660	12,0600	0,2369	0,2449
2 - GEN	0,0354	0,9934	29,69	0,1600	0,0117	0,6400	0,1278	0,7360	14,4900	0,0917	0,1105
2 – MID	0,0378	0,9927	25,48	0,2080	0,0058	0,4960	0,5296	1,0400	16,6000	0,0047	0,0023
2 - GND	0,0387	0,9917	25,71	0,2240	0,0186	0,1440	0,6773	0,8804	16,1100	0,8653	0,8599
3 - GEN	0,0405	0,9935	33,18	0,2560	0,0221	1,0560	0,6692	0,7388	14,1200	1,3920	1,3350
3 – MID	0,0391	0,9935	28,35	0,1600	0,0076	0,8960	0,1302	1,0340	14,5900	1,2350	1,2080
3 - GND	0,0387	0,9939	27,52	0,1440	0,0216	0,8160	0,3153	0,8894	19,1800	1,1160	1,0750
4 - GEN	0,0206	0,9978	21,18	0,2560	0,0140	0,7840	0,4186	0,0085	5,8960	0,2798	0,2420
4 – MID	0,0180	0,9981	19,06	0,0800	0,0012	0,6720	0,2153	0,1468	5,3030	0,1031	0,0728
4 - GND	0,0182	0,9983	19,36	0,2240	0,0197	0,5120	0,2252	0,1561	5,0980	0,2107	0,1778
Χωρίς χειριστή	0,0420	0,9932	36,43	0,1280	0,0391	1,9360	1,5430	0,4331	15,2300	2,4670	2,3810

Πίνακας 4.25: Κατάταξη των 13 σεναρίων μέτρησης για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 – 1η διάταξη μέτρησης (διακρίβωση)

Σενάριο μέτρησης	Κατάταξη											Τελική κατάταξη
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I _p (A)	Dev t _r (ns)	Dev I _{p2} (A)	Dev I ₃₀ (A)	Dev I ₆₀ (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)	
1 - GEN	4	5	10	2	3	4	1	8	10	7	7	5
1 – MID	6	10	7	7	8	3	12	11	5	8	8	8
1 - GND	5	6	4	13	6	1	7	7	4	5	6	4
2 - GEN	7	9	11	5.5	5	7	2	5	7	2	3	6
2 – MID	8	12	5	8	2	5	9	13	12	1	1	7
2 - GND	10	13	6	10	9	2	11	9	11	9	9	10
3 - GEN	12	7	12	11	12	12	10	6	6	12	12	12
3 – MID	11	8	9	5.5	4	11	3	12	8	11	11	11
3 - GND	9	4	8	4	11	10	6	10	13	10	10	9
4 - GEN	3	3	3	12	7	9	8	1	3	6	5	3
4 – MID	1	2	1	1	1	8	4	2	2	3	2	1
4 - GND	2	1	2	9	10	6	5	3	1	4	4	2
Χωρίς χειριστή	13	11	13	3	13	13	13	4	9	13	13	13

Η ανάλυση της κατανομής των δεικτών και της τελικής κατάταξης αποκαλύπτει μικρότερη διασπορά στις θέσεις των φερριτών έναντι της γεννήτριας EM Test Dito, υποδηλώνοντας υψηλότερη συνέπεια στα αποτελέσματα. Ο φερρίτης αρπάγης με P.N. 0475181651, ειδικά στη θέση MID, ξεχωρίζει ως βέλτιστη επιλογή, καταλαμβάνοντας σταθερά κορυφαίες θέσεις και αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά του στην προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης.

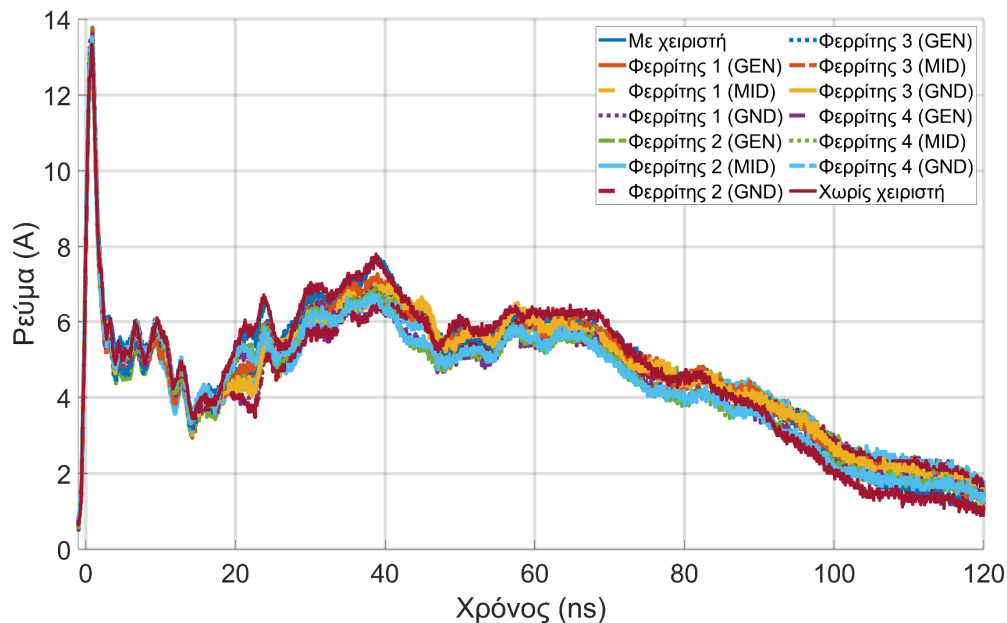
Αντιθέτως, η κυματομορφή χωρίς χειριστή κατατάσσεται σταθερά στην τελευταία θέση, επιβεβαιώνοντας ότι στη γεννήτρια NSG 438 η χρήση φερριτών αρπάγης προσφέρει σαφώς καλύτερη προσομοίωση. Τέλος, η θέση τοποθέτησης εξακολουθεί να επηρεάζει τη συμπεριφορά κάθε φερρίτη, χωρίς όμως να αναδεικνύεται μονοσήμαντο πρότυπο υπεροχής συγκεκριμένης θέσης.

4.2.3.4. Γεννήτρια Teseq NSG 438 – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

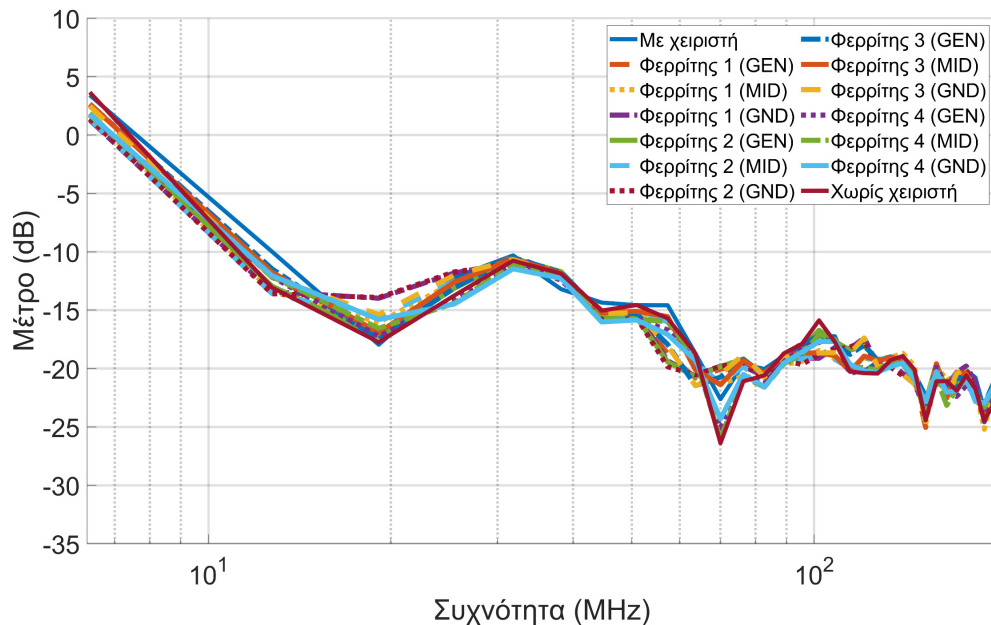
Στη διάταξη δοκιμών με τη γεννήτρια Teseq NSG 438 παρατηρείται μικρότερη επίδραση του χειριστή στην κυματομορφή συγκριτικά με τη γεννήτρια EM Test DITO, γεγονός που αποδίδεται στον ηπιότερο, λιγότερο ταλαντωτικό χαρακτήρα και στο περιορισμένο φασματικό περιεχόμενο χαμηλών συχνοτήτων της NSG 438.

Το διάστημα 20 – 45 ns παρουσιάζει σχεδόν πλήρη ταύτιση της κυματομορφής αναφοράς με εκείνη χωρίς χειριστή, στοιχείο που θέτει υπό αμφισβήτηση τη σκοπιμότητα χρήσης φερριτών για τη συγκεκριμένη γεννήτρια. Ούτε ο χειριστής ούτε οι φερρίτες επηρεάζουν ουσιαστικά την πρώτη αιχμή, ενώ η ενίσχυση στο διάστημα 2 – 6 ns, που εμφανίζεται εντονότερη σε άλλες γεννήτριες, εδώ καταγράφεται σαφώς μειωμένη. Αντίθετα, οι φερρίτες σε περιοχές όπως 20 – 45 ns επιφέρουν ήπια εξασθένηση της κυματομορφής, αν και οι μεταβολές παραμένουν περιορισμένες σε ένταση.

Στο διάστημα 45 – 90 ns, οι αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων περιορίζονται, χωρίς να προκύπτει σαφής βέλτιστος φερρίτης, ενώ στο σκέλος της δεύτερης αιχμής παρατηρείται γενικευμένη ενίσχυση από όλους τους φερρίτες, υπερβαίνοντας την ενίσχυση που προκαλεί η ανθρώπινη παρουσία, στοιχείο που ενδεχομένως υποδηλώνει υπεραντισταθμιστική συμπεριφορά.



Σχήμα 4.22: Σύγκριση κυματομορφών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για τη γεννήτρια Teseq NSG 438: με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)



Σχήμα 4.23: Σύγκριση φάσματος για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, με φερρίτες, με χειριστή και χωρίς χειριστή για την 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Πίνακας 4.26: Τιμές παραμέτρων μέσω κυματομορφών για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 για κάθε σενάριο μέτρησης – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Σενάριο μέτρησης	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}	Φορτίο	Φάσμα 6,25-200MHz	Φάσμα 200MHz -1GHz
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]		[%]	[%]
1 - GEN	13,49	1,071	7,072	6,405	6,136	603,9	93,04	6,99
1 – MID	13,54	1,095	6,904	5,894	5,967	600,2	92,35	7,65
1 - GND	13,53	1,097	6,520	5,708	5,991	600,7	91,86	8,14
2 - GEN	13,41	1,078	6,850	6,125	5,984	602,5	92,49	7,51
2 – MID	13,47	1,057	6,794	5,638	5,882	601,3	91,92	8,08
2 - GND	13,29	1,081	6,500	5,575	5,968	593,7	92,10	7,90
3 - GEN	13,41	1,105	7,132	6,344	6,202	601,1	93,50	6,5
3 – MID	13,36	1,109	7,282	6,103	6,072	599,1	93,57	6,43
3 - GND	13,32	1,093	6,997	5,966	6,100	596,8	93,46	6,54
4 - GEN	13,43	1,084	6,987	6,016	5,495	578,3	92,37	6,63
4 – MID	13,33	1,133	6,952	5,916	5,548	576,5	92,31	6,69
4 - GND	13,43	1,096	6,862	5,982	5,576	579,3	92,16	6,84
Χωρίς χειριστή	13,25	1,058	7,812	6,775	6,165	601,6	94,34	5,66
Με χειριστή (Αναφορά)	13,70	1,053	7,732	6,522	6,001	600,1	94,30	5,70

Πίνακας 4.27: Τιμές των δεικτών για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 για κάθε σενάριο μέτρησης – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Σενάριο μέτρησης	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_P (A)	Dev t_r (ns)	Dev I_{P2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)
1 - GEN	0,0266	0,9969	21,8000	0,2074	0,0181	0,6602	0,1177	0,1350	3,8170	1,2580	1,1510
1 – MID	0,0331	0,9953	25,3200	0,1632	0,0422	0,8274	0,6281	0,0345	0,0583	1,9510	1,8100
1 - GND	0,0422	0,9923	34,0200	0,1705	0,0437	1,2120	0,8148	0,0102	0,6023	2,4380	2,3030
2 - GEN	0,0346	0,9946	26,4600	0,2901	0,0250	0,8814	0,3977	0,0170	2,4380	1,8070	1,6750
2 – MID	0,0387	0,9934	28,0000	0,2335	0,0035	0,9378	0,8840	0,1197	1,2290	2,3830	2,2290
2 - GND	0,0401	0,9928	27,7400	0,4140	0,0280	1,2320	0,9476	0,0332	6,3730	2,2000	2,0680
3 - GEN	0,0229	0,9978	20,6500	0,2947	0,0520	0,6001	0,1784	0,2008	1,0380	0,7977	0,7135
3 – MID	0,0205	0,9981	17,7400	0,3422	0,0556	0,4496	0,4198	0,0710	1,0130	0,7298	0,6496
3 - GND	0,0261	0,9969	20,4700	0,3852	0,0399	0,7344	0,5563	0,0993	3,3310	0,8458	0,7771
4 - GEN	0,0304	0,9969	35,7200	0,2722	0,0312	0,7442	0,5062	0,5061	21,8400	1,9330	1,8070
4 – MID	0,0316	0,9964	36,7100	0,3732	0,0799	0,7794	0,6068	0,4527	23,6200	1,9920	1,8590
4 - GND	0,0332	0,9962	38,0400	0,2079	0,0433	0,8699	0,5406	0,4253	20,8000	2,1420	2,0060
Χωρίς χειριστή	0,0220	0,9986	20,3300	0,4529	0,0051	0,0800	0,2521	0,1639	1,5000	0,0426	0,0259

Πίνακας 4.28: Κατάταξη των 13 σεναρίων μέτρησης για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 – 2^η διάταξη μέτρησης (δοκιμή ατρωσίας)

Σενάριο μέτρησης	Κατάταξη											Τελική κατάταξη
	RMSE	Cross-correlation	DTW	Dev I_p (A)	Dev t_r (ns)	Dev I_{p2} (A)	Dev I_{30} (A)	Dev I_{60} (A)	Dev Total Energy (nC)	Dev spectrum 6,25 -200MHz (%)	Dev spectrum 0,2 -1GHz (%)	
1 - GEN	5	5	5	3	3	4	1	8	9	5	5	4
1 - MID	8	9	6	1	8	8	10	4	1	8	8	7
1 - GND	13	13	10	2	10	12	11	1	2	13	13	11
2 - GEN	10	10	7	7	4	10	4	2	7	6	6	6
2 - MID	11	11	9	5	1	11	12	7	5	12	12	12
2 - GND	12	12	8	12	5	13	13	3	10	11	11	13
3 - GEN	3	3	4	8	11	3	2	10	4	3	3	3
3 - MID	1	2	1	9	12	2	5	5	3	2	2	1
3 - GND	4	4	3	11	7	5	8	6	8	4	4	5
4 - GEN	6	6	11	6	6	6	6	13	12	7	7	8
4 - MID	7	7	12	10	13	7	9	12	13	9	9	10
4 - GND	9	8	13	4	9	9	7	11	11	10	10	9
Χωρίς χειριστή	2	1	2	13	2	1	3	9	6	1	1	2

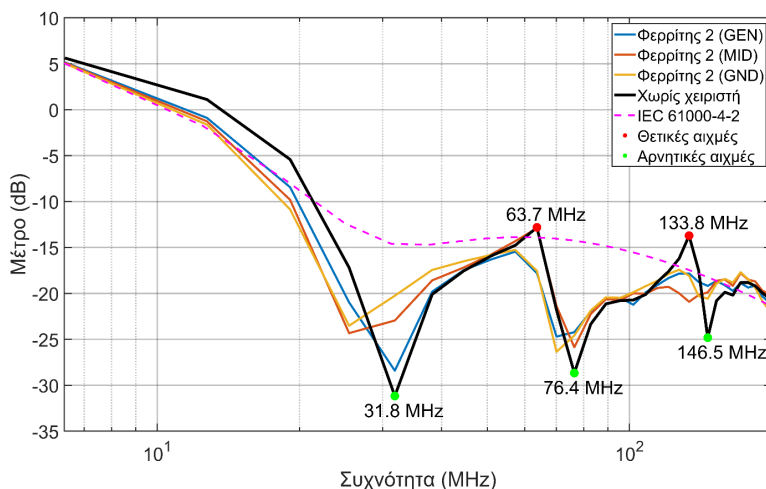
Φασματικά, οι παρατηρήσεις μοιάζουν με εκείνες της EM Test DITO. Στο εύρος 1 – 15 MHz, η παρουσία του χειριστή προκαλεί ήπια ενίσχυση, ενώ οι φερρίτες εμφανίζουν ανομοιογενή συμπεριφορά, με τάσεις εξασθένησης κάτω των 8 MHz και ήπιας ενίσχυσης σε υψηλότερες συχνότητες, ειδικά από τον φερρίτη με P.N. 0461164951. Στο εύρος 15 – 40 MHz, οι διαφοροποιήσεις παραμένουν μικρές, χωρίς κανέναν φερρίτη να προσομοιώνει πλήρως τη μορφολογία της κυματομορφής αναφοράς. Στο διάστημα 40 – 70 MHz, η κυματομορφή αναφοράς χαρακτηρίζεται από ομαλή εξασθένηση, σε αντίθεση με τις ταλαντώσεις και τις αυξημένες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στα φάσματα των φερριτών. Στις υψηλότερες συχνότητες, οι μορφές συγκλίνουν, αν και μικρές διαφορές παραμένουν.

Οι αποκλίσεις στις παραμέτρους I_p και t_r παραμένουν περιορισμένες και χαμηλές, ενώ οι παράμετροι I_{p2} , I_{30} και I_{60} εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά, αν και συχνά οι αποκλίσεις περιορίζονται κάτω από 5 %, τεκμηριώνοντας τη δυνατότητα συγκεκριμένων φερριτών να προσομοιώνουν ικανοποιητικά την ανθρώπινη επίδραση. Η ανάλυση της τελικής κατάταξης αποκαλύπτει ηπιότερες διακυμάνσεις μεταξύ των θέσεων τοποθέτησης των φερριτών σε σχέση με τη γεννήτρια DITO. Ο φερρίτης με P.N. 0461164951 στη θέση MID ξεχωρίζει ως η βέλτιστη επιλογή, ενώ η κυματομορφή χωρίς χειριστή κατατάσσεται συχνά σε υψηλές θέσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει τη μικρότερη επίδραση της ανθρώπινης παρουσίας στη γεννήτρια Teseq NSG 438.

Συνολικά, προκύπτει ότι σε γεννήτριες με πιο έντονο ταλαντωτικό χαρακτήρα και σημαντικό χαμηλόσυχο φασματικό περιεχόμενο, η προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορίζει με μεγαλύτερη αξιοπιστία την ιδανικότερη λύση φερρίτη. Αντιθέτως, σε γεννήτριες με περιορισμένες επιδράσεις από τον χειριστή, η μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην κατάταξη και τα αποτελέσματα καθίστανται λιγότερο σταθερά, υποδηλώνοντας ότι η ανάγκη προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης μέσω φερριτών εξαρτάται σημαντικά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας.

4.2.4. Επίδραση της θέσης τοποθέτησης του φερρίτη στην Κυματομορφή ESD

Τα αποτελέσματα των Πινάκων της Ενότητας 4.2.3, σε συνδυασμό με τη μεγεθυμένη απεικόνιση του φάσματος συχνοτήτων στην περιοχή 6,25 MHz έως 200 MHz (βλ. Σχήμα 4.24) για τη γεννήτρια EM Test Dito στη διάταξη διακρίβωσης, καταδεικνύουν με σαφήνεια τη σημαντική επίδραση της θέσης τοποθέτησης του φερρίτη στη μορφή της τελικής κυματομορφής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

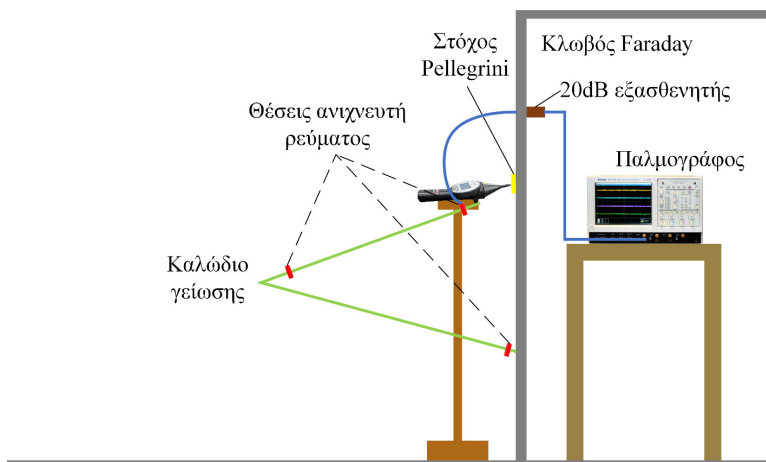


Σχήμα 4.24: Μεγεθυμένη απεικόνιση του φάσματος 6,25 MHz - 200 MHz για τις τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του φερρίτη για τη γεννήτρια EM Test Dito στη διάταξη διακρίβωσης

4.2.4.1. Πειραματική διερεύνηση της θέσης τοποθέτησης

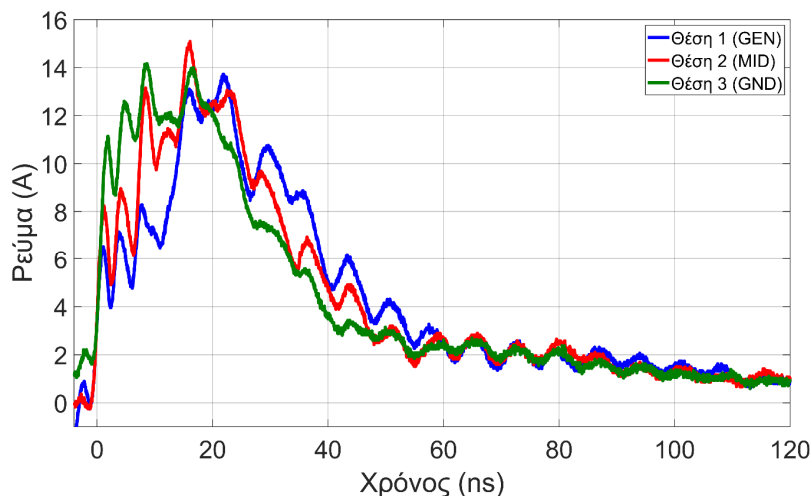
Για την κατανόηση αυτής της εξάρτησης, σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη, στην οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη γεννήτρια EM Test Dito, χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή ρεύματος FCC F-65 και εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 2.1.

Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε διαδοχικά στις τρεις χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του καλωδίου γείωσης (Θέση 1 (GEN), Θέση 2 (MID), Θέση 3 (GND)), χωρίς φερρίτες τοποθετημένους πάνω στο καλώδιο. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 4.25.

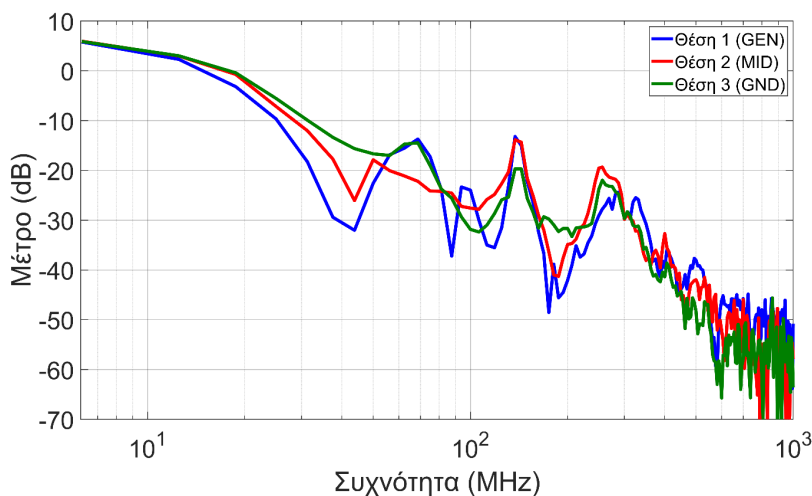


Σχήμα 4.25: Πειραματική διάταξη μέτρησης ρεύματος χωρίς την παρουσία φερριτών για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, όπως αποτυπώνονται στα Σχήματα 4.26 και 4.27, κατέδειξαν με σαφήνεια ότι τόσο η μορφή της κυματομορφής του ρεύματος όσο και το φάσμα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τη θέση μέτρησης κατά μήκος του καλωδίου γείωσης. Η διακύμανση αυτή καθίσταται ιδιαίτερα έντονη για συχνότητες άνω των 15 MHz, όπου οι αποκλίσεις στο φάσμα δύνανται να υπερβαίνουν αρκετά dB μεταξύ των επιμέρους θέσεων. Η παρατηρούμενη διαφοροποίηση τεκμηριώνει ότι κάθε σημείο του καλωδίου χαρακτηρίζεται από διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες, γεγονός το οποίο έχει καθοριστική σημασία για τον τρόπο με τον οποίο θα δράσει τοπικά ένας φερρίτης αρπάγης.



Σχήμα 4.26: Κυματομορφές ρεύματος χωρίς την παρουσία φερριτών για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του ανιχνευτή ρεύματος



Σχήμα 4.27: Φάσμα κυματομορφών ρεύματος χωρίς την παρουσία φερριτών για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις τοποθέτησης του ανιχνευτή ρεύματος

4.2.4.2. Μηχανισμός δημιουργίας στάσιμων κυμάτων και συντονισμών

Η κύρια αιτία των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ των θέσεων μέτρησης αποδίδεται στο σχηματισμό στάσιμων κυμάτων και στην εμφάνιση φαινομένων συντονισμού κατά μήκος του καλωδίου γείωσης. Κατά τη διάδοση ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά μήκος του καλωδίου,

σημειώνονται ανακλάσεις στα φυσικά άκρα του συστήματος, δηλαδή αφενός στη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και αφετέρου στο σημείο σύνδεσης του καλωδίου με το εκάστοτε επίπεδο γείωσης κάθε διάταξης (η κάθετη μεταλλική πλάκα στην οποία έχει εγκατασταθεί ο ομοαξονικός προσαρμογέας (ανιχνευτής) μέτρησης ρεύματος για την περίπτωση της διάταξης διακρίβωσης). Η υπέρθεση των προσπιπτόντων και ανακλώμενων κυματομορφών οδηγεί στο σχηματισμό στάσιμων κυμάτων, η γεωμετρία των οποίων εξαρτάται τόσο από το μήκος κύματος της διεγερόμενης συχνότητας όσο και από το μήκος του καλωδίου.

Η ανάλυση των στάσιμων κυμάτων αναδεικνύει δύο θεμελιώδεις έννοιες:

- Δεσμοί (Nodes): Σημεία κατά μήκος του καλωδίου όπου το ρεύμα λαμβάνει ελάχιστη τιμή, ενώ η σύνθετη αντίσταση μεγιστοποιείται. Τα σημεία αυτά προσομοιώνουν συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, καθώς η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη κυματομορφή βρίσκονται σε φάση αλληλεξουδετέρωσης.
- Κοιλίες (Antinodes): Σημεία όπου το ρεύμα παρουσιάζει μέγιστη τιμή και η σύνθετη αντίσταση ελαχιστοποιείται, προσομοιώνοντας συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Η απόσταση μεταξύ ενός δεσμού και μίας κοιλίας ισούται με το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος της διεγερόμενης συχνότητας και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$|x_{node} - x_{antinode}| = \frac{\lambda}{4} = \frac{c \cdot VF}{4 \cdot f_{res}} = L \quad (36)$$

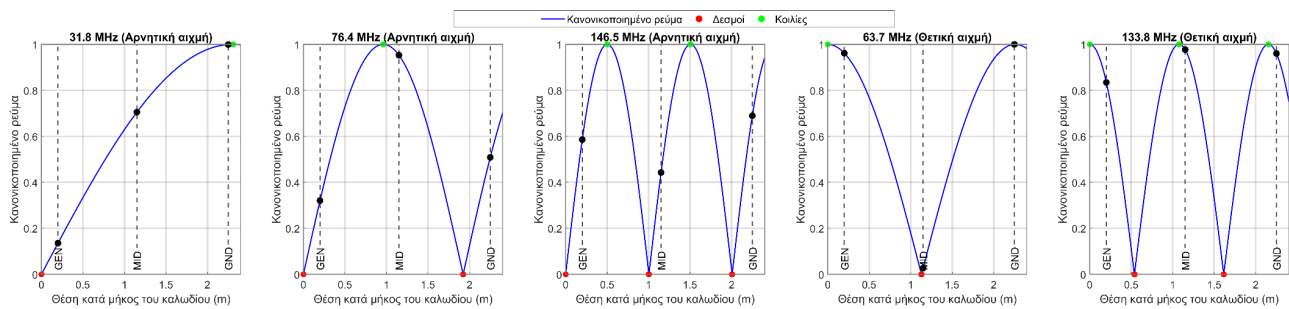
όπου: c είναι η ταχύτητα του φωτός, VF ο συντελεστής ταχύτητας (Velocity Factor), f_{res} η συχνότητα συντονισμού και λ το μήκος κύματος.

Η ανάλυση των κορυφών του φάσματος στο Σχήμα 4.24 αποκάλυψε την παρουσία διαφόρων συχνοτήτων συντονισμού, οι οποίες ταξινομήθηκαν είτε ως δεσμοί είτε ως κοιλίες. Οι συχνότητες αυτές υποδηλώνουν ότι το σημείο μέτρησης, δηλαδή ο στόχος Pellegrini, βρίσκεται πλησίον δεσμού ή κοιλίας για τη συγκεκριμένη διεγερόμενη συχνότητα. Για κάθε συχνότητα συντονισμού που εντοπίζεται, η κατανομή του κανονικοποιημένου ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου περιγράφεται ως συνημιτονοειδής συνάρτηση της θέσης:

$$I(x) \propto \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (37)$$

Η εξίσωση αυτή αποτυπώνει το φαινόμενο σχηματισμού δεσμών, δηλαδή σημείων ελάχιστης έντασης ρεύματος και μέγιστης σύνθετης αντίστασης, καθώς και κοιλιών, δηλαδή σημείων μέγιστης έντασης ρεύματος και ελάχιστης σύνθετης αντίστασης. Η συμπεριφορά αυτή είναι καθοριστική για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η θέση τοποθέτησης του φερρίτη αρπάγης επηρεάζει τη συμπεριφορά του ρεύματος, δεδομένου ότι η απορρόφηση ισχύος από τον φερρίτη είναι ανάλογη του τετραγώνου της έντασης του μαγνητικού πεδίου που τον διαρρέει.

Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.28, όπου παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη κατανομή του ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου. Οι κόκκινες ενδείξεις αναπαριστούν δεσμούς (χαμηλή ένταση ρεύματος), οι πράσινες κοιλίες (υψηλή ένταση ρεύματος), ενώ οι μαύρες κουκκίδες σημειώνουν τις θέσεις τοποθέτησης των φερριτών κατά τα πειράματα.



Σχήμα 4.28: Κανονικοποιημένη κατανομή του ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου γείωσης

4.2.4.3. Επίδραση της θέσης τοποθέτησης στην αποτελεσματικότητα του φερρίτη

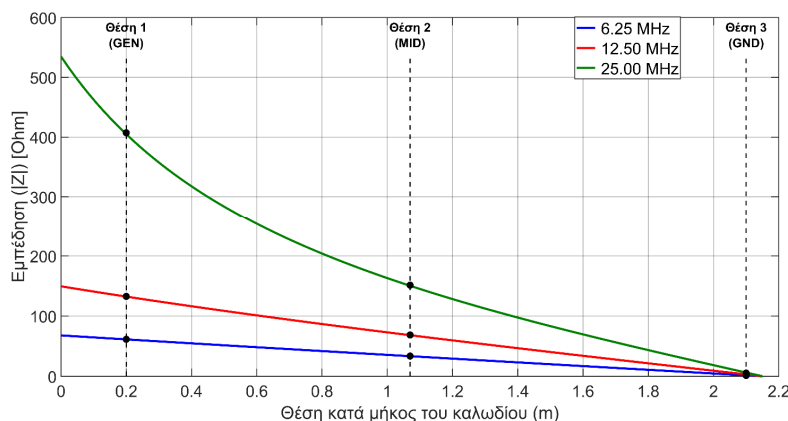
Η θέση τοποθέτησης του φερρίτη αρπάγης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητά του, καθώς η απορρόφηση ενέργειας εξαρτάται άμεσα από το πλάτος του τοπικού μαγνητικού πεδίου. Ο φερρίτης δρα πολύ πιο αποτελεσματικά όταν τοποθετείται σε περιοχές κοιλιών, όπου η ένταση του ρεύματος – και συνεπώς και του μαγνητικού πεδίου – είναι μέγιστη. Δεδομένου ότι η ισχύς που απορροφά ο φερρίτης αυξάνεται με το τετράγωνο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, η τοποθέτησή του σε θέσεις μέγιστης ροής εξασφαλίζει μεγαλύτερη εξασθένηση ανεπιθύμητων ταλαντώσεων.

Πέραν της απλής εξασθένησης, η παρουσία του φερρίτη στις κοιλίες οδηγεί σε τοπική αύξηση της σύνθετης αντίστασης, μειώνοντας τον συντελεστή ανάκλασης. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της έντασης των στάσιμων κυμάτων, περιορίζοντας την ανάπτυξη υπερβολικών ταλαντώσεων που ενδέχεται να αλλοιώσουν σημαντικά την κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Χαρακτηριστικό είναι το εύρημα ότι η πρώτη θεωρητικά αναμενόμενη συχνότητα συντονισμού, η οποία υπολογίζεται στα 33,5 MHz για καλώδιο μήκους 2,15 m, εμφανίζεται στην πράξη μετατοπισμένη γύρω στα 31,8 MHz. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι το σημείο έγχυσης του παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βρίσκεται εντός της γεννήτριας, αυξάνοντας έτσι το ηλεκτρικά ενεργό μήκος του καλωδίου.

4.2.4.4. Συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες

Η επίδραση της θέσης τοποθέτησης δεν περιορίζεται μόνο στις συχνότητες υψηλότερες της πρώτης συχνότητας συντονισμού. Στο Σχήμα 4.29 απεικονίζεται η διαφοροποίηση της σύνθετης αντίστασης ακόμη και για χαμηλότερες συχνότητες, συγκεκριμένα στις 6,25 MHz, 12,5 MHz και 25 MHz.



Σχήμα 4.29: Διαφοροποίηση της σύνθετης αντίστασης σε χαμηλές συχνότητες

Οι διαφοροποιήσεις οφείλονται στη μεταβολή της γραμμής μεταφοράς και περιγράφονται από την εξίσωση σύνθετης αντίστασης:

$$Z(x) = Z_0 \cdot \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta x)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta x)} \quad (38)$$

όπου: Z_0 είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής (περίπου 225 Ω) [93], Z_L είναι η αντίσταση φορτίου στο άκρο του καλωδίου (σχεδόν μηδενική αν συνδέεται σε μεταλλική πλάκα), $\beta = 2\pi/\lambda$, και $\tan(\beta x)$ είναι η εφαπτομένη που εκφράζει την περιοδική μεταβολή της σύνθετης αντίστασης

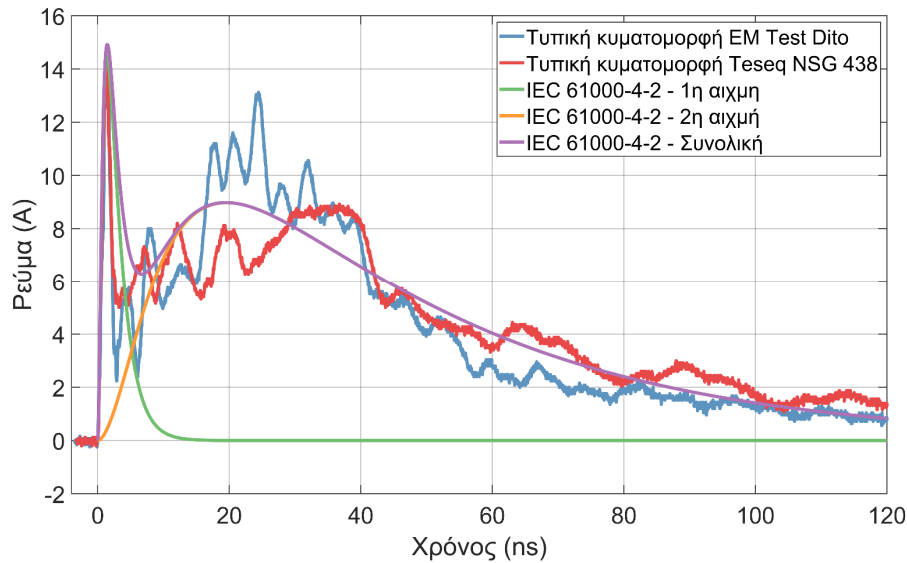
Η τοπική διακύμανση της σύνθετης αντίστασης επηρεάζει τον τρόπο διάδοσης του ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου, οδηγώντας σε επιλεκτική ενίσχυση ή εξασθένηση συγκεκριμένων περιοχών συχνοτήτων, ανάλογα με τη θέση μέτρησης. Ακόμη και όταν το φασματικό εύρος αυτών των συχνοτήτων δεν είναι εκτεταμένο, η συμβολή τους παραμένει καθοριστική στη συνολική διαμόρφωση της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Συνοψίζοντας, η ανάλυση της θέσης τοποθέτησης του φερρίτη αρπάγης ανέδειξε ότι η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό και τις φασματικές του ιδιότητες, αλλά και από το ακριβές σημείο εγκατάστασής του κατά μήκος του καλωδίου. Στις υψηλές συχνότητες, η τοποθέτηση του φερρίτη σε περιοχές κοιλιών μεγιστοποιεί την εξασθένηση, λόγω υψηλότερης τοπικής έντασης του μαγνητικού πεδίου. Αντίθετα, στα χαμηλότερα διαστήματα, όπως ανέδειξε το Σχήμα 4.29, η τοπική μεταβολή της σύνθετης αντίστασης υποδεικνύει ότι η τοποθέτηση του φερρίτη πλησιέστερα προς το επίπεδο αναφοράς γης είναι πιο αποτελεσματική για την εξασθένηση ανεπιθύμητων ταλαντώσεων. Το εύρημα αυτό συνδέεται άμεσα με τον βασικό στόχο της διατριβής, δηλαδή την προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή, καθώς η κατάλληλη τοποθέτηση του φερρίτη δύναται να καταστεί μέσο περιορισμού των φαινομένων που αλλοιώνουν την κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Συνεπώς, η επιλογή της θέσης τοποθέτησης δεν μπορεί να είναι τυχαία, αλλά πρέπει να στηρίζεται σε ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών κάθε διάταξης.

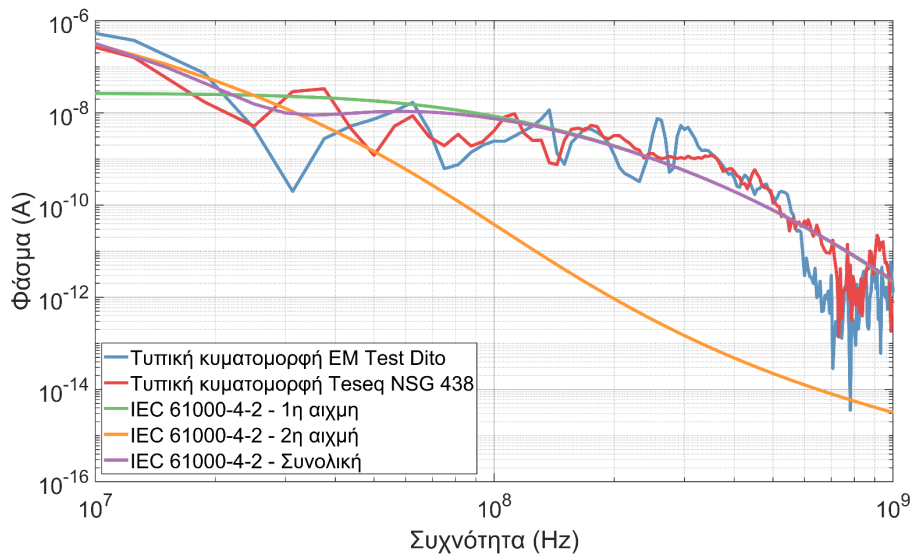
4.2.5. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων της ενότητας 4.2.3 προκύπτει ότι οι φερρίτες αρπάγης μπορούν να αξιοποιηθούν για την προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, προσφέροντας επαναλήψιμο και αναπαραγώγιμο αποτέλεσμα. Ωστόσο, δεν αναδείχθηκε κάποιος φερρίτης ως καθολικά βέλτιστη επιλογή για όλες τις γεννήτριες και συνθήκες μέτρησης, καθώς η απόδοσή του επηρεάζεται έντονα από το φασματικό περιεχόμενο και τον βαθμό ταλαντώσεων που χαρακτηρίζουν την κυματομορφή κάθε γεννήτριας, όπως τεκμηριώνεται στα Σχήματα 4.30 και 4.31.

Στις τέσσερις εξετασθείσες περιπτώσεις, διαφορετικός φερρίτης κατέλαβε την πρώτη θέση στην τελική κατάταξη. Ειδικότερα, για τη γεννήτρια EM Test DITO, τόσο στη διάταξη διακρίβωσης όσο και στη διάταξη δοκιμών, καθώς και για τη διάταξη δοκιμών με τη γεννήτρια Teseq NSG 438, καταλληλότερος αναδείχθηκε ο φερρίτης αρπάγης με υλικό 61. Αντιθέτως, στη διάταξη διακρίβωσης της NSG 438, καλύτερη επίδοση παρουσίασε ο φερρίτης με υλικό 75. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η επίδραση των φερριτών αρπάγης εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας και το φάσμα συχνοτήτων που αυτή παράγει.



Σχήμα 4.30: Σύγκριση κυματομορφών των γεννητριών EM Test Dito και Teseq NSG 438 με τις συνιστώσες της ιδανικής κυματομορφής του Προτύπου IEC 61000-4-2 για το επίπεδο +4 kV [27]



Σχήμα 4.31: Σύγκριση φασμάτων των γεννητριών EM Test Dito και Teseq NSG 438 με τις συνιστώσες της ιδανικής κυματομορφής του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]

4.2.5.1. Επίδραση των φερριτών στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Όλοι οι εξεταζόμενοι φερρίτες αρπάγης παρουσιάζουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι δεν επιδρούν ουσιαστικά στην πρώτη αιχμή της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο ως προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος (παράμετρος I_p) όσο και ως προς τον χρόνο ανόδου (παράμετρος t_r). Οι όποιες αποκλίσεις που καταγράφηκαν παραμένουν περιορισμένες και εντός των ορίων πειραματικής αβεβαιότητας.

Η κυριότερη επίδραση των φερριτών καταγράφεται στο σκέλος της δεύτερης αιχμής, δηλαδή στο διάστημα 10 – 40 ns, όπου παρατηρείται εξασθένηση του ρεύματος (παράμετρος I_{p2}), αντίστοιχη με εκείνη που προκαλεί η παρουσία του χειριστή. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη λειτουργία των

φερριτών ως φίλτρων που περιορίζουν παρασιτικές συνιστώσες, λόγω χωρητικότητων και επαγωγών στο κύκλωμα επιστροφής ρεύματος. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση διακρίβωσης με τη γεννήτρια EM Test Dito, όπου η παράμετρος I_{p2} υπερβαίνει τα όρια του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] όταν δεν υπάρχει χειριστής ή φερρίτης, αλλά επανέρχεται εντός προδιαγραφών με την παρουσία τους, γεγονός που αναδεικνύει τη συμβολή τους στη μείωση της διεργαστηριακής αναπαραγωγιμότητας. Παράλληλα, οι φερρίτες επηρεάζουν τις παραμέτρους I_{30} και I_{60} , οδηγώντας κατά κανόνα σε μείωση της παραμέτρου I_{30} , ενώ η I_{60} , στις περισσότερες περιπτώσεις, εμφανίζει αύξηση.

4.2.5.2. Σχόλια για τις φασματικές περιοχές επίδρασης των φερριτών

Στο φασματικό πεδίο, οι φερρίτες αρπάγης επιδρούν κυρίως στο εύρος 20 – 40 MHz, το οποίο συνδέεται με το σκέλος της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής. Η γεννήτρια EM Test Dito παρουσιάζει πιο έντονο φαινόμενο ταλαντώσεων και αυξημένο χαμηλόσυχο φασματικό περιεχόμενο, όπως προκύπτει και από τη σύγκριση του φάσματός της με εκείνο της ιδανικής κυματομορφής (Σχήμα 4.31). Αντιθέτως, η Teseq NSG 438 εμφανίζει ηπιότερη φασματική συμπεριφορά και περιορισμένο χαμηλόσυχο περιεχόμενο. Το γεγονός ότι η κυματομορφή χωρίς χειριστή κατατάσσεται συχνά σε υψηλές θέσεις, ιδίως με τη γεννήτρια Teseq NSG 438, δείχνει ότι σε συστήματα με μειωμένες ταλαντώσεις και μικρότερο φασματικό περιεχόμενο στις χαμηλές συχνότητες η επίδραση του χειριστή δεν είναι πάντοτε καθοριστική. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η χρήση φερρίτη αρπάγης απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση, καθώς μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες αποκλίσεις αντί να βελτιώσει την προσομοίωση.

Η συμπεριφορά των φερριτών ερμηνεύεται βάσει της σχέσης τους με τις χαμηλόσυχνες και τις υψίσυχνες ταλαντώσεις της κυματομορφής. Οι χαμηλόσυχνες ταλαντώσεις, που σχετίζονται με τη δεύτερη αιχμή, περιορίζονται σε συχνότητες έως περίπου 30 MHz, ενώ οι πιο υψίσυχνες ταλαντώσεις, διάρκειας 3 – 5 ns, εμφανίζονται σε περιοχές άνω των 200 MHz, όπως αποτυπώνεται στο Σχήματα 4.31. Η γεννήτρια EM Test Dito χαρακτηρίζεται από σημαντική φασματική συγκέντρωση στις γρήγορες συνιστώσες, γεγονός που καθιστά τον φερρίτη 61, με περιοχή λειτουργίας 200 MHz – 1 GHz, ιδιαίτερος αποτελεσματικό στην καταστολή ανεπιθύμητων ταλαντώσεων. Αντιθέτως, η NSG 438 παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή με τον φερρίτη 75, ο οποίος δρα κυρίως κάτω από τα 10 MHz και επηρεάζει τις αργές ταλαντώσεις της δεύτερης αιχμής.

Συνεπώς, δεν υπάρχει ένας ενιαίος βέλτιστος συνδυασμός φερρίτη-θέσης τοποθέτησης για όλες τις περιπτώσεις. Η επιλογή του πρέπει να βασίζεται σε λεπτομερή ανάλυση του φασματικού περιεχομένου και της ταλαντωτικής συμπεριφοράς της κυματομορφής κάθε γεννήτριας [139], ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή.

4.3. Προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή μέσω φερρίτη: διατάξεις καλωδίου γείωσης και γραμμικότητα

Η Ενότητα 4.2 ανέδειξε, με συστηματική πειραματική τεκμηρίωση, τη σημαντική επίδραση του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και διερεύνησε τη δυνατότητα προσομοίωσης αυτής της επίδρασης με τη χρήση φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης. Τα ευρήματα κατέδειξαν ότι, παρότι η προσέγγιση με φερρίτες μπορεί να μειώσει τις αποκλίσεις από την κυματομορφή με χειριστή, η αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης εξαρτάται από πλήθος

παραγόντων, όπως το φασματικό περιεχόμενο της γεννήτριας, τα φαινόμενα ταλαντώσεων και τη θέση τοποθέτησης των φερριτών.

Ωστόσο, παραμένουν ζητήματα που δεν έχουν εξεταστεί επαρκώς, όπως το πώς επηρεάζεται η επίδραση του χειριστή — και αντίστοιχα η προσομοίωσή της μέσω φερριτών — σε συνάρτηση με τη διάταξη του καλωδίου γείωσης, τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ή το επίπεδο της τάσης δοκιμής.

Η παρούσα ενότητα επιχειρεί να καλύψει αυτά τα κενά, παρέχοντας αναλυτική διερεύνηση των συνθηκών υπό τις οποίες η επίδραση του χειριστή τροποποιεί σημαντικά την κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και προτεινόμενη μεθοδολογία προσομοίωσής της με τη χρήση φερριτών αρπάγης. Η μελέτη επικεντρώνεται σε τρεις βασικούς άξονες: (i) τη διάταξη του καλωδίου γείωσης, (ii) τον τύπο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, και (iii) το επίπεδο της τάσης δοκιμής. Η επίδραση του χειριστή ποσοτικοποιείται μέσω τεσσάρων (4) διαφορετικών διατάξεων καλωδίου γείωσης και τριών (3) εμπορικών γεννητριών, ενισχύοντας τη γενικευσιμότητα της ανάλυσης. Οι δείκτες της κυματομορφής — ιδίως όσοι αφορούν το σκέλος της δεύτερης αιχμής — συγκρίνονται μεταξύ συνθηκών με και χωρίς χειριστή, αναδεικνύοντας σημαντικές αποκλίσεις που εξαρτώνται από τη διάταξη του καλωδίου και τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας.

Για την ενίσχυση της αναπαραγωγιμότητας στις αυτοματοποιημένες δοκιμές, η μέθοδος προσομοίωσης της επίδρασης του χειριστή με φερρίτες αρπάγης εφαρμόζεται συστηματικά σε τέσσερις (4) διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης και σε τρεις (3) τύπους γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο τύπος του φερρίτη αρπάγης και η θέση τοποθέτησής του μεταβάλλονται μεθοδικά, προκειμένου να εντοπιστούν οι συνδυασμοί που επιτυγχάνουν σταθερή προσομοίωση των φαινομένων που προκαλεί η παρουσία του χειριστή. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω δεικτών κυματομορφής και του ενιαίου Δείκτη Απόκλισης (Deviation Index - DI), λαμβάνοντας ως αναφορά τις κυματομορφές που καταγράφονται παρουσία χειριστή. Η αξιοπιστία της μεθοδολογίας επιβεβαιώνεται με ανάλυση ευαισθησίας των βαρών κατά τη μέθοδο Monte Carlo.

Η διεύρυνση της μελέτης σε πολλαπλές διατάξεις καλωδίου γείωσης και η εφαρμογή διαφοροποιημένων σεναρίων στάθμισης των δεικτών, όπως προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας, οδήγησαν σε αυξημένη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν δύναται να καταλήξει σε μία μοναδική, καθολικά βέλτιστη λύση· αντιθέτως, υιοθετείται στατιστική προσέγγιση που αναδεικνύει ένα σύνολο εναλλακτικών συνδυασμών φερριτών αρπάγης και θέσεων τοποθέτησης, οι οποίοι παρουσιάζουν συγκρίσιμη ικανότητα προσομοίωσης της επίδρασης του χειριστή.

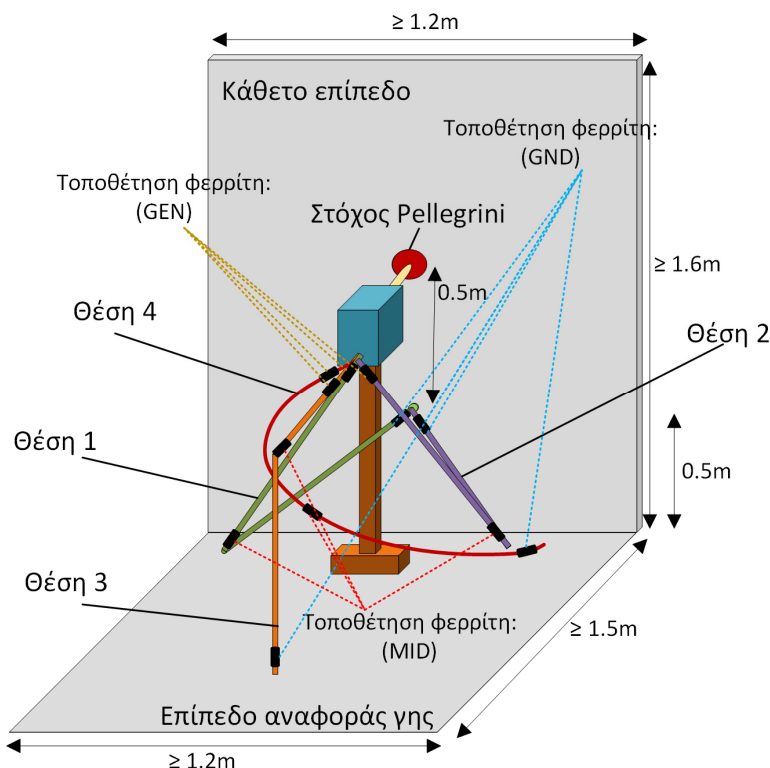
Πέραν αυτών, εξετάζονται δύο κρίσιμες παράμετροι πρακτικού ενδιαφέροντος: η γραμμικότητα και ο κορεσμός [134]. Η ανάλυση γραμμικότητας διερευνά τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι της κυματομορφής κλιμακώνονται με την αύξηση της τάσης δοκιμής, καθώς και κατά πόσο η παρουσία του χειριστή ή η χρήση φερρίτη αρπάγης συμβάλλει στη σταθεροποίηση αυτής της συμπεριφοράς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παρουσία χειριστή ή η εφαρμογή κατάλληλου φερρίτη βελτιώνει αισθητά τη γραμμικότητα, ιδιαίτερα στην παράμετρο I_{60} .

Ο κορεσμός αξιολογείται μέσω δοκιμών φερριτών με διαφορετική εσωτερική διάμετρο σε υψηλότερα επίπεδα τάσης (≥ 6 kV), αποκαλύπτοντας μείωση της απόδοσης όταν η διατομή του φερρίτη δεν επαρκεί. Τα ευρήματα συνεισφέρουν στην ανάπτυξη αξιόπιστων και αναπαραγώγιμων στρατηγικών προσομοίωσης της επίδρασης του χειριστή, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της 3^{ης} Έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27].

4.3.1. Διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων

4.3.1.1. Διάταξη μέτρησης

Η διάταξη μέτρησης ακολουθεί το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], χρησιμοποιώντας τον καθιερωμένο εξοπλισμό του εργαστηρίου και τρεις (3) από τις γεννήτριες που είναι διαθέσιμες στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (EM Test Dito, Schaffner NSG 433 και Teseq NSG 438). Πέραν της προτυποποιημένης θέσης του καλωδίου γείωσης, εξετάζονται τρεις (3) επιπλέον διατάξεις, ενώ για όλες τις θέσεις αξιολογείται η τοποθέτηση φερριτών αρπάγης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.32.



Σχήμα 4.32: Διάταξη μέτρησης βασισμένη στη διάταξη διακρίβωσης του IEC 61000-4-2: Απεικονίζονται τέσσερις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης (Θέση 1-4). Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις θέσεις τοποθέτησης φερριτών: α) Κίτρινο – Κοντά στη γεννήτρια (GEN), β) Κόκκινο – Στο μέσο του καλωδίου γείωσης (MID) και γ) Μπλε – Πλησίον του σημείου γείωσης του καλωδίου (GND).

Η Θέση 1 αντιστοιχεί στην προτυποποιημένη διάταξη του Προτύπου IEC 61000-4-2, όπου το καλώδιο σχηματίζει ισοσκελές τρίγωνο με κάμψη στο μέσο του. Οι Θέσεις 2 έως 4 αναπαριστούν εναλλακτικές, μη τυποποιημένες διατάξεις, οι οποίες προσομοιώνουν ρεαλιστικότερα σενάρια δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και εισάγουν μεταβολές στην σύνθετη αντίσταση της διαδρομής επιστροφής του ρεύματος, τροποποιώντας αντίστοιχα την παραγόμενη κυματομορφή. Συγκεκριμένα:

- ... Θέση 2: Αποτελεί περιστροφή κατά 45° της προτυποποιημένης διάταξης.
- ... Θέση 3: Σχηματίζει ορθογώνιο τρίγωνο με κάμψη του καλωδίου κατά 90° ως προς το Επίπεδο Αναφοράς Γείωσης, προσομοιώνοντας συνθήκες δοκιμής επάνω σε τραπέζι.
- ... Θέση 4: Αναπαριστά αυθαίρετη διάταξη, όπου το ελεύθερο άκρο του καλωδίου συνδέεται επίσης στο επίπεδο αναφοράς γης.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε λειτουργία επαφής και με θετική πολικότητα. Για τις μετρήσεις χωρίς χειριστή, οι γεννήτριες ρυθμίστηκαν σε αυτόματη λειτουργία με ρυθμό επαναλήψεων 1 Hz. Για τις μετρήσεις με χειριστή, ο χειριστής στεκόταν πλησίον της γεννήτριας, την κρατούσε σταθερά με το χέρι (βλ. Σχήμα 4.33) και πραγματοποιούσε χειροκίνητες εκφορτίσεις με ρυθμό περίπου 1 Hz.



Σχήμα 4.33: Φωτογραφική απεικόνιση της χειροκίνητης εκφόρτισης στη Θέση 1

4.3.1.2. Διαδικασία αξιολόγησης για την προσομοίωση μέσω φερρίτη αρπάγης

Η προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή μέσω φερρίτη αρπάγης έχει αναλυθεί εκτενώς στο Κεφάλαιο 4, όπου φερρίτες αρπάγης διαφορετικού εύρους συχνότητας λειτουργίας τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η απόδοση κάθε διάταξης φερρίτη αξιολογήθηκε βάσει συνόλου δεικτών κυματομορφής και προκαθορισμένων βαρών, με στόχο τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης προσομοίωσης.

Η διαδικασία αξιολόγησης που εφαρμόζεται στην παρούσα ενότητα βασίζεται σε στοιχεία της ανωτέρω μεθοδολογίας, αλλά διαφοροποιείται σημαντικά. Συγκεκριμένα, ενώ η αξιολόγηση στην Ενότητα 4.2 στηρίζεται στον μέσο όρο κατάταξης όλων των επιμέρους δεικτών, εδώ υιοθετείται μία ενοποιημένη προσέγγιση μέσω υπολογισμού ενός Δείκτη Απόκλισης, ο οποίος εκφράζεται ως ποσοστό. Ο Δείκτης Απόκλισης επιτρέπει όχι μόνο τη συγκριτική κατάταξη, αλλά και την αποτύπωση του απόλυτου μεγέθους των διαφορών σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς του ανθρώπινου χειριστή, προσφέροντας έτσι λεπτομερέστερη ανάλυση, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου ακόμη και μικρές αποκλίσεις έχουν σημαντική φυσική ή ρυθμιστική σημασία.

Για λόγους απλοποίησης της ανάλυσης και εστίασης στα πλέον πληροφοριακά χαρακτηριστικά, επιλέχθηκε ένα υποσύνολο επτά (7) βασικών δεικτών από το αρχικό σύνολο των έντεκα (11) της Ενότητας 4.2. Οι δείκτες επιλέχθηκαν βάσει της συνάφειάς τους με το σχήμα, το πλάτος και το φασματικό περιεχόμενο της κυματομορφής, ώστε να εξασφαλίζεται ισορροπημένη αξιολόγηση χωρίς πλεονασμό. Οι επιλεγμένοι δείκτες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.29.

Πίνακας 4.29: Επιλεγμένοι δείκτες για τη διαδικασία αξιολόγησης προσομοίωσης μέσω φερρίτη αρπάγης

Δείκτης	Περιγραφή
I_p	Μέγιστη τιμή της αρχικής αιχμής του ρεύματος
t_r	Χρονικό διάστημα ανόδου του ρεύματος από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του
I_{p2}	Μέγιστη τιμή του ρεύματος στο χρονικό παράθυρο 10 ns έως 40 ns μετά τη στιγμή που η κυματομορφή υπερέβη για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής της
I_{30}	Τιμή του ρεύματος στα 30 ns από τη στιγμή που το ρεύμα υπερέβη για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του
I_{60}	Τιμή του ρεύματος στα 60 ns από τη στιγμή που το ρεύμα υπερέβη για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του
RMSE	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error) μεταξύ της δοκιμαζόμενης και της κυματομορφής αναφοράς
Φάσμα 6,25MHz-200MHz (%)	Ποσοστό του φάσματος συχνοτήτων στο εύρος 6,25 MHz – 200 MHz σε σχέση με το συνολικό φάσμα συχνοτήτων*

*Η τιμή 6,25 MHz προκύπτει ως λόγος του ρυθμού δειγματοληψίας (20 GS/s) προς 3200 σημεία μέτρησης.

Για την ποσοτική εκτίμηση της ομοιότητας κάθε εξεταζόμενης διάταξης με την κυματομορφή αναφοράς, εισάγεται ο Δείκτης Απόκλισης. Ο δείκτης αυτός συγκεντρώνει τις πληροφορίες από όλους τους επιμέρους δείκτες σε μία μοναδική τιμή, εκφράζοντας το συνολικό μέγεθος της απόκλισης. Θεωρώντας ότι το y_j είναι το διάνυσμα των χαρακτηριστικών για τη διάταξη δοκιμής j και y_H το αντίστοιχο διάνυσμα αναφοράς που προκύπτει από μετρήσεις με ανθρώπινο χειριστή, ο Δείκτης Απόκλισης υπολογίζεται ως εξής:

$$DI_j = 100 \cdot \sum_{m=1}^7 \alpha_m \cdot \left| \frac{y_{j,m} - y_{H,m}}{y_{H,m}} \right| \quad (38)$$

όπου: $y_{j,m}$ είναι η τιμή του δείκτη m για τη διάταξη j , $y_{H,m}$ είναι η αντίστοιχη τιμή αναφοράς, α_m είναι ο κανονικοποιημένος συντελεστής βάρους για τον δείκτη m , ο οποίος ορίζεται ως:

$$\alpha_m = \frac{w_m}{\sum_{m=1}^7 w_m} \quad (39)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, το w_m αντιπροσωπεύει το μη κανονικοποιημένο βάρος σημαντικότητας που αποδίδεται στον κάθε δείκτη. Εκτός αν ορίζεται διαφορετικά, όλα τα βάρη θεωρούνται ίσα ($w_m=1$ για όλα τα m). Οι τιμές των αποδοθέντων βαρών για τους επτά (7) δείκτες παρατίθενται στον Πίνακα 4.30.

Πίνακας 4.30: Αρχικές τιμές βαρών w_m για τους 7 εξεταζόμενους δείκτες

I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}	RMSE	Φάσμα % 6,25-200 MHz
1	1	2	2	2	1	1

Οι δείκτες που σχετίζονται με τη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής (I_{p2} , I_{30} και I_{60}) έλαβαν διπλάσιο βάρος σε σύγκριση με τους υπόλοιπους, αντανakλώντας τόσο τα ευρήματα του Κεφαλαίου 4 όσο και της παρούσας ενότητας. Η περιοχή της δεύτερης αιχμής αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευαίσθητη στην παρουσία ή απουσία ανθρώπινου χειριστή, καθώς και στην τοποθέτηση φερρίτη αρπάγης γύρω από το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αποτελώντας καθοριστικό παράγοντα για τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών διατάξεων δοκιμής. Η αύξηση του σχετικού τους βάρους εξασφαλίζει ότι

η αξιολόγηση δίνει τη δέουσα προτεραιότητα στα τμήματα της κυματομορφής που επηρεάζονται περισσότερο από τις προαναφερθείσες αλληλεπιδράσεις.

Η τελική τιμή του Δείκτη Απόκλισης εκφράζεται ως ποσοστό, με το 0% να δηλώνει πλήρη συμφωνία με την κυματομορφή αναφοράς του ανθρώπινου χειριστή, ενώ υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν αυξανόμενη απόκλιση βάσει του συνολικού συνόλου των εξεταζόμενων δεικτών.

4.3.1.3. Ανάλυση ευαισθησίας

Για την περαιτέρω ενίσχυση της αξιοπιστίας της αξιολόγησης και τον περιορισμό της υποκειμενικότητας που συνεπάγεται η χρήση σταθερών τιμών βαρών για τους δείκτες, εφαρμόστηκε προσέγγιση τύπου Monte Carlo, η οποία εισάγει ελεγχόμενη μεταβλητότητα στο σύστημα βαρών και αξιολογεί τη σταθερότητα της απόδοσης κάθε διαμόρφωσης υπό ευρύ φάσμα ρεαλιστικών συνθηκών [140], [141].

Σε κάθε επανάληψη της προσομοίωσης Monte Carlo, το αρχικό διάνυσμα βαρών διαταράσσεται μέσω κανονικής κατανομής με μηδενική μέση τιμή, ώστε να προσομοιωθεί μια πιθανή μεταβολή $\pm 30\%$. Συγκεκριμένα, κάθε βάρος τροποποιείται σύμφωνα με τη σχέση:

$$w_m' = \max(w_m + \delta_m, 0) \quad (40)$$

όπου:
$$\delta_m \sim \mathcal{N}(0, (0,3 \cdot w_m)^2) \quad (41)$$

Η κατανομή $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ δηλώνει κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 . Συνεπώς, η τυχαία μεταβλητή δ_m έχει μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ίση με το 30% του αρχικού βάρους w_m . Αυτή η αναλογική τυπική απόκλιση διασφαλίζει ότι οι δείκτες με υψηλότερα βάρη εμφανίζουν μεγαλύτερες απόλυτες διακυμάνσεις από εκείνους με μικρότερα βάρη, διατηρώντας τη σχετική τους επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα.

Η χρήση της συνάρτησης μέγιστου $\max$ εξασφαλίζει ότι όλα τα προκύπτοντα βάρη παραμένουν μη αρνητικά, καθώς αρνητικές συνεισφορές στον Δείκτη Απόκλισης δεν είναι φυσικά ερμηνεύσιμες ούτε μαθηματικά αποδεκτές. Μετά την ψαλίδιση (clipping), τα διαταραγμένα βάρη κανονικοποιούνται, ώστε το άθροισμά τους να ισούται με τη μονάδα.

Η διαδικασία διατάραξης (perturbation) και κανονικοποίησης επαναλαμβάνεται για 1.000 ανεξάρτητες επαναλήψεις, δημιουργώντας μία κατανομή τιμών για τον Δείκτη Απόκλισης και την κατάταξη κάθε διαμόρφωσης. Τα δεδομένα αυτά συγκεντρώνονται για την εξαγωγή βασικών στατιστικών δεικτών, όπως η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του Δείκτη Απόκλισης, καθώς και το ποσοστό κατάληψης κάθε θέσης κατάταξης (rank occupancy). Ο τελευταίος δείκτης αποκαλύπτει τη συχνότητα με την οποία κάθε διαμόρφωση καταλαμβάνει τις υψηλότερες θέσεις στις δοκιμές.

Μέσω της εξερεύνησης ενός διευρυμένου, αλλά ελεγχόμενου χώρου πιθανοτήτων ως προς την προτεραιοποίηση των δεικτών, η μεθοδολογία Monte Carlo προσφέρει μία στατιστικά τεκμηριωμένη και αμερόληπτη συγκριτική αξιολόγηση της ομοιότητας των κυματομορφών. Διασφαλίζει ότι η αξιολόγηση αντικατοπτρίζει όχι μόνο τη μέση απόδοση υπό σταθερές παραδοχές, αλλά και τη σταθερότητα και ανθεκτικότητα κάθε εξεταζόμενου σεναρίου απέναντι σε ρεαλιστικές μεταβολές των κριτηρίων αξιολόγησης.

4.3.2. Αποτελέσματα

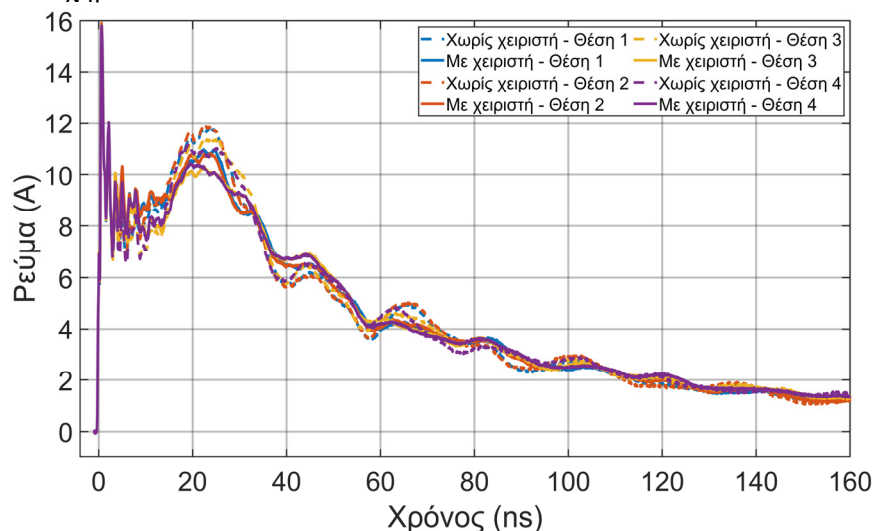
Τα αποτελέσματα της παρούσας ενότητας παρουσιάζονται σε τέσσερις διακριτές ενότητες:

- Α) Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του χειριστή υπό διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου γείωσης, χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τη γεννήτρια Schaffner NSG 433. Καταγράφηκαν κυματομορφές ρεύματος με και χωρίς την παρουσία χειριστή για τις τέσσερις διατάξεις του καλωδίου που περιγράφηκαν στην Ενότητα 4.3.1.1. Η ενότητα αυτή αναδεικνύει την ανάγκη για αναζήτηση κατάλληλων λύσεων προσομοίωσης της επίδρασης του χειριστή μέσω φερρίτη, προσαρμοσμένων στις εκάστοτε διατάξεις καλωδίου.
- Β) Εφαρμογή της διαδικασίας αξιολόγησης που περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.1 και στις τρεις γεννήτριες (EM Test Dito, Schaffner NSG 433, Teseq NSG 438) για τις τέσσερις διατάξεις καλωδίου γείωσης, με χρήση ενός σταθερού συνόλου βαρών για τους δείκτες κυματομορφής.
- Γ) Ανάλυση ευαισθησίας βαρών για όλες τις γεννήτριες, με σκοπό την αξιολόγηση της σταθερότητας των επιδόσεων προσομοίωσης και την ανάδειξη συνεπών και αξιόπιστων εναλλακτικών διαμορφώσεων με φερρίτες.
- Δ) Ανάλυση γραμμικότητας, η οποία εξετάζει πώς η επίδραση του χειριστή αλλά και η προσομοίωση μέσω φερρίτη επηρεάζουν τις παραμέτρους του δεύτερου ρεύματος αιχμής συναρτήσει του επιπέδου τάσης δοκιμής.

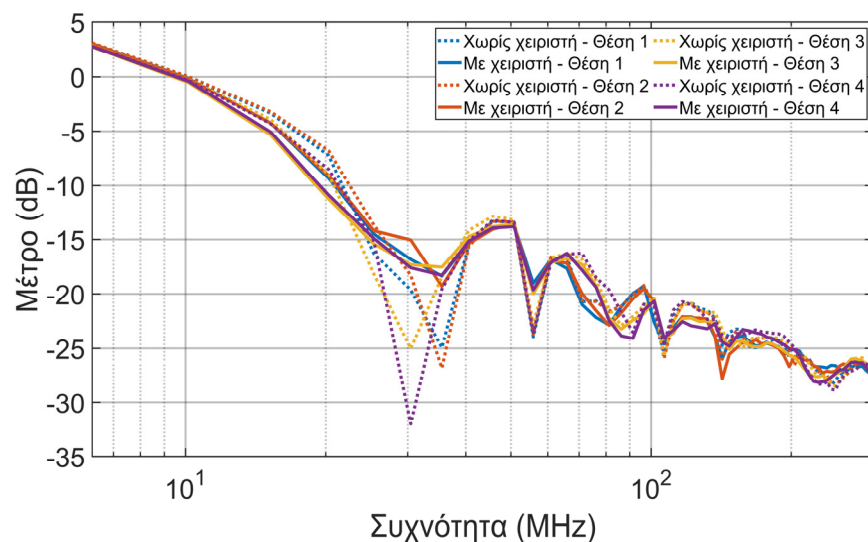
Όλες οι μετρήσεις στις Ενότητες Α έως Δ πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο τάσης δοκιμής +4 kV, ενώ η Ενότητα Δ περιλαμβάνει μετρήσεις επίπεδα από +2 kV έως +9 kV, με βήμα 1 kV.

4.3.2.1. Επίδραση του χειριστή για διαφορετικές διατάξεις γείωσης του καλωδίου της γεννήτριας ESD

Το Σχήμα 4.34 παρουσιάζει τις κυματομορφές ρεύματος που καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 για όλες τις διατάξεις καλωδίου γείωσης, τόσο χωρίς την αλληλεπίδραση του χειριστή — όπως προβλέπεται από το πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] — όσο και με χειριστή που κρατά τη γεννήτρια. Τα αντίστοιχα φάσματα συχνοτήτων, που καλύπτουν το εύρος από 6,25 MHz έως 300 MHz, απεικονίζονται στο Σχήμα 4.35.



Σχήμα 4.34: Κυματομορφές ρεύματος για όλες τις διατάξεις καλωδίου - Schaffner NSG 433.



Σχήμα 4.35: Φάσμα συχνοτήτων (6,25 MHz – 300 MHz) για όλες τις διατάξεις καλωδίου - Schaffner NSG 433.

Τα ποιοτικά αυτά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι κυματομορφές ρεύματος που σχετίζονται με διαφορετικές διατάξεις καλωδίου εμφανίζουν την αναμενόμενη μετατόπιση των ταλαντώσεων στην περιοχή της δεύτερης αιχμής του παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, λόγω των διαφοροποιήσεων στην ολική σύνθετη αντίσταση του μονοπατιού εκφόρτισης/ροής του ρεύματος. Τα φάσματα συχνοτήτων αναδεικνύουν επιπλέον την επίδραση του χειριστή στο πλάτος αυτών των ταλαντώσεων. Σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, όπως γύρω από τα 30 MHz και 55 MHz, παρατηρείται σημαντική μεταβολή στο πλάτος, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο χειριστής παρέχει μία εναλλακτική διαδρομή επιστροφής του ρεύματος, μειώνοντας τα φαινόμενα στασίμων κυμάτων σε αυτές τις συχνότητες (βλ. Ενότητα 4.2.4.). Σε όλο το υπόλοιπο φασματικό εύρος παρατηρείται γενική μείωση του φασματικού πλάτους, κάτι που συμβαδίζει με την αποσβεστική επίδραση του χειριστή σε επιλεγμένες φασματικές συνιστώσες. Τέλος, επιβεβαιώνεται ότι η πρώτη αιχμή της κυματομορφής δεν επηρεάζεται ούτε από τη διάταξη του καλωδίου γείωσης ούτε από την παρουσία ή τη λαβή του χειριστή, καθώς αυτό το τμήμα της κυματομορφής καθορίζεται από τη γεωμετρία του άκρου εκφόρτισης και την αρχική διαδρομή του παλμού, η οποία δεν περιλαμβάνει το καλώδιο γείωσης. Οι διαφοροποιήσεις της επίδρασης του χειριστή στις κυματομορφές για διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου γείωσης απεικονίζονται περαιτέρω στα ποσοτικά αποτελέσματα του Πίνακα 4.31.

Πίνακας 4.31: Παράμετροι κυματομορφής και αποκλίσεις για όλες τις διατάξεις καλωδίου (Γεννήτρια Schaffner NSG 433)

Θέση	I_P			t_r			I_{P2}			I_{30}			I_{60}		
	Με χειριστή	Χωρίς χειριστή	Απόκλιση	Με χειριστή	Χωρίς χειριστή	Απόκλιση	Με χειριστή	Χωρίς χειριστή	Απόκλιση	Με χειριστή	Χωρίς χειριστή	Απόκλιση	Με χειριστή	Χωρίς χειριστή	Απόκλιση
	[A]	[A]	[%]	[ns]	[ns]	[%]	[A]	[A]	[%]	[A]	[A]	[%]	[A]	[A]	[%]
1	15,96	16,02	-0,374	0,882	0,888	-0,703	11,41	13,66	-16,46	9,572	9,808	-2,406	3,544	3,256	8,845
2	15,97	15,99	-0,100	0,887	0,888	-0,154	10,86	13,65	-20,40	9,180	10,51	-12,64	3,296	3,116	5,777
3	15,68	15,61	0,436	0,882	0,886	-0,385	9,984	11,97	-16,58	9,208	10,89	-15,43	4,408	3,628	21,50
4	15,73	15,81	-0,506	0,883	0,883	-0,065	10,30	11,91	-13,53	9,232	11,28	-18,16	3,884	3,260	19,14

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι οι παράμετροι της πρώτης αιχμής — δηλαδή το μέγιστο ρεύμα (I_p) και ο χρόνος ανόδου (t_r) — παραμένουν ουσιαστικά ανεπηρέαστοι από την παρουσία ή τη λήψη του χειριστή. Αντίθετα, οι παράμετροι της δεύτερης αιχμής — I_{p2} , I_{30} και I_{60} — παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις λόγω της επίδρασης του χειριστή. Συγκεκριμένα, η παράμετρος I_{p2} εμφανίζει συστηματικές αποκλίσεις μεταξύ $-20,40\%$ και $-13,53\%$, ενώ οι αποκλίσεις για τις I_{30} και I_{60} κυμαίνονται αντίστοιχα από $-18,16\%$ έως $-2,41\%$ και από $+5,78\%$ έως $+21,50\%$. Η αυξημένη μεταβλητότητα στις I_{30} και I_{60} αποδίδεται στις μετατοπισμένες ταλαντώσεις που εμφανίζονται στη φθίνουσα περιοχή της δεύτερης αιχμής. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε γεννήτριες που εμφανίζουν ταλαντώσεις υψηλότερου πλάτους σε αυτό το τμήμα της κυματομορφής. Δεδομένου ότι οι I_{30} και I_{60} αναφέρονται σε σταθερά χρονικά σημεία, η ευαισθησία τους σε τέτοιες μετατοπίσεις περιορίζει την αξιοπιστία τους ως δείκτες πλήρους καταγραφής της επίδρασης του χειριστή. Ωστόσο, συνεχίζουν να παρέχουν αδύναμες αλλά σταθερές ενδείξεις αυτής της επίδρασης.

Αντίθετα, ο νέος δείκτης I_{p2} — ο οποίος καταγράφει τη μέγιστη τιμή ρεύματος σε ένα παράθυρο χρόνου ($10 - 40$ ns) — προσφέρει πιο αξιόπιστη αξιολόγηση. Η φύση της, βασισμένη σε χρονικό παράθυρο και όχι σε μεμονωμένο σημείο, τον καθιστά λιγότερο ευαίσθητο σε τοπικές διακυμάνσεις της κυματομορφής, βελτιώνοντας έτσι την ικανότητά του να αντανακλά ουσιαστικές αποκλίσεις που οφείλονται στην παρουσία του χειριστή.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ενώ οι παράμετροι I_{p2} και I_{30} μειώνονται συστηματικά λόγω της εξασθενητικής επίδρασης του χειριστή, η τιμή της παραμέτρου I_{60} αυξάνεται για όλες τις διατάξεις. Αυτό αποδίδεται στην καταστολή των αποσβεννυμένων ταλαντώσεων από την παρουσία του χειριστή, η οποία αποκαλύπτει την πραγματική εκθετική απομείωση του ρεύματος και οδηγεί σε υψηλότερα επίπεδα ρεύματος στα 60 ns.

Πέραν της επίδρασης του χειριστή, τα δεδομένα καταδεικνύουν ότι η γεωμετρία και η διαδρομή του καλωδίου γείωσης επηρεάζουν ουσιαστικά τον βαθμό και τη φύση των παρατηρούμενων αποκλίσεων. Η ποσοτική ανάλυση δείχνει ότι η επίδραση του χειριστή διαφοροποιείται έντονα μεταξύ των τεσσάρων διατάξεων, με την παράμετρο I_{p2} να εμφανίζει μέγιστη απόκλιση $-20,40\%$ στη Θέση 2 και ελάχιστη $-13,53\%$ στη Θέση 4, ενώ η παράμετρος I_{60} κυμαίνεται από $+5,78\%$ (Θέση 2) έως $+21,50\%$ (Θέση 3). Οι διαφορές αυτές υποδεικνύουν ότι η χωρική διαδρομή του καλωδίου τροποποιεί την κατανομή της σύνθετης αντίστασης και συνεπώς τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρά η παρουσία του χειριστή με τις ταλαντώσεις και τη φθίνουσα περιοχή της δεύτερης αιχμής.

Δεδομένης της παρατηρούμενης μεταβλητότητας μεταξύ διαφορετικών διατάξεων καλωδίου, καθίσταται αναγκαία η εφαρμογή της διαδικασίας αξιολόγησης με χρήση φερρίτη αρπάγης για κάθε διάταξη ξεχωριστά. Αυτή η ολιστική προσέγγιση επιτρέπει την αναγνώριση διαμορφώσεων με συνεπή απόδοση, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη καθολικά εφαρμόσιμων λύσεων προσομοίωσης.

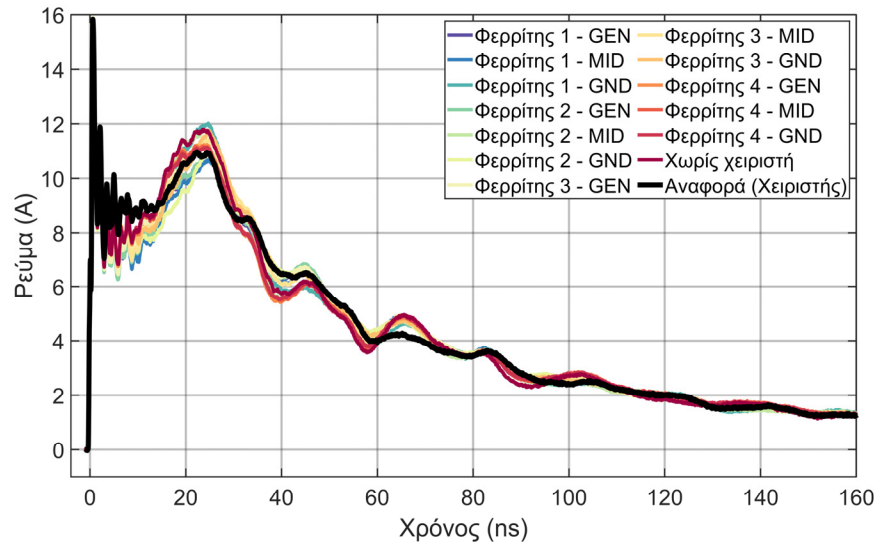
4.3.2.2. Προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή με φερρίτες αρπάγης για διαφορετικές γεννήτριες ESD και διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου γείωσης

Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αναπαραγωγής μέσω φερρίτη χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικοί τύποι φερριτών αρπάγης. Οι συχνότητες λειτουργίας τους, η κωδικοποίηση και οι θέσεις αρπάγης τους γύρω από το καλώδιο γείωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4.32.

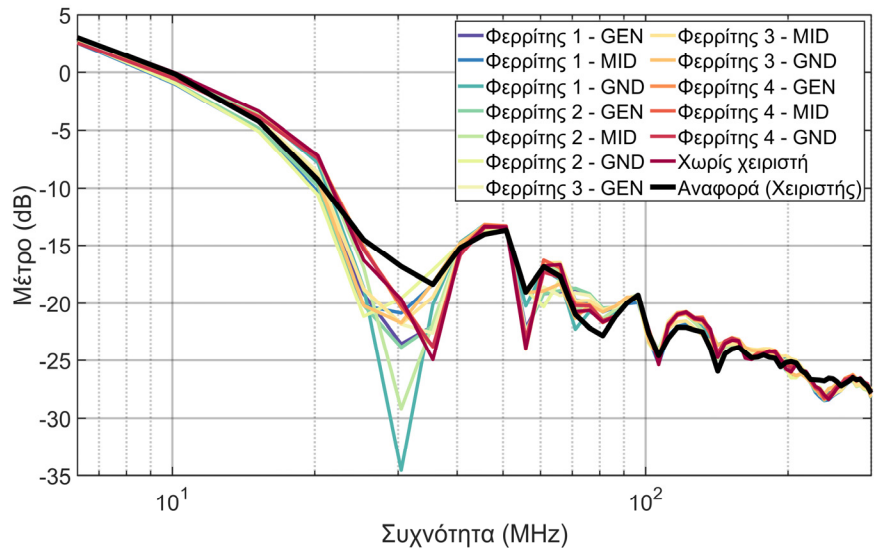
Πίνακας 4.32: Κωδικοποίηση φερριτών, εύρος συχνοτήτων λειτουργίας και θέσεις αρπαγής

Τύπος φερρίτη	1	2	3	4
Συχνότητα λειτουργίας	1 MHz – 300 MHz	25 MHz – 300 MHz	200 MHz – 1 GHz	150 kHz – 10 MHz
Θέση τοποθέτησης	... Πλησίον της γεννήτριας – (GEN) ... Στο μέσο του καλωδίου – (MID) ... Πλησίον του σημείου γείωσης – (GND)			

Τα Σχήματα 4.36 και 4.37 παρουσιάζουν τις κυματομορφές ρεύματος και τα αντίστοιχα φάσματα συχνοτήτων που καταγράφηκαν για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 υπό την πρώτη διάταξη καλωδίου γείωσης (Θέση 1). Τα ποιοτικά αυτά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ομοιότητα της επίδρασης του φερρίτη με εκείνη του χειριστή στην κυματομορφή, όπως έχει ήδη φανεί στα Σχήματα 4.34 και 4.35.



Σχήμα 4.36: Καταγεγραμμένες κυματομορφές ρεύματος για διάφορους συνδυασμούς τύπου φερρίτη και θέσης αρπαγής για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 και τη διάταξη καλωδίου γείωσης «Θέση 1».



Σχήμα 4.37: Φάσματα συχνοτήτων για διάφορους συνδυασμούς τύπου φερρίτη και θέσης αρπαγής για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 και τη διάταξη καλωδίου γείωσης «Θέση 1».

Τα αναλυτικά αποτελέσματα για τους 7 δείκτες (με τιμές βαρών βάσης όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.30), καθώς και για τον υπολογιζόμενο Δείκτη Απόκλισης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.33 και υπογραμμίζουν την ομοιότητα της προσέγγισης μέσω φερρίτη με την επίδραση του χειριστή. Ο δείκτης που σχετίζεται με την πρώτη αιχμή της κυματομορφής δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτες αποκλίσεις, με τις τιμές I_p να κυμαίνονται από 15,55 A έως 15,91 A και τις τιμές t_r από 0,734 ns έως 0,741 ns. Ωστόσο, οι δείκτες της δεύτερης αιχμής εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερες σχετικές αποκλίσεις. Οι τιμές I_{p2} κυμαίνονται από 10,66 A έως 12,02 A, οι τιμές I_{30} από 8,460 A έως 9,540 A και οι τιμές I_{60} από 3,912 A έως 4,368 A.

Πίνακας 4.33: Αποτελέσματα δεικτών και υπολογισμένος Δείκτης Απόκλισης για διάφορους συνδυασμούς τύπου φερρίτη και θέσης αρπαγής για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 και τη διάταξη καλωδίου «Θέση 1»

Σενάριο μέτρησης (Φερρίτης-Θέση)	Δείκτες						φάσμα 6,25MHz-200MHz	Δείκτης απόκλισης (DI)
	I_p	t_r	I_{p2}	I_{30}	I_{60}	RMSE		
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]	[%]	[%]	[%]
1 - GEN	15,64	0,741	11,06	8,892	4,248	2,323	92,15	2,912
1 – MID	15,55	0,735	10,66	9,132	4,200	2,208	92,03	3,650
1 - GND	15,60	0,739	12,02	9,164	3,928	2,317	93,52	3,747
2 - GEN	15,70	0,741	11,07	8,988	4,176	2,349	92,14	2,754
2 – MID	15,69	0,737	11,77	9,168	3,960	2,421	93,58	3,353
2 - GND	15,75	0,739	11,07	9,064	4,368	2,290	92,03	3,861
3 - GEN	15,91	0,739	11,66	9,272	4,092	2,195	92,89	3,951
3 – MID	15,85	0,740	11,43	9,540	4,148	2,133	92,91	4,422
3 - GND	15,80	0,735	11,72	9,328	4,264	2,051	92,81	4,995
4 - GEN	15,76	0,738	11,24	8,552	4,024	2,334	93,22	1,419
4 – MID	15,80	0,737	11,18	8,460	3,956	2,214	93,14	1,119
4 - GND	15,85	0,734	11,14	8,480	4,092	2,225	93,08	1,707
Χωρίς χειριστή	15,81	0,738	11,79	9,028	3,912	2,502	93,65	2,978
Με χειριστή (αναφορά)	15,83	0,736	10,97	8,600	3,932	-	92,70	-

Ο στόχος της μεθοδολογίας προσομοίωσης μέσω φερρίτη είναι η αναγνώριση συνδυασμών τύπου φερρίτη – θέσης αρπαγής που αποδίδουν χαμηλότερες τιμές Δείκτη Απόκλισης (Deviation Score), δηλαδή καλύτερη ευθυγράμμιση με την κυματομορφή αναφοράς του «Χειριστή» (που σημειώνεται με έντονη γραφή στον Πίνακα 4.33) σε σχέση με τη διάταξη «Χωρίς Χειριστή». Τα αποτελέσματα του Δείκτη Απόκλισης δείχνουν ότι τουλάχιστον πέντε (5) συνδυασμοί επιτυγχάνουν καλύτερες επιδόσεις (τιμές < 2,978%) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε κατά τη διαδικασία διακρίβωσης, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του χειριστή με αναπαραγωγίμο τρόπο, είτε σε αυτοματοποιημένες ρομποτικές δοκιμές εκφόρτισης, ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα μεταξύ διαφορετικών μεθοδολογιών.

Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα της Ενότητας 4.3.2.1 σχετικά με τη μεταβλητότητα της επίδρασης του χειριστή ανάλογα με τη διάταξη καλωδίου γείωσης — καθώς και τη συμπεριφορά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας εκφόρτισης — η διαδικασία αναπαραγωγής επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει και τις 3 γεννήτριες εκφόρτισης και τις τέσσερις διατάξεις καλωδίου. Τα πλήρη αποτελέσματα του Δείκτη Απόκλισης για όλες τις περιπτώσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 4.34.

Οι συνδυασμοί που επισημαίνονται με πράσινο χρώμα υποδηλώνουν καλύτερη αντιστοίχιση με την κυματομορφή αναφοράς του «Χειριστή», καθώς οι τιμές του Δείκτη Απόκλισης για αυτές είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του σεναρίου «Χωρίς Χειριστή». Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι για τις γεννήτριες EM Test Dito και Schaffner NSG 433, πολλαπλοί συνδυασμοί τύπου φερρίτη – θέσης αρπαγής μπορούν να αναπαράγουν με επιτυχία την επίδραση του χειριστή. Συγκεκριμένα, για την EM Test Dito, είτε οι φερρίτες Τύπου 3 είτε οι Τύπου 4 — ανεξαρτήτως θέσης αρπαγής — μπορούν να αποτελέσουν αποτελεσματικές εναλλακτικές ως προς τη διαμόρφωση «Χωρίς Χειριστή» που ορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Αντίστοιχα, για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433, οι φερρίτες Τύπου 4, τοποθετημένοι σε οποιαδήποτε από τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις, αποδίδουν επίσης επιτυχώς.

Πίνακας 4.34: Δείκτης Απόκλισης για διάφορους συνδυασμούς τύπου φερρίτη - θέσης αρπαγής, για τις γεννήτριες EM Test Dito, Schaffner NSG 433 και Teseq NSG 438 και τέσσερις (4) διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης

Σενάριο μέτρησης (Φερρίτης-Θέση)	Δείκτης Απόκλισης (%)											
	EM Test Dito				Schaffner NSG 433				Teseq NSG 438			
	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
1 - GEN	10,73	10,64	4,073	7,480	2,912	3,706	2,937	2,022	5,857	5,485	3,182	3,901
1 – MID	14,14	14,95	7,739	9,112	3,650	3,829	2,713	3,040	6,275	8,040	6,063	6,898
1 - GND	12,15	13,16	9,905	13,55	3,747	4,337	2,535	0,975	5,150	9,662	6,289	7,671
2 - GEN	8,653	7,993	4,662	5,872	2,754	3,203	2,552	1,293	7,897	5,474	3,884	4,376
2 – MID	11,61	21,03	8,056	8,084	3,353	4,216	2,936	3,259	9,681	6,132	7,871	8,568
2 - GND	15,78	16,42	10,44	11,67	3,861	4,951	2,599	2,581	12,00	8,412	7,390	9,822
3 - GEN	2,973	5,636	2,855	3,117	3,951	4,358	4,308	3,307	5,032	6,098	4,047	4,017
3 – MID	4,942	6,618	2,681	5,361	4,422	4,367	3,828	4,315	5,087	5,656	3,837	4,596
3 - GND	5,660	5,876	2,052	5,158	4,995	5,308	4,399	3,880	4,582	5,385	3,976	4,684
4 - GEN	4,908	3,323	5,893	4,163	1,419	2,144	3,146	1,451	5,779	3,367	4,221	4,247
4 – MID	5,895	3,936	5,149	2,538	1,119	2,057	2,487	2,308	5,296	4,529	4,570	3,853
4 - GND	5,842	5,908	6,149	4,858	1,707	2,614	2,343	2,392	5,381	4,295	5,555	4,661
Χωρίς χειριστή	7,185	10,24	12,35	11,77	2,978	3,906	4,726	4,094	2,740	3,444	4,589	5,072

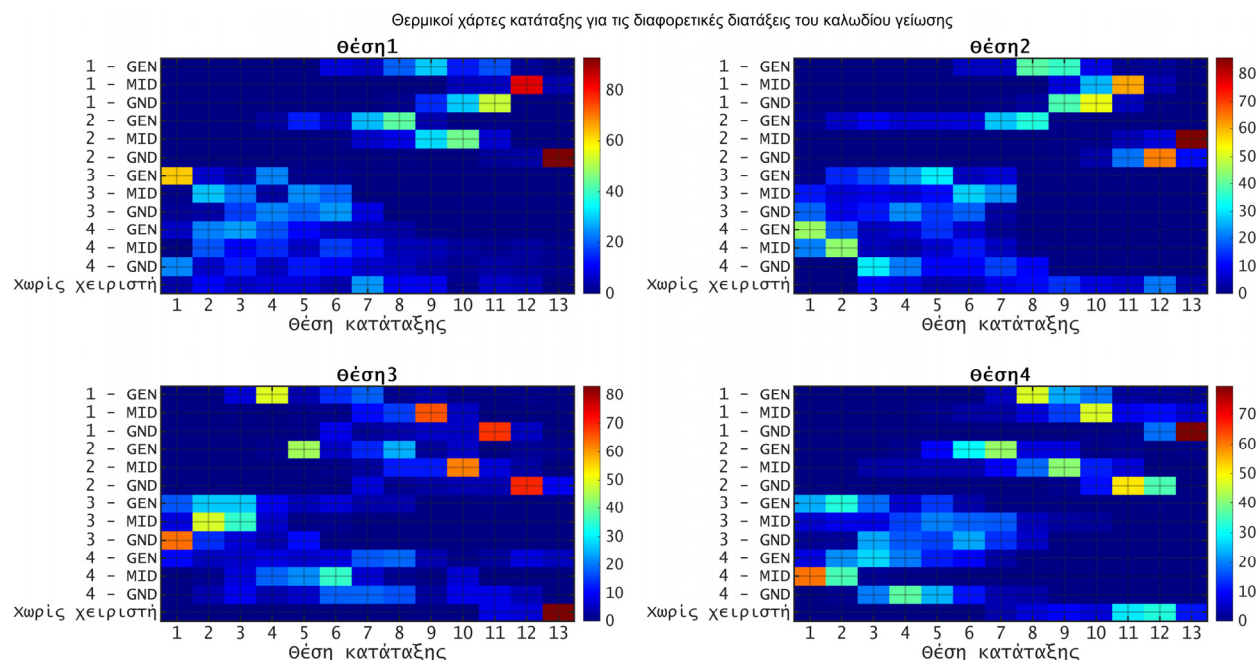
Αντιθέτως, για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, κανένας τύπος φερρίτη ή θέση αρπαγής δεν επιτυγχάνει αποδεκτή αναπαραγωγή για όλες τις θέσεις καλωδίου γείωσης, γεγονός που υποδηλώνει τον περιορισμένο βαθμό εφαρμοσιμότητας της μεθόδου για γεννήτριες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κυματομορφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω αποτελέσματα βασίζονται στο σύνολο βαρών βάσης που ορίζεται στον Πίνακα 4.30 επομένως, είναι απαραίτητη η ανάλυση ευαισθησίας βαρών, για να επιβεβαιωθεί η σταθερότητα και η αξιοπιστία αυτών των παρατηρήσεων.

4.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα βάρη

Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 4.3.1.2, εφαρμόστηκε μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας βασισμένη στην τεχνική Monte Carlo, με μεταβολές $\pm 30\%$ στα αρχικά βάρη των δεικτών, για 1.000 επαναλήψεις ανά γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και για όλες τις εξεταζόμενες διατάξεις του καλωδίου γείωσης. Σε κάθε επανάληψη, όλα τα σενάρια φερριτών αρπαγής — καθώς και το σενάριο «Χωρίς Χειριστή» — αξιολογήθηκαν βάσει των τροποποιημένων βαρών και ταξινομήθηκαν από την 1^η

(καλύτερη) έως τη 13^η (χειρότερη) θέση, με κριτήριο τον Δείκτη Απόκλισης, όπου οι χαμηλότερες τιμές υποδηλώνουν μεγαλύτερη πιστότητα στην αναπαραγωγή της κυματομορφής με παρουσία χειριστή.

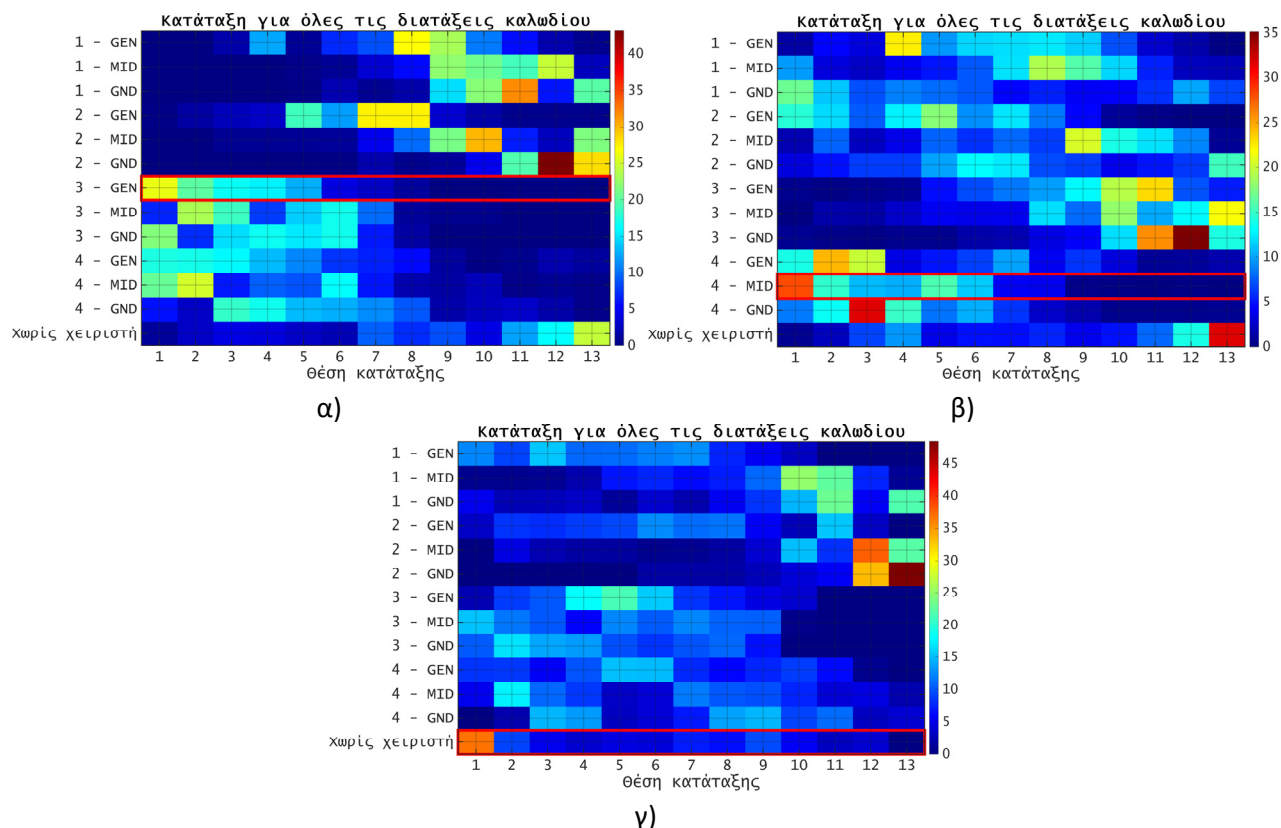
Το Σχήμα 4.38 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τη γεννήτρια EM Test Dito, απεικονίζοντας όλα τα σενάρια με τη μορφή θερμικών χαρτών (heatmaps), οι οποίοι αποδίδουν την κατανομή των θέσεων κατάταξης για κάθε συνδυασμό τύπου φερρίτη και θέσης τοποθέτησης. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σενάριο, ενώ κάθε στήλη αναπαριστά μία θέση κατάταξης από 1 (καλύτερη) έως 13 (χειρότερη). Η ένταση του χρώματος φανερώνει τη συχνότητα (ποσοστό εμφάνισης) με την οποία ο εκάστοτε συνδυασμός καταλάμβανε τη συγκεκριμένη θέση κατά τις 1.000 προσομοιώσεις, με θερμότερα χρώματα (π.χ. κόκκινο, κίτρινο) να υποδηλώνουν υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης.



Σχήμα 4.38: Θερμικός χάρτης συχνότητων κατάληψης θέσεων κατάταξης για τη γεννήτρια εκφόρτισης EM Test Dito για όλες τις διατάξεις καλωδίου γείωσης.

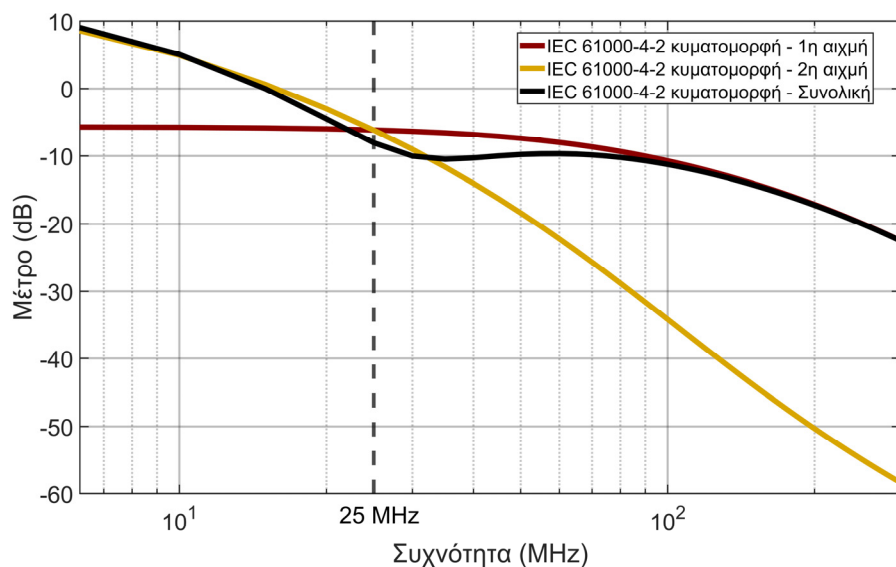
Τα αποτελέσματα ανά διάταξη δείχνουν ότι, παρότι δεν υπάρχει ένας μοναδικός συνδυασμός που να κατατάσσεται πρώτος σε όλες τις διατάξεις, οι φερρίτες Τύπου 3 και Τύπου 4 υπερτερούν σταθερά της διαμόρφωσης «Χωρίς Χειριστή». Η τάση αυτή καθίσταται ακόμη πιο εμφανής όταν συγκεντρωθούν και οι 4.000 επαναλήψεις των Monte Carlo δοκιμών σε έναν συνολικό θερμικό χάρτη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.39. Σε αυτά, ο συνδυασμός με την καλύτερη συνολική επίδοση σημειώνεται με κόκκινο περίγραμμα. Για τη γεννήτρια EM Test Dito, αυτή η διαμόρφωση αντιστοιχεί στον φερρίτη συχνοτήτων 200 MHz – 1 GHz τοποθετημένο κοντά στη γεννήτρια.

Αντίστοιχα, τα Σχήματα 4.39β και 4.39γ παρουσιάζουν τους συνολικούς θερμικούς χάρτες για τις γεννήτριες Schaffner NSG 433 και Teseq NSG 438, αντίστοιχα. Για τη γεννήτρια Schaffner NSG 433, ο φερρίτης Τύπου 4 — ιδίως όταν τοποθετείται στο μέσο του καλωδίου γείωσης — εμφανίζει την καλύτερη συνολική επίδοση. Αντιθέτως, για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, κανένα σενάριο σε οποιαδήποτε θέση τοποθέτησης δεν επιτυγχάνει σταθερή υπεροχή έναντι του σεναρίου «Χωρίς Χειριστή», γεγονός που υποδεικνύει ότι η μέθοδος προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης μέσω φερρίτη δεν είναι εφαρμόσιμη για αυτήν τη συγκεκριμένη γεννήτρια.



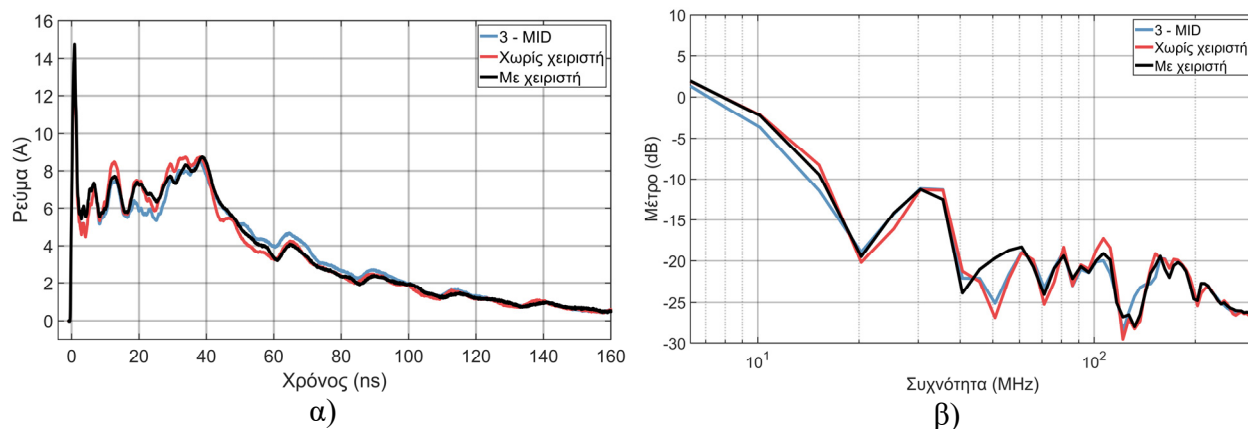
Σχήμα 4.39: Συνολικοί θερμικοί χάρτες συχνότητων κατάληψης θέσεων κατάταξης για όλες τις διατάξεις καλωδίου γείωσης: (α) γεννήτρια EM Test Dito, (β) γεννήτρια Schaffner NSG 433, (γ) γεννήτρια Teseq NSG 438.

Η διαφορά στην αποτελεσματικότητα οφείλεται κυρίως στα ενδογενή χαρακτηριστικά της κυματομορφής ρεύματος της κάθε γεννήτριας και, πιο συγκεκριμένα, στο φασματικό περιεχόμενο της δεύτερης αιχμής. Η εν λόγω περιοχή περιλαμβάνει σημαντικό φασματικό περιεχόμενο έως και τα 25 MHz, το οποίο ξεπερνά κατά πολύ τη συμβολή της πρώτης αιχμής (Σχήμα 4.40).



Σχήμα 4.40: Φάσμα συχνότητων της κυματομορφής εκφόρτισης σύμφωνα με το IEC 61000-4-2 και των επιμέρους συνιστωσών της.

Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται περαιτέρω από τη σύγκριση της επίδρασης του χειριστή και των φερριτών για τη γεννήτρια εκφόρτισης Teseq NSG 438. Το Σχήμα 4.41α και ο Πίνακας 4.35 δείχνουν ότι η επίδραση του χειριστή στα βασικά χαρακτηριστικά της κυματομορφής (I_{P2} , I_{30} και I_{60}) είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τη γεννήτρια Schaffner NSG 433 (Σχήματα 4.36, 4.37 και Πίνακας 4.33). Το Σχήμα 4.41β απεικονίζει τη μικρή επιρροή στο φασματικό εύρος 10 – 25 MHz. Το σενάριο 3 – MID, το οποίο κατατάσσεται υψηλότερα στο Σχήμα 4.39γ, (αμέσως μετά την περίπτωση χωρίς χειριστή) περιλαμβάνεται στη σύγκριση ώστε να αποδειχθεί η υπέρμετρη εξασθένηση που σχετίζεται με την προσομοίωση μέσω φερριτών σε αυτή την περίπτωση.

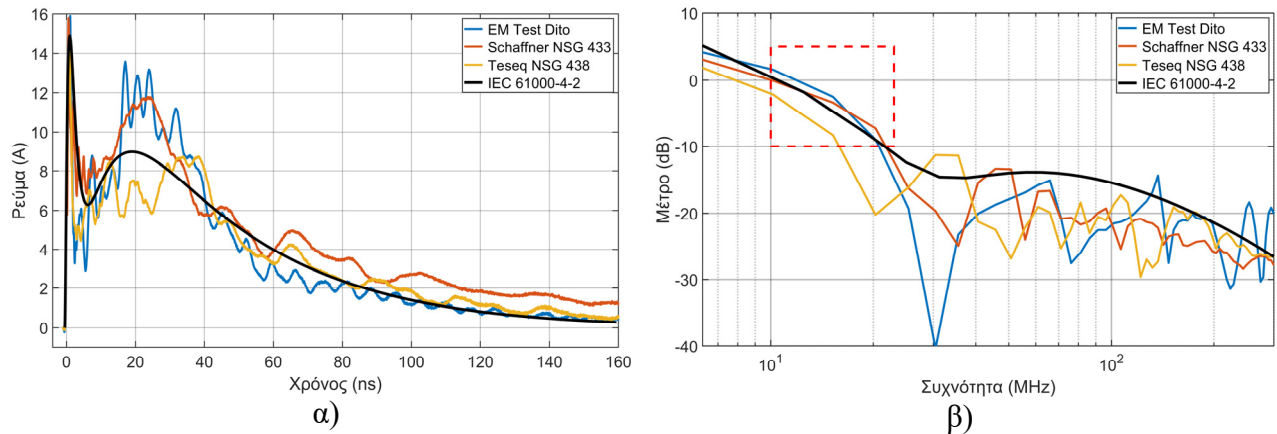


Σχήμα 4.41: Σύγκριση κυματομορφής (α) και φάσματος (β) μεταξύ του χειριστή και του σεναρίου φερριτών με την υψηλότερη κατάταξη για τη γεννήτρια Teseq NSG 438

Πίνακας 4.35: Σύγκριση των παραμέτρων της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής μεταξύ του χειριστή και της διαμόρφωσης φερριτών με την υψηλότερη κατάταξη (γεννήτρια Teseq NSG 438)

Παράμετρος	Χωρίς χειριστή	Με χειριστή		Σενάριο 3 - MID	
		Τιμή	Απόκλιση από «Χωρίς χειριστή»	Τιμή	Απόκλιση από «Χωρίς χειριστή»
	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]
I_{P2}	8,724	8,736	0,138	8,500	-2,568
I_{30}	8,116	7,508	-7,491	7,456	-8,132
I_{60}	3,272	3,348	2,323	3,952	20,782

Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνεται περαιτέρω μέσω ευρύτερης σύγκρισης αντιπροσωπευτικών κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης και των αντίστοιχων φασμάτων συχνοτήτων και για τις τρεις γεννήτριες εκφόρτισης που εξετάζονται στη μελέτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.42. Για λόγους σύγκρισης, περιλαμβάνεται επίσης η ιδανική κυματομορφή που ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Εξετάζοντας τα φασματικά χαρακτηριστικά εντός της επισημασμένης περιοχής 10 – 25 MHz στο Σχήμα 4.42β — και συγκρίνοντάς τα με αυτά των Σχημάτων 4.35 και 4.41β — καθίσταται σαφές ότι οι γεννήτριες με περιορισμένο φασματικό περιεχόμενο σε αυτή τη ζώνη παρουσιάζουν ελάχιστη ευαισθησία σε επιδράσεις του χειριστή. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή φερριτών σε τέτοιες περιπτώσεις οδηγεί σε υπέρμετρη εξασθένηση, η οποία τελικά αλλοιώνει την κυματομορφή αντί να αναπαράγει με ακρίβεια την επίδραση του χειριστή.



Σχήμα 4.42: Κυματομορφές ρεύματος (α) και φάσματα συχνοτήτων (β) για τις 3 γεννήτριες εκφόρτισης και την κυματομορφή αναφοράς του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]

4.3.3.1. Γραμμικότητα της επίδρασης του χειριστή και της προσομοίωσης μέσω φερρίτη ως προς το επίπεδο τάσης δοκιμής

Μία κρίσιμη πτυχή τόσο της επίδρασης του χειριστή όσο και της μεθόδου αναπαραγωγής μέσω φερρίτη, η οποία δεν έχει ακόμη μελετηθεί επαρκώς, είναι η γραμμικότητά τους σε σχέση με την αυξανόμενη τάση δοκιμής. Καθώς και οι δύο μηχανισμοί δρουν ως εξασθενητικά στοιχεία για παρασιτικές ταλαντώσεις και συντονισμούς στο σύστημα της γεννήτριας εκφόρτισης — περιλαμβανομένης της ίδιας της γεννήτριας και της αντίστοιχης διάταξης καλωδίου γείωσης — η αποτελεσματικότητά τους αναμένεται να ποικίλλει ανάλογα με την ένταση αυτών των ταλαντώσεων. Η συμπεριφορά αυτή, η οποία συζητήθηκε στην Ενότητα 4.3.2, υποδεικνύει ότι η αξιολόγηση της γραμμικότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική για γεννήτριες εκφόρτισης που παρουσιάζουν έντονα παρασιτικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς, είναι αναγκαία μια λεπτομερής μελέτη της γραμμικότητας, προκειμένου να αξιολογηθεί η εξάρτηση από την τάση τόσο για τις επιδράσεις του χειριστή όσο και για τις αντίστοιχες μέσω φερριτών.

Για την αξιολόγηση της γραμμικότητας κάθε δείκτη της κυματομορφής ως προς την εφαρμοζόμενη τάση εκφόρτισης, υιοθετήθηκε μία αναλογική γραμμική προσαρμογή, με αναφορά στο επίπεδο των 2 kV. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε δείκτη ρεύματος (I_p , I_{p2} , I_{30} , I_{60}), η τιμή του στα 2 kV χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς και εφαρμόστηκε η εξής γραμμική σχέση:

$$y(V) = y_{2kV} \cdot \left(\frac{V}{2kV} \right) \quad (42)$$

όπου η παράμετρος $y(V)$ αντιστοιχεί στην αναμενόμενη τιμή του δείκτη για επίπεδο τάσης V , το y_{2kV} είναι η μετρούμενη τιμή του δείκτη στα 2 kV, το V είναι η τάση δοκιμής (εκφρασμένη σε kV), και τα $2kV$ αποτελούν την τάση βάσης για την αναλογική κλιμάκωση.

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόστηκε για όλο το εύρος τάσεων 2 έως 9 kV, απεικονίζοντας την ιδανική περίπτωση γραμμικής κλιμάκωσης με την τάση εκφόρτισης.

Για την ποσοτικοποίηση της ποιότητας προσαρμογής, υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 μεταξύ των μετρούμενων δεδομένων και του αναλογικού μοντέλου:

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_{measured} - y_{fit})^2}{\Sigma(y_{measured} - \bar{y})^2} \quad (43)$$

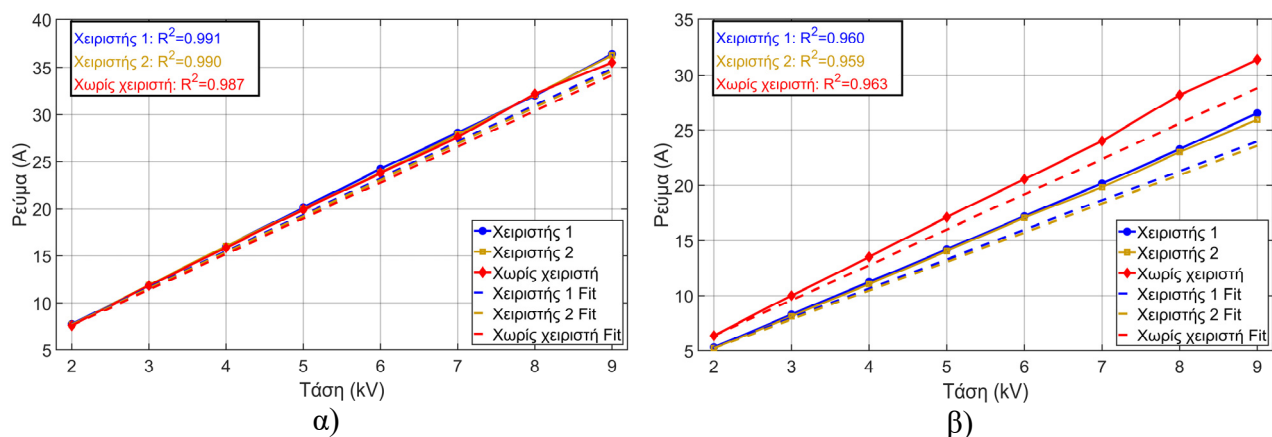
όπου R^2 είναι ο συντελεστής προσδιορισμού, που κυμαίνεται από 0 (καμία συσχέτιση μεταξύ τάσης και του δείκτη) έως 1 (τέλεια γραμμικότητα, δηλαδή όλα τα μετρούμενα σημεία ταυτίζονται ακριβώς με τη γραμμική προσαρμογή), το $y_{measured}$ είναι οι πραγματικές τιμές του δείκτη για διάφορα επίπεδα τάσης, το y_{fit} είναι οι αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται από το αναλογικό μοντέλο, και το $\bar{y}$ η μέση τιμή των μετρούμενων τιμών.

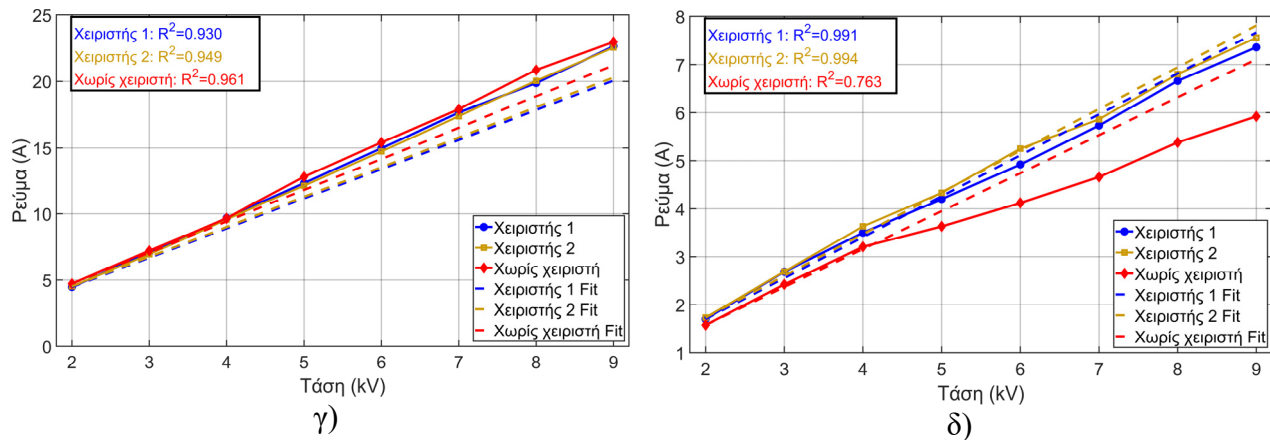
Υψηλές τιμές R^2 υποδεικνύουν ότι ο δείκτης κλιμακώνεται γραμμικά με την τάση, ενώ χαμηλές τιμές φανερώνουν αποκλίσεις από τη γραμμικότητα, συνήθως λόγω ανακλάσεων ή μη γραμμικής κατανομής ενέργειας στο σύστημα.

Επίδραση χειριστή

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για δύο διαφορετικούς χειριστές και για τη διάταξη «Χωρίς Χειριστή» (Χειριστής 1, Χειριστής 2 και Χωρίς Χειριστή), επιτρέποντας άμεση σύγκριση ως προς τη συνέπεια και τη γραμμική συμπεριφορά της κυματομορφής. Οι δύο χειριστές επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς σωματότυπους και δύναμη λαβής: ο Χειριστής 1 είχε ύψος 1,75 m και βάρος 60 kg, ενώ ο Χειριστής 2 είχε ύψος 1,85 m και βάρος 100 kg. Αυτή η διαφοροποίηση αποσκοπεί στη διερεύνηση της πιθανής επίδρασης των σωματικών χαρακτηριστικών στα παρασιτικά στοιχεία του συστήματος και, κατ' επέκταση, στη γραμμικότητα της κυματομορφής.

Τα Σχήματα 4.43α – 4.43β παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της γραμμικότητας για τη γεννήτρια EM Test Dito και για τους τέσσερις δείκτες της κυματομορφής. Για τους τρεις πρώτους δείκτες (I_p , I_{p2} και I_{30}), παρατηρήθηκε υψηλή γραμμικότητα σε όλες τις περιπτώσεις ($R^2 \geq 0,93$). Αντίθετα, για τον δείκτη I_{60} , η διαμόρφωση Χωρίς Χειριστή παρουσίασε σημαντικά χαμηλότερη γραμμικότητα ($R^2 = 0,763$), ενώ οι Χειριστές 1 και 2 πέτυχαν σαφώς υψηλότερες τιμές ($R^2 = 0,991$ και $0,994$ αντίστοιχα). Αυτό υποδεικνύει ότι η παρουσία του χειριστή μειώνει τις παρασιτικές ταλαντώσεις και βελτιώνει σημαντικά τη σταθερότητα της κλιμάκωσης για τον συγκεκριμένο δείκτη, όπως είχε ήδη φανεί στο Σχήμα 4.35.



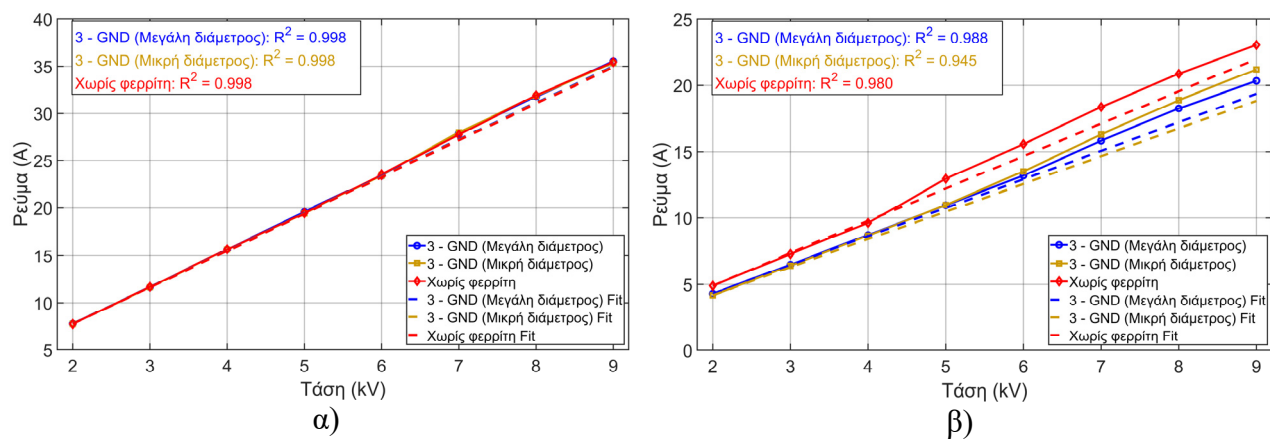


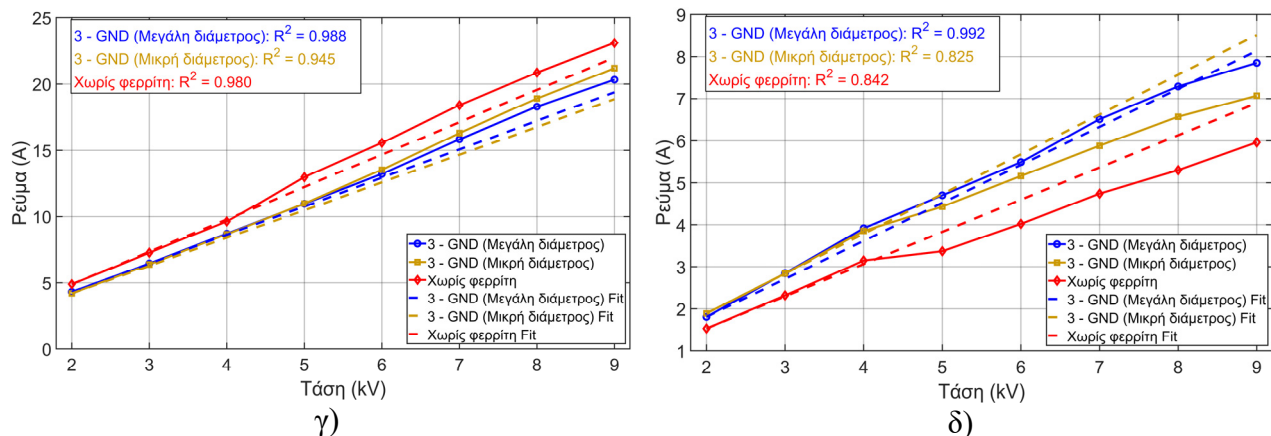
Σχήμα 4.43: Αποτελέσματα γραμμικότητας για τη γεννήτρια EM Test Dito: σύγκριση δύο διαφορετικών χειριστών και της διαμόρφωσης «Χωρίς Χειριστή» για (α) I_P , (β) I_{P2} , (γ) I_{30} και (δ) I_{60}

Προσομοίωση μέσω φερρίτη

Η ίδια μεθοδολογία προσαρμογής εφαρμόστηκε και για την αξιολόγηση της γραμμικότητας της μεθόδου προσομοίωσης μέσω φερρίτη. Χρησιμοποιήθηκαν φερρίτες Τύπου 3 με δύο διαφορετικές εσωτερικές διαμέτρους, τοποθετημένοι στη θέση GND (πλησίον του σημείου γείωσης) του καλωδίου γείωσης για τη γεννήτρια EM Test Dito. Οι επιλεγόμενες εσωτερικές διάμετροι ήταν 4,90 mm και 12,75 mm. Η σύγκριση αποσκοπεί στη διερεύνηση φαινομένων κορεσμού που μπορεί να προκύψουν λόγω των υψηλών ρευμάτων που χαρακτηρίζουν τις δοκιμές εκφόρτισης.

Τα Σχήματα 4.44α – 4.44δ παρουσιάζουν τα αποτελέσματα γραμμικότητας για τους ίδιους 4 δείκτες, επιτρέποντας άμεση σύγκριση μεταξύ των δύο διαμορφώσεων φερρίτη. Όπως και στην περίπτωση του χειριστή, οι δείκτες I_P , I_{P2} και I_{30} παρουσιάζουν υψηλή γραμμικότητα ($R^2 > 0,93$) και για τις δύο διαμέτρους. Ωστόσο, για τον δείκτη I_{60} , παρατηρείται αισθητή βελτίωση της γραμμικότητας μόνο για τον φερρίτη με τη μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρο, η οποία αντιστοιχεί και σε υψηλότερο ρεύμα κορεσμού. Πάνω από τα 4 kV, η απόδοση των δύο φερριτών αποκλίνει σημαντικά: η εξασθενητική ικανότητα του φερρίτη μικρότερης διαμέτρου υποβαθμίζεται ($R^2 = 0,825$), υποδεικνύοντας την εμφάνιση κορεσμού. Ενδείξεις κορεσμού εμφανίζονται επίσης — αν και σε μικρότερο βαθμό — και στους δείκτες I_{P2} και I_{30} .





Σχήμα 4.44: Αποτελέσματα γραμμικότητας για τη γεννήτρια εκφόρτισης EM Test Dito: σύγκριση λύσεων αναπαραγωγής μέσω φερρίτη, χρησιμοποιώντας φερρίτη Τύπου 3 διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου και της διαμόρφωσης «Χωρίς Χειριστή/Χωρίς Φερρίτη» για (α) I_p , (β) I_{P2} , (γ) I_{30} και (δ) I_{60} .

Πάνω από τα 6 kV, η επίδοση εξασθένησης του μικρότερου φερρίτη συνεχίζει να υπολείπεται σε σχέση με τον μεγαλύτερο. Αν και ο μεγαλύτερης διαμέτρου φερρίτης αρχίζει επίσης να εμφανίζει ενδείξεις κορεσμού — κυρίως στον δείκτη I_{60} — μετά τα 8 kV, η πρακτική του επίδραση είναι περιορισμένη. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2, η πλειονότητα των εφαρμογών για εμπορική και βιομηχανική χρήση καθορίζει ως ονομαστική τάση δοκιμής τα 4 kV, με μόνο λίγες απαιτήσεις να φτάνουν τα 8 kV. Συνεπώς, για τις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις δοκιμών, ο φερρίτης μεγαλύτερης διαμέτρου προσφέρει γραμμικότητα αντίστοιχη με αυτή του χειριστή και συνιστάται ισχυρά για χρήση σε τάσεις άνω των 4 kV.

4.3.4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επεκτείνει τη μεθοδολογία αναπαραγωγής της επίδρασης του χειριστή στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], εξετάζοντας τρεις διαφορετικές γεννήτριες εκφόρτισης και τέσσερις διατάξεις καλωδίου γείωσης. Η παρουσία του χειριστή, αν και δεν προβλέπεται ρητά από το Πρότυπο, μεταβάλλει σημαντικά την κυματομορφή της εκφόρτισης, ιδιαίτερα στο σκέλος της δεύτερης αιχμής, προκαλώντας αυξημένη μεταβλητότητα που επηρεάζει την επαναληψιμότητα των μετρήσεων και τη συνέπεια μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

Η ανάλυση κατέδειξε ότι οι δείκτες της πρώτης αιχμής, όπως η μέγιστη τιμή του ρεύματος (παράμετρος I_p) και ο χρόνος ανόδου (παράμετρος t_r), παραμένουν σταθεροί με αποκλίσεις μικρότερες του 0,5 %. Ωστόσο, οι παράμετροι του σκέλους της δεύτερης αιχμής παρουσίασαν σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες εξαρτώνται τόσο από τη διάταξη του καλωδίου γείωσης όσο και από τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας. Στη Διάταξη 2, η παράμετρος I_{P2} μειώθηκε περίπου κατά 20 %, ενώ στη Διάταξη 3 παρατηρήθηκε αύξηση άνω του 21 % στην παράμετρο I_{60} . Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στην αλλαγή της σύνθετης αντίστασης της διαδρομής επιστροφής του ρεύματος λόγω της ανθρώπινης παρουσίας, η οποία επηρεάζει τη μορφή και την ένταση των φαινομένων ταλαντώσεων στο δεύτερο σκέλος της κυματομορφής.

Για την αναπαραγωγή των παρατηρούμενων επιδράσεων, δοκιμάστηκαν δώδεκα συνδυασμοί τύπων φερρίτη αρπάγης και θέσεων τοποθέτησης. Ιδιαίτερα αποτελεσματικοί αποδείχθηκαν οι φερρίτες Τύπου 4 τοποθετημένοι στο μέσο του καλωδίου, οι οποίοι πέτυχαν πολύ χαμηλό Δείκτη Απόκλισης, όπως στη

Διάταξη 2, όπου η τιμή του περιορίστηκε στο 2,057 %, έναντι 3,906 % στη διαμόρφωση «Χωρίς Χειριστή». Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι, με ορθή επιλογή τύπου φερρίτη και θέσης τοποθέτησης, είναι δυνατή η αξιόπιστη αναπαραγωγή της ανθρώπινης επίδρασης, ιδίως σε διατάξεις που χαρακτηρίζονται από έντονα φαινόμενα ταλαντώσεων.

Αντιθέτως, σε γεννήτριες με πιο περιορισμένο φασματικό περιεχόμενο, η χρήση φερρίτη αρπάγης όχι μόνο δεν βελτίωσε την αναπαραγωγή, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις επέφερε ανεπιθύμητη εξασθένηση, καταδεικνύοντας ότι η στρατηγική αναπαραγωγής πρέπει να προσαρμόζεται στα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας. Η ανάλυση ευαισθησίας τύπου Monte Carlo έδειξε ότι οι φερρίτες Τύπου 3 και 4 διατηρούν σταθερά υψηλή απόδοση ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις των βαρών των δεικτών, στοιχείο που υπογραμμίζει τη φυσική τους καταλληλότητα για χρήση σε περιβάλλοντα δοκιμών με υψηλή πολυπλοκότητα.

Κεφάλαιο 5: Ρομποτικοί βραχίονες και ανθρώπινη επίδραση στις έμμεσες δοκιμές ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2

5.1. Ρομποτικοί βραχίονες και κυματομορφή ESD – προσομοίωση της επίδρασης του χειριστή

Η ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων ανέδειξε τη σημαντική επίδραση του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων και τις ιδιαιτερότητες των διαφορετικών διατάξεων του καλωδίου γείωσης. Η προσομοίωση της επίδρασης αυτής είναι απαραίτητη, αφενός για να διασφαλίζεται ότι η διακρίβωση αντικατοπτρίζει πιστά τις συνθήκες των πραγματικών δοκιμών, οι οποίες κατά κανόνα πραγματοποιούνται από χειριστή, και αφετέρου για να επιτυγχάνεται υψηλή διεργαστηριακή αναπαραγωγικότητα, διατηρώντας συγκρίσιμα τα αποτελέσματα μεταξύ δοκιμών με χειριστή και αυτοματοποιημένων συστημάτων, όπως οι ρομποτικοί βραχίονες.

Στην Ενότητα 4.2 παρουσιάστηκε η χρήση φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ως αναπαραγώγιμη μέθοδος προσομοίωσης της ανθρώπινης επίδρασης. Η προσέγγιση αυτή απέδειξε ικανότητα τροποποίησης της κυματομορφής, κυρίως ως προς τη δεύτερη αιχμή, υπό την παραδοχή ότι οι ρομποτικοί βραχίονες, όταν είναι κατασκευασμένοι από μη αγώγιμα υλικά, παρουσιάζουν ηλεκτρική συμπεριφορά ισοδύναμη με την περίπτωση «Χωρίς Χειριστή». Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μεταλλικοί βραχίονες για λόγους μηχανικής αντοχής και ακρίβειας, οι οποίοι μεταβάλλουν την σύνθετη αντίσταση του συστήματος και ενδέχεται να αλλοιώσουν την κυματομορφή, ακόμη και χωρίς άμεση σύνδεση με το επίπεδο αναφοράς γείωσης. Συνεπώς, η μέθοδος της Ενότητας 4.2 δεν επαρκεί σε περιπτώσεις χρήσης μεταλλικών βραχιόνων.

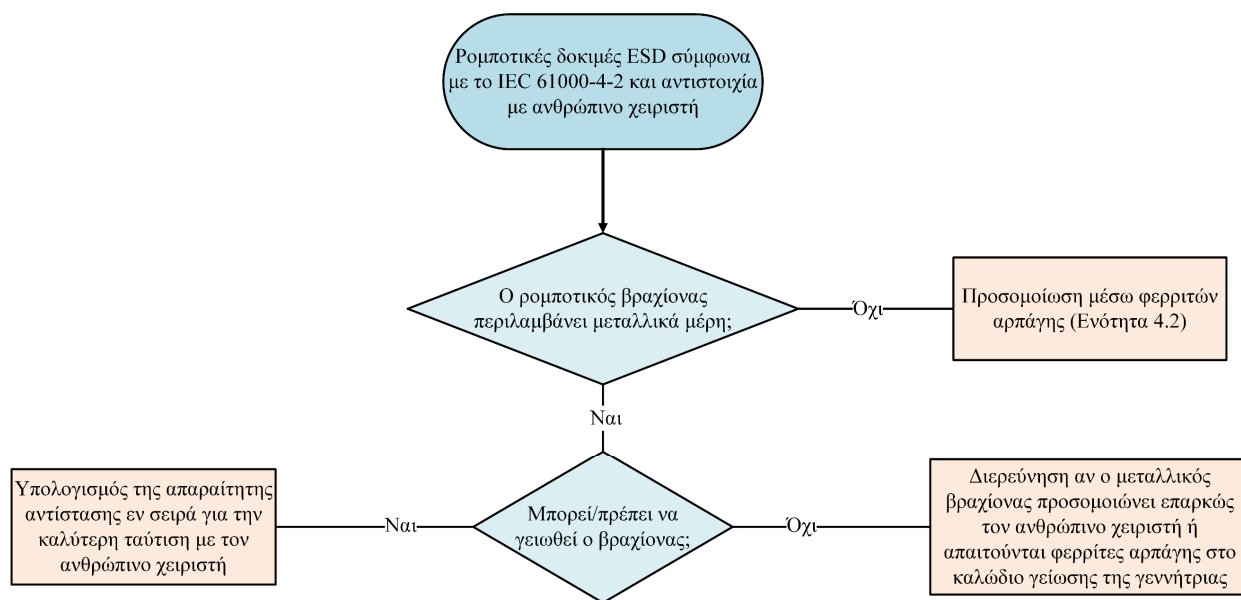
Η Ενότητα 5.1 επεκτείνει τη μεθοδολογία, εισάγοντας συστηματική προσέγγιση για την ποσοτικοποίηση και αναπαραγωγή της επίδρασης του χειριστή με μεταλλικούς βραχίονες. Προτείνονται δύο σενάρια: χρήση κατάλληλης αντίστασης γείωσης ή φερριτών αρπάγης. Επιπλέον, εισάγεται πρότυπη διάταξη διακρίβωσης με μεταλλικό βραχίονα και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ώστε να διασφαλίζεται η πιστή αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών δοκιμών και η διεργαστηριακή συνέπεια.

5.1.1. Προσομοίωση ρομποτικού βραχίονα και μεθοδολογία μέτρησης

Η ισοδυναμία της αυτοματοποιημένης ρομποτικής δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με την τυπική δοκιμή που πραγματοποιείται από ανθρώπινο χειριστή εξαρτάται πρωτίστως από το υλικό κατασκευής του ρομποτικού βραχίονα. Το Σχήμα 5.1 απεικονίζει τα διαφορετικά σενάρια και παρουσιάζει την προτεινόμενη λογική προσομοίωσης σε κάθε περίπτωση. Εφόσον το ρομποτικό χέρι και ο βραχίονας είναι κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από πλαστικό, μπορεί να εφαρμοστεί η προσέγγιση που περιγράφεται στην Ενότητα 4.2, κατά την οποία χρησιμοποιούνται φερρίτες αρπάγης γύρω από το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με στόχο την όσο το δυνατόν ακριβέστερη αναπαραγωγή της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή με μη παρεμβατικό και επαναλήψιμο τρόπο. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ο βραχίονας είναι μεταλλικής κατασκευής, η αγώγιμη αυτή δομή μπορεί

να επηρεάσει σημαντικά τη μορφή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, επιδρώντας καθοριστικά στην αναπαραγωγικότητα των δοκιμών μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

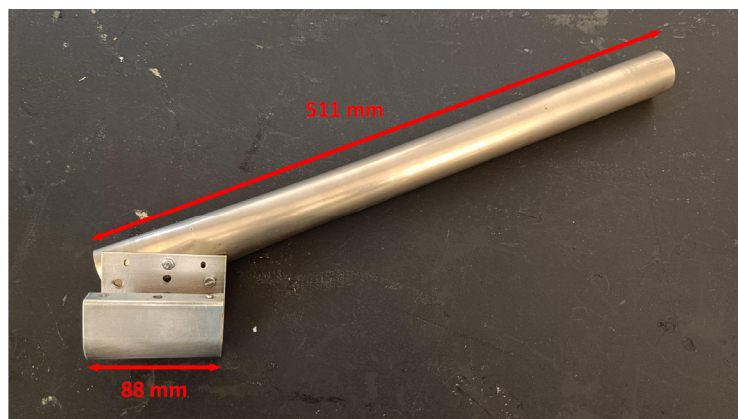
Σύμφωνα με το Σχήμα 5.1, προκύπτουν δύο διακριτά σενάρια όταν χρησιμοποιείται μεταλλική δομή. Το πρώτο σενάριο αφορά περιπτώσεις στις οποίες η δομή, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, πρέπει να γειωθεί. Στην περίπτωση αυτή διερευνάται η επίδραση της σύνδεσης γείωσης και, ειδικότερα, αν μία άμεση σύνδεση (περίπου μηδενικής αντίστασης — $\sim 0 \Omega$) προσομοιώνει επαρκώς την επίδραση του ανθρώπινου χειριστή ή αν είναι προτιμότερες διαφορετικές τιμές αντίστασης γείωσης. Στο δεύτερο σενάριο, η μεταλλική δομή του ρομποτικού χεριού ή βραχίονα παραμένει, είτε εκ σχεδιασμού είτε αναγκαστικά, χωρίς γείωση. Στην περίπτωση αυτή, εξετάζεται τόσο η επίδραση της μη γειωμένης μεταλλικής δομής, όσο και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοίωσης μέσω φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής για την ισοδυναμία του ανθρώπινου χειριστή με αυτοματοποιημένες δοκιμές

5.1.1.1. Χαρακτηριστικά κατασκευασμένου μεταλλικού χεριού και βραχίονα

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης κατασκευάστηκε μία μεταλλική δομή χεριού και βραχίονα, με σκοπό την προσομοίωση σεναρίων χρήσης μεταλλικών ρομποτικών βραχιόνων, προσεγγίζοντας παράλληλα τις διαστάσεις και τη στάση ενός ανθρώπινου πήχη και παλάμης. Το Σχήμα 5.2α και το Σχήμα 5.2β παρουσιάζουν αντίστοιχα την πρόσθια και την προοπτική πλευρική όψη της δομής. Το Σχήμα 5.2α απεικονίζει τις γραμμικές διαστάσεις των δύο επιμέρους υποδομών, ενώ το Σχήμα 5.2β τις αντίστοιχες διαστάσεις διατομής. Ένας κοίλος μεταλλικός σωλήνας μήκους 511 mm και διαμέτρου 40 mm, ο οποίος αναπαριστά τον ρομποτικό βραχίονα, συνδέεται με ημικυλινδρικό τμήμα μήκους 88 mm και πλάτους 45 mm. Η δομή κατασκευάστηκε από ορείχαλκο, κράμα χαλκού, το οποίο επελέγη λόγω της υψηλής μηχανικής ανθεκτικότητας και της σταθερότητάς του σε βάθος χρόνου.



α)



β)

Σχήμα 5.2: Απεικόνιση της κατασκευασμένης μεταλλικής δομής που προσομοιώνει τον ρομποτικό βραχίονα: α) πρόσθια όψη και β) προοπτική πλευρική όψη

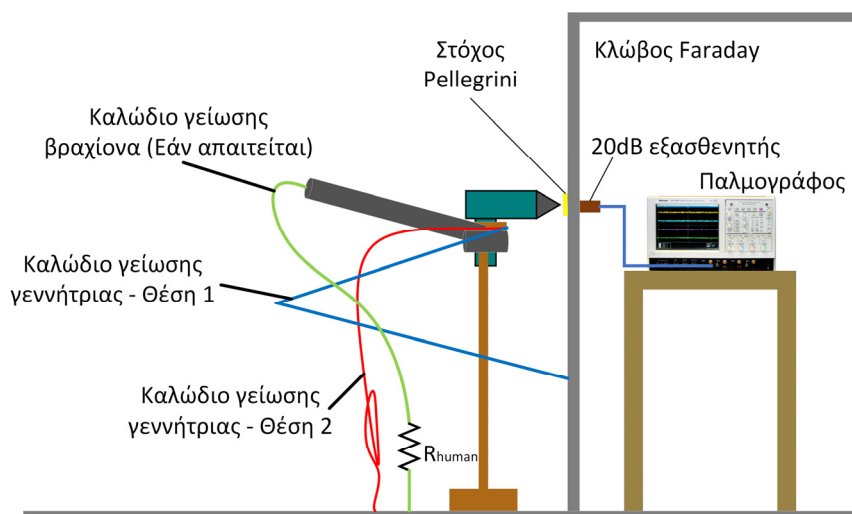
Ο ορείχαλκος σχηματίζει ένα σταθερό στρώμα οξειδίου, το οποίο δεν αλλοιώνει ουσιαστικά τις επιφανειακές του ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου, καθιστώντας τον ιδιαίτερα κατάλληλο για επαναλαμβανόμενη χρήση σε διατάξεις δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν δεν βασίστηκαν αυστηρά σε ανθρωπομετρικά δεδομένα, αλλά αποτελούν ένα πρακτικό σημείο εκκίνησης, προσεγγίζοντας τη γεωμετρία ενός τυπικού ρομποτικού βραχίονα και αντανakλώντας, σε γενικές γραμμές, τις αναλογίες ενός ανθρώπινου άκρου. Η φιλοσοφία σχεδιασμού της εν λόγω γεωμετρίας βασίζεται στα εξής χαρακτηριστικά:

... Απλότητα: Η δομή περιλαμβάνει μόλις δύο κύρια εξαρτήματα, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη κατασκευή της από οποιοδήποτε εργαστήριο και διευκολύνει την τυποποίησή της από την αρμόδια Τεχνική Επιτροπή, με σκοπό την ενσωμάτωσή της στη διαδικασία διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2, ιδιαιτέρως για γεννήτριες που προορίζονται για χρήση με μεταλλικούς ρομποτικούς βραχίονες.

... Επεκτασιμότητα: Η προτεινόμενη γεωμετρία, αποδίδοντας σε ικανοποιητικό βαθμό τον συνδυασμό ανθρώπινου χεριού και βραχίονα, μπορεί να αξιοποιηθεί στο πλαίσιο μελλοντικών ερευνητικών δραστηριοτήτων για τη διερεύνηση πιθανών σεναρίων επίδρασης του χειριστή, είτε σε συνδυασμό με την προσέγγιση που βασίζεται στη χρήση φερριτών αρπάγης, όπως περιεγράφη στην Ενότητα 4.2, είτε ως εναλλακτική αυτής.

5.1.1.2. Γενική διάταξη μέτρησης και μεθοδολογία

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Η διάταξη αυτή ακολουθεί κατά βάση τη διαδικασία διακρίβωσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπως καθορίζεται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Σύμφωνα με αυτή, η γεννήτρια τοποθετείται σε μη αγώγιμη βάση και οι εκφορτίσεις εφαρμόζονται σε στόχο (ανιχνευτή) ρεύματος ονομαστικής αντίστασης $2,1 \Omega$ (στόχος Pellegrini). Ο στόχος (ομοαξονικός προσαρμογέας) αυτός είναι προσαρτημένος σε μεγάλη κάθετη αγώγιμη επιφάνεια και συνδέεται μέσω εξασθενητή 20 dB με παλμογράφο τοποθετημένο εντός κλωβού Faraday, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο μετρούμενο ρεύμα. Σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μήκους δύο μέτρων, πρέπει να σχηματίζει ισοσκελές τρίγωνο, με το σημείο κάμψης στο μέσον του και να συνδέεται με την κατακόρυφη αγώγιμη επιφάνεια σε ύψος πενήντα εκατοστών από το επίπεδο αναφοράς γης (Θέση 1 στο Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Σενάρια μέτρησης για δύο διαφορετικές διατάξεις τοποθέτησης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Θέση 1 και Θέση 2)

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης εξετάστηκε επιπλέον μία εναλλακτική διάταξη τοποθέτησης του καλωδίου γείωσης, προσομοιώνοντας ρεαλιστικό σενάριο δοκιμής ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπου το καλώδιο συνδέεται αυθαίρετα στο επίπεδο αναφοράς γης, με τη μόνη απαίτηση το επιπλέον μήκος να παραμένει εκτός του επιπέδου. Στη διάταξη αυτή (Θέση 2 στο Σχήμα 5.3) το καλώδιο διπλώθηκε και τοποθετήθηκε επάνω σε ξύλινη βάση υπό γωνία, αναπαριστώντας την παρουσία δοκιμαστικού τραπεζιού.

Στην τελική έκδοση της αναθεωρημένης IEC 61000-4-2, η οποία δημοσιεύθηκε στις 7 Μαρτίου 2025 [27], η αναδίπλωση του καλωδίου γείωσης δεν επιτρέπεται. Ωστόσο, η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, δεδομένου ότι επηρεάζει σημαντικά την σύνθετη αντίσταση του καλωδίου και, επομένως, αντιπροσωπεύει μία οριακή περίπτωση, μέσω της οποίας αναδεικνύεται η καθολικότητα των ευρημάτων της μελέτης. Επιπλέον, η εν λόγω διάταξη εφαρμόζεται σε πολλά εργαστήρια για περισσότερα από δεκαπέντε έτη και θα συνεχίσει να επιτρέπεται έως την ημερομηνία υποχρεωτικής εφαρμογής των αναθεωρημένων εκδόσεων (2027).

Η μεταλλική δομή χεριού και βραχίονα προσαρτήθηκε στη χειρολαβή της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το σενάριο του γειωμένου βραχίονα χρησιμοποιήθηκε καλώδιο γείωσης μήκους 1,5 μέτρων μεταξύ του άκρου του βραχίονα και του επιπέδου αναφοράς γης.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, προερχόμενες από διαφορετικούς κατασκευαστές:

... Η EMTEST Dito, η οποία τροφοδοτείται από μπαταρία, και

... Η Teseq NSG 438, η οποία τροφοδοτείται από εξωτερικό τροφοδοτικό

Κατά τη διάρκεια κάθε σειρά μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν είκοσι (20) εκφορτίσεις, με τις γεννήτριες ρυθμισμένες σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής σε επίπεδο τάσης +4 kV. Ως εξοπλισμός μέτρησης χρησιμοποιήθηκε παλμογράφος Tektronix TDS7254B, εύρους ζώνης 2,5 GHz και ρυθμού δειγματοληψίας 20 GSa/s, καθώς και ο ομοαξονικός προσαρμογέας Teseq MD103 (στόχος Pellegrini και εξασθενητής 20 dB), προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας. Η διάταξη παρέμεινε αμετάβλητη μεταξύ των διαδοχικών εκφορτίσεων.

Για τις περιπτώσεις χωρίς χειριστή, οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης λειτούργησαν σε αυτόματη λειτουργία εκφόρτισης, εφαρμόζοντας παλμούς ανά πέντε δευτερόλεπτα. Στην περίπτωση «Με Χειριστή», ο χειριστής ενεργοποιούσε χειροκίνητα είκοσι εκφορτίσεις, επίσης ανά πέντε δευτερόλεπτα, κρατώντας τη γεννήτρια όσο το δυνατόν σταθερότερα, προκειμένου να μειωθούν οι διακυμάνσεις λόγω κινήσεων του χεριού.

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες υπολογίστηκαν για κάθε μέση κυματομορφή ρεύματος. Οι παράμετροι I_p , t_r , I_{30} και I_{60} καθορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 τόσο στη 2^η Έκδοση (2008) [26] όσο και στην 3^η Έκδοση (2025) [27], ενώ η παράμετρος I_{p2} αποτελεί νέα προσθήκη που καθορίζει περαιτέρω τη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι παράμετροι $I_{P(2-10ns)}$ και $I_{M(2-10ns)}$ χρησιμοποιούνται στην παρούσα ενότητα για τη διερεύνηση του χρονικού παραθύρου 2 – 10 ns (διαστήματος μεταξύ των δύο κορυφών της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης), το οποίο, όπως συζητείται στην Ενότητα 4.2, επηρεάζεται ιδιαίτερα από το χέρι του χειριστή και, κατ' επέκταση, από την παρουσία μεταλλικού βραχίονα.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης / δείκτες αξιολόγησης

Δείκτης	Περιγραφή	Σχόλια
I_p	Μέγιστη τιμή της αρχικής αιχμής του ρεύματος	Καθορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 ED2 και ED3
t_r	Χρόνος ανόδου 10%-90% της αρχικής αιχμής	
I_{p2}	Μέγιστη τιμή του ρεύματος στο χρονικό παράθυρο μεταξύ 10 ns και 40 ns από τη στιγμή που το ρεύμα έφτασε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του	Εισήχθη στο πρότυπο IEC 61000-4-2 ED3
I_{30}	Τιμή του ρεύματος στα 30 ns από τη στιγμή που το ρεύμα έφτασε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του	Καθορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 ED2 και ED3
I_{60}	Τιμή του ρεύματος στα 60 ns από τη στιγμή που το ρεύμα έφτασε για πρώτη φορά το 10% της μέγιστης τιμής του	
$I_{P(2-10ns)}$	Μέγιστη τιμή του ρεύματος στο χρονικό παράθυρο 2 – 10 ns	Δεν καθορίζεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2, εισάγεται στην παρούσα μελέτη
$I_{M(2-10ns)}$	Μέση τιμή του ρεύματος στο χρονικό παράθυρο 2 – 10 ns	

5.1.1.3. Μεθοδολογία αξιολόγησης αποτελεσμάτων βάσει σταθμισμένων υπολογισμένων παραμέτρων κυματομορφής ESD

Οι επτά (7) προαναφερθείσες παράμετροι κυματομορφής χρησιμοποιούνται περαιτέρω ως δείκτες αξιολόγησης για την ποσοτική εκτίμηση της ομοιότητας μεταξύ κάθε διάταξης δοκιμής και της κυματομορφής που καταγράφεται με την παρουσία χειριστή. Παράλληλα, αξιοποιούνται για τον υπολογισμό του Δείκτη Απόκλισης σύμφωνα με τις Εξισώσεις (38) και (39) της Ενότητας 4.3.1.2.

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τις μη κανονικοποιημένες τιμές βαρών w_k που αποδόθηκαν σε κάθε παράμετρο για τις δύο διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η επιλογή των τιμών αυτών βασίστηκε στη διακύμανση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της κυματομορφής.

Πίνακας 5.2: Μη κανονικοποιημένες τιμές βαρών (w_k) για τις δύο γεννήτριες ESD

Δείκτης	Τιμές βαρών (w_k)	
	EMTEST Dito	TESEQ NSG 438
I_P	2	2
t_r	1	1
I_{P2}	2	2
I_{30}	1	2
I_{60}	1	1
$I_{P(2-10ns)}$	2	1
$I_{M(2-10ns)}$	2	1

Στον Πίνακα 5.3 επισημαίνονται με έντονη γραφή οι παράμετροι που επηρεάζονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10 % από την παρουσία του χειριστή. Στις παραμέτρους αυτές, καθώς και στην παράμετρο I_P (η οποία αφορά την πρώτη μέγιστη αιχμή ρεύματος και παρουσιάζει σημαντική επίδραση), αποδόθηκε υψηλότερη τιμή βάρους (2).

Πίνακας 5.3: Επίδραση του ανθρώπινου χειριστή στις παραμέτρους κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για δύο γεννήτριες και δύο διαφορετικές διατάξεις του καλωδίου γείωσης

Γεννήτρια	Θέση καλωδίου	Σενάριο	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}	$I_{P2-10ns}$	$I_{M2-20ns}$
			[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
Dito	1	Με χειριστή	16,02	0,886	11,10	9,272	3,436	10,18	7,030
		Χωρίς χειριστή	15,45	0,886	12,85	9,176	3,184	8,496	5,535
	2	Με χειριστή	16,00	0,885	11,62	9,808	3,332	9,980	6,454
		Χωρίς χειριστή	15,86	0,886	12,38	10,40	3,004	8,200	4,974
NSG 438	1	Με χειριστή	14,44	0,862	8,500	8,240	3,868	7,092	6,134
		Χωρίς χειριστή	14,31	0,849	8,944	8,944	3,716	6,992	5,829
	2	Με χειριστή	14,40	0,852	8,572	8,572	4,044	6,884	6,132
		Χωρίς χειριστή	14,19	0,845	9,544	9,420	3,868	6,692	5,638

Η επίδραση του ανθρώπινου χειριστή διαφοροποιείται μεταξύ διαφορετικών γεννητριών λόγω παραμέτρων σχεδιασμού, όπως η τοπολογία του κυκλώματος εκφόρτισης, τα στοιχεία διαμόρφωσης της κυματομορφής και η εσωτερική διαμόρφωση της διαδρομής επιστροφής του ρεύματος. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν τον βαθμό ευαισθησίας κάθε γεννήτριας σε μεταβολές της εξωτερικής σύνθετης

αντίστασης, καθώς και στην ηλεκτρομαγνητική σύζευξη που προκαλείται από την εγγύτητα του ανθρώπινου σώματος.

Στην περίπτωση της γεννήτριας EM Test Dito, οι δείκτες I_{P_2} , $I_{P(2-10\text{ ns})}$ και $I_{M(2-10\text{ ns})}$ παρουσίασαν εντονότερη επίδραση από τον χειριστή και τους αποδόθηκαν υψηλότερες τιμές βαρών. Αντίστοιχα, για τη γεννήτρια Teseq NSG 438, οι δείκτες I_{P_2} και I_{30} εμφάνισαν αξιοσημείωτη επίδραση από την παρουσία του χειριστή και τους αποδόθηκαν επίσης αυξημένες τιμές βαρών. Παρά το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες τιμές βαρών διαφέρουν μεταξύ των δύο γεννητριών, το σκεπτικό απόδοσής τους βασίζεται σε παρατήρηση των επηρεαζόμενων παραμέτρων και παραμένει εφαρμόσιμο και σε άλλες γεννήτριες εκφόρτισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που συμμορφώνονται με το Πρότυπο.

Οι αποκλίσεις μεγαλύτερες του 10%, που καταγράφονται στον Πίνακα 5.3, χρησιμοποιήθηκαν ως πρακτικό όριο για τον εντοπισμό δεικτών της κυματομορφής που επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία του ανθρώπινου χειριστή. Παρότι οι μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χαρακτηρίζονται τυπικά από μειωμένη επαναληψιμότητα, κάθε τιμή στον συγκεκριμένο πίνακα αποτελεί μέσο όρο είκοσι (20) εκφορτίσεων, γεγονός που μειώνει την επίδραση τυχαίων διακυμάνσεων. Η αβεβαιότητα επαναληψιμότητας, όπως ποσοτικοποιήθηκε υπό ελεγχόμενες συνθήκες στην Ενότητα 4.2, είναι τυπικά σημαντικά μικρότερη — έως και 0,134% για τις παραμέτρους της πρώτης αιχμής (I_P , t_r) και έως και 0,246% για τις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής (I_{P_2} , I_{30} , I_{60}) — γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι παρατηρούμενες αποκλίσεις δεν αποδίδονται σε ζητήματα επαναληψιμότητας.

Οι δείκτες που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις, όπως οι I_{P_2} και $I_{M(2-10\text{ ns})}$, συνδέονται άμεσα με τη διαδρομή επιστροφής του ρεύματος και με φαινόμενα υψηλών συχνοτήτων. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζονται από τη σύνθετη αντίσταση του ανθρώπινου σώματος και την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη του με γειτονικές μεταλλικές δομές, οι οποίες μεταβάλλουν τη διανομή του ρεύματος και το προφίλ της σύνθετης αντίστασης της διάταξης εκφόρτισης.

Παρόλο που δεν πραγματοποιήθηκε επίσημος στατιστικός έλεγχος υποθέσεων, η ύπαρξη αποκλίσεων σε φυσικά σημαντικούς δείκτες σε πολλαπλές διατάξεις υποδεικνύει ουσιαστική επίδραση από τον ανθρώπινο χειριστή. Μελλοντικές μελέτες μπορούν να επεκτείνουν τα ευρήματα αυτά, ενσωματώνοντας διαστήματα εμπιστοσύνης ή στατιστικούς ελέγχους.

5.1.2. Μετρήσεις και αποτελέσματα αξιολόγησης

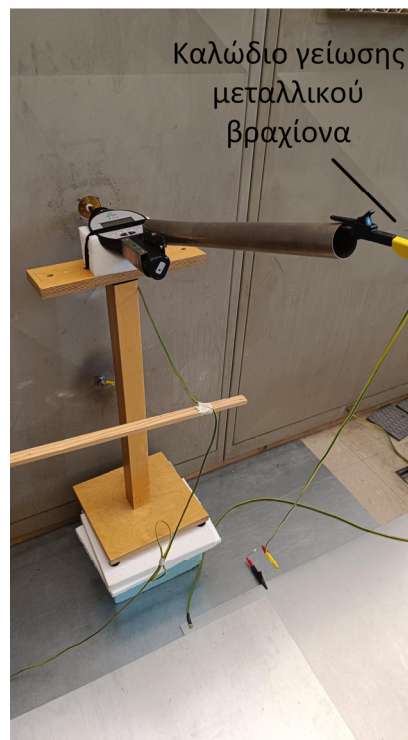
Τα πειραματικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν το μέσο ρεύμα που καταγράφηκε για κάθε εξεταζόμενο σενάριο, καθώς και τις αντίστοιχες τιμές των επτά δεικτών του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που έχουν ήδη αναφερθεί.

5.1.2.1. Διάταξη με γειωμένο μεταλλικό βραχίονα

Η διάταξη μέτρησης για το σενάριο του γειωμένου μεταλλικού βραχίονα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4. Ένα καλώδιο γείωσης μήκους 1,2 m συνδέει το άκρο του μεταλλικού βραχίονα με το επίπεδο αναφοράς γης. Το Σχήμα 5.4α απεικονίζει τη διάταξη με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq NSG 438, της οποίας το καλώδιο γείωσης είναι διαμορφωμένο σύμφωνα με τη διαδικασία διακρίβωσης του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] («Θέση 1»).



α)

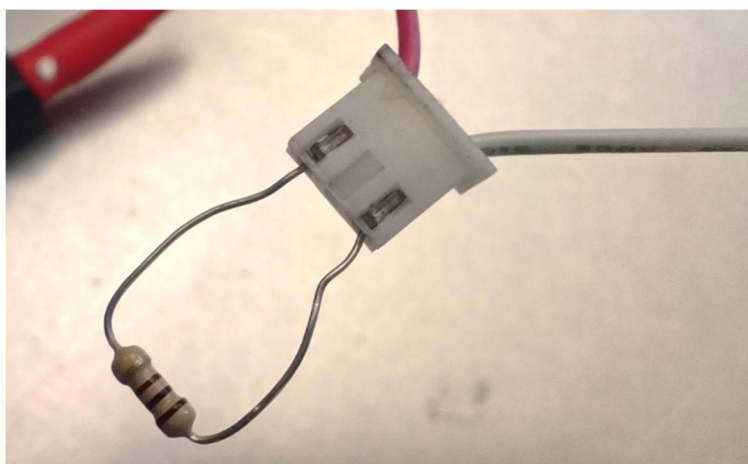


β)

Σχήμα 5.4: Διάταξη μέτρησης για το σενάριο γειωμένου μεταλλικού βραχίονα: α) Teseq NSG 438 με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε «Θέση 1» και β) EMTEST Dito με το καλώδιο γείωσης σε «Θέση 2».

Αντιθέτως, το Σχήμα 5.4β παρουσιάζει τη γεννήτρια EM Test Dito, με το καλώδιο γείωσης αναδιπλωμένο και τοποθετημένο κατά τρόπο που προσομοιώνει πρακτικές τυπικής δοκιμής ατρωσίας επιτραπέζιου εξοπλισμού, επίσης συνδεδεμένο στο επίπεδο αναφοράς γης («Θέση 2»).

Σε όλες τις διατάξεις δοκιμής (δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης × δύο διατάξεις καλωδίου γείωσης), τοποθετήθηκε ένας σύνδεσμος δύο ακίδων σε σειρά με το καλώδιο γείωσης του βραχίονα, κοντά στο σημείο σύνδεσης με το επίπεδο αναφοράς γης. Ο σύνδεσμος αυτός επέτρεψε την εισαγωγή αντιστάσεων διαφόρων τιμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Αντίσταση στο καλώδιο γείωσης του μεταλλικού βραχίονα

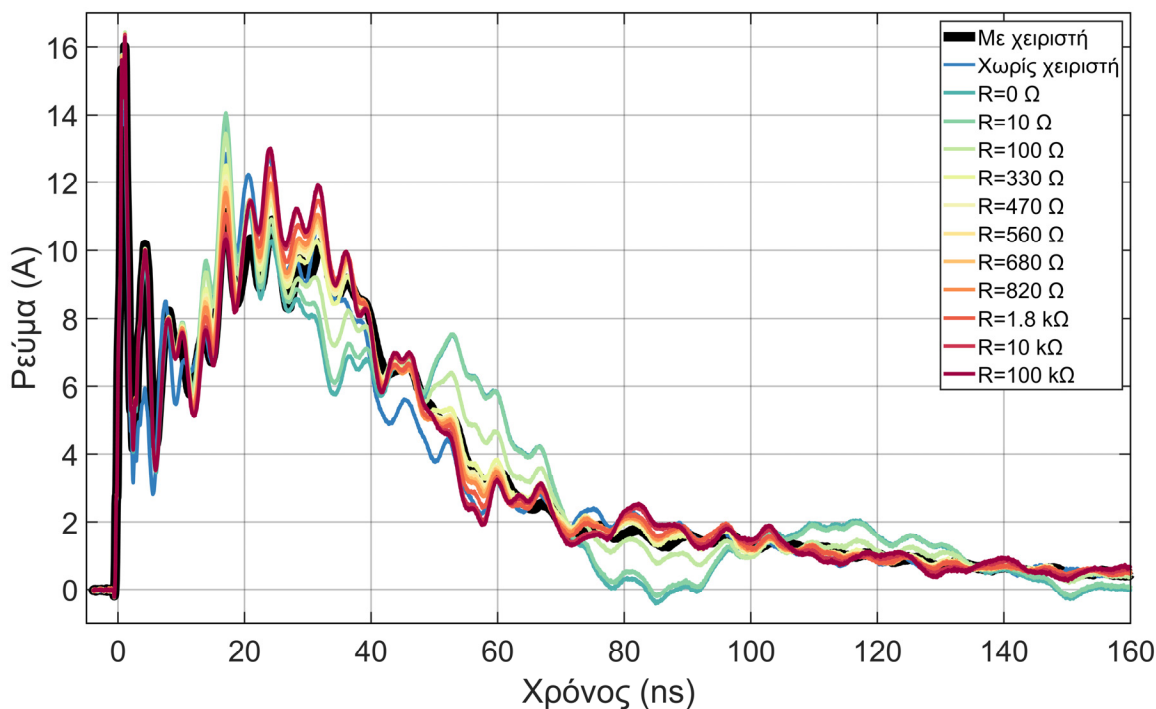
Οι τιμές των αντιστάσεων, που παρατίθενται στον Πίνακα 5.4, κυμαίνονται από 10 Ω έως 100 kΩ και επιλέχθηκαν ώστε να αντιστοιχούν σε τυποποιημένα, εμπορικά διαθέσιμα εξαρτήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργαστήρια δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Για την αξιολόγηση της βασικής περίπτωσης άμεσης σύνδεσης, χρησιμοποιήθηκε απλός αγωγός στη θέση της αντίστασης, προσομοιώνοντας την περίπτωση μηδενικής αντίστασης ($\sim 0 \Omega$) μεταξύ του μεταλλικού βραχίονα και του επιπέδου αναφοράς γης.

Πίνακας 5.4: Τιμές αντιστάσεων που διερευνήθηκαν για τη διάταξη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα

Τιμές αντιστάσεων	10Ω, 100Ω, 330 Ω, 470 Ω, 560 Ω, 680Ω, 820 Ω, 1,8 kΩ, 10 kΩ, 100 kΩ
-------------------	--

Πρόσθετες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα σενάρια μέτρησης και χωρίς τη χρήση του μεταλλικού βραχίονα: μία με ανθρώπινο χειριστή να εκτελεί χειροκίνητα τις εκφορτίσεις στον στόχο Pellegrini και μία χωρίς ανθρώπινη παρουσία. Η περίπτωση «Με Χειριστή» θεωρήθηκε ως κυματομορφή αναφοράς, έναντι της οποίας αξιολογούνται τα υπόλοιπα σενάρια μέσω του Δείκτη Απόκλισης. Η περίπτωση «Χωρίς Χειριστή» αντιστοιχεί στη συνθήκη διακρίβωσης, όπως ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27].

Ο βασικός στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η χρήση μεταλλικού βραχίονα, σε συνδυασμό με αντίσταση σε σειρά, μπορεί να προσομοιώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κυματομορφή που προκύπτει κατά την εκφόρτιση από ανθρώπινο χειριστή, σε σύγκριση με την κατάσταση «Χωρίς Χειριστή» που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Επιπλέον, διερευνάται ποια τιμή αντίστασης επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή με την κυματομορφή του χειριστή.

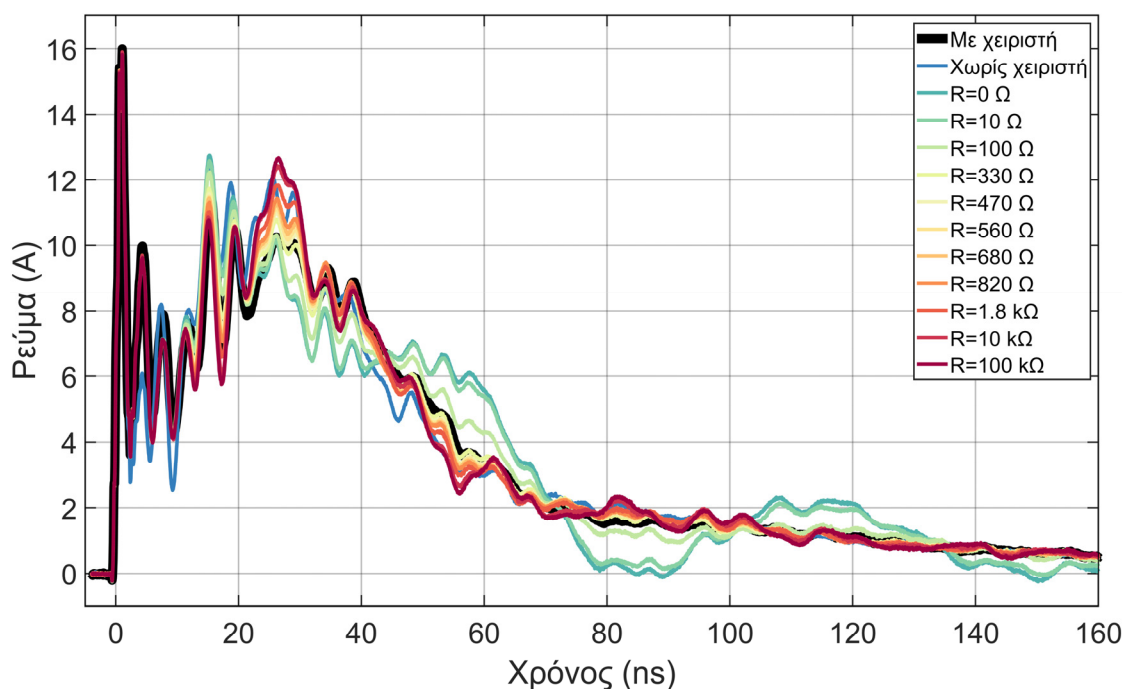


Σχήμα 5.6: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές τιμές αντίστασης στο καλώδιο γείωσης του βραχίονα για τη γεννήτρια EM Test Dito με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαμορφωμένο στη «Θέση 1»

Πίνακας 5.5: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την αντίσταση γείωσης του βραχίονα – EM Test Dito, καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε «Θέση 1»

Σενάριο	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{P2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	16,02	0,886	11,10	9,272	3,436	10,18	7,030	-
Χωρίς χειριστή	15,45	0,886	12,85	9,176	3,184	8,496	5,535	11,14
R = 0 Ω	15,84	0,884	13,68	8,056	5,800	9,740	6,675	13,58
R = 10 Ω	16,36	0,886	14,06	8,420	5,768	10,05	6,889	12,84
R = 100 Ω	16,44	0,887	13,45	8,972	4,636	10,04	6,875	8,464
R = 330 Ω	16,39	0,885	12,51	9,700	3,824	10,04	6,857	4,872
R = 470 Ω	16,36	0,887	12,19	9,936	3,632	10,04	6,853	4,069
R = 560 Ω	16,30	0,888	12,03	10,04	3,548	10,03	6,846	3,667
R = 680 Ω	16,30	0,887	11,86	10,14	3,492	10,01	6,839	3,378
R = 820 Ω	16,24	0,885	11,98	10,19	3,460	10,01	6,838	3,458
R = 1.8 kΩ	16,18	0,883	12,43	10,44	3,284	9,980	6,823	4,814
R = 10 kΩ	16,37	0,889	12,90	10,60	3,196	10,01	6,799	6,201
R = 100 kΩ	16,29	0,888	13,01	10,60	3,212	9,992	6,793	6,294

Τα Σχήματα 5.6 και 5.7 απεικονίζουν τις καταγεγραμμένες κυματομορφές για τη γεννήτρια EMTEST Dito στις διατάξεις του καλωδίου γείωσης «Θέση 1» και «Θέση 2» αντίστοιχα, ενώ οι Πίνακες 5.5 και 5.6 παρουσιάζουν τους μετρούμενους δείκτες για τη κυματομορφή εκφόρτισης και τον υπολογιζόμενο Δείκτη Απόκλισης από την κυματομορφή αναφοράς («Με Χειριστή») για την κυματομορφή χωρίς χειριστή, καθώς και για όλες τις τιμές αντίστασης του Πίνακα 5.4, περιλαμβανομένης της περίπτωσης άμεσης σύνδεσης (~0 Ω).

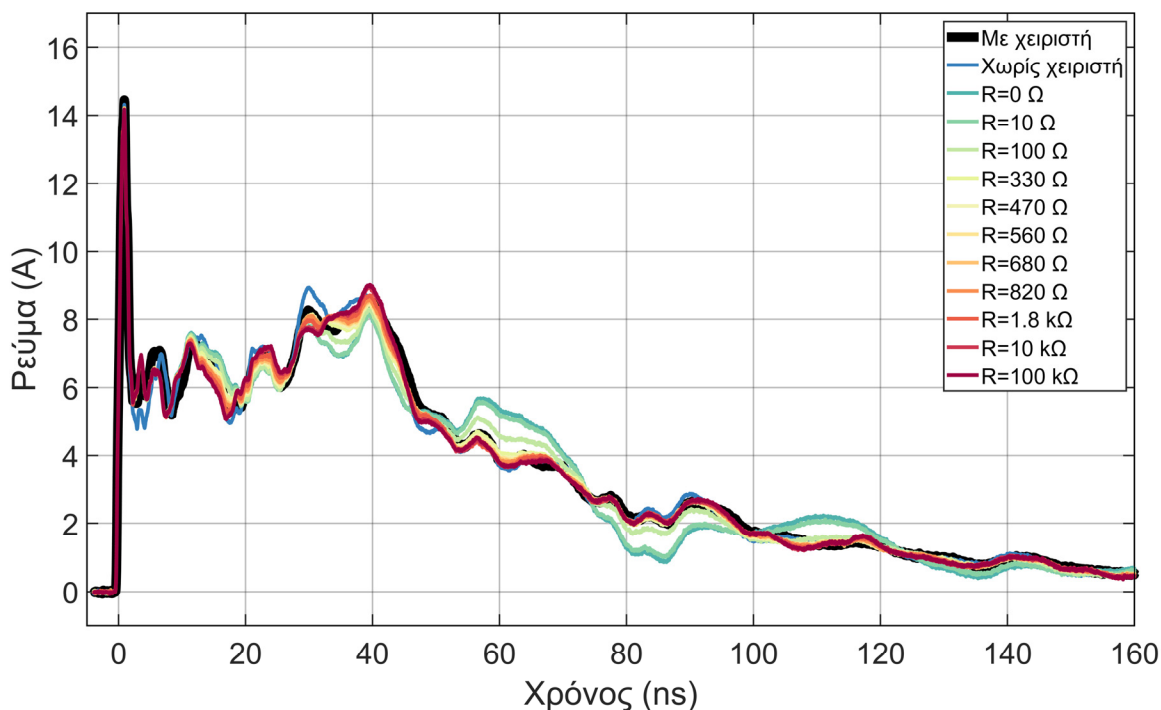


Σχήμα 5.7: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές τιμές αντίστασης στο καλώδιο γείωσης του βραχίονα για τη γεννήτρια EM Test Dito με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαμορφωμένο στη «Θέση 2»

Πίνακας 5.6: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την αντίσταση γείωσης του βραχίονα – EM Test Dito, καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε «Θέση 2»

Σενάριο	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{P2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	16,02	0,886	11,10	9,272	3,436	10,18	7,030	-
Χωρίς χειριστή	15,86	0,886	12,38	10,40	3,004	8,200	4,974	10,21
R = 0 Ω	15,84	0,886	12,76	8,004	5,556	9,664	6,075	11,35
R = 10 Ω	15,83	0,884	12,59	8,152	5,412	9,664	6,083	10,55
R = 100 Ω	15,84	0,883	12,24	8,788	4,300	9,620	6,081	6,457
R = 330 Ω	15,85	0,885	11,74	9,768	3,468	9,692	6,069	2,367
R = 470 Ω	15,84	0,886	11,58	10,06	3,356	9,668	6,070	2,195
R = 560 Ω	15,83	0,887	11,49	10,21	3,260	9,624	6,068	2,718
R = 680 Ω	15,85	0,885	11,44	10,34	3,232	9,636	6,068	2,926
R = 820 Ω	15,89	0,886	11,44	10,48	3,168	9,692	6,061	3,134
R = 1.8 kΩ	15,83	0,884	11,84	10,79	3,120	9,640	6,058	3,762
R = 10 kΩ	15,90	0,888	12,44	11,03	3,204	9,680	6,053	4,576
R = 100 kΩ	15,82	0,886	12,68	11,09	3,180	9,612	6,052	5,272

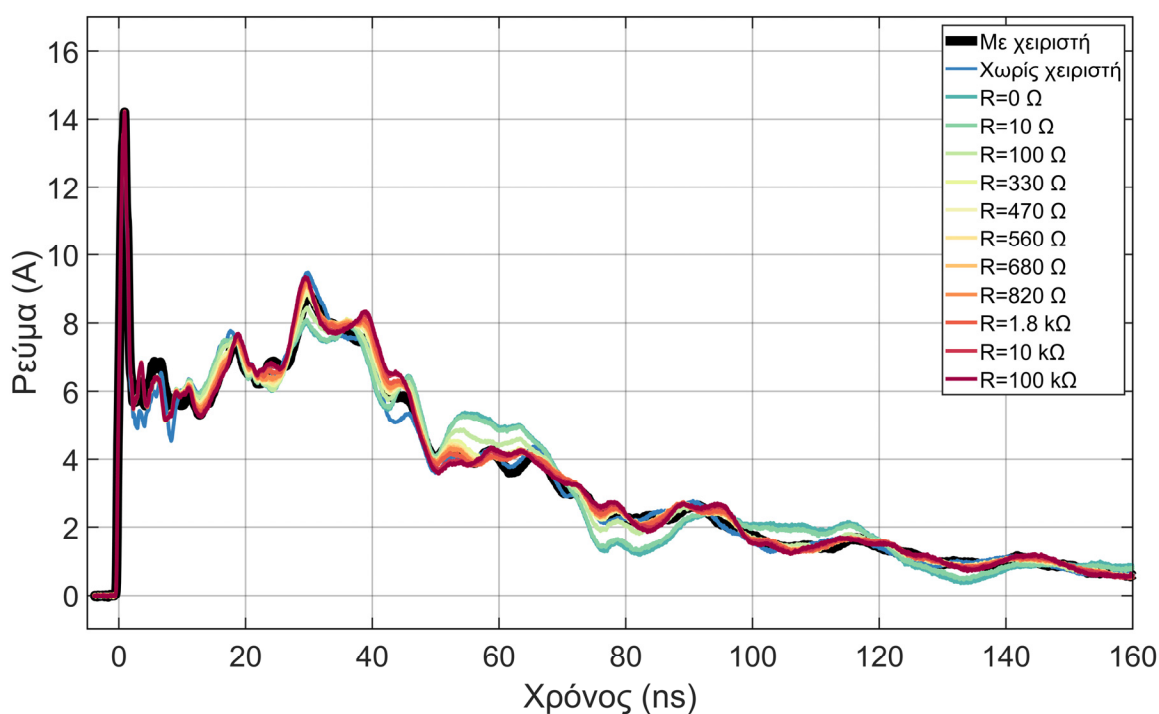
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.8, 5.9, καθώς και στους Πίνακες 5.7 και 5.8.



Σχήμα 5.8: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές τιμές αντίστασης στο καλώδιο γείωσης του βραχίονα για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαμορφωμένο στη «Θέση 1»

Πίνακας 5.7: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την αντίσταση γείωσης του βραχίονα – Teseq NSG 438, καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε «Θέση 1»

Σενάριο	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{P2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	14,44	0,862	8,500	8,240	3,868	7,092	6,134	-
Χωρίς χειριστή	14,31	0,849	8,944	8,944	3,716	6,992	5,829	4,114
R = 0 Ω	14,16	0,846	8,144	7,784	5,332	6,932	6,059	6,648
R = 10 Ω	14,08	0,847	8,128	7,796	5,168	6,900	6,026	6,440
R = 100 Ω	14,07	0,842	8,288	7,944	4,576	6,872	6,023	4,286
R = 330 Ω	14,21	0,848	8,440	8,068	4,088	6,916	6,029	2,032
R = 470 Ω	14,12	0,849	8,480	8,052	3,964	6,896	6,018	1,818
R = 560 Ω	14,05	0,843	8,496	8,092	3,936	6,916	6,026	1,731
R = 680 Ω	14,22	0,853	8,568	8,084	3,880	6,904	6,032	1,423
R = 820 Ω	14,18	0,849	8,604	8,064	3,856	6,912	6,031	1,635
R = 1.8 kΩ	14,12	0,845	8,716	7,932	3,760	6,920	6,027	2,598
R = 10 kΩ	14,10	0,846	8,964	7,772	3,772	6,900	6,028	3,577
R = 100 kΩ	14,17	0,852	9,024	7,680	3,792	6,968	6,032	3,617



Σχήμα 5.9: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές τιμές αντίστασης στο καλώδιο γείωσης του βραχίονα για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαμορφωμένο στη «Θέση 2»

Πίνακας 5.8: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την αντίσταση γείωσης του βραχίονα – Teseq NSG 438, καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε «Θέση 2»

Σενάριο	I_P	t_r	I_{P2}	I_{30}	I_{60}	$I_{P2-10ns}$	$I_{M2-20ns}$	DI
	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[%]
Με χειριστή (αναφορά)	14,20	0,859	8,824	8,800	4,012	6,876	6,054	-
Χωρίς χειριστή	13,79	0,852	9,476	9,428	4,064	6,540	5,530	5,045
R = 0 Ω	14,14	0,849	8,048	7,888	4,916	6,820	5,882	6,648
R = 10 Ω	14,19	0,849	8,092	7,976	4,824	6,820	5,890	6,039
R = 100 Ω	14,10	0,849	8,448	8,352	4,392	6,824	5,892	3,417
R = 330 Ω	14,18	0,847	8,880	8,800	4,100	6,832	5,893	0,850
R = 470 Ω	14,17	0,847	9,032	8,912	4,088	6,820	5,884	1,464
R = 560 Ω	14,11	0,845	9,056	8,988	4,048	6,816	5,887	1,700
R = 680 Ω	14,18	0,843	9,108	9,028	4,024	6,840	5,893	1,732
R = 820 Ω	14,17	0,849	9,168	9,040	4,020	6,860	5,885	1,801
R = 1.8 kΩ	14,12	0,845	9,300	9,160	4,040	6,852	5,890	2,546
R = 10 kΩ	14,23	0,847	9,332	9,168	4,172	6,856	5,888	2,868
R = 100 kΩ	14,20	0,848	9,352	9,184	4,236	6,832	5,888	3,101

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη γεννήτρια EM Test Dito καταδεικνύουν με σαφήνεια ότι η απευθείας γείωση του μεταλλικού βραχίονα αλλοιώνει σημαντικά τη δεύτερη αιχμή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανεξαρτήτως διάταξης καλωδίου γείωσης. Παρόμοια παραμόρφωση παρατηρείται και όταν χρησιμοποιείται αντίσταση 10 Ω στη διαδρομή γείωσης. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνονται ποσοτικά από τα αποτελέσματα του Δείκτη Απόκλισης, καθώς και στις δύο περιπτώσεις καταγράφονται οι υψηλότερες (δηλαδή οι λιγότερο επιθυμητές) τιμές σε σχέση με την κυματομορφή αναφοράς, η οποία καταγράφηκε με ανθρώπινο χειριστή. Με την αύξηση της τιμής της αντίστασης, ο Δείκτης Απόκλισης βελτιώνεται, φθάνοντας σε ελάχιστο επίπεδο περίπου στα 680 Ω για τη «Θέση 1» και στα 470 Ω για τη «Θέση 2». Πέραν αυτών των τιμών, ο δείκτης αρχίζει να επιδεινώνεται εκ νέου και σταθεροποιείται σε υψηλά επίπεδα για τιμές αντίστασης άνω των 10 kΩ.

Περαιτέρω, η συνθήκη «Χωρίς Χειριστή» δεν επιτυγχάνει ικανοποιητική συμφωνία με την κυματομορφή αναφοράς «Με Χειριστή». Η ασυμφωνία αυτή είναι εμφανής στα Σχήματα 5.6 και 5.7, ιδίως στο χρονικό παράθυρο 2 – 10 ns. Ποσοτικά, η εν λόγω διάταξη κατέγραψε τον τρίτο υψηλότερο Δείκτη Απόκλισης και στις δύο διαμορφώσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει περαιτέρω την ανεπαρκή καταλληλότητά της ως κυματομορφή αναφοράς.

Παρόμοιες τάσεις παρατηρήθηκαν και για τη γεννήτρια Teseq NSG 438. Αν και οι αποκλίσεις είναι λιγότερο έντονες σε σύγκριση με τη γεννήτρια EM Test Dito —λόγω της εγγενώς πλησιέστερης προσαρμογής της Teseq NSG 438 στην ιδανική κυματομορφή που καθορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] — το γενικό μοτίβο παραμένει σταθερό. Οι τιμές των αντιστάσεων που επιτυγχάνουν την καλύτερη συμφωνία με την κυματομορφή του χειριστή είναι είτε ίδιες είτε πολύ κοντά με εκείνες που εντοπίστηκαν κατά τις μετρήσεις με τη γεννήτρια EM Test Dito. Ειδικότερα, για τη «Θέση 1», η χαμηλότερη τιμή του Δείκτη Απόκλισης επιτεύχθηκε με αντίσταση 680 Ω, ενώ στη «Θέση 2» η βέλτιστη προσαρμογή καταγράφηκε με αντίσταση 330 Ω, σε αντίθεση με την τιμή των 470 Ω που παρατηρήθηκε στην περίπτωση της γεννήτριας EM Test Dito.

Η ανάλυση των κυματομορφών σε όλες τις διατάξεις μέτρησης καταδεικνύει ότι η απευθείας γείωση του μεταλλικού βραχίονα προκαλεί σημαντικές αποκλίσεις από την κυματομορφή του χειριστή, ιδίως στο τμήμα της δεύτερης αιχμής. Η εισαγωγή αντίστασης σε σειρά, στην περιοχή μεταξύ 330 Ω και 680 Ω, μειώνει αισθητά αυτές τις αποκλίσεις, με τη βέλτιστη τιμή να εξαρτάται τόσο από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όσο και από τη διάταξη του καλωδίου γείωσης. Οι εν λόγω τιμές αντίστασης οδηγούν σταθερά σε κυματομορφές που προσομοιάζουν περισσότερο εκείνες που καταγράφονται υπό πραγματικές συνθήκες διεξαγωγής της δοκιμής με ανθρώπινο χειριστή, υπερτερώντας της συνθήκης διακρίβωσης «Χωρίς Χειριστή», τόσο σε επίπεδο οπτικής σύγκρισης όσο και με βάση τον Δείκτη Απόκλισης.

Στις πραγματικές διατάξεις δοκιμών ο χειριστής κρατά το πλαστικό περίβλημα της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, χωρίς άμεση γαλβανική σύνδεση με το εσωτερικό κύκλωμα γείωσής της. Η διαδρομή επιστροφής του ρεύματος διαμορφώνεται μέσω συνδυασμού χωρητικής σύζευξης με το περίβλημα της γεννήτριας, της εσωτερικής αντίστασης του ανθρώπινου σώματος, της αντίστασης του δέρματος και της σύνθετης αντίστασης μεταξύ πέλματος και γείωσης. Σύμφωνα με το Πρότυπο IEEE Std 80 [142], η εσωτερική αντίσταση του ανθρώπινου σώματος ανέρχεται σε περίπου 300 Ω, ενώ τιμή 1.000 Ω χρησιμοποιείται συνήθως στα μοντέλα ασφάλειας για την αναπαράσταση της αντίστασης μεταξύ χεριού και ποδιού σε συχνότητες ισχύος (50 – 60 Hz). Σύμφωνα με τα στοιχεία του Προτύπου IEC 60479-1 [143], για τάσεις επαφής μεγαλύτερες των 500 V η συνολική σύνθετη αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μπορεί να υποχωρήσει κάτω από 1 kΩ. Ειδικότερα, για διαδρομή ρεύματος χέρι σε χέρι σε ξηρές συνθήκες, η τιμή για το 50 % του πληθυσμού ανέρχεται περίπου σε 1.000 Ω, ενώ για το 5 % του πληθυσμού φθάνει έως και τα 625 Ω· για τάση 1 kV οι τιμές μειώνονται περαιτέρω σε περίπου 875 Ω και 575 Ω, αντίστοιχα. Όπως αναφέρεται στο ίδιο Πρότυπο, για τη διαδρομή ρεύματος χέρι σε πόδι η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι κατά 10 - 30 % χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή χέρι σε χέρι.

Πειραματικές μελέτες [144] αναφέρουν ακόμη τιμές σύνθετης σύνθετης αντίστασης στην περιοχή των 400 – 800 Ω για συχνότητες που σχετίζονται με τα μεταβατικά φαινόμενα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στην περιοχή των MHz. Οι τιμές των αντιστάσεων που προσδιορίστηκαν ως βέλτιστες στην παρούσα μελέτη (330 – 680 Ω) προέκυψαν εμπειρικά με κριτήριο την ελάχιστη απόκλιση από την κυματομορφή του χειριστή και, ταυτόχρονα, εμπίπτουν στο αναμενόμενο εύρος αντίστασης ενός όρθιου χειριστή. Η εν λόγω συμφωνία υποδηλώνει ότι οι επιλεγμένες τιμές είναι τόσο πειραματικά αποτελεσματικές όσο και φυσικά τεκμηριωμένες.

5.1.2.2. Διάταξη μη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα

Δύο από τα σενάρια μέτρησης για την περίπτωση του μη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα απεικονίζονται στα Σχήματα 5.10α και 5.10β. Σε αυτή τη διάταξη, δεν συνδέεται κανένα καλώδιο από τον μεταλλικό βραχίονα προς το επίπεδο αναφοράς γης, προσομοιώνοντας έναν ρομποτικό μεταλλικό βραχίονα χωρίς προδιαγραφή υποχρεωτικής γείωσης. Δεδομένου ότι η χρήση αντίστασης σε σειρά δεν αποτελεί εφαρμόσιμη επιλογή για την προσομοίωση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή σε αυτή την περίπτωση, εφαρμόζεται η προσέγγιση που περιγράφεται στην Ενότητα 4.2, προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσο ο μεταλλικός βραχίονας από μόνος του αρκεί για την προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης ή απαιτούνται επιπλέον μέτρα.

Ο Πίνακας 5.9 παρουσιάζει τους τέσσερις τύπους φερριτών αρπάγης που χρησιμοποιήθηκαν, μαζί με τις αντίστοιχες περιοχές συχνότητας λειτουργίας και τις θέσεις τοποθέτησης επί του καλωδίου γείωσης

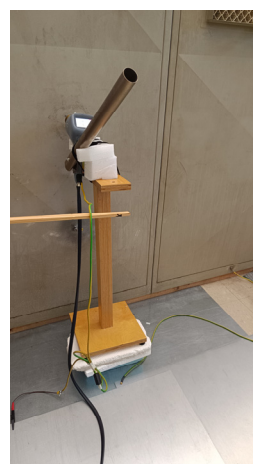
της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το Σχήμα 5.11 αποτυπώνει την εφαρμογή των φερριτών αυτών για τα δύο διαφορετικά σενάρια καλωδίου γείωσης («Θέση 1» και «Θέση 2»).

Πέραν αυτών των δώδεκα (12) συνόλων μετρήσεων (4 τύποι φερριτών $\times$ 3 θέσεις τοποθέτησης) για κάθε διάταξη καλωδίου γείωσης και για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καταγράφηκαν κυματομορφές για τις εξής περιπτώσεις:

- (α) με ανθρώπινο χειριστή (χωρίς προσαρτημένο μεταλλικό βραχίονα), η οποία αποτελεί την κυματομορφή αναφοράς για την αξιολόγηση,
- (β) για τη διάταξη διακρίβωσης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27] («Χωρίς Χειριστή»), και
- (γ) για το σενάριο στο οποίο δεν χρησιμοποιούνται φερρίτες, με τον μη γειωμένο μεταλλικό βραχίονα προσαρτημένο στη γεννήτρια



α)

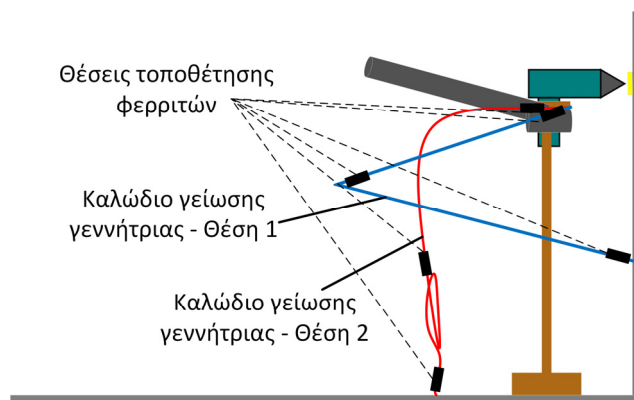


β)

Σχήμα 5.10: Σενάρια μέτρησης για τη διάταξη μη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα με τοποθετημένο φερρίτη: α) EM Test Dito με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στη «Θέση 1» και β) Teseq NSG 438 με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στη «Θέση 2».

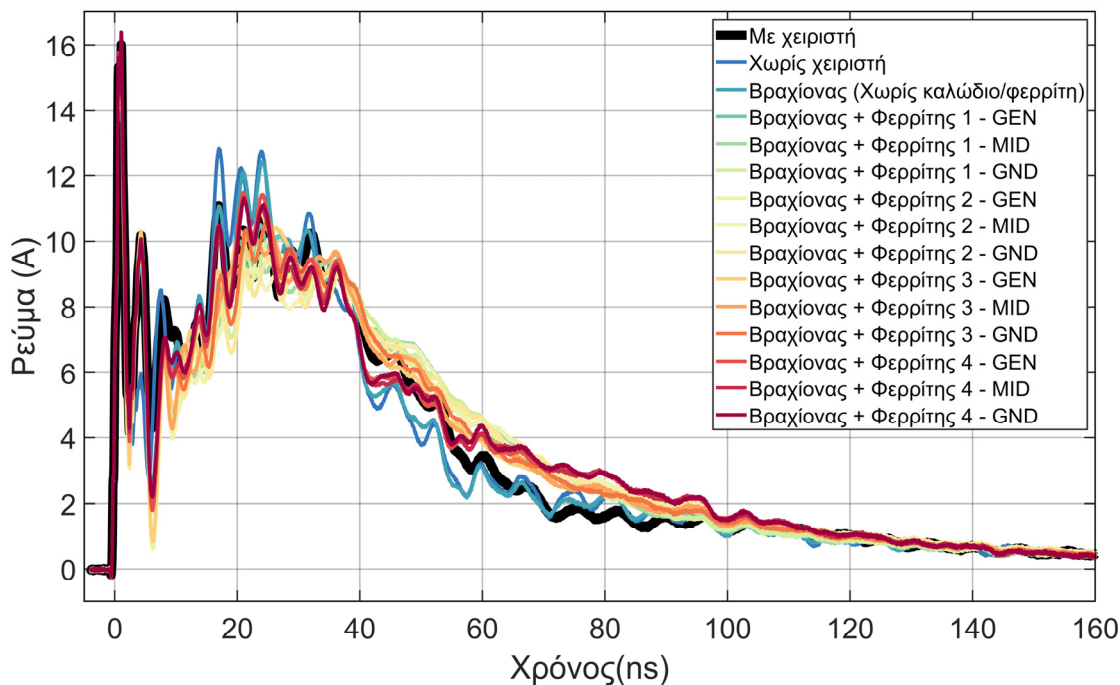
Πίνακας 5.9: Περιοχές συχνοτήτων λειτουργίας φερριτών αρπάγης και θέσεις τοποθέτησης

Κωδικοποίηση φερρίτη	Συχνότητα λειτουργίας	Θέση τοποθέτησης φερρίτη
Φερρίτης 1	1 MHz- 300 MHz	... Πλησίον της γεννήτριας - GEN
Φερρίτης 2	25 MHz – 300 MHz	... Στο μέσο του καλωδίου – MID
Φερρίτης 3	200 MHz – 1 GHz	... Πλησίον του σημείου γείωσης – GND
Φερρίτης 4	150 kHz – 10 MHz	



Σχήμα 5.11: Διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης των φερριτών αρπάγης

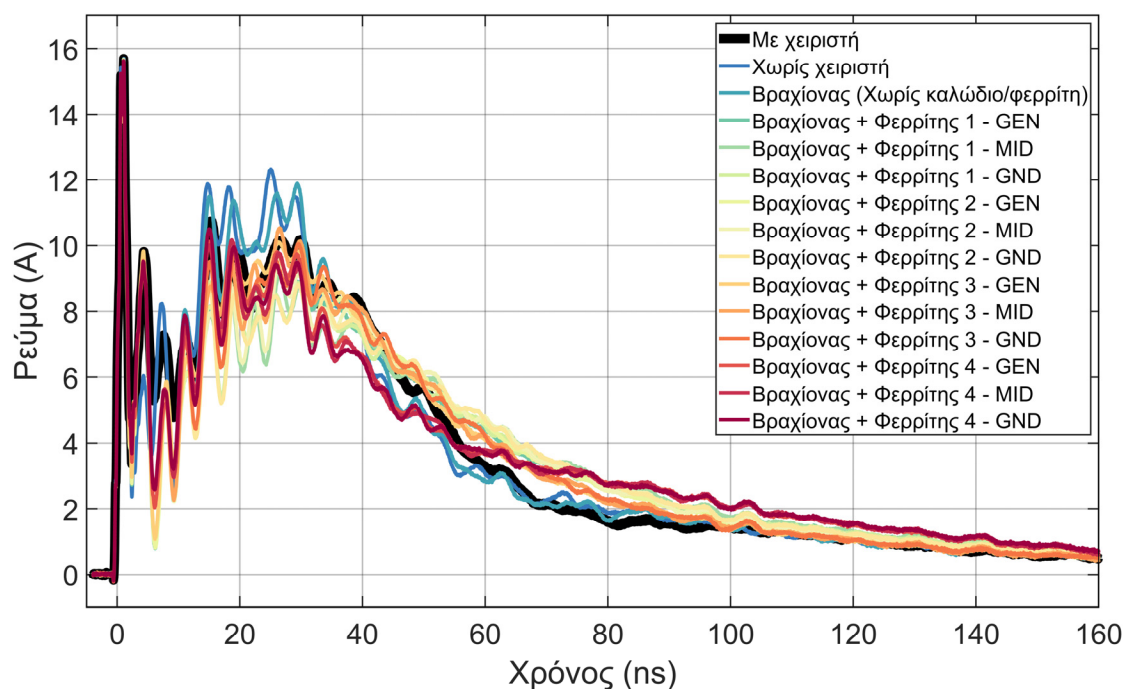
Τα Σχήματα 5.12 και 5.13 παρουσιάζουν τις καταγεγραμμένες κυματομορφές που ελήφθησαν για τη γεννήτρια EM Test Dito για τα σενάρια καλώδιου γείωσης «Θέση 1» και «Θέση 2» αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες παράμετροι κυματομορφής και οι τιμές του Δείκτη Απόκλισης συνοψίζονται στους Πίνακες 5.10 και 5.11.



Σχήμα 5.12: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές διατάξεις φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας EM Test Dito διαμορφωμένο στη «Θέση 1»

Πίνακας 5.10: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την διάταξη φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας EM Test Dito διαμορφωμένο στη «Θέση 1»

Σενάριο	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{P2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	16,02	0,886	11,10	9,272	3,436	10,18	7,030	-
Χωρίς χειριστή	15,45	0,886	12,85	9,176	3,184	8,496	5,535	11,43
Μεταλλικός βραχίονας (Χωρίς καλώδιο/φερρίτη)	15,45	0,881	12,41	9,688	3,092	9,584	5,823	8,525
Βραχίονας + 1 – GEN	15,68	0,879	10,50	9,200	4,352	10,24	5,301	8,755
Βραχίονας + 1 – MID	16,08	0,885	9,800	8,656	4,480	9,884	5,629	10,09
Βραχίονας + 1 – GND	16,13	0,889	10,07	8,900	4,588	9,852	5,952	8,936
Βραχίονας + 2 – GEN	15,68	0,879	9,980	8,816	4,404	10,12	5,153	10,57
Βραχίονας + 2 – MID	16,16	0,890	9,348	8,148	4,496	9,912	5,628	11,47
Βραχίονας + 2 – GND	16,16	0,880	9,548	8,520	4,568	9,880	5,956	10,15
Βραχίονας + 3 – GEN	15,76	0,885	10,90	9,248	3,872	10,31	5,443	6,315
Βραχίονας + 3 – MID	16,29	0,887	10,27	8,992	3,936	9,936	5,694	7,393
Βραχίονας + 3 – GND	16,23	0,889	10,66	9,048	4,080	9,936	6,014	6,176
Βραχίονας + 4 – GEN	16,34	0,888	11,50	9,072	4,088	10,028	5,843	6,475
Βραχίονας + 4 – MID	16,36	0,887	11,34	8,592	4,096	10,036	6,042	6,171
Βραχίονας + 4 – GND	16,39	0,892	11,33	8,780	4,356	10,068	6,144	6,418

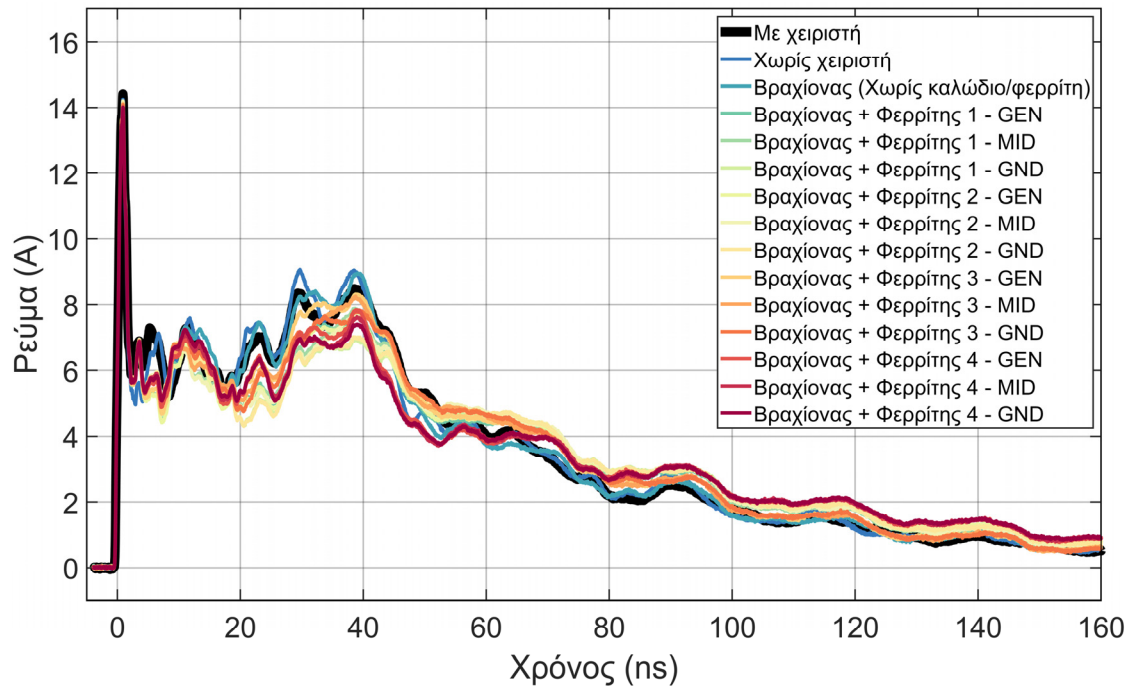


Σχήμα 5.13: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές διατάξεις φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας EM Test Dito διαμορφωμένο στη «Θέση 2»

Πίνακας 5.11: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την διάταξη φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας EM Test Dito διαμορφωμένο στη «Θέση 2»

Σενάριο	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{P2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	15,70	0,889	10,75	10,17	3,244	9,816	6,449	-
Χωρίς χειριστή	15,70	0,881	12,33	10,72	3,080	8,232	4,965	10,83
Μεταλλικός βραχίονας (Χωρίς καλώδιο/φερρίτη)	15,63	0,880	11,90	11,40	2,848	9,540	5,303	8,058
Βραχίονας + 1 – GEN	15,30	0,874	9,324	8,820	4,420	9,788	4,666	12,62
Βραχίονας + 1 – MID	15,67	0,884	9,112	8,804	4,684	9,540	5,095	12,45
Βραχίονας + 1 – GND	15,68	0,887	8,916	8,680	4,484	9,600	5,290	11,63
Βραχίονας + 2 – GEN	15,28	0,876	9,508	9,028	4,588	9,736	4,671	12,67
Βραχίονας + 2 – MID	15,53	0,882	9,568	9,304	4,780	9,528	5,096	11,70
Βραχίονας + 2 – GND	15,62	0,883	8,832	8,608	4,704	9,552	5,289	12,65
Βραχίονας + 3 – GEN	15,25	0,877	10,11	9,756	4,132	9,828	4,907	8,948
Βραχίονας + 3 – MID	15,63	0,888	10,54	10,07	4,212	9,552	5,099	7,541
Βραχίονας + 3 – GND	15,48	0,881	10,05	9,844	4,196	9,464	5,286	8,415
Βραχίονας + 4 – GEN	15,46	0,876	10,13	9,264	3,668	9,484	4,992	8,192
Βραχίονας + 4 – MID	15,57	0,885	10,18	9,084	3,792	9,520	5,242	7,619
Βραχίονας + 4 – GND	15,63	0,882	10,51	9,032	3,664	9,516	5,288	6,581

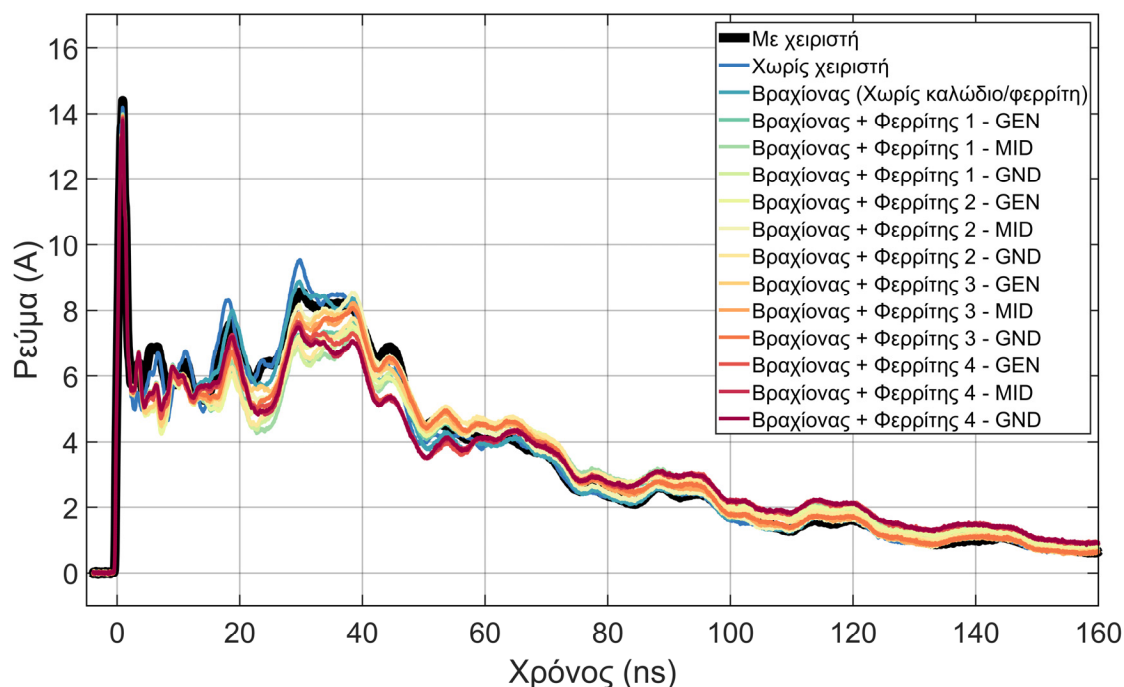
Τα Σχήματα 5.14 και 5.15, σε συνδυασμό με τους Πίνακες 5.12 και 5.13, παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη γεννήτρια Teseq NSG 438. Για λόγους ευκολίας σύγκρισης, η διάταξη «Χωρίς Χειριστή» και η διάταξη που εμφανίζει τον μικρότερο Δείκτη Απόκλισης (δηλαδή την καλύτερη προσαρμογή με την κυματομορφή αναφοράς) επισημαίνονται με έντονη γραφή.



Σχήμα 5.14: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές διατάξεις φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας Teseq NSG 438 διαμορφωμένο στη «Θέση 1»

Πίνακας 5.12: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την διάταξη φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας Teseq NSG 438 διαμορφωμένο στη «Θέση 1»

Σενάριο	I_P [A]	t_r [ns]	I_{P2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{P2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	14,42	0,846	8,488	8,264	4,004	7,300	6,327	-
Χωρίς χειριστή	14,25	0,850	9,076	8,944	3,872	7,132	5,923	4,505
Μεταλλικός βραχίονας (Χωρίς καλώδιο/φερρίτη)	14,06	0,838	8,968	8,188	3,716	6,892	5,931	3,811
Βραχίονας + 1 – GEN	14,10	0,839	7,748	7,140	4,364	6,644	5,460	8,159
Βραχίονας + 1 – MID	14,16	0,835	7,880	6,584	4,664	6,928	5,934	8,774
Βραχίονας + 1 – GND	14,02	0,833	7,140	6,352	4,620	6,920	5,910	11,24
Βραχίονας + 2 – GEN	14,14	0,836	7,696	6,984	4,440	6,644	5,438	8,877
Βραχίονας + 2 – MID	14,20	0,842	7,784	6,488	4,708	6,952	5,939	9,153
Βραχίονας + 2 – GND	14,14	0,841	7,132	6,348	4,668	6,916	5,905	11,14
Βραχίονας + 3 – GEN	14,12	0,836	8,316	7,720	4,440	6,664	5,620	5,337
Βραχίονας + 3 – MID	14,10	0,837	8,252	7,084	4,596	6,920	5,904	6,627
Βραχίονας + 3 – GND	14,08	0,843	7,828	7,040	4,608	6,860	5,891	7,827
Βραχίονας + 4 – GEN	13,99	0,841	7,840	7,084	3,828	6,848	5,738	7,029
Βραχίονας + 4 – MID	13,99	0,835	7,628	6,888	3,912	6,892	5,897	7,556
Βραχίονας + 4 – GND	14,01	0,832	7,412	6,844	3,856	6,880	5,886	8,347



Σχήμα 5.15: Καταγεγραμμένες κυματομορφές για διαφορετικές διατάξεις φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας Teseq NSG 438 διαμορφωμένο στη «Θέση 2»

Πίνακας 5.13: Παράμετροι κυματομορφής σε συνάρτηση με την διάταξη φερρίτη αρπάγης στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας Teseq NSG 438 διαμορφωμένο στη «Θέση 2»

Σενάριο	I_p [A]	t_r [ns]	I_{p2} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]	$I_{p2-10ns}$ [A]	$I_{M2-20ns}$ [A]	DI [%]
Με χειριστή (αναφορά)	14,40	0,852	8,572	8,572	4,044	6,884	6,132	-
Χωρίς χειριστή	14,19	0,845	9,544	9,420	3,868	6,692	5,638	5,554
Μεταλλικός βραχίονας (Χωρίς καλώδιο/φερρίτη)	13,92	0,839	8,900	8,780	3,940	6,716	5,694	3,222
Βραχίονας + 1 – GEN	13,90	0,838	7,648	7,160	4,460	6,456	5,250	9,241
Βραχίονας + 1 – MID	14,00	0,836	7,452	6,880	4,544	6,752	5,705	9,032
Βραχίονας + 1 – GND	13,89	0,836	7,456	6,636	4,472	6,696	5,677	9,770
Βραχίονας + 2 – GEN	13,88	0,838	7,576	7,120	4,544	6,448	5,208	9,793
Βραχίονας + 2 – MID	13,90	0,838	8,560	8,024	4,284	6,684	5,659	4,222
Βραχίονας + 2 – GND	13,90	0,839	7,768	6,904	4,648	6,652	5,659	9,185
Βραχίονας + 3 – GEN	13,84	0,837	8,116	7,816	4,484	6,444	5,353	6,948
Βραχίονας + 3 – MID	13,94	0,843	8,232	7,680	4,536	6,672	5,659	6,127
Βραχίονας + 3 – GND	13,90	0,835	8,084	7,352	4,544	6,716	5,664	7,276
Βραχίονας + 4 – GEN	13,88	0,837	7,664	7,528	4,080	6,672	5,496	6,479
Βραχίονας + 4 – MID	13,86	0,840	7,604	7,440	4,104	6,708	5,655	6,495
Βραχίονας + 4 – GND	13,80	0,834	7,492	7,372	4,104	6,688	5,657	7,000

Τα αποτελέσματα στους Πίνακες 5.10 – 5.13 καταδεικνύουν ότι, και για τις δύο γεννήτριες, ορισμένα τροποποιημένα σενάρια επιτυγχάνουν καλύτερη συμφωνία με την κυματομορφή αναφοράς από ό,τι η τυπική διάταξη του προτύπου IEC 61000-4-2 χωρίς χειριστή. Στην περίπτωση της γεννήτριας EM Test Dito —όπου η επίδραση των φερριτών είναι ιδιαίτερα έντονη, κυρίως στο χρονικό διάστημα 10 ns έως 40 ns— η συνδυασμένη χρήση μη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα με φερρίτη που λειτουργεί στην περιοχή 150 kHz έως 10 MHz προσφέρει την καλύτερη προσαρμογή και για τα δύο σενάρια καλωδίου γείωσης. Οι αντίστοιχοι Δείκτες Απόκλισης είναι 6,171% και 6,581%, σε σύγκριση με τις τιμές 11,43% και 10,83% για τη διάταξη χωρίς χειριστή.

Παρότι η θέση τοποθέτησης του φερρίτη μεταβάλλεται μεταξύ των δύο σεναρίων καλωδίου γείωσης, η επίδρασή της στον Δείκτη Απόκλισης αποδεικνύεται μικρότερης σημασίας συγκριτικά με τον τύπο του φερρίτη, με τις διαφορές να αποδίδονται στις διαφοροποιήσεις της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου. Το σενάριο με «μόνο τον μεταλλικό βραχίονα» (χωρίς χρήση φερριτών) προσφέρει επίσης μια συνεπή και πρακτική εναλλακτική, παρουσιάζοντας Δείκτες Απόκλισης 8,525% και 8,058% αντίστοιχα για τα δύο σενάρια γείωσης — επιτυγχάνοντας καλύτερη προσαρμογή από τη διάταξη διακρίβωσης «Χωρίς Χειριστή», χωρίς όμως να αποτελεί τη βέλτιστη λύση συνολικά.

Για τη γεννήτρια Teseq NSG 438 —η οποία εγγενώς παράγει κυματομορφές πλησιέστερες προς την ιδανική του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]— οι διατάξεις με φερρίτες δεν επιφέρουν ιδιαίτερες βελτιώσεις. Παρ' όλα αυτά, το σενάριο με τον μεταλλικό βραχίονα χωρίς χρήση φερριτών υπερέχει σταθερά έναντι της διάταξης διακρίβωσης χωρίς χειριστή και στα δύο σενάρια γείωσης. Η διαφοροποιημένη αποτελεσματικότητα των φερριτών ανάμεσα στις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποδίδεται σε διαφορές σχεδίασης και ευαισθησίας στις εξωτερικές επιδράσεις. Η γεννήτρια EM Test Dito παρουσιάζει μεγαλύτερη ευπάθεια στις μεταβολές της διαδρομής επιστροφής του ρεύματος, πιθανότατα λόγω της αρχιτεκτονικής του κυκλώματος εκφόρτισης, του περιορισμένου θωρακισμού και των εγγενών ταλαντώσεων υψηλών συχνοτήτων. Όπως συζητείται στην [145], τέτοιες ταλαντώσεις προκύπτουν από συνδυασμό εσωτερικών δομών της γεννήτριας και κατανεμημένων συντονισμών στη διαδρομή επιστροφής του ρεύματος, με χαρακτηριστικά που διαφοροποιούνται τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στη συχνότητα, ανάλογα με την αρχιτεκτονική της κάθε γεννήτριας. Τα στοιχεία φερρίτη, παρόμοια με την παρουσία του ανθρώπινου χειριστή, λειτουργούν ως αποσβεστικά στοιχεία για τις παρασιτικές αυτές ταλαντώσεις. Κατά συνέπεια, η επίδρασή τους είναι πιο έντονη σε γεννήτριες που παρουσιάζουν ισχυρότερη ή λιγότερο ελεγχόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά. Αυτό εξηγεί το παρατηρούμενο αποτέλεσμα, όπου η εισαγωγή φερρίτη βελτιώνει σημαντικά την πιστότητα της κυματομορφής για τη γεννήτρια EM Test Dito, ενώ έχει περιορισμένη επίδραση στη γεννήτρια NSG 438, η οποία διαθέτει καλύτερη εσωτερική απόσβεση.

5.1.3. Συζήτηση

Ο πειραματικός στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η διερεύνηση της αναπαραγωγιμότητας μεταξύ κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγονται όταν η γεννήτρια κρατείται από ανθρώπινο χειριστή και εκείνων που παράγονται μέσω μεταλλικού ρομποτικού βραχίονα, καθώς και η αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων μεγιστοποίησης της συμφωνίας τους. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις μεταλλικού βραχίονα: η περίπτωση γειωμένου και η περίπτωση μη γειωμένου μεταλλικού βραχίονα.

Για τους γειωμένους βραχίονες, η άμεση γείωση ή η χρήση χαμηλής αντίστασης (π.χ. 10 Ω) οδηγεί σε σημαντική παραμόρφωση της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής

εκφόρτισης — γεγονός που αποτυπώνεται σε τιμές της παραμέτρου I_{60} περίπου 5,8 A για τη γεννήτρια EMTEST Dito — υπερβαίνοντας το ανώτατο όριο των 5,2 A που καθορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κυματομορφών που δεν συμμορφώνονται με το πρότυπο. Η εισαγωγή μιας αντίστασης σε σειρά, τιμών μεταξύ 330 Ω και 680 Ω, αμβλύνει το φαινόμενο αυτό, επιτυγχάνοντας κυματομορφές που προσομοιώνουν πολύ πιο πιστά αυτές που παράγονται κατά τη χειροκίνητη λειτουργία, διατηρώντας παράλληλα τη συμμόρφωση με το Πρότυπο. Για τη διασφάλιση της συνέπειας στις αυτοματοποιημένες διατάξεις δοκιμών, οι μελλοντικές αναθεωρήσεις του προτύπου IEC 61000-4-2 θα πρέπει να εξετάσουν την ενσωμάτωση πρότυπης διάταξης διακρίβωσης που θα περιλαμβάνει αντιπροσωπευτικό μεταλλικό βραχίονα και αντίσταση.

Στην περίπτωση του μη γειωμένου βραχίονα, η δυνατότητα προσομοίωσης της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αναλύθηκαν δύο γεννήτριες συμβατές με την Έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [26], οι οποίες, αν και συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του Προτύπου, παράγουν διαφορετικές κυματομορφές. Για γεννήτριες που εμφανίζουν εγγενώς μεγαλύτερη συμφωνία με την ιδανική κυματομορφή του Προτύπου, η χρήση του μεταλλικού βραχίονα από μόνη της παρέχει ικανοποιητική προσέγγιση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή. Αντιθέτως, για γεννήτριες που εμφανίζουν εντονότερες αποκλίσεις — ιδίως ως προς τη δεύτερη αιχμή — η προσθήκη φερρίτη αρπάγης επί του καλωδίου γείωσης καθίσταται αναγκαία. Διαπιστώθηκε ότι ο τύπος του φερρίτη έχει μεγαλύτερη επίδραση από τη θέση τοποθέτησής του, αν και και τα δύο επηρεάζονται από την σύνθετη αντίσταση του καλωδίου γείωσης.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι η ισχύουσα μεθοδολογία διακρίβωσης του Προτύπου IEC, η οποία αποκλείει τόσο την επίδραση του ανθρώπινου χειριστή όσο και την επίδραση ρομποτικών διατάξεων, χρήζει αναθεώρησης. Προτείνεται η ενσωμάτωση πρότυπης διάταξης με μεταλλικό βραχίονα — ενδεχομένως με καθορισμένες προδιαγραφές για φερρίτες — ώστε να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη συνέπεια στις αυτοματοποιημένες διατάξεις δοκιμών και να επιτευχθεί αναπαραγωγιμότητα σε σχέση με τη δοκιμή που διενεργείται από ανθρώπινο χειριστή.

5.1.4. Συμπεράσματα

Η πρώτη αναθεώρηση του προτύπου IEC 61000-4-2 [26], [27] μετά το 2008 δημοσιεύθηκε στις 7 Μαρτίου 2025, εισάγοντας νέα παράμετρο κυματομορφής για τον περαιτέρω έλεγχο της δεύτερης αιχμής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αν και η ανανέωση αυτή αντανακλά σημαντική προσπάθεια ενίσχυσης της διεργαστηριακής αναπαραγωγιμότητας στη διακρίβωση — μέσω αυστηρότερων απαιτήσεων, όπως η υποχρεωτική χρήση επιπέδου αναφοράς γείωσης και ο καθορισμός συγκεκριμένων σημείων σύνδεσης γείωσης — η επίδραση του ανθρώπινου χειριστή που κρατά τη γεννήτρια ή η χρήση μεταλλικού βραχίονα σε ρομποτικά συστήματα δοκιμών παραμένει εκτός ρύθμισης.

Η παρούσα ενότητα διερεύνησε την επίδραση δύο διαμορφώσεων μεταλλικού ρομποτικού βραχίονα — γειωμένου και μη γειωμένου — στη συμπεριφορά της κυματομορφής, συγκρίνοντάς τις τόσο με τη συνθήκη χειριστή όσο και με τη συνθήκη διακρίβωσης χωρίς χειριστή που ορίζει το Πρότυπο. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η χρήση αυτοματοποιημένων διατάξεων χωρίς προσαρμογή, ιδίως με άμεση γείωση μεταλλικού βραχίονα, μπορεί να προκαλέσει σημαντική παραμόρφωση της κυματομορφής. Ως αντίμετρο προτάθηκαν πρακτικές βελτιώσεις: εισαγωγή αντίστασης σε σειρά για

γειωμένους βραχίονες και επιλεκτική εφαρμογή φερριτών αρπάγης επί του καλωδίου γείωσης για μη γειωμένους βραχίονες.

Παρότι τα μέτρα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν μεμονωμένα από εργαστήρια ή κατασκευαστές γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η πλέον καθοριστική βελτίωση θα ήταν η επίσημη ενσωμάτωση των ρομποτικών διατάξεων δοκιμών — με τυποποιημένους μεταλλικούς βραχίονες — σε μελλοντικές εκδόσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2, προκειμένου να διασφαλιστεί η συνέπεια, η αναπαραγωγικότητα και η ρεαλιστική αναπαράσταση των συνθηκών δοκιμής.

Η μελλοντική εργασία θα επικεντρωθεί σε μετρήσεις αξιοποιώντας πλήρεις ρομποτικές διατάξεις δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με στόχο την περαιτέρω βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του προτεινόμενου μεταλλικού βραχίονα και τη λεπτομερή διερεύνηση διαφόρων σεναρίων γείωσης. Επιπλέον, απαιτείται συγκριτική αξιολόγηση των προτεινόμενων υλοποιήσεων γειωμένου και μη γειωμένου βραχίονα έναντι εναλλακτικών μεθόδων προσομοίωσης της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή, ώστε να εντοπιστούν ενδεχόμενες καθολικές λύσεις διακρίβωσης που να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τόσο τις επιδράσεις του ανθρώπου όσο και τις ιδιαιτερότητες των ρομποτικών διατάξεων σε τυποποιημένα περιβάλλοντα δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Καθώς ο προτεινόμενος σχεδιασμός του μεταλλικού βραχίονα αποτελεί προκαταρκτικό υποκατάστατο του ανθρώπινου χειριστή, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη συστηματική διερεύνηση της επίδρασης του τύπου υλικού, του σχήματος και των διαστάσεων του βραχίονα στη συμπεριφορά της κυματομορφής. Η διερεύνηση αυτή κρίνεται απαραίτητη, εφόσον η προσέγγιση αυτή πρόκειται να θεσμοθετηθεί και να ενσωματωθεί σε μελλοντικές αναθεωρήσεις του προτύπου IEC 61000-4-2.

5.2. Ποσοτική ανάλυση της επίδρασης του χειριστή στις έμμεσες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και συστάσεις για ενισχυμένη αναπαραγωγικότητα

Η ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων ανέδειξε ότι η παρουσία του ανθρώπινου χειριστή επιδρά σημαντικά στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ιδίως στη δεύτερη αιχμή, εισάγοντας μεταβλητότητα που μπορεί να επηρεάσει την αναπαραγωγικότητα των δοκιμών. Στην Ενότητα 4.2 τεκμηριώθηκε η δυνατότητα αναπαραγωγής της ανθρώπινης επίδρασης στις άμεσες εκφορτίσεις μέσω φερρίτη αρπάγης, ενώ το Κεφάλαιο 5 διεύρυνε τη μελέτη, εξετάζοντας και την περίπτωση μεταλλικών βραχιόνων.

Ωστόσο, η βιβλιογραφία δεν έχει διερευνήσει επαρκώς τον ρόλο του χειριστή στις έμμεσες εκφορτίσεις, όπως αυτές σε οριζόντιο ή κάθετο επίπεδο σύζευξης (Horizontal και Vertical Coupling Plane - HCP και VCP), που ορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [26], [27]. Οι έμμεσες δοκιμές χαρακτηρίζονται από σταθερή γεωμετρία και καθορισμένα σημεία έγχυσης, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Παρόλα αυτά, στην πράξη πραγματοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά χειροκίνητα, γεγονός που δημιουργεί ανάγκη για συστηματική αξιολόγηση της επίδρασης του χειριστή και για πιθανή ανάπτυξη προτύπων δοκιμών χωρίς χειριστή.

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στην ποσοτική ανάλυση της επίδρασης του χειριστή κατά τις έμμεσες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27]. Η διερεύνηση βασίζεται στη χρήση συστήματος επικοινωνίας SpaceWire [146] ως υπό δοκιμή εξοπλισμό, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστική διασύνδεση υψηλής ταχύτητας και χαμηλής τάσης, με ευρεία

εφαρμογή σε διαστημικά συστήματα [147], [148] και γνωστή ευαισθησία σε μεταβατικές παρεμβολές [149], [150]. Στο πειραματικό μέρος της συγκεκριμένης ενότητας, πραγματοποιούνται μετρήσεις τόσο του ρεύματος έγχυσης στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας όσο και του επαγόμενου ρεύματος στο θωρακισμένο καλώδιο που τοποθετείται στο επίπεδο δοκιμής, με καταγραφή του ρεύματος κατά τις εκφορτίσεις στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο σύζευξης. Η παρουσία ή η απουσία του χειριστή μεταβάλλεται συστηματικά, επιτρέποντας άμεση σύγκριση των χαρακτηριστικών των κυματομορφών.

Περαιτέρω, η ανάλυση εξετάζει τη δυνατότητα χρήσης αυτοματοποιημένων διατάξεων χωρίς χειριστή, αξιολογώντας τρεις διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης με τη γεννήτρια τοποθετημένη σε μονωτική βάση, με στόχο τον εντοπισμό της πιο σταθερής διάταξης που θα μπορούσε να προτυποποιηθεί. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου οι αυτοματοποιημένες λύσεις δεν είναι εφικτές, διερευνάται κατά πόσον ο προστατευτικός εξοπλισμός σώματος (γάντια, υποδήματα εκφόρτισης ή υψηλής τάσης) μπορεί να μειώσει τη μεταβλητότητα των χειροκίνητων δοκιμών.

Στόχος της ενότητας είναι να προσδιορίσει σε ποιο βαθμό η ανθρώπινη παρουσία επηρεάζει τις έμμεσες δοκιμές εκφόρτισης και να προτείνει πρακτικές λύσεις για τη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας, συμβάλλοντας έτσι στη μελλοντική εξέλιξη του Προτύπου IEC 61000-4-2.

5.2.1. Μεθοδολογία

5.2.1.1. Μεθοδολογία μετρήσεων

Παράμετροι μέτρησης

Η αξιολόγηση της επίδρασης του χειριστή στις έμμεσες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πραγματοποιείται τόσο για το ρεύμα έγχυσης που μετράται στο άκρο εκφόρτισης, όσο και για το επαγόμενο ρεύμα που ανιχνεύεται στη θωράκιση του καλωδίου υπό δοκιμή. Για το ρεύμα έγχυσης χρησιμοποιούνται οι καθιερωμένοι δείκτες που περιγράφονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27], ήτοι οι παράμετροι I_P , t_r , I_{P2} , I_{30} και I_{60} , χωρίς να απαιτείται περαιτέρω ορισμός τους στην παρούσα ενότητα, καθώς έχουν αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

Ωστόσο, για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση, οι παραδοσιακοί δείκτες του Προτύπου δεν επαρκούν για την πλήρη περιγραφή της επίδρασης της εκφόρτισης, ιδίως σε φαινόμενα σύζευξης χαμηλών συχνοτήτων και στη συνολική μεταφορά ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, εισάγονται οι ακόλουθοι επιπλέον δείκτες αξιολόγησης, οι οποίοι ποσοτικοποιούν διαφορετικές πτυχές της κυματομορφής:

... Η ενεργός τιμή ρεύματος (RMS), η οποία ποσοτικοποιεί το αποτελεσματικό πλάτος της κυματομορφής στο χρονικό πεδίο και ορίζεται ως:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (44)$$

Η παράμετρος αυτή αντικατοπτρίζει τη μέση ισχύ που μπορεί να μεταδοθεί στο σύστημα λόγω του επαγόμενου ρεύματος στη θωράκιση.

... Το ολικό μεταφερόμενο φορτίο (Q), που εκφράζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα του ρεύματος::

$$Q = \int_0^T i(t) dt \quad (45)$$

Αποτελεί ένδειξη της συνολικής ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου που εγχέεται στη θωράκιση κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης.

... Η απόδοση σύζευξης (η), η οποία ποσοτικοποιεί το ποσοστό του φορτίου που εγχέεται στη θωράκιση σε σχέση με το φορτίο που εγχέεται από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας, υπολογιζόμενη ως:

$$\eta = \frac{Q_{\text{shield}}}{Q_{\text{tip}}} \times 100\% \quad (46)$$

... Η αρχική κλίση ανόδου, η οποία περιγράφει την ταχύτητα αύξησης του ρεύματος μεταξύ του 10 % και του 90 % της μέγιστης τιμής και υπολογίζεται ως:

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{10-90} = \frac{0,8 \cdot I_p}{t_{90\%} - t_{10\%}} \quad (47)$$

Η κλίση ανόδου αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την εκτίμηση των επαγόμενων τάσεων σε επαγωγικά φορτία ή διασυνδέσεις, σύμφωνα με τη σχέση $V = L \cdot \frac{di}{dt}$ και επομένως αποτελεί βασικό μέγεθος για την αξιολόγηση πιθανών προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI).

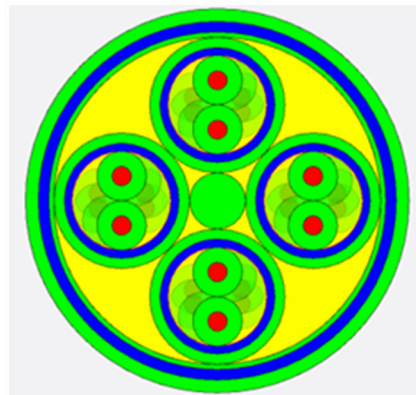
... Το φασματικό πλάτος στη συχνότητα κυρίαρχης ταλάντωσης, $|FFT|_{\text{XMHz}}$, αντιστοιχεί στο πλάτος της κυματομορφής στο πεδίο της συχνότητας στη συχνότητα συντονισμού (X) που εμφανίζεται ως κυρίαρχη στην κυματομορφή. Η παράμετρος αυτή συμπληρώνει την ανάλυση στο χρονικό πεδίο, υποδεικνύοντας πιθανές συνιστώσες σύζευξης που συνδέονται με τα φαινόμενα συντονισμού της διάταξης δοκιμής.

Μετρήσεις με ανιχνευτή ρεύματος

Για τη μέτρηση του επαγόμενου ρεύματος χρησιμοποιείται ανιχνευτής ρεύματος τοποθετημένος γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενώ εφαρμόζεται η μεθοδολογία αντιστάθμισης που περιγράφηκε στην Ενότητα 2.2, προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρούμενων κυματομορφών.

Χαρακτηριστικά σύνδεσης SpaceWire και δείκτες

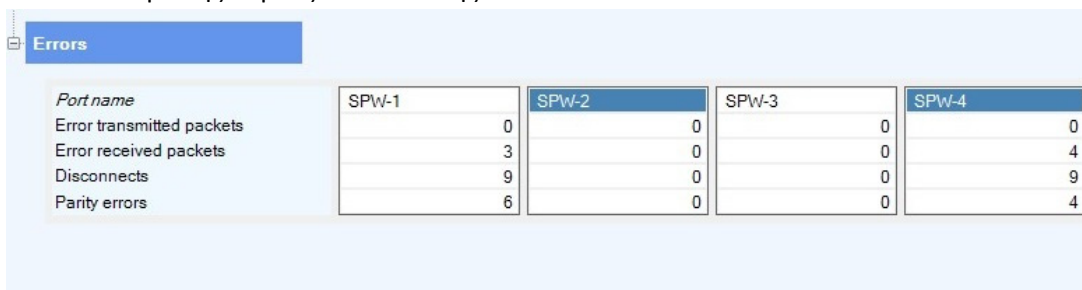
Για τη δημιουργία και παρακολούθηση της σύνδεσης SpaceWire χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής SpaceWire iSAFT της εταιρίας TELETEL σε συνδυασμό με καλώδιο τύπου AL μήκους 10 μέτρων (βλ. Σχήμα 5.18), το οποίο τερματίζεται με υποδοχές τύπου D.



Σχήμα 5.16: Εγκάρσια τομή καλωδίου SpaceWire τύπου AL Variant 01

Ο προσομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε ενσωματώνει τετραπλή κάρτα διασύνδεσης SpaceWire τύπου PCIe, παρέχοντας δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας σε κάθε θύρα. Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, οι θύρες 1 και 4 του συστήματος iSAFT διασυνδέθηκαν μέσω καλωδίου SpaceWire, διαμορφώνοντας πλήρη αμφίδρομη σύνδεση και επιτρέποντας την παρακολούθηση των επιδόσεων της επικοινωνίας σε επίπεδο πρωτοκόλλου κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Αν και το σύστημα υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης έως 400 Mbps, για τις ανάγκες των πειραματικών μετρήσεων επελέγη η ταχύτητα των 200 Mbps, η οποία αντανακλά συνηθέστερες εφαρμογές. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, μεταδίδονταν συνεχώς πακέτα μεγέθους 1024 bytes, με τυχαίο περιεχόμενο και καθορισμένη καθυστέρηση 100 μs μεταξύ διαδοχικών αποστολών. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο διαφωνίας (crosstalk), χρησιμοποιήθηκαν οι θύρες 1 και 4, οι οποίες βρίσκονται στα άκρα της κάρτας διασύνδεσης.



Port name	SPW-1	SPW-2	SPW-3	SPW-4
Error transmitted packets	0	0	0	0
Error received packets	3	0	0	4
Disconnects	9	0	0	9
Parity errors	6	0	0	4

Σχήμα 5.17: Απεικόνιση της διεπαφής αναφοράς σφαλμάτων του εξομοιωτή SpaceWire

Κατά τη διάρκεια των έμμεσων δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, παρακολουθήθηκαν συστηματικά οι ακόλουθες κατηγορίες σφαλμάτων στο δίαυλο SpaceWire, καθώς αποτελούν κρίσιμες ενδείξεις της επίδρασης των παροδικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων:

- ... Error Received Packets: Αφορά πακέτα που φθάνουν αλλοιωμένα λόγω επαγόμενων ρευμάτων στη θωράκιση του καλωδίου. Τα ισχυρά παροδικά ηλεκτρικά πεδία κατά την εκφόρτιση προκαλούν θόρυβο ή παραμόρφωση των σημάτων, οδηγώντας σε σφάλματα στην παραλαβή των δεδομένων.
- ... Error Transmitted Packets: Καταγράφει σφάλματα σε εξερχόμενες μεταδόσεις, τα οποία συνδέονται με ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές ενδέχεται να προκαλέσουν αλλοίωση πακέτων ή σφάλματα στον εσωτερικό ρυθμό μετάδοσης.
- ... Disconnects: Σχετίζεται με ισχυρές παροδικές διαταραχές, κυρίως μέσω της θωράκισης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε επανεκκίνηση του συστήματος λόγω επαναλαμβανόμενων σφαλμάτων ή παραβίασης χρονικών περιορισμών του πρωτοκόλλου επικοινωνίας.
- ... Parity Errors: Προκύπτουν όταν επαγόμενα ρεύματα αλλοιώνουν χαρακτήρες των μεταδιδόμενων δεδομένων, προκαλώντας αναστροφή bit και παραβίαση του αλγορίθμου περιττής ισοτιμίας που εφαρμόζεται στο πρωτόκολλο SpaceWire. Αποτελούν κρίσιμη ένδειξη για την ευαισθησία του συστήματος στα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και συμβάλλουν στην εκτίμηση της ατρωσίας της επικοινωνίας έναντι παροδικών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

5.2.1.2. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της παραγράφου 8.3.3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27], για τη διενέργεια είκοσι (20) έμμεσων εκφορτίσεων. Ως γεννήτρια

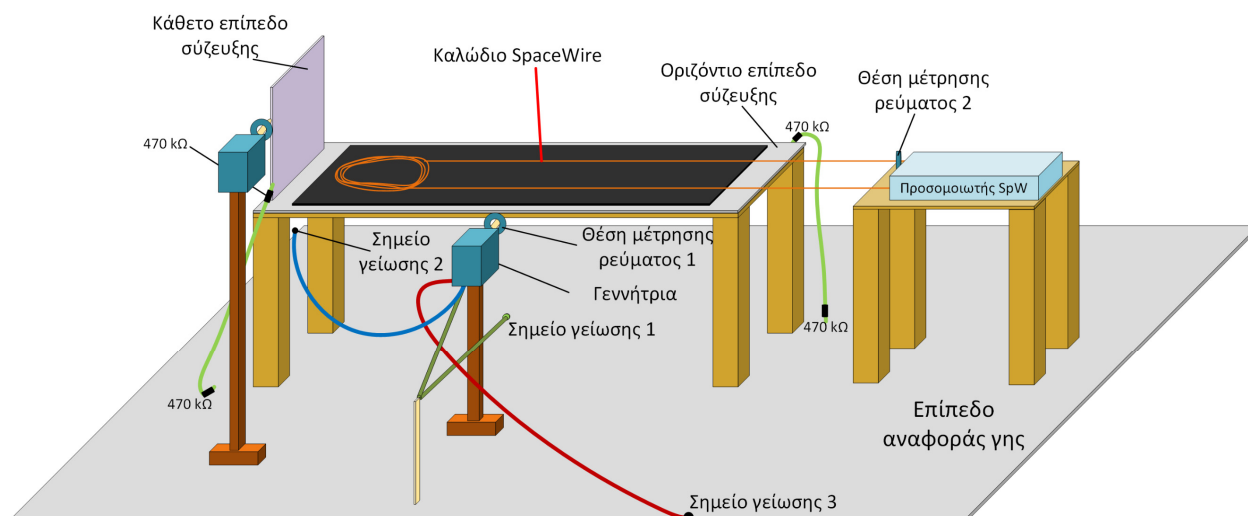
ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια EM Test Dito, η οποία πραγματοποιούσε εκφορτίσεις είτε στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης είτε στο κάθετο επίπεδο σύζευξης, ακολουθώντας τη νεότερη έκδοση του Προτύπου που προδιαγράφει αριθμό 20 εκφορτίσεων σε εξοπλισμό ο οποίος περιλαμβάνει ψηφιακά κυκλώματα.

Η γεννήτρια βρισκόταν σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής, όπως απαιτείται από το Πρότυπο, με επιλεγμένη τάση δοκιμής 4 kV, η οποία αποτελεί τη συχνότερα προτεινόμενη στάθμη τάσης στα Πρότυπα Προϊόντων. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε θετική πολικότητα, δεδομένου ότι σε προηγούμενες έρευνες δεν έχουν αναδειχθεί σημαντικές διαφοροποιήσεις λόγω πολικότητας σε αντίστοιχα πειράματα [149].

Για την καταγραφή των κυματομορφών τόσο του ρεύματος έγχυσης όσο και του επαγόμενου ρεύματος στη θωράκιση χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός:

- ... Ψηφιακός παλμογράφος Tektronix TDS7254B, εύρους ζώνης 2,5 GHz και ρυθμού δειγματοληψίας 20 GS/s
- ... Ανιχνευτής ρεύματος FCC F-65 με περιοχή λειτουργίας 10 kHz – 1 GHz
- ... Εξασθενητής Tektronix 20 dB, περιοχή λειτουργίας DC – 2 GHz
- ... Ομοαξονικό καλώδιο τύπου N της Pasternack, μήκους 3 m και ονομαστικής συχνότητας έως 18 GHz

Η διάταξη μέτρησης παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 5.18. Το σημείο σύνδεσης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας στο επίπεδο αναφοράς γης τροποποιήθηκε σε διάφορες φάσεις του πειραματικού σταδίου. Κατά την πρώτη φάση, όπου μελετήθηκε η επίδραση του ανθρώπινου χειριστή, η θέση γείωσης διατηρήθηκε σταθερή και τοποθετήθηκε κάτω από το μέσο του τραπεζιού δοκιμών (Σημείο Γείωσης 1), ευθυγραμμισμένη με το σημείο επαφής της ακίδας στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης. Για την ικανοποίηση της απαίτησης του Προτύπου περί μη επαπτομενικής διάταξης του καλωδίου γείωσης πάνω στο επίπεδο αναφοράς γης, εφαρμόστηκε μονωτικό στήριγμα, προκειμένου να διασφαλιστεί το χαρακτηριστικό τριγωνικό σχήμα της διάταξης, προσεγγίζοντας τη γεωμετρία που χρησιμοποιείται στη διαδικασία διακρίβωσης.

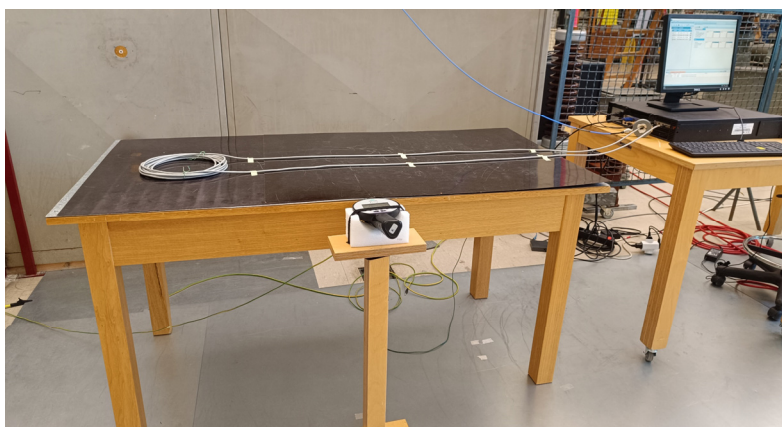


Σχήμα 5.18: Διάταξη μέτρησης για την έμμεση εφαρμογή παλμών εκφόρτισης στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο σύζευξης

Στη δεύτερη φάση, όπου μελετήθηκε η επίδραση της διάταξης καλωδίου γείωσης χωρίς χειριστή, προστέθηκαν δύο επιπλέον σημεία γείωσης — το ένα στο αριστερό άκρο του επιπέδου αναφοράς γης (Σημείο Γείωσης 3) και το άλλο στη δεξιά πλευρά της γεννήτριας (Σημείο Γείωσης 2) (Σχήμα 5.18) — δημιουργώντας διαφορετικές διατάξεις/βρόχους καλωδίου και, κατ' επέκταση, διαφορετικές τιμές σύνθετης αντίστασης.

Το Σχήμα 5.19 παρουσιάζει ενδεικτικά δύο διαφορετικές διατάξεις μέτρησης της παρούσας ενότητας:

- A) Η γεννήτρια είναι τοποθετημένη σε μονωτική βάση (σενάριο «Χωρίς Χειριστή») και εκφορτίζεται στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης, με το καλώδιο γείωσης συνδεδεμένο στο «Σημείο Γείωσης 2», ενώ ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος γύρω από το καλώδιο SpaceWire κοντά στους ακροδέκτες του προσομοιωτή (Θέση μέτρησης 2).
- B) Η γεννήτρια κρατείται από χειριστή και εκφορτίζεται στο κάθετο επίπεδο σύζευξης, με το καλώδιο γείωσης συνδεδεμένο σε τριγωνική διάταξη στο «Σημείο Γείωσης 1», και ο ανιχνευτής τοποθετείται γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Θέση μέτρησης 1).



α)



β)

Σχήμα 5.19: Διάταξη μέτρησης κατά την α) έμμεση εφαρμογή παλμών στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης χωρίς χειριστή με το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας συνδεδεμένο στο «Σημείο Γείωσης 2» – ανιχνευτής τοποθετημένος γύρω από το καλώδιο SpaceWire, και β) έμμεση εφαρμογή παλμών στο κάθετο επίπεδο σύζευξης με χειριστή που κρατά τη γεννήτρια και το καλώδιο γείωσης συνδεδεμένο στο «Σημείο Γείωσης 1» – ανιχνευτής τοποθετημένος γύρω από την ακίδα της γεννήτριας.

5.2.2. Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

5.2.2.1. Επίδραση του Χειριστή

Κατά την παρούσα φάση πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες μετρήσεων (Σημείο γείωσης 1):

A) με τη γεννήτρια τοποθετημένη σε μονωτική βάση (σενάριο Χωρίς χειριστή) και

B) με τη γεννήτρια να κρατείται από δύο διαφορετικούς χειριστές

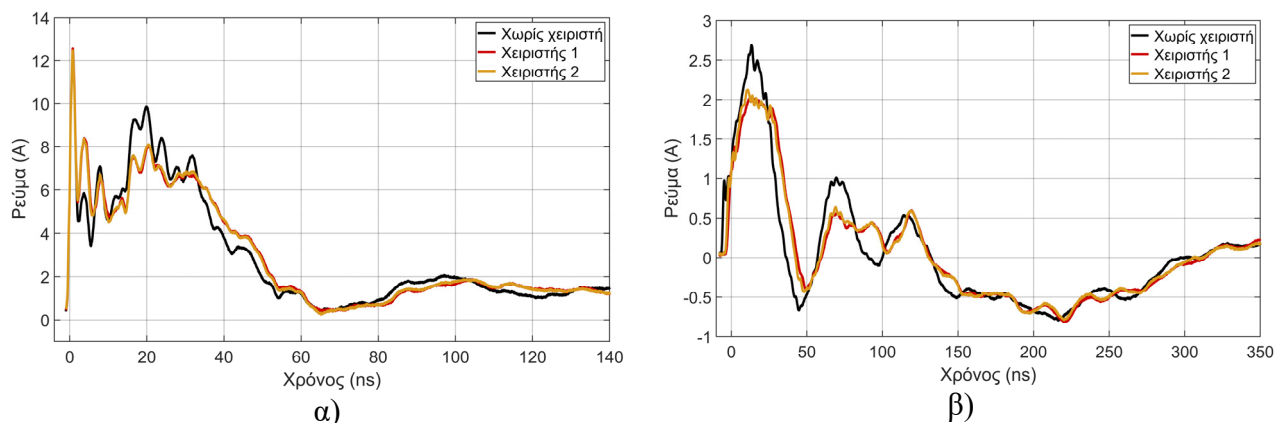
Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζονται οι καταγεγραμμένες κυματομορφές ρεύματος για:

... το ρεύμα έγχυσης στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) (Σχήμα 5.20α) και

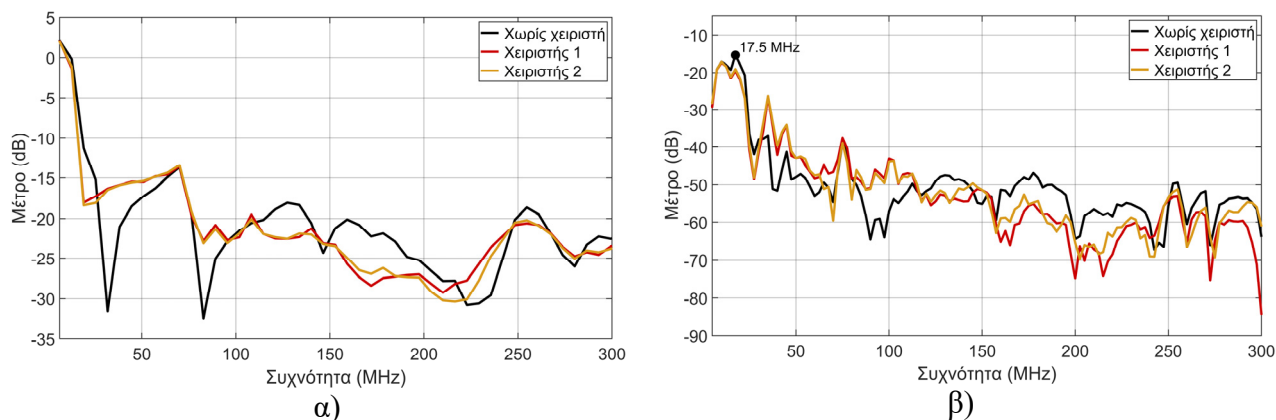
... το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση του καλωδίου (Θέση μέτρησης ρεύματος 2) (Σχήμα 5.20β)

ενώ στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το φασματικό περιεχόμενο για την εφαρμογή στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης.

Τα αποτελέσματα του ρεύματος στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Σχήμα 5.20α) καταδεικνύουν ποιοτικά την επίδραση του χειριστή, η οποία γίνεται εμφανής μετά τα 5 ns — χρονικό σημείο που



Σχήμα 5.20: Μέσες κυματομορφές κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1) για α) το ρεύμα έγχυσης (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) και β) το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)



Σχήμα 5.21: Υπολογισμένο φάσμα συχνοτήτων κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1) για α) το ρεύμα έγχυσης (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) και β) το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)

αντιστοιχεί στη βραδύτερη δεύτερη αιχμή του παλμού. Η παρατήρηση αυτή ενισχύεται από τα ποσοτικά αποτελέσματα του Πίνακα 5.14, όπου παρουσιάζεται η απόκλιση των επιμέρους δεικτών της κυματομορφής για κάθε χειριστή σε σχέση με το σενάριο χωρίς χειριστή.

Ενώ οι δείκτες που σχετίζονται με την πρώτη αιχμή παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι (απόκλιση έως 2,5 %), οι δείκτες της δεύτερης αιχμής παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις: ο δείκτης I_{P2} μειώνεται έως και κατά -18,5 %, ενώ ο δείκτης I_{60} αυξάνεται περίπου κατά 10 %.

Πίνακας 5.14: Δείκτες κυματομορφής και ποσοστά απόκλισης για το ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) κατά την έμμεση εφαρμογή στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1)

Δείκτης	Χωρίς χειριστή	Χειριστής 1	Απόκλιση	Χειριστής 2	Απόκλιση
I_P	12,57 A	12,62 A	0,381 %	12,58 A	0,101 %
t_r	1,095 ns	1,105 ns	0,913 %	1,123 ns	2,511 %
I_{P2}	9,957 A	8,115 A	-18,50 %	8,190 A	-17,75 %
I_{30}	6,580 A	6,728 A	2,252 %	6,728 A	2,254 %
I_{60}	1,186 A	1,304 A	9,961 %	1,264 A	6,544 %

Επιπλέον, το Σχήμα 5.21α παρουσιάζει τη φασματική διάσταση της επίδρασης του χειριστή. Τόσο το χαμηλής συχνότητας φασματικό περιεχόμενο (έως 25 MHz, που αντιστοιχεί στην πιο αργή δεύτερη αιχμή) όσο και το υψίσυχο περιεχόμενο (120 – 210 MHz, που σχετίζονται με παρασιτικές ταλαντώσεις) παρουσιάζουν εξασθένηση. Οι συντονισμοί γύρω από ~31 MHz και ~83 MHz — οι οποίοι σχετίζονται με την σύνθετη αντίσταση του καλωδίου [41], [64] — εξασθενούν σημαντικά. Αυτό υποδηλώνει ότι η ανθρώπινη παρουσία αλληλεπιδρά με την κυματομορφή με σύνθετο και πολυπαραγοντικό τρόπο.

Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση. Οι κυματομορφές του Σχήματος 5.20β παρουσιάζουν σαφείς αποκλίσεις εντός των πρώτων 100 ns, ενώ το Σχήμα 5.21β επιβεβαιώνει τις φασματικές διαφοροποιήσεις. Οι υπολογισμένοι δείκτες του επαγόμενου ρεύματος στον Πίνακα 5.15 ενισχύουν περαιτέρω τη μεταβλητότητα της επίδρασης του χειριστή.

Πίνακας 5.15: Δείκτες κυματομορφής και ποσοστά απόκλισης για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2) κατά την έμμεση εφαρμογή στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1)

Δείκτης	Χωρίς χειριστή	Χειριστής 1	Απόκλιση	Χειριστής 2	Απόκλιση
I_{RMS}	0,707 A	0,646 A	-8,581 %	0,629 A	-11,02 %
Φορτίο	25,74 nC	24,52 nC	-4,717 %	23,69 nC	-7,943 %
η	5,9405 %	5,674 %	-0,266 %	5,494 %	-0,446 %
Κλίση ανόδου	0,133 A/ns	0,146 A/ns	9,873 %	0,159 A/ns	19,31 %
$ FFT _{17,5MHz}$	-15,51 dB	-19,35 dB	-3,84 dB	-19,55 dB	-4,04 dB

Η ιδιαίτερα έντονη ταλάντωση εντός των πρώτων 57 ns στην κυματομορφή του ρεύματος θωράκισης υποδεικνύει την ύπαρξη δομικού συντονισμού στο σύστημα, με θεμελιώδη συχνότητα περίπου 17,5 MHz. Αν και παρατηρείται ποιοτικά συνεπής συμπεριφορά σε όλους τους δείκτες, οι αριθμητικές τιμές απόκλισης εμφανίζουν σημαντική μεταβλητότητα:

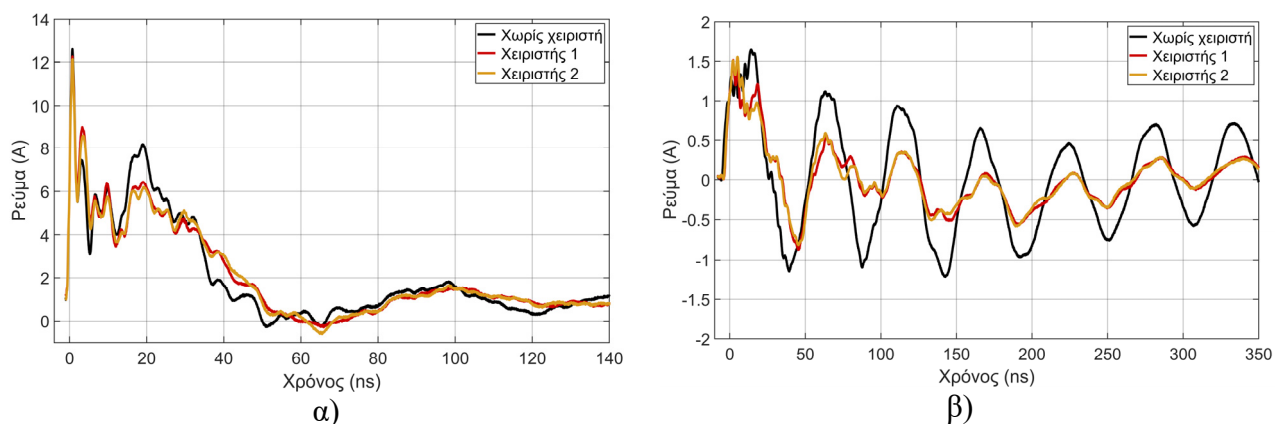
- ... Οι σωρευτικοί δείκτες (όπως I_{RMS} , *Charge* και η απόδοση σύζευξης η) μειώνονται υπό την παρουσία του χειριστή, υποδεικνύοντας χαμηλότερη συνολική ενέργεια μεταφοράς.
- ... Αντίθετα, η κλίση ανόδου (*Rise Slope*) αυξάνεται, υποδεικνύοντας απότομες αρχικές μεταβάσεις.
- ... Η φασματική τιμή $|FFT|$ στη συχνότητα 17,5 MHz μειώνεται, αντανακλώντας εξασθένηση συγκεκριμένων φασματικών συνιστωσών.

Η επίδραση του χειριστή παρουσιάζεται έντονα και στα στατιστικά σφαλμάτων της σύνδεσης SpaceWire, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.16: παρατηρούνται αυξημένες αποκλίσεις στα transmitted packet errors και στα parity errors, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ των δύο χειριστών. Αυτό αντανακλά τη διαφοροποίηση τόσο των χαμηλόσυχνων όσο και των υψίσυχνων φασματικών συνιστωσών, επηρεάζοντας άμεσα τα αποτελέσματα των δοκιμών και υπονομεύοντας την αναπαραγωγιμότητα τους.

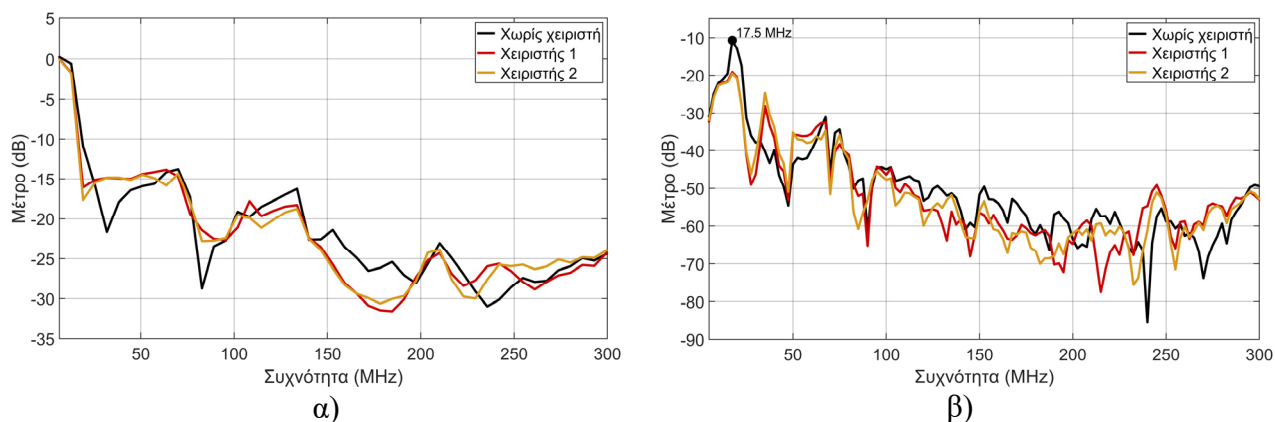
Πίνακας 5.16: Σφάλματα σύνδεσης SpaceWire κατά την έμμεση εφαρμογή στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης

Τύπος σφάλματος	Χωρίς χειριστή		Χειριστής 1		Χειριστής 2	
	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4
Error received packets	0	0	0	0	0	0
Error transmitted packets	8	9	9	12	12	10
Disconnects	22	22	20	20	22	22
Parity error	14	13	14	16	12	13

Οι παραπάνω επιδράσεις γίνονται ακόμη πιο εμφανείς στην περίπτωση έμμεσης εκφόρτισης στο κάθετο επίπεδο σύζευξης. Όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.22 και 5.23 καθώς και στους Πίνακες 5.17 – 5.19, η παρουσία του χειριστή εισάγει σημαντικές και πολύπλοκες αποκλίσεις τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 5.22: Μέσες κυματομορφές κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών στο κάθετο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1) για α) το ρεύμα έγχυσης (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) και β) το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)



Σχήμα 5.23: Υπολογισμένο φάσμα συχνοτήτων κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών στο κάθετο επίπεδο σύζευξης για (Σημείο γείωσης 1) α) το ρεύμα έγχυσης (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) και β) το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2).

Πίνακας 5.17: Δείκτες κυματομορφής και ποσοστά απόκλισης για το ρεύμα στο άκρο της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) κατά την έμμεση εφαρμογή στο κάθετο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1)

Δείκτης	Χωρίς χειριστή	Χειριστής 1	Απόκλιση	Χειριστής 2	Απόκλιση
I_P	12,62 A	12,29 A	2,602 %	12,22 A	3,178 %
t_r	1,300 ns	1,460 ns	12,31 %	1,283 ns	1,346 %
I_{P2}	8,275 A	6,541 A	20,95 %	6,333 A	23,47 %
I_{30}	4,594 A	4,577 A	0,363 %	5,013 A	9,124 %
I_{60ns}	0,386 A	-0,010 A	-	0,172 A	-

Πίνακας 5.18: Δείκτες κυματομορφής και ποσοστά απόκλισης για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2) κατά την έμμεση εφαρμογή στο κάθετο επίπεδο σύζευξης (Σημείο γείωσης 1)

Δείκτης	Χωρίς χειριστή	Χειριστής 1	Απόκλιση	Χειριστής 2	Απόκλιση
I_{RMS}	0,657 A	0,349 A	-46,92 %	0,350 A	-46,81 %
Φορτίο	10,28 nC	8,520 nC	-17,15 %	8,845 nC	-13,98 %
η	3,307 %	2,776 %	-0,531 %	2,891 %	-0,415 %
Κλίση ανόδου	0,090 A/ns	0,254 A/ns	16,05 %	0,243 A/ns	12,56 %
$ FFT _{17,5MHz}$	-10,26 dB	-19,67 dB	-9,41 dB	-19,82 dB	-9,56 dB

Πίνακας 5.19: Σφάλματα σύνδεσης SpaceWire κατά την έμμεση εφαρμογή στο κάθετο επίπεδο σύζευξης

Τύπος σφάλματος	Χωρίς χειριστή		Χειριστής 1		Χειριστής 2	
	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4
Error received packets	0	0	0	0	0	0
Error transmitted packets	15	16	8	11	15	11
Disconnects	21	21	20	20	23	23
Parity error	10	13	11	14	11	16

Οι διαφορές που παρατηρούνται δεν περιορίζονται μόνο ανάμεσα στις συνθήκες με χειριστή και χωρίς χειριστή, αλλά επεκτείνονται και μεταξύ των δύο διαφορετικών χειριστών, γεγονός που επιβεβαιώνει την πολυπλοκότητα και τη μη προβλέψιμη φύση της ανθρώπινης επίδρασης.

Ειδικότερα, για το ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας, καταγράφονται αποκλίσεις στην παράμετρο I_{P2} που υπερβαίνουν το 23 %, ενώ για την παράμετρο I_{60} η ποσοστιαία διαφοροποίησή της δεν μπορεί να υπολογιστεί, λόγω τιμών πολύ κοντά στο μηδέν.

Όσον αφορά το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση, η παράμετρος I_{RMS} εμφανίζει μείωση της τάξεως του 47 %, ενώ η φασματική συνιστώσα στα 17,5 MHz εξασθενεί περίπου κατά 10 dB. Παράλληλα, τα στατιστικά σφαλμάτων της σύνδεσης SpaceWire καταδεικνύουν περαιτέρω υποβάθμιση της αναπαραγωγιμότητας, ως άμεσο αποτέλεσμα της ανθρώπινης επίδρασης.

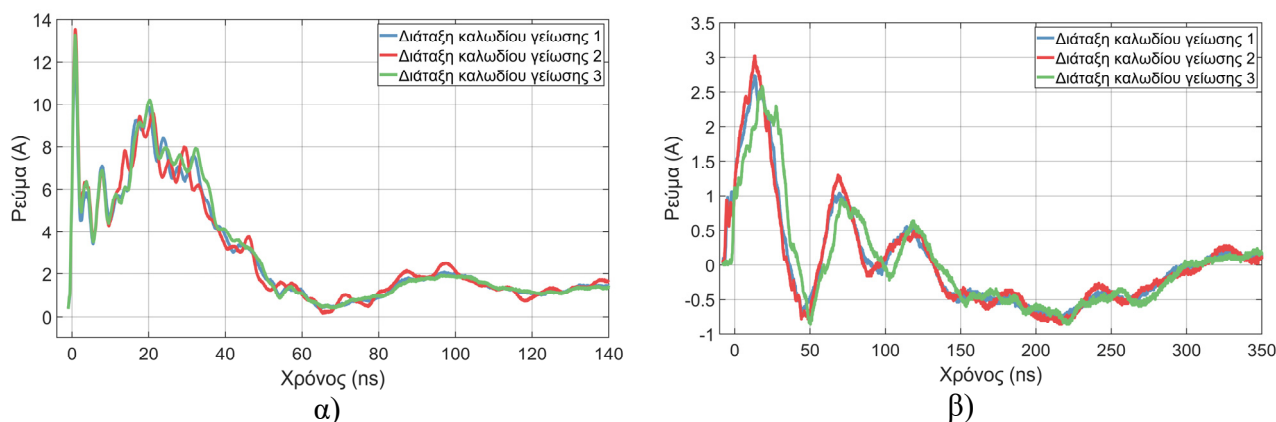
Λαμβανομένης υπόψη της σημαντικής επίδρασης του χειριστή τόσο στα ρεύματα έγχυσης όσο και στα επαγόμενα ρεύματα — ιδίως στο φασματικό πεδίο — καθώς και της παρατηρούμενης μεταβλητότητας μεταξύ διαφορετικών χειριστών, καθίσταται σαφές ότι οι έμμεσες εκφορτίσεις συνιστάται να διεξάγονται χωρίς την παρουσία χειριστή. Η χρήση μονωτικής βάσης και αυτοματοποιημένου μηχανισμού εκφόρτισης συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό των ανθρωπογενών επιδράσεων και στη βελτίωση της αναπαραγωγιμότητας των δοκιμών.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η κυματομορφή παραμένει ευαίσθητη στις μεταβολές της σύνθετης αντίστασης και της γεωμετρίας του καλωδίου γείωσης. Κατά συνέπεια, στην επόμενη ενότητα εξετάζονται διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης υπό συνθήκες χωρίς χειριστή, με σκοπό την ταυτοποίηση εκείνων των διατάξεων που δύνανται να ενισχύσουν περαιτέρω την αναπαραγωγικότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

5.2.2.2. Διάταξη του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Όπως αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες και αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.18, μελετήθηκαν τρία διαφορετικά σημεία σύνδεσης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με το επίπεδο αναφοράς γης, για την περίπτωση εφαρμογής παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χωρίς την παρουσία χειριστή. Στο σενάριο αυτό, η γεννήτρια τοποθετήθηκε επάνω σε μονωτική βάση ή τρίποδο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27] για τη διαδικασία διακρίβωσης.

Το «Σημείο Γείωσης 1» αναπαριστά τη διάταξη που χρησιμοποιείται κατά τη διακρίβωση, ενώ τα «Σημεία Γείωσης 2» και «3» αντιστοιχούν σε εναλλακτικές διαμορφώσεις, εξεταζόμενες στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης για πιθανή βελτίωση της αναπαραγωγικότητας. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε καλώδιο γείωσης μήκους 2 m, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή της γεννήτριας. Το Σχήμα 5.24 παρουσιάζει τις καταγεγραμμένες κυματομορφές τόσο για το ρεύμα έγχυσης στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1) όσο και για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2), κατά την εφαρμογή των έμμεσων εκφορτίσεων στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης, για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης.



Σχήμα 5.24: Μέσες κυματομορφές κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας: α) ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1), β) επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)

Τα αποτελέσματα για το ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.24α καταδεικνύουν διακριτές μεταβολές μεταξύ των παραγόμενων κυματομορφών, με το σενάριο «Σημείο Γείωσης 2» να διαφοροποιείται αισθητά σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Η διαφορά αυτή αποδίδεται κυρίως στην τριγωνική διαμόρφωση του βρόχου του καλωδίου γείωσης, σε αντίθεση με την ημικυκλική γεωμετρία που χαρακτηρίζει τα άλλα δύο σενάρια.

Οι επιδράσεις των διαφοροποιήσεων αυτών αποτυπώνονται και στους δείκτες κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίοι συνοψίζονται στον Πίνακα 5.20. Ειδικότερα, ο χρόνος ανόδου

παραμένει σχεδόν αμετάβλητος σε όλα τα σενάρια ($\sim 1,09$ ns), γεγονός που υποδηλώνει περιορισμένη επίδραση στην πρώτη αιχμή της κυματομορφής. Αντιθέτως, άλλοι δείκτες παρουσιάζουν σημαντικότερες μεταβολές. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος (παράμετρος I_p) αυξάνεται από 12,57 A στο Σημείο Γείωσης 1 σε 13,67 A στο Σημείο Γείωσης 2, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρότερη σύζευξη. Αντίστοιχες μεταβολές, της τάξης του ~ 15 %, καταγράφονται και για την παράμετρο I_{p2} καθώς και για τις παραμέτρους που σχετίζονται με τη δεύτερη αιχμή, όπως οι παράμετροι I_{30} και I_{60} . Σημειώνεται ότι στο Σενάριο 2 παρατηρείται η υψηλότερη τιμή της παραμέτρου I_{30} και η χαμηλότερη τιμή της παραμέτρου I_{60} .

Πίνακας 5.20: Δείκτες κυματομορφής κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης για το ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1)

Δείκτης	Διάταξη καλωδίου γείωσης		
	1	2	3
I_p	12,57 A	13,67 A	13,39 A
t_r	1,095 ns	1,085 ns	1,095 ns
I_{p2}	9,957 A	9,691 A	10,30 A
I_{30}	6,580 A	7,617 A	6,780 A
I_{60}	1,186 A	1,001 A	1,115 A

Οι παρατηρήσεις αυτές αποτυπώνονται επίσης και στο επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2) (Σχήμα 5.24β και Πίνακας 5.21), καθώς και στα στατιστικά σφάλματα της σύνδεσης SpaceWire (Πίνακας 5.22). Ενώ οι σωρευτικοί δείκτες, όπως η ενεργός τιμή του ρεύματος (παράμετρος I_{RMS}) και το μεταφερόμενο φορτίο, παραμένουν σχετικά σταθεροί, παρατηρείται ελαφρά μείωση της μεταφερόμενης ενέργειας από το Σενάριο Γείωσης 1 προς το Σενάριο Γείωσης 3. Η κλίση ανόδου εμφανίζει μεταβολή της τάξης του ~ 13 %, γεγονός που υποδηλώνει διαφορές στην απότομη μεταβατική συμπεριφορά του επαγόμενου ρεύματος. Επιπλέον, το φασματικό περιεχόμενο στα 17,5 MHz παρουσιάζει απόκλιση 1,16 dB, με το Σενάριο Γείωσης 2 να εμφανίζει τη μικρότερη εξασθένιση.

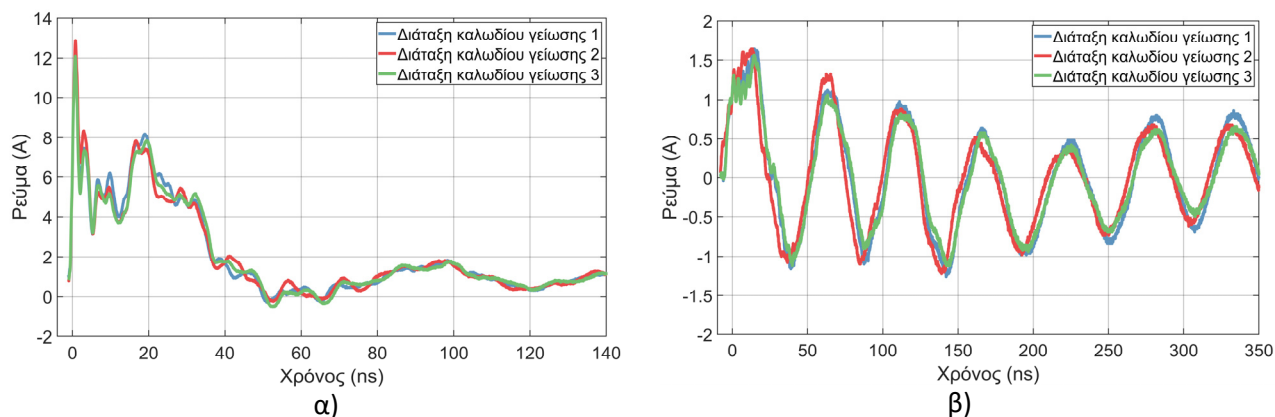
Πίνακας 5.21: Δείκτες κυματομορφής κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)

Δείκτης	Διάταξη καλωδίου γείωσης		
	1	2	3
I_{RMS}	0,707 A	0,737 A	0,693 A
Φορτίο	25,74 nC	25,12 nC	24,20 nC
η	5,940 %	5,753 %	5,464 %
Κλίση ανόδου	0,133 A/ns	0,140 A/ns	0,124 A/ns
$ FFT _{17,5MHz}$	-15,51 dB	-14,50 dB	-15,66 dB

Πίνακας 5.22: Σφάλματα συνδέσμου SpaceWire κατά την έμμεση εφαρμογή εκφορτίσεων στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια σύνδεσης του καλωδίου γείωσης.

Error type	Διάταξη καλωδίου γείωσης					
	1		2		3	
	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4
Error received packets	0	0	0	0	0	0
Error transmitted packets	8	9	13	13	9	9
Disconnects	22	22	24	24	20	20
Parity error	14	13	14	15	15	16

Οι μεταβολές αυτές αντικατοπτρίζουν μέτριες, αλλά μη αμελητέες επιδράσεις της διάταξης του καλωδίου γείωσης στη σύζευξη με το θωρακισμένο καλώδιο. Τα στατιστικά σφάλματα της σύνδεσης SpaceWire ενισχύουν τα παραπάνω ευρήματα, καθώς στο Σενάριο Γείωσης 2 παρατηρείται ο μεγαλύτερος αριθμός σφαλμάτων μετάδοσης πακέτων και αποσυνδέσεων. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι ακόμη και μικρές διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία της γείωσης μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά την αναπαραγωγικότητα των δοκιμών και την ευπάθεια του συστήματος σε παρεμβολές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 5.25: Μέσες κυματομορφές κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο κάθετο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας: α) ρεύμα στο άκρο της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1), β) επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)

Πίνακας 5.23: Δείκτες κυματομορφής κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο κάθετο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης για το ρεύμα στο άκρο της γεννήτριας (Θέση μέτρησης ρεύματος 1)

Δείκτης	Διάταξη καλωδίου γείωσης		
	1	2	3
I_P	12,62 A	12,90 A	12,14 A
t_r	1,300 ns	1,193 ns	1,220 ns
I_{P2}	8,275 A	7,923 A	7,928 A
I_{30}	4,594 A	4,699 A	4,673 A
I_{60}	0,386 A	0,170 A	0,217 A

Πίνακας 5.24: Δείκτες κυματομορφής κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο κάθετο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια διάταξης του καλωδίου γείωσης για το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση (Θέση μέτρησης ρεύματος 2)

Δείκτης	Διάταξη καλωδίου γείωσης		
	1	2	3
I_{RMS}	0,657 A	0,630 A	0,579 A
Φορτίο	10,283 nC	9,904 nC	9,285 nC
η	3,307 %	3,221 %	3,034 %
Κλίση ανόδου	0,090 A/ns	0,096 A/ns	0,071 A/ns
$ FFT _{17,5MHz}$	-10,26 dB	-10,92 dB	-11,58 dB

Πίνακας 5.25: Σφάλματα συνδέσμου SpaceWire κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο κάθετο επίπεδο σύζευξης για τρία διαφορετικά σενάρια σύνδεσης του καλωδίου γείωσης.

Error type	Διάταξη καλωδίου γείωσης					
	1		2		3	
	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4	Port 1	Port 4
Error received packets	0	0	0	0	0	0
Error transmitted packets	15	16	13	16	12	14
Disconnects	21	21	24	24	22	22
Parity error	10	13	10	17	14	11

Αντίστοιχα με την περίπτωση του οριζόντιου επιπέδου σύζευξης, τα αποτελέσματα για το κάθετο επίπεδο σύζευξης (Σχήμα 5.25 και Πίνακες 5.23 – 5.25) καταδεικνύουν μετρήσιμες μεταβολές μεταξύ των τριών σεναρίων σύνδεσης του καλωδίου γείωσης.

Για το ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας, η μέγιστη τιμή ρεύματος (παράμετρος I_p) κυμαίνεται από 12,14 A έως 12,90 A, ενώ ο χρόνος ανόδου (παράμετρος t_r) κυμαίνεται μεταξύ 1,193 ns και 1,300 ns. Ο δείκτης I_{P2} εμφανίζει επίσης διαφοροποιήσεις της τάξεως του 4 %. Στους δείκτες του επαγόμενου ρεύματος στη θωράκιση, η ενεργός τιμή I_{RMS} μειώνεται από 0,657 A σε 0,579 A, ενώ το φασματικό πλάτος στη συχνότητα των 17,5 MHz μειώνεται από -10,26 dB σε -11,58 dB.

Παρά το γεγονός ότι οι αποκλίσεις αυτές είναι ηπιότερες συγκριτικά με εκείνες που παρατηρούνται στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης, επιβεβαιώνεται ότι το σενάριο σύνδεσης του καλωδίου γείωσης επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής ακόμη και σε συνθήκες απουσίας χειριστή. Η περιορισμένη αυτή ευαισθησία της κάθετης διάταξης αποδίδεται στη μεγαλύτερη απόσταση από το υπό δοκιμή καλώδιο και το επίπεδο σύζευξης, στη μικρότερη και πιο άμεση διαδρομή του καλωδίου γείωσης, καθώς και στον λιγότερο ευθυγραμμισμένο προσανατολισμό του σε σχέση με τη διαδρομή εκφόρτισης – παράγοντες που περιορίζουν τη χωρητική και επαγωγική σύζευξη.

Συνεπώς, εφόσον το Πρότυπο κινηθεί προς την υιοθέτηση αυτοματοποιημένων διατάξεων για τις έμμεσες εκφορτίσεις, καθίσταται κρίσιμη η τυποποίηση του σεναρίου σύνδεσης του καλωδίου γείωσης, ώστε να διασφαλιστεί η αναπαραγωγικότητα και η συγκρισιμότητα μεταξύ διαφορετικών διατάξεων δοκιμής και εργαστηρίων.

Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου η εφαρμογή ενός πλήρως αυτοματοποιημένου ή χωρίς χειριστή σεναρίου δεν είναι εφικτή – όπως στις εκφορτίσεις σε εξοπλισμό δαπέδου – η επίδραση του χειριστή εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση. Στις περιπτώσεις αυτές, η χρήση εξειδικευμένου προστατευτικού εξοπλισμού, όπως γάντια ESD ή μονωτικά υποδήματα υψηλής τάσης (HV), ενδέχεται να προσφέρει μία πρακτική στρατηγική εξομάλυνσης. Η επόμενη ενότητα διερευνά κατά πόσον ο διαθέσιμος προστατευτικός εξοπλισμός μπορεί να περιορίσει την επίδραση του χειριστή στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να συμβάλει στη βελτίωση της αναπαραγωγικότητας των δοκιμών που διεξάγονται υπό χειροκίνητες συνθήκες εκφόρτισης.

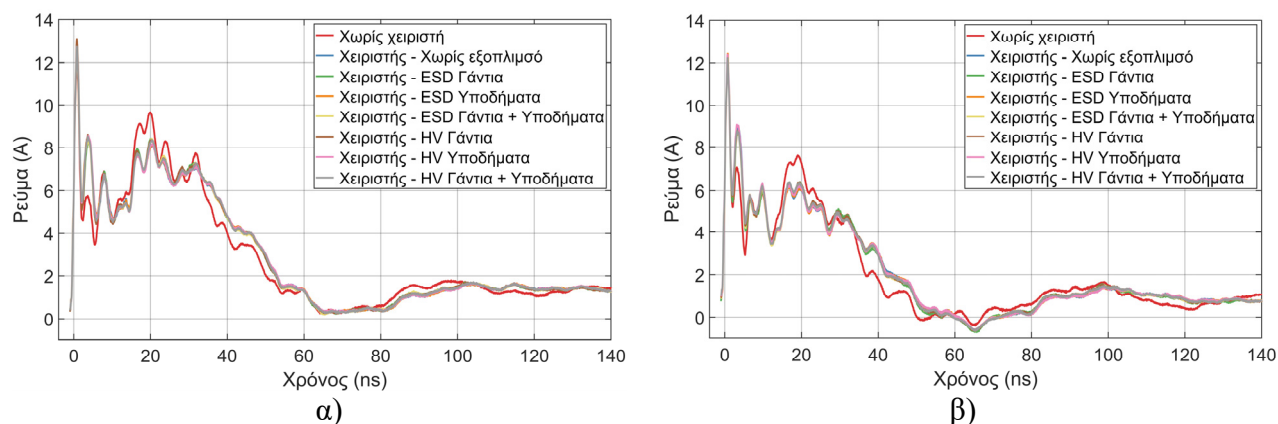
5.2.2.3. Μελέτη της αλληλεπίδρασης του φαινομένου επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ESD με προστατευτικό εξοπλισμό σώματος

Στο παρόν στάδιο της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τον ανθρώπινο χειριστή να κρατά τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με το καλώδιο γείωσης συνδεδεμένο στο «Σημείο Γείωσης 2», κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης τόσο στο

οριζόντιο όσο και στο κάθετο επίπεδο σύζευξης. Ο χειριστής φορούσε διάφορους τύπους συνήθους προστατευτικού εξοπλισμού σώματος ή συνδυασμούς αυτών.

Ο προστατευτικός εξοπλισμός περιλάμβανε γάντια και υποδήματα ESD, καθώς και γάντια και υποδήματα Υψηλής Τάσης (HV). Τα γάντια ESD κατασκευάζονται από αγώγιμα υλικά, επιτρέποντας την ασφαλή εκφόρτιση του στατικού ηλεκτρισμού από τα χέρια, ενώ τα γάντια HV κατασκευάζονται από μονωτικό καουτσούκ και παρέχουν προστασία έναντι ηλεκτροπληξίας κατά την εργασία σε συνθήκες υψηλής τάσης. Αντίστοιχα, τα υποδήματα ESD διαθέτουν αγώγιμες σόλες, διατηρώντας χαμηλή αντίσταση προς τη γη και αποτρέποντας τη συσσώρευση στατικού φορτίου, ενώ τα υποδήματα HV διαθέτουν μονωτικές σόλες, εμποδίζοντας τη ροή ρεύματος και προσφέροντας ηλεκτρική απομόνωση σε περιβάλλοντα υψηλής τάσης.

Η ποιοτική παρατήρηση των κυματομορφών (Σχήμα 5.26) υποδεικνύει μικρές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων προστατευτικού εξοπλισμού, χωρίς ωστόσο να διαφαίνεται ουσιαστική εξάλειψη της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τα ποσοτικά αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.26 και 5.27, παρέχουν πιο αναλυτική εικόνα για την επίδραση κάθε συνδυασμού εξοπλισμού.



Σχήμα 5.26: Μέσες κυματομορφές ρεύματος κατά τη σύγκριση της κατάστασης χωρίς χειριστή και των περιπτώσεων με χειριστή που φορά διάφορους συνδυασμούς προστατευτικού εξοπλισμού, κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο α) οριζόντιο επίπεδο σύζευξης και β) κάθετο επίπεδο σύζευξης

Πίνακας 5.26: Ποσοστά απόκλισης των δεικτών κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το σενάριο χωρίς χειριστή, για διάφορους συνδυασμούς προστατευτικού εξοπλισμού, κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης

Δείκτες κυματομορφής «Χωρίς χειριστή» (αναφορά): $I_p=12,45\text{ A}$, $t_r=1,103\text{ ns}$, $I_{p2}=9,726\text{ A}$, $I_{30}=6,596\text{ A}$, $I_{60}=1,286\text{ A}$							
Δείκτης	Χωρίς εξοπλισμό	ESD Γάντια	ESD Υποδήματα	ESD Γάντια + ESD Υποδήματα	HV Γάντια	HV Υποδήματα	HV Γάντια + HV Υποδήματα
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
I_p	1,346	3,960	1,325	1,766	5,811	3,118	2,783
t_r	1,361	1,814	0,680	0,454	1,361	1,361	1,134
I_{p2}	15,66	12,26	15,10	12,44	13,15	15,06	13,28
I_{30}	5,468	7,025	5,086	4,826	4,706	3,869	4,234
I_{60}	2,161	0,577	4,462	2,216	0,223	3,606	2,707

Πίνακας 5.27: Ποσοστά απόκλισης των δεικτών κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το σενάριο χωρίς χειριστή, για διάφορους συνδυασμούς προστατευτικού εξοπλισμού, κατά την έμμεση εφαρμογή παλμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο κάθετο επίπεδο σύζευξης

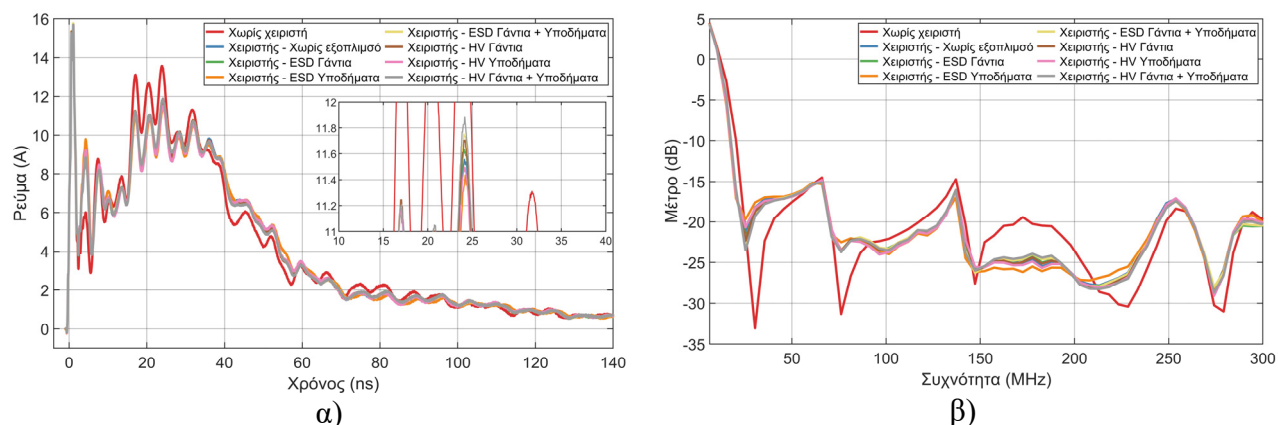
Δείκτες «Χωρίς χειριστή» (αναφορά): $I_P=12,17\text{ A}$, $t_r=1,283\text{ ns}$, $I_{P2}=7,730\text{ A}$, $I_{30}=4,484\text{ A}$, $I_{60}=0,180\text{ A}$							
Δείκτης	Χωρίς εξοπλισμό	ESD Γάντια	ESD Υποδήματα	ESD Γάντια + ESD Υποδήματα	HV Γάντια	HV Υποδήματα	HV Γάντια + HV Υποδήματα
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
I_P	0,366	0,571	2,520	1,179	0,977	2,218	0,924
t_r	2,144	3,314	5,458	0,195	2,144	0,975	7,213
I_{P2}	18,88	16,24	18,88	16,77	16,26	17,72	16,22
I_{30}	9,163	10,94	6,651	5,986	8,355	5,330	5,957
I_{60}	-	-	-	-	-	-	-

Πιο αναλυτικά, για το οριζόντιο επίπεδο σύζευξης, κανένας συνδυασμός προστατευτικού εξοπλισμού δεν εξαλείφει πλήρως την επίδραση του χειριστή, αν και ορισμένα σενάρια οδηγούν σε μειώσεις επιμέρους αποκλίσεων. Τα γάντια ESD, καθώς και ο συνδυασμός γαντιών και υποδημάτων ESD, μειώνουν την απόκλιση στον δείκτη I_{P2} από 15,66 % (χωρίς εξοπλισμό) σε 12,26 % και 12,44 % αντίστοιχα. Ομοίως, τα γάντια ESD εμφανίζουν τη μικρότερη απόκλιση στον δείκτη I_{60} , με τιμή 0,577 %, υποδεικνύοντας μικρή βελτίωση στη συμπεριφορά του ρεύματος σε μεταγενέστερα χρονικά διαστήματα. Αντιθέτως, τα γάντια HV οδηγούν στη μεγαλύτερη απόκλιση στον δείκτη I_P (5,811 %), γεγονός που υποδηλώνει ότι ο μονωτικός εξοπλισμός μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να επιδεινώσει το φαινόμενο της σύζευξης.

Για το κάθετο επίπεδο σύζευξης, οι αποκλίσεις είναι γενικώς μικρότερες συγκριτικά με εκείνες που παρατηρούνται στο οριζόντιο επίπεδο, γεγονός που αποδίδεται στη μειωμένη ευαισθησία του κάθετου σεναρίου στο ανθρώπινο σώμα. Τα γάντια ESD μειώνουν και εδώ την απόκλιση στον δείκτη I_{P2} από 18,88 % (χωρίς εξοπλισμό) σε 16,24 %, ενώ ο συνδυασμός γαντιών και υποδημάτων ESD παρουσιάζει την πλέον συνεπή απόδοση σε όλους τους δείκτες. Όπως και στα προηγούμενα ευρήματα, οι αποκλίσεις στον δείκτη I_{60} δεν αναφέρονται λόγω της σχεδόν μηδενικής τιμής αναφοράς, καθιστώντας τις ποσοστιαίες αποκλίσεις μη αξιόπιστες.

Συνολικά, αν και η χρήση προστατευτικού εξοπλισμού δεν επιτυγχάνει πλήρη εξάλειψη της επίδρασης του χειριστή, ο συνδυασμός γαντιών και υποδημάτων ESD αποδεικνύεται η πλέον σταθερή λύση, προσφέροντας τη μεγαλύτερη συνέπεια στη μείωση κρίσιμων δεικτών της κυματομορφής και μπορεί να θεωρηθεί η καταλληλότερη επιλογή σε περιπτώσεις όπου η διεξαγωγή δοκιμών χωρίς χειριστή δεν είναι εφικτή.

Για την περαιτέρω επιβεβαίωση της αποτελεσματικότερης διάταξης προστατευτικού εξοπλισμού, πραγματοποιήθηκαν είκοσι (20) μετρήσεις χωρίς χειριστή και είκοσι (20) με χειριστή που φορούσε τον ανωτέρω εξοπλισμό, στη διάταξη διακρίβωσης που καθορίζεται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 (Σχήμα 5.27). Στη διαδικασία αυτή, η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εκφορτίζεται σε λειτουργία επαφής προς τον στόχο Pellegrini, ο οποίος συνδέεται, μέσω εξασθενητή 20 dB, σε παλμογράφο, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τα ποσοτικά αποτελέσματα της σύγκρισης των διαφορετικών σεναρίων εξοπλισμού με το σενάριο αναφοράς («Χωρίς χειριστή») παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.28.



Σχήμα 5.27: Μέσες κυματομορφές (α) και φάσμα συχνοτήτων (β) για το σενάριο «Χωρίς χειριστή» και τις περιπτώσεις με χειριστή που φορά διάφορους συνδυασμούς προστατευτικού εξοπλισμού, κατά τη διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2

Πίνακας 5.28: Ποσοστά απόκλισης των δεικτών κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από την κατάσταση χωρίς χειριστή, για διάφορους συνδυασμούς προστατευτικού εξοπλισμού, κατά τη διαδικασία διακρίβωσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2

Δείκτες κυματομορφής «Χωρίς χειριστή» (αναφορά): $I_P=12,17\text{ A}$, $t_r=1,283\text{ ns}$, $I_{P2}=7,730\text{ A}$, $I_{30}=4,484\text{ A}$, $I_{60}=0,180\text{ A}$

Δείκτης	Χωρίς εξοπλισμό	ESD Γάντια	ESD Υποδήματα	ESD Γάντια + ESD Υποδήματα	HV Γάντια	HV Υποδήματα	HV Γάντια + HV Υποδήματα
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
I_P	0,101	0,379	0,303	0,051	0,202	0,759	0,329
t_r	0,283	0,850	0,000	1,133	0,850	0,567	0,850
I_{P2}	14,69	14,01	15,66	13,16	13,60	15,19	12,40
I_{30}	4,547	4,217	7,772	4,671	4,961	6,780	5,457
I_{60}	6,962	6,329	5,316	4,304	5,190	8,987	3,291

Σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς προστατευτικό εξοπλισμό, η οποία εμφανίζει αποκλίσεις της τάξεως του 14,69 % στον δείκτη I_{P2} , 4,55 % στον δείκτη I_{30} και 6,96 % στον δείκτη I_{60} , η χρήση γαντιών και υποδημάτων ESD περιορίζει τις αποκλίσεις αντίστοιχα σε 13,16 %, 4,67 % και 4,30 %, παρουσιάζοντας σταθερή βελτίωση σε κρίσιμους δείκτες. Αξιοσημείωτο είναι ότι ο συνδυασμός γαντιών και υποδημάτων HV επιτυγχάνει τη μικρότερη απόκλιση στον δείκτη I_{60} (3,291 %), αν και παρουσιάζει λιγότερο σταθερή απόδοση στους υπόλοιπους δείκτες. Αντιθέτως, η χρήση μόνο υποδημάτων ESD οδηγεί σε υψηλότερες αποκλίσεις τόσο στον δείκτη I_{30} (7,772 %) όσο και στον δείκτη I_{60} (5,316 %), γεγονός που καταδεικνύει περιορισμένη αποτελεσματικότητα όταν χρησιμοποιούνται μεμονωμένα.

Παρότι καμία διάταξη προστατευτικού εξοπλισμού δεν εξαλείφει πλήρως την επίδραση του χειριστή, ο συνδυασμός γαντιών και υποδημάτων ESD αναδεικνύεται ως η πλέον αξιόπιστη επιλογή για τη μείωση των αποκλίσεων, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά του ως βέλτιστη λύση σε περιπτώσεις, όπου η παρουσία χειριστή είναι αναπόφευκτη.

5.2.3. Συμπεράσματα

Η παρούσα ενότητα παρουσίασε συστηματική διερεύνηση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή και στην αναπαραγωγικότητα των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έμμεσης εφαρμογής, βάσει του Προτύπου IEC 61000-4-2 [27]. Οι μετρήσεις περιέλαβαν εκφορτίσεις τόσο προς το

οριζόντιο όσο και προς το κάθετο επίπεδο σύζευξης, με υπό δοκιμή εξοπλισμό καλώδιο τύπου SpaceWire. Η ανάλυση αφορούσε τόσο το εγχεόμενο ρεύμα στο άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όσο και το επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση, εξετάζοντας δείκτες τόσο στο χρονικό όσο και στο φασματικό πεδίο, συμπληρωμένη από στοιχεία επίδοσης του πρωτοκόλλου SpaceWire υπό καταπόνηση.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η παρουσία χειριστή προκαλεί σημαντική μεταβλητότητα στην κυματομορφή, ιδίως κατά τις εκφορτίσεις στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης, όπου η εγγύτητα του σώματος ενισχύει τη χωρητική και επαγωγική σύζευξη. Στη διαμόρφωση αυτή, ο δείκτης δεύτερης αιχμής I_{P2} παρουσίασε απόκλιση άνω του 18 %, ενώ η παράμετρος I_{60} εμφάνισε μεταβολές έως και 10 %. Αντίστοιχες επιδράσεις παρατηρήθηκαν στη φασματική περιοχή κάτω των 25 MHz, καθώς και σε υψηλότερες συντονιστικές συχνότητες. Σημαντικές αποκλίσεις καταγράφηκαν και στο επαγόμενο ρεύμα στη θωράκιση, με μειώσεις έως 11 % στην παράμετρο I_{RMS} και διαφοροποιήσεις στη φασματική συνιστώσα στα 17,5 MHz. Οι επιπτώσεις αυτές αντικατοπτρίζονται και στη λειτουργία του πρωτοκόλλου SpaceWire, το οποίο εμφάνισε αυξημένα σφάλματα μετάδοσης και αποσυνδέσεις.

Στο κάθετο επίπεδο σύζευξης, η ευαισθησία στην παρουσία χειριστή ήταν μικρότερη, αν και παρέμειναν μετρήσιμες αποκλίσεις, με τον δείκτη I_{P2} να υπερβαίνει το 20 % σε ορισμένα σενάρια. Η μειωμένη επίδραση αποδίδεται στη γεωμετρία και στη μεγαλύτερη απόσταση του χειριστή από τη διαδρομή εκφόρτισης.

Η αξιολόγηση διατάξεων χωρίς χειριστή, με τη γεννήτρια τοποθετημένη σε μονωτική βάση, ανέδειξε πως η διάταξη του καλωδίου γείωσης παραμένει κρίσιμος παράγοντας, καθώς παρατηρήθηκαν μεταβολές έως και 15 % σε δείκτες, όπως η μέγιστη τιμή ρεύματος και η παράμετρος I_{P2} , παρά τον σταθερό χρόνο ανόδου.

Τέλος, η δοκιμή διαφόρων σεναρίων προστατευτικού εξοπλισμού ανέδειξε ότι ο συνδυασμός γαντιών και υποδημάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης προσφέρει τη μεγαλύτερη συνέπεια στη μείωση αποκλίσεων, αν και δεν εξαλείφει πλήρως την επίδραση του χειριστή. Τα ευρήματα αυτά τεκμηριώνουν την ανάγκη για τυποποιημένη διάταξη χωρίς χειριστή και καθορισμό της διαμόρφωσης του καλωδίου γείωσης, ενώ σε περιπτώσεις αναγκαστικής χειροκίνητης εκφόρτισης, προτείνεται η χρήση εξειδικευμένου προστατευτικού εξοπλισμού ως στρατηγική εξομάλυνσης.

Κεφάλαιο 6: Συμβολή – Πρωτοτυπία – Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

6.1. Συμβολή και Πρωτοτυπία

1) Ανάλυση μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας και προσομοιώσεις σχετικού εξοπλισμού

Η ανάλυση της μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας, όπως παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνικές συνεισφορές της διατριβής, καθώς εξετάζει τη μέθοδο αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας για την ανακατασκευή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όταν χρησιμοποιείται ανιχνευτής ρεύματος τοποθετημένος γύρω από το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας. Παρότι η μέθοδος έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, η παρούσα μελέτη αποτελεί την πρώτη συστηματική αξιολόγησή της υπό ευρύ φάσμα συνθηκών, καλύπτοντας διαφορετικές γεννήτριες και όλα τα επίπεδα τάσης δοκιμής του Προτύπου IEC 61000-4-2.

Κύρια συμβολή του κεφαλαίου συνιστά η πλήρης ποσοτική καταγραφή των παραμέτρων *detrend*, οι οποίες αποδείχθηκαν ειδικές για κάθε γεννήτρια και μεταβαλλόμενες ανά επίπεδο τάσης. Η τεκμηρίωση αυτή καθιστά τη μέθοδο εφαρμόσιμη σε κάθε εργαστήριο, χωρίς απαίτηση αναλυτικού επαναπροσδιορισμού, επεκτείνοντας τη χρήση της πέραν της διακρίβωσης, σε εφαρμογές όπως δοκιμές σε μεταλλικά σημεία δοκιμών ή σε επίπεδα σύζευξης.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν υψηλή ακρίβεια στην ανακατασκευή του χαμηλόσυχνου μέρους της κυματομορφής, ανεξαρτήτως γεννήτριας ή επιπέδου δοκιμής. Ωστόσο, στην πρώτη αιχμή καταγράφηκαν αποκλίσεις άνω του 10% για τάσεις 6 kV και 8 kV, υποδεικνύοντας την ανάγκη για προηγούμενη επικύρωση ανά γεννήτρια.

Πρωτοτυπία του κεφαλαίου συνιστά η ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση δύο κρίσιμων στοιχείων:

... Ανιχνευτής ρεύματος (FCC F-65): Αποδείχθηκε ότι αποκλίσεις χιλιοστού στη γεωμετρία επιφέρουν μετρήσιμη μεταβολή στην απόκριση, υπογραμμίζοντας τη σημασία ακριβούς κατασκευής.

... Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (EM Test Dito): Εμφάνισε εξαιρετική συμφωνία με μετρήσεις, με αποκλίσεις κάτω του 0,06% στο μέγιστο ρεύμα και 0,7% στον χρόνο ανόδου. Μικρές αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στις παραμέτρους I_{30} και I_{60} , λόγω φαινομένου ταλαντώσεων.

Τέλος, αναλύεται το φαινόμενο φόρτωσης ανιχνευτή, που αποδίδεται τόσο στη γεωμετρία του ανιχνευτή όσο και στις μαγνητικές απώλειες του φερρίτη. Η ανάλυση κατέδειξε ότι σε συχνότητες άνω των 150 MHz, η πρώτη αιχμή μειώνεται κατά 3%, ενώ η μεταφερόμενη φόρτιση περιορίζεται κατά 1,5%.

Η συνολική συμβολή του κεφαλαίου έγκειται στην παροχή ενός δομημένου, ποσοτικά τεκμηριωμένου πλαισίου, το οποίο καθιστά τη μέθοδο αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας αξιόπιστο εργαλείο για την ακριβέστερη καταγραφή κυματομορφών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, διευκολύνοντας τη μετέπειτα ανάλυση και εφαρμογή της στα επόμενα κεφάλαια.

2) Επιπτώσεις της αναθεώρησης του Προτύπου IEC 61000-4-2 και προτεινόμενες λύσεις

Ιδιαίτερη καινοτομία της μελέτης αποτελεί η διερεύνηση των επιπτώσεων που εισάγει η τελευταία αναθεώρηση (2025) του Προτύπου IEC 61000-4-2 και παρουσιάζεται στο τρίτο κεφάλαιο. Η αναθεώρηση αυτή εισάγει την παράμετρο I_{P2} για την αξιολόγηση του βραδύτερου σκέλους της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, θέτοντας αυστηρότερα όρια και ενισχύοντας τις απαιτήσεις συμμόρφωσης. Η αλλαγή προκαλεί εύλογη ανησυχία σε διαπιστευμένα εργαστήρια και κατασκευαστές, καθώς πολλές υφιστάμενες γεννήτριες ενδέχεται να μην πληρούν τις νέες προδιαγραφές.

Ενδεικτικά, για τη γεννήτρια EM Test Dito καταγράφηκαν υπερβάσεις στην παράμετρο I_{P2} έως και κατά 25%, γεγονός που δύναται να συνεπάγεται σημαντική οικονομική επιβάρυνση λόγω πιθανής ανάγκης αναβάθμισης ή αντικατάστασης εξοπλισμού.

Στο πλαίσιο αυτό, η διατριβή προτείνει μία καινοτόμο, πρακτικά εφαρμόσιμη και μη επεμβατική λύση, βασισμένη στη χρήση φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης. Η μέθοδος δεν απαιτεί καμία τροποποίηση στον σχεδιασμό της γεννήτριας και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εργαστήρια με περιορισμένο προϋπολογισμό.

Η πειραματική αξιολόγηση ανέδειξε ότι η εφαρμογή φερριτών μπορεί να μειώσει την τιμή της παραμέτρου I_{P2} έως και κατά 21% (με φερρίτη τύπου 61), ενώ παράλληλα επηρεάζει σημαντικά τις παραμέτρους I_{30} και I_{60} , καθώς και το φασματικό περιεχόμενο της κυματομορφής. Οι επιδράσεις αποδείχθηκαν εξαρτώμενες από τα χαρακτηριστικά κάθε γεννήτριας, τεκμηριώνοντας την ανάγκη για εξειδικευμένη επιλογή φερρίτη ανά περίπτωση.

Τέλος, παρουσιάζεται μία συστηματική διαδικασία κατάταξης των φερριτών με βάση δείκτες, όπως ο Δείκτης Απόκλισης, προσφέροντας ένα ποσοτικά τεκμηριωμένο εργαλείο επιλογής φερρίτη για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η συνολική συμβολή του κεφαλαίου συνίσταται στην παροχή μιας τεχνικά και οικονομικά βιώσιμης λύσης, η οποία διευκολύνει τη συμμόρφωση με τη νέα έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2, χωρίς να απαιτείται ριζική ανασχεδίαση των υπαρχόντων συστημάτων δοκιμής.

3) Πειραματική αξιολόγηση της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 και προσομοίωσή της με χρήση φερριτών αρπάγης

Κεντρική καινοτομία της μελέτης αποτελεί η σε ευρεία κλίμακα πειραματική ανάλυση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σε συνδυασμό με τη διερεύνηση μεθόδων αναπαραγωγής αυτής της επίδρασης και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς υπό διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης, όπως παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο.

Η πρώτη φάση της μελέτης (Ενότητα 4.1) περιλάμβανε μετρήσεις με δέκα διαφορετικούς χειριστές. Διαπιστώθηκαν σημαντικές αποκλίσεις σε σύγκριση με την κατάσταση «Χωρίς Χειριστή», με μεταβολές που ξεπερνούσαν το 15% για κρίσιμες παραμέτρους, όπως η παράμετρος I_{P2} και οι παράμετροι I_{30} και I_{60} . Οι επιδράσεις εντοπίζονται κυρίως μετά την πρώτη αιχμή, λόγω μεταβολών στη σύνθετη αντίσταση του συστήματος και εισαγωγής παρασιτικών ταλαντώσεων, ιδιαίτερα στην περιοχή 20 – 40 MHz. Η

στατιστική ανάλυση έδειξε ότι η επίδραση του χειριστή δεν ακολουθεί σταθερή κατανομή, ούτε μπορεί να ενταχθεί απλώς στο ισοζύγιο αβεβαιότητας, καθώς εξαρτάται ισχυρά από τα χαρακτηριστικά της κάθε γεννήτριας.

Στην Ενότητα 4.2 εξετάζεται η χρήση φερριτών αρπάγης στο καλώδιο γείωσης με στόχο την προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης. Μελέτες με τέσσερις τύπους φερριτών και ποικίλες θέσεις τοποθέτησης έδειξαν ότι, ενώ η μέγιστη τιμή της πρώτης αιχμής παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστη, η δομή του δεύτερου σκέλους επηρεάζεται αισθητά. Σε τρεις από τις τέσσερις διατάξεις, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα παρατηρήθηκε με φερρίτες υψηλής συχνοτικής δραστηριότητας (άνω των 200 MHz), γεγονός που υποδεικνύει ότι τόσο η ανθρώπινη παρουσία όσο και οι φερρίτες επιδρούν κυρίως στα υψηλότερα μεταβατικά φαινόμενα. Παρ' όλα αυτά, δεν προέκυψε ένας «καθολικά βέλτιστος» φερρίτης για όλες τις γεννήτριες, ενώ παρατηρήθηκαν αποκλίσεις έως 10% – 12% στο χρονικό παράθυρο 3 – 9 ns.

Η Ενότητα 4.3 επεκτείνει τη μελέτη, διερευνώντας την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου σε διαφορετικές διατάξεις καλωδίου γείωσης και τη γραμμικότητα της απόκρισης. Ενώ οι δείκτες της πρώτης αιχμής, όπως η παράμετρος I_p και ο χρόνος ανόδου, διατηρήθηκαν σχεδόν σταθεροί (με αποκλίσεις <0,5%), καταγράφηκαν σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους της δεύτερης αιχμής. Στη Διάταξη 2, η παράμετρος I_{p2} μειώθηκε έως και 20%, ενώ στη Διάταξη 3 η παράμετρος I_{60} αυξήθηκε κατά 21%. Οι αποκλίσεις αποδόθηκαν σε μεταβολές της σύνθετης αντίστασης της διαδρομής επιστροφής λόγω της ανθρώπινης παρουσίας. Η εφαρμογή φερρίτη τύπου D στο μέσο του καλωδίου στη Διάταξη 2 απέδωσε Δείκτη Απόκλισης μόλις 2,057%, επιτυγχάνοντας πολύ καλή συμφωνία με την κυματομορφή «με Χειριστή». Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας μέσω Monte Carlo ($\pm 30\%$ διακύμανση βαρών) επιβεβαίωσε την ευστάθεια της προτεινόμενης προσέγγισης. Ωστόσο, για γεννήτριες με περιορισμένα παρασιτικά φαινόμενα, η χρήση φερρίτη ενδέχεται να εισάγει περιττή εξασθένηση, υποδεικνύοντας την ανάγκη επιλογής ανά γεννήτρια και διάταξη.

Η συνολική συμβολή του κεφαλαίου συνίσταται στην παροχή των πρώτων ποσοτικών, τεκμηριωμένων δεδομένων για την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και στην αξιολόγηση των δυνατοτήτων αναπαραγωγής αυτής της επίδρασης μέσω φερριτών αρπάγης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ρόλο της διάταξης καλωδίου γείωσης, καθιστώντας τη μελέτη θεμέλιο για αξιόπιστες και αναπαραγώγιμες αυτοματοποιημένες δοκιμές, σύμφωνα με τις αυστηρές απαιτήσεις της νέας έκδοσης του Προτύπου IEC 61000-4-2.

4) Ρομποτικοί βραχίονες και ανθρώπινη επίδραση στις έμμεσες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2

Σημαντική επέκταση και εμβάθυνση της ανάλυσης αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης μεταλλικών ρομποτικών βραχιόνων και των έμμεσων δοκιμών εκφόρτισης κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2. Η μελέτη αυτή, όπως παρουσιάζεται στο πέμπτο κεφάλαιο, ποσοτικοποιεί τις αποκλίσεις που προκύπτουν λόγω παρουσίας ή απουσίας χειριστή και παράλληλα διατυπώνει προτάσεις για μελλοντικές αναθεωρήσεις του Προτύπου, ώστε να ενσωματωθούν ρομποτικές διατάξεις στο πλαίσιο αξιολόγησης.

Στην ενότητα 5.1 εξετάζεται η επίδραση ρομποτικών βραχιόνων στην κυματομορφή εκφόρτισης και η δυνατότητα αναπαραγωγής της επίδρασης του χειριστή. Δοκιμάστηκαν δύο σενάρια: γειωμένος και μη γειωμένος βραχίονας. Στους γειωμένους βραχίονες, η άμεση σύνδεση στη γείωση ή η χρήση χαμηλής αντίστασης προκάλεσε παραμόρφωση της δεύτερης αιχμής, ενώ η εισαγωγή υψηλότερης αντίστασης

βελτίωσε τη συμπεριφορά. Για τον μη γειωμένο βραχίονα, η χρήση φερρίτη αποδείχθηκε καθοριστική, αναδεικνύοντας τη σημασία υλικού και θέσης τοποθέτησης. Με βάση αυτά τα ευρήματα, προτείνεται η τυποποίηση μεταλλικών ρομποτικών βραχιόνων με συγκεκριμένα υλικά, σχήματα και σενάρια γείωσης στις μελλοντικές εκδόσεις του Προτύπου, ώστε να διασφαλίζεται η συνέπεια και η ρεαλιστική προσομοίωση της ανθρώπινης επίδρασης.

Η ενότητα 5.2 παρουσιάζει συστηματική ανάλυση της επίδρασης του ανθρώπινου χειριστή στις έμμεσες δοκιμές εκφόρτισης προς το οριζόντιο και κάθετο επίπεδο σύζευξης. Διαπιστώθηκε ότι η παρουσία του χειριστή επηρεάζει τόσο την κυματομορφή, όσο και τη σύζευξη στο θωρακισμένο καλώδιο, επηρεάζοντας ακόμη και την επίδοση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Δοκιμές με προστατευτικό εξοπλισμό, όπως γάντια και υποδήματα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, έδειξαν μερική μόνο μείωση των αποκλίσεων. Παράλληλα, η διάταξη του καλωδίου γείωσης αποδείχθηκε κρίσιμος παράγοντας και στις αυτόματες δοκιμές. Τα ευρήματα αυτά καθιστούν αναγκαία την ενσωμάτωση στο Πρότυπο οδηγιών για τυποποιημένη διάταξη καλωδίου γείωσης και τη διερεύνηση της χρήσης προστατευτικού εξοπλισμού ως εναλλακτικής λύσης εξομάλυνσης, όταν η χρήση ρομποτικών διατάξεων δεν είναι εφικτή.

Η συνολική συμβολή του κεφαλαίου έγκειται στην ενίσχυση της κατανόησης της ανθρώπινης επίδρασης και στην παροχή ενός ποσοτικά τεκμηριωμένου πλαισίου για την εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης ή εξομάλυνσης, με στόχο την απαιτούμενη αναπαραγωγικότητα των δοκιμών. Παράλληλα, οι προτάσεις που διατυπώνονται παρέχουν βάση για μελλοντικές αναθεωρήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2, εισάγοντας προδιαγραφές για ρομποτικούς βραχίονες, καθορισμό διάταξης καλωδίου γείωσης και ενσωμάτωση προστατευτικού εξοπλισμού στις διαδικασίες δοκιμών.

6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα διατριβή θέτει τις βάσεις για σημαντικές μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, ικανές να εμβαθύνουν περαιτέρω την κατανόηση και την πρακτική εφαρμογή των ευρημάτων. Πρώτον, απαιτείται η αναζήτηση ενός αξιόπιστου κυκλωματικού ισοδυναμίου που να αποδίδει με φυσικό και μαθηματικό τρόπο την επίδραση του ανθρώπινου χειριστή στην κυματομορφή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Πρόκειται για σύνθετο εγχείρημα, καθώς το ισοδύναμο κύκλωμα πρέπει να αποτυπώνει τόσο τα χωρητικά και επαγωγικά χαρακτηριστικά, όσο και τη συχνотική συμπεριφορά του ανθρώπινου σώματος σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Δεύτερον, κρίνεται αναγκαία μια συγκριτική μελέτη των διαφορετικών μεθοδολογιών αξιολόγησης κυματομορφών που παρουσιάστηκαν στην εργασία, με εφαρμογή τους στο ίδιο σύνολο μετρήσεων φερριτών. Μια τέτοια ανάλυση θα αναδείξει κατά πόσο οι διαφορετικές προσεγγίσεις συγκλίνουν στα ίδια συμπεράσματα και θα προσδιορίσει ποια μεθοδολογία είναι καταλληλότερη για μελλοντικές χρήσεις.

Τρίτον, επιβάλλεται η συστηματική προσπάθεια προτυποποίησης των ευρημάτων και των προτεινόμενων λύσεων, ώστε να διατυπωθούν με τεκμηριωμένο και σαφή τρόπο προς την αρμόδια επιτροπή IEC – TC 77/SC 77B, η οποία διαχειρίζεται τις αναθεωρήσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2..

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω μαθηματική και φυσική μοντελοποίηση της ανθρώπινης επίδρασης, με στόχο την ανάπτυξη προβλεπτικών εργαλείων που θα μειώσουν σημαντικά την ανάγκη εκτεταμένων πειραματικών δοκιμών στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] Λ. Οικονόμου, Γεώργιος Φώτης, Χρήστος Χριστοδούλου, *Υψηλές τάσεις, 3η έκδοση*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2023.
- [2] Π. Σ. Κατσιβέλης, “Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης,” *Διδακτορική Διατριβή Νοέμβριος*, 2011, [Online]. Available: <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/8886>
- [3] “Διεθνής Συνεταιρισμός κοινωνικής ασφάλισης issa, Οδηγός για την εκτίμηση των Κινδύνων στις Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις, διαθέσιμο στη διεύθυνση.” [Online]. Available: https://www.issa.int/sites/default/files/documents/prevention/Explosion_greek_el-36214.pdf
- [4] H. Zou *et al.*, “Quantifying the triboelectric series,” *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09461-x.
- [5] “Εικόνα διαθέσιμη στη διεύθυνση.” [Online]. Available: <https://staticsmart.com/wp-content/uploads/2019/09/Static-Electricity.png>
- [6] Θ. 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, [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/18316>
- [7] S. H. Volmand, *ESD Circuits and Devices*. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [8] “Εικόνα διαθέσιμη στη διεύθυνση.” [Online]. Available: <https://www.fs-pcba.com/wp-content/uploads/2024/07/3-ESD-Discharge-Models.png>
- [9] Sanjay Agarwal, “What’s The Difference Between HBM, CDM, And MM Test?” [Online]. Available: <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/21799383/whats-the-difference-between-hbm-cdm-and-mm-test>
- [10] “Υλικό διαθέσιμο στη διεύθυνση του ESD Association.” [Online]. Available: <https://www.esda.org/esd-overview/esd-fundamentals/part-1-an-introduction-to-esd/>
- [11] H. Ito, M. Yoshida, Y. Yano, J. Wang, T. Ishida, and M. Sawada, “Comparison of ESD Damage Test for Common-Mode Chokes With ESD Gun and TLP-HMM,” *IEEE Lett. Electromagn. Compat. Pract. Appl.*, vol. 5, no. 1, pp. 10–15, doi: 10.1109/LEMCPA.2022.3222019.
- [12] J. Smallwood, “ESD damage control in electronics industry,” *J. Electrostat.*, p. 104078, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104078>.
- [13] J. Shao *et al.*, “Investigation on the ESD failure mechanism of integrated circuits in a 0.11μm CMOS process,” in *18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Aug. 2017. doi: 10.1109/ICEPT.2017.8046409.
- [14] M.-D. Ker and S.-F. Hsu, “Component-Level Measurement for Transient-Induced Latch-up in CMOS ICs Under System-Level ESD Considerations,” *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 6, no. 3, pp. 461–472, Sep. 2006, doi: 10.1109/tdmr.2006.882203.
- [15] J. E. Vinson and J. J. Liou, “Electrostatic discharge in semiconductor devices: An overview,” in *Proceedings of the IEEE*, Mar. 1998. doi: 10.1109/5.659493.

- [16] P. Lai, Y. Wang, X. Liang, X. Kuang, and J. Zou, "Location techniques of failure analysis ESD damage in electronic component," in *2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*, Guangzhou, China: IEEE, Aug. 2014, pp. 127–131. doi: 10.1109/icrms.2014.7107152.
- [17] J. Maeshima *et al.*, "Model of Secondary ESD for a Portable Electronic Product," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 54, no. 3, pp. 546–555, 2011, doi: 10.1109/temc.2011.2171040.
- [18] S. Marathe, G. Maghlakelidze, D. Pommerenke, and M. Hertz, "Implementation and Practical Experience with an Automatic Secondary ESD Detection Algorithm," *2018 IEEE Symp. Electromagn. Compat. Signal Integr. Power Integr. EMC SI PI 2018*, pp. 402–407, 2018, doi: 10.1109/EMCSI.2018.8495425.
- [19] A. Hosseinbeig, P. Wei, D. Z. Li, D. Pommerenke, and S. Marathe, "Full-Wave Simulation of System-Level Disruption During Secondary ESD Events in a Smartphone," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 61, no. 1, pp. 40–47, 2018, doi: 10.1109/temc.2018.2815024.
- [20] J. Sakhuja, U. Ganguly, and L. S, "Low Voltage NIPIN Symmetric and Bi-Directional Diode for System Level ESD Protection," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 45, no. 12, pp. 2483–2486, 2024.
- [21] P. Wei, J. Meiguni, and D. Pommerenke, "System-level design for ESD protection on multiple IO interfaces," *IEEE Int. Reliab. Phys. Symp. Proc.*, vol. 2018-March, p. 2C.11-2C.18, 2018, doi: 10.1109/IRPS.2018.8353547.
- [22] S. Muriel, "Data Line ESD Protection: TVS Diodes or Chip Varistors?," 2024.
- [23] J. Li, Z. Wang, and S. Jin, "Development of Injection Probes for Electrostatic Discharge Immunity Test of Integrated Circuits," in *7th International Conference on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, China, 2024, pp. 183-186.
- [24] K. Muhonen, E. Grund, N. Peachey, and T. Hemminger, "Alternative method for electrostatic discharge stress testing of individual system components," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 220–228, Jul. 2010, doi: 10.1049/iet-smt.2009.0103.
- [25] S. Vora and E. Rosenbaum, "Analysis of System-Level ESD-Induced Soft Failures in a CMOS Microcontroller," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 62, no. 6, pp. 2679–2688, doi: 10.1109/TEM.2020.2986971.
- [26] International Electrotechnical Commission, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test*, 2008. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/4189>
- [27] International Electrotechnical Commission, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test*, 2025. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68954>
- [28] T. Ishida and O. Fujiwara, "Revision Status and Further Study Issue of International Standard on System Level ESD Immunity Testing," in *2024 IEEE Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity: EMC Japan / Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Japan/APEMC Okinawa)*, Ginowan, Okinawa, Japan: IEEE, May 2024, pp. 126–129. doi: 10.23919/EMCJapan/APEMCOkinaw58965.2024.10585185.
- [29] M. Hirata, T. Takahashi, and N. Shibuya, "Evaluation of Falling Time Restriction of ESD Immunity Test Current Waveform: The result of IEC 61000-4-2 Round Robin Test in Japan," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*,

- [30] K. Muhonen, "HMM round robin study: What to expect when testing components to the IEC 61000-4-2 waveform," in *Electrical Overstress / Electrostatic Discharge Symposium Proceedings 2012*, pp. 1–8.
- [31] H. Heidler, "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung," in *ICLP International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1985, pp. 63–66.
- [32] Y. Tozawa, Y. Kobayashi, T. Ishida, and O. Fujiwara, "Waveform Comparison of Discharge Currents for Contact Discharges from Different Eight Models of Electrostatic Discharge Generators," *IEEE Trans Fundam. Mater*, vol. 140, no. 2, pp. 86–91, 2020.
- [33] J. Yousaf *et al.*, "Effect of ESD generator ground strap configuration on ESD waveform," in *2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Seoul: IEEE, Jun. 2017. doi: 10.1109/apemc.2017.7975441.
- [34] B. Pu, "Modeling and prediction of electromagnetic immunity for intergrated circuits," *J. Electromagnetic Eng. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 54–61, Mar. 2013.
- [35] American Society for Testing and Materials, *ASTM E691-99 Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*, 2017.
- [36] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, and O. Fujiwara, "Influence of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations in Contact Discharge Calibration Waveform from ESD Generator," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2023-Sept, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274328.
- [37] H. Lin, H. Sheng-zong, W. You-liang, L. Xiao-si, and J. Qi-zheng, "Study on Electrostatic Discharge Damage and Defect Damage Failure Analysis Technology for Semiconductor Devices," in *19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Shanghai, China, 2018, pp. 1246–1249, doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480420.
- [38] T. Brodbeck, W. Stadler, C. Baumann, K. Esmark, and K. Domanski, "Triggering of Transient Latch-up by System-Level ESD," *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 11, no. 4, pp. 509–515, Dec. 2011, doi: 10.1109/TDMR.2011.2165072.
- [39] K. N. J. -H. Lee and M.-D. Ker, "System-Level ESD-Induced Voltage Fluctuation to the Power of Integrated Circuits on System Board," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 64, no. 6, pp. 1883–1889, Dec. 2022, doi: 10.1109/TEMC.2022.3220651.
- [40] J. Koo *et al.*, "The repeatability of system level ESD test and relevant ESD generator parameters," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2008-Janua, pp. 1–6, 2008, doi: 10.1109/ISEMC.2008.4652119.
- [41] P. K. Papastamatis, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou, and I. F. Gonos, "Operator Influence on IEC 61000-4-2 ESD Waveforms: A Study and Ferrite-Based Replication Proposal," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. doi: 10.1109/TEMC.2025.3560614.
- [42] Q. Cai *et al.*, "Correlation Between EUT Failure Levels and ESD Generator Parameters," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 50, no. 4, pp. 794–801, 2008, doi: 10.1109/temc.2008.2005403.
- [43] N. Jianjian, Y. Qingyun, and W. Yong, "Correlation between coupled voltage and discharge current," *Proc. - Asia-Pac. Conf. Environ. Electromagn. CEEM2009*, pp. 75–78, 2009, doi: 10.1109/CEEM.2009.5304394.
- [44] 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,” in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Brugge, Belgium: EMC Europe, 2024, pp. 483–488,. doi: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722155.
- [45] P. K. Papastamatis, M. I. Tsortanidi, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou, and I. F. Gonos, “Quantitative Assessment of Human Operator Influence in IEC 61000-4-2 ESD Testing,” in *accepted in Proc. 25th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering & 9th I&CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe 15-18*, Chania, Crete, Jul. 2025.
 - [46] “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) Industry Council on ESD Target Levels,” 2021. [Online]. Available: <http://www.jedec.org/>
 - [47] Y. Sun, “Self-adaptive electrostatic discharge performance of ZnO microvaristors doped silicone rubber composites,” *High Volt.*, vol. 8, no. 6, pp. 1180–1187, 2023.
 - [48] L. Speckbacher, D. J. Pommerenke, G. Fellner, L. Pertoll, and H. Gossner, “System-Efficient ESD Design Based on a Modular Measurement System Applied to USB,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, pp. 1–8, 2025.
 - [49] Y. Shen, “Study on Enhancing Electrostatic Discharge Stress Robustness of Flexible Thin-Film Transistors via Interface Modification,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 71, no. 5, pp. 2901–2906, 2024.
 - [50] S. Yang and D. J. Pommerenke, “Effect of Different Load Impedances on ESD Generators and ESD Generator SPICE Models,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 60, no. 6, pp. 1726–1733, Dec. 2018, doi: 10.1109/TEM.2017.2785739.
 - [51] P. Leuchtmann and J. Sroka, “Enhanced field simulations and measurements of the ESD calibration setup,” in *2001 IEEE EMC International Symposium. Symposium Record. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Cat. No.01CH37161)*, Montreal, QC, Canada, 2001, pp. 1273–1278. doi: 10.1109/IEMC.2001.950627.
 - [52] Z. Li, P. Maheshwari, and D. J. Pommerenke, “Measurement Methodology for Field-Coupled Soft Errors Induced By Electrostatic Discharge,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 58, no. 3, pp. 701–708, Jun. 2016, doi: 10.1109/TEM.2016.2524545.
 - [53] M. Gopalraj and T. Sanford, “Analyzing Repeatability During Air Discharge ESD Tests,” in *2023 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal/Power Integrity, EMC+SIPI 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 460–465. doi: 10.1109/EMCSPI50001.2023.10241666.
 - [54] S. Yang, A. Bhandare, H. Rezaei, W. Huang, and D. J. Pommerenke, “Step-Response-Based Calibration Method for ESD Generators in the Air-Discharge Mode,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 60, no. 5, pp. 1598–1601, 2018, doi: 10.1109/TEM.2017.2776749.
 - [55] T. Ishida, H. Okajima, K. Endo, M. Kinoshita, O. Fujiwara, and S. Nitta, “Combined effects of relative humidity and temperature on air discharges of electrostatic discharge generator,” *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 135–139, 2017, doi: 10.1109/IEMC.2017.8078009.
 - [56] T. Ishida and O. Fujiwara, “Influence of absolute humidity and saturation deficit on air discharge currents from electrostatic discharge generator with three different approach speeds,” *IEEJ Trans. Fundam. Mater.*, vol. 140, no. 2, pp. 98–102, 2020, doi: 10.1541/ieejfms.140.98.
 - [57] F. Ruan, W. Zhu, G. Li, and X. Yang, “Investigation of low repeatability in parameters measurement of non-conducted electrostatic discharge,” in *IEEE International Symposium on Electromagnetic*

- Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2014, pp. 1144–1148. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6931075.
- [58] 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 Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 62, no. 4, pp. 1546–1554, Aug. 2020, doi: 10.1109/TEM.2020.2986173.
 - [59] Y. Morinaga, K. Nagai, J. Wang, and D. Anzai, “Impact of Electrostatic Discharge on Wearable Robotic Hand and Improvement of Immunity Performance by Wireless Control,” *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 9, no. 4, pp. 37–45, 2020, doi: 10.1109/memc.2020.9327996.
 - [60] Y. P. Zhou and J. J. Hajjar, “A circuit model of electrostatic discharge generators for ESD and EMC SPICE simulation,” *2014 IEEE Int. Conf. Electron Devices Solid-State Circuits EDSSC 2014*, pp. 1–2, 2014, doi: 10.1109/EDSSC.2014.7061083.
 - [61] Y. Wang, “A SPICE-Based Simulation Method for System Efficient Electrostatic Discharge Design,” in *6th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference, EDTM 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 229–231. doi: 10.1109/EDTM53872.2022.9798202.
 - [62] T. Matsushima, M. Aoki, T. Hisakado, and O. Wada, “Equivalent circuit model with nonlinear characteristics of zener diode extracted from SPICE model for ESD simulation,” *Proc. 2017 11th Int. Workshop Electromagn. Compat. Integr. Circuits EMCCompo 2017*, pp. 152–155, 2017, doi: 10.1109/EMCCompo.2017.7998101.
 - [63] C. Carobbi, A. Burger, and S. Caniggia, “Effect of the Insertion of a Ferrite Along Return Cable and of Return Cable Layout on ESD Contact Discharge,” *2023 35th Gen. Assem. Sci. Symp. Int. Union Radio Sci. URSI GASS 2023*, no. August, pp. 1–4, 2023, doi: 10.23919/URSIGASS57860.2023.10265511.
 - [64] 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,” in *2024 IEEE Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity: EMC Japan / Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Japan/APEMC Okinawa)*, Ginowan, Okinawa, Japan: IEEE, May 2024, pp. 357–360. doi: 10.23919/EMCJapan/APEMCOkinaw58965.2024.10584971.
 - [65] Y. Tozawa, T. Ishida, and 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,” in *The Papers of Technical Meeting on Electromagnetic Compatibility*,
 - [66] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, and 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 Trans. Commun.*, vol. 2023EBP3080.
 - [67] Y. Tozawa, T. Ishida, J. Wang, and O. Fujiwara, “Consideration and Cause Validation of Cable Resonance on Ringing Damped Oscillations of Contact Discharge Calibration Current Waveform from ESD Generator,” in *The Papers of Technical Meeting on Electromagnetic Compatibility, IEE Japan*, Oct. 2023, p. 23-049,.
 - [68] T. Adachi, N. Yamamoto, Y. Taka, and O. Fujiwara, “Dependence of Discharge Current Waveform on Arrangement of ESD-Gun,” *IEICE Trans. Commun.*, no. 6, pp. 959-962, 2009.

- [69] “ESD generator - TESEQ NSG 439.” 2015. [Online]. Available: https://www.dqm.it/wp-content/uploads/2015/06/NSG_439.pdf
- [70] “ESD generator - Schaffner NSG 433, ESD Simulator, User manual.”
- [71] “ESD generator - Schaffner NSG 438, ESD Simulator.” [Online]. Available: <https://www.teseq.com/products/downloads/>
- [72] “ESD generator - EM Test Dito ESD Simulator.” [Online]. Available: <http://www.emtest.com/products/product/135120100000010183.php>
- [73] “EMC Partner Transient 3000, User Manual.”
- [74] M. I. Τσορτανίδη, “Μελέτη της επίδρασης του χειριστή στην κυματομορφή ESD: Ανάλυση αβεβαιοτήτων και χρήση φερριτών ως μέσο προσομοίωσης,” *Διπλωματική Εργασία Ιούνιος*, 2025, [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/19618>
- [75] “ESD Pulse Calibration Set - Teseq MD 103.” [Online]. Available: https://www.teseq.com/products/downloads/datasheet/MD_103.pdf
- [76] “Digital Phosphor Oscilloscope - Tektronix TDS7254B.” [Online]. Available: <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/TEKTRONIX>
- [77] “RF Current Monitor - Fischer Custom Communications, Inc. F65.” [Online]. Available: <https://www.fischercc.com/type/current-monitor-probes/>
- [78] S. Marathe, J. Meiguni, K. Zhou, D. Pommerenke, and M. Hertz, “ESD Generator Tip Current Reconstruction Using a Current Probe Measurement at the Ground Strap,” in *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*, New Orleans, LA, USA: IEEE, Jul. 2019, pp. 141–146. doi: 10.1109/IEMC.2019.8825230.
- [79] S. Yang, J. Zhou, D. Pommerenke, and D. Liu, “A simple frequency response compensation method for current probe measurements of ESD currents,” in *Proc., IEEE Int. Symp. E. Compat. and S. Integr.*, Eds., Washington, DC, USA, 2017, pp. 158–163. doi: 10.1109/IEMC.2017.8077859.
- [80] J. Baran and J. Sroka, “Distortion of ESD Generator Pulse Due to Limited Bandwidth of Verification Path,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 797–803, Nov. 2010, doi: 10.1109/TEMC.2010.2071386.
- [81] Tektronix, “AC Current Probes CT1 CT2 CT6 Datasheet,” pp. 1–2–6. [Online]. Available: <https://download.tek.com/datasheet/AC-Current-Probe-Datasheet-24Jan2023.pdf>
- [82] C. F. M. Carobbi and L. M. Millanta, “Circuit Loading in Radio-Frequency Current Measurements: The Insertion Impedance of the Transformer Probes,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 1, pp. 200–204, Jan. 2010, doi: 10.1109/TIM.2009.2022450.
- [83] L. M. Millanta, “Fundamentals of the EMC current probes,” in *Proceedings of 12th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Feb. 1997, pp. 585–590.
- [84] P. K. Papastamatis, E. P. Nicolopoulou, C. D. Nikolopoulos, N. C. Ilia, C. A. Christodoulou, and I. F. Gonos, “Impact of Current Monitoring Probes on ESD Waveforms: Experimental and EM Simulation Analysis,” in *Accepted in Proc., Int. Symp. Electromagn. Compatib*, Paris, France: EMC Eur, 2025.
- [85] P. Ι. Τσαλαμέγκας Ι., *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Τόμος Α*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.

- [86] M. A. Sistané and A. L. Rodríguez, "Permeability characterization of ferrites in the radio frequency range".
- [87] F. Grassi, "Accurate modeling of ferrite-core effects in probes for Bulk Current Injection," in *2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems*, Tel Aviv, Israel: IEEE, Nov. 2009, pp. 1–6. doi: 10.1109/COMCAS.2009.5385974.
- [88] X. Liu *et al.*, "Behavioral Modeling of Complex Magnetic Permeability With High-Order Debye Model and Equivalent Circuits," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 3, pp. 730–738, Jun. 2021, doi: 10.1109/TEMC.2020.3016376.
- [89] F. Grassi, F. Marliani, and S. A. Pignari, "Circuit Modeling of Injection Probes for Bulk Current Injection," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 3, pp. 563–576, Aug. 2007, doi: 10.1109/TEMC.2007.902385.
- [90] P. Derooy and S. Piper, "Full-wave modeling of bulk current injection probe coupling to multi-conductor cable bundles," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2016, pp. 770–774. doi: 10.1109/ISEMC.2016.7571746.
- [91] F. W. Grover, *Inductance Calculations: Working Formulas and Tables*. in Dover phoenix editions. Dover Publications, 2004. [Online]. Available: <https://books.google.gr/books?id=K3KHi9IIltcC>
- [92] Ι. Ε. Καρύδας, "Προσομοίωση Αισθητήρα Ρεύματος Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων," *Διπλωματική Εργασία Σεπτέμβριος, 2024*, [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/19304>
- [93] S. Caniggia and F. Maradei, "Circuit and numerical modeling of electrostatic discharge generators," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 6, pp. 1350–1357, 2006, doi: 10.1109/TIA.2006.882686.
- [94] C. Qing, J. Koo, A. Nandy, D. Pommerenke, J. S. Lee, and B. S. Seol, "Advanced full wave ESD generator model for system level coupling simulation," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2008-Janua, pp. 1–6, 2008, doi: 10.1109/ISEMC.2008.4652137.
- [95] F. Centola, D. Pommerenke, T. V. D. Wang Kai, and S. Caniggia, "ESD excitation model for susceptibility study," in *2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.03CH37446)*, Boston, MA, USA, 2003, pp. 58–63. doi: 10.1109/ISEMC.2003.1236564.
- [96] D. Liu, A. Nandy, D. Pommerenke, S. J. Kwon, and K. H. Kim, "Full wave model for simulating a Noiseken ESD generator," in *2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Austin, TX, USA: IEEE, Aug. 2009, pp. 334–339. doi: 10.1109/ISEMC.2009.5284625.
- [97] J. Yousaf *et al.*, "Efficient Circuit and an em Model of an Electrostatic Discharge Generator," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 60, no. 4, pp. 1078–1086, 2018, doi: 10.1109/TEMC.2017.2787189.
- [98] Α. Δ. Σπυροπούλου, "Μελέτη επίδρασης παραμέτρων προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης," *Διπλωματική Εργασία Σεπτέμβριος, 2024*, [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/19367>
- [99] P. Wei, G. Maghlaelidze, J. Zhou, H. Gossner, and D. Pommerenke, "An Application of System Level Efficient ESD Design for HighSpeed USB3.x Interface," in *2018 40th Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD)*, Reno, NV: IEEE, Sep. 2018, pp. 1–10. doi: 10.23919/EOS/ESD.2018.8509765.

- [100] Y. Xu *et al.*, "SEED Modeling of an ESD Gun Discharge to a USB Cable Surrogate," in *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, USA: IEEE, Jul. 2021, pp. 1159–1164. doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559216.
- [101] 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," *Electronics*, vol. 10, no. 6, p. 728, Mar. 2021, doi: 10.3390/electronics10060728.
- [102] F. Zur Nieden, S. Scheier, and S. Frei, "Circuit models for ESD-generator-cable field coupling configurations based on measurement data," in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Rome, Italy: IEEE, Sep. 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396754.
- [103] C. F. M. Carobbi and L. M. Millanta, "The Loading Effect of Radio-Frequency Current Probes," in *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Sorrento, Italy: IEEE, Apr. 2006, pp. 2050–2053. doi: 10.1109/IMTC.2006.328454.
- [104] A. Kriz, K. Fujii, D. Knight, and D. Schwarzbeck, "An International Round-Robin Test for Insertion Impedance of Current Probes," in *2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Brugge, Belgium: IEEE, Sep. 2024, pp. 308–311. doi: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722478.
- [105] T. Williams, "EMC for Product Designers." Elsevier Science & Technology, Burlington, MA, USA, pp. 361–364, 2006.
- [106] E. M. C. Directory, "What is a Ferrite Clamp?" 2024. [Online]. Available: <https://www.emc-directory.com/community/what-is-the-ferrite-clamp>
- [107] N. Bondarenko, P. Shao, A. Orlando, M. Y. Koledintseva, D. G. Beetner, and P. Berger, "Prediction of common-mode current reduction using ferrites in systems with cable harnesses," in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Pittsburgh, PA, USA, Aug. 2012, pp. 80–84.
- [108] C. R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility." Wiley Interscience, Hoboken, NJ, USA, 2006.
- [109] J. Yao, Y. Li, H. Zhao, and S. Wang, "Design of CM Inductor Based on Core Loss for Radiated EMI Reduction in Power Converters," in *Proceedings of the 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Anaheim, CA, USA, Mar. 2019, pp. 2673–2680.
- [110] H. W. Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering." John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2009.
- [111] J. Urabe, K. Fujii, Y. Dowaki, Y. Jito, Y. Matsumoto, and A. Sugiura, "A Method for Measuring the Characteristics of an EMI Suppression Ferrite Core," *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 48, pp. 774–780, 2006.
- [112] Y. Kraftmakher, "Experiments on ferrimagnetism," *Eur J Phys*, vol. 34, p. 213, 2012.
- [113] X. C. Tong, *Advanced Materials for Electromagnetic Interference Shielding*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press.
- [114] A. Orlando, M. Y. Koledintseva, D. G. Beetner, P. Shao, and P. Berger, "A lumped-element circuit model of ferrite chokes," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Fort Lauderdale, FL, USA: Van den Bossche, Jul. 2010, pp. 754–759.

- [115] A. Bossche and V. C. Valchev, "Inductors and Transformers for Power Electronics." CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- [116] A. Weinschrott, "New measurement method for high frequency cable mounted ferrites," in *Proceedings of the 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, IL, USA, Aug. 2005, pp. 312–314.
- [117] A. Goldman, *Modern Ferrite Technology*, 2nd ed. Springer, 2006. doi: 10.1007/978-0-387-29413-1.
- [118] A. Suarez *et al.*, "Characterization of Different Cable Ferrite Materials to Reduce the Electromagnetic Noise in the 2–150 kHz Frequency Range," *Materials*, vol. 11, p. 174, 2018.
- [119] M. Damjanovi, G. Stojanovi, L. Živanov, and V. Desnica, "Comparison of different structures of ferrite EMI suppressors," *Microelectron Int*, vol. 23, pp. 42–48, 2006.
- [120] A. Suarez, J. Victoria, P. A. Martinez, A. Alcarria, J. Torres, and I. Molina, "Analysis of different Sleeve Ferrite Cores Performance according to their Dimensions," in *Proceedings of the 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*, Barcelona, Spain, Sep. 2019, pp. 88–93.
- [121] A. Suarez *et al.*, "Effectiveness Assessment of a Nanocrystalline Sleeve Ferrite Core Compared with Ceramic Cores for Reducing Conducted EMI," *Electronics*, vol. 8, p. 800, 2019.
- [122] A. Limjoco, "Jefferson Eco, Ferrite Beads Demystified," *Analog Dialogue*, vol. 50–02, Feb. 2016, [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/ferrite-beads-demystified.html>
- [123] Fair-Rite Products Corp., "Greatest Hits Kit - Datasheet." [Online]. Available: <https://fairrite.com/kits/greatest-hits-kit/>
- [124] W. Mazgaj, M. Sierzega, and Z. Szular, "Approximation of Hysteresis Changes in Electrical Steel Sheets," *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4110, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144110.
- [125] TDK Group Company, "EPCOS Data Book 2013 - Ferrites and Accessories." 2013. [Online]. Available: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/519704/069c210d0363d7b4682d9ff22c2ba503/ferrites-and-accessories-db-130501.pdf>
- [126] J. V. G. Rama Rao, J. Amarnath, and S. Kamakshaiah, "Simulation and experimental method for the suppressing of very fast transient over voltages in a 245kv gis using ferrite rings," in *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2010, pp. 128–131.
- [127] P. Muttathukunnel, "ESD failure resolution with ferrites on exposed signal lines," in *13th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC)*, IEEE, 2015, pp. 146–149.
- [128] B. Deutschmann, J. S. Khan, G. Winkler, and J. Victoria, "Reduction of Electromagnetic Emission from ICs Using Soft Flexible Ferrite Sheets," in *13th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo)*, IEEE, 2022, pp. 19–24.
- [129] M. Y. Koledintseva, "Soft Ferrites for EMC Applications," in *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI)*, IEEE, 2018, pp. 1–31.
- [130] N. C. Joshi, A. Verma, A. Satyanarayanan, S. Chand, K. N., and S. S. Islam, "Application of Ni substituted Li-Zn-Mn ferrite for the suppression of transients," in *9th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC)*, IEEE, 2006, pp. 426–432.

- [131] M. Ammer, S. Miropolskiy, A. Rupp, F. z Nieden, M. Sauter, and L. Maurer, "Characterizing and Modelling Common Mode Inductors at high Current Levels for System ESD Simulations," in *41st Annual EOS/ESD Symposium (EOS/ESD)*, IEEE, 2019, pp. 1–7.
- [132] B. Wunsch, T. Christen, S. Skibin, and V. Forsstrom, "Broadband Circuit Model of a Ferrite Core, Including Dimensional Resonance, Saturation, and Hysteresis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 7, pp. 1–5, 2019.
- [133] "SmartZap-Amber Precision Instruments." 2017. [Online]. Available: http://www.amberpi.com/products_smartzap.php
- [134] A. I. Luxolis, 2024. [Online]. Available: <https://luxolis.ai/industrial-automation-2/esd-testing-with-3d-vision-and-cobots>
- [135] G.-X. Luo, B.-C. Huang, K. Huang, R. Mi, and D. Pommerenke, "Human Metal ESD: Design of a Full-Wave Model and an Improved Compact Generator," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 65, no. 3, pp. 634–642, Jun. 2023, doi: 10.1109/TEM.2023.3257240.
- [136] G.-X. Luo, K. Huang, J.-C. Zhou, W. Zhang, D. Pommerenke, and J. Holliman, "Design of an Artificial Dummy for Human Metal Model ESD," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, no. 1, pp. 319–323, Feb. 2021, doi: 10.1109/TEM.2020.2984338.
- [137] H. Sakoe and S. Chiba, "Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 26, no. 1, pp. 43-49, Feb. 1978, doi: 10.1109/TASSP.1978.1163055.
- [138] D. Deriso and S. Boyd, "A general optimization framework for dynamic time warping," *Optim. Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 1411–1432, Jun. 2023, doi: 10.1007/s11081-022-09738-z.
- [139] K. Muhonen, J. Richner, and T. J. Maloney, "Spectral analysis of the IEC waveform, a comparison of generators and pulsers," *Microelectron. Reliab.*, vol. 128, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114430.
- [140] J. Mazurek and D. Strzałka, "On the Monte Carlo weights in multiple criteria decision analysis," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 10, p. e0268950, Oct. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0268950.
- [141] J. Więckowski and W. Sałabun, "Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review," *Appl. Soft Comput.*, vol. 148, p. 110915, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.asoc.2023.110915.
- [142] IEEE Standards Association, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std 80, 2013.
- [143] International Electrotechnical Commission, *IEC 60479-1: Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects*, 2018.
- [144] V. Santis, P. A. Beeckman, and D. A. Lampasi, "Assessment of human body impedance for safety requirements against contact currents for frequencies up to 110 MHz," *IEEE Trans Biomed Eng.*, vol. 58, no. 2, pp. 390-396, 2011.
- [145] 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," in *Proceedings of 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe*,
- [146] European Cooperation for Space Standardization (ECSS), *ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 – SpaceWire – Links, Nodes, Routers and Networks*, 2019.

- [147] European Cooperation for Space Standardization (ECSS), *ECSS-E-ST-20-07C Rev.2 – Space Engineering – Electromagnetic Compatibility*, 2022.
- [148] E. P. Nicolopoulou, P. K. Papastamatis, and I. F. Gonos, “Electromagnetic transients: EMC testing and mitigation methodologies - recent trends”, in *Recent Trends on Electromagnetic Environmental Effects for Aeronautics and Space Applications*, C. D. Nikolopoulos, Ed., Hershey, Pennsylvania, U.S.A: IGI Global, 2020, pp. 226–263.
- [149] P. K. Papastamatis, C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, I. O. Vardiambasis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, “Experimental measurement of the shield current of a AL SpaceWire cable induced by indirect ESD according to the IEC 61000-4-2 Standard,” in *26th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC*, Crete, Greece, 2022, pp. 256-259,. doi: 10.1109/CSCC55931.2022.00050.
- [150] C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, P. K. Papastamatis, T. N. Kapetanakis, I. O. Vardiambasis, and I. F. Gonos, “RF Field and ESD Immunity Test on Cable Assembly Type AL SpaceWire Link,” in *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 840-844,. doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559301.

A. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

- A1. **Panagiotis K. Papastamatis**, Evangelos A. Paliatsos, Ioannis F. Gonos, Ioannis 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". *Electronics* 2021, 10, 728. <https://doi.org/10.3390/electronics10060728>
- A2. **Papastamatis, P.K.**, Nicolopoulou, E.P., Christodoulou, C.A. and Gonos, I.F. (2025), Ferrite-Based Approach for Optimising Electrostatic Discharge Generator Waveforms. *IET Sci. Meas. Technol.*, 19: e70025. <https://doi.org/10.1049/smt2.70025>
- A3. **P. K. Papastamatis**, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Operator Influence on IEC 61000-4-2 ESD Waveforms: A Study and Ferrite-Based Replication Proposal," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 67, no. 3, pp. 739-750, June 2025, doi: 10.1109/TEM.C.2025.3560614
- A4. **P. K. Papastamatis**, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Impact of Metallic Robotic Arms on IEC 61000-4-2 ESD Waveform Integrity and Human Operator Replication," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, doi: 10.1109/TEM.C.2025.3596441
- A5. **P. K. Papastamatis**, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Quantitative Analysis of Operator Influence on IEC 61000-4-2 Indirect ESD Testing and Recommendations for Enhanced Reproducibility," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 138900-138913, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3596287

B. Ανακοινώσεις σε Πρακτικά Διεθνών Συνεδρίων

- B1. **P. K. Papastamatis**, E. A. Paliatsos, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Investigation of the frequency response compensation method for ESD current reconstruction for different test levels and ESD test generators," *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Rome, Italy, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245818.
- B2. C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, **P. K. Papastamatis**, T. N. Kapetanakis, I. O. Vardiambasis and I. F. Gonos, "RF Field and ESD Immunity Test on Cable Assembly Type AL SpaceWire Link," *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 840-844, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559301.
- B3. A. T. Baklezos, C. D. Nikolopoulos, **P. K. Papastamatis**, T. N. Kapetanakis, I. O. Vardiambasis and C. N. Capsalis, "Early Considerations for Unit's Induced Electric Behaviour Characterization in the Extreme Low Frequency Domain," *2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Gothenburg, Sweden, 2022, pp. 744-747, doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9901176.

- B4. **P. K. Papastamatis**, C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, I. O. Vardiambasis, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Experimental measurement of the shield current of a AL SpaceWire cable induced by indirect ESD according to the IEC 61000-4-2 Standard," *2022 26th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC)*, Crete, Greece, 2022, pp. 256-259, doi: 10.1109/CSCC55931.2022.00050.
- B5. **P. K. Papastamatis**, T. K. Lamprinos, C. D. Nikolopoulos, A. T. Baklezos, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Impact of the injection point selection during indirect application of ESD pulses according to IEC 61000-4-2," *2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Gothenburg, Sweden, 2022, pp. 753-757, doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9901107.
- B6. **Panagiotis K. Papastamatis**, Ioanna P. Katsanaki, Eleni P. Nicolopoulou, Christos D. Nikolopoulos, Christos A. Christodoulou, Ioannis F. Gonos: «Comparative analysis of calibration procedures in current and proposed editions of the IEC 61000-4-2 Standard», *Proceedings of the 2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2024)*, Bruges, Belgium, September 2-5, 2024, pp. 483-488, doi: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722155.
- B7. A. T. Baklezos, D. Kalderis, I. O. Vardiambasis, **P. K. Papastamatis** and C. D. Nikolopoulos, "Investigating the EMI Shielding Effectiveness of Sustainable Biochar-Based Composites for 5G and 6G Mid-Band Applications," *2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Brugge, Belgium, 2024, pp. 523-527, doi: 10.1109/EMCEurope59828.2024.10722376.
- B8. **P. K. Papastamatis**, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Reproducibility analysis during ESD testing of a SpaceWire link simulator," *2025 6th International Conference in Electronic Engineering & Information Technology (EEITE)*, Chania, Greece, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEITE65381.2025.11166493.
- B9. **P. K. Papastamatis**, M. I. Tsortanidi, E. P. Nicolopoulou, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Quantitative Assessment of Human Operator Influence in IEC 61000-4-2 ESD Testing," *2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Chania, Crete, Greece, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169076.
- B10. **P. K. Papastamatis**, E. P. Nicolopoulou, C. D. Nikolopoulos, N. C. Ilia, C. A. Christodoulou and I. F. Gonos, "Impact of Current Monitoring Probes on ESD Waveforms: Experimental and EM Simulation Analysis," *2025 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Paris, France, 2025, pp. 501-506, doi: 10.1109/EMCEurope61644.2025.11176188.

Γ. Ανακοινώσεις σε Πρακτικά Ελληνικών Συνεδρίων

- Γ1. **Παπασταμάτης Π.Κ.**, Νικολοπούλου Ε.Π., Ηλία Ν.Χ., Κονταργύρη Β.Θ., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «Δοκιμές Ηλεκτρομαγνητικής Ατρωσίας σε ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα», 6^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα 13-14 Μαΐου 2016, Ενότητα: Ηλεκτρικές Μετρήσεις.

- Γ2. **Παπασταμάτης Π.Κ.**, Νικολοπούλου Ε.Π., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: «EMC και εξοπλισμός πληροφορικής. Η μετάβαση από το EN 55022 στο EN 55032: αλλαγές για εργαστήρια μετρήσεων και σχεδιαστές», 7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα 11-12 Μαΐου 2018, Εργασία με ID: 91, Ενότητα: Ηλεκτρικές Μετρήσεις 2.
- Γ3. **Παπασταμάτης Π.Κ.**, Λαμπρινός Θ.Κ., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α., «Έμμεση εφαρμογή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 / Καταγραφή ρεύματος για διάφορα σημεία έγχυσης», 8ο Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας, Θεσσαλονίκη, 1-2 Ιουλίου 2022, Εργασία με ID: 36
- Γ4. Τσορτανίδη Μ.Ι., Νικολοπούλου Ε.Π., **Παπασταμάτης Π.Κ.**, Ηλία Ν.Χ., Χριστοδούλου Χ.Α., Γκόνος Ι.Φ. «Μελέτη της αναπαραγωγιμότητας ανάμεσα στους χειριστές μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2», 9ο Τακτικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 20-21 Ιουνίου 2025, Εργασία με ID: 68

Δ. Κεφάλαια Βιβλίων

- Δ1. Ε. Ρ. Nicolopoulou, **P. K. Papastamatis**, Chapter: “Transient Electromagnetic Phenomena – Standardization and EMC Requirements – Mitigation Techniques”, Book: “Electromagnetic Compatibility for Space Systems Design”, pp. 211-247, IGI Global, pp. 211-247, 2018, DOI: 10.4018/978-1-5225-5415-8.ch006
- Δ2. Ε. Ρ. Nicolopoulou, **P. K. Papastamatis**, Ι. Φ. Gonos Chapter: “Electromagnetic Transients: EMC Testing and Mitigation Methodologies–Recent Trends”, Book: “Recent Trends on Electromagnetic Environmental Effects for Aeronautics and Space Applications”, IGI Global, 2021, pp. 226-263, DOI: 10.4018/978-1-7998-4879-0.ch004
- Δ3. **P. K. Papastamatis**, Ε. Ρ. Nicolopoulou, Ι. Φ. Gonos Chapter: “Electromagnetic Compatibility Testing for Space Systems: Specifications, Methodologies, Tailoring, and Recent Trends”, Book: “Recent Trends on Electromagnetic Environmental Effects for Aeronautics and Space Applications”, pp. 97-126, IGI Global, 2021, DOI: 10.4018/978-1-7998-4879-0.ch008