



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

**Το αναθεωρημένο πρότυπο IEC 61000-4-2: Συγκριτικές μετρήσεις
διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΑ ΚΑΤΣΑΝΑΚΗ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2025



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

**Το αναθεωρημένο πρότυπο IEC 61000-4-2: Συγκριτικές μετρήσεις
διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΑ ΚΑΤΣΑΝΑΚΗ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24η Μαρτίου 2025.

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Χρήστος Α. Χριστοδούλου

Αντώνιος Αντωνόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, 24 Μαρτίου 2025

.....
Ιωάννα Κατσανάκη

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

Copyright © Ιωάννα Κατσανάκη, 2024.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (electrostatic discharges, ESD), με σκοπό τη σύγκριση των δύο εκδόσεων (ισχύουσα και προτεινόμενη) του Προτύπου IEC 61000-4-2, χρησιμοποιώντας τρεις γεννήτριες του εργαστηρίου για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. Το συγκεκριμένο Πρότυπο, με βάση τα οποία πραγματοποιούνται οι δοκιμές και έλεγχοι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο ηλεκτρονικών συστημάτων, ορίζουν αυστηρά την κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τις βασικές της παραμέτρους, έτσι ώστε να εφαρμόζονται σωστά εκφορτίσεις σε ηλεκτρονικές συσκευές.

Αρχικά, αναλύεται η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μεταξύ συσκευών και συνεπώς ο σκοπός εφαρμογής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, καθώς και οι επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στις συσκευές αυτές. Στη συνέχεια, μελετώνται οι δύο εκδόσεις του προτύπου δοκιμής, σύμφωνα με τις οποίες πρέπει να πραγματοποιούνται οι εκφορτίσεις αυτές και περιγράφεται η εφαρμογή τους στη πειραματική διαδικασία που ακολούθησε στο εργαστήριο, μέσω των 3 γεννητριών που διατίθονταν. Δηλαδή, πραγματοποιήθηκαν εκφορτίσεις ρεύματος για διάφορα επίπεδα τάσης, θετικής και αρνητικής, για τα οποία παρουσιάζονται στην εργασία αυτή οι αναλυτικές μετρήσεις, οι κυματομορφές ρεύματος και φωτογραφίες της κάθε διάταξης, με προσθήκη των απαραίτητων σχολιασμών.

Τέλος, μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών, αναλύονται οι διαφορές των δύο εκδόσεων τόσο στη πειραματική διάταξη, όσο και στον καθορισμό ορίων του ρεύματος των κυματομορφών εκφόρτισης μέσα από τα πρότυπα. Ακολουθούν και τα αντίστοιχα συμπεράσματα για τη λειτουργία των γεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν και τη δυνατότητα περαιτέρω χρήσης τους.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, Πρότυπο IEC 61000-4-2, διακρίβωση γεννητριών, προσομοίωση

Abstract

This thesis examines the phenomenon of electrostatic discharges (ESD) with the aim of comparing the two (old and new) versions of the IEC 61000-4-2 Standard, using three laboratory generators for conducting experimental measurements. This Standard, which define the testing and verification procedures for electrostatic discharges at the electronic system level, strictly specify the electrostatic discharge current waveform and its key parameters to ensure proper application of discharges on electronic devices.

Initially, the concept of electromagnetic compatibility between devices is analyzed, along with the purpose of applying electrostatic discharges and the effects of electromagnetic interference on these devices. Subsequently, the two versions of the test standard, according to which these discharges should be performed, are studied. Their application in the experimental procedure conducted in the laboratory using the three available generators is also described. Specifically, current discharges were carried out for various voltage levels, both positive and negative, and this work presents the detailed measurements, current waveforms, and photographs of each setup, accompanied by the necessary commentary.

Finally, after conducting these experiments, the differences between the two standard versions are analyzed, both in terms of the experimental setup and in defining the current waveform discharge limits specified by the standards. The corresponding conclusions regarding the operation of the generators used and their potential for further use are also presented.

Keywords: Electromagnetic compatibility, electrostatic discharge, Standard IEC 61000-4-2, calibration of generators, simulation.

Πρόλογος

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας, που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων, της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., είναι η μελέτη της επίδρασης των αλλαγών, που έχουν προκύψει στην τρίτη έκδοση (Ed3.0) του προτύπου IEC 61000-4-2, συγκριτικά με την ισχύουσα έκδοση (Ed2.0), στη κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Τέλος, παρουσιάζεται μια προσομοίωση μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Αναλύονται οι επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και συστήματα και μελετώνται οι τεχνικές μείωσής τους.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και οι αιτίες που προκαλείται. Στη συνέχεια αναλύονται οι επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής εκφόρτισης σε συσκευές και συστήματα και μελετώνται μέθοδοι προστασίας για τις συσκευές αυτές. Τέλος, γίνεται μια εισαγωγή στο μέσο διεξαγωγής με το οποίο θα πραγματοποιήσουμε ηλεκτρικές εκφορτίσεις σε αυτήν την εργασία, δηλαδή τις γεννήτριες εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η νέα έκδοση (ED3.0) του προτύπου IEC 61000-4-2 και ακολουθεί σύγκριση με την ισχύουσα έκδοση (ED2.0) του ίδιου προτύπου. Στη συνέχεια, μελετάται ο σκοπός του καινούριου προτύπου και περιγράφεται η διάταξη με την οποία θα διεξαχθούν τα πειράματα και θα προκύψουν οι μετρήσεις που χρειαζόμαστε.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται σε πίνακες οι μετρήσεις που προέκυψαν από τη διεξαγωγή των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για διάφορα επίπεδα τάσης όπως ορίζει το πρότυπο, καθώς και αντίστοιχα γραφήματα με τις κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις, μελετώνται οι αιτίες που προκάλεσαν τα αποτελέσματα αυτά και με βάση αυτά αναφέρεται η μελλοντική συνέχεια της έρευνας.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των σπουδών μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνετέλεσαν στην πορεία των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Κ. Παπασταμάτη, υποψήφιο διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη που μου παρείχε από την πρώτη στιγμή της συνεργασίας μας και σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Ευρετήριο Εικόνων	10
Ευρετήριο Πινάκων.....	183
Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	Error! Bookmark not defined.
1.1. Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	Error! Bookmark not defined.
1.2. Δοκιμές EMC.....	Error! Bookmark not defined.
1.2.1. Δοκιμές εκπομπών	16
1.2.2. Δοκιμές ανοχής.....	Error! Bookmark not defined.
1.2.3. Δοκιμές συνοχής.....	17
1.3. Διεθνείς κανονισμοί και πρότυπα	17
1.4. Παρεμβολές και επιπτώσεις σε συσκευές και συστήματα	18
1.5. Τεχνικές μείωσης παρεμβολών.....	20
1.6. Προκλήσεις και Εξελίξεις στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα.....	21
1.7. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα σε Ειδικά Περιβάλλοντα	22
1.8. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	23
Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση	24
2.1. Φαινόμενο και αιτίες της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	24
2.1.1. Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	25
2.1.2. Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής.....	27
2.2. Επιπτώσεις των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στις ηλεκτρονικές συσκευές	30
2.3. Πρακτικές πτυχές της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: μέθοδοι προστασίας. 32	
2.3.1. Γείωση (Grounding).....	32
2.3.2. Προστατευτικά υλικά.....	32
2.3.3. Εκφορτιστές (Discharge Devices)	33
2.3.4. Προστατευτικά Κυκλώματα	33
2.3.5. Έλεγχος υγρασίας περιβάλλοντος.....	33
2.4. Δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις	33
2.5. Κανονιστικές απαιτήσεις για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.....	35
Κεφάλαιο 3: Πρότυπα διεξαγωγής δοκιμών ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και πειραματική διάταξη	35
3.1. Πρότυπο διεξαγωγής ατρωσίας	36

3.1.1.	Αντικείμενο του προτύπου IEC 61000-4-2 ED3	36
3.1.2.	Επίπεδα δοκιμών	39
3.1.3.	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	40
3.1.4.	Χαρακτηριστικά των άκρων εκφόρτισης	43
3.1.5.	Βαθμονόμηση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας ESD.....	45
3.2.	Διαφοροποίηση από το πρότυπο IEC 61000-4-2 Edition 2	48
3.3.	Σκοπός καινούριου προτύπου.....	50
3.4.	Πειραματική διάταξη.....	51
Κεφάλαιο 4:	Πειραματικές μετρήσεις.....	Error! Bookmark not defined.
Κεφάλαιο 5:	Σύνοψη - Συμπεράσματα	94
Βιβλιογραφία		96

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1.	Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από συσκευές	σελ.15
Εικόνα 1.2.	Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές της καθημερινότητας και οι συσκευές που επηρεάζονται	σελ.19
Εικόνα 2.1.	Η τυπική περίπτωση προσωπικής εκφόρτισης ESD	σελ.25
Εικόνα 2.2.	Η τριβή που προκύπτει όταν η σόλα των παπουτσιών έρχεται σε επαφή και χωρίζεται από το πάτωμα δημιουργεί στατική τάση.	σελ.27
Εικόνα 2.3.	Επαφή μεταξύ επιφανειών με ίδιο φορτίο απωθούν το ένα το άλλο, ενώ με ίδιο φορτίο έλκονται.	σελ.29
Εικόνα 2.4.	Στατικός ηλεκτρισμός μεταξύ μπαλονιού και μαλλιών δημιουργείται όταν έχουν αντίθετα φορτία	σελ.30
Εικόνα 2.5.	Εποπτική απλουστευμένη παρουσίαση φόρτισης εξ επαγωγής	σελ.30
Εικόνα 3.1.	Άμεση εφαρμογή εκκενώσεων αέρα στο περίβλημα του δοκιμίου	σελ.38
Εικόνα 3.2.	Άμεση εφαρμογή εκκενώσεων επαφής στο δοκίμιο	σελ.38
Εικόνα 3.3.	Εκκενώσεις στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης	σελ.38
Εικόνα 3.4.	Εκκενώσεις στο κάθετο επίπεδο σύζευξης	σελ.38
Εικόνα 3.5.	Διάγραμμα γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	σελ.40
Εικόνα 3.6.	Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας	σελ.41
Εικόνα 3.7.	Άκρο εκφόρτισης επαφής της γεννήτριας ESD	σελ.43
Εικόνα 3.8.	Άκρο εκφόρτισης αέρα της γεννήτριας ESD	σελ.43
Εικόνα 3.9.	Διάταξη διακρίβωσης σύμφωνα με την έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2	σελ.48
Εικόνα 3.10.	Διάταξη διακρίβωσης σύμφωνα με την έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2	σελ.49
Εικόνα 3.11.	Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας EMTEST DITO	σελ.52
Εικόνα 3.12.	Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 433 (SCHAFFNER)	σελ.53
Εικόνα 3.13.	Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438 (SCHAFFNER)	σελ.54
Εικόνα 4.1.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +2kV.	σελ.55
Εικόνα 4.2.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.	σελ.55
Εικόνα 4.3.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.	σελ.55
Εικόνα 4.4.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +4kV.	σελ.56
Εικόνα 4.5.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.	σελ.56
Εικόνα 4.6.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.	σελ.56
Εικόνα 4.7.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +6kV.	σελ.57
Εικόνα 4.8.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.	σελ.57
Εικόνα 4.9.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.	σελ.57
Εικόνα 4.10.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +8kV.	σελ.58
Εικόνα 4.11.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.	σελ.58
Εικόνα 4.12.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.	σελ.58

Εικόνα 4.46.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -8kV.	σελ.77
Εικόνα 4.47.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.	σελ.77
Εικόνα 4.48.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.	σελ.77
Εικόνα 4.49.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +2kV.	σελ.84
Εικόνα 4.50.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.	σελ. 84
Εικόνα 4.51.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.	σελ. 84
Εικόνα 4.52.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +4kV.	σελ.85
Εικόνα 4.53.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.	σελ. 85
Εικόνα 4.54.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.	σελ. 85
Εικόνα 4.55.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +6kV.	σελ.86
Εικόνα 4.56.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.	σελ.86
Εικόνα 4.57.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.	σελ.86
Εικόνα 4.58.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +8kV.	σελ.87
Εικόνα 4.59.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.	σελ.87
Εικόνα 4.60.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.	σελ.87
Εικόνα 4.61.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -2kV.	σελ.88
Εικόνα 4.62.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.	σελ.88
Εικόνα 4.63.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.	σελ.88
Εικόνα 4.64.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -4kV.	σελ.89
Εικόνα 4.65.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.	σελ.89
Εικόνα 4.66.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.	σελ. 89
Εικόνα 4.67.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -6kV.	σελ. 90
Εικόνα 4.68.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.	σελ.90
Εικόνα 4.69.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.	σελ. 90
Εικόνα 4.70.	Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -8kV.	σελ. 91
Εικόνα 4.71.	Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.	σελ.91
Εικόνα 4.72.	Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.	σελ.91

Ευρετήριο Πινάκων

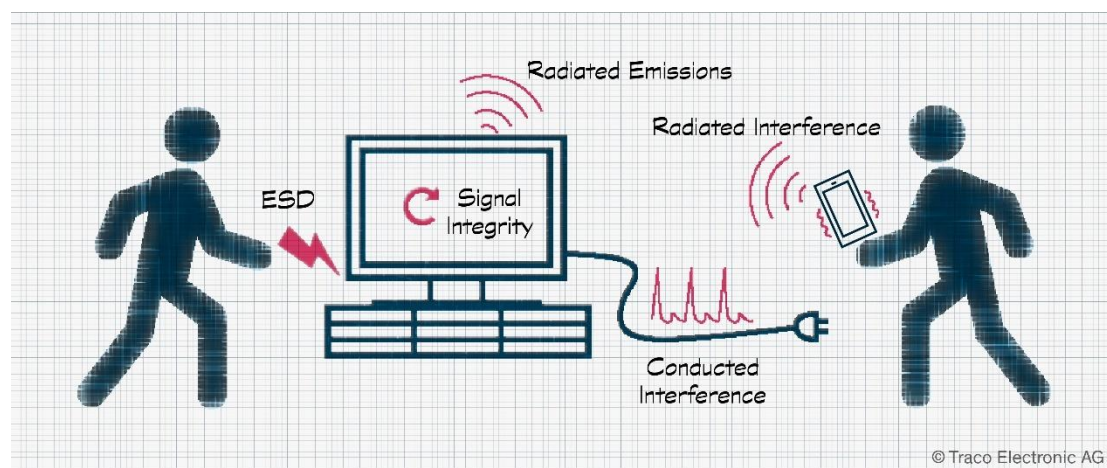
Πίνακας 2.1.	Τριβοηλεκτρική σειρά	σελ.26
Πίνακας 3.1.	Προτεινόμενα επίπεδα δοκιμών	σελ.39
Πίνακας 3.2.	Γενικές προδιαγραφές παραμέτρων	σελ.42
Πίνακας 3.3.	Ιδανικές τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης	σελ.42
Πίνακας 3.4.	Διαδικασία διακρίβωσης	σελ.47
Πίνακας 3.5.	Παράμετροι κυματομορφής στη έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2	σελ.49
Πίνακας 3.6.	Παράμετροι κυματομορφής στη έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2	σελ.50
Πίνακας 4.1.	Μέσες τιμές του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.63
Πίνακας 4.2.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.63
Πίνακας 4.3.	Μέσες τιμές του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.63
Πίνακας 4.4.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.64
Πίνακας 4.5.	Μέσες τιμές του I_{p2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.64
Πίνακας 4.6.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{p2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.64
Πίνακας 4.7.	Μέσες τιμές των I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.65
Πίνακας 4.8.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.65
Πίνακας 4.9.	Μέσες τιμές των I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.65
Πίνακας 4.10.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.66
Πίνακας 4.11.	Μέσες τιμές των I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.76
Πίνακας 4.12.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.76
Πίνακας 4.13.	Μέσες τιμές των χρόνων ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.76
Πίνακας 4.14.	Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης	σελ.77

Κεφάλαιο 1: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC)

1.1. Εισαγωγή στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility - EMC) αναφέρεται στην ικανότητα μιας ηλεκτρικής συσκευής να λειτουργεί σωστά στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον χωρίς να επηρεάζεται από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ενώ ταυτόχρονα να μην προκαλεί τέτοιες παρεμβολές σε άλλες συσκευές [6].

Η ανάγκη για την Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα προκύπτει από την ολοένα αυξανόμενη χρήση ηλεκτρονικών και ασύρματων συσκευών, οι οποίες παράγουν και καταναλώνουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Καθώς οι συσκευές αυτές γίνονται όλο και πιο περίπλοκες, η διαχείριση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών καθίσταται κρίσιμη για τη σωστή τους λειτουργία. Η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα δεν αφορά μόνο τη μείωση των παρεμβολών, αλλά και την προσαρμογή των συσκευών έτσι ώστε να αντέχουν σε αυτές τις παρεμβολές, καθιστώντας τις άτρωτες σε ορισμένα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζονται συνήθεις παρεμβολές που μπορεί να δημιουργηθούν από ηλεκτρικές συσκευές [15].



Εικόνα 1.1 Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών από συσκευές

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτουν οι παρακάτω βασικοί όροι που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

- **Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference)** είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί είτε να προκαλέσει μείωση της απόδοσης

μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, είτε να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωτική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης.

- **Ηλεκτρομαγνητική ευαισθησία (Electromagnetic susceptibility)** είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της σε συνθήκες παρουσίας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής, δηλαδή η έλλειψη ατρωσίας.
- **Ατρωσία (Immunity)** είναι η ικανότητα μιας συσκευής να λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τα κριτήρια επίδοσης που προδιαγράφονται για τη συσκευή, παρά την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.

1.2. Δοκιμές / μετρήσεις EMC

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών / μετρήσεων EMC χρησιμοποιούνται 3 μέθοδοι, οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

1.2.1 Μετρήσεις εκπομπών

Οι μετρήσεις εκπομπών διασφαλίζουν ότι μια συσκευή δεν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πάνω από τα επιτρεπτά όρια. Οι βασικές μέθοδοι περιλαμβάνουν:

α. Ανάλυση Φάσματος ή Μετρητικοί δέκτες

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι αναλυτές φάσματος ή μετρητικοί δέκτες. Η συσκευή αυτή τοποθετείται σε έναν ειδικά σχεδιασμένο χώρο δοκιμών (ανηχοϊκός ή ήμι-ανηχοϊκός θάλαμος) , όπου πραγματοποιείται η μέτρηση σε διάφορες συχνότητες. Στη συνέχεια ο αναλυτής σαρώνει ένα εύρος συχνοτήτων, καταγράφοντας την ισχύ στις διαφορετικές συχνότητες. Συχνά οι μετρήσεις γίνονται σε τρεις διαστάσεις για να καταγραφούν οι διαφορετικές κατευθύνσεις των εκπομπών.

β. Αξιολόγηση Δεδομένων

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με κανονιστικά όρια (π.χ., FCC, CISPR). Τα δεδομένα που προκύπτουν αναλύονται και καταγράφονται σε αναφορές που περιγράφουν τις συνθήκες δοκιμών και τα αποτελέσματα.

1.2.2. Δοκιμές Ατρωσίας (Immunity Testing)

Οι δοκιμές ατρωσίας αξιολογούν την ικανότητα μιας συσκευής να αντέχει σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Υπάρχουν τα παρακάτω είδη δοκιμών.

α. Δοκιμές σε ακτινοβολούμενες διαταραχές

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για αυτές τις δοκιμές είναι πομποί RF. Η συσκευή εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που προσομοιώνουν πραγματικές παρεμβολές. Αυτές οι δοκιμές περιλαμβάνουν δημιουργία πεδίων σε συχνότητες που κυμαίνονται από 80 MHz έως 1 GHz ή υψηλότερα, δηλαδή εκπομπές RF. Στη συνέχεια, ακολουθεί αξιολόγηση αντίκτυπου, δηλαδή καταγράφεται η αντίδραση της συσκευής, όπως σφάλματα λειτουργίας ή αλλαγές στην απόδοση.

β. Δοκιμές σε αγόμενες διαταραχές

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι πηγές θορύβου (noise sources). Οι παρεμβολές που απαιτούνται για τη διεξαγωγή των δοκιμών, εισάγονται μέσω των γραμμών τροφοδοσίας ή σήματος. Δηλαδή, μια πηγή θορύβου εγχέει διαταραχές στις γραμμές της συσκευής, και στη συνέχεια ακολουθεί αξιολόγηση της απόδοσης, δηλαδή αντιμετωπίζονται ζητήματα όπως η ευαισθησία των κυκλωμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία [1].

1.2.3. Δοκιμές Συμβατότητας (Compatibility Testing)

Αυτές οι δοκιμές διασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία συσκευών σε περιβάλλοντα με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι συστημικές δοκιμές στις οποίες χρησιμοποιούνται πολλές ηλεκτρονικές συσκευές. Πραγματοποιούνται δηλαδή δοκιμές σε ελεγχόμενο περιβάλλον με αυτές τις συσκευές ενεργές ταυτόχρονα και δημιουργούνται συνθήκες που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία σε πραγματικά περιβάλλοντα. Στη συνέχεια αξιολογείται η λειτουργία κάθε συσκευής υπό τη λειτουργία άλλων συσκευών [2]. Οι συστημικές δοκιμές ESD είναι πιο ρεαλιστικές, καθώς προσομοιώνουν συνθήκες πραγματικού κόσμου, όπου πολλές συσκευές επηρεάζονται ταυτόχρονα από ηλεκτροστατικές εκκενώσεις.

1.3. Διεθνείς κανονισμοί και πρότυπα

Για να διασφαλιστεί η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, υπάρχουν διάφοροι διεθνείς κανονισμοί και Πρότυπα που πρέπει να τηρούνται από τους κατασκευαστές. Μερικά από τα σημαντικότερα πρότυπα περιλαμβάνουν:

α. Διεθνή Πρότυπα

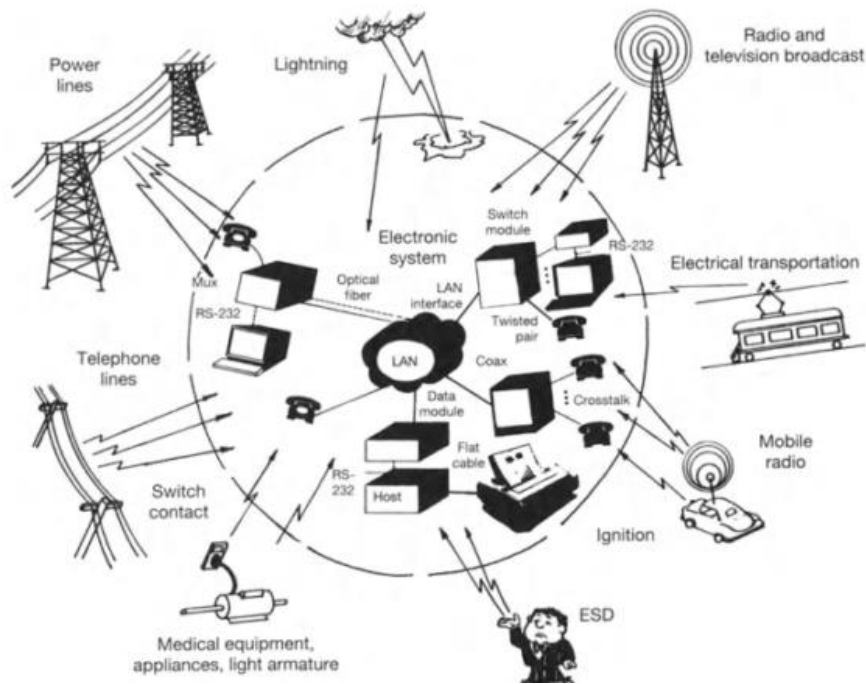
Η σειρά Προτύπων IEC 61000 καλύπτει τις απαιτήσεις για τις δοκιμές ατρωσίας, με τυποποιημένες μεθόδους και επίπεδα δοκιμών [3]. Αντιστοίχως, για τις μετρήσεις εκπομπών έχει δημοσιευθεί η σειρά Προτύπων CISPR 16-X-X, στην οποία καθορίζονται ο απαιτούμενος μετρητικός εξοπλισμός και η μεθοδολογία των μετρήσεων [4].

β. Ρυθμιστικές Αρχές

Υπάρχει η FCC (Federal Communications Commission), δηλαδή ο οργανισμός των ΗΠΑ που ρυθμίζει τις τηλεπικοινωνίες και καθορίζει τις απαιτήσεις EMC για τις συσκευές. Επίσης, στην Ευρώπη, οι συσκευές πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις EMC για να φέρουν το σήμα CE.

1.4. Παρεμβολές και Επιπτώσεις σε Συσκευές και Συστήματα

Οι παρεμβολές μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές. Συνήθεις πηγές είναι τα ραδιοκύματα, δηλαδή τα σήματα που εκπέμπουν οι πομποί ραδιοσυχνοτήτων (π.χ., κεραίες κινητής τηλεφωνίας), οι μηχανολογικές πηγές, δηλαδή μηχανές, κινητήρες και άλλος εξοπλισμός που παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία κατά τη λειτουργία τους και οι συσκευές καταναλωτών, όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων και οι ασύρματες συσκευές. Επίσης, υπάρχουν και οι φυσικές πηγές, δηλαδή οι αστραπές, ηλιακές καταιγίδες και άλλα φυσικά φαινόμενα που παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Όλες αυτές οι πηγές μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές ή συστήματα, με επιπτώσεις που κυμαίνονται από μικρές δυσλειτουργίες έως σοβαρές βλάβες. Μερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές της καθημερινότητας καθώς και οι συσκευές που επηρεάζονται, παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.2. [20].



Εικόνα 1.2. Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές της καθημερινότητας και οι συσκευές που επηρεάζονται

Οι παρεμβολές που προκαλούνται από έλλειψη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μπορεί να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στην απόδοση και τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες παρεμβολών που μπορεί να επηρεάσουν διαφορετικά συστήματα:

- **Παρεμβολές σε Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα:** Οι ασύρματες συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι δορυφορικοί δέκτες, και τα συστήματα Wi-Fi, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Για παράδειγμα, σε περιβάλλοντα με υψηλά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η ποιότητα της σύνδεσης μπορεί να μειωθεί ή να διακοπεί εντελώς. Οι πομποί και δέκτες τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι ευάλωτοι σε θόρυβο (noise) και διακοπή σήματος (signal drop), κάτι που μπορεί να προκαλέσει από απώλεια δεδομένων μέχρι και πλήρη αδυναμία επικοινωνίας.
- **Παρεμβολές σε Ιατρικές Συσκευές:** Η σωστή λειτουργία ιατρικών συσκευών όπως οι βηματοδότες, οι απινιδωτές και οι ανιχνευτές ακτινοβολίας εξαρτάται από την απουσία εξωτερικών παρεμβολών. Αν μια ιατρική συσκευή επηρεαστεί από εξωτερικές παρεμβολές, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι απειλητικά για τη ζωή των ασθενών. Για παράδειγμα, μια ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να

προκαλέσει δυσλειτουργία σε έναν βηματοδότη, οδηγώντας σε επικίνδυνες καταστάσεις για τον ασθενή.

- **Παρεμβολές σε Αεροπορικά και Ναυτιλιακά Συστήματα:** Τα αεροπλάνα και τα πλοία χρησιμοποιούν ένα μεγάλο πλήθος ηλεκτρονικών συστημάτων για την πλοήγηση, την επικοινωνία και τον έλεγχο των πτήσεων ή της πορείας τους. Οι παρεμβολές σε αυτά τα συστήματα μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην ασφάλεια των επιβατών και των πληρωμάτων. Στην αεροπορία, για παράδειγμα, παρεμβολές στα συστήματα επικοινωνίας ή ραντάρ μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα επικοινωνίας με τους πύργους ελέγχου ή σε απώλεια δεδομένων για την ακριβή θέση του αεροσκάφους.
- **Παρεμβολές σε Πολυμεσικές Συσκευές:** Οι συσκευές πολυμέσων (όπως οι τηλεοράσεις, οι υπολογιστές και οι κονσόλες παιχνιδιών) μπορεί επίσης να υποστούν παρεμβολές, επηρεάζοντας την ποιότητα εικόνας, ήχου ή την απόδοση συνολικά. Για παράδειγμα, η ανεπαρκής θωράκιση στην καλωδίωση ενός συστήματος οικιακής ψυχαγωγίας μπορεί να προκαλέσει γραμμές και θόρυβο στην οθόνη ή διακοπές ήχου στα ηχεία.

Η διασφάλιση της σωστής λειτουργίας αυτών των συσκευών σε ένα ηλεκτρομαγνητικά "θορυβώδες" περιβάλλον απαιτεί τεχνικές και μέτρα που θα περιγραφούν στην επόμενη ενότητα.

1.5. Τεχνικές Μείωσης Παρεμβολών

Για την ελαχιστοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, οι οποίες εφαρμόζονται τόσο στο σχεδιασμό των συσκευών όσο και στο περιβάλλον όπου αυτές λειτουργούν. Οι βασικές τεχνικές περιλαμβάνουν:

- **Θωράκιση (Shielding):** Η θωράκιση αφορά τη χρήση υλικών που αποτρέπουν τη διαφυγή ή την εισροή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Τα μεταλλικά περιβλήματα γύρω από ηλεκτρονικές συσκευές ή τα καλώδια περιορίζουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Για παράδειγμα, σε μια ηλεκτρική συσκευή, το περίβλημα από μέταλλο λειτουργεί ως "κλωβός Faraday", απομονώνοντας τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα από εξωτερικές παρεμβολές.

- **Φίλτρα (Filters):** Τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για την απομόνωση συγκεκριμένων συχνοτήτων, επιτρέποντας μόνο τις επιθυμητές συχνότητες να περάσουν μέσω ενός κυκλώματος. Αυτά τα φίλτρα τοποθετούνται σε γραμμές τροφοδοσίας, κεραίες ή άλλες γραμμές μετάδοσης σήματος. Για παράδειγμα, βαθυπερατά φίλτρα επιτρέπουν μόνο τις χαμηλές συχνότητες να περάσουν, μειώνοντας τις παρεμβολές υψηλών συχνοτήτων.
- **Γείωση (Grounding):** Η σωστή γείωση των συσκευών και των συστημάτων είναι κρίσιμη για την αποτροπή της συσσώρευσης στατικού φορτίου και τη μείωση των παρεμβολών. Η γείωση παρέχει μια διαδρομή για τη διάχυση των ανεπιθύμητων φορτίων, προλαμβάνοντας την εκπομπή παρεμβολών.
- **Χρήση Διαφορικών Σημάτων (Differential Signaling):** Αντί να χρησιμοποιούνται απλά σήματα (single-ended signals), όπου η πληροφορία μεταφέρεται μέσω ενός αγωγού σε σχέση με το έδαφος, τα διαφορικά σήματα μεταφέρουν το ίδιο σήμα σε δύο αγωγούς με αντίθετες φάσεις. Αυτό καθιστά τις συσκευές λιγότερο ευαίσθητες σε παρεμβολές, καθώς οποιαδήποτε εξωτερική παρεμβολή επηρεάζει εξίσου και τους δύο αγωγούς, οπότε ακυρώνεται.
- **Απομονωτές και Διηλεκτρικά Υλικά:** Η χρήση απομονωτών, όπως οπτικοί απομονωτές (optocouplers), μπορεί να διαχωρίσει ηλεκτρικά τα κυκλώματα, ενώ η χρήση διηλεκτρικών υλικών περιορίζει τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
- **Σχεδιασμός Πλακέτας Τυπωμένων Κυκλωμάτων (PCB Layout):** Η σωστή τοποθέτηση των διαδρομών (traces) και των στοιχείων σε μια πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων μπορεί να μειώσει δραστικά τις παρεμβολές. Αποφεύγοντας παράλληλες διαδρομές και μειώνοντας τα μήκη των γραμμών, περιορίζονται οι πιθανότητες επαγωγικών παρεμβολών.

Η εφαρμογή αυτών των τεχνικών στο σχεδιασμό και την παραγωγή συσκευών είναι απαραίτητη για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [5].

1.6. Προκλήσεις και Εξελίξεις στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αποτελεί μια συνεχώς εξελισσόμενη πρόκληση, κυρίως λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων και της συνεχούς εισαγωγής νέων ασύρματων τεχνολογιών. Οι βασικές προκλήσεις περιλαμβάνουν:

- **Αύξηση της Πυκνότητας των Ηλεκτρονικών Συσκευών:** Η συνεχής αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούνται σε κλειστά περιβάλλοντα (π.χ., σπίτια, γραφεία) αυξάνει την πιθανότητα παρεμβολών. Η συνύπαρξη πολλών συσκευών με ποικίλες λειτουργίες δημιουργεί ένα πιο "θορυβώδες" ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, καθιστώντας δυσκολότερη την επίτευξη συμβατότητας.
- **Νέες Ασύρματες Τεχνολογίες:** Η μετάβαση σε νέα πρότυπα, όπως το 5G και το IoT (Internet of Things), έχει προσθέσει νέες συχνότητες στο φάσμα και αυξημένη ζήτηση για υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Αυτό δημιουργεί νέες προκλήσεις για την EMC, καθώς απαιτείται να λειτουργούν σωστά οι νέες συσκευές σε περιβάλλοντα με πολλές και διάφορες παρεμβολές.
- **Αντοχή σε Υψηλής Ισχύος Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία (EMP):** Σε κρίσιμες υποδομές, όπως στρατιωτικές ή αεροπορικές εγκαταστάσεις, η προστασία από ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που μπορεί να προκληθούν από φυσικά ή ανθρωπογενή γεγονότα (π.χ., ηλεκτρομαγνητικές επιθέσεις ή ηλιακές εκλάμψεις), αποτελεί ζωτικής σημασίας πρόκληση.

Οι εξελίξεις σε τεχνολογίες όπως οι ευφυείς κεραίες, η χρήση νέων υλικών με αυξημένη θωράκιση, και οι βελτιωμένες τεχνικές μέτρησης και προσομοίωσης συμβάλλουν στη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

1.7. Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα σε Ειδικά Περιβάλλοντα

Ορισμένα περιβάλλοντα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή ως προς την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, λόγω της φύσης των συσκευών που λειτουργούν σε αυτά ή των αυξημένων απαιτήσεων για ασφάλεια:

- **Νοσοκομεία:** Τα ιατρικά μηχανήματα, όπως οι μαγνητικοί τομογράφοι, οι βηματοδότες και οι ανιχνευτές ακτινοβολίας, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επιπλέον, οι νοσοκομειακές εγκαταστάσεις έχουν υψηλή πυκνότητα ηλεκτρονικών συσκευών, καθιστώντας την EMC κρίσιμη για την ασφάλεια των ασθενών.
- **Αεροδρόμια και Αεροπλάνα:** Οι αεροπορικές εγκαταστάσεις και τα αεροσκάφη λειτουργούν με ένα πλήθος ασύρματων και ηλεκτρονικών συστημάτων, καθιστώντας την EMC ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των πτήσεων. Ο

εξοπλισμός επικοινωνίας, πλοήγησης και ελέγχου πτήσης πρέπει να λειτουργεί χωρίς παρεμβολές.

- **Βιομηχανίες και Εργοστάσια:** Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, οι μηχανές υψηλής ισχύος και τα ρομποτικά συστήματα μπορεί να παράγουν ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές, επηρεάζοντας άλλα ηλεκτρονικά συστήματα. Χρειάζεται να διασφαλιστεί ότι οι μηχανές αυτές δεν προκαλούν παρεμβολές και ότι τα συστήματα είναι ανθεκτικά σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

1.8. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι ένας τομέας που αποκτά συνεχώς μεγαλύτερη σημασία καθώς η τεχνολογία προοδεύει. Η επίτευξη της απαιτεί έναν συνδυασμό τεχνικών, κανονιστικών πλαισίων και συνεχούς έρευνας για να αντιμετωπιστούν οι νέες προκλήσεις. Οι μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη πιο προηγμένων υλικών θωράκισης, τη βελτίωση των προσομοιώσεων και της ανάλυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και την ενσωμάτωση τεχνολογιών που μειώνουν τις παρεμβολές, ακόμη και σε ασύρματα δίκτυα με υψηλές απαιτήσεις. Οι προκλήσεις της EMC θα συνεχίσουν να αυξάνονται, αλλά η τεχνολογική καινοτομία θα συνεχίσει να προσφέρει λύσεις για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών σε περιβάλλοντα υψηλών απαιτήσεων [6].

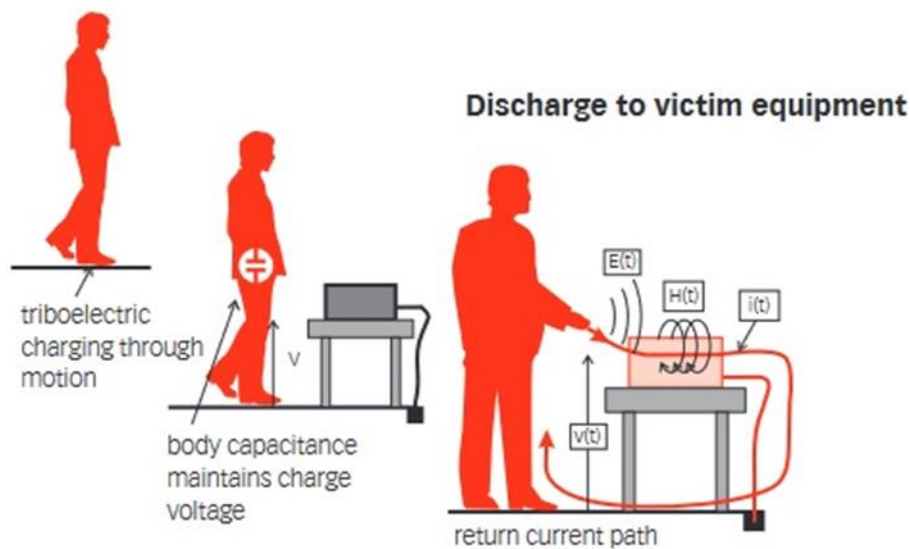
Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

2.1. Φαινόμενο και αιτίες της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η απότομη μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου ανάμεσα σε δύο σώματα με διαφορετικό δυναμικό. Όταν το στατικό ηλεκτρικό φορτίο σε ένα αντικείμενο αυξάνεται αρκετά ώστε να υπερβεί τη διηλεκτρική ισχύ του υλικού που χωρίζει δύο αντικείμενα, τότε γίνεται εκφόρτιση μέσω της διαφυγής ηλεκτρονίων από το ένα αντικείμενο στο άλλο. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες μορφές, όπως σπινθήρες ή ηλεκτρικά πεδία, και μπορεί να προκαλέσει από σφάλματα λειτουργίας μέχρι βλάβες σε ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εμφανίζεται λόγω της συσσώρευσης στατικού ηλεκτρισμού σε ένα υλικό, συνήθως από τριβή, επαφή ή διαχωρισμό δύο υλικών. Ο στατικός ηλεκτρισμός προκαλείται όταν υπάρχει ανισορροπία ηλεκτρικών φορτίων ανάμεσα σε δύο επιφάνειες. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί με φυσικές δραστηριότητες όπως το περπάτημα σε ένα χαλί ή το άγγιγμα ενός μεταλλικού αντικειμένου, ειδικά σε περιβάλλοντα χαμηλής υγρασίας, που ενισχύουν τη συσσώρευση στατικού φορτίου.

Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα φορτισμένο αντικείμενο έρθει σε επαφή με ένα άλλο, διαφορετικού δυναμικού (το δεύτερο αντικείμενο μπορεί να είναι γειωμένο, αλλά δεν είναι απαραίτητο), το φορτίο εξισώνεται μεταξύ τους και δημιουργείται μια τάση $V(t)$ και ρεύμα $i(t)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. [18]. Το πλάτος και η κυματομορφή των παροδικών αυτών μεγεθών εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού και τη συνολική εμπέδηση της διαδρομής του ρεύματος κατά την εξίσωση.



Εικόνα 2.1: Η τυπική περίπτωση προσωπικής εκφόρτισης ESD [18]

Σχετιζόμενα με την τάση $V(t)$ και το ρεύμα $i(t)$, είναι τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία $E(t)$ και $H(t)$. Αυτές οι τέσσερις παράμετροι του φαινομένου θα συζευχθούν με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που βρίσκονται στη διαδρομή του ρεύματος ή κοντά στην πηγή του πεδίου. Αυτή η σύζευξη προκαλεί επαγόμενες παροδικές τάσεις εντός των κυκλωμάτων σήματος. Συγκεκριμένα, τα ψηφιακά κυκλώματα αποκρίνονται σε αυτούς τους παλμούς σαν να ήταν κανονικά σήματα και επομένως η λειτουργία τους μπορεί διακοπεί [18].

2.1.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η διαδικασία κατά την οποία ορισμένα υλικά αποκτούν ηλεκτρικό φορτίο μέσω της τριβής μεταξύ τους. Όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή και στη συνέχεια χωρίζονται, μπορεί να μεταφερθούν ηλεκτρόνια από το ένα υλικό στο άλλο, δημιουργώντας θετικά ή αρνητικά φορτισμένα σώματα. Η ικανότητα ενός υλικού να αποκτήσει θετικό ή αρνητικό φορτίο εξαρτάται από τη χημική του σύσταση και τις ηλεκτρονικές του ιδιότητες. Ορισμένα υλικά τείνουν να χάνουν ηλεκτρόνια και να αποκτούν θετικό φορτίο, ενώ άλλα υλικά τείνουν να κερδίζουν ηλεκτρόνια και να αποκτούν αρνητικό φορτίο [10]. Τα στάδια του φαινομένου είναι τα εξής:

- **Τριβή:** Δύο υλικά τρίβονται μεταξύ τους. Τα ηλεκτρόνια στην επιφάνεια των υλικών μπορεί να μετακινηθούν από το ένα υλικό στο άλλο.

- **Μεταφορά φορτίων:** Κατά τη διάρκεια της τριβής, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που χάνει ηλεκτρόνια αποκτά θετικό φορτίο, ενώ το υλικό που κερδίζει ηλεκτρόνια αποκτά αρνητικό φορτίο.
- **Διαχωρισμός:** Όταν τα υλικά απομακρύνονται, το φορτίο παραμένει σε αυτά, και έτσι δημιουργείται διαφορά δυναμικού. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD), όταν τα φορτισμένα σώματα έρχονται σε επαφή με αγώγιμα υλικά ή γειωμένες επιφάνειες.

Κάποια παραδείγματα Τριβοηλεκτρικού Φαινομένου είναι:

- **Χτένα και μαλλιά:** Όταν χτενίζουμε τα μαλλιά μας με μια πλαστική χτένα, η χτένα μπορεί να αποκτήσει αρνητικό φορτίο καθώς κερδίζει ηλεκτρόνια από τα μαλλιά, ενώ τα μαλλιά γίνονται θετικά φορτισμένα.
- **Γόμα και χαρτί:** Η τριβή της γόμας πάνω στο χαρτί μπορεί να οδηγήσει στη μεταφορά φορτίων, με τη γόμα να φορτίζεται θετικά και το χαρτί αρνητικά.
- **Μπαλόνι και ύφασμα:** Αν τρίψουμε ένα μπαλόνι σε μάλλινο ύφασμα, το μπαλόνι μπορεί να αποκτήσει αρνητικό φορτίο και να κολλήσει σε επιφάνειες, όπως ένας τοίχος, λόγω της διαφοράς δυναμικού.

Τα υλικά κατατάσσονται σε μια τριβοηλεκτρική σειρά ανάλογα με την τάση τους να αποκτούν θετικό ή αρνητικό φορτίο κατά την τριβή. Τα υλικά στην κορυφή της σειράς (όπως το γυαλί) τείνουν να χάνουν ηλεκτρόνια και να γίνονται θετικά φορτισμένα, ενώ τα υλικά στη βάση της σειράς (όπως το πλαστικό) τείνουν να κερδίζουν ηλεκτρόνια και να γίνονται αρνητικά φορτισμένα.

Πίνακας 2.1. Τριβοηλεκτρική σειρά

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

Χαρτί	PVC
Πολυουρεθάνη	TEFLON
Βαμβάκι	Λάστιχο σιλικόνης
Ξύλο	
Ατσάλι	

Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι υπεύθυνο για πολλές καθημερινές ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά μπορεί να προκαλέσει και προβλήματα σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπως βλάβες σε ηλεκτρονικές συσκευές. Κατανοώντας το φαινόμενο, είναι δυνατόν να ληφθούν μέτρα για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, όπως η χρήση αντιστατικών υλικών και γείωσης [8]. Όσον αφορά τον άνθρωπο, φαίνεται στην Εικόνα 2.2 παρακάτω το πώς πραγματοποιείται η ηλεκτροστατική εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος, όταν αυτός κινείται πάνω σε δάπεδο [21].



Εικόνα 2.2. Η τριβή που προκύπτει όταν η σόλα των παπουτσιών έρχεται σε επαφή και χωρίζεται από το πάτωμα δημιουργεί στατική τάση.

2.1.2. Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Η ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής (ή απλά φόρτιση εξ επαγωγής) είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα αντικείμενο φορτίζεται ηλεκτρικά χωρίς να έρθει σε άμεση επαφή με ένα άλλο φορτισμένο αντικείμενο. Η φόρτιση εξ επαγωγής συμβαίνει μέσω της επιρροής ενός ηλεκτρικού πεδίου, που προκαλεί την αναδιάταξη των ηλεκτρικών φορτίων στο αντικείμενο.

Ακολουθεί μια εξήγηση της διαδικασίας:

1. **Κοντινό φορτισμένο αντικείμενο:** Ένα φορτισμένο αντικείμενο (π.χ. με θετικό ή αρνητικό φορτίο) πλησιάζει ένα ουδέτερο αντικείμενο χωρίς να το αγγίζει. Το ηλεκτρικό πεδίο του φορτισμένου αντικειμένου αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια του ουδέτερου αντικειμένου.
2. **Αναδιάταξη των φορτίων:** Το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μετατόπιση των ηλεκτρικών φορτίων μέσα στο ουδέτερο αντικείμενο. Αν, για παράδειγμα, το πλησιέστερο αντικείμενο έχει θετικό φορτίο, θα απωθήσει τα θετικά φορτία του ουδέτερου αντικειμένου προς την πλευρά του μακριά από το φορτισμένο αντικείμενο και θα έλξει τα αρνητικά φορτία προς το μέρος του.
3. **Διαχωρισμός φορτίων:** Αυτός ο διαχωρισμός των φορτίων προκαλεί μια διαφορά δυναμικού στο ουδέτερο αντικείμενο, δηλαδή, το αντικείμενο θα εμφανίζει θετικό φορτίο στη μία πλευρά και αρνητικό φορτίο στην άλλη.
4. **Γείωση και φόρτιση:** Εάν ένα καλώδιο γείωσης ή ένα αγωγίμο υλικό συνδεθεί με το ουδέτερο αντικείμενο, τα φορτία μπορούν να μετακινηθούν από ή προς τη γείωση, ανάλογα με την πολικότητα του φορτισμένου αντικειμένου. Όταν αφαιρεθεί η γείωση και απομακρυνθεί το αρχικό φορτισμένο αντικείμενο, το ουδέτερο αντικείμενο θα διατηρήσει το αντίθετο φορτίο από το αρχικό αντικείμενο.

Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η φόρτιση ενός μετάλλου όταν πλησιάζει ένα φορτισμένο αντικείμενο. Δηλαδή, αν πλησιάσουμε ένα αρνητικά φορτισμένο μπαλόνι σε μια ουδέτερη μεταλλική σφαίρα χωρίς να τα ακουμπήσουμε, τα ηλεκτρόνια της σφαίρας θα απωθηθούν μακριά από το μπαλόνι. Αν η σφαίρα γειωθεί, κάποια από τα ηλεκτρόνια θα ρεύσουν προς τη γείωση. Όταν αφαιρεθεί η γείωση και απομακρυνθεί το μπαλόνι, η σφαίρα θα παραμείνει θετικά φορτισμένη.

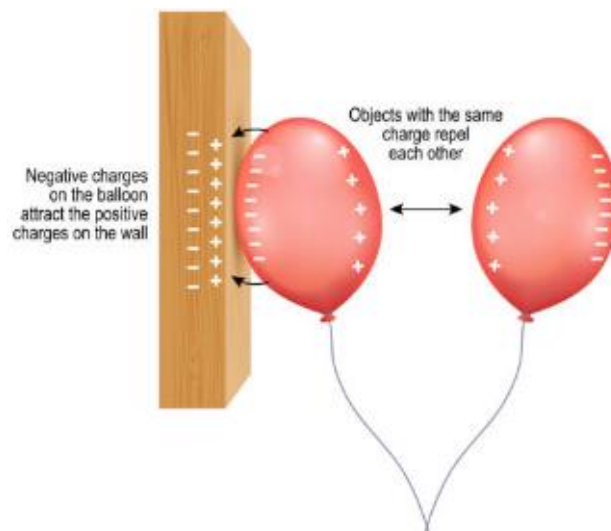
Η φόρτιση εξ επαγωγής είναι σημαντική σε πολλές εφαρμογές της φυσικής και της ηλεκτροστατικής, όπως:

- **Ηλεκτροστατικές γεννήτριες:** Συσκευές όπως ο *Γεννήτρια Van de Graaff* λειτουργούν με βάση την αρχή της επαγωγής για τη δημιουργία υψηλών τάσεων.
- **Ανίχνευση φορτίου:** Χρησιμοποιείται στην ανίχνευση ηλεκτρικών φορτίων, σε εφαρμογές όπως οι ηλεκτροσκόποι.

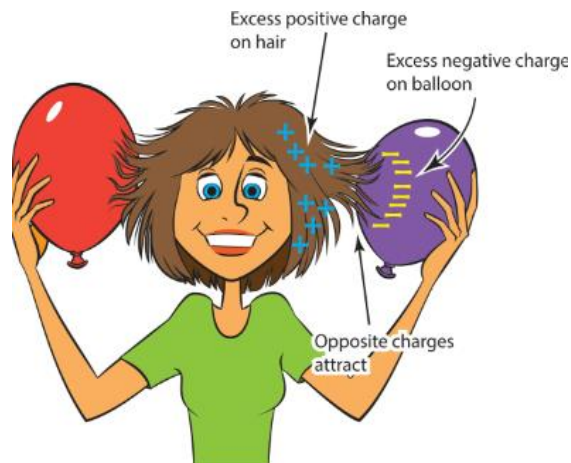
- **Ηλεκτροστατική προστασία:** Η κατανόηση του φαινομένου είναι σημαντική για την αποφυγή ακούσιας ηλεκτροστατικής φόρτισης σε ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα και συσκευές.

Η φόρτιση εξ επαγωγής είναι ένα βασικό φαινόμενο που εξηγεί πώς μπορούν να δημιουργηθούν ηλεκτρικά φορτία σε αντικείμενα χωρίς άμεση επαφή, απλώς μέσω της επίδρασης ενός ηλεκτρικού πεδίου [9].

Τα παραπάνω παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα στην Εικόνα 2.3 απεικονίζεται το γεγονός ότι επιφάνειες με ίδιο φορτίο απωθούν η μια την άλλη, ενώ με ίδιο φορτίο έλκονται [22]. Στην Εικόνα 2.4, ο στατικός ηλεκτρισμός μεταξύ μπαλονιού και μαλλιών που προκαλείται όταν έχουν αντίθετα φορτία [23] και στην Εικόνα 2.5, μια απλουστευμένη παρουσίαση φόρτισης εξ επαγωγής, μεταξύ ανθρώπου και πόρτας την οποία πρόκειται να ανοίξει [24].



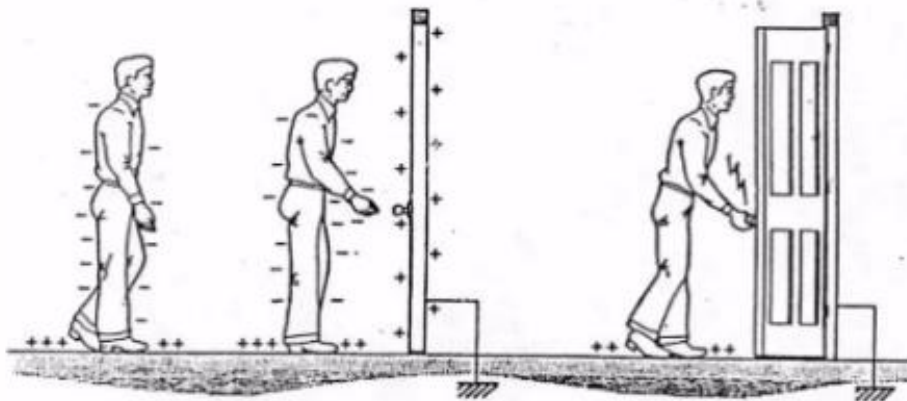
Εικόνα 2.3. Επαφή μεταξύ επιφανειών με ίδιο φορτίο απωθούν το ένα το άλλο, ενώ με ίδιο φορτίο έλκονται.



Εικόνα 2.4. Στατικός ηλεκτρισμός μεταξύ μπαλονιού και μαλλιών δημιουργείται όταν έχουν αντίθετα φορτία

Frictional charging

Electrostatic discharge



Εικόνα 2.5. Εποπτική απλουστευμένη παρουσίαση φόρτισης εξ επαγωγής

2.2. Επιπτώσεις των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στις ηλεκτρονικές συσκευές

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD), ή αλλιώς ηλεκτροστατικό σοκ, αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για τις ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες σε κυκλώματα και εξαρτήματα. Παρακάτω αναλύονται οι επιπτώσεις της ESD σε ηλεκτρονικές συσκευές, οι μηχανισμοί βλαβών, και τα μέτρα πρόληψης. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση συμβαίνει όταν υπάρχει ξαφνική ροή ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε δύο αντικείμενα με διαφορετικό δυναμικό, προκαλώντας βλάβες με τους εξής μηχανισμούς:

- **Θερμικές Βλάβες:** Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να δημιουργήσει υψηλές θερμοκρασίες σε μικροσκοπικά σημεία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων,

προκαλώντας τήξη ή εξάχνωση υλικών, όπως λεπτών μεταλλικών διαδρομών, και καταστρέφοντας τις λειτουργίες τους.

- **Διακοπή Μόνωσης:** Η μεγάλη τάση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορεί να διαπεράσει τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την προστασία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, προκαλώντας ρήξεις και διάτρηση της μόνωσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκυκλώματα.
- **Καταστροφή Διόδων και Τρανζίστορ:** Τα ευαίσθητα στοιχεία, όπως οι διόδοι, τα τρανζίστορ και άλλα ημιαγωγικά εξαρτήματα, είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, καθώς η υπερβολική τάση μπορεί να υπερβεί τα όρια ανοχής τους, οδηγώντας σε βλάβες ή μόνιμες καταστροφές.
- **Μόνιμη Αποτυχία:** Σε ορισμένες περιπτώσεις, η βλάβη λόγω ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι μόνιμη και αμέσως ανιχνεύσιμη. Για παράδειγμα, ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που έχει καταστραφεί μπορεί να σταματήσει να λειτουργεί αμέσως.
- **Λανθάνουσες Βλάβες:** Μερικές φορές η ζημιά δεν οδηγεί σε άμεση αποτυχία, αλλά μπορεί να προκαλέσει λανθάνουσες βλάβες, οι οποίες καθιστούν το εξάρτημα ευπαθές σε μελλοντική αποτυχία, ακόμα και μετά από κανονική χρήση για κάποιο διάστημα.

Διάφοροι τομείς ηλεκτρονικών συσκευών στις οποίες παρατηρούνται συχνά επιπτώσεις είναι οι εξής:

- **Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (ICs):** Τα ICs είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση λόγω της μικρής κλίμακας των τρανζίστορ που περιέχουν. Η παραμικρή ζημιά μπορεί να διακόψει τη λειτουργία τους ή να προκαλέσει ανεπιθύμητα σήματα.
- **Μνήμες και Μικροεπεξεργαστές:** Οι μνήμες RAM και οι μικροεπεξεργαστές είναι εξαιρετικά ευάλωτοι, καθώς τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αυτών των συσκευών λειτουργούν με πολύ χαμηλή τάση και αντέχουν πολύ περιορισμένα επίπεδα ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- **Ημιαγωγοί Ισχύος:** Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ισχύος, όπως οι τρανζίστορ MOSFET και IGBT, μπορούν να καταστραφούν από την υψηλή τάση και τη θερμότητα που δημιουργείται λόγω ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

- **Αισθητήρες:** Αισθητήρες που περιέχουν ημιαγωγούς, όπως φωτοδιόδους ή συσκευές MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), μπορεί να σταματήσουν να λειτουργούν ή να χάσουν ακρίβεια.

Συμπερασματικά, οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα για τις ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς μπορεί να προκαλέσει από λανθάνουσες βλάβες έως άμεση καταστροφή των εξαρτημάτων. Η χρήση κατάλληλων προστατευτικών μέτρων, όπως υλικά αντιστατικά, προστατευτικά κυκλώματα, και γείωση, είναι απαραίτητη για την αποφυγή τέτοιων βλαβών.

2.3. Πρακτικές πτυχές της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: μέθοδοι προστασίας

Οι πρακτικές στρατηγικές για την προστασία των συσκευών από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση περιλαμβάνουν πολλές μεθόδους και τεχνικές που εφαρμόζονται τόσο στο επίπεδο του σχεδιασμού συσκευών όσο και στις διαδικασίες παραγωγής και χρήσης.

2.3.1. Γείωση (Grounding)

Η γείωση είναι ένας από τους βασικότερους τρόπους αποφυγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Η συσσώρευση στατικού φορτίου αποφεύγεται καθώς τα φορτία εκτρέπονται προς το έδαφος μέσω γειωμένων καλωδίων και αγωγών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με γείωση εξοπλισμού, δηλαδή με σύνδεση κάθε μεταλλικής επιφάνειας ή ηλεκτρονικού συστήματος με το έδαφος μέσω γειωτικών καλωδίων ή πινάκων, είτε με γείωση χειριστών, δηλαδή οι χειριστές θα πρέπει να φορούν γειωτικά λουριά ή παπούτσια που διασφαλίζουν τη συνεχή αποβολή του στατικού φορτίου.

2.3.2. Προστατευτικά Υλικά

Ορισμένα υλικά μπορούν να αποτρέψουν ή να μειώσουν τη συσσώρευση στατικού φορτίου. Τέτοιου είδους υλικά μπορεί να ανήκουν στη κατηγορία των αγωγών και ημιαγωγών, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικά αγωγή υλικά σε πλακέτες και καλώδια που διευκολύνουν τη διοχέτευση φορτίων. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντιστατικά υλικά, από τα οποία θα είναι φτιαγμένες οι επιφάνειες σε περιβάλλοντα που απαιτούν αποφυγή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (π.χ., συσκευές, πλαστικά καλύμματα).

2.3.3. Εκφορτιστές (Discharge Devices)

Ειδικά εργαλεία ή συσκευές όπως ζώνες γείωσης και αντιστατικά χαλιά χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν ότι το στατικό φορτίο διαχέεται χωρίς να προκαλεί ζημιές. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, χρησιμοποιούνται εκφορτιστές υψηλής ακρίβειας που αποτρέπουν τις βλάβες στα κυκλώματα.

2.3.4. Προστατευτικά Κυκλώματα

Η ενσωμάτωση προστατευτικών κυκλωμάτων σε ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές είναι μια από τις πιο κοινές τεχνικές προστασίας από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Αυτά περιλαμβάνουν διόδους προστασίας (ESD diodes) και Θωράκιση (Shielding). Οι διόδοι προστασίας είναι ειδικές διόδοι που προστατεύουν τα κυκλώματα εκτρέποντας την τάση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ασφαλή επίπεδα και θωράκιση είναι η χρήση μεταλλικών περιβλημάτων ή θωρακισμένων καλωδίων η οποία μειώνει την πιθανότητα εκπομπής ή εισόδου στατικών φορτίων.

2.3.5. Έλεγχος Υγρασίας Περιβάλλοντος

Η υγρασία μειώνει την πιθανότητα συσσώρευσης στατικού φορτίου, καθώς το φορτίο διαχέεται μέσω του αέρα. Σε περιβάλλοντα με χαμηλή υγρασία, οι πιθανότητες ESD αυξάνονται. Σε βιομηχανικούς χώρους, συχνά ελέγχεται η υγρασία για να διατηρείται σε επίπεδα που μειώνουν τον κίνδυνο ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

2.4. Δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

Οι δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD immunity tests) πραγματοποιούνται για να αξιολογηθεί η ανθεκτικότητα ηλεκτρονικών συσκευών σε εκφορτίσεις που προέρχονται από συσσώρευση ηλεκτροστατικού φορτίου. Αυτές οι δοκιμές είναι σημαντικές για τη συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα και για την αποφυγή αστοχιών κατά τη λειτουργία. Ο εξοπλισμός των δοκιμών περιλαμβάνει γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD Guns) οι οποίες προσομοιώνουν τις εκφορτίσεις και μπορούν να λειτουργήσουν σε λειτουργία επαφής ή αέρος, καθώς και μετρητές κυματομορφών, οι οποίοι ελέγχουν τα χαρακτηριστικά της εκφόρτισης (ρεύμα, τάση).

Οι δοκιμές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων πραγματοποιούνται σε ελεγχόμενα εργαστηριακά περιβάλλοντα για την εξασφάλιση της επαναληψιμότητας και ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Το περιβάλλον περιλαμβάνει αγωγίμες επιφάνειες, όπως

οριζόντια (HCP) και κάθετα επίπεδα σύζευξης (VCP), για προσομοίωση πραγματικών συνθηκών και ελεγχόμενη θερμοκρασία και υγρασία για να αποφευχθούν αποκλίσεις.

Παρακάτω περιγράφονται οι πιο κοινές μέθοδοι δοκιμών:

- **Δοκιμή Επαφής (Contact Discharge Test)**

Η δοκιμή επαφής προσομοιώνει την άμεση εκφόρτιση μέσω ενός αγωγίμου αντικειμένου που έρχεται σε επαφή με τη συσκευή. Αρχικά, τοποθετείται η συσκευή υπό δοκιμή (DUT) στο κατάλληλο περιβάλλον. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται εκφόρτιση μέσω του της γεννήτριας σε αγωγίμες επιφάνειες της συσκευής και καταγράφεται η επίδοση της συσκευής (π.χ., απώλειες λειτουργίας, βλάβες). Αυτές οι δοκιμές πραγματοποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2, δηλαδή τα επίπεδα τάσης είναι από 2 kV έως 8 kV, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε Προτύπου Προϊόντος, και ο ρυθμός εφαρμογής της δοκιμής είναι 10 εκφορτίσεις ανά σημείο με χρονικό διάστημα ανάμεσα στις επαναλήψεις το 1s.

- **Δοκιμή Εκφόρτισης Αέρα (Air Discharge Test)**

Η δοκιμή εκφόρτισης αέρα προσομοιώνει εκφορτίσεις μέσω του αέρα, όταν ένα αντικείμενο δεν έρχεται απευθείας σε επαφή με τη συσκευή. Το πιστόλι ESD πλησιάζει την επιφάνεια της συσκευής υπό δοκιμή μέχρι να πραγματοποιηθεί εκφόρτιση και στη συνέχεια καταγράφονται οι αντιδράσεις της συσκευής. Αυτές οι δοκιμές γίνονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-2, δηλαδή τα επίπεδα τάσης είναι από 2 kV έως 15 kV και επηρεάζεται από παράγοντες όπως υγρασία και θερμοκρασία.

- **Δοκιμή έμμεσων εκφορτίσεων σε επίπεδα σύζευξης**

Η δοκιμή έμμεσων εκφορτίσεων εξετάζει την επαγωγική εκφόρτιση μέσω αγωγίμων επιφανειών. Η συσκευή τοποθετείται κοντά σε αγωγίμες επιφάνειες (π.χ., τραπέζια, καλύμματα) και εφαρμόζονται εκφορτίσεις στις επιφάνειες και παρακολουθείται η συμπεριφορά της συσκευής.

Οι αντιδράσεις της συσκευής στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση καταγράφονται και κατηγοριοποιούνται στα παρακάτω επίπεδα:

- **Επίπεδο 1:** Καμία επίδραση στη λειτουργία.
- **Επίπεδο 2:** Προσωρινή απώλεια λειτουργίας, αλλά ανάκτηση χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

- **Επίπεδο 3:** Προσωρινή απώλεια λειτουργίας που απαιτεί παρέμβαση (π.χ., επανεκκίνηση).
- **Επίπεδο 4:** Μόνιμη βλάβη στη συσκευή.

2.5. Κανονιστικές απαιτήσεις για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

Κάποια από τα διεθνή Πρότυπα που αναφέρονται στο φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και καθορίζουν δοκιμές και μετρήσεις είτε σε επίπεδο συστήματος είτε σε επίπεδο κατασκευαστικών στοιχείων, ή ακόμα και σε χώρους είναι:

- **IEC 61000-4-2:** Το πρότυπο IEC 61000-4-2 καθορίζει τις απαιτήσεις και τις μεθόδους δοκιμών για ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτρονικές συσκευές. Αυτό το πρότυπο περιλαμβάνει τις διαδικασίες για την προσομοίωση εκφορτίσεων και καθορίζει τα επίπεδα έντασης των δοκιμών.
- **ANSI/ESD S20.20:** Το ANSI/ESD S20.20 είναι το αμερικανικό πρότυπο που καθορίζει τις απαιτήσεις για τη διαχείριση των κινδύνων από την ESD σε περιβάλλοντα παραγωγής. Εφαρμόζεται κυρίως σε χώρους παραγωγής ηλεκτρονικών ειδών και εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με τις διαδικασίες ασφαλείας.
- **JESD22-A114:** Τα πρότυπα της JEDEC αφορούν εφαρμογές μικροηλεκτρονικής (τόσο από την πλευρά των κατασκευαστών όσων και των χρηστών). Το πρότυπο JESD22-A114 καθορίζει τις απαιτήσεις για δοκιμές HBM σε ημιαγωγούς. Χρησιμοποιείται για την προστασία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων από καταστροφικές εκφορτίσεις κατά τη διάρκεια της παραγωγής ή της χρήσης [7].

Συμπερασματικά, η προστασία από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία και τη μακροχρόνια λειτουργικότητα των ηλεκτρονικών συσκευών. Οι θεωρητικές αρχές της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι μέθοδοι προστασίας και οι διαδικασίες δοκιμών, μαζί με την συμμόρφωση με τα κανονιστικά πρότυπα, διασφαλίζουν ότι οι συσκευές είναι ανθεκτικές και λειτουργούν ομαλά ακόμα και σε περιβάλλοντα με αυξημένη πιθανότητα εκφόρτισης.

Κεφάλαιο 3: Πρότυπο διεξαγωγής δοκιμών ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (IEC 61000-4-2)

3.1. Πρότυπο διεξαγωγής ατρωσίας

3.1.1. Αντικείμενο του Προτύπου IEC 61000-4-2

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 προδιαγράφει τις απαιτήσεις ατρωσίας και τις μεθόδους ελέγχων για ηλεκτρονικό εξοπλισμό που υπόκειται σε δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, είτε υπό τη μορφή άμεσων εκφορτίσεων είτε έμμεσων. Προσδιορίζει επιπρόσθετα επίπεδα ελέγχων που σχετίζονται με τις διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και τις συνθήκες εγκατάστασης και προσδιορίζει τις διαδικασίες δοκιμής. Αντικείμενο αυτού του Προτύπου είναι η δημιουργία μιας κοινής και αναπαραγώγιμης βάσης για την αξιολόγηση της απόδοσης του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού όταν υποβάλλεται σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Σε αυτές, περιλαμβάνονται και οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις που μπορεί να προκύψουν από ένα άτομο προς άλλα αντικείμενα κοντά στον εξοπλισμό.

Πιο συγκεκριμένα, το IEC 61000-4-2 καλύπτει δύο πτυχές της ESD σε επίπεδο δοκιμών συστήματος. Η πρώτη είναι η διαδικασία δοκιμής, η οποία καθορίζει μια ESD εκφόρτιση γεννήτριας είτε στον υπό δοκιμή εξοπλισμό (άμεση εκκένωση) ή σε κοντινή επιφάνεια (έμμεση εκκένωση) και η δεύτερη είναι η διαδικασία βαθμονόμησης και οι παράμετροι κυματομορφής για τη γεννήτρια ESD που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η νέα έκδοση του Προτύπου περιλαμβάνει αλλαγές σχετικά με τις δύο αυτές πτυχές [19].

Το Πρότυπο καθορίζει:

- την ονομαστική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης.
- τα επίπεδα δοκιμής
- τον εξοπλισμό δοκιμών
- τη διάταξη δοκιμών.
- τη διαδικασία δοκιμών
- τη διαδικασία διακρίβωσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης
- την αβεβαιότητα των μετρήσεων

Σκοπός του Προτύπου αυτού δεν είναι να περιορίσει την εφαρμογή των δοκιμών αυτών σε συγκεκριμένες συσκευές ή συστήματα. Ο κύριος στόχος του είναι ο καθορισμός μιας αναφοράς για τη διευκόλυνση των αρμόδιων Επιτροπών Προϊόντων (Product Committees). Οι Επιτροπές Προϊόντων, καθώς και οι χρήστες και οι κατασκευαστές εξοπλισμού, παραμένουν υπεύθυνοι για την κατάλληλη επιλογή του είδους δοκιμής και το επίπεδο των δοκιμών που θα επιλέξουν να εφαρμοστεί σε αυτές. Αυτό το Πρότυπο σχετίζεται με εξοπλισμό, συστήματα, υποσυστήματα και περιφερειακά που δύναται να υποστούν ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, οι οποίες μπορεί να οφείλονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις συνθήκες εγκατάστασης, όπως χαμηλή σχετική υγρασία, χρήση χαλιών χαμηλής αγωγιμότητας (τεχνητές ίνες), ενδύματα βινυλίου κ.λπ..

Από τεχνικής άποψης, ο ακριβής όρος για το φαινόμενο θα ήταν εκφόρτιση στατικού ηλεκτρισμού. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις κατηγοριοποιούνται σε άμεσες εκφορτίσεις και έμμεσες εκφορτίσεις. Επιπλέον, οι άμεσες εκφορτίσεις κατηγοριοποιούνται σε εκφορτίσεις επαφής και εκφορτίσεις αέρα.

Σχετικά με τις έμμεσες εκκενώσεις επαφής, εκκενώσεις σε αντικείμενα που είναι τοποθετημένα ή εγκατεστημένα κοντά στο δοκίμιο προσομοιώνονται με εφαρμογή των εκκενώσεων επαφής της γεννήτριας ESD στο οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο σύζευξης[16].

Σημαντικός παράγοντας στις δοκιμές εκφόρτισης μέσω αέρα αποτελεί η υγρασία, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των υδρατμών στον αέρα, τόσο πιο εύκολο γίνεται να ξεκινήσει μια εκκένωση και τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση εκφόρτισης. Η υψηλότερη υγρασία δίνει χαμηλότερα ρεύματα εκφόρτισης και πιο αργούς χρόνους ανόδου, λόγω της υψηλότερης αντίστασης τόξου. Αν και η εκφόρτιση ESD που προκαλείται από ένα φορτισμένο ανθρώπινο σώμα είναι μόνο εκφόρτιση μέσω αέρα, έχει παρατηρηθεί ότι είναι αδύνατο να επιτευχθεί αναπαραγωγιμότητα της εκκένωσης που συνοδεύεται από το φαινόμενο διηλεκτρικής διάσπασης του αέρα, ακόμη και αν ελέγχονται προσεκτικά διάφορες συνθήκες του περιβάλλοντος και της γεννήτριας ESD. Για αυτόν τον λόγο η εκφόρτιση επαφής δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από άποψη αναπαραγωγιμότητας [17].

3.1.2 Επίπεδα δοκιμών

Η εκφόρτιση επαφής είναι η προτιμώμενη μέθοδος δοκιμής και οι εκφορτίσεις αέρα πρέπει να χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που η μέθοδος επαφής δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Το προτεινόμενο εύρος επιπέδων δοκιμής και οι τάσεις που αντιστοιχούν για τη δοκιμή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Προτεινόμενα επίπεδα δοκιμών

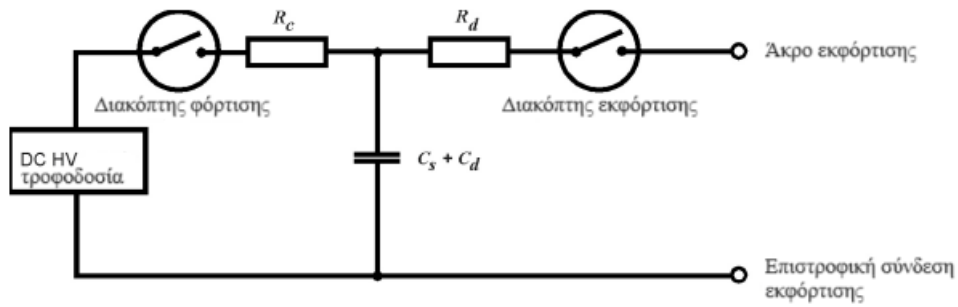
Επίπεδο	Επίπεδο τάσης	
	Εκφόρτιση επαφής	Εκφόρτιση αέρα
1	2 kV	2 kV
2	4 kV	4 kV
3	6 kV	6 kV
4	8 kV	8 kV
X ^a	Ειδικό	Ειδικό

^a: το x μπορεί να είναι οποιοδήποτε επίπεδο, υψηλότερο ή χαμηλότερο ή ενδιάμεσο. Το επίπεδο θα προσδιορίζεται στις αποκλειστικές προδιαγραφές του εξοπλισμού. Εάν αναφέρονται υψηλότερες τάσεις από αυτές που παρουσιάζονται εδώ, μπορεί να χρειαστεί ειδικός εξοπλισμός δοκιμής.

Οι τάσεις που περιέχει ο πίνακας αυτός είναι διαφορετικές για κάθε μέθοδο, λόγω των διαφορετικών μεθόδων δοκιμής. Για τη δοκιμή εκφόρτισης αέρα, η δοκιμή πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα επίπεδα δοκιμής του πίνακα 1, συμπεριλαμβανομένου του καθορισμένου επιπέδου δοκιμής. Για τη δοκιμή εκφόρτισης επαφής, η δοκιμή εφαρμόζεται στο καθορισμένο επίπεδο δοκιμής μόνο, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά από τις Επιτροπές Προϊόντων.

3.1.3 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [3].

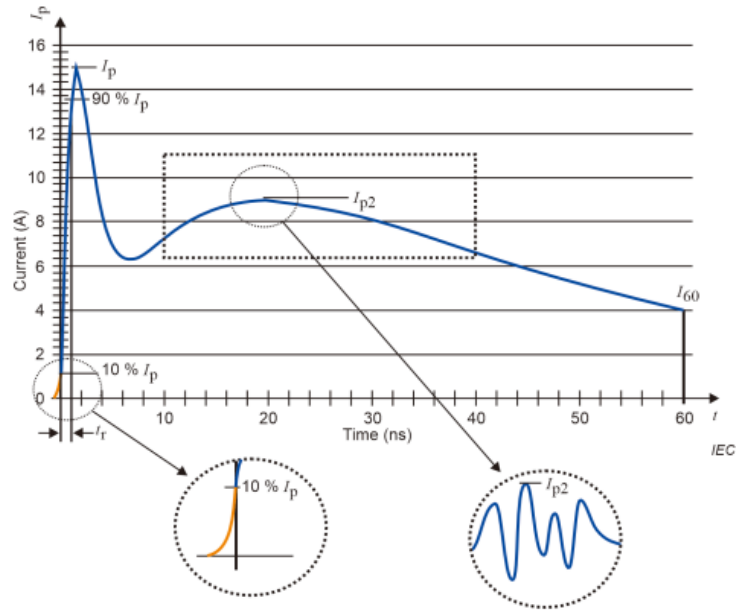


Εικόνα 3.5. Διάγραμμα γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η γεννήτρια δοκιμών αποτελείται, στα κύρια μέρη της, από

- την αντίσταση φόρτισης R_c
- τον πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας C_s
- την κατανεμημένη χωρητικότητα C_d
- την αντίσταση εκφόρτισης R_d
- τον διακόπτη εκφόρτισης
- τον διακόπτη φόρτισης
- τα εναλλάξιμα άκρα εκφόρτισης (βλέπε Εικόνα 3.3 και Εικόνα 3.4).
- το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης
- το τροφοδοτικό

Η C_d είναι μια κατανεμημένη χωρητικότητα που υπάρχει μεταξύ της γεννήτριας και του περιβάλλοντα χώρου. Ο συνδυασμός $C_s + C_d$ έχει τυπική τιμή 150pF και το R_d έχει τυπική τιμή 330Ω. Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας πρέπει να έχει τη παρακάτω μορφή [3]:



Εικόνα 3.6. Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας

Η συνάρτηση από την οποία προκύπτει η κυματομορφή της εικόνας 2.6. είναι η εξής:

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

Όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n \tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right) \quad (2)$$

$$k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n \tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right) \quad (3)$$

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), $n = 1,8$

Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 3.2. Γενικές προδιαγραφές παραμέτρων

Παράμετροι	Τιμές
Τάση εξόδου, λειτουργία εκφόρτισης επαφής	Από 1 kV έως 8 kV, ονομαστική
Τάση εξόδου, λειτουργία εκφόρτισης αέρα	Από 2 kV έως 15 kV, ονομαστική
Ανοχή τάσης εξόδου	±5%
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετικό και αρνητικό
Χρόνος διατήρησης	≥5 s
Λειτουργία εκφόρτισης	Μονές εκφορτίσεις

Πίνακας 3.3. Ιδανικές τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης

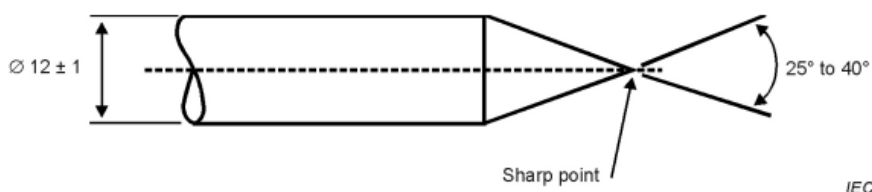
Επίπεδο		Τάση	I_p (±15%)	t_r (±25%)	I_{p2} (±30%)	I_{30ns} (±30%)	I_{60ns} (±30%)
CD	AD	[kV]	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
1	1	2	7.5	0.8	4.5	4.0	2.0
2	2	4	15.0	0.8	9.0	8.0	4.0
3	-	6	22.5	0.8	13.5	12.0	6.0
4	3	8	30.0	0.8	18.0	16.0	8.0
-	4	15	56.3	0.8	33.8	30.0	15.0
Το σημείο αναφοράς για τη μέτρηση του χρόνου για το ρεύμα στα 30ns και 60ns είναι η στιγμή που το ρεύμα φτάνει πρώτα το 10 % της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.							

Η γεννήτρια θα πρέπει να διαθέτει μέσα αποτροπής ακούσιων εκπομπών ακτινοβολίας ή εκπομπών, είτε παλμικού είτε συνεχούς τύπου, ώστε να μην διαταράσσεται το δοκίμιο ή ο βοηθητικός εξοπλισμός δοκιμής από παρασιτικές επιδράσεις. Το καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης της δοκιμαστικής γεννήτριας πρέπει να έχει μήκος τουλάχιστον 2 m και να είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να επιτρέπει στη γεννήτρια να πληροί τις προδιαγραφές. Σε περιπτώσεις όπου το μήκος 2 m του καλωδίου επιστροφής εκφόρτισης είναι ανεπαρκές (π.χ. για ψηλά EUT), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μακρύτερο καλώδιο (π.χ. 3 m). Το μήκος του καλωδίου επιστροφής εκφόρτισης μετράται από το σώμα της γεννήτριας ESD μέχρι το άκρο του σημείου σύνδεσης. Πρέπει να είναι επαρκώς μονωμένο ώστε να αποτρέπεται η ροή του ρεύματος εκφόρτισης στο προσωπικό ή σε αγωγίμες επιφάνειες εκτός από την απόληξή του, κατά τη δοκιμή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το καλώδιο αυτό που

χρησιμοποιείται για τη δοκιμή πρέπει να είναι το ίδιο καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διακρίβωση.

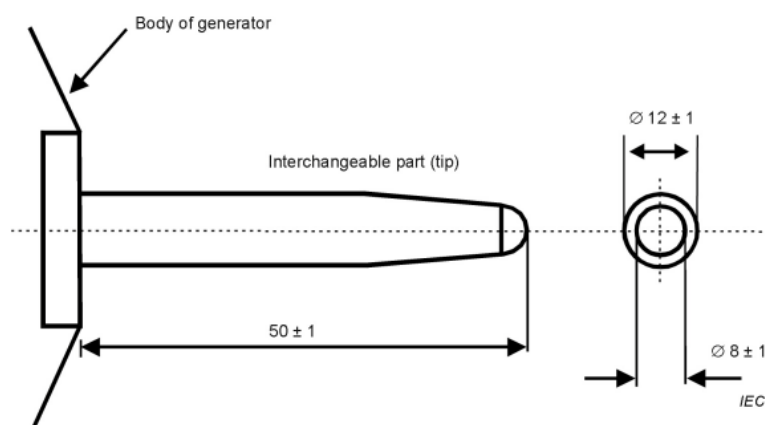
3.1.4. Χαρακτηριστικά των άκρων εκφόρτισης

Υπάρχουν 2 είδη άκρων εκφόρτισης που προσαρμόζονται στις γεννήτριες. Το άκρο εκφόρτισης επαφής θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με την Εικόνα 3.7. [3]. Το άκρο εκφόρτισης με τις διαστάσεις της Εικόνας 3.7 μπορεί να έχει μονωτική επίστρωση υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι προδιαγραφές της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης.



Εικόνα 3.7. Άκρο εκφόρτισης επαφής της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Το άκρο εκφόρτισης αέρα θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με την Εικόνα 3.8 [3]. Το άκρο εκφόρτισης με τις διαστάσεις της Εικόνας 3.8 μπορεί επίσης να έχει μονωτική επίστρωση υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι προδιαγραφές της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης.



Εικόνα 3.8. Άκρο εκφόρτισης αέρα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Ο νόμος του Paschen είναι γνωστός ως η σχέση μεταξύ της τάσης φόρτισης και της αρχικής απόστασης στην οποία ξεκινά μια εκφόρτιση λόγω της διηλεκτρικής διάσπασης του αέρα. Αυτός ο νόμος μπορεί να προσαρμοστεί υπό στατικές συνθήκες

χρησιμοποιώντας μεγάλο σφαιρικό άκρο του οποίου οι επιφανειακές συνθήκες διατηρούν μια σταθερή κατάσταση. Για ένα φορτισμένο ανθρώπινο σώμα που πλησιάζει ένα άλλο σώμα, η απόσταση εκφόρτισης είναι μικρότερη από την απόσταση εκφόρτισης σύμφωνα με το νόμο του Paschen λόγω της καθυστέρησης της έναρξης του σπινθήρα. Επιπλέον, όταν ένα αντικείμενο είναι αιχμηρό ή έχει μια τραχιά επιφάνεια, η απόσταση εκφόρτισης είναι μεγαλύτερη λόγω της υψηλότερης πυκνότητας φορτίου που προκαλεί ευκολότερη διάσπαση του αέρα. Εάν η επιφάνεια του σώματος έχει φίλμ λαδιού, η εκφόρτιση είναι δύσκολη και η απόσταση εκφόρτισης μειώνεται. Ο σπινθήρας που προκαλείται από τη διηλεκτρική διάσπαση του αέρα είναι μια αντίσταση σπινθήρα που ποικίλλει με το χρόνο ανάλογα με την απόσταση εκφόρτισης και η τιμή του είναι αντιπροσωπευτική του νόμου αντίστασης σπινθήρα του Rompe-Weizel.

$$r(t) = \frac{\delta}{\sqrt{\frac{2\alpha}{\rho} \int_{-\infty}^t i^2(t') dt'}} \quad (4)$$

$\alpha \cong 1,1 \times 10^{-4} \text{ atm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{V}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

ρ : Air pressure (atm)

δ : Discharge distance (m)

Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση στον σπινθήρα επηρεάζει σημαντικά την πρώτη κορυφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το ρεύμα αιχμής γίνεται μεγάλο και ο χρόνος ανόδου γίνεται γρήγορος εάν η απόσταση εκφόρτισης είναι μικρή. Καθώς η απόσταση εκφόρτισης αυξάνεται, το ρεύμα αιχμής μειώνεται και ο χρόνος ανόδου επίσης μειώνεται, επομένως δεν υπάρχει ένα πρώτο ρεύμα αιχμής ως αποτέλεσμα. Σε τάσεις εκφόρτισης αρκετών kV ή μικρότερες, επιτυγχάνεται ρεύμα αιχμής μεγαλύτερο από την εκφόρτιση επαφής και χρόνος ταχείας ανόδου. Σε τάση 5 kV έως 8 kV ή περισσότερο, ο χρόνος ανόδου γίνεται πιο αργός και το ρεύμα αιχμής μειώνεται. Ένας μακρύς και φωτεινός σπινθήρας θα εμφανιστεί σε υψηλότερες τάσεις, ωστόσο το ρεύμα εκφόρτισης και ο χρόνος ανόδου δεν γίνονται σοβαρό φαινόμενο ανάλογο με την εφαρμοζόμενη τάση.

Οι παράγοντες που μεταβάλλουν το ρεύμα εκφόρτισης αέρα περιλαμβάνουν την τάση φόρτισης, την ταχύτητα προσέγγισης, τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, το σχήμα και την κατάσταση της επιφάνειας του άκρου

εκφόρτισης και τα χαρακτηριστικά του δοκιμίου , που επηρεάζουν την απόσταση εκφόρτισης. Συγκεκριμένα, το ρεύμα αιχμής και ο χρόνος ανόδου της πρώτης κορυφής θα αλλάξουν. Με την αλλαγή των συνθηκών αυτών των παραγόντων, είναι δυνατός ο έλεγχος του ρεύματος εκφόρτισης, αλλά θα εξακολουθεί να είναι μεταβλητό. Αν και η διακύμανση μειώνεται ανάλογα με την κατάσταση, συμβαίνουν επίσης απρόβλεπτες διακυμάνσεις και είναι αδύνατο να ελεγχθεί το ρεύμα εκφόρτισης με ακρίβεια σε αρκετές δεκάδες τοις εκατό.

3.1.5. Διακρίβωση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας πρέπει να διακρίβώνονται προκειμένου να διαπιστωθεί ότι πληρούν τις απαιτήσεις αυτού του προτύπου. Η γεννήτρια συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων άκρων εκφόρτισης (αέρος και επαφής) πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές που δίνονται στον Πίνακα 3.2. και στον Πίνακα 3.3. Τα επαναλήψιμα και αναπαραγώγιμα αποτελέσματα μίας δοκιμής ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αποτελούν σημαντικές παραμέτρους της δοκιμής. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν πρόκειται να διεξαχθούν δοκιμές με χρήση γεννητριών διαφορετικών κατασκευαστών ή όταν οι δοκιμές αναμένεται να παραταθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Είναι σημαντικό η επαναληψιμότητα να αποτελεί κινητήριο παράγοντα στην αξιολόγηση. Η γεννήτρια διακρίβώνεται σε συγκεκριμένα καθορισμένα χρονικά διαστήματα, ενώ ο τρόπος τροφοδότησης της γεννήτριας (από το AC δίκτυο μέσω τροφοδοτικού ή από μπαταρία) θα πρέπει να είναι ο ίδιος και κατά τη διεξαγωγή της διακρίβωσης αλλά και της δοκιμής.

Απαιτείται ο ακόλουθος εξοπλισμός για τη διακρίβωση γεννητριών ESD:

- Παλμογράφος με εύρος ζώνης ≥ 2 GHz και ρυθμό δειγματοληψίας ≥ 8 GS/s.
- Ομοαξονικό ρεύμα στόχος-εξασθενητής-αλυσίδα καλωδίου.
- Βολτόμετρο υψηλής τάσης με μετρητική ικανότητα τουλάχιστον 15 kV. Για τη διακρίβωση της τάσης εξόδου συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης υψηλής τάσης με αντίσταση συνδεδεμένο σε ένα βολτόμετρο. Η συνολική ακρίβεια του διαιρέτη υψηλής τάσης συμπεριλαμβανομένου του βολτόμετρου πρέπει να είναι ± 1 % της ένδειξης. Η ελάχιστη αντίσταση εισόδου του διαιρέτη υψηλής τάσης εξαρτάται από το μοντέλο της γεννήτριας και καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ηλεκτροστατικό βολτόμετρο με την ίδια ακρίβεια.

- Κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης με τον στόχο ομοαξονικού ρεύματος τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει απόσταση τουλάχιστον 0,6 m από το στόχο σε οποιοδήποτε άκρο του επιπέδου.
- Επίπεδο αναφοράς γης (Reference Ground Plane-RGP) και πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το τραβηγμένο καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης να είναι πλήρως καλυμμένο
- Εξασθενητής με επαρκή ικανότητα ισχύος.

Ο στόχος ρεύματος (Pellegrini target) τοποθετείται στο κέντρο του κατακόρυφου επιπέδου διακρίβωσης. Η σύνδεση για το καλώδιο επιστροφής ρεύματος πρέπει να πραγματοποιείται 0,5m κάτω από τον στόχο στο κέντρο της επιφάνειας. Το καλώδιο επιστροφής ρεύματος πρέπει να τραβιέται προς τα πίσω στη μέση του καλωδίου, σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο. Δεν επιτρέπεται να αφήνεται το καλώδιο να βρίσκεται στο πάτωμα κατά τη διακρίβωση. Κατά τη διακρίβωση, το καλώδιο επιστροφής δεν πρέπει να συγκρατείται από τους χειριστές. Το RGP πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το τραβηγμένο καλώδιο επιστροφής να καλύπτεται πλήρως. Το τροφοδοτικό της γεννήτριας τοποθετείται στο RGP. Κανένα αντικείμενο δεν πρέπει να τοποθετείται εντός των ελάχιστων διαστάσεων της διάταξης διακρίβωσης.

Χρειάζεται να ακολουθήσει κάποιος τα βήματα που δίνονται παρακάτω για να επαληθεύσει εάν η τρέχουσα κυματομορφή μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι εντός των προδιαγραφών. Στη συνέχεια χρειάζεται να καταγράψει την κυματομορφή τις και να μετρήσει τις ακόλουθες παραμέτρους:

I_p : Τιμή κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης [A]

I_{p2} : 2^η τιμή κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης [A]

I_{30} : Τιμή του ρεύματος στα 60 ns αφού το μέγιστο ρεύμα έχει φτάσει το 0,1 φορές την τιμή του I_p [A].

I_{30} : Τιμή του ρεύματος στα 30 ns αφού το μέγιστο ρεύμα έχει φτάσει το 0,1 φορές την τιμή του I_p [A].

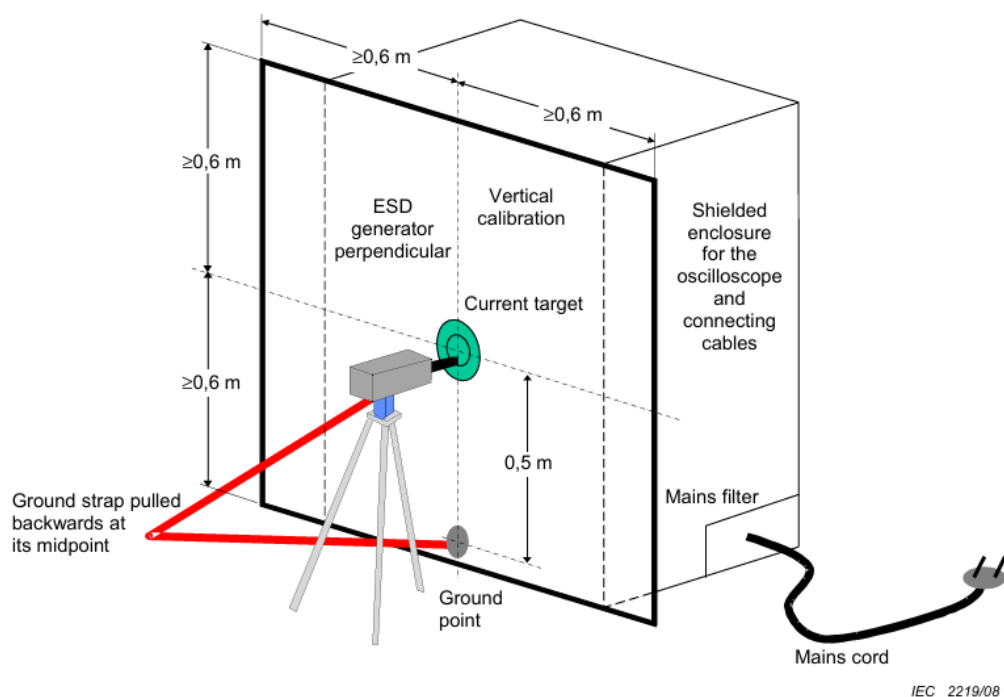
T_r : χρόνος ανόδου του ρεύματος [ns].

Πίνακας 3.4. Διαδικασία διακρίβωσης

Βήμα	Περιγραφή
Εκφόρτιση τις γεννήτρια σε κάθε επίπεδο δοκιμής πέντε φορές και για τις δύο πολικότητες και αποθήκευση κάθε αποτελέσματος.	Οι προδιαγραφές πρέπει να πληρούνται και για τις 5 εκφορτίσεις.
Μέτρηση των I_p , I_{p2} , I_{30} , I_{60} , t_r σε κάθε κυματομορφή.	Οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε επίπεδο δοκιμής.
Ρεύμα κορυφής: έλεγχος αν το I_p ισοδυναμεί με $15\text{ A} \pm 15\%$	Οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε επίπεδο δοκιμής.
Ρεύμα κορυφής: έλεγχος αν το I_{p2} ισοδυναμεί με $9.0\text{ A} \pm 30\%$	Οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε επίπεδο δοκιμής.
Ρεύμα στα 30ns: έλεγχος αν το I_{30} ισοδυναμεί με $8.0\text{ A} \pm 30\%$	Οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε επίπεδο δοκιμής.
Ρεύμα στα 60ns: έλεγχος αν το I_{60} ισοδυναμεί με $4.0\text{ A} \pm 30\%$	Οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε επίπεδο δοκιμής.
Χρόνος ανόδου: έλεγχος αν το t_r ισοδυναμεί με $0,8\text{ ns} \pm 25\%$	Οι παράμετροι πρέπει να ελεγχθούν σε κάθε επίπεδο δοκιμής.
* Η διακρίβωση εκφόρτισης αέρα εκτελείται σε λειτουργία εκφόρτισης επαφής με το άκρο εκφόρτισης αέρα. Είναι επαρκής η διακρίβωση σε οποιοδήποτε επίπεδο ή μέχρι το υψηλότερο επίπεδο εκφόρτισης επαφής.	

Η γεννήτρια πρέπει να εγκατασταθεί σε τρίποδο ή σε ισοδύναμο μη αγώγιμο στήριγμα και πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το RGP και το κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα. Το τροφοδοτικό πρέπει να τοποθετείται στην αριστερή πλευρά του RGP, δηλαδή αριστερά από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος. Το καλώδιο μεταξύ του τροφοδοτικού και της γεννήτριας δρομολογείται κατά μήκος του RGP και του κατακόρυφου επιπέδου διακρίβωσης. Η διάταξη διακρίβωσης σύμφωνα με την έκδοση 3 του Προτύπου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.9. [19]. Η θωράκιση του παλμογράφου δεν είναι απαραίτητη εάν μπορεί να αποδειχθεί με μέτρηση ότι οι έμμεσες διαδρομές σύζευξης στο σύστημα μέτρησης δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα διακρίβωσης. Το σύστημα διακρίβωσης μπορεί να χαρακτηριστεί επαρκώς άνοσο (δηλαδή δεν απαιτείται κλωβός Faraday) εάν δεν προκύψει ενεργοποίηση του παλμογράφου όταν:

- Το επίπεδο ενεργοποίησης του παλμογράφου έχει ρυθμιστεί στο $\leq 10\%$ του χαμηλότερου επιπέδου δοκιμής και,
- Η γεννήτρια εκφορτίζεται με το υψηλότερο επίπεδο δοκιμής στον εξωτερικό δακτύλιο του στόχου (αντί στον εσωτερικό δακτύλιο) [3]



Εικόνα 3.10. Διάταξη διακρίβωσης σύμφωνα με την έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2

- Στη δεύτερη έκδοση του Προτύπου δεν μελετώνται οι εκφορτίσεις αέρος στις γεννήτριες. Για παράδειγμα, αυτό φαίνεται στους παρακάτω πίνακες. Ο πρώτος αφορά την παλιά έκδοση (2^η) στην παρατηρούμε ότι δεν περιέχονται επίπεδα τάσης που αφορούν τις εκφορτίσεις αέρος και ο δεύτερος, ο οποίος περιλαμβάνεται στην νέα, 3^η έκδοση, και τις περιέχει.

Πίνακας 3.5. Παράμετροι κυματομορφής στη έκδοση 2 του Προτύπου IEC 61000-4-2

Επίπεδο	Τάση	I_P ($\pm 15\%$)	t_r ($\pm 25\%$)	I_{30ns} ($\pm 30\%$)	I_{60ns} ($\pm 30\%$)
	[kV]	[A]	[ns]	[A]	[A]
1	2	7.5	0.8	4.0	2.0
2	4	15.0	0.8	8.0	4.0
3	6	22.5	0.8	12.0	6.0
4	8	30.0	0.8	16.0	8.0

Το σημείο αναφοράς για τη μέτρηση του χρόνου για το ρεύμα στα 30 ns και 60 ns είναι η στιγμή που το ρεύμα φτάνει πρώτα το 10 % της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Ο χρόνος ανόδου, t_r , είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ του 10 % και 90 % της τιμής της πρώτης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.

Πίνακας 3.6. Παράμετροι κυματομορφής στη έκδοση 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2

Επίπεδο		Τάση	I_P ($\pm 15\%$)	t_r ($\pm 25\%$)	I_{P2} ($\pm 30\%$)	I_{30ns} ($\pm 30\%$)	I_{60ns} ($\pm 30\%$)
CD	AD	[kV]	[A]	[ns]	[A]	[A]	[A]
1	1	2	7.5	0.8	4.5	4.0	2.0
2	2	4	15.0	0.8	9.0	8.0	4.0
3	-	6	22.5	0.8	13.5	12.0	6.0
4	3	8	30.0	0.8	18.0	16.0	8.0
-	4	15	56.3	0.8	33.8	30.0	15.0
Το σημείο αναφοράς για τη μέτρηση του χρόνου για το ρεύμα στα 30ns και 60ns είναι η στιγμή που το ρεύμα φτάνει πρώτα το 10 % της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.							

Μια σημαντική διαφορά στη διάταξη είναι ότι σύμφωνα με το καινούριο πρότυπο προστίθεται μια πλάκα γείωσης αναφοράς (RPG) κάτω από τη γεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα, αυτή είναι μια επίπεδη αγωγίμη επιφάνεια που έχει το ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό με το έδαφος αναφοράς, η οποία χρησιμοποιείται ως κοινή αναφορά και συμβάλλει σε μια αναπαραγώγιμη παρασιτική χωρητικότητα με τον περιβάλλοντα χώρο του υπό δοκιμή εξοπλισμού. Το RGP λοιπόν, θα είναι ένα μεταλλικό φύλλο (χαλκός ή αλουμίνιο) ελάχιστου πάχους 0,25mm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα μεταλλικά υλικά, αλλά πρέπει να έχουν ελάχιστο πάχος 0,65mm. Το RGP θα προεξέχει πέρα από τον υπό δοκιμή εξοπλισμό και το οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (όπου υπάρχει) κατά τουλάχιστον 0,5m σε όλες τις πλευρές και θα συνδέεται με το θεμελιακό σύστημα γείωσης. Επίσης, το RGP πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το τραβηγμένο καλώδιο επιστροφής του ρεύματος να μην προεξέχει αυτού, ενώ αν η τροφοδοσία της γεννήτριας παρέχεται μέσω τροφοδοτικού αυτό θα πρέπει να τοποθετείται πάνω στο RGP και σε συγκεκριμένη θέση. Εδώ σημαντικό θα ήταν να αναφέρουμε ότι το καλώδιο επιστροφής ρεύματος η επηρεάζει το δεξί μέρος της κυματομορφής, δηλαδή την δεύτερη κορυφή και μετά [26]. Τέλος, κανένα αντικείμενο δεν πρέπει να τοποθετείται εντός των ελάχιστων διαστάσεων της διάταξης διακρίβωσης.

3.3. Στόχος της αναθεώρησης του Προτύπου IEC 61000-4-2

Η δοκιμή ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, όπως και όλες οι δοκιμές ατρωσίας, σε μικρότερο ή σε μεγαλύτερο βαθμό, εμπεριέχουν παραμέτρους αβεβαιότητας υποβαθμίζοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, είτε μεταξύ των χειριστών της ίδιας γεννήτριας είτε μεταξύ διαφορετικών γεννητριών. Στόχος, εν γένει,

των Προτύπων Δοκιμής, ένα εκ των οποίων είναι και το IEC 61000-4-2, είναι ο καθορισμός των παραμέτρων της δοκιμής ώστε να ελαχιστοποιείται η προαναφερθείσα αβεβαιότητα. Μέρος αυτής της προσπάθειας ήταν και οι τροποποιήσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι οποίες στοχεύουν κυρίως στη διαδικασία διακρίβωσης ώστε το βασικό εργαλείο διεξαγωγής της δοκιμής, η γεννήτρια των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, να είναι η κατάλληλη με την ελάχιστη αβεβαιότητα [11].

3.4. Πειραματική διάταξη

Για να επιτευχθεί η σύγκριση των δύο εκδόσεων του Προτύπου σε σχέση με τα αποτελέσματα της διακρίβωσης, τρεις (3) γεννήτριες του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. διακριβώθηκαν και με τις δύο εκδόσεις του Προτύπου. Οι γεννήτριες ήταν οι:

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

Με την πρώτη γεννήτρια (EMTEST DITO) πραγματοποιήσαμε εκφορτίσεις επαφής και αέρος. Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τάση φόρτισης μεταξύ -16,5 kV και +16,5 kV. Για τη λειτουργία της χρειάζεται μόνο μια σταθερή γείωση και για την τροφοδοσία της χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Επίσης, διαθέτει οθόνη στην οποία εμφανίζονται όλες οι χρήσιμες ενδείξεις/πληροφορίες, όπως ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι εκφορτίσεις, ο αριθμός των επαναλήψεων και η τάση φόρτισης.

Στη συνέχεια (Εικόνα 3.11) παρουσιάζεται η σχετική διάταξη διακρίβωσης.



Εικόνα 3.11. Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας EMTEST DITO

Η δεύτερη γεννήτρια είναι η NSG-433 (SCHAFFNER) με την οποία πραγματοποιήσαμε εκφορτίσεις επαφής και αέρος. Αυτή η γεννήτρια παρέχει δυνατότητα ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τάση φόρτισης μεταξύ -18 kV και $+18\text{ kV}$ και χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns . Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στη συσκευή, μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο το οποίο δείχνει τη τάση φόρτισης. Η γεννήτρια περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό εκφορτίσεων που πραγματοποιούνται. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (πχ. Πίεση, υγρασία, θερμοκρασία κτλ) καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή, τον προσαρμοστή εκφόρτισης επαφής (contact discharge adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος.

Παρακάτω (Εικόνα 3.12) παρουσιάζεται η διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας NSG-433.



Εικόνα 3.12. Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 433 (SCHAFFNER)

Η τρίτη γεννήτρια είναι η NSG 438 (SCHAFFNER) με την οποία πραγματοποιήσαμε εκφορτίσεις επαφής και αέρος. Η γεννήτρια αυτή παράγει εκφορτίσεις με τάση μεταξύ -30kV και $+30\text{kV}$. Η γεννήτρια αυτή διαθέτει οθόνη αφής, μέσω της οποίας πραγματοποιούνται οι αναγκαίοι χειρισμοί. Η γεννήτρια αυτή αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα, η οποία περιλαμβάνει τη μπαταρία τροφοδοσίας, τη γεννήτρια και το ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (power on, interlock reset, emergency power off) και 4 λυχνίες (power, battery, high voltage, interlock).
- Η γεννήτρια στην οποία βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος και επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στη λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν, το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό το οποίο έχει είσοδο $100\text{--}250\text{ Vac}$, $50\text{--}60\text{ Hz}$, 1 A και δίνει στη βασική μονάδα 24 Vdc . [10]

Στη συνέχεια (Εικόνα 3.13) παρουσιάζεται η διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438.

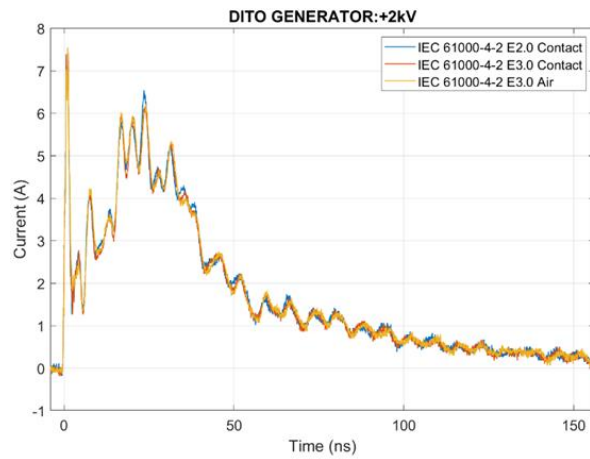


Εικόνα 3.13. Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας NSG 438 (SCHAFFNER)

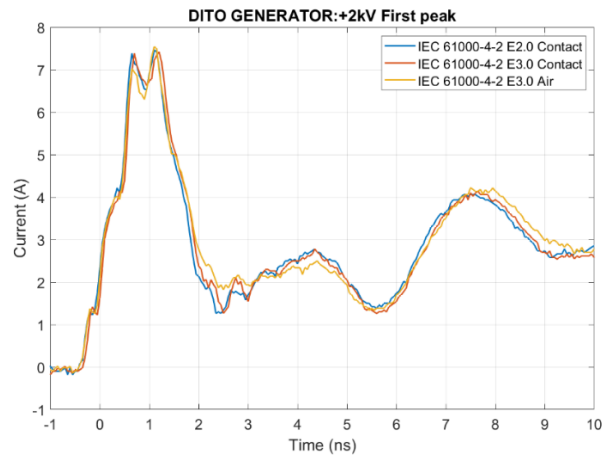
Κεφάλαιο 4: Συγκριτικές μετρήσεις και υπολογισμός των παραμέτρων κυματομορφής

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι καταγεγραμμένες κυματομορφές κατά τη διεξαγωγή της διακρίβωσης και των τριών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τα επίπεδα $\pm 2\text{kV}$, $\pm 4\text{kV}$, $\pm 6\text{kV}$ και $\pm 8\text{kV}$.

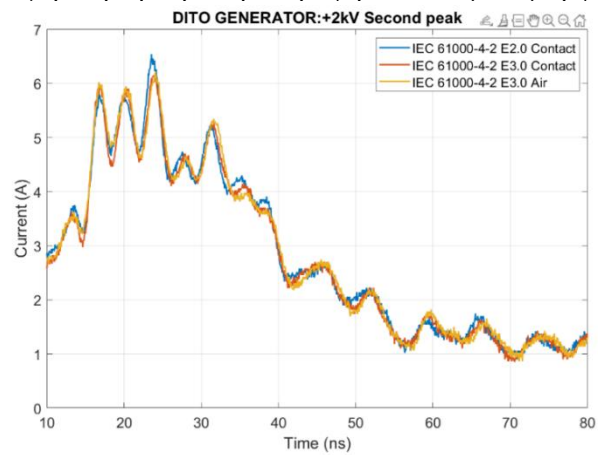
4.1. Αποτελέσματα για την Γεννήτρια Dito



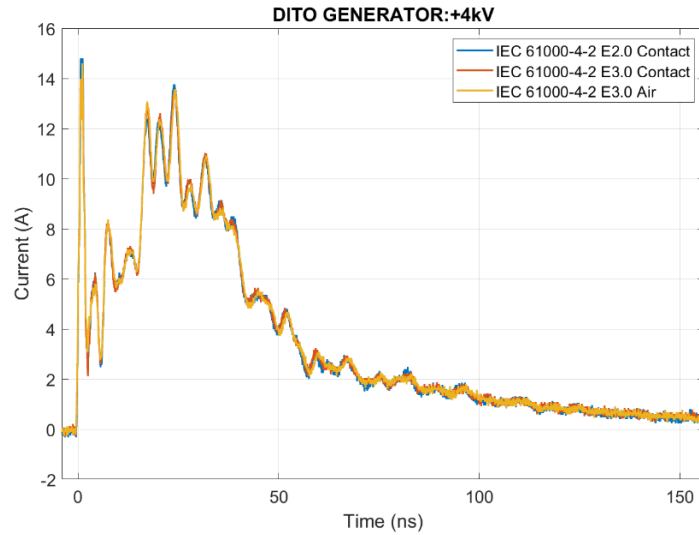
Εικόνα 4.1: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +2kV.



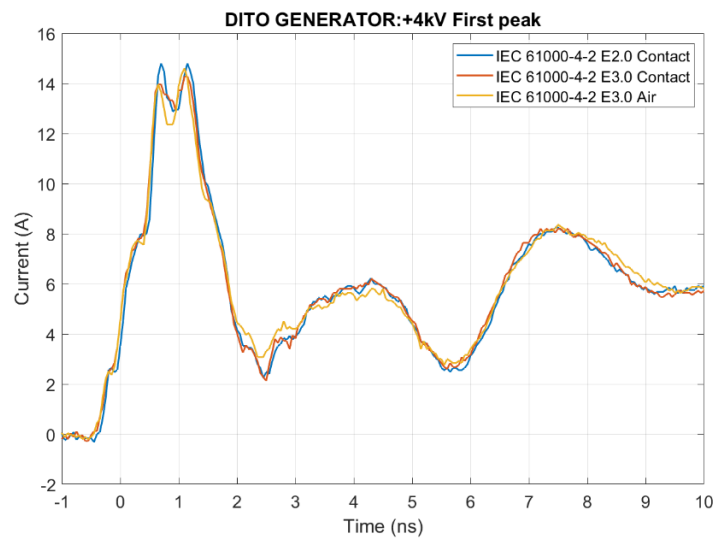
Εικόνα 4.2: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.



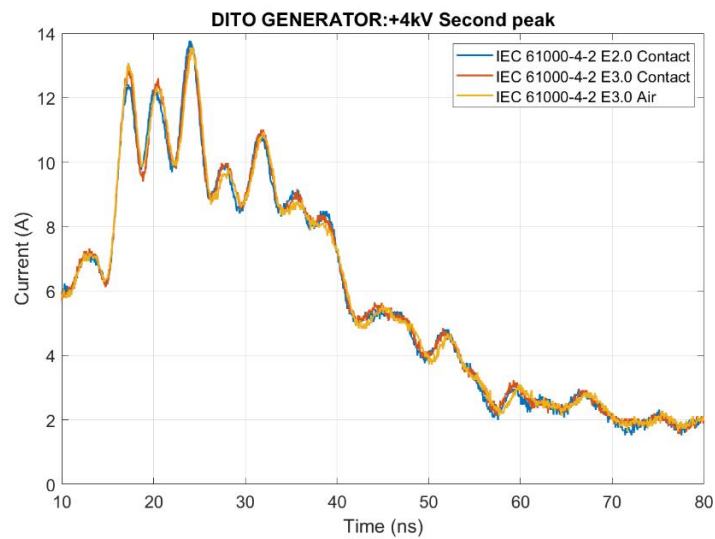
Εικόνα 4.3: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.



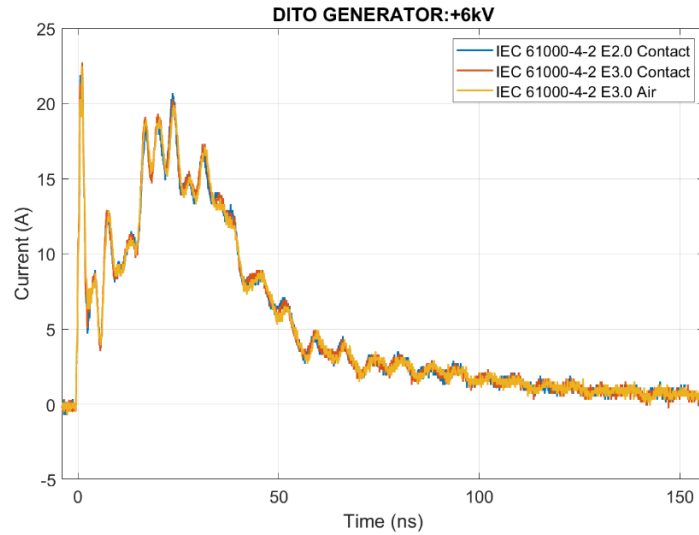
Εικόνα 4.4: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +4kV.



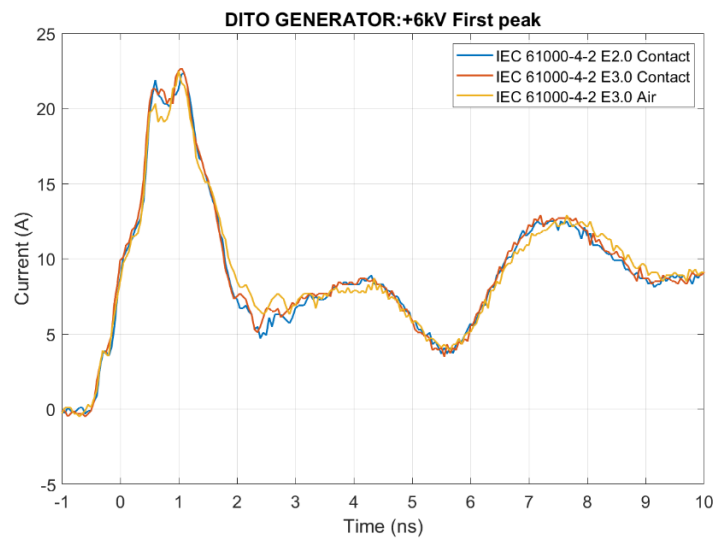
Εικόνα 4.5: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.



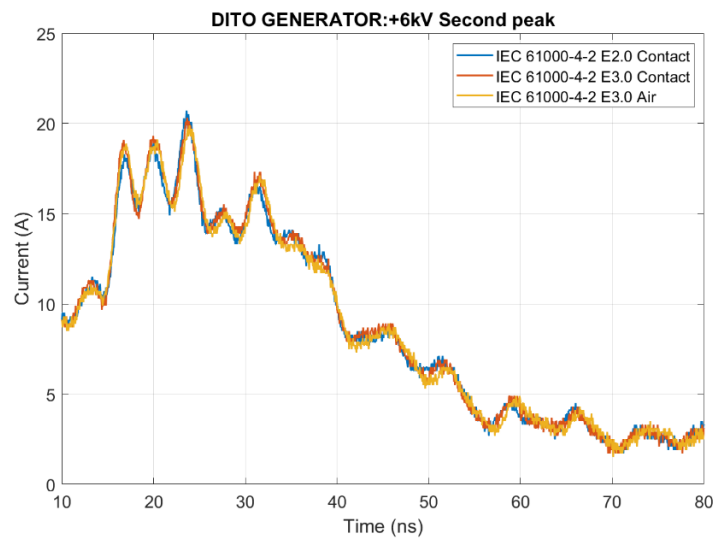
Εικόνα 4.3: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.



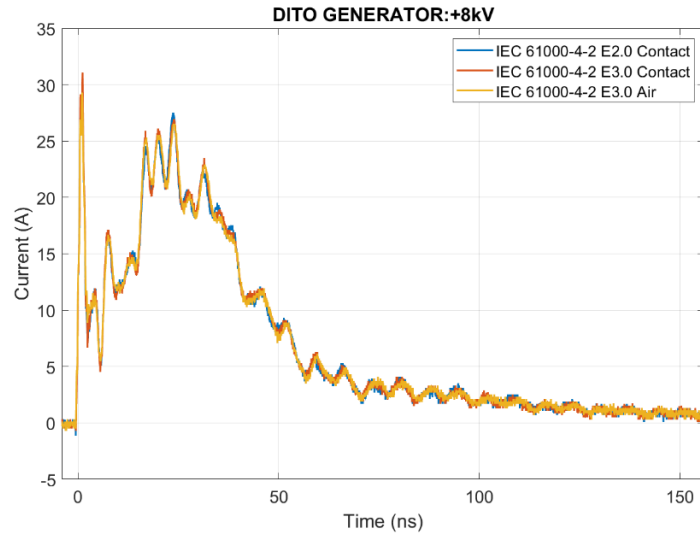
Εικόνα 4.7: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +6kV.



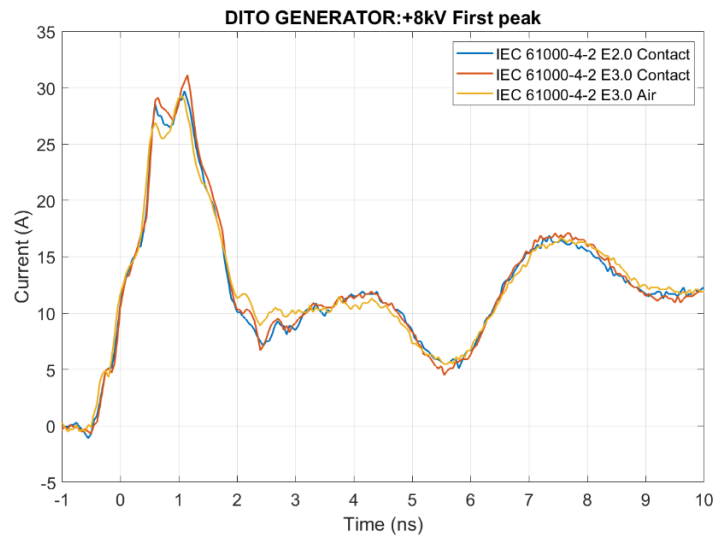
Εικόνα 4.8: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.



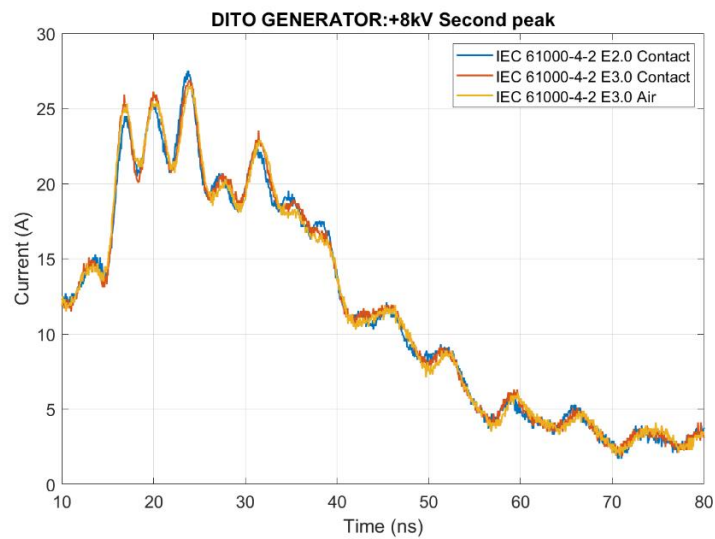
Εικόνα 4.9: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.



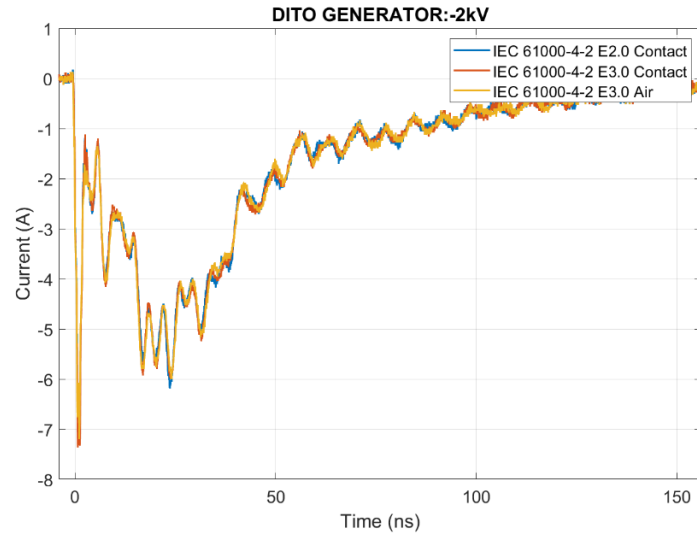
Εικόνα 4.10: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +8kV.



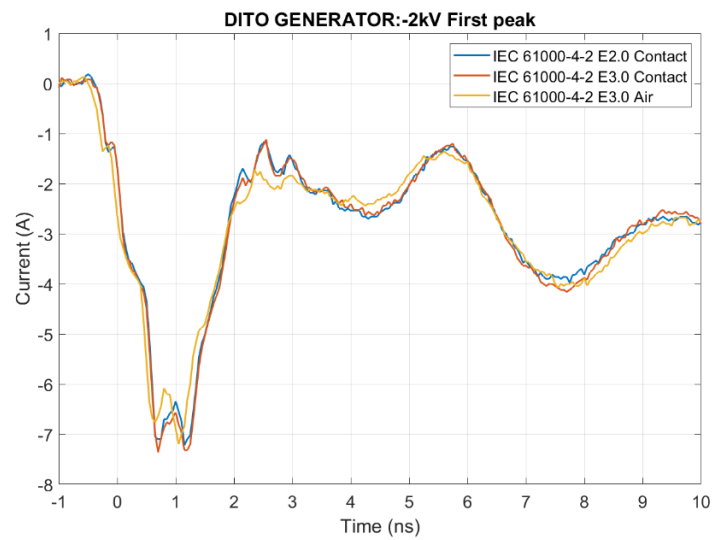
Εικόνα 4.11: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.



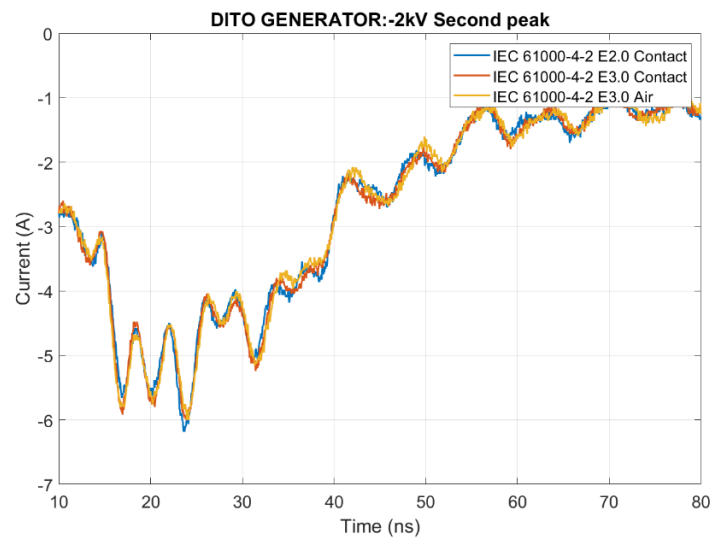
Εικόνα 4.12: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.



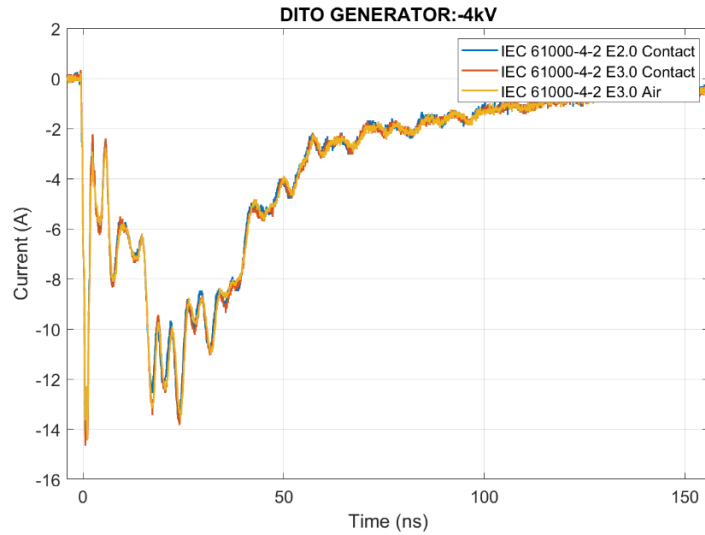
Εικόνα 4.13: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -2kV.



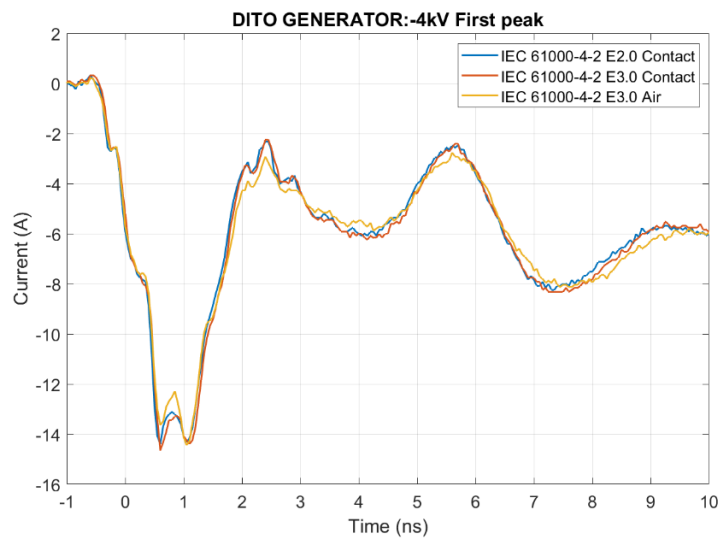
Εικόνα 4.14: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.



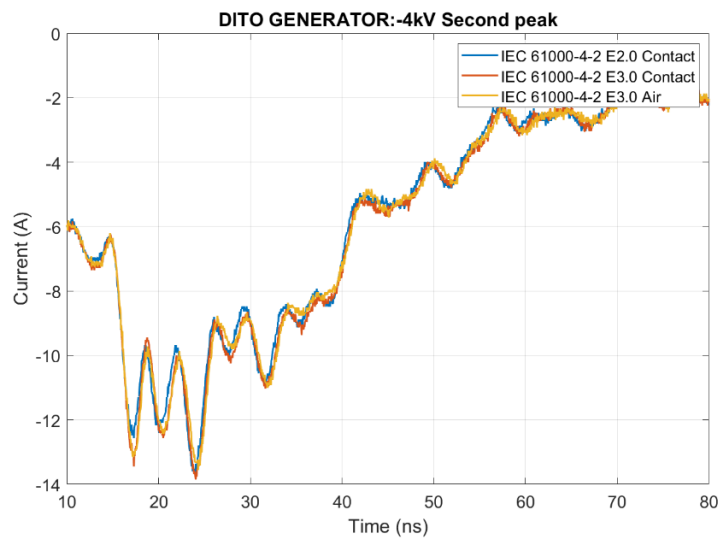
Εικόνα 4.15: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.



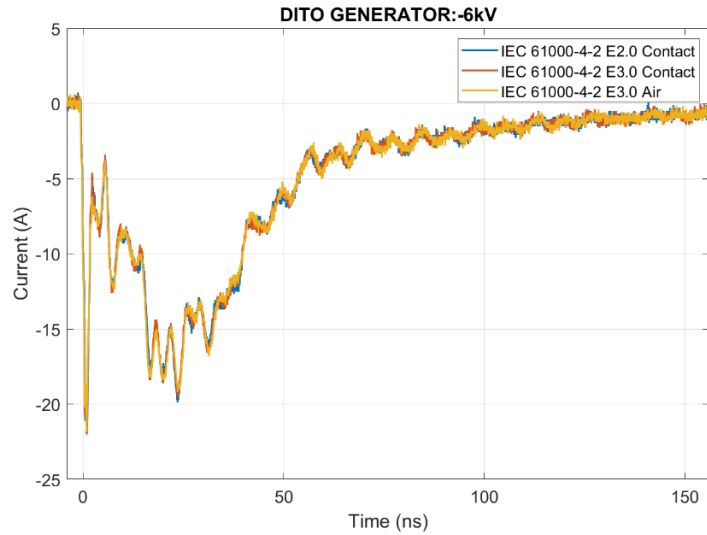
Εικόνα 4.16: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -4kV.



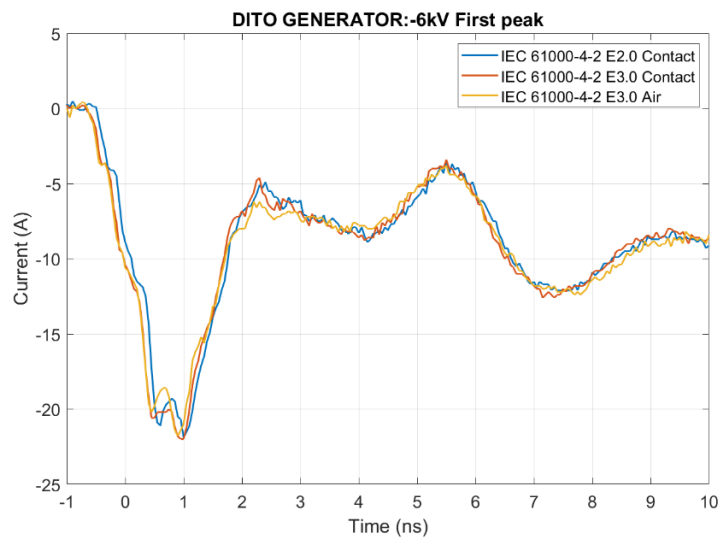
Εικόνα 4.17: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.



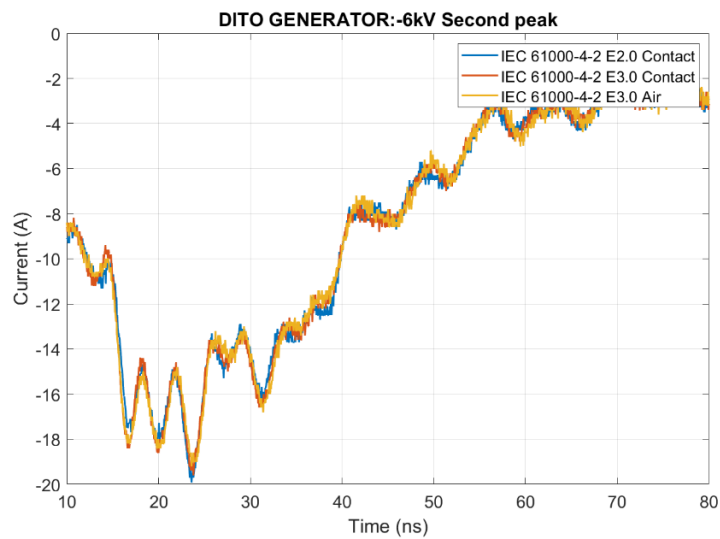
Εικόνα 4.18: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.



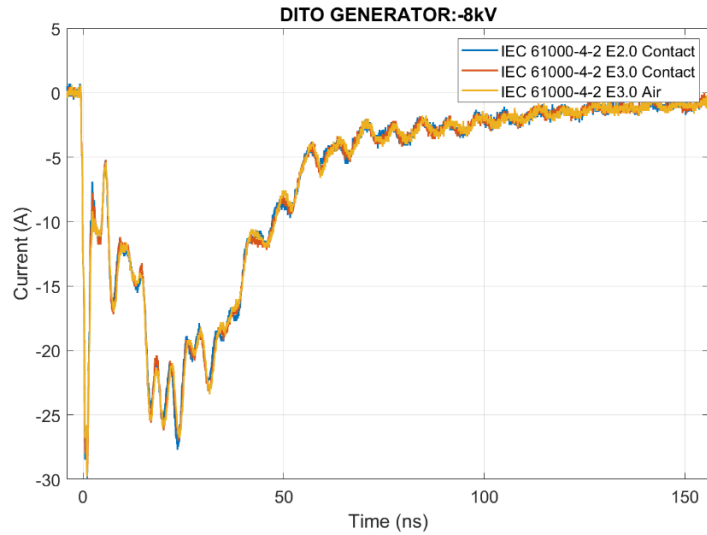
Εικόνα 4.19: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -6kV.



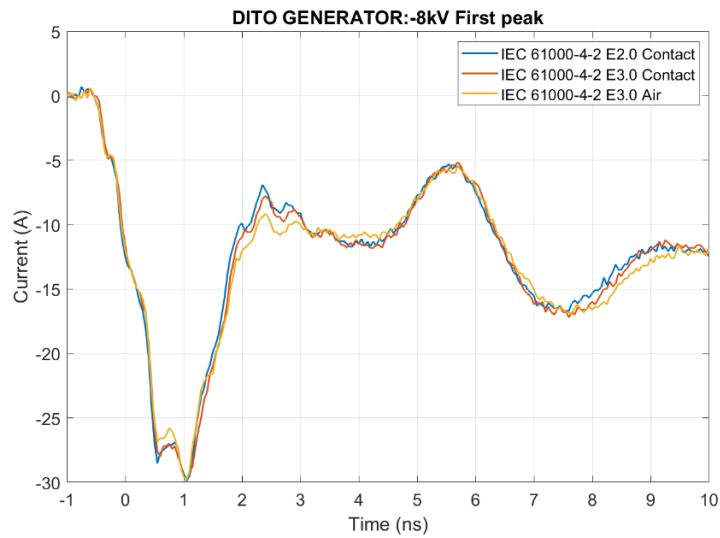
Εικόνα 4.20: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.



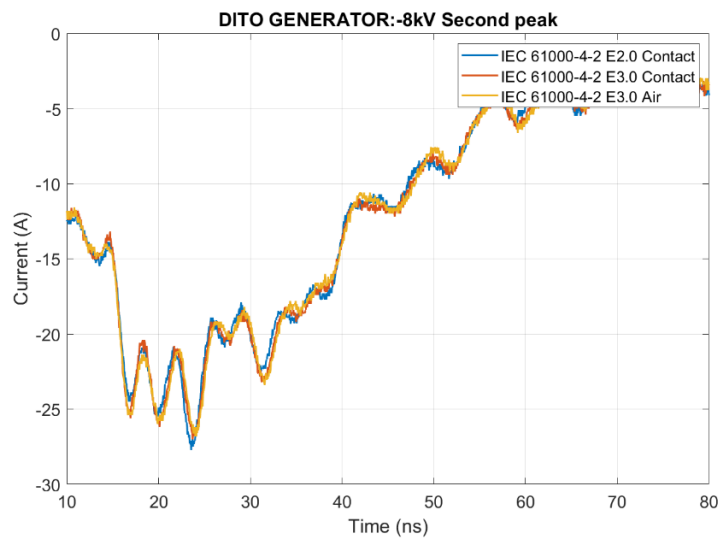
Εικόνα 4.21: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.



Εικόνα 4.22: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -8kV.



Εικόνα 4.23: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.



Εικόνα 4.24: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.

Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_p ED 2 Επαφής (A)	I_p ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_p ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	6.375 - 8.625	7.4160	7.3880	-0.3596	7.3960	-0.2685
-2 kV	-8.625 - -6.375	-7.2360	-7.3840	-2.0441	-7.2000	0.4974
+4 kV	12.75 - 17.25	14.5680	14.5280	-0.2403	14.4160	-1.0224
-4 kV	12.75 - 17.25	-14.4640	-14.6640	-1.3951	-14.5440	-0.5626
+6 kV	19.125 - 25.875	22.4400	22.6600	1.0010	22.2800	-0.6659
-6 kV	19.125 - 25.875	-22.1000	-22.1400	-0.2450	-21.7600	1.4794
+8 kV	25.5 - 34.5	29.8200	30.5600	2.4950	29.6600	-0.5252
-8 kV	25.5 - 34.5	-29.9000	-30.1000	-0.6941	-29.7000	0.6542

Πίνακας 4.2. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_p ED 2 - Επαφής [%]	I_p ED 3 - Επαφής [%]	I_p ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.4650	0.2254	0.8070
-2 kV	-0.1474	-0.4791	-0.2485
+4 kV	0.4942	0.3620	0.2489
-4 kV	-0.3479	-0.2578	-0.2177
+6 kV	0.6239	0.6552	0.4722
-6 kV	-0.7631	-0.5224	-0.3573
+8 kV	0.4024	0.5348	0.3303
-8 kV	-0.3989	-0.4232	-0.4288

Πίνακας 4.3. Μέσες τιμές του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	t_r ED 2 Επαφής (A)	t_r ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	t_r ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	0.6 – 1	0.8697	0.8672	-0.2794	0.8878	2.0893
-2 kV	0.6 – 1	0.8704	0.8707	-0.0379	0.8876	-1.9787
+4 kV	0.6 – 1	0.8692	0.8649	-0.4944	0.8809	1.3496
-4 kV	0.6 – 1	0.8718	0.8730	-0.1524	0.8844	-1.4649
+6 kV	0.6 – 1	0.8846	0.8942	1.1104	0.9210	4.1466
-6 kV	0.6 – 1	0.8852	0.8977	-1.4255	0.9188	-3.8129
+8 kV	0.6 – 1	0.8930	0.8933	0.0669	0.9273	3.8675
-8 kV	0.6 – 1	0.8949	0.8991	-0.4934	1.0237	-14.4154

Πίνακας 4.4. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	t_r ED 2 - Επαφής [%]	t_r ED 3 - Επαφής [%]	t_r ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.2598	0.1785	0.5161
-2 kV	0.1997	0.2378	0.4570
+4 kV	0.2358	0.2338	0.1757
-4 kV	0.2868	0.2783	0.3596
+6 kV	0.4430	0.6305	0.8777
-6 kV	0.3256	0.4971	0.6474
+8 kV	0.5334	0.3969	0.4502
-8 kV	0.4962	0.3577	5.0127

Πίνακας 4.5. Μέσες τιμές του I_{p2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2, για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{p2} ED 2 Επαφής (A)	I_{p2} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_{p2} ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	3.15 - 5.85	6.4520	6.0840	-5.7064	6.1760	-4.2726
-2 kV	-5.85 - -3.15	-6.2200	-6.0520	2.6982	-6.0080	3.4043
+4 kV	6.3 - 11.7	13.8240	13.6960	-0.9245	13.5280	-2.1391
-4 kV	-11.7 - -6.3	-13.7200	-13.7520	-0.2349	-13.5200	1.4544
+6 kV	9.45 - 17.55	20.5600	22.0000	-2.7223	19.8400	-3.5009
-6 kV	-17.55 - -9.45	-20.2800	-19.4200	4.1896	-19.2200	5.1805
+8 kV	12.6 - 23.4	27.4200	27.0600	-1.3112	26.6200	-2.9160
-8 kV	-23.4 - -12.6	-27.5400	-27.0200	1.8852	-26.8200	2.6125

Πίνακας 4.6. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{p2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{p2} ED 2 - Επαφής [%]	I_{p2} ED 3 - Επαφής [%]	I_{p2} ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.2226	1.4511	0.4871
-2 kV	0.1917	0.2423	0.1661
+4 kV	0.1444	0.2142	0.1577
-4 kV	0.1792	0.2025	0.2021
+6 kV	0.2076	0.5218	0.2152
-6 kV	0.7417	0.2403	0.2428
+8 kV	0.1191	0.0986	0.2295
-8 kV	0.1812	0.2050	0.1339

Πίνακας 4.7. Μέσες τιμές των I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{30} ED 2 Επαφής (A)	I_{30} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_{30} ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	2.8 – 5.2	4.3255	4.2445	-1.8736	4.2436	-1.8882
-2 kV	-5.2 - -2.8	-4.1779	-4.2488	-1.7038	-4.1492	0.6733
+4 kV	5.6 – 10.4	8.6430	8.6930	0.5809	8.6718	0.3402
-4 kV	-10.4 - -5.6	-8.6419	-8.8092	-1.9399	-8.7879	-1.6970
+6 kV	8.4 – 15.6	13.9431	14.0505	0.7787	13.8132	-0.9128
-6 kV	-15.6 - -8.4	-13.8591	-13.7553	0.6802	-13.4857	2.6412
+8 kV	11.2 – 20.8	18.8293	19.1367	1.6364	18.5394	-1.5350
-8 kV	-20.8 - -11.2	-18.9325	-19.1683	-1.2565	-18.7787	0.8029

Πίνακας 4.8. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{30} ED 2 - Επαφής [%]	I_{30} ED 3 - Επαφής [%]	I_{30} ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.2824	0.4724	0.5974
-2 kV	0.3409	0.4446	0.2073
+4 kV	0.2082	0.2712	0.3689
-4 kV	0.1920	0.3294	0.3445
+6 kV	0.4581	0.6417	0.3194
-6 kV	0.8776	0.4572	0.3639
+8 kV	0.2316	0.1786	0.2991
-8 kV	0.3129	0.2130	0.3804

Πίνακας 4.9. Μέσες τιμές των I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{60} ED 2 Επαφής (A)	I_{60} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_{60} ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	1.4 – 2.6	1.5330	1.6045	4.6406	1.7230	12.4323
-2 kV	-2.6 - -1.4	-1.4970	-1.6175	-8.1406	-1.7040	-13.9630
+4 kV	2.8 – 5.2	2.8385	3.0148	6.2434	3.0007	5.7786
-4 kV	-5.2 - -2.8	-2.8842	-3.0974	-7.5271	-3.0660	-6.4949
+6 kV	4.2 – 7.8	4.0592	4.4618	10.0932	4.5656	12.6673
-6 kV	-7.8 - -4.2	-4.2087	-4.4468	-6.0583	-4.5827	-9.1830
+8 kV	5.6 – 10.4	5.1840	5.6362	8.8169	5.8669	13.2357
-8 kV	-10.4 - -5.6	-5.3659	-5.7997	-8.1685	-5.9594	-11.1671

Πίνακας 4.10. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{60} ED 2 - Επαφής [%]	I_{60} ED 3 - Επαφής [%]	I_{60} ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.6509	2.2455	0.704
-2 kV	1.0388	0.7707	0.694
+4 kV	0.9335	0.7155	0.946
-4 kV	1.1796	0.5641	0.530
+6 kV	1.5828	1.2309	1.096
-6 kV	1.8523	1.4192	1.351
+8 kV	0.8198	0.8440	0.655
-8 kV	0.9904	0.7921	0.876

Παρατηρώντας τα γραφήματα και τις μετρήσεις, και με σύγκριση των μετρούμενων παραμέτρων με τα όρια ανοχής του Προτύπου, προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

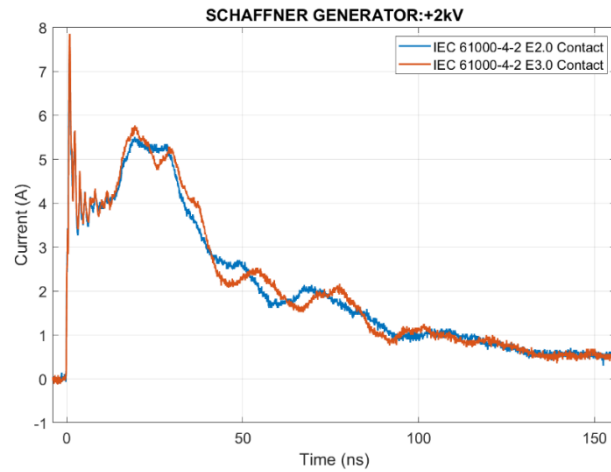
- Οι μέσες τιμές του I_p επαφής σύμφωνα με τη νέα έκδοση του Προτύπου παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις από τις μέσες τιμές σύμφωνα με την εν ενεργεία έκδοση και παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής. Το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές του I_p για τις εκφορτίσεις αέρος. Συγκρίνοντας τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας του I_p παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων.
- Οι μέσες τιμές του χρόνου ανόδου t_r για μετρήσεις επαφής με τη νέα έκδοση παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις συγκριτικά με τις μέσες τιμές της εν ενεργεία έκδοσης και παραμένουν όλες μέσα στα όρια ανοχής. Οι μέσες τιμές t_r αέρα παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις, αλλά παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής, εκτός από την τιμή στα -8 kV. Συγκρίνοντας τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων.
- Για τα αποτελέσματα της παραμέτρου I_{p2} παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των μέσω τιμών για κάθε επίπεδο τάσης είναι εκτός ορίων ανοχής, τόσο για τη νέα όσο και για την εν ενεργεία έκδοση. Παρατηρείται επίσης μικρή απόκλιση των τιμών μεταξύ των δύο εκδόσεων. Τέλος, δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις για τις τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας των μετρήσεων αυτών.
- Οι μέσες τιμές του I_{30} για μετρήσεις επαφής και αέρος με τη νέα έκδοση παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις συγκριτικά με τις αντίστοιχες της εν ενεργεία

έκδοσης και παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής. Δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις για τις τιμές αβεβαιότητας επαναληψιμότητας μεταξύ των δύο εκδόσεων.

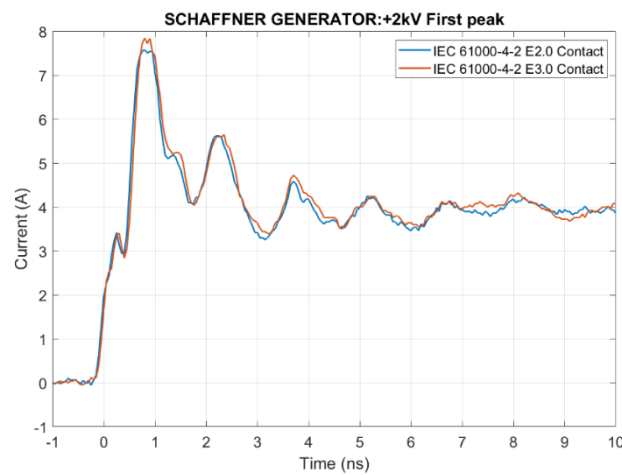
- Οι μέσες τιμές του I_{60} στις δοκιμές επαφής και αέρα παραμένουν εντός ορίων ανοχής, εκτός από 3. Όμως, παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων του Προτύπου. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας που τους αντιστοιχούν.

4.2. Αποτελέσματα για την Γεννήτρια NSG-433 (SCHAFFNER)

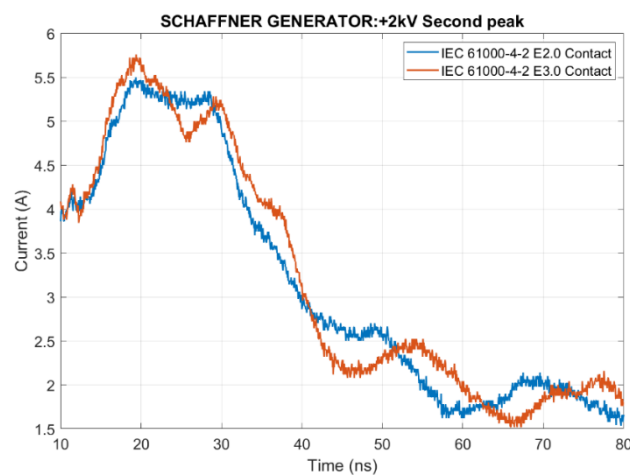
Ακολουθούν τα γραφήματα και οι μετρήσεις που προέκυψαν για τη γεννήτρια NSG-433 (SCHAFFNER).



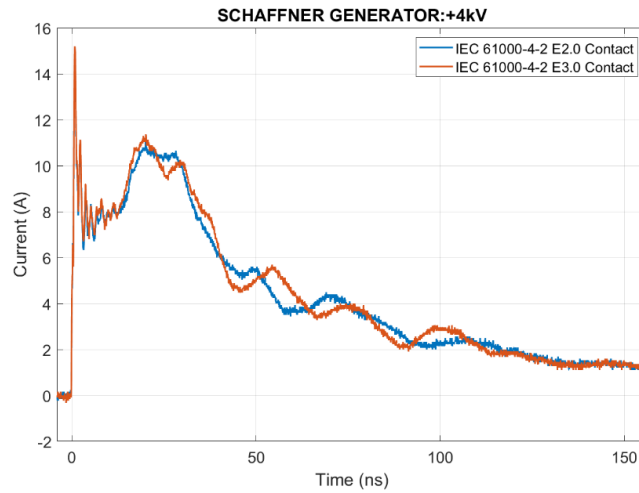
Εικόνα 4.25: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +2kV.



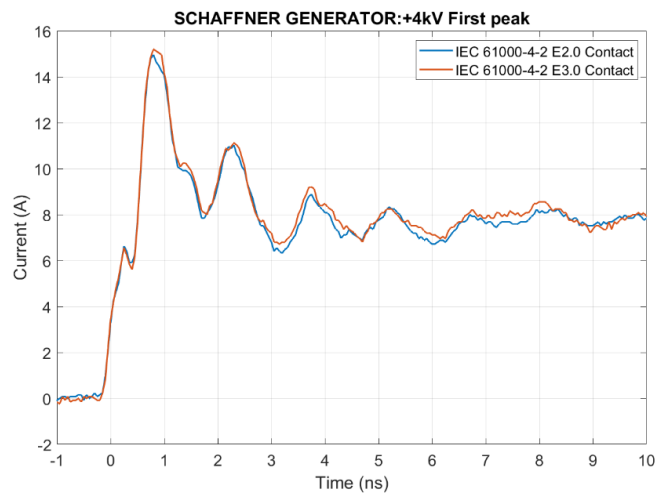
Εικόνα 4.26: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.



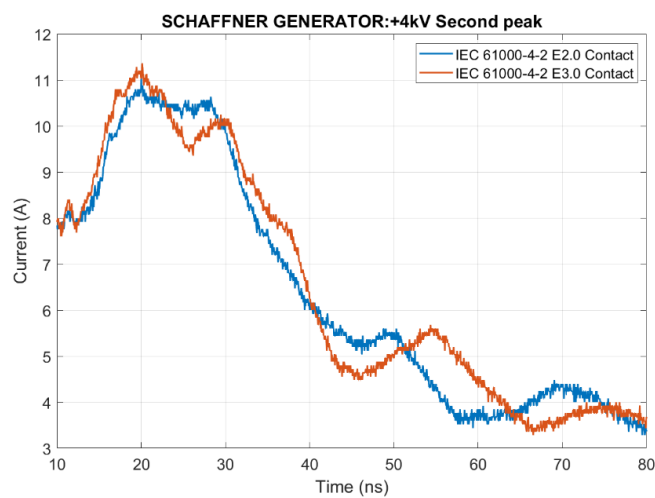
Εικόνα 4.27: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.



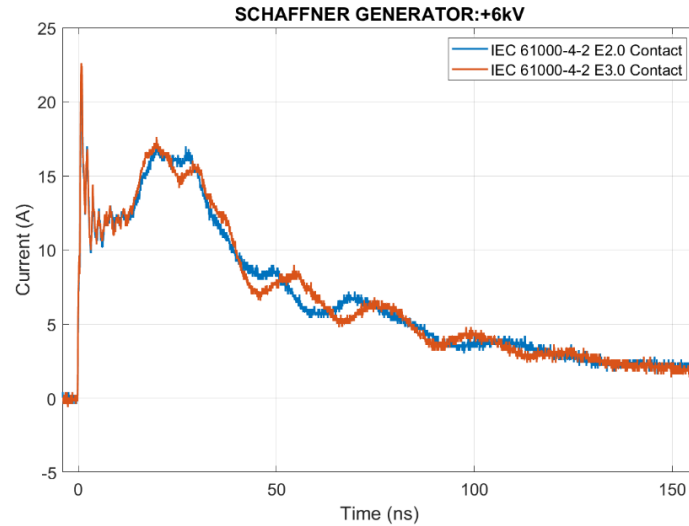
Εικόνα 4.28: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +4kV.



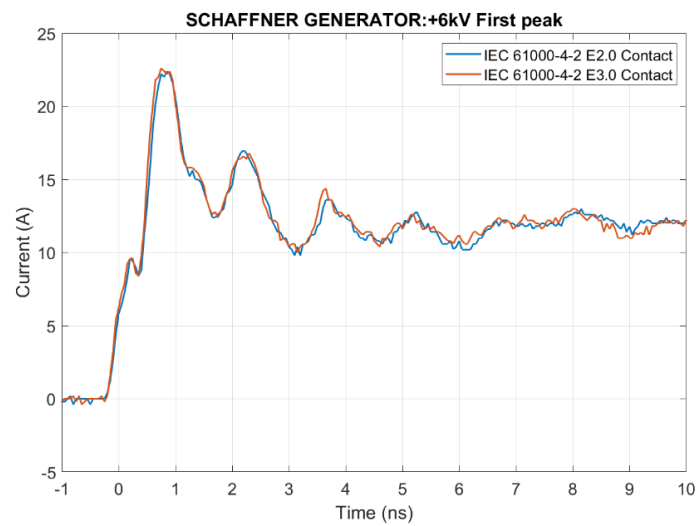
Εικόνα 4.29: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.



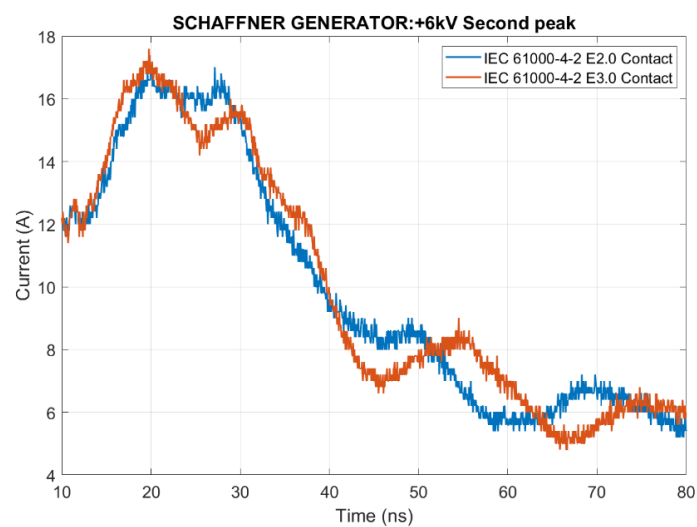
Εικόνα 4.30: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.



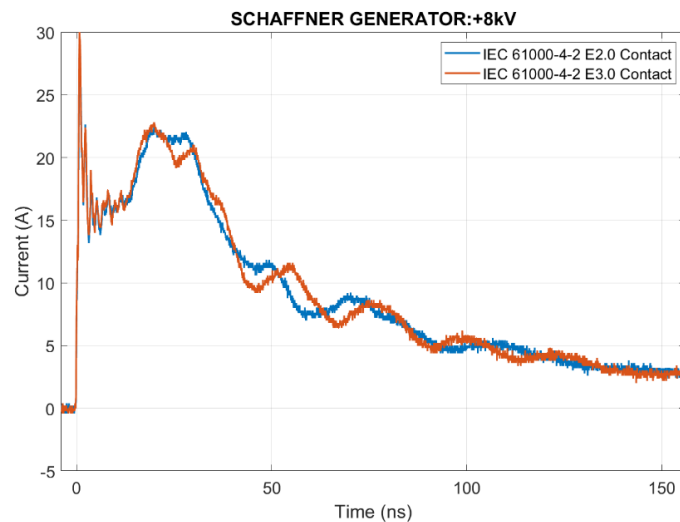
Εικόνα 4.31: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +6kV.



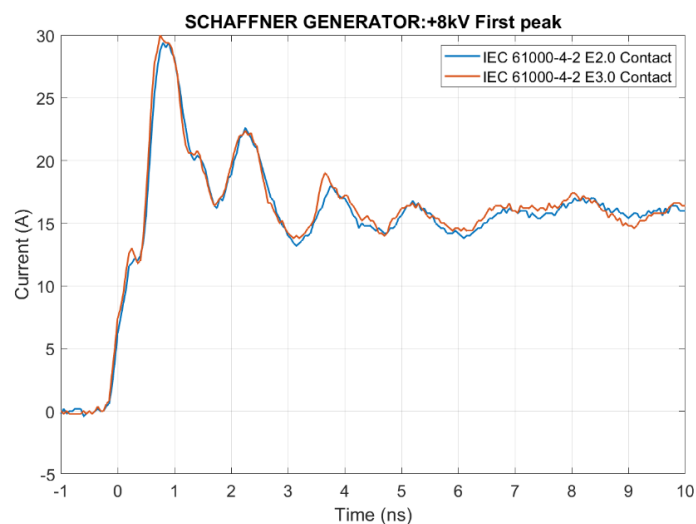
Εικόνα 4.32: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.



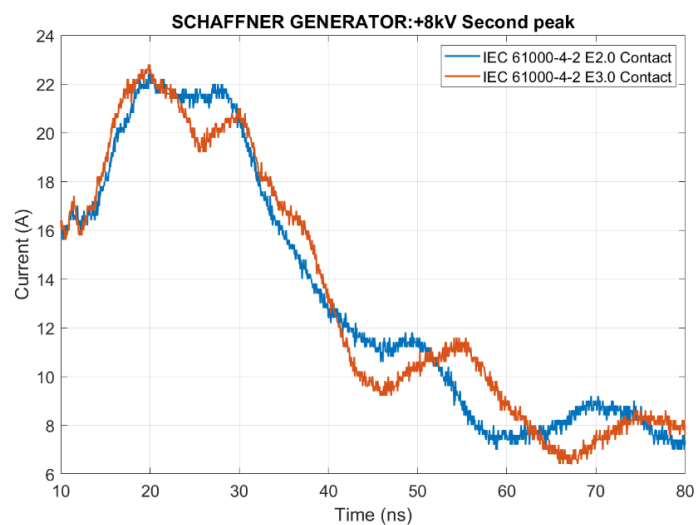
Εικόνα 4.33: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.



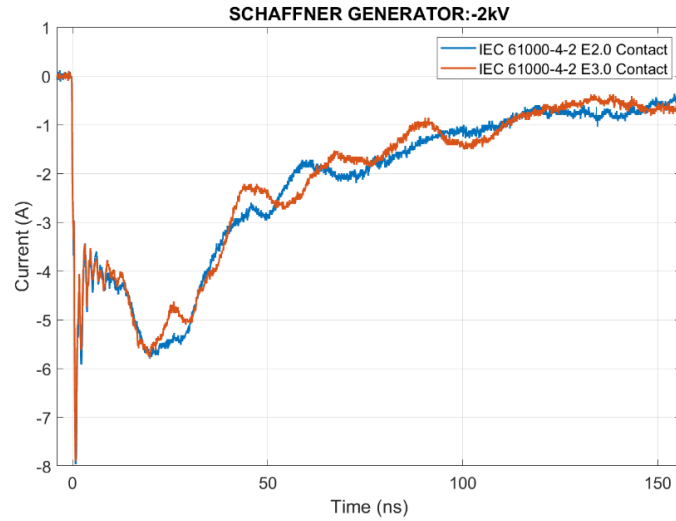
Εικόνα 4.34: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +8kV.



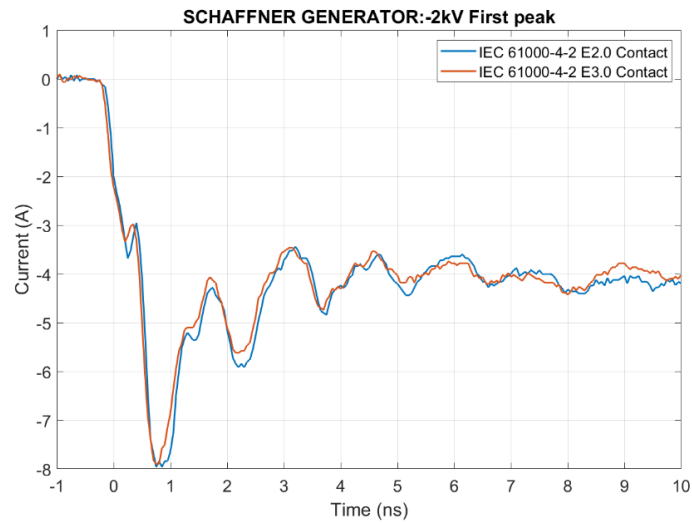
Εικόνα 4.35: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.



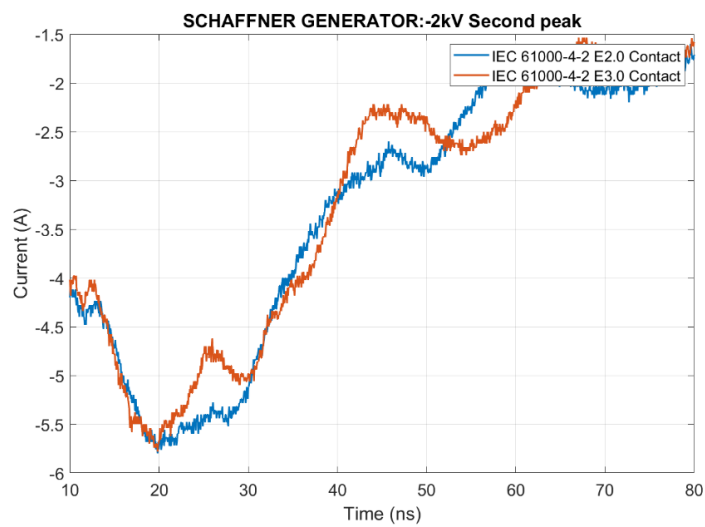
Εικόνα 4.36: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.



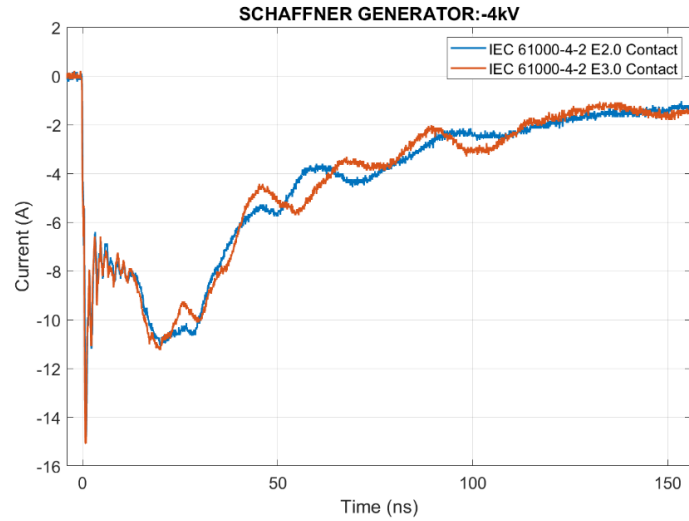
Εικόνα 4.37: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -2kV.



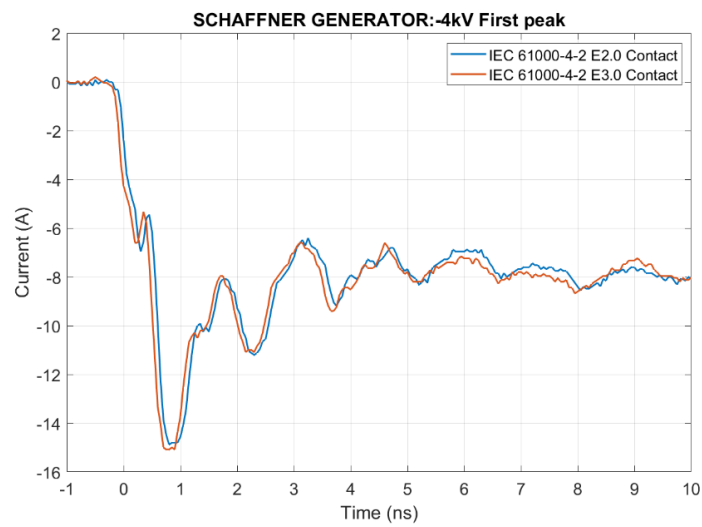
Εικόνα 4.38: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.



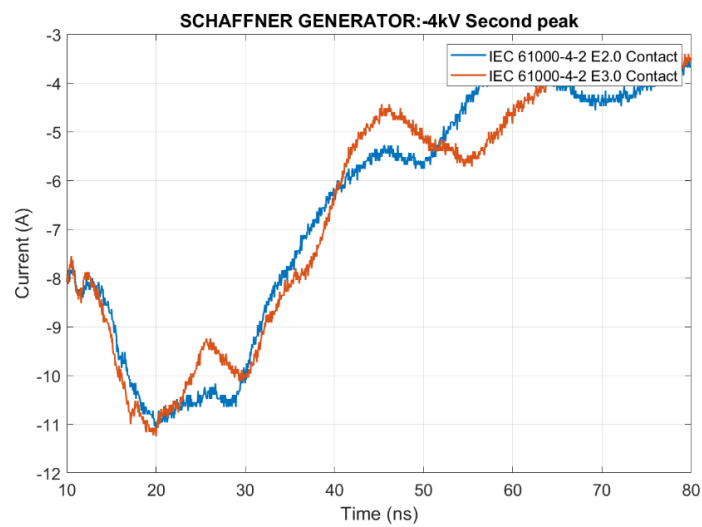
Εικόνα 4.39: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.



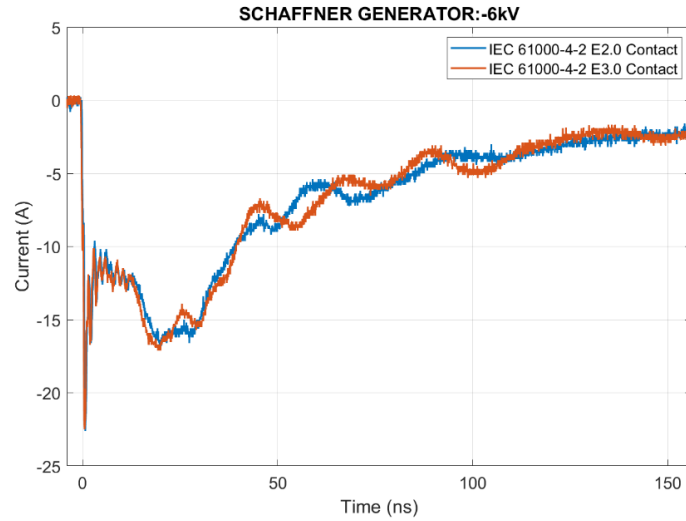
Εικόνα 4.40: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -4kV.



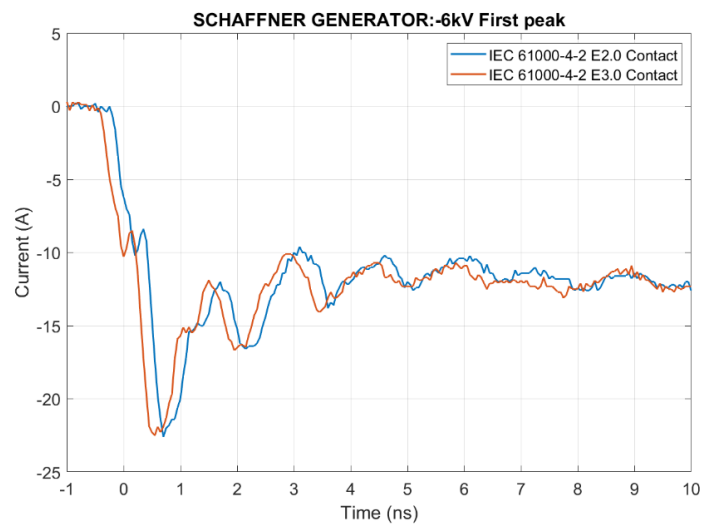
Εικόνα 4.41: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.



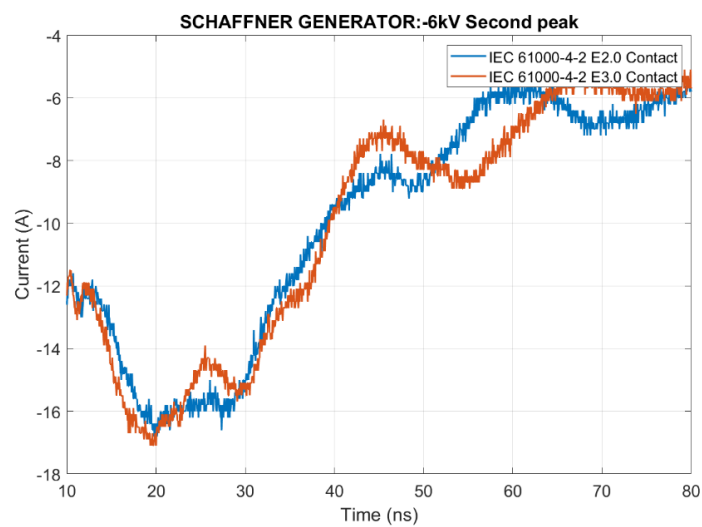
Εικόνα 4.42: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.



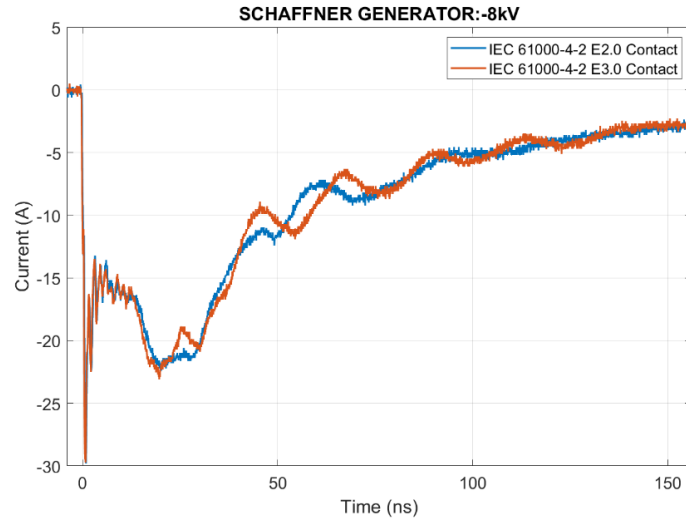
Εικόνα 4.43: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -6kV.



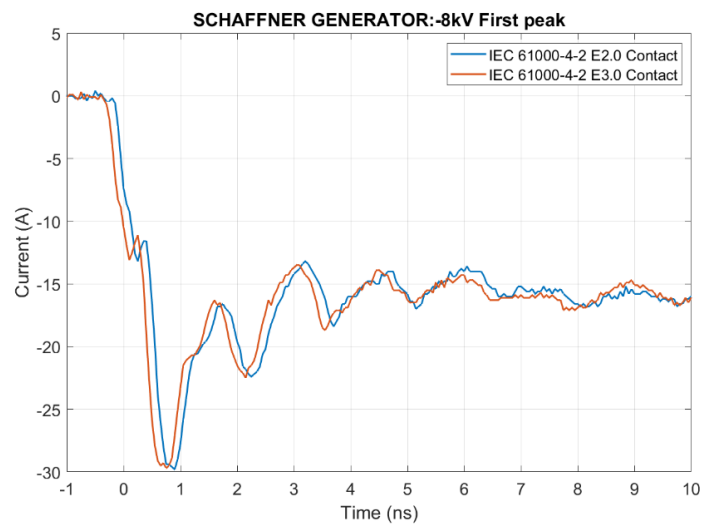
Εικόνα 4.44: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.



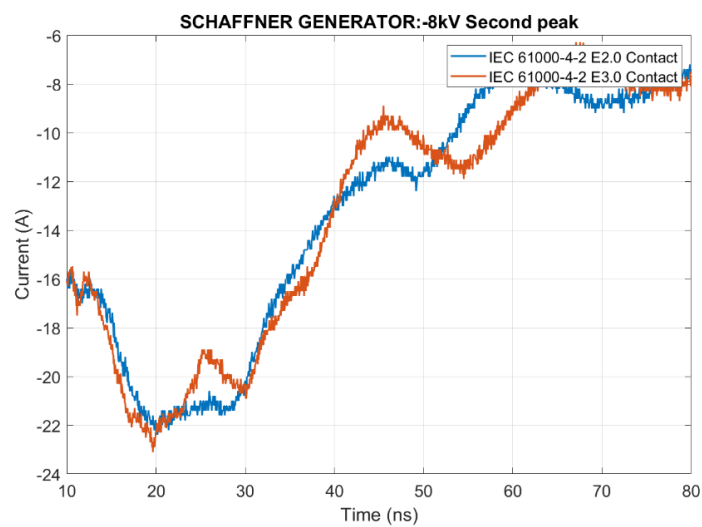
Εικόνα 4.45: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.



Εικόνα 4.46: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -8kV.



Εικόνα 4.47: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.



Εικόνα 4.48: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.

Πίνακας 4.11. Μέσες τιμές των I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_p ED 2 Επαφής (A)	I_p ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]
+2 kV	6.375 - 8.625	7.648	7.9080	3.4322
-2 kV	-8.625 - -6.375	-8.072	-7.9200	1.8586
+4 kV	12.75 - 17.25	14.984	15.1520	1.1505
-4 kV	12.75 - 17.25	-15.032	-15.2880	-1.7211
+6 kV	19.125 - 25.875	22.560	22.8000	1.0795
-6 kV	19.125 - 25.875	-22.480	-22.6000	-0.5571
+8 kV	25.5 - 34.5	29.920	30.2400	1.0820
-8 kV	25.5 - 34.5	-29.780	-29.7800	-0.0025

Πίνακας 4.12. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_p ED 2 - Επαφής [%]	I_p ED 3 - Επαφής [%]
+2 kV	0.6384	0.5172
-2 kV	-0.4776	-0.4002
+4 kV	0.4974	0.3358
-4 kV	-0.4080	-0.4821
+6 kV	0.4137	0.3460
-6 kV	-0.4439	-0.3298
+8 kV	0.3755	0.4275
-8 kV	-0.3533	-0.4500

Πίνακας 4.13. Μέσες τιμές των χρόνων ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	t_r ED 2 Επαφής (A)	t_r ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]
+2 kV	0.6 – 1	0.7255	0.7271	0.2340
-2 kV	0.6 – 1	0.7349	0.7276	0.9619
+4 kV	0.6 – 1	0.7322	0.7359	0.5149
-4 kV	0.6 – 1	0.7389	0.7394	-0.0762
+6 kV	0.6 – 1	0.7389	0.7481	1.2703
-6 kV	0.6 – 1	0.7442	0.7478	-0.5364
+8 kV	0.6 - 1	0.7404	0.7517	1.5502
-8 kV	0.6 - 1	0.7542	0.7459	1.0821

Πίνακας 4.14. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	t_r ED 2 - Επαφής [%]	t_r ED 3 - Επαφής [%]
+2 kV	0.3095	0.4355
-2 kV	0.3755	0.5739
+4 kV	0.4450	0.5333
-4 kV	0.4314	0.4294
+6 kV	0.5035	0.5113
-6 kV	0.7069	0.5244
+8 kV	0.5118	0.5361
-8 kV	0.5511	0.3452

Πίνακας 4.15. Μέσες τιμές των I_{p2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{p2} ED 2 Επαφής (A)	I_{p2} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]
+2 kV	3.15 - 5.85	5.5280	5.7360	3.7670
-2 kV	-5.85 - -3.15	-5.8240	-5.7880	0.6174
+4 kV	6.3 - 11.7	11.0080	11.2640	2.3279
-4 kV	-11.7 - -6.3	-11.0000	-11.2960	-2.7000
+6 kV	9.45 - 17.55	16.9000	17.3600	2.7269
-6 kV	-17.55 - -9.45	-16.9800	-17.2800	-1.7711
+8 kV	12.6 - 23.4	22.5400	23.0000	2.0417
-8 kV	-23.4 - -12.6	-22.3800	-22.8800	-2.2366

Πίνακας 4.16. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{p2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{p2} ED 2 - Επαφής [%]	I_{p2} ED 3 - Επαφής [%]
+2 kV	0.2653	0.2371
-2 kV	0.1832	0.2008
+4 kV	0.1938	0.1772
-4 kV	0.2235	0.2803
+6 kV	0.1972	0.2304
-6 kV	0.2748	0.2078
+8 kV	0.1355	0.3175
-8 kV	0.1604	0.2040

Πίνακας 4.17. Μέσες τιμές των I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{30} ED 2 Επαφής (A)	I_{30} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]
+2 kV	2.8 – 5.2	4.9354	5.1185	3.7291
-2 kV	-5.2 - -2.8	-5.1480	-5.0715	1.4822
+4 kV	5.6 – 10.4	10.0219	10.1742	1.5269
-4 kV	-10.4 - -5.6	-9.8518	-10.0047	-1.5626
+6 kV	8.4 – 15.6	15.3674	15.4956	0.8400
-6 kV	-15.6 - -8.4	-15.2476	-15.3347	-0.5929
+8 kV	11.2 – 20.8	20.6199	20.7224	0.5065
-8 kV	-20.8 - -11.2	-20.3152	-20.4840	-0.8329

Πίνακας 4.18. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{30} ED 2 - Επαφής [%]	I_{30} ED 3 - Επαφής [%]
+2 kV	0.5017	0.3654
-2 kV	0.2700	0.3491
+4 kV	0.3261	0.2033
-4 kV	0.3278	0.1776
+6 kV	0.3080	0.4389
-6 kV	0.4321	0.3261
+8 kV	0.2836	0.2499
-8 kV	0.1542	0.2050

Πίνακας 4.19. Μέσες τιμές των I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{60} ED 2 Επαφής (A)	I_{60} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]
+2 kV	1.4 – 2.6	1.7216	1.9473	13.1712
-2 kV	-2.6 - -1.4	-1.9601	-2.2263	-14.1575
+4 kV	2.8 – 5.2	3.6936	4.2598	15.3274
-4 kV	-5.2 - -2.8	-3.8259	-4.6760	-22.2571
+6 kV	4.2 – 7.8	5.8224	6.8393	17.5688
-6 kV	-7.8 - -4.2	-6.0020	-7.1823	-19.7322
+8 kV	5.6 – 10.4	7.6385	8.7025	13.9721
-8 kV	-10.4 - -5.6	-7.6784	-8.7668	-14.2238

Πίνακας 4.20. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{60} ED 2 - Επαφής [%]	I_{60} ED 3 - Επαφής [%]
+2 kV	0.9088	0.9687
-2 kV	2.2354	0.7291
+4 kV	0.8074	1.3145
-4 kV	0.6735	0.4632
+6 kV	0.9304	1.0623
-6 kV	0.7489	1.3425
+8 kV	0.6204	0.6853
-8 kV	0.8814	1.1069

Παρατηρώντας τα γραφήματα και τις μετρήσεις, και με σύγκριση των μετρούμενων παραμέτρων με τα όρια ανοχής του Προτύπου, προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

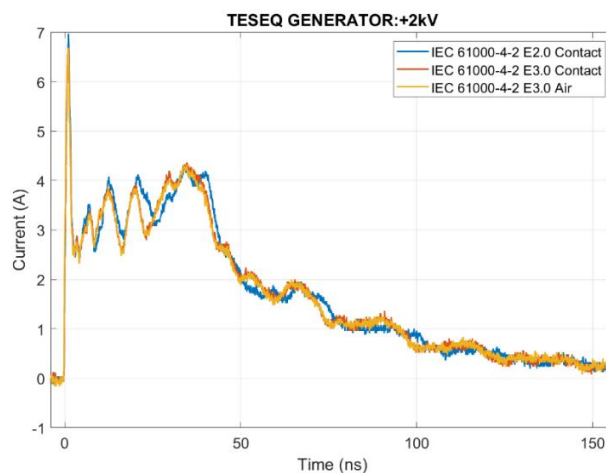
- Οι μέσες τιμές του I_p επαφής σύμφωνα με τη νέα έκδοση του Προτύπου παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις από τις μέσες τιμές σύμφωνα με την εν ενεργεία έκδοση και παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής. Το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές του I_p για τις εκφορτίσεις αέρος. Όμως, συγκρίνοντας τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας του I_p παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων.
- Οι μέσες τιμές του χρόνου ανόδου t_r για μετρήσεις επαφής με τη νέα έκδοση παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις συγκριτικά με τις μέσες τιμές της εν ενεργεία έκδοσης και παραμένουν όλες μέσα στα όρια ανοχής. Το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές t_r αέρα. Συγκρίνοντας τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας παρατηρούνται αρκετές αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων.
- Στην ανάλυση της παραμέτρου I_{p2} παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των μέσων τιμών για κάθε επίπεδο τάσης είναι εντός ορίων ανοχής, τόσο για τη νέα όσο και για την εν ενεργεία έκδοση. Παρατηρείται επίσης μικρή απόκλιση των τιμών μεταξύ των δύο εκδόσεων. Τέλος, δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις για τις τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας των μετρήσεων αυτών.
- Οι μέσες τιμές του I_{30} για μετρήσεις επαφής και αέρος με τη νέα έκδοση παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις συγκριτικά με τις αντίστοιχες της εν ενεργεία

έκδοσης και παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής. Δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις για τις τιμές αβεβαιότητας επαναληψιμότητας μεταξύ των δύο εκδόσεων.

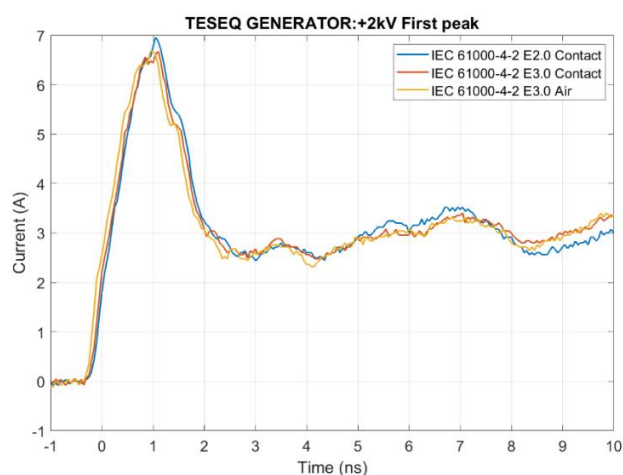
- Οι μέσες τιμές του I60 στις δοκιμές επαφής και αέρα παραμένουν εντός ορίων ανοχής. Δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων του προτύπου.. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας που τους αντιστοιχούν.

4.3. Αποτελέσματα για την Γεννήτρια NSG-438(SCHAFFNER)

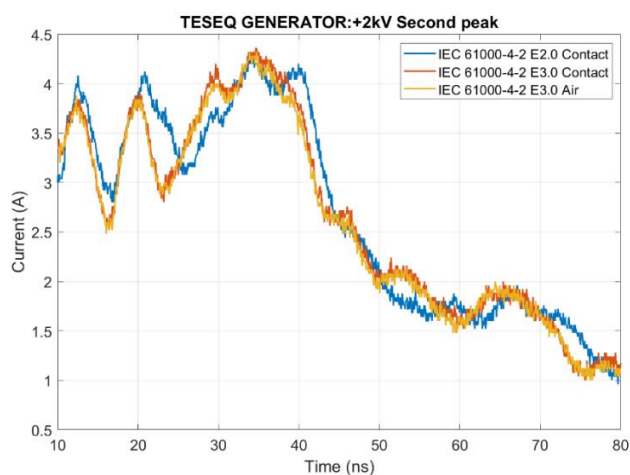
Ακολουθούν τα γραφήματα και οι μετρήσεις που πήραμε για τη γεννήτρια NSG-438 (SCHAFFNER).



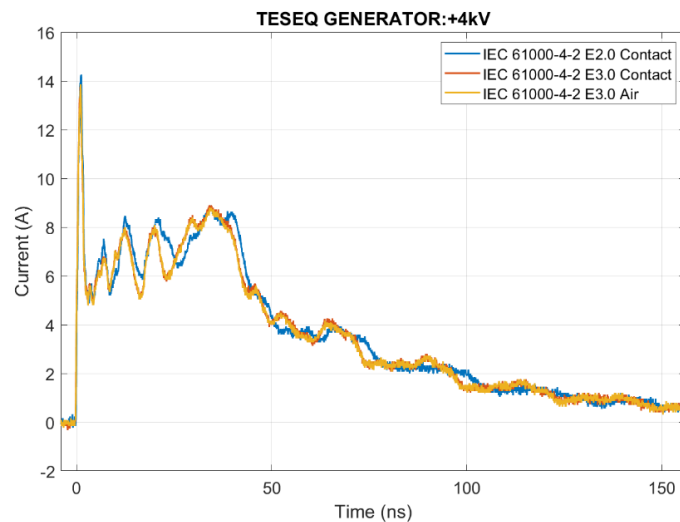
Εικόνα 4.49: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +2kV.



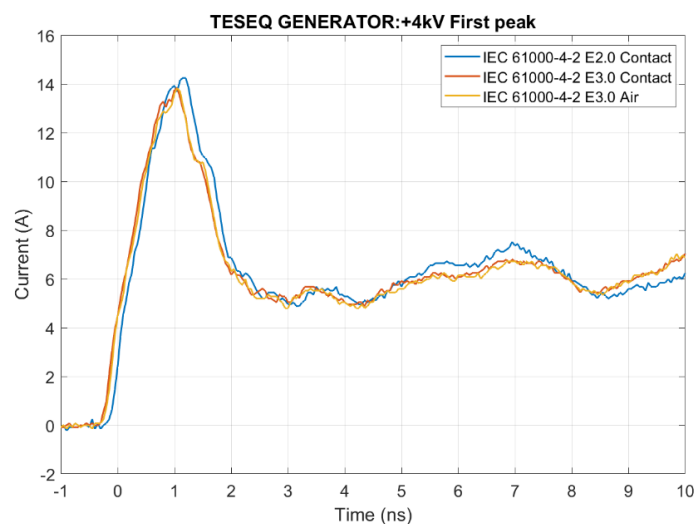
Εικόνα 4.50: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.



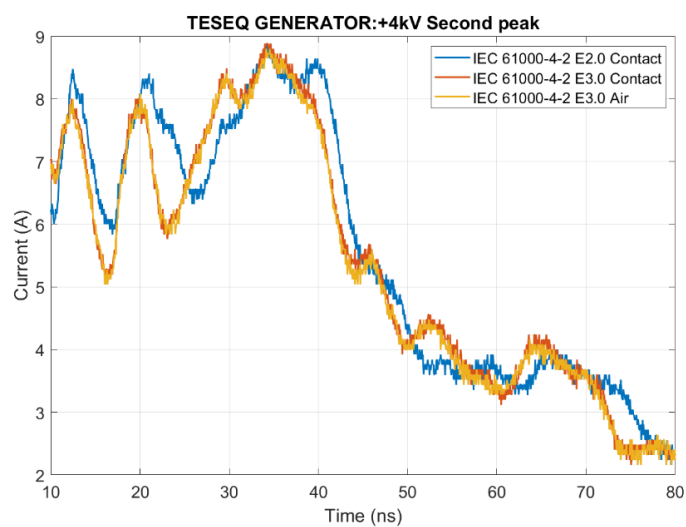
Εικόνα 4.51: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +2kV.



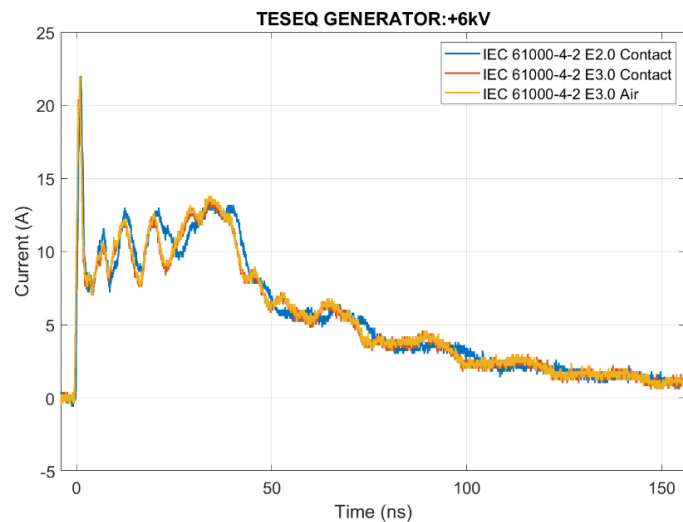
Εικόνα 4.52: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +4kV.



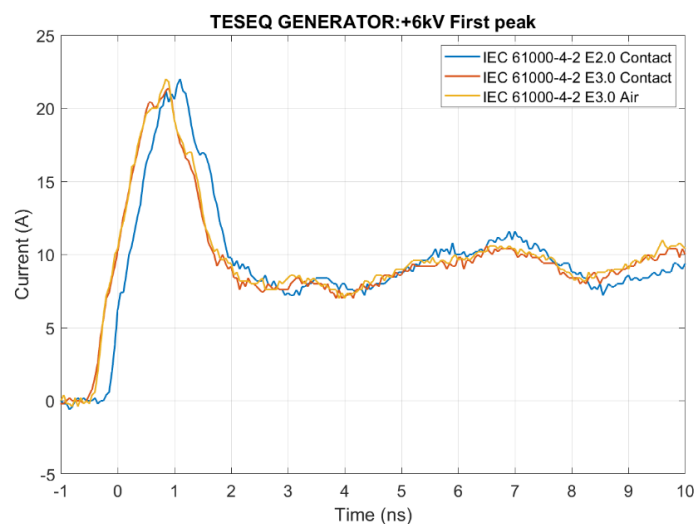
Εικόνα 4.53: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.



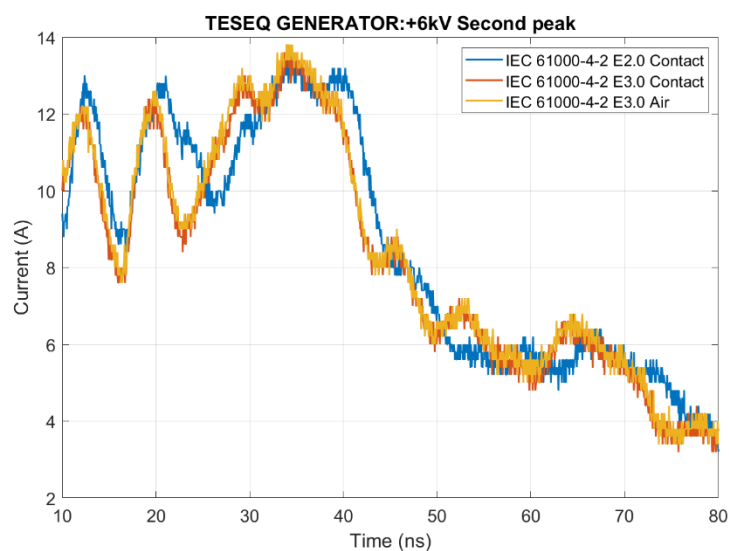
Εικόνα 4.54: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +4kV.



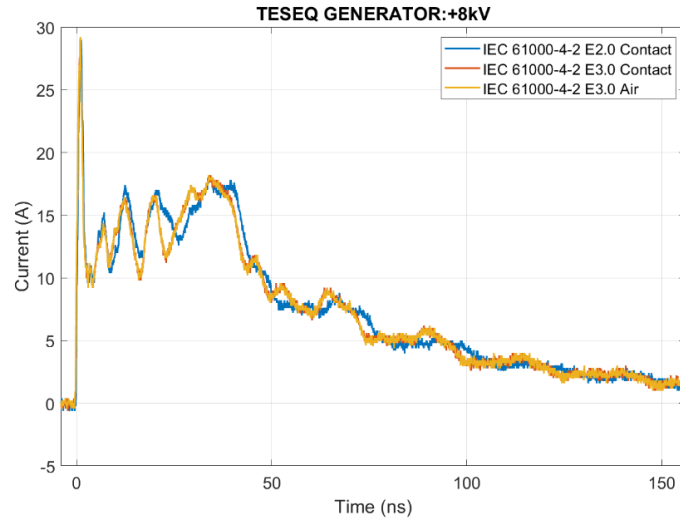
Εικόνα 4.55: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +6kV.



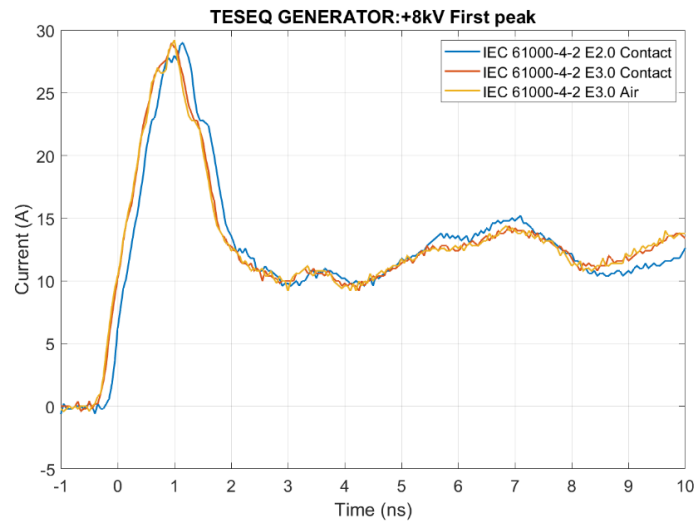
Εικόνα 4.56: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.



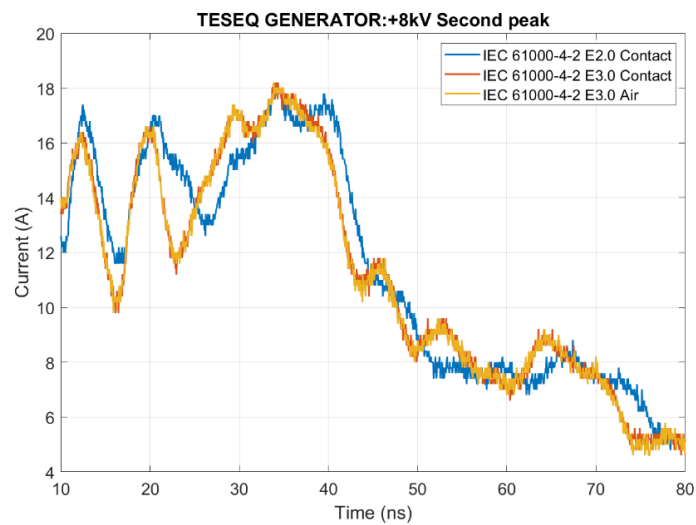
Εικόνα 4.57: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +6kV.



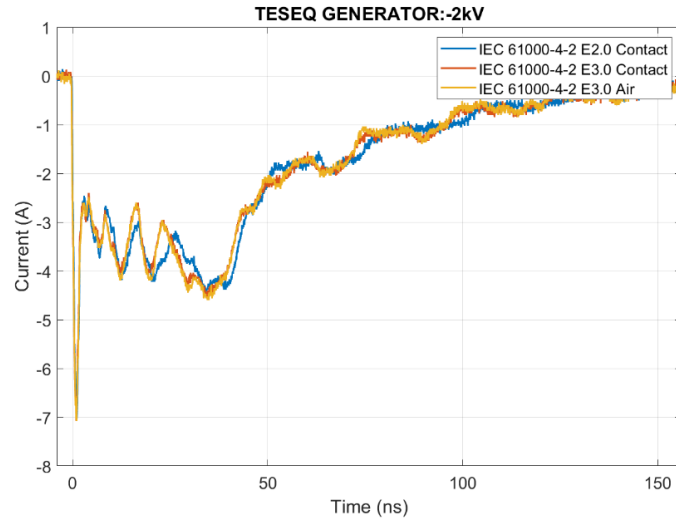
Εικόνα 4.58: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα +8kV.



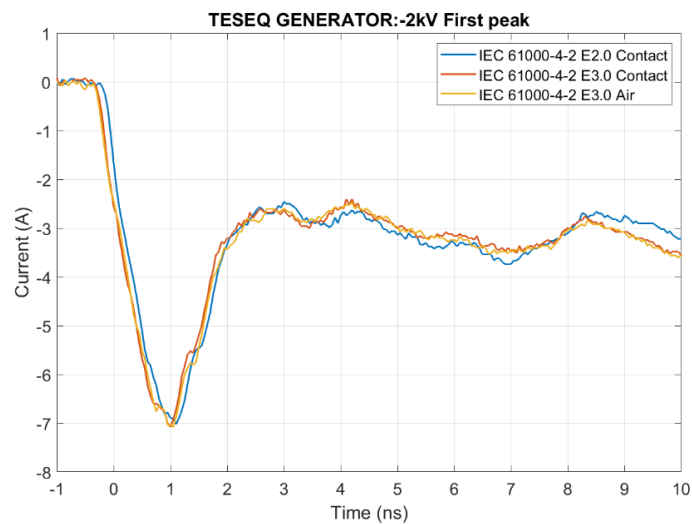
Εικόνα 4.59: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.



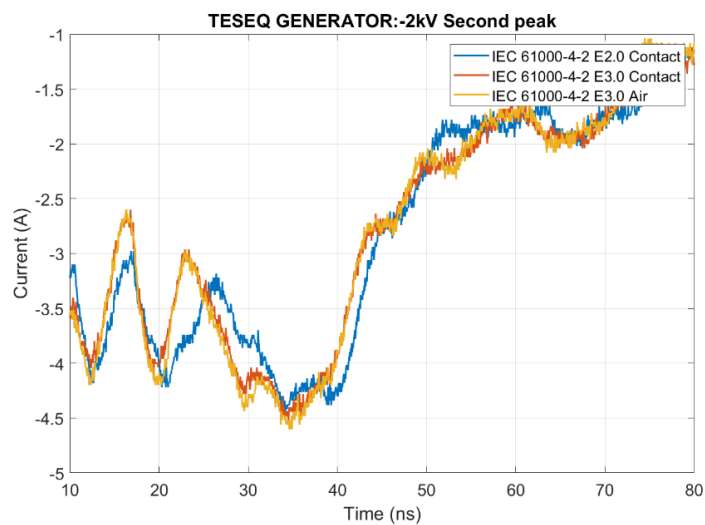
Εικόνα 4.60: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα +8kV.



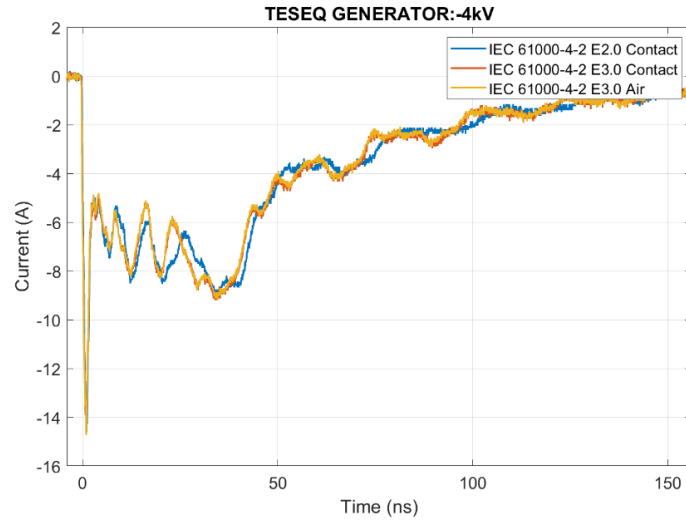
Εικόνα 4.61: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -2kV.



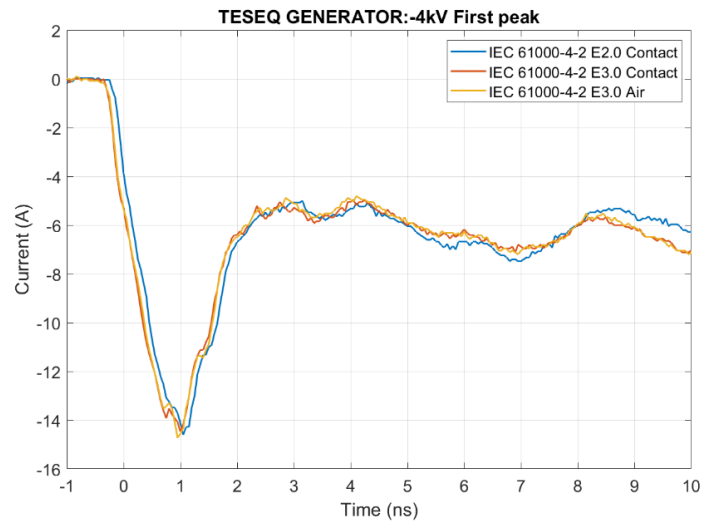
Εικόνα 4.62: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.



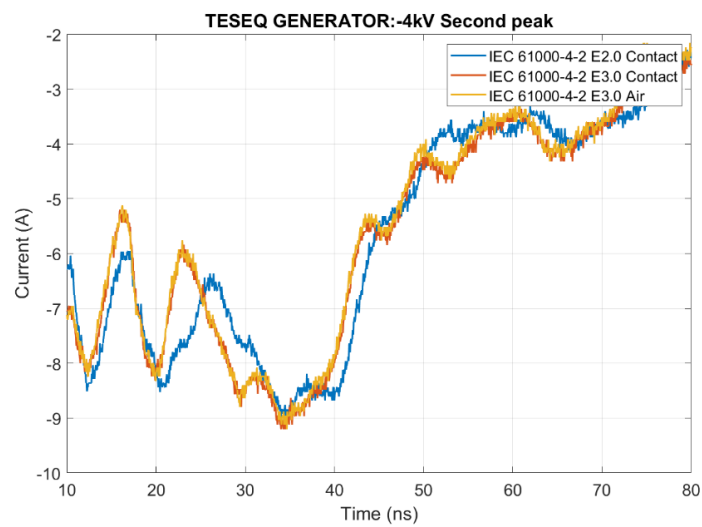
Εικόνα 4.63: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -2kV.



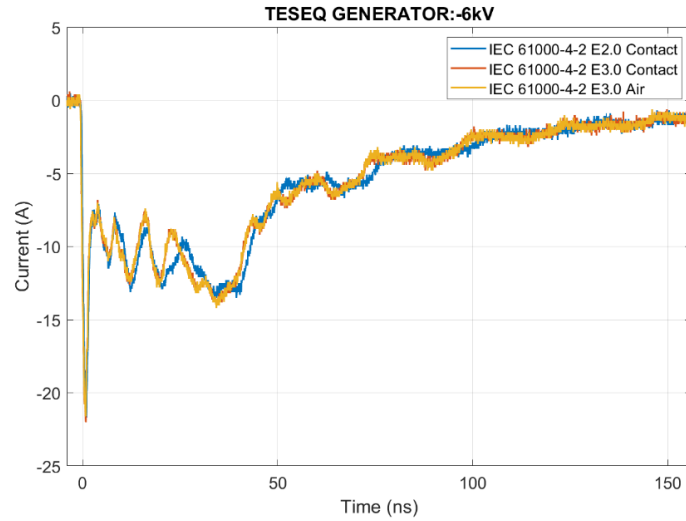
Εικόνα 4.64: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -4kV.



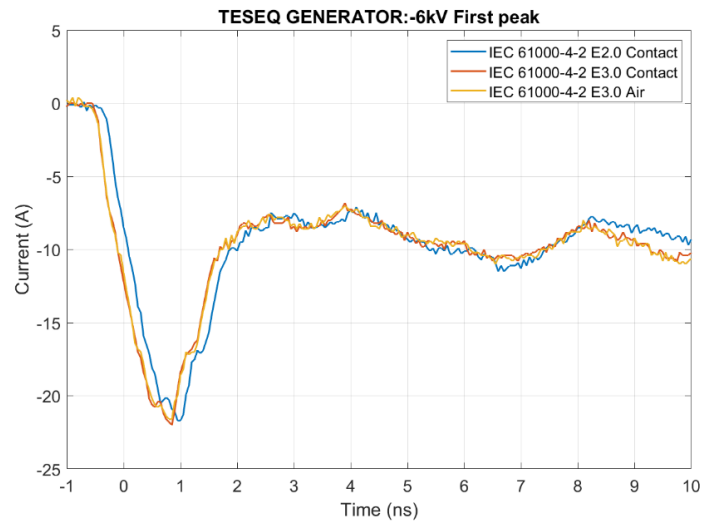
Εικόνα 4.65: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.



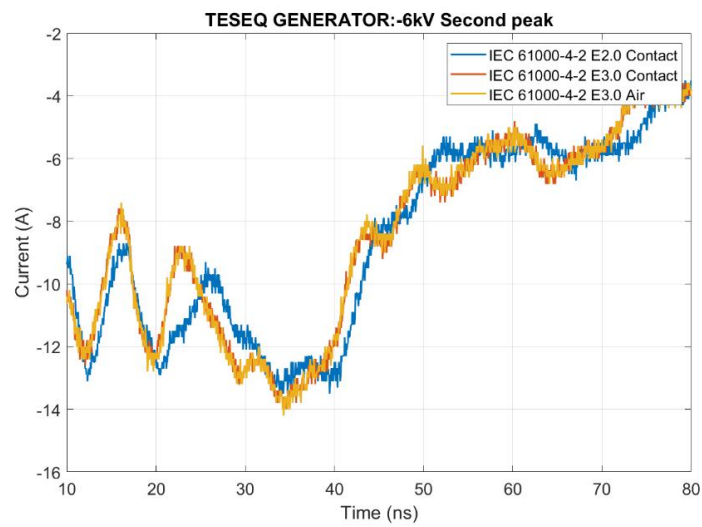
Εικόνα 4.66: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -4kV.



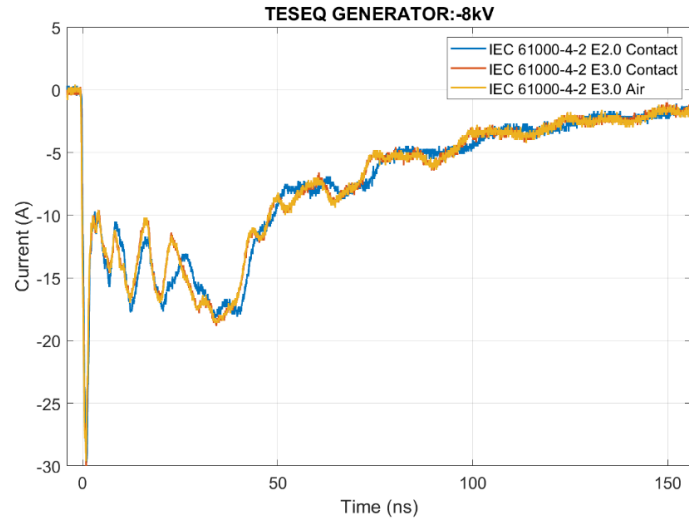
Εικόνα 4.67: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -6kV.



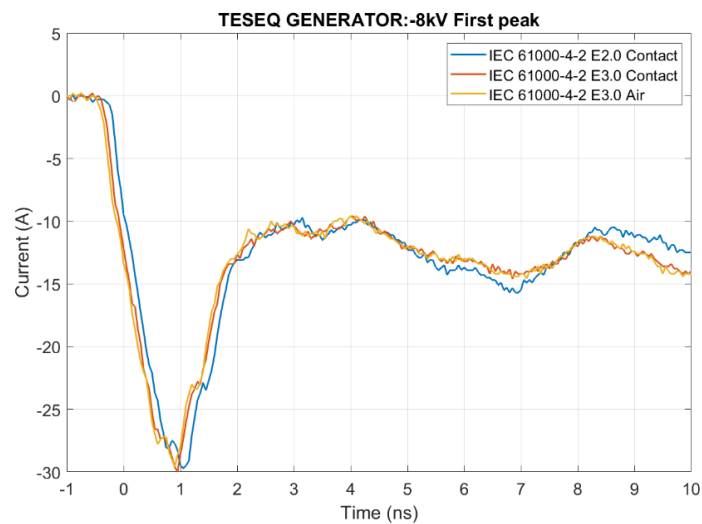
Εικόνα 4.68: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.



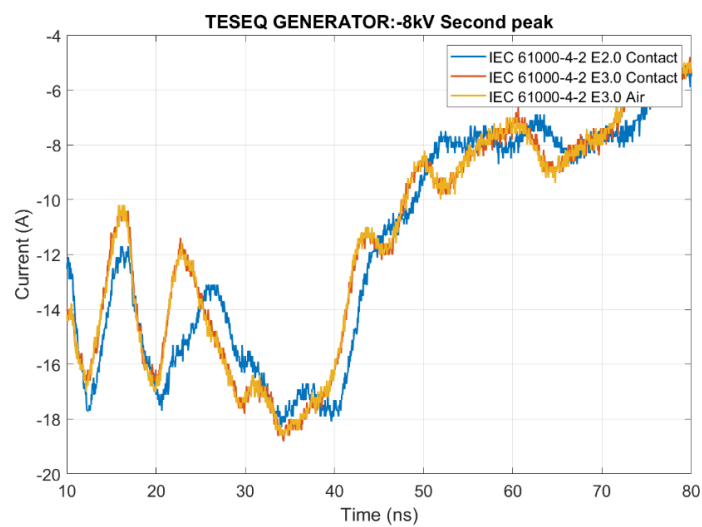
Εικόνα 4.69: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -6kV.



Εικόνα 4.70: Σύγκριση των κυματομορφών για τις εκδόσεις E2.0 και E3.0 του Προτύπου IEC 61000-4-2, στα -8kV.



Εικόνα 4.71: Σύγκριση της πρώτης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.



Εικόνα 4.72: Σύγκριση της δεύτερης κορυφής των κυματομορφών στα -8kV.

Πίνακας 4.21. Μέσες τιμές των I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_p ED 2 Επαφής (A)	I_p ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_p ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	6.375 - 8.625	6.9120	6.6880	-3.2260	6.6440	-3.8602
-2 kV	-8.625 - -6.375	-7.0360	-6.9920	-0.6200	-7.3840	-4.9543
+4 kV	12.75 - 17.25	14.1360	13.7440	-2.7710	13.8560	-1.9711
-4 kV	12.75 - 17.25	-14.3840	-14.1120	-1.8752	-14.7600	-2.6405
+6 kV	19.125 - 25.875	21.6200	21.6400	0.1165	21.7600	0.6594
-6 kV	19.125 - 25.875	-21.7000	-20.9200	3.6043	-21.9000	-0.9420
+8 kV	25.5 - 34.5	28.9200	29.1000	0.6372	28.9400	0.0857
-8 kV	25.5 - 34.5	-29.4800	-29.3800	-0.3256	-29.5200	-0.1574

Πίνακας 4.22. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_p και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_p ED 2 - Επαφής [%]	I_p ED 3 - Επαφής [%]	I_p ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.3319	0.7009	0.3958
-2 kV	-0.2836	-0.5243	-0.7796
+4 kV	0.2240	0.3338	0.4619
-4 kV	-0.4838	-0.5867	-0.5435
+6 kV	0.4458	0.3848	0.3300
-6 kV	-0.4345	-0.7251	-0.3910
+8 kV	0.4517	0.2943	0.4377
-8 kV	-0.4573	-0.5600	-0.2892

Πίνακας 4.23. Μέσες τιμές των χρόνων ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	t_r ED 2 Επαφής (A)	t_r ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	t_r ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	0.6 - 1	0.8502	0.8543	0.5129	0.8464	-0.4315
-2 kV	0.6 - 1	0.8469	0.8551	-0.9949	0.8917	-5.2590
+4 kV	0.6 - 1	0.8549	0.8591	0.5340	0.8543	0.0189
-4 kV	0.6 - 1	0.8590	0.8559	0.3449	0.8733	-1.6920
+6 kV	0.6 - 1	0.8480	0.8573	1.1236	0.8988	5.9760
-6 kV	0.6 - 1	0.8570	0.8675	-1.2290	0.8649	-0.9311
+8 kV	0.6 - 1	0.8572	0.8678	1.2381	0.8694	1.4380
-8 kV	0.6 - 1	0.8645	0.8591	0.5215	0.8754	-1.4275

Πίνακας 4.24. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του χρόνου ανόδου και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	t_r ED 2 - Επαφής [%]	t_r ED 3 - Επαφής [%]	t_r ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.5446	0.8917	0.7080
-2 kV	0.4585	0.6577	2.2710
+4 kV	0.9547	0.6251	0.4829
-4 kV	0.5382	0.4998	0.4554
+6 kV	0.5192	0.5331	2.0188
-6 kV	0.3175	0.9026	0.5051
+8 kV	0.3398	0.6641	0.6676
-8 kV	1.2292	0.6911	0.8863

Πίνακας 4.25. Μέσες τιμές των I_{P2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{P2} ED 2 Επαφής (A)	I_{P2} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_{P2} ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	3.15 - 5.85	4.3200	4.3760	1.3100	4.3000	-0.4453
-2 kV	-5.85 - -3.15	-4.4400	-4.5280	-1.9898	-4.6280	-4.2402
+4 kV	6.3 - 11.7	8.7840	8.8480	0.7356	8.9280	1.6498
-4 kV	-11.7 - -6.3	-8.9840	-9.1440	-1.7873	-9.1760	-2.1401
+6 kV	9.45 - 17.55	13.6600	13.8800	1.6134	13.9000	1.7626
-6 kV	-17.55 - -9.45	-13.6600	-13.4720	1.3635	-14.1800	-3.8130
+8 kV	12.6 - 23.4	18.0600	18.3800	1.7802	18.2400	1.0000
-8 kV	-23.4 - -12.6	-18.2800	-18.8400	-3.0668	-18.8600	-3.1773

Πίνακας 4.26. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{P2} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{P2} ED 2 - Επαφής [%]	I_{P2} ED 3 - Επαφής [%]	I_{P2} ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.4141	0.3393	0.1550
-2 kV	0.2421	0.3172	0.3656
+4 kV	0.3270	0.3074	0.4666
-4 kV	0.2221	0.2625	0.2270
+6 kV	0.2237	0.3186	0.3217
-6 kV	0.2928	0.6015	0.2532
+8 kV	0.2364	0.3013	0.1462
-8 kV	0.1964	0.2648	0.2263

Πίνακας 4.27. Μέσες τιμές των I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{30} ED 2 Επαφής (A)	I_{30} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_{30} ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	2.8 – 5.2	3.7117	4.0193	8.3093	3.9906	7.5438
-2 kV	-5.2 - -2.8	-3.8141	-4.1904	-9.8717	-4.3072	-12.9365
+4 kV	5.6 – 10.4	7.5572	8.2034	8.5536	8.3245	10.1574
-4 kV	-10.4 - -5.6	-7.6365	-8.4164	-10.2177	-8.5549	-12.0435
+6 kV	8.4 – 15.6	11.6362	12.7908	9.9615	12.8641	10.5763
-6 kV	-15.6 - -8.4	-11.7183	-12.4563	-6.3162	-13.0003	-10.9652
+8 kV	11.2 – 20.8	15.5608	17.0770	9.7532	17.1658	10.3228
-8 kV	-20.8 - -11.2	-15.8282	-17.3824	-9.8322	-17.4636	-10.3416

Πίνακας 4.28. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{30} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{30} ED 2 - Επαφής [%]	I_{30} ED 3 - Επαφής [%]	I_{30} ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.4555	0.4390	0.4229
-2 kV	0.2598	0.2676	0.3124
+4 kV	0.2160	0.3564	0.5945
-4 kV	0.3490	0.3832	0.3399
+6 kV	0.5926	0.4208	0.5275
-6 kV	0.4589	0.7176	0.5102
+8 kV	0.2721	0.2706	0.3516
-8 kV	0.2818	0.3409	0.2966

Πίνακας 4.29. Μέσες τιμές των I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	Όρια ανοχής Προτύπου (A)	I_{60} ED 2 Επαφής (A)	I_{60} ED 3 Επαφής (A)	Απόκλιση (ED3 επαφής - ED2 επαφής) [%]	I_{60} ED 3 Αέρος (A)	Απόκλιση (ED3 Αέρος - ED2 Επαφής) [%]
+2 kV	1.4 – 2.6	1.6894	1.6168	-4.2412	1.5695	-7.0603
-2 kV	-2.6 - -1.4	-1.7964	-1.7184	4.2250	-1.6724	6.7899
+4 kV	2.8 – 5.2	3.6119	3.3974	-5.9419	3.4541	-4.3406
-4 kV	-5.2 - -2.8	-3.6853	-3.5200	4.4712	-3.4705	5.7876
+6 kV	4.2 – 7.8	5.8328	5.3531	-8.1972	5.3323	-8.5412
-6 kV	-7.8 - -4.2	-5.8596	-5.1662	11.8107	-5.4247	7.3697
+8 kV	5.6 – 10.4	7.7090	7.2217	-6.2944	7.3178	-5.0432
-8 kV	-10.4 - -5.6	-7.9857	-7.3075	8.4667	-7.3031	8.5291

Πίνακας 4.30. Τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας του I_{60} και απόκλιση μεταξύ των εκδόσεων 2 και 3 του Προτύπου IEC 61000-4-2 για κάθε επίπεδο τάσης

Επίπεδο δοκιμής	I_{60} ED 2 - Επαφής [%]	I_{60} ED 3 - Επαφής [%]	I_{60} ED 3 - Αέρος [%]
+2 kV	0.7936	0.5704	0.9899
-2 kV	1.0062	0.8189	0.9243
+4 kV	0.5441	1.1770	0.3861
-4 kV	0.6351	0.8680	0.7873
+6 kV	0.6221	1.1112	1.0450
-6 kV	0.5363	4.0208	1.2559
+8 kV	0.6341	0.7256	0.7321
-8 kV	0.5642	0.5953	0.6492

Παρατηρώντας τα γραφήματα και τις μετρήσεις, και ελέγχοντας αν οι τιμές βρίσκονται μέσα στα όρια ανοχής του προτύπου, προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Οι μέσες τιμές του I_p επαφής σύμφωνα με τη νέα έκδοση του Προτύπου παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις από τις μέσες τιμές σύμφωνα με την εν ενεργεία έκδοση και παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής. Το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές του I_p για τις εκφορτίσεις αέρος. Συγκρίνοντας όμως τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας του I_p παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων.
- Οι μέσες τιμές του χρόνου ανόδου t_r για μετρήσεις επαφής με τη νέα έκδοση παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις συγκριτικά με τις μέσες τιμές της εν ενεργεία έκδοσης και παραμένουν όλες μέσα στα όρια ανοχής. Το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές t_r αέρα. Συγκρίνοντας τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων.
- Για τα αποτελέσματα της παραμέτρου I_{p2} παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των μέσω τιμών για κάθε επίπεδο τάσης είναι εντός ορίων ανοχής, τόσο για τη νέα όσο και για την εν ενεργεία έκδοση. Παρατηρείται επίσης ελάχιστη απόκλιση των τιμών μεταξύ των δύο εκδόσεων. Τέλος, παρατηρούνται κάποιες μικρές αποκλίσεις για τις τιμές της αβεβαιότητας επαναληψιμότητας των μετρήσεων αυτών.
- Οι μέσες τιμές του I_{30} για μετρήσεις επαφής και αέρος με τη νέα έκδοση παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις συγκριτικά με τις αντίστοιχες της εν ενεργεία έκδοσης αλλά παραμένουν όλες εντός των ορίων ανοχής. Επίσης, παρατηρούνται

σημαντικές αποκλίσεις για τις τιμές αβεβαιότητας επαναληψιμότητας μεταξύ των δύο εκδόσεων.

- Οι μέσες τιμές του I_{60} στις δοκιμές επαφής και αέρα παραμένουν εντός ορίων ανοχής. Όμως, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των δύο εκδόσεων του Προτύπου. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές των αβεβαιοτήτων επαναληψιμότητας που τους αντιστοιχούν.

Κεφάλαιο 5: Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά τη διεξαγωγή της διακρίβωσης διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με την νέα έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2, αλλά και την εν ενεργεία έκδοση με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδοσή τους. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι με την εισαγωγή της παραμέτρου I_{P2} συγκεκριμένες γεννήτριες θα κριθούν ακατάλληλες για την διεξαγωγή της σχετικής δοκιμής ατρωσίας (EMTEST DITO) και θα απαιτηθεί είτε αντικατάστασή τους ή τροποποίησή τους από τον κατασκευαστή.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι η απαίτηση για την παρουσία οριζόντιας μεταλλικής πλάκας στην έκδοση 3 του Προτύπου δεν επηρεάζει σημαντικά τις παραμέτρους και την μορφή της πρώτης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης. Αντιθέτως τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις μετρήσεις των παραμέτρων I_{30} και I_{60} , οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στην διαφοροποίηση της εμπέδησης του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος λόγω της παρουσίας της οριζόντιας πλάκας. Σχετικά με τις αβεβαιότητες, οι τιμές που προκύπτουν είναι μικρές, τόσο ακολουθώντας τόσο σύμφωνα με την 2^η όσο και με την 3^η έκδοση του Προτύπου. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά ήταν σε μεγάλο βαθμό αναμενόμενη και οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Οι αλλαγές που παρουσιάστηκαν στη παρούσα εργασία μεταξύ των δύο Προτύπων έχουν σαν στόχο τη μείωση της αναπαραγωγιμότητας περιορίζοντας κατά το δυνατόν διαφοροποιήσεις είτε μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων διακρίβωσης (interlaboratory reproducibility) είτε μεταξύ των διαφορετικών χειριστών εντός του εκάστοτε εργαστηρίου. Η κυματομορφή του ρεύματος της εκφόρτισης επαφής επηρεάζεται από το περιβάλλον διακρίβωσης. Σύμφωνα με έρευνα [12], στο πλαίσιο της οποίας πραγματοποιήθηκαν διακριβώσεις μιας συγκεκριμένης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε διαφορετικά εργαστήρια διακρίβωσης στην Ευρώπη, παρατηρήθηκαν διαφορές στη μετρούμενη κυματομορφή της δεύτερης κορυφής του ρεύματος και η ακόλουθη έλλειψη προδιαγραφών περιβάλλοντος διακρίβωσης επιβεβαιώθηκαν ως ο λόγος για τις διαφορές και οδήγησαν στην εισαγωγή των καινούργιων απαιτήσεων:

- Το ύψος του τρέχοντος στόχου από το πάτωμα δεν ήταν προσδιορισμένο
- Η ύπαρξη της πλάκας γείωσης στο έδαφος δεν αναφερόταν

- Καθορισμένη τοποθέτηση του καλωδίου εκφόρτισης
- Καθορισμός ορίων των τιμών I_{p2}

Ενώ οι συγκεκριμένες προσθήκες αναμένεται να μειώσουν την αβεβαιότητα αναπαραγωγιμότητας της διαδικασίας διακρίβωσης η σημαντική επίδραση του καλωδίου επιστροφής του ρεύματος στην αναπαραγωγιμότητα της δοκιμής ακόμα δεν έχει εκτιμηθεί επαρκώς από την αρμόδια τεχνική επιτροπή [13, 14]. Ως μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας προτείνεται να διεξαχθεί διεργαστηριακή σύγκριση αποτελεσμάτων διακρίβωσης σύμφωνα με τις δύο εκδόσεις του Προτύπου προς επιβεβαίωση της βελτιώσης της αναπαραγωγιμότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons.
- [2] Paul, C. R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons.
- [3] International Electrotechnical Commission. (2025). IEC 61000-4-2:2025 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test (Edition 3.0). Geneva, Switzerland: IEC.
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC). (n.d.). CISPR 16-X-X: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. International Special Committee on Radio Interference (CISPR).
- [5] Clayton, R. P. (1995). *Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications*. IEEE Press.
- [6] Μελέτη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και παρεμβολής τηλεπικοινωνιακών διατάξεων, Σωτήριος Κ. Γούδος, 2001
- [7] Greason, W. D. (2006). *Electrostatic Discharge in Electronics*. Wiley.
- [8] Carl T. A. Johnsen, *Electrostatics: Principles, Problems and Applications*. Springer, 2016.
- [9] Paul Lorrain, Dale Corson, *Electromagnetic Fields and Waves*. W. H. Freeman and Company, 1988.
- [10] Παύλος Σ. Κατσίβελης Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.
- [11] JungHo Jin, ChoongPyo Jeon, JinHwan Kim and YuChul Hwang (2016), The reproducibility improving method of system-level ESD test through operating program workload analysis
- [12] K. Muhonen *et al.*, "HMM round robin study: What to expect when testing components to the IEC 61000-4-2 waveform," *Electrical Overstress / Electrostatic Discharge Symposium Proceedings 2012*, Tucson, AZ, USA, 2012, pp. 1-8.

- [13] Takeshi Ishida, Osamu Fujiwara, 2024, Revision Status and further study issue of international standard on system level ESD immunity testing
- [14] Yukihiro Tozawa, Takeshi Ishida, Jiaqing Wang, Osamu Fujiwara, “Influence of Return Current Cable Arrangement on Ringing Damped Oscillations in Contact Discharge Calibration Waveform from ESD Generator”, Proceedings of 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe, 2023
- [15] How to tackle electromagnetic compatability (EMC), Angela Kuster, October 20, 2022.
- [16] Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σε ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα, Π. Κ. Παπασταμάτης, Ε. Π. Νικολοπούλου, Ν. Χ. Ηλία, Β. Θ. Κονταργύρη, Ι. Φ. Γκόνοβ και Ι. Α. Σταθόπουλος
- [17] Μελέτη επίδρασης παραμέτρων προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, Σπυροπούλου Δ. Αγγελική, Σεπτέμβριος 2024
- [18] Teseq, “Transient Immunity Testing, Handy Guide”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.unittest.com/pdf/Transient_immunity_testing_e.pdf
- [19] Comparative analysis of calibration procedures in current and proposed editions of the IEC 61000-4-2 Standard, Panagiotis K. Papastamatis, 2024
- [20] Electromagnetic interference (EMI) and electromagnetic compatability (EMC). Ver Pangonilo, 2024
- [21] StaticWorx. (n.d.). *Glossary: Electrostatic Discharge (ESD)*. Retrieved March 20, 2025, from https://staticworx.com/esd_glossary/electrostatic-discharge/
- [22] Aydem Perakende. (2024). *What is static electricity? How is it formed?* Retrieved March 20, 2025, from <https://www.aydemperakende.com.tr>
- [23] Bobrowsky, M. (2018). *What Is “Static Electricity,” and How Can I See Its Effects?* Retrieved March 20, 2025, from <https://www.scientificamerican.com>
- [24] Guo, L. (2019). Static electricity. NexPCB. Retrieved March 10, 2025, from <https://www.nexpcb.com/blog/static-electricity>.
- [25] J. Yousaf et al., "Efficient Circuit and an EM Model of an Electrostatic Discharge Generator," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 4, Aug. 2018.

- [26] J. Yousaf et al., "Effect of ESD generator ground strap configuration on ESD waveform," 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Seoul, Korea (South), 2017.
- [27] IEC 61000-4-2 ED2. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test. International Electrotechnical Commission.,2008