



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

**Μελέτη επίδρασης παραμέτρων προσομοίωσης μοντέλου
γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ Δ. ΑΓΓΕΛΙΚΗ

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



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

**Μελέτη επίδρασης παραμέτρων προσομοίωσης μοντέλου
γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ Δ. ΑΓΓΕΛΙΚΗ

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος

Χρήστος Α. Χριστοδούλου

Αντώνιος Αντωνόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 27 Σεπτεμβρίου 2024

.....
Αγγελική, Δ. Σπυροπούλου

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

Copyright © Αγγελική, Δ. Σπυροπούλου, 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 τη συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη της επίδρασης που έχουν οι παράμετροι της προσομοίωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται με προσομοίωση στο λογισμικό CST Studio Suite μοντέλου γεννήτριας ESD, με σκοπό την αναπαραγωγή της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας ESD Dito, που μετρήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και χρήσιμοι ορισμοί σχετικά με αυτές. Στη συνέχεια, αναλύονται οι τρόποι εμφάνισης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι επιπτώσεις της στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τρόποι μοντελοποίησης της για τη μελέτη της σε επιστημονικό επίπεδο.

Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 και στην προτεινόμενη νέα έκδοσή του IEC 61000-4-2 Ed3.0 (Committee Draft). Παρουσιάζονται ακόμα, οι παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης.

Επιπλέον, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε παλαιότερη έρευνα και διεθνή βιβλιογραφία που αναφέρεται σε διάφορα κυκλωματικά και αριθμητικά μοντέλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς από ερευνητές, για την προσομοίωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία της προσομοίωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και διερευνάται η επίδρασή τους στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται και συγκρίνονται με απεικόνισή τους με τη μορφή κατάλληλων γραφημάτων. Τέλος, γίνεται διαμόρφωση κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης, οι παράμετροι της οποίας είναι κοντά σε αυτές της μετρημένης κυματομορφής της γεννήτριας Dito.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, Πρότυπο IEC 61000-4-2, γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), προσομοίωση, CST Studio Suite, παράμετροι.

Abstract

This thesis deals with the study of the effect that the parameters of the electrostatic discharge generator simulation have on the waveform of the discharge current. This study is carried out by simulation in the CST Studio Suite software of an ESD generator model, in order to reproduce the discharge current waveform of the Dito ESD generator, which was measured in the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens.

Specifically, it represents the basic concepts of electromagnetic compatibility, the phenomenon of electrostatic discharge and useful definitions related to them. Furthermore, it analyzes the ways in which electrostatic discharge occurs, its effects on electrotechnical equipment and ways of modeling it for its scientific study.

Moreover, the characteristics of electrostatic discharge generators, as defined in Standard IEC 61000-4-2 Ed2.0 and in its proposed new version IEC 61000-4-2 Ed3.0 (Committee Draft), are presented. The parameters of the discharge current waveform are also presented.

In addition, a literature review is done on past research and international literature referring to various circuit and numerical models that have been proposed from time to time by researchers, for the simulation of electrostatic discharge generators.

Then, the individual components of the ESD generator simulation are analyzed and their effect on the discharge current waveform is investigated. The results of the simulations are presented and compared by depicting them in the form of appropriate graphs. Finally, a discharge current waveform is reproduced, the parameters of which are close to those of the measured waveform of the Dito generator.

Keywords: Electromagnetic compatibility, electrostatic discharge, Standard IEC 61000-4-2, electrostatic discharge generator, simulation, CST Studio Suite, parameters.

Πρόλογος

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

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται οι έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αναλύονται οι τρόποι εμφάνισης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και οι επιπτώσεις της στον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό, καθώς επίσης περιγράφονται μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και οι παράμετροι των κυματομορφών του ρεύματος εκφόρτισης, όπως αυτά περιγράφονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 και στην προτεινόμενη έκδοσή του Ed3.0. Επίσης, παρουσιάζονται οι διατάξεις διακρίβωσης μια γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση τις δύο εκδόσεις του Προτύπου.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε παλαιότερη έρευνα και διεθνή βιβλιογραφία, που αναφέρεται σε διάφορα κυκλωματικά και αριθμητικά μοντέλα, που έχουν προταθεί κατά καιρούς από ερευνητές, για την προσομοίωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία του μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η επίδραση των παραμέτρων της προσομοίωσης μελετάται με σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται σε κατάλληλα διαγράμματα. Επίσης, γίνεται παραμετροποίηση του μοντέλου προσομοίωσης της γεννήτριας για την αναπαραγωγή κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης από μετρημένη κυματομορφή της γεννήτριας Dito.

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

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. Γκόννο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

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.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαιτέρως τον συνοδοιπόρο στη ζωή μου, Αλέξιο Ν. Ζακυνθινό, και την οικογένειά του, για την απεριόριστη στήριξη και ώθηση που μου έδωσαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Πρόλογος.....	9
Ευχαριστίες.....	10
Περιεχόμενα	11
Ευρετήριο Σχημάτων.....	14
Ευρετήριο Πινάκων.....	20
 Κεφάλαιο 1 : Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	22
1.1 Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	22
1.1.1 Παράγοντες της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας.....	24
1.1.2 Θέματα σχεδιασμού ηλεκτρονικών συστημάτων.....	25
1.2 Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	27
1.2.1 Τρόποι δημιουργίας ηλεκτροστατικής φόρτισης.....	28
1.2.1.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	28
1.2.1.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση με επαγωγή	32
1.2.2 Οι επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τα προληπτικά μέτρα που μπορούν να ληφθούν	33
1.2.3 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	36
1.2.3.1 Μοντέλο ανθρωπίνου σώματος – Human Body Model (HBM)	36
1.2.3.2 Μοντέλο της Μηχανής – Machine Model (MM)	38
1.2.3.3 Μοντέλο φορτισμένης συσκευής – Charged Device Model (CDM)	39
 Κεφάλαιο 2 : Γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	42
2.1 Πρότυπα για δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....	42

2.2 Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0.....	44
2.2.1 Επίπεδα Τάσεων Δοκιμής.....	45
2.2.2 Γεννήτρια Δοκιμών	46
2.2.2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	46
2.2.2.2 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις της γεννήτριας ESD.....	47
2.2.3 Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ESD για τη μέθοδο εκφόρτισης με επαφή σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0.....	50
2.2.4 Επιλογή στοιχείων της γεννήτριας ESD.....	52
2.3 Ακτινοβολούμενα πεδία από εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου και γεννήτριες ESD	53
2.3.1 Γενικά για την εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου.....	53
2.3.2 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου	54
2.3.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση γεννήτριας ESD	56
2.4 Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0.....	58
2.4.1 Επίπεδα Τάσεων Δοκιμής.....	58
2.4.2 Γεννήτρια Δοκιμών	58
2.4.2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	58
2.4.2.2 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις της γεννήτριας ESD.....	59
2.4.3 Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ESD για τη μέθοδο εκφόρτισης με επαφή σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0.....	62
2.4.4 Συνάφεια δοκιμής εκφόρτισης αέρα - επαφής.....	64
Κεφάλαιο 3 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην προσομοίωση γεννητριών ESD.....	66
3.1 Εισαγωγή	66
3.2 Προκλήσεις της προσομοίωσης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συστήματος.....	67

3.3 Κυκλωματική και αριθμητική προσομοίωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	69
3.4 Προηγμένο μοντέλο γεννήτριας ESD πλήρους κύματος για προσομοίωση σύζευξης σε επίπεδο συστήματος.....	73
3.5 Μοντέλο πλήρους κύματος για την προσομοίωση μια γεννήτριας ESD Noiseken	77
3.6 Αποτελεσματικό κυκλωματικό και αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	82
 Κεφάλαιο 4 : Μελέτη παραμέτρων προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	86
4.1 Εισαγωγή	86
4.2 Στοιχεία προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ESD	86
4.3 Μελέτη παραμέτρων.....	97
4.4 Αναπαραγωγή κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης από μετρημένη κυματομορφή της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Dito	135
 Κεφάλαιο 5 : Σύνοψη – Συμπεράσματα – Επόμενη ημέρα.....	137
 BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [4]	23
Σχήμα 1.2: Βασικοί παράγοντες ενός προβλήματος EMC σύζευξης [7]	24
Σχήμα 1.3: Ορισμένα θέματα σχεδιασμού ηλεκτρονικών συστημάτων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (a) Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD), (b) Ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP), (c) Κεραυνός, (d) TEMPEST (Προστασία επικοινωνίας και δεδομένων) [9, 10, 11, 12]	26
Σχήμα 1.4: Ηλεκτροστατική φόρτιση με τριβή[13][15]	29
Σχήμα 1.5: Ηλεκτροστατική φόρτιση με επαφή[13]	29
Σχήμα 1.6: Ηλεκτροστατική φόρτιση με επαγωγή [16]	32
Σχήμα 1.7: Η τυπική περίπτωση προσωπικής εκφόρτισης ESD [17]	33
Σχήμα 1.8: Μηχανισμός δευτερευουσών εκφορτίσεων[17]	35
Σχήμα 1.9: Κυκλωματική αναπαράσταση μοντέλου ανθρωπίνου σώματος [23]	37
Σχήμα 1.10: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης ESD – Μοντέλο ανθρωπίνου σώματος [23]	38
Σχήμα 1.11: Κυκλωματική αναπαράσταση μοντέλου μηχανής [23]	39
Σχήμα 1.12: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης ESD – Μοντέλο Μηχανής[23]	39
Σχήμα 1.13: Κυκλωματική αναπαράσταση μοντέλου φορτισμένης συσκευής [23]	40
Σχήμα 1.14: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης ESD – Μοντέλο φορτισμένης συσκευής [23]	41
Σχήμα 2.1: Γεννήτριες ESD [28]	43
Σχήμα 2.2: Απλοποιημένο κύκλωμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [27]	47
Σχήμα 2.3: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4kV κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [27]	49
Σχήμα 2.4: Ηλεκτρόδιο για εκφόρτιση με επαφή [27]	50
Σχήμα 2.5: Ηλεκτρόδιο για εκφόρτιση μέσω αέρα [27]	50
Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [27]	52
Σχήμα 2.7: Ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου [31]	53
Σχήμα 2.8: Συνιστώσες κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης [31]	54

Σχήμα 2.9: Απλοποιημένο κύκλωμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 [29]	59
Σχήμα 2.10 Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4kV κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 [29].....	61
Σχήμα 2.11: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 [29]	63
Σχήμα 3.1: Ισοδύναμο κύκλωμα SPICE τυπικής γεννήτριας ESD [33]	70
Σχήμα 3.2: Προσομοιωτής Γεννήτριας ESD μοντελοποιημένος σε MWS [33]	71
Σχήμα 3.3: Στοιχεία κυκλώματος για την αναπαραγωγή της φυσικής μορφής μιας γεννήτριας ESD και του προτεινόμενου ρεύματος εκφόρτισης αναφοράς [33]	71
Σχήμα 3.4: Διάταξη δοκιμής για τη διακρίβωση του ρεύματος ESD [33].....	72
Σχήμα 3.5: Ρεύμα άκρου: μετρημένο (συνεχής γραμμή), Πρότυπο IEC (γραμμή με κουκίδες), ισοδύναμο κύκλωμα SPICE (διακεκομμένη γραμμή), και μοντέλο MWS (διακεκομμένη και κουκίδες γραμμή) [33].....	72
Σχήμα 3.6: Ρεύμα καλωδίου: μετρημένο (συνεχής γραμμή), ισοδύναμο κύκλωμα SPICE (διακεκομμένη γραμμή), και μοντέλο MWS (διακεκομμένη και κουκίδες γραμμή) [33]	73
Σχήμα 3.7: Επαγόμενη τάση βρόχου προηγούμενου μοντέλου γεννήτριας ESD [36] σε σύγκριση με μετρήσεις [35]	74
Σχήμα 3.8: Γεννήτρια ESD πλήρους κύματος (α) Επισκόπηση μοντέλου γεννήτριας ESD πλήρους κύματος, (b) Λεπτομέρειες των τμημάτων σχηματισμού παλμών [35].....	75
Σχήμα 3.9: Ρεύμα εκφόρτισης ESD μετρημένο(κόκκινο) και προσομοίωσης(μπλε), για τα πρώτα 10ns [35].....	77
Σχήμα 3.10: Μοντελοποίηση του ρελέ [37]	78
Σχήμα 3.11: Σήμα διέγερσης [37]	78
Σχήμα 3.12: Στα αριστερά εσωτερική όψη της μονάδας πυκνωτή και της αντίστασης εκφόρτισης, στα δεξιά η μονάδα πυκνωτή μοντελοποιημένη σε CST στο πεδίο της συχνότητας [37].....	79
Σχήμα 3.13: Ισοδύναμο μοντέλο της δομής πηνίου στο πεδίο της συχνότητας μοντελοποιημένο σε CST [37]	79
Σχήμα 3.14: Ισοδύναμο μοντέλο του δακτυλίου φερρίτη στο πεδίο της συχνότητας μοντελοποιημένο σε CST [37]	80
Σχήμα 3.15: Γεωμετρία της γεννήτριας ESD σε προσομοίωση πλήρους κύματος [37]	80

Σχήμα 3.16: Γεωμετρία της γεννήτριας ESD με μακρύ καλώδιο γείωσης σε προσομοίωση πλήρους κύματος [37]	81
Σχήμα 3.17: Σύγκριση προσομοιούμενου και μετρούμενου ρεύματος εκφόρτισης με (α) κοντό καλώδιο γείωσης, (b) μακρύ καλώδιο γείωσης [37]	81
Σχήμα 3.18: (α) Ισοδύναμο προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο, (b) Τιμές στοιχείων ισοδύναμου προτεινόμενου κυκλωματικού μοντέλου [25]	82
Σχήμα 3.19: Σύγκριση προσομοιωμένης κυκλωματικής (μαύρο) και μετρούμενης (κόκκινο) κυματομορφής ESD για το επίπεδο τάσης εκφόρτισης +4KV [25]	83
Σχήμα 3.20: Αριθμητικό μοντέλο γεννήτριας ESD [25]	83
Σχήμα 3.21: Λεπτομέρειες υλικών αριθμητικού μοντέλου MWS [25]	84
Σχήμα 3.22: Περιγραφή στοιχείων αριθμητικού μοντέλου MWS [25]	84
Σχήμα 3.23: Σύγκριση προσομοιωμένης κυκλωματικής (μαύρο), μετρούμενης (κόκκινο) και προσομοιωμένης σε MWS αριθμητικής κυματομορφής ESD (μπλε) για το επίπεδο τάσης εκφόρτισης +4KV [25]	85
Σχήμα 4.1: Περιβάλλον προσομοίωσης του λογισμικού CST Studio Suite	87
Σχήμα 4.2: Πρώτο μοντέλο προσομοίωσης γεννήτριας ESD	87
Σχήμα 4.3: Στόχος ρεύματος πρώτου μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας ESD	88
Σχήμα 4.4: Δεύτερο (απλοποιημένο) μοντέλο προσομοίωσης γεννήτριας ESD	88
Σχήμα 4.5: Στόχος ρεύματος δεύτερου μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας ESD	88
Σχήμα 4.6: Κατακόρυφο επίπεδο προσομοίωσης	89
Σχήμα 4.7: Δίσκος_1 (Disk_1)	90
Σχήμα 4.8: Δίσκος_2 (Disk_2)	90
Σχήμα 4.9: Δίσκος_3 (Disk_3)	91
Σχήμα 4.10: Κυλινδρικό τμήμα άκρου εκφόρτισης	92
Σχήμα 4.11: Κωνικό τμήμα άκρου εκφόρτισης	92
Σχήμα 4.12: Στοιχείο Element_1	93
Σχήμα 4.13: Στοιχείο Element_2	93
Σχήμα 4.14: Στοιχείο Element_3	94
Σχήμα 4.15: Στοιχείο Element_4	95
Σχήμα 4.16: Στοιχείο Element_5	95
Σχήμα 4.17: Καλώδιο γείωσης	96
Σχήμα 4.18: Πηγή τάσης προσομοίωσης	96

Σχήμα 4.19: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement2	97
Σχήμα 4.20: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement3	98
Σχήμα 4.21: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement3 για χρόνο $t=0-20\text{ns}$	99
Σχήμα 4.22: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement4	100
Σχήμα 4.23: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Lelement5	101
Σχήμα 4.24: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement2	102
Σχήμα 4.25: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement3	104
Σχήμα 4.26: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement3 για χρόνο $t=0-20\text{ns}$	104
Σχήμα 4.27: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement4	106
Σχήμα 4.28: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement4 για χρόνο $t=0-20\text{ns}$	106
Σχήμα 4.29: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement5	108
Σχήμα 4.30: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου cable radius	109
Σχήμα 4.31: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου cable radius για χρόνο $t=0-40\text{ns}$	110
Σχήμα 4.32: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Diameter	111
Σχήμα 4.33: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Diameter	112
Σχήμα 4.34: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Length.....	113

Σχήμα 4.35: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Length για $t=0-40\text{ns}$	114
Σχήμα 4.36: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Diameter	115
Σχήμα 4.37: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Diameter	115
Σχήμα 4.38: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Distance	117
Σχήμα 4.39: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Distance για $t=10-60\text{ns}$	117
Σχήμα 4.40: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Length.....	119
Σχήμα 4.41: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Length για $t=0-20\text{ns}$	119
Σχήμα 4.42: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Diameter	121
Σχήμα 4.43: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Diameter για $t=0-20\text{ns}$	121
Σχήμα 4.44: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Distance	123
Σχήμα 4.45: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Length.....	124
Σχήμα 4.46: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Load Length	125
Σχήμα 4.47: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Load Length για $t=0-20\text{ns}$	126
Σχήμα 4.48: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου DP Length	127
Σχήμα 4.49: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου DP Length για $t=0-40\text{ns}$	128
Σχήμα 4.50: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R4+R5=250\Omega$	129

Σχήμα 4.51: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R4+R5=550\Omega$	130
Σχήμα 4.52: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R3+R4+R5=350\Omega$	131
Σχήμα 4.53: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R3+R4+R5=430\Omega$	132
Σχήμα 4.54: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C3 συναρτήσει της παραμέτρου $R3=30\Omega$	133
Σχήμα 4.55: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C3 συναρτήσει της παραμέτρου $R3=120\Omega$	133
Σχήμα 4.56: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C3 συναρτήσει της παραμέτρου $R3=500\Omega$	134
Σχήμα 4.57: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης μετρημένης στο εργαστήριο της γεννήτριας ESD Dito και μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας	135

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1 Τριβηλεκτρική σειρά υλικών	30
Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης	31
Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις	31
Πίνακας 2.1: Επίπεδα τάσεων δοκιμών	45
Πίνακας 2.2: Ενδεικτική οδηγία επιλογής επιπέδου δοκιμής.....	46
Πίνακας 2.3: Γενικές προδιαγραφές γεννήτριας ESD.....	48
Πίνακας 2.4: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος σε εκφόρτιση με επαφή κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0.....	48
Πίνακας 2.5: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0.....	60
Πίνακας 4.1: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της C2	98
Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της C3	99
Πίνακας 4.3: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της C4.....	100
Πίνακας 4.4: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της L5	102
Πίνακας 4.5: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R2	103
Πίνακας 4.6: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R3.....	105
Πίνακας 4.7: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R4.....	107
Πίνακας 4.8: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R5.....	108
Πίνακας 4.9: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της cable radius.....	109
Πίνακας 4.10: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk1 Diameter	112

Πίνακας 4.11: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk1 Length.....	113
Πίνακας 4.12: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk2 Diameter	116
Πίνακας 4.13: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk2 Distance	118
Πίνακας 4.14: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk2 Length.....	120
Πίνακας 4.15: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk3 Diameter	122
Πίνακας 4.16: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk3 Distance	123
Πίνακας 4.17: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk3 Length.....	124
Πίνακας 4.18: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Load Length	126
Πίνακας 4.19: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της DP Length	128
Πίνακας 4.20: Σύγκριση παραμέτρων της μετρημένης κυματομορφής της γεννήτριας Dito με την προσομοιωμένη στο CST Studio Suite κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης.....	136

Κεφάλαιο 1 : Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

1.1 Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

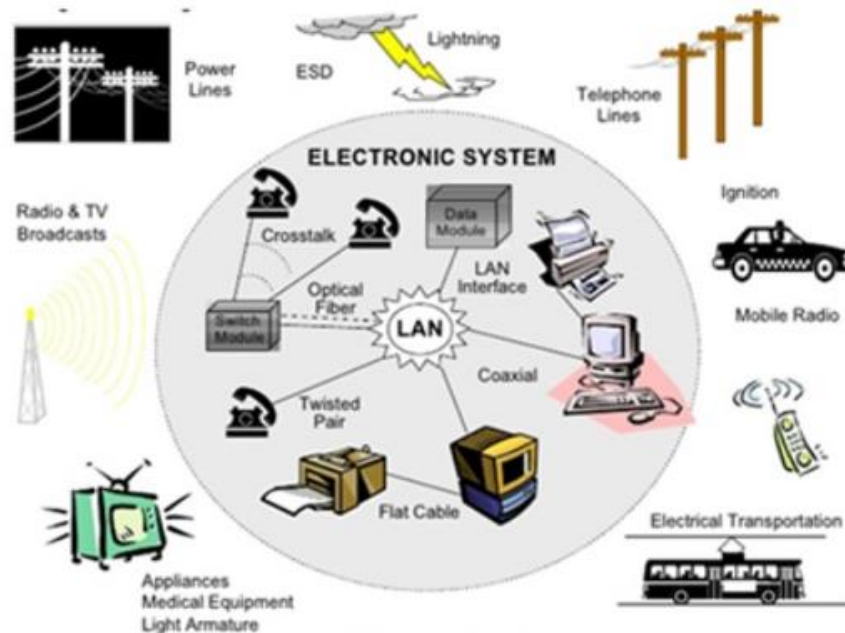
Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον, χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε αυτό.

Με την ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων, πριν περίπου έναν αιώνα, η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα, με το ενδιαφέρον να εντείνεται ολοένα και πιο πολύ τα τελευταία χρόνια. Οι απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής επιβάλλουν την ευρεία χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων σε όλους σχεδόν του τομείς της τεχνολογίας – αυτοκίνητα, κινητά τηλέφωνα, οικιακές συσκευές, τραπεζικά συστήματα, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, αεροδιαστημική, φωτισμός – συχνά διασυνδεδεμένων και αλληλεξαρτώμενων, που σκοπό έχουν να εκτελούν ικανοποιητικά τις λειτουργίες για τις οποίες είναι προορισμένα.

Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference, EMI) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να είναι ένας θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μια μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης [1], [2].

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) αποτελούν μείζον ζήτημα στη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθώς τα ηλεκτρονικά συστήματα που βρίσκονται σε ένα περιβάλλον, συχνά επιδρούν δυσμενώς το ένα στο άλλο. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένα τέτοιο περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Η χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών συσκευών, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και η ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας έχουν μειώσει το μέγεθος του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Καθώς τα κυκλώματα εξελίσσονται και γίνονται μικρότερα, περισσότερα κυκλώματα συνωστίζονται σε λιγότερο χώρο. Επιπλέον, οι συχνότητες ρολογιού έχουν αυξηθεί δραματικά με την πάροδο των χρόνων. Όλοι αυτοί οι παράγοντες αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, οι οποίες υποβαθμίζουν την

απόδοση των ηλεκτρονικών συστημάτων ή και προκαλούν βλάβες σε διατάξεις τους. Συνεπώς, είναι αναγκαίο κάθε σύστημα να σχεδιάζεται με τρόπο τέτοιο, ώστε να συμμορφώνεται με τα όρια ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που καθορίζονται από εθνικά και διεθνή πρότυπα και να είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατό [3].



Σχήμα 1.1: Περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών [4]

Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και την εύρεση των τρόπων με τους οποίους επιτυγχάνεται δίνονται παρακάτω κάποιοι επιπλέον χρήσιμοι ορισμοί [1], [2]:

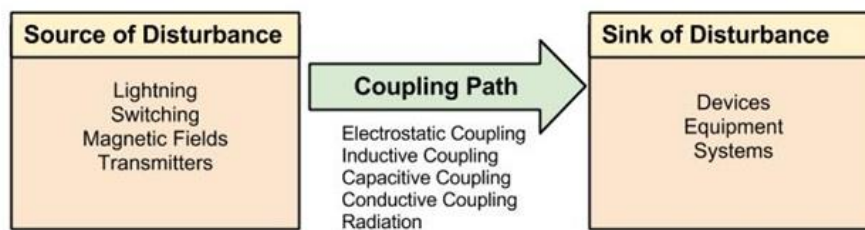
- *Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level)* είναι η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μια διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.
- *Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin)* είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ως προς μια στάθμη διαταραχής αναφοράς.
- *Ηλεκτρομαγνητική Ατρωσία (Immunity)* σε μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί, χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της/του, με την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.
- *Ηλεκτρομαγνητική Επιδεκτικότητα (Electromagnetic Susceptibility)* είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της

ποιότητας της/του παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή, επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

- *Στάθμη Ατρωσίας (Immunity Level)* είναι η μέγιστη στάθμη μιας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής υπό την οποία μια συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα αυτή/ό παραμένει ικανή/ό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.
- *Όριο Ατρωσίας (Immunity Limit)* είναι η καθορισμένη στάθμη ατρωσίας.
- *Περιθώριο Ατρωσίας (Immunity Margin)* είναι ο λόγος του ορίου ατρωσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος προς τη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

1.1.1 Παράγοντες της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας

Οι βασικοί παράγοντες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) είναι η παραγωγή, η μετάδοση και η λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αυτοί οι τρεις παράγοντες, που απεικονίζονται στο Σχήμα 1.2, αποτελούν και το βασικό πλαίσιο σχεδιασμού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.



Σχήμα 1.2: Βασικοί παράγοντες ενός προβλήματος EMC σύζευξης [7]

Μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η οποία συχνά αναφέρεται ως εκπομπός, παράγει την εκπεμπόμενη ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω ενός μονοπατιού σύζευξης ή μετάδοσης σε έναν δέκτη. Ο δέκτης επεξεργάζεται την ενέργεια και οδηγείται σε επιθυμητή ή μη συμπεριφορά. Αν η ληφθείσα ενέργεια προκαλεί μη επιθυμητή συμπεριφορά του δέκτη, τότε εμφανίζεται παρεμβολή [5].

Μια πηγή ή ένας δέκτης μπορεί να λειτουργεί με δύο μοντέλα, το εκούσιο και το ακούσιο. Έχουν τη δυνατότητα να συμπεριφέρονται και με τους δύο τρόπους, κάτι που εξαρτάται τόσο από το μονοπάτι σύζευξης όσο και από το είδος τους. Αν και συνήθως η μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας γίνεται μέσω ακούσιων μονοπατιών σύζευξης, δεν είναι βέβαιο ότι η ακούσια μεταφορά της θα προκαλέσει παρεμβολή. Σημαντικός

παράγοντας στην εμφάνιση παρεμβολής είναι η επεξεργασία της ληφθείσας ενέργειας από τον δέκτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interferences, EMI) μπορούν να αποφευχθούν με τους εξής τρόπους:

- Μείωση της ανεπιθύμητης εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο σημείο της πηγής, κάτι που αποτελεί την καλύτερη μέθοδο για περιορισμό των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών
- Το μονοπάτι σύζευξης να είναι όσο το δυνατόν μη αποτελεσματικό
- Ο δέκτης να γίνει όσο το δυνατόν λιγότερο ευαίσθητος στις εκπομπές

Πιθανές πηγές ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής είναι κεραυνοί, ραδιοπομποί, ηλεκτρικοί κινητήρες, ηλεκτρονικά κυκλώματα, λαμπτήρες και σχεδόν οτιδήποτε χρησιμοποιεί ή δημιουργεί ηλεκτρική ενέργεια. Μονοπάτια σύζευξης ή μετάδοσης μπορούν να είναι καλώδια, κεραίες, γραμμές ισχύος, χωρητικές και επαγωγικές συζεύξεις. Οι πιθανοί δέκτες είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα, ραδιόφωνα, κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρονικές συσκευές και σχεδόν οτιδήποτε χρησιμοποιεί ή μπορεί να ανιχνεύσει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια [6].

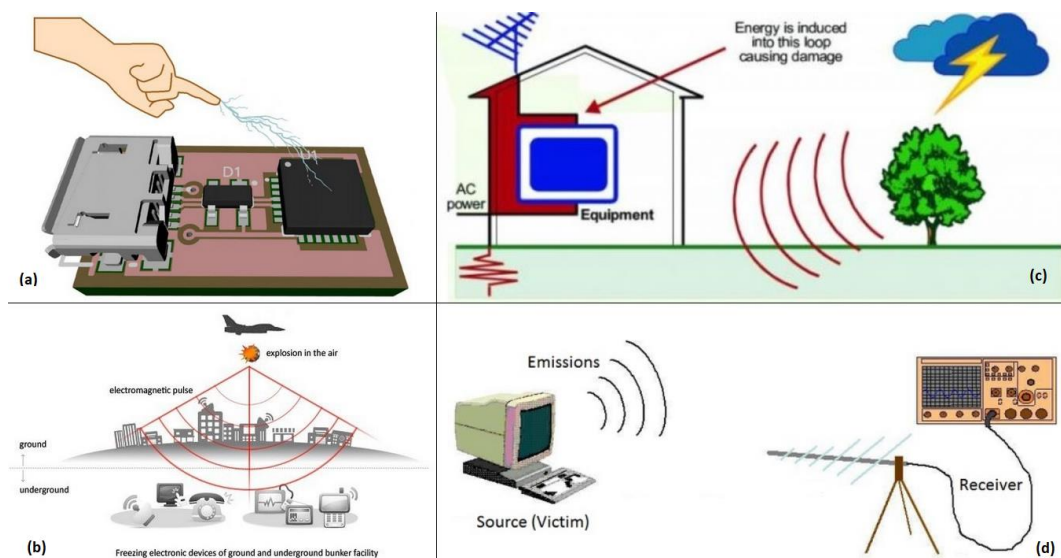
1.1.2 Θέματα σχεδιασμού ηλεκτρονικών συστημάτων

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) έχει αποτελέσει αναπόσπαστο κομμάτι της ηλεκτρονικής αγοράς. Οι σύγχρονοι σχεδιαστές πρέπει κατά τον σχεδιασμό των προϊόντων να λαμβάνουν υπόψιν τους την αναγκαιότητα να λειτουργούν ικανοποιητικά σε πραγματικές συνθήκες, κοντά στον υπόλοιπο εξοπλισμό και να εναρμονίζονται με τους κανονισμούς για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC). Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) αποτελεί βασικό παράγοντα στον σχεδιασμό όλων των ηλεκτρονικών προϊόντων, διάφορες κυβερνητικές υπηρεσίες και ρυθμιστικά σώματα έχουν θεσπίσει κανονισμούς που πρέπει να τηρούνται, ώστε να τίθεται ένα προϊόν διαθέσιμο στην αγορά.

Συστήματα τα οποία έχουν σχεδιαστεί χωρίς καμία μέριμνα για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, είναι πιθανό να παρουσιάσουν αρκετά προβλήματα [8]. Στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας υπάρχουν πολυάριθμα τέτοια προβλήματα και μερικά από αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3.

Το Σχήμα 1.3(a) παρουσιάζει ένα σύννηδες πρόβλημα ευαισθησίας στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα μικρής κλίμακας, αυτό της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (electrostatic discharge, ESD). Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το περπάτημα πάνω σε νάιλον με παπούτσια από καουτσούκ, το οποίο μπορεί να προκαλέσει συσσώρευση στατικού φορτίου στο σώμα. Στη συνέχεια, μέσω μιας επαφής του σώματος με μια ηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να προκληθεί μεταφορά του στατικού φορτίου στη συσκευή και να δημιουργηθεί ένα τόξο μεταξύ των δακτύλων και της συσκευής. Αυτή η μεταφορά του φορτίου μπορεί να προκαλέσει μόνιμη βλάβη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ή και δυσλειτουργία του συστήματος.

Στο Σχήμα 1.3(b) παρουσιάζεται ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικού παλμού (electromagnetic pulse, EMP) που δημιουργείται από μία έκρηξη. Η πρώτη ανακάλυψη έγινε μετά την πρώτη πυρηνική έκρηξη στα μέσα της δεκαετίας του 1940, όπου παρατηρήθηκε ότι οι ημιαγώγιμες συσκευές σε ηλεκτρονικά συστήματα που χρησιμοποιούνταν για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων των εκρήξεων καταστρέφονταν. Το γεγονός αυτό δεν οφειλόταν στις άμεσες φυσικές συνέπειες της έκρηξης, αλλά λόγω του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που παραγόταν από το διαχωρισμό φορτίου και κίνησης εντός της έκρηξης. Στο στρατιωτικό χώρο υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την προστασία των δεδομένων και των συσκευών, λόγω των συνεπειών που προκαλούσε αυτός ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP).



Σχήμα 1.3: Ορισμένα θέματα σχεδιασμού ηλεκτρονικών συστημάτων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (a) Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD), (b) Ηλεκτρομαγνητικός παλμός (EMP), (c) Κεραυνός, (d) TEMPEST (Προστασία επικοινωνίας και δεδομένων) [9, 10, 11, 12]

Στο Σχήμα 1.3(c) εμφανίζεται το πρόβλημα της καταστροφικής επίδρασης των κεραυνών σε ηλεκτρονικές συσκευές από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα ρεύματα υψηλής έντασης που προκαλούν. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω των έντονων ρευμάτων (πάνω από 50kA) μπορούν να συζευχθούν είτε από την άμεση ακτινοβολία είτε μέσω των καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος. Είναι σημαντικό λοιπόν, οι συσκευές να σχεδιάζονται και να ελέγχονται προκειμένου να είναι θωρακισμένες από τάσεις στα καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον θέμα είναι αυτό της προστασίας ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών από μη εξουσιοδοτημένα άτομα. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η παρακολούθηση των όσων γράφονται σε μια ηλεκτρονική γραφομηχανή λαμβάνοντας τις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3(d). Το θέμα αυτό, γνωστό με το κωδικό όνομα TEMPEST, αποτελεί πρόβλημα τόσο για το στρατό όσο και για τις εταιρείες λόγω επιπτώσεων από την παρακολούθηση δεδομένων[5].

1.2 Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (electrostatic discharge, ESD) είναι ένα από τα πιο συχνά ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα που μπορεί να συμβεί σε ηλεκτρονικές διατάξεις και αφορά στην απότομη μεταφορά του ηλεκτροστατικού φορτίου από μια επιφάνεια σε μία άλλη. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (electrostatic discharge, ESD) έχει καταστεί κίνδυνος για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών και καθώς οι ηλεκτρονικές συσκευές γίνονται μικρότερες, πιο γρήγορες και λειτουργούν σε χαμηλότερες τάσεις, η ευαισθησία τους στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση θα αυξάνεται. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση αποτελεί έναν πολύ γνωστό κίνδυνο για τις ηλεκτρονικές διατάξεις. Μπορεί να διαταράξει ή ακόμη και να καταστρέψει ηλεκτρονικές συσκευές ή και συστήματα, τα οποία βρίσκονται στο περιβάλλον τους. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος (έμμεση εκφόρτιση).

Τα τελευταία χρόνια έχουν προκληθεί σοβαρά προβλήματα λόγω ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως εκρήξεις σε δεξαμενόπλοια, κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους, ζημιές και καταστροφές μικρο-κυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους, εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας αεροσκαφών με καύσιμα και βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων [14].

1.2.1 Τρόποι δημιουργίας ηλεκτροστατικής φόρτισης

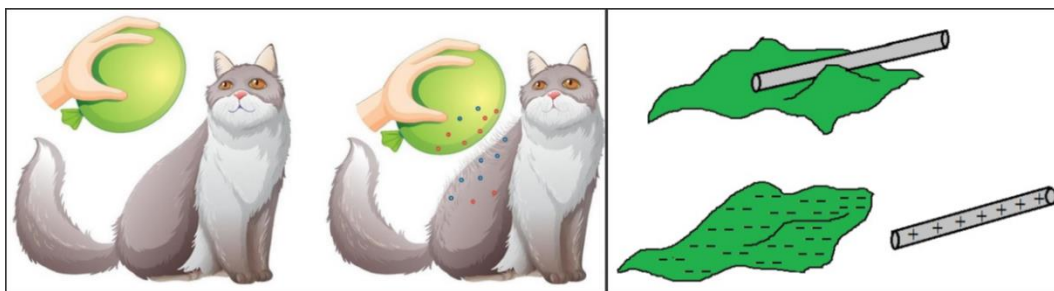
Η ηλεκτρική ουδετερότητα αναφέρεται στην παρουσία ίσης ποσότητας θετικών και αρνητικών φορτίων στα περισσότερα σώματα. Για να φορτιστεί ένα ουδέτερο σώμα, πρέπει να αλλάξει η ισορροπία θετικών και αρνητικών φορτίων. Η φόρτιση των σωμάτων γίνεται, είτε λόγω της προσθήκης ηλεκτρονίων στις εξωτερικές τους στιβάδες (αρνητική φόρτιση), είτε λόγω αφαίρεσης ηλεκτρονίων από τις εξωτερικές τους στιβάδες (θετική φόρτιση). Τρόποι εμφάνισης της ηλεκτροστατικής φόρτισης των υλικών μπορεί να είναι η τριβή (τριβοηλεκτρικό φαινόμενο), η επαγωγική φόρτιση, και άλλες όπως δέσμες ιόντων, η φόρτιση Corona, κ.λπ. [14].

1.2.1.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Ο στατικός ηλεκτρισμός μπορεί να δημιουργηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, αλλά ο πιο συνηθισμένος είναι με την επαφή και τον επακόλουθο διαχωρισμό των υλικών. Αν και συνήθως θεωρείται ότι η τριβή απαιτείται για τη δημιουργία φορτίου μεταξύ δύο υλικών, το μόνο που απαιτείται στην πραγματικότητα είναι τα υλικά να έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια να διαχωριστούν.

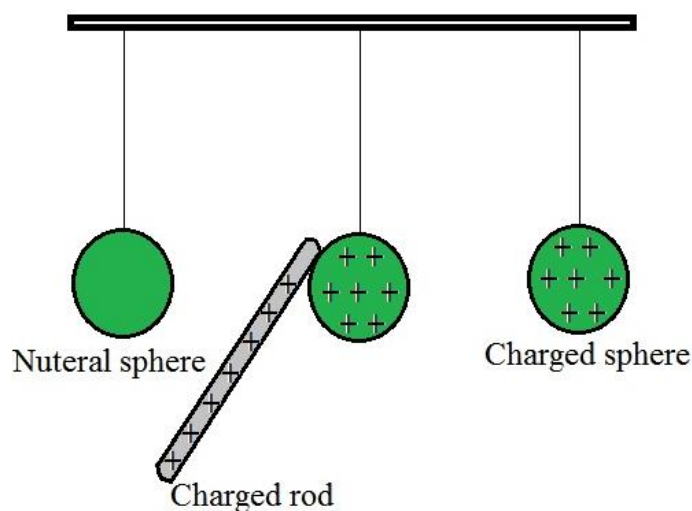
Τα υλικά μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Όταν δύο μονωτές έρχονται σε επαφή, κάποιο φορτίο (ηλεκτρόνια) μεταφέρεται από το ένα υλικό στο άλλο. Επειδή το φορτίο σε ένα μονωτή δεν είναι ευκίνητο, όταν τα δύο υλικά διαχωρίζονται, αυτό το φορτίο μπορεί να μην επιστρέψει στο αρχικό υλικό. Εάν τα δύο υλικά ήταν αρχικά ουδέτερα, θα φορτιζόνταν το ένα θετικά και το άλλο αρνητικά. Αυτή η μέθοδος παραγωγής στατικού ηλεκτρισμού αναφέρεται ως τριβοηλεκτρικό φαινόμενο [3].

Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται η ηλεκτροστατική φόρτιση που παράγεται μέσω της τριβής. Η τριβή ενός μπαλονιού από καουτσούκ σε γούνα ζώων φέρνει τα άτομά τους κοντά μεταξύ τους, προκαλώντας την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων τους, με αποτέλεσμα και τα δύο υλικά να φορτίζονται. Ομοίως, όταν δύο γυάλινες ράβδοι που έχουν τριφτεί με μάλλινο ή μεταξωτό ύφασμα έρθουν σε επαφή, απωθούν η μία την άλλη μαζί με τα νήματα του υφάσματος. Ωστόσο, η γυάλινη ράβδος και το ύφασμα έλκονται μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής φόρτισης.



Σχήμα 1.4: Ηλεκτροστατική φόρτιση με τριβή[13][15]

Ένα άλλο παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Εάν μια θετικά φορτισμένη πλάκα αλουμινίου έρθει σε επαφή με μια ουδέτερη μεταλλική σφαίρα, η σφαίρα φορτίζεται, καθώς τα ηλεκτρόνια της σφαίρας κινούνται προς τη θετικά φορτισμένη πλάκα. Η κίνηση αυτή προκαλεί την εμφάνιση θετικού φορτίου στη σφαίρα[13].



Σχήμα 1.5: Ηλεκτροστατική φόρτιση με επαφή[13]

Όπως αναφέρθηκε, η ανταλλαγή ηλεκτρονίων που παρατηρείται κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο, ενώ βρίσκονται σε επαφή, έχει ως αποτέλεσμα τη φόρτιση δύο υλικών με αντίθετα φορτία. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25kV, με αποθηκευμένες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει βλάβες σε συσκευές και ανθρώπους[14].

Η φύση του υλικού είναι αυτή που καθορίζει αν θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβοηλεκτρική σειρά του Πίνακα 1.1, όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).

Πίνακας 1.1 Τριβοηλεκτρική σειρά υλικών

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

Στον Πίνακα 1.2 εμφανίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών. Οι συνθήκες περιβάλλοντος και κυρίως η υγρασία αποτελούν το βασικό παράγοντα για την εμφάνιση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

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

Στον Πίνακα 1.3 εμφανίζονται ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών σε συνάρτηση με τη σχετική υγρασία. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά και πιο ήπιες. Αντίθετα, όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία, η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλος χρόνος ανόδου).

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Αναπτυσσόμενη Τάση (V)	
	10%-20% Σχετική Υγρασία	65%-90% Σχετική Υγρασία
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35000	1500
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο παρκέ	12000	250
Άνοιγμα πλαστικού φακέλου	7000	600
Σήκωμα πλαστικής σακούλας	20000	1200
Κάθιση σε καρέκλα από αφρό πολυουρεθάνης	18000	1500

Ο στατικός ηλεκτρισμός είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο, καθώς το στατικό φορτίο υπάρχει αποκλειστικά στην επιφάνεια των υλικών και όχι στο εσωτερικό τους. Το φορτίο σε έναν μονωτή παραμένει στην περιοχή όπου δημιουργείται και δε διανέμεται εντός του υλικού ή σε ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού. Εάν ένας φορτισμένος μονωτής γειωθεί, δε θα χάσει το φορτίο του.

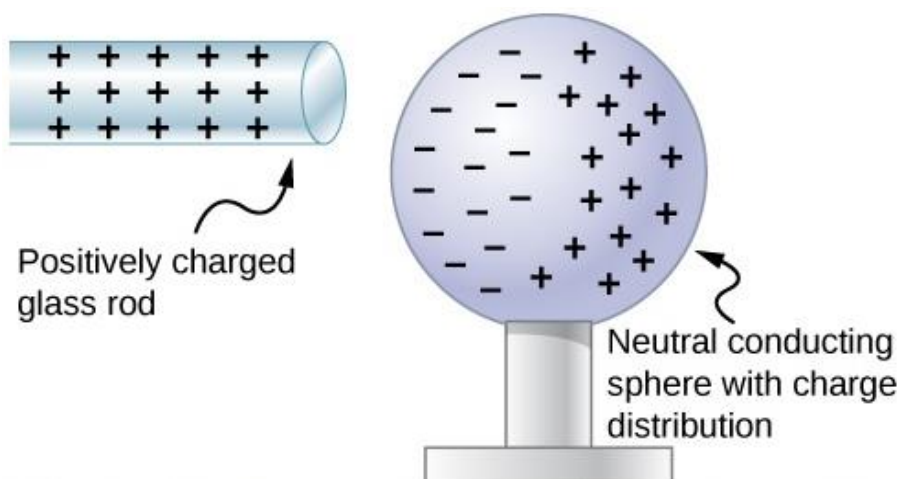
Ωστόσο, εάν δημιουργηθεί φορτίο σε έναν αγωγό, τα φορτία παρόμοιας πολικότητας θέλουν να διαχωριστούν το ένα από το άλλο και επομένως θα κατανεμηθούν σε

ολόκληρη την επιφάνεια του αγωγού, επειδή η επιφάνεια είναι η μεγαλύτερη απόσταση που μπορούν να απομακρυνθούν τα φορτία το ένα από το άλλο. Το φορτίο δε θα βρίσκεται μέσα στον αγωγό, αλλά θα υπάρχει μόνο στην επιφάνεια. Εάν ένας φορτισμένος αγωγός γειωθεί, τότε το φορτίο του θα εξαλειφθεί.

Ένας φορτισμένος μονωτήρας από μόνος του δεν αποτελεί άμεση απειλή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Εφόσον το φορτίο ενός μονωτήρα δεν είναι ελεύθερο να κινηθεί, δεν μπορεί να παράγει στατική εκκένωση. Ο κίνδυνος από έναν φορτισμένο μονωτή προέρχεται από τη δυνατότητά του να παράγει φορτίο, συνήθως με επαγωγή, σε έναν αγωγό, όπως ένα άτομο, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να εκκενωθεί [3].

1.2.1.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση με επαγωγή

Ένας άλλος τρόπος ηλεκτροστατικής φόρτισης είναι με επαγωγή, κατά την οποία ένα ηλεκτρικά ουδέτερο αντικείμενο φορτίζεται χωρίς να υπάρξει επαφή με άλλο φορτισμένο αντικείμενο. Σε έναν αγωγό τα “ελεύθερα” ηλεκτρόνια μπορούν να κινούνται με σχεδόν πλήρη ελευθερία. Ως αποτέλεσμα, όταν ένας φορτισμένος μονωτής (όπως μια θετικά φορτισμένη γυάλινη ράβδος) φέρεται κοντά σε έναν αγωγό, το (συνολικό) φορτίο του μονωτή ασκεί ηλεκτρική δύναμη στα “ελεύθερα” ηλεκτρόνια. Εφόσον η ράβδος είναι θετικά φορτισμένη, τα “ελεύθερα” ηλεκτρόνια (τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα) έλκονται, ρέοντας προς τον μονωτή στην κοντινή πλευρά του αγωγού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6.



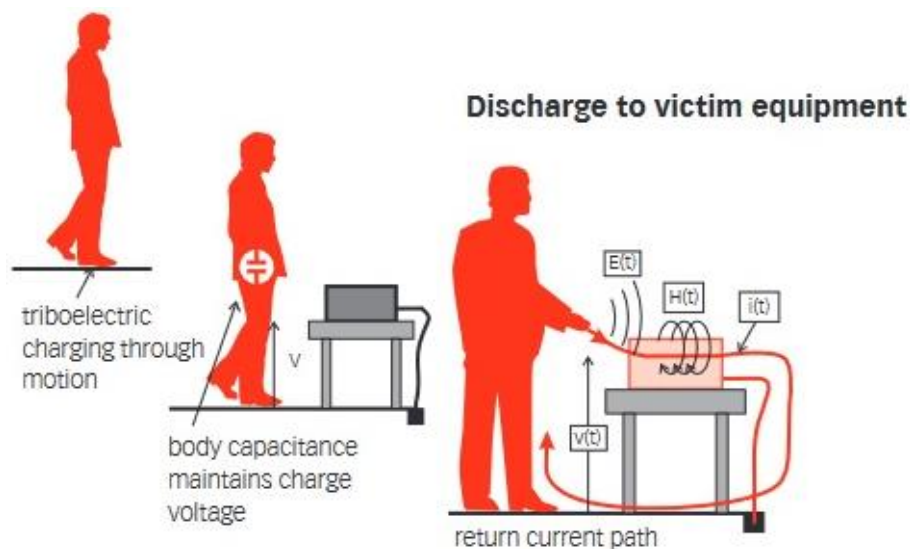
Σχήμα 1.6: Ηλεκτροστατική φόρτιση με επαγωγή [16]

Σε αυτή την περίπτωση, ο αγωγός εξακολουθεί να είναι συνολικά ουδέτερος, αφού τα “ελεύθερα” ηλεκτρόνια έχουν αλλάξει θέση, αλλά εξακολουθούν να βρίσκονται στο

αγώγιμο υλικό. Ο αγωγός έχει την εξής κατανομή φορτίου: το κοντινό άκρο (το τμήμα του αγωγού που βρίσκεται πιο κοντά στον μονωτή) εμφανίζει περισσότερο αρνητικό φορτίο, και το αντίστροφο ισχύει για το άκρο που βρίσκεται πιο μακριά από τον μονωτή. Η μετατόπιση των αρνητικών φορτίων στην κοντινή πλευρά του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα ένα συνολικό θετικό φορτίο στο τμήμα του αγωγού που βρίσκεται πιο μακριά από τον μονωτή [16].

1.2.2 Οι επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τα προληπτικά μέτρα που μπορούν να ληφθούν

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 1.7. 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.



Σχήμα 1.7: Η τυπική περίπτωση προσωπικής εκφόρτισης ESD [17]

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 θα διακοπεί [17].

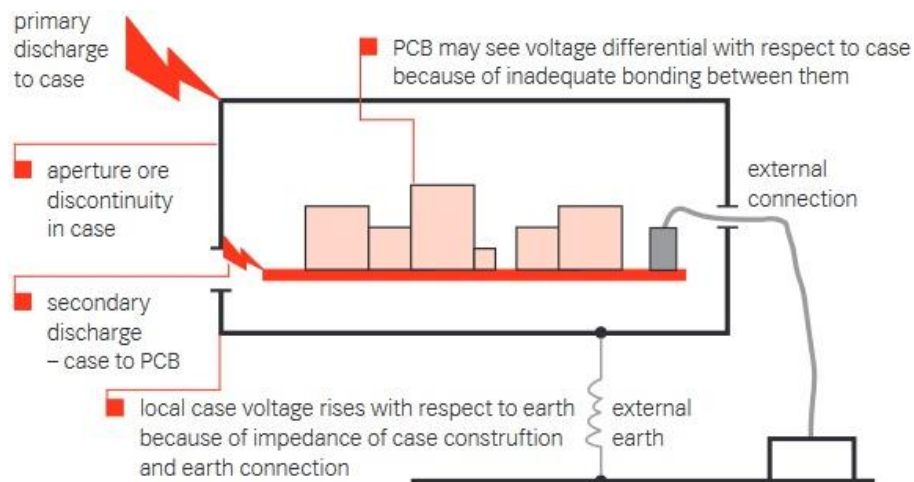
Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίσει υψηλή τιμή, μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών, καταλήγοντας στην καταστροφή τους. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να παρατηρηθεί σε συνθήκες αυξημένης πεδιακής έντασης [18]. Ένας από τους λόγους που έχουν οδηγήσει στη συγκέντρωση του ενδιαφέροντος στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι οι αναφλέξεις ή και εκρήξεις που μπορεί να προκαλέσουν οι σπινθήρες κατά την εκφόρτιση σε εύφλεκτα υλικά, ένας κίνδυνος μεγάλης σημασίας για την πετρελαϊκή, τη χημική, τη φαρμακευτική και τη στρατιωτική βιομηχανία. Ένας άλλος λόγος είναι ότι στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, μοντέρνα ηλεκτρονικά εξαρτήματα μικροσκοπικού μεγέθους μπορούν να καταστραφούν από μια εκφόρτιση μερικών δεκάδων Volt. Επίσης, εκφορτίσεις μερικών μJ μπορεί να προκαλέσουν εκρήξεις [19].

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να συμβούν [14]:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων. Για παράδειγμα, το φορτίο που διοχετεύεται στο κέλυφος μιας συσκευής πληροφορικής από ένα φορτισμένο σώμα κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι δυνατόν να μεταφερθεί με μια δευτερεύουσα εκφόρτιση στα ολοκληρωμένα κυκλώματα που βρίσκονται στο εσωτερικό του και να τα καταστρέψει.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού στα οποία αναπτύσσονται υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή, εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται ο μηχανισμός εμφάνισης των δευτερευουσών εκφορτίσεων. Μια δευτερεύουσα εκφόρτιση μπορεί να συμβεί εάν το ρεύμα εκφόρτισης μέσω μιας συσκευής ακολουθήσει μια διαδρομή διακένου αέρα. Η τάση στο διάκενο

αυξάνεται μέχρι να σπάσει το διάκενο και αυτή η δευτερεύουσα βλάβη μπορεί να είναι για τα εσωτερικά κυκλώματα πιο κρίσιμη από την αρχική εκφόρτιση, επειδή είναι εγγύτερα σε αυτά και πιθανώς η αντίσταση διαδρομής να είναι μικρότερη. Η διάσπαση μπορεί να συμβεί ταυτόχρονα με την εφαρμοζόμενη κύρια τάση ή μπορεί να προκύψει όταν έχουν συμβεί πολλές πρωτεύουσες εκφορτίσεις, έτσι ώστε ένα απομονωμένο αγωγίμο τμήμα να έχει δημιουργήσει επαρκή τάση για να εκφορτιστεί. [17]



Σχήμα 1.8: Μηχανισμός δευτερευουσών εκφορτίσεων[17]

Προκειμένου να προστατευθεί ο ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ληφθούν προληπτικά μέτρα και να αναπτυχθούν τεχνικές προστασίας ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα δυσμενή αποτελέσματα των εκφορτίσεων, εφόσον αυτές συμβούν.

Μερικά από τα προληπτικά μέτρα είναι [14]:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου απαιτείται η επικάλυψη μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγωγίμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [20], με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, οι Fowler, Klein και Fromm [21] ανέπτυξαν προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση

ως προς γη μικρότερη των 10 MΩ, αλλά από την άλλη θα πρέπει να είναι αρκούντως μονωτικά, ώστε να μην υπάρχει κανένας κίνδυνος για την ασφάλεια των ανθρώπων.

Η προστασία των συσκευών από τις ηλεκτροστατικές φορτίσεις, όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί, μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες τεχνικές:

- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, για αποτροπή δευτερευουσών εκφορτίσεων
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οπότε εξασφαλίζεται μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος
- Θωράκιση των κυκλωμάτων έναντι των πεδίων εξ επαγωγής
- Εγκατάσταση συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό

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

1.2.3 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Τα συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτελούν ένα συχνό φαινόμενο στο οποίο εμπλέκονται πολλά και διαφορετικά είδη σωμάτων. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιδράσεις που μπορεί να έχουν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, είναι αναγκαίο αυτά τα συμβάντα να ενταχθούν σε ομάδες και να μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά. Η ένταξή τους σε ομάδες έχει αποτελέσει μάλιστα αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων [18, 20, 22]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι [23]:

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

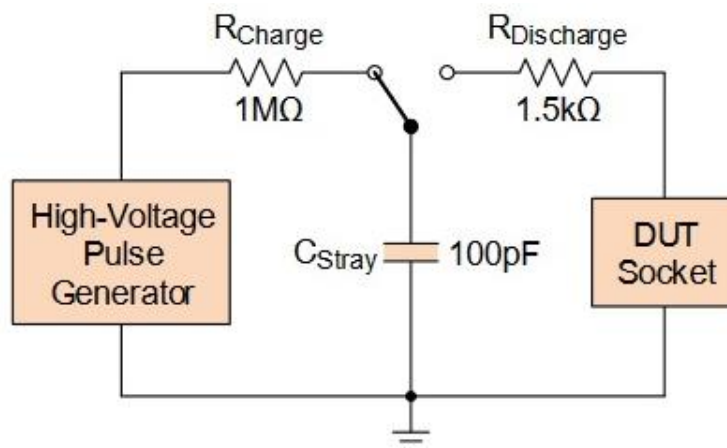
1.2.3.1 Μοντέλο ανθρωπίνου σώματος – Human Body Model (HBM)

Το μοντέλο ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model, HBM) είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συσκευής και χαρακτηρίζει την ευαισθησία ενός ηλεκτρονικού εξαρτήματος σε βλάβη λόγω ESD. Η δοκιμή προσομοιώνει μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου σε ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα,

η οποία μπορεί να συμβεί εάν δημιουργηθεί φορτίο από έναν άνθρωπο (πχ. σύροντας τα πόδια του σε ένα χαλί φορώντας κάλτσες) και αγγίζει μια ηλεκτρονική συσκευή. Οι τρόποι δοκιμής αστοχίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με βάση το μοντέλο ανθρωπίνου σώματος αποτελούνται από ζημιά με διασταύρωση, διείσδυση με μέταλλο, τήξη μεταλλικών στρωμάτων, ακίδες επαφής και ζημιά στα οξειδία πύλης.

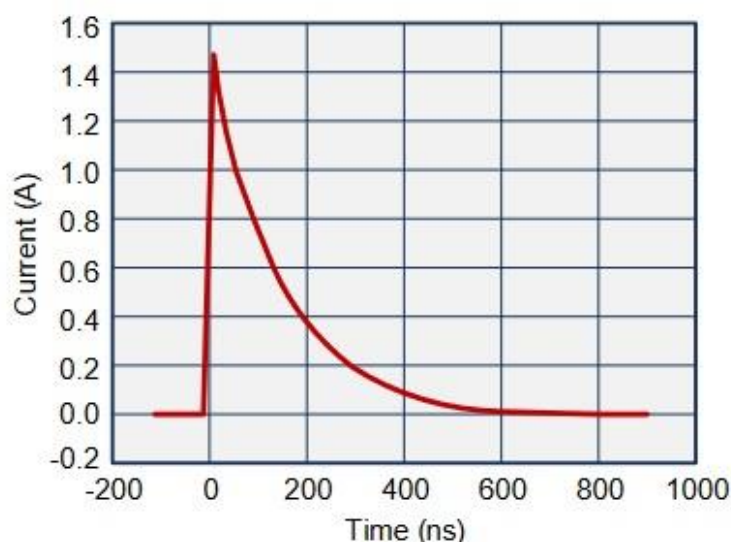
Η διαδικασία δοκιμής ρυθμίζεται με την εφαρμογή τροφοδοσίας υψηλής τάσης σε σειρά με μια αντίσταση $1\text{M}\Omega$ και έναν πυκνωτή 100pF . Αφού φορτιστεί πλήρως ο πυκνωτής, τότε αφαιρείται από την αντίσταση και την πηγή υψηλής τάσης και εφαρμόζεται σε σειρά με μια αντίσταση $1,5\text{k}\Omega$ και την υπό εξέταση συσκευή (Device Under Test, DUT), μέσω ενός διακόπτη. Στη συνέχεια, ο πυκνωτής εκφορτίζεται πλήρως μέσω της αντίστασης και της υπό εξέτασης συσκευής (DUT).

Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται μια κυκλωματική αναπαράσταση του μοντέλου ανθρωπίνου σώματος (HBM). Οι τιμές για την παροχή υψηλής τάσης ποικίλλουν ανάλογα με το επίπεδο δοκιμής μεταξύ $0,5\text{kV}$ και 15kV .



Σχήμα 1.9: Κυκλωματική αναπαράσταση μοντέλου ανθρωπίνου σώματος [23]

Στο Σχήμα 1.10 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης κατά τη διάρκεια μια εκφόρτισης μοντέλου ανθρωπίνου σώματος.



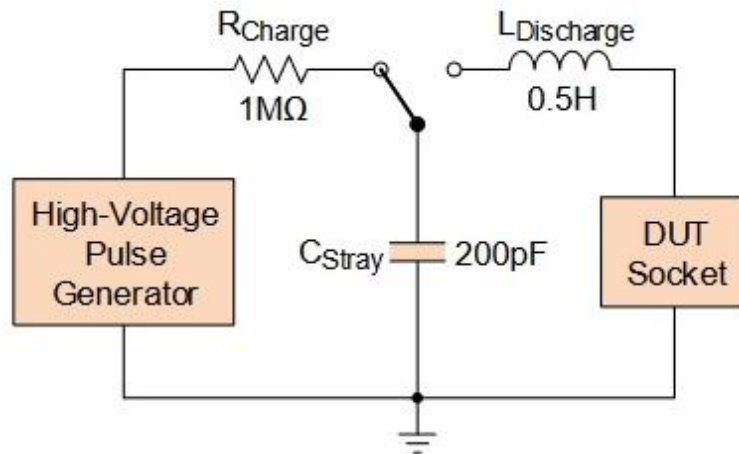
Σχήμα 1.10: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης ESD – Μοντέλο ανθρωπίνου σώματος [23]

1.2.3.2 Μοντέλο της Μηχανής – Machine Model (MM)

Η δοκιμή μοντέλου μηχανής (Machine Model, MM) σε επίπεδο συσκευής είναι λιγότερο συνηθισμένη στις μέρες μας και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1990. Εκείνη την εποχή οι τοποθεσίες για την κατασκευή βιομηχανικών αυτοματισμών έγιναν δημοφιλείς, χάρη στην ανάγκη για αύξηση της παραγωγής. Με την ενεργοποίησή τους τα μηχανήματα φορτίζονταν ηλεκτρικά και έπειτα εκφορτίζονταν σε ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα μέσω της επαφής. Το μοντέλο της μηχανής δημιουργήθηκε ως ανάγκη μοντελοποίησης αυτού του είδους εκφόρτισης ESD. Οι τρόποι δοκιμής αστοχίας που εμφανίζονται σε αυτό το μοντέλο μοιάζουν με αυτούς του μοντέλου ανθρωπίνου σώματος, όπως ζημιά με διασταύρωση, τήξη των μεταλλικών στρωμάτων και οξείδια της πύλης.

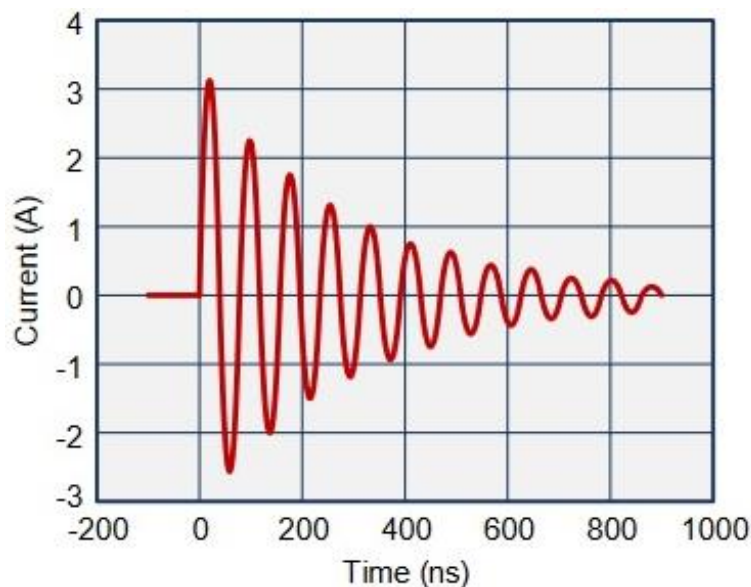
Η διαδικασία δοκιμής για το μοντέλο της μηχανής ρυθμίζεται με την εφαρμογή πηγής υψηλής τάσης σε σειρά με μια αντίσταση και ένα πυκνωτή 200pF. Όταν ο πυκνωτής φορτιστεί πλήρως, τότε αφαιρείται από την πηγή υψηλής τάσης και την αντίσταση και εφαρμόζεται σε σειρά με μια επαγωγή 0,5μH και την υπό εξέταση συσκευή (DUT), μέσω ενός διακόπτη. Η επαγωγή με την τάση του πυκνωτή διαχέεται μέσω της συσκευής υπό δοκιμή (DUT).

Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται μια κυκλωματική αναπαράσταση του μοντέλου μηχανής. Οι συνήθεις τιμές για την τροφοδοσία υψηλής τάσης μπορεί να ποικίλλουν, αλλά οι πιο συνηθισμένες κυμαίνονται από 50V έως 400V.



Σχήμα 1.11: Κυκλωματική αναπαράσταση μοντέλου μηχανής [23]

Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης κατά τη διάρκεια μια εκφόρτισης μοντέλου μηχανής.



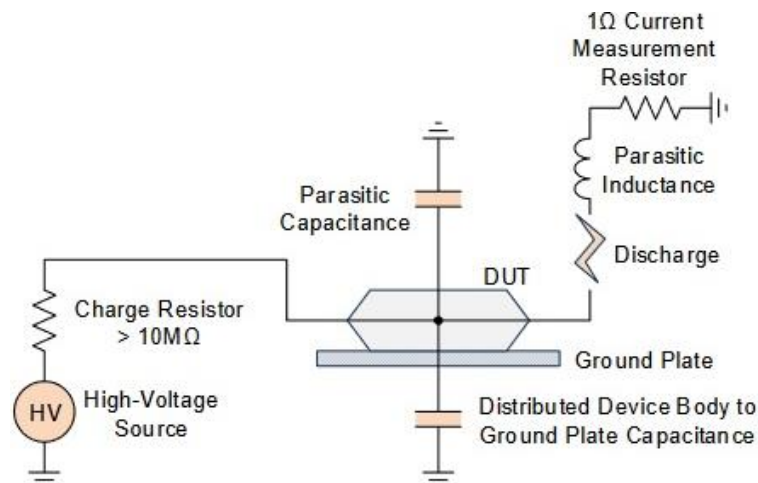
Σχήμα 1.12: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης ESD – Μοντέλο Μηχανής[23]

1.2.3.3 Μοντέλο φορτισμένης συσκευής – Charged Device Model (CDM)

Η δοκιμή μοντέλου φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model, CDM) σε επίπεδο συσκευής είναι μια προσομοίωση του τι συμβαίνει συχνά σε ένα αυτοματοποιημένο περιβάλλον παραγωγής. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι συσκευές παραμένουν σε λειτουργία για αόριστο χρονικό διάστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματά τους να φορτίζονται ηλεκτρικά με την πάροδο του χρόνου. Όταν μια συσκευή έρχεται σε επαφή με έναν γειωμένο αγωγό, η συσσωρευμένη χωρητικότητα εκφορτίζεται. Για τη δοκιμή μοντέλου φορτισμένης συσκευής, η υπό

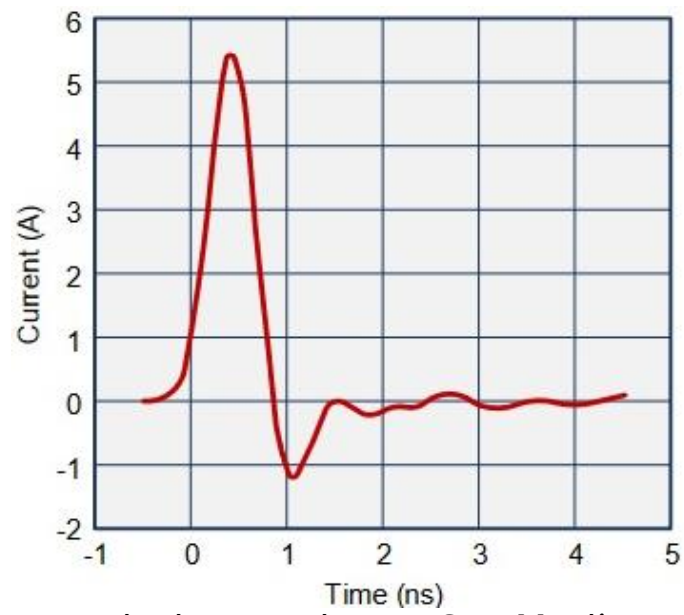
εξέταση συσκευή (DUT) τοποθετείται στην πλάτη του στραμμένο προς τα επάνω σε μια πλακέτα δοκιμής.

Στο Σχήμα 1.13 φαίνεται μια κυκλωματική αναπαράσταση του μοντέλου φορτισμένης συσκευής. Η μεταλλική πλάκα πεδίου και η υπό εξέταση συσκευή (DUT) χωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό, το οποίο λειτουργεί ως πυκνωτής μεταξύ δύο αντικειμένων. Στη συνέχεια, η μεταλλική πλάκα συνδέεται σε μια πηγή υψηλής τάσης και ανυψώνεται στο απαιτούμενο επίπεδο τάσης δοκιμής του μοντέλου φορτισμένης συσκευής (CDM). Ακολουθώντας, ένας ανιχνευτής έρχεται κοντά στον συγκεκριμένο υπό δοκιμή ακροδέκτη, όπου συμβαίνει μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση, και επαληθεύεται παρακολουθώντας τη γείωση του υπό δοκιμή ακροδέκτη. Αυτή η δοκιμή επαναλαμβάνεται σε κάθε ακίδα της από εξέτασης συσκευής για τρεις θετικούς και τρεις αρνητικούς παλμούς, με αποτέλεσμα έξι συνολικά εκκενώσεις ανά ακίδα.



Σχήμα 1.13: Κυκλωματική αναπαράσταση μοντέλου φορτισμένης συσκευής [23]

Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης κατά τη διάρκεια μια εκφόρτισης μοντέλου φορτισμένης συσκευής. Η εκφόρτιση συμβαίνει σε μερικά ns, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη δοκιμή και τη μοντελοποίηση. Αποτέλεσμα αυτής της δοκιμής είναι ένα υψηλό ρεύμα 5A έως 6A, το οποίο εκφορτίζεται σε λιγότερο από 1ns και μέχρι τα 5ns έχει ήδη εκφορτιστεί πλήρως. Εξαιτίας αυτού του γρήγορου μεταβατικού φαινομένου, οι αστοχίες που εμφανίζονται σε αυτού του είδους τις δοκιμές είναι ζημιά από οξειδίο πύλης, παγίδευση φορτίου και ζημιά στις συνδέσεις.



Σχήμα 1.14: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης ESD – Μοντέλο φορτισμένης συσκευής [23]

Κεφάλαιο 2 : Γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

2.1 Πρότυπα για δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Τα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) αποτελούν μια εξέχουσα απειλή για τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία ή καταστροφή προϊόντα ή κυκλώματά τους. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα που διατίθενται στην αγορά είναι ικανά να εκτελέσουν ικανοποιητικά τις λειτουργίες για τις οποίες προορίζονται και να συνυπάρχουν αρμονικά με τα υπόλοιπα συστήματα στο περιβάλλον λειτουργίας τους, έχουν αναπτυχθεί Πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) από διεθνείς επιτροπές.

Τα Πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) καθορίζουν τα όρια και τα ελάχιστα επίπεδα δοκιμής για ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και την ατρωσία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων. Επίσης, διατυπώνουν τις μεθόδους δοκιμής, το περιβάλλον δοκιμής, καθώς και τον απαραίτητο ειδικό δοκιμαστικό εξοπλισμό. Με αυτόν τον τρόπο οι μετρήσεις μπορούν να είναι επαναλαμβανόμενες και συγκρίσιμες.

Τα Πρότυπα EMC είτε ορίζονται και διατυπώνονται από διεθνείς και εθνικούς ή περιφερειακούς οργανισμούς και επιτροπές για λογαριασμό διοικητικών φορέων (όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση εκχωρεί τη διατύπωση των προτύπων EMC στη CEN/ELC) είτε διοικητικοί ή και ρυθμιστικοί φορείς τα αναφέρουν οι ίδιοι. Με στόχο να ικανοποιούνται οι ανάγκες της σύγχρονης εποχής και οι απαιτήσεις που ορίζει η κοινωνία, τα πρότυπα αυτά βρίσκονται σε μια διαρκή διαδικασία εξέλιξης και αναβάθμισης με τις παλαιότερες εκδόσεις τους να αντικαθίστανται από τις νεότερες [24].

Το κυρίαρχο Πρότυπο για την εκτέλεση δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) σε επίπεδο συστήματος είναι σχεδιασμένο από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission, IEC) και είναι το IEC 61000-4-2. Ο σκοπός της εκτέλεσης δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) σε επίπεδο συστήματος είναι να διασφαλιστεί ότι το προϊόν θα μπορούσε να λειτουργήσει κανονικά τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά την εκδήλωση του φαινομένου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD).

Για την αναπαραγωγή του σεναρίου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) ανθρώπου-μετάλλου κατά τη διάρκεια δοκιμής ESD σε επίπεδο συστήματος χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές που ονομάζονται γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (electrostatic discharge generators). Συχνά χρησιμοποιείται ο όρος πιστόλι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD gun) λόγω του ιδιαίτερου σχήματός τους [25]. Παραδείγματα τέτοιων γεννητριών ESD φαίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Γεννήτριες ESD [28]

Μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης λειτουργεί δημιουργώντας ένα παλμό υψηλής τάσης, ο οποίος εκκενώνεται μέσω ενός ηλεκτροδίου στην υπό εξέταση συσκευή (Device Under Test, DUT). Το επίπεδο τάσης, η πολικότητα εκφόρτισης και η διάρκεια του παλμού μπορούν να ρυθμιστούν για την προσομοίωση διαφορετικών τύπων συμβάντων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης είναι συνήθως μια μεταλλική πλάκα ή σημείο, το οποίο τοποθετείται κοντά στην υπό εξέταση συσκευή (DUT).

Όταν ο παλμός υψηλής τάσης εκφορτίζεται μέσω του ηλεκτροδίου, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την υπό εξέταση συσκευή (DUT). Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει τη συσσώρευση φορτίου στην επιφάνεια του της υπό εξέτασης

συσκευής (DUT), προσομοιώνοντας τα αποτελέσματα ενός συμβάντος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD). Η ποσότητα φόρτισης που συσσωρεύεται στην υπό εξέταση συσκευή (DUT) εξαρτάται από το επίπεδο της τάσης, την πολικότητα εκφόρτισης και τη διάρκεια του παλμού [26].

Τα χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές μια τέτοιας γεννήτριας ESD ορίζονται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

2.2 Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 αποτελεί την αναθεωρημένη δεύτερη έκδοση του τέταρτου μέρους του προτύπου IEC 61000 και σχετίζεται με τις απαιτήσεις ατρωσίας και τις μεθόδους δοκιμής για ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό που υπόκειται σε ηλεκτροστατικές εκκενώσεις, απευθείας από τους χειριστές σε παρακείμενα αντικείμενα. Επιπλέον, ορίζει το εύρος επιπέδων των δοκιμών που σχετίζονται με διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες εγκατάστασης, καθώς επίσης θεσπίζει τις διαδικασίες δοκιμής.

Σκοπός αυτού του προτύπου είναι να δημιουργηθεί μια κοινή και αναπαραγώγιμη βάση για την αξιολόγηση της απόδοσης του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όταν υποβάλλεται σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Επίσης, περιλαμβάνει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις που μπορεί να συμβούν από τους ανθρώπους κοντά σε ζωτικής σημασίας εξοπλισμό.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρότυπο αυτό καθορίζονται:

- Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης
- Τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής
- Ο απαιτούμενος εξοπλισμός δοκιμής
- Η εγκατάσταση δοκιμής
- Η διαδικασία της δοκιμής
- Η διαδικασία της διακρίβωσης
- Η μέτρηση αβεβαιοτήτων

Σε αυτή τη διπλωματική θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε ότι αφορά τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως περιγράφεται στο συγκεκριμένο Πρότυπο [27].

2.2.1 Επίπεδα Τάσεων Δοκιμής

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις κατηγοριοποιούνται σε εκφορτίσεις επαφής και εκφορτίσεις αέρα. Επιπλέον, οι εκφορτίσεις επαφής χωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες. Γενικά, οι άμεσες εκφορτίσεις εφαρμόζονται σε αγώγιμες επιφάνειες, ενώ οι έμμεσες εκφορτίσεις εφαρμόζονται σε επίπεδα σύζευξης κοντά στον υπό εξέταση εξοπλισμό (EUT) [29].

Τα προτεινόμενα επίπεδα τάσης για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ESD δίνονται στον Πίνακα 2.1. Η προτιμητέα μέθοδος είναι η εκφόρτιση με επαφή, ενώ η εκφόρτιση μέσω του αέρα θα εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατό να εκτελεστεί εκφόρτιση με επαφή. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1 οι τάσεις για κάθε μέθοδο είναι διαφορετικές, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η αυστηρότητα της δοκιμής είναι ισοδύναμη μεταξύ των μεθόδων.

Για τη μέθοδο εκφόρτισης μέσω του αέρα, η δοκιμή πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα επίπεδα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 έως και το επιθυμητό επίπεδο δοκιμής. Για τη μέθοδο εκφόρτισης με επαφή, η δοκιμή πρέπει να εκτελείται μόνο για το καθορισμένο επίπεδο δοκιμής, εκτός αν προβλέπεται κάτι διαφορετικό από τις επιτροπές προϊόντος.

Πίνακας 2.1: Επίπεδα τάσεων δοκιμών

Επίπεδο	Ένδειξη τάσης δοκιμής	
	Εκφορτίσεις Επαφής	Εκφορτίσεις Αέρα
1	2 kV	2 kV
2	4 kV	4 kV
3	6 kV	8 kV
4	8 kV	15 kV
x*	special	special
*Το επίπεδο "x" μπορεί να είναι οποιοδήποτε επίπεδο, μεγαλύτερο, μικρότερο ή ανάμεσα στα άνωθεν επίπεδα. Το επίπεδο τάσης δοκιμής πρέπει να καθορίζεται στις προδιαγραφές του εξοπλισμού. Εάν προβλέπονται μεγαλύτερες τάσεις δοκιμής από τις παραπάνω, ίσως να χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός για τη δοκιμή.		

Τα επιθυμητά επίπεδα δοκιμής θα πρέπει να επιλέγονται σύμφωνα με τις πιο ρεαλιστικές συνθήκες εγκατάστασης και περιβάλλοντος. Όπως έχει γίνει γνωστό, η δημιουργία

ηλεκτροστατικών φορτίων ευνοείται ιδιαίτερα από το συνδυασμό συνθετικών υφασμάτων και ξηρής ατμόσφαιρας και μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε τιμές τάσης έως και αρκετά kV. Ωστόσο, για ορισμένα υλικά, όπως το ξύλο, το σκυρόδεμα και το κεραμικό μπορούν να επιλεγούν τα χαμηλότερα επίπεδα δοκιμών. Στον Πίνακα 2.2 φαίνεται μια ενδεικτική οδηγία για την επιλογή επιπέδου δοκιμής [27].

Πίνακας 2.2: Ενδεικτική οδηγία επιλογής επιπέδου δοκιμής

Επίπεδο	Σχετική υγρασία τόσο χαμηλή όσο %	Αντιστατικό υλικό	Συνθετικό υλικό	Μέγιστη Τάση [kV]
1	35	X		2
2	10	X		4
3	50		X	8
4	10		X	15

2.2.2 Γεννήτρια Δοκιμών

2.2.2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που περιγράφεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed2.0 βασίζεται στο μοντέλου του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model, HBM).

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτελείται από:

- αντίσταση φόρτισης R_c
- πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας C_s
- κατανεμημένη χωρητικότητα C_d
- αντίσταση εκφόρτισης R_d
- ενδείκτη τάσης
- διακόπτη εκφόρτισης (discharge switch)
- διακόπτη φόρτισης (charge switch)
- εναλλάξιμα άκρα του ηλεκτροδίου εκφόρτισης (interchangeable tips of the discharge electrode)
- καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης
- τροφοδοτικό (DC HV supply)

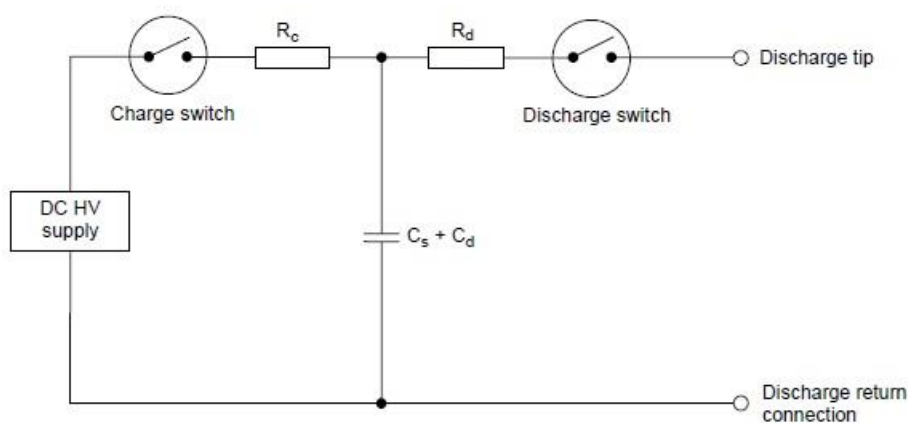
Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπου ισχύει ότι:

- Η χωρητικότητα C_d είναι μια κατανεμημένη χωρητικότητα που υφίσταται ανάμεσα στη γεννήτρια και όσων την περιβάλλουν
- Το άθροισμα χωρητικοτήτων $C_d + C_s$ έχει τυπική τιμή 150pF
- Η αντίσταση R_d έχει τυπική τιμή 330Ω.

Η λειτουργία της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βασίζεται, στην πραγματικότητα, στη διαδικασία της φόρτισης ενός πυκνωτή μέσω μιας πηγής υψηλής τάσης και του οποίου η τάση φόρτισης εκφορτίζεται μέσω αντιστάσεων μέσω του σημείου επαφής στη γείωση.

Η χωρητικότητα αποθήκευσης είναι αντιπροσωπευτική της χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος και η τιμή των 150pF έχει προσδιοριστεί ως κατάλληλη για αυτό το σκοπό. Επίσης, η αντίσταση των 330Ω αντιπροσωπεύει την αντίσταση ενός ανθρωπίνου σώματος που κρατά ένα μεταλλικό αντικείμενο, όπως ένα κλειδί ή ένα εργαλείο. Έχει αποδειχθεί ότι αυτή η περίπτωση εκφόρτισης μετάλλου είναι αρκετά σοβαρή ώστε να αντιπροσωπεύει όλες τις ανθρώπινες εκφορτίσεις στο πεδίο.

Διευκρινίζεται ότι οι ούτε το διάγραμμα του Σχήματος 2.2, ούτε οι τιμές των στοιχείων καθορίζονται λεπτομερώς από το Πρότυπο.



Σχήμα 2.2: Απλοποιημένο κύκλωμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [27]

2.2.2.2 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις της γεννήτριας ESD

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές που δίνονται στους Πίνακες 2.3 και 2.4.

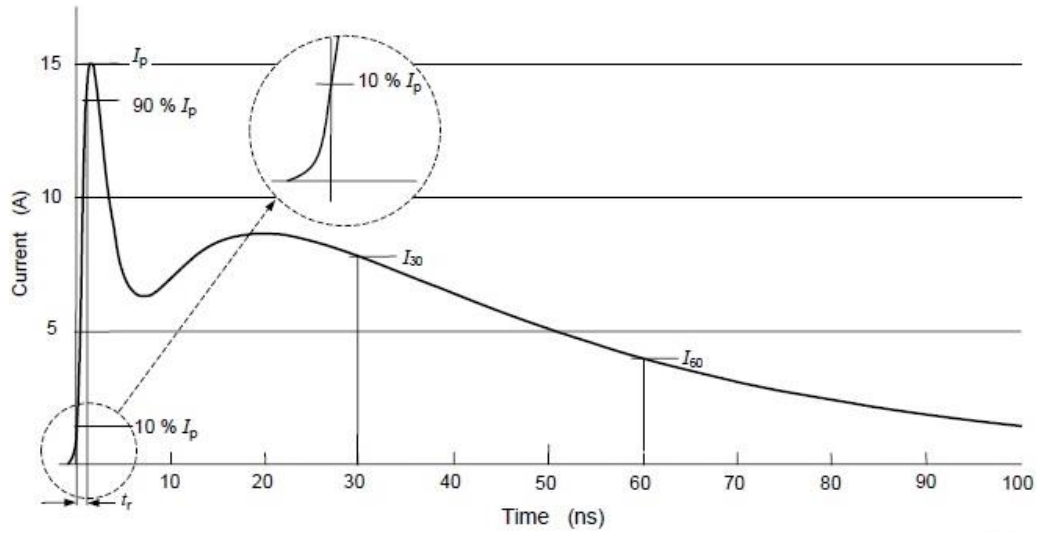
Πίνακας 2.3: Γενικές προδιαγραφές γεννήτριας ESD

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

Πίνακας 2.4: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος σε εκφόρτιση με επαφή κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0

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

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης $I(t)$ στα 4kV, καθώς και τα σημεία μετρήσεων που αναφέρονται στους Πίνακες 2.3 και 2.4.



Σχήμα 2.3: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4kV κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [27]

Το ρεύμα εκφόρτισης $I(t)$ σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.3, μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος I_p , το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak), και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση ανθρωπίνου σώματος. [30]

Η εξίσωση για την ιδανική κυματομορφή του Σχήματος 2.3, $I(t)$ είναι η εξής:

$$I(t) = \frac{I_1}{k_1} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \times \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{I_2}{k_2} \times \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \times \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right) \quad [2.1]$$

όπου:

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

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

και

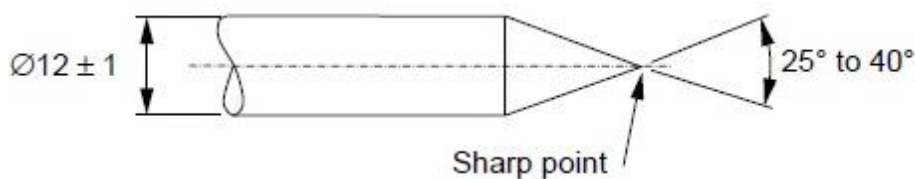
$$\tau_1 = 1.1ns, \tau_2 = 2ns, \tau_3 = 12ns, \tau_4 = 37ns$$

$$I_1 = 16.6A \text{ (στα } 4kV), I_2 = 9.3A \text{ (στα } 4kV)$$

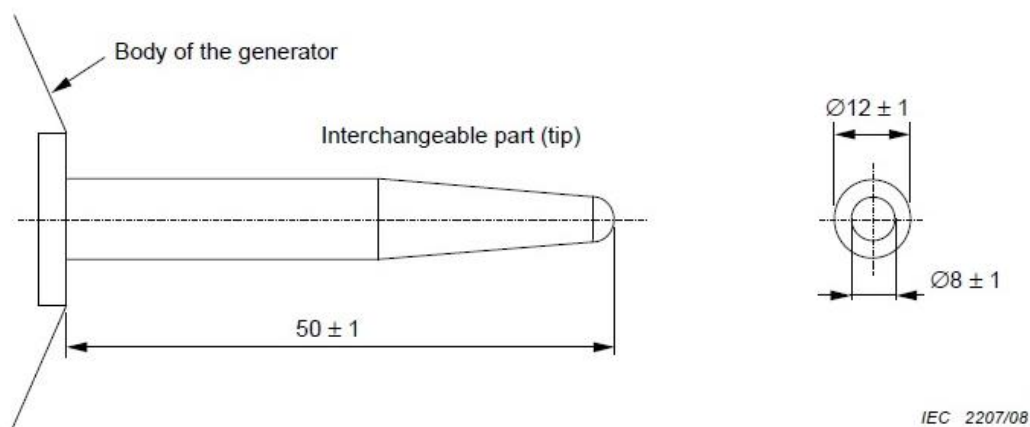
$$n = 1.8$$

Η γεννήτρια θα πρέπει να διαθέτει τα απαραίτητα μέσα αποτροπής ακούσιων εκπομπών (επαγόμενων ή ακτινοβολούμενων), είτε συνεχείς είτε σε μορφή παλμού, ώστε να μη διαταράσσονται από παράσιτα η υπό εξέταση συσκευή και ο εξοπλισμός δοκιμής.

Τα ηλεκτρόδια εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τα σχήματα και τις διαστάσεις που φαίνονται στα Σχήματα 2.4 και 2.5. Μπορούν να καλύπτονται με μονωτικές επιστρώσεις, με την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι προδιαγραφές της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης.



Σχήμα 2.4: Ηλεκτρόδιο για εκφόρτιση με επαφή [27]



Σχήμα 2.5: Ηλεκτρόδιο για εκφόρτιση μέσω αέρα [27]

Για την εκτέλεση της μεθόδου δοκιμής εκφόρτισης μέσω αέρα, χρησιμοποιείται η ίδια γεννήτρια ESD και θα πρέπει ο διακόπτης εκφόρτισης να είναι κλειστός. Η γεννήτρια ESD πρέπει να είναι εφοδιασμένη με το στρογγυλό άκρο (ηλεκτρόδιο) που φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Εφόσον χρησιμοποιείται η ίδια γεννήτρια ESD, δεν υπάρχουν περαιτέρω προδιαγραφές για αυτή τη μέθοδο εκφόρτισης.

2.2.3 Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ESD για τη μέθοδο εκφόρτισης με επαφή σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0

Κατά την αξιολόγηση μιας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι σημαντικό να υπάρχει συγκρίσιμο αποτέλεσμα διακρίβωσης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου κατά τις δοκιμές

χρησιμοποιούνται γεννήτριες ESD διαφορετικών κατασκευαστών ή όταν οι δοκιμές παρατείνονται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Θα πρέπει η επαναληψιμότητα να αποτελεί έναν κινητήριο παράγοντα στην αξιολόγηση. Η γεννήτρια ESD θα βαθμονομείται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα σε σχέση με ένα αναγνωρισμένο σύστημα διασφάλισης ποιότητας.

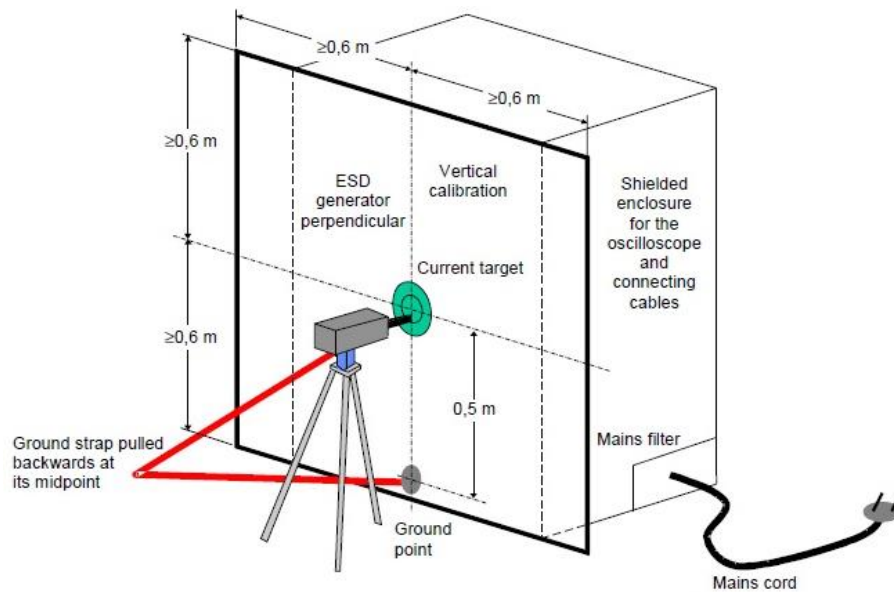
Για τη διακρίβωση μιας γεννήτριας ESD σύμφωνα με το IEC 61000-4-2 Ed 2.0 απαιτείται ο εξής εξοπλισμός:

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

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

- Ο στόχος ρεύματος τοποθετείται στο κέντρο του κατακόρυφου επιπέδου διακρίβωσης.
- Η σύνδεση του καλωδίου ρεύματος επιστροφής της γεννήτριας ESD (ιμάντας γείωσης) πρέπει να γίνεται στο κάτω κέντρο του επιπέδου διακρίβωσης 0,5m κάτω από τον στόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.
- Ο ιμάντας γείωσης πρέπει να τραβιέται προς τα πίσω στη μέση του καλωδίου, σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο. Ο ιμάντας γείωσης δεν επιτρέπεται να ακουμπά στο πάτωμα κατά τη διακρίβωση.
- Η γεννήτρια πρέπει να εγκατασταθεί σε τρίποδο ή ισοδύναμο μη μεταλλικό στήριγμα χαμηλών απωλειών.
- Η γεννήτρια ESD θα πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί μια αντεστραμμένη διάταξη του Σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0 [27]

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

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

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

2.2.4 Επιλογή στοιχείων της γεννήτριας ESD

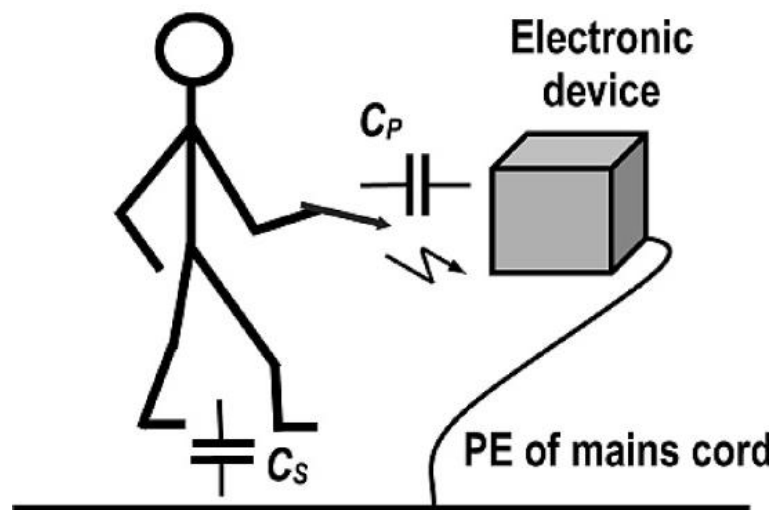
Όπως είδαμε, σύμφωνα με το Πρότυπο, για το άθροισμα των χωρητικότητων $C_d + C_s$ έχει επιλεγεί η τυπική τιμή των 150pF, η οποία είναι αντιπροσωπευτική της χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος και έχει προσδιοριστεί κατάλληλη για αυτό το σκοπό. Γενικά, η χωρητικότητα μεταξύ της γης και του ανθρωπίνου σώματος είναι της τάξης των 100 pF και η χωρητικότητα είναι κυρίαρχη στην επιφάνεια επαφής του ποδιού με τη γη. Το ανθρώπινο σώμα είναι ανθεκτικό και όλα τα μέρη του φορτισμένου ανθρωπίνου σώματος είναι σχεδόν ισοδυναμικές επιφάνειες. Επίσης, η χωρητικότητα του ανθρωπίνου σώματος εξαρτάται και από τη δραστηριότητά του, δηλαδή αν κάθεται, στέκεται ή περπατά.

Η αντίσταση R_d έχει τυπική τιμή 330Ω και έχει επιλεγεί για να αντιπροσωπεύει την αντίσταση πηγής ενός ανθρώπινου σώματος που κρατά ένα μεταλλικό αντικείμενο, όπως ένα κλειδί ή ένα εργαλείο. Έχει αποδειχθεί ότι αυτή η κατάσταση εκφόρτισης μετάλλου είναι αρκετά σοβαρή, ώστε να αντιπροσωπεύει όλες τις ανθρώπινες εκκενώσεις στο πεδίο.

2.3 Ακτινοβολούμενα πεδία από εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου και γεννήτριες ESD

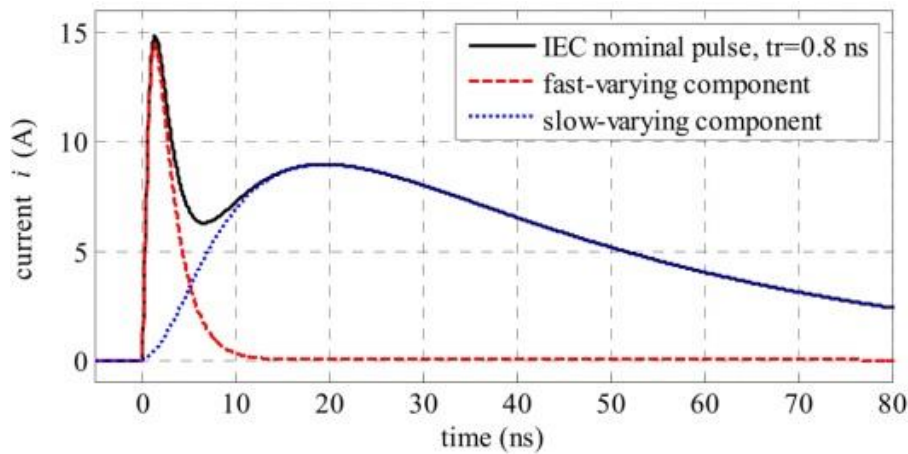
2.3.1 Γενικά για την εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου μπορεί να λάβει χώρα όταν ένα φορτισμένο άτομο που κρατά ένα μυτερό μεταλλικό αντικείμενο, όπως ένα κατσαβίδι ή ένα μεταλλικό στυλό, κινεί γρήγορα το χέρι του σε μια ηλεκτρονική συσκευή. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται μια περίπτωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου-μετάλλου.



Σχήμα 2.7: Ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου [31]

Στο Σχήμα 2.8 εμφανίζεται το ρεύμα εκφόρτισης λόγω αυτού του φαινομένου. Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης μπορεί να αναλυθεί από δύο συνιστώσες ρεύματος. Η ταχέως μεταβαλλόμενη συνιστώσα, που απεικονίζεται με τη διακεκομμένη κόκκινη γραμμή, οφείλεται στην εκφόρτιση τόξου μιας χωρητικότητας C_p μεταξύ του μεταλλικού άκρου και της συσκευής. Η αργά μεταβαλλόμενη συνιστώσα, που απεικονίζεται με τη διακεκομμένη μπλε γραμμή οφείλεται στην εκφόρτιση μιας μεγαλύτερης χωρητικότητας σώματος C_s .



Σχήμα 2.8: Συνιστώσες κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης [31]

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση από έναν άνθρωπο μέσω ενός μικρού μεταλλικού αντικειμένου, έχει αποτελέσει τη βάση για την κυματομορφή που καθορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2. Αυτή η εκφόρτιση από τον άνθρωπο, καθώς και η εκφόρτιση από μία γεννήτρια ESD είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ισχυρών συσχετιζόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [31].

Στη συνέχεια γίνεται μια επισκόπηση των διεργασιών που προκαλούν εκούσια και ακούσια πεδία από μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου και από εκφόρτιση γεννήτριας ESD.

2.3.2 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου

Για ένα συμβάν ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) από ένα άνθρωπο σε εξοπλισμό υπό δοκιμή (Equipment Under Test, EUT), θα συμβεί η ακόλουθη σειρά γεγονότων:

- Καθώς ένα μεταλλικό αντικείμενο, που το κρατάει ένας άνθρωπος στο χέρι, πλησιάζει μια μεταλλική επιφάνεια ενός EUT και πριν από την εκφόρτιση του ρεύματος, υπάρχει ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Δεν ρέει καθόλου ρεύμα (ή ρέει πολύ λίγο) και δεν υπάρχει σχετικό μαγνητικό πεδίο.
- Μόλις ξεκινήσει η εκφόρτιση μεταξύ του χειροκίνητου μεταλλικού αντικειμένου και του EUT, το ηλεκτροστατικό πεδίο καταρρέει μέσα στο διάκενο μεταξύ των δύο. Ξεκινώντας από την αρχική του τιμή, καταρρέει σε μια τάση στο διάκενο περίπου 25V έως 40V μέσα σε χρόνο 50ps έως 5ns. Ο χρόνος κατάρρευσης εξαρτάται από τις παραμέτρους του τόξου, την τάση κ.λπ. Η αρχική κατάρρευση του ηλεκτρικού πεδίου

είναι το πρώτο βήμα σε μια σειρά γεγονότων που προκαλούν ισχυρά παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

- Ένα ρεύμα αρχίζει να ρέει στο μεταλλικό αντικείμενο που κρατά ο άνθρωπος και στο EUT. Το μπροστινό μέτωπο του ρεύματος διαστέλλεται με την ταχύτητα του φωτός και μέσα σε περίπου 0,8ns, έχει φτάσει στο χέρι του ατόμου. Καθώς το ρεύμα συνεχίζει να επεκτείνεται περαιτέρω στο EUT και στο βραχίονα, θα παρουσιάσει αντανάκλασεις και απώλειες λόγω ακτινοβολίας και αντίστασης, οδηγώντας σε ένα περίπλοκο μοτίβο πυκνότητας ρεύματος τόσο στο EUT όσο και στο άτομο.
- Καθώς η διαδικασία εκφόρτισης συνεχίζεται, οι συνιστώσες υψηλότερης συχνότητας του ρεύματος θα εξασθενήσουν γρήγορα, κυρίως λόγω της ακτινοβολίας. Το ρεύμα, στη συνέχεια, γίνεται πιο ομαλό (δηλαδή με λιγότερο περιεχόμενο υψηλής συχνότητας) όσο αυξάνεται ο χρόνος και τελικά το σώμα φτάνει σε μια νέα ηλεκτροστατική ισορροπία με το EUT. Το υπόλοιπο φορτίο στο σώμα, ωστόσο, μπορεί να μην είναι μηδενικό, καθώς το τόξο μπορεί να σβήσει πριν αποφορτιστεί πλήρως το σώμα. Εάν το χέρι και το μεταλλικό αντικείμενο συνεχίσουν να πλησιάζουν το EUT, μπορεί να συμβεί μια δεύτερη εκφόρτιση σε χαμηλότερη τάση που οδηγεί σε μια ακολουθία ESD, καθεμία σε χαμηλότερη τάση και καθεμία έχει ταχύτερο χρόνο ανόδου (που εν μέρει αποδίδεται στη χαμηλότερη τάση).
- Κατά τη διάρκεια κάθε ακολουθίας εκφόρτισης, ένας παρατηρητής που βρίσκεται σε κάποιο σημείο του χεριού, του σώματος ή του EUT θα παρατηρεί μια πυκνότητα φόρτισης πριν από την εκφόρτιση, κατά τη φάση εκφόρτισης ένα ταχέως μεταβαλλόμενο ρεύμα και μετά την εκφόρτιση ένα μικρό υπολειπόμενο φορτίο.
- Από τη θεωρία της κεραίας είναι γνωστό ότι η αλλαγή της πυκνότητας φορτίου και η αλλαγή των ρευμάτων θα προκαλέσει ακτινοβολούμενα πεδία. Σε κοντινή απόσταση, τα πεδία κυριαρχούνται από το ρεύμα και τη φόρτιση άμεσα, και σε μεγαλύτερες αποστάσεις το ρεύμα και η παράγωγος χρόνου φόρτισης θα καθορίσουν τα πεδία. Η περιοχή μετάβασης μεταξύ των πεδίων κοντινής απόστασης (κοντό πεδίο) και των πεδίων που φαίνονται σε μεγαλύτερη απόσταση (μακρινό πεδίο) είναι πιο περίπλοκη. Οι μετρήσεις και οι προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι τα μεταβατικά πεδία της ESD, τουλάχιστον για τα πιο ανησυχητικά πρώτα ns, θα φτάσουν σε συνθήκες μακρινού πεδίου σε απόσταση 10 cm από το τόξο.

- Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι το ρεύμα και η παράγωγος χρόνου φόρτισης είναι εξαιρετικά σημαντικά όσον αφορά την ανατροπή (μη καταστροφικό σφάλμα) ηλεκτρονικών συστημάτων.
- Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε μια ανθρώπινη εκφόρτιση, το ρεύμα και τα παράγωγα φορτίου καθορίζονται από το χρόνο κατάρρευσης της τάσης στο τόξο. Έτσι, ο χρόνος ανόδου ρεύματος κατά την εκφόρτιση καθορίζει τα στοιχεία υψηλής συχνότητας.

Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι τα μεταβατικά πεδία μιας ESD ανθρώπου-μετάλλου αποτελούν σημαντικό μέρος της διαδικασίας ESD. Μια ιδανική γεννήτρια ESD θα τα αναπαράγει με κάποιο ποσοτικό τρόπο. Οι δυνάμεις πεδίου της ESD ανθρώπου-μετάλλου κ.λπ., είναι γνωστές[27].

2.3.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση γεννήτριας ESD

Σε αντιστοιχία της ανάλυσης του φαινομένου ESD ανθρώπου-μετάλλου, ακολουθεί η ανάλυση και η σύγκριση της διαδικασίας που συμβαίνει στις σύγχρονες γεννήτριες ESD. Δεδομένου ότι οι περισσότερες δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εκτελούνται σε λειτουργία επαφής και για λόγους αναπαραγωγιμότητας, τα ακόλουθα περιορίζονται στις γεννήτριες ESD λειτουργίας επαφής:

- Το άκρο εκφόρτισης της γεννήτριας ESD έρχεται σε επαφή με ένα γειωμένο (στις περισσότερες περιπτώσεις) τμήμα του EUT.
- Πριν την εκφόρτιση, ένας πυκνωτής στη γεννήτρια ESD φορτίζεται. Σε πολλά σχέδια, το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτροστατικού πεδίου που προκύπτει από τη διαδικασία φόρτισης περιορίζεται στη γεννήτρια ESD. Ως αποτέλεσμα, το ηλεκτροστατικό πεδίο στην περιοχή πριν από την εκφόρτιση είναι πολύ μικρότερο από το ηλεκτροστατικό πεδίο που θα μετρούσε κανείς στο ίδιο σημείο από έναν άνθρωπο που φορτίζεται με την ίδια τάση.
- Η εκφόρτιση ξεκινά με το κλείσιμο ενός ρελέ εσωτερικού στη γεννήτρια ESD. Ο σχεδιασμός αυτών των ειδικών ρελέ επιτρέπει μια πολύ καλή αναπαραγωγιμότητα του ρεύματος εκφόρτισης. Ωστόσο, επειδή το ρελέ είναι εσωτερικό και όχι στο σημείο στο οποίο η γεννήτρια ESD αγγίζει το EUT, η έναρξη της ροής του ρεύματος εκφόρτισης είναι αρκετά διαφορετική από την ανθρώπινη εκφόρτιση.

- Οι χρόνοι κατάρρευσης της τάσης μέσα στο ρελέ είναι πολύ γρήγοροι, σίγουρα λιγότεροι από 100 ps, γεγονός που οδηγεί σε ένα κύμα ρεύματος που απομακρύνεται από το ρελέ προς όλες τις κατευθύνσεις και σε όλα τα μεταλλικά μέρη που έρχονται σε επαφή και άλλα μεταλλικά μέρη σε κοντινή απόσταση. Το ρεύμα θα διαδοθεί με την ταχύτητα του φωτός (σε διηλεκτρικά με μειωμένη ταχύτητα). Ο χρόνος ανόδου αυτού του ρεύματος ισούται με τον χρόνο κατάρρευσης της τάσης.
- Ο χρόνος κατάρρευσης της τάσης είναι μικρότερος από 100 ps, αλλά αυτό το πρότυπο απαιτεί χρόνο ανόδου ρεύματος ($0,8 \pm 0,2$) ns που μετράται στο σημείο επαφής με τον στόχο. Για να επιτευχθεί αυτό, σχεδιάζονται μέτρα στις γεννήτριες ESD που αυξάνουν τον χρόνο ανόδου από την πολύ χαμηλή τιμή εντός του ρελέ στις τυποποιημένες τιμές στο άκρο εκφόρτισης.
- Τα μεταβατικά πεδία προκαλούνται από όλες τις παραγώγους ρεύματος χρόνου και τις παραγώγους πυκνότητας φορτίου χρόνου. Πρέπει να σημειωθεί μια σημαντική διαφορά μεταξύ της εκφόρτισης από μια γεννήτρια και εκείνης από έναν άνθρωπο με μέταλλο: Για μια ανθρώπινη εκφόρτιση ο χρόνος ανόδου του ρεύματος στο τόξο είναι η ταχύτερη διαδικασία και καθορίζει το φάσμα των μεταβατικών πεδίων. Ωστόσο, με μια γεννήτρια ESD σε λειτουργία επαφής, το φάσμα υψηλής συχνότητας καθορίζεται από την κατάρρευση τάσης του ρελέ και όχι από τον χρόνο ανόδου του ρεύματος στο άκρο εκφόρτισης.
- Δεδομένου ότι όλα τα μεταβαλλόμενα ρεύματα στη γεννήτρια προκαλούν μεταβατικά πεδία, υπάρχει μια συμβολή των ανοδικών ρευμάτων 100 ps στο ρελέ στα μεταβατικά πεδία από μια γεννήτρια ESD, καθώς και η συμβολή από τα αυξανόμενα ρεύματα ($0,8 \pm 0,2$) ns στο το σημείο εκφόρτισης. Τα μεταβατικά πεδία που προκαλούνται από τα ταχύτερα συμβάντα στη γεννήτρια είναι γενικά ανεπιθύμητα μεταβατικά πεδία, καθώς αυξάνουν το περιεχόμενο υψηλής συχνότητας αυτών των ακτινοβολούμενων πεδίων πέρα από εκείνα που αναπτύχθηκαν από μια ισοδύναμη εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου που έχει τον ίδιο τρέχοντα χρόνο ανόδου και τιμή αιχμής στο σημείο εκφόρτισης.

Από τα παραπάνω μπορεί να φανεί ότι η ισχύς της συμβολής των ταχέως αυξανόμενων ρευμάτων στα μεταβατικά πεδία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό της γεννήτριας ESD. Αυτή η συνεισφορά πεδίου μπορεί να καταστέλλεται καλά ή μπορεί να κυριαρχεί στα μεταβατικά πεδία σε οποιαδήποτε δεδομένη γεννήτρια. Δυστυχώς, αυτές

οι συνεισφορές δεν ρυθμίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 2.0, με αποτέλεσμα τα συμβάντα ανατροπής κατά τη διάρκεια της δοκιμής ESD να εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκεκριμένη γεννήτρια που χρησιμοποιείται[27].

2.4 Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0

Τον Μάρτιο του 2023 προτάθηκε από την Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) μια νεότερη αναθεώρηση την δεύτερης έκδοσης του τέταρτου μέρους του Προτύπου IEC 61000, το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0, το οποίο αντικαθιστά το IEC 61000-4-2 Ed 2.0. Με τη νεότερη αναθεώρηση περιγράφεται η αλλαγή στη διακρίβωση των χαρακτηριστικών για τις γεννήτριες ESD, η αλλαγή στην προσέγγιση της αποτυχίας σε στατική (ντετερμινιστική) έναντι στατιστικής και καθορίζονται οι ρυθμίσεις δοκιμής για συγκεκριμένες υπό εξέταση συσκευές. Σε αυτή τη ενότητα, παρουσιάζεται η νεότερη αναθεώρηση IEC 61000-4-2 Ed 3.0 σε ότι έχει σχέση με τις γεννήτριες ESD.

2.4.1 Επίπεδα Τάσεων Δοκιμής

Τα επίπεδα τάσεων δοκιμής στη νεότερη αναθεώρηση παραμένουν ίδια με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.2.1 και τον Πίνακα 2.1. Για τη μέθοδο εκφόρτισης μέσω του αέρα, η δοκιμή πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα επίπεδα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 έως και το επιθυμητό επίπεδο δοκιμής. Για τη μέθοδο εκφόρτισης με επαφή, η δοκιμή πρέπει να εκτελείται μόνο για το καθορισμένο επίπεδο δοκιμής, εκτός αν προβλέπεται κάτι διαφορετικό από τις επιτροπές προϊόντος.

2.4.2 Γεννήτρια Δοκιμών

2.4.2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

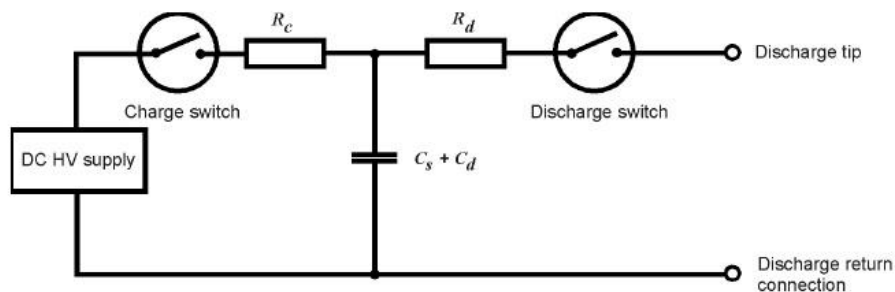
Το κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ESD που περιγράφεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 δεν εμφανίζει διαφοροποίηση από αυτό του Προτύπου IEC 61000-4-2 Ed 2.0. Συγκεκριμένα η γεννήτρια ESD αποτελείται από:

- αντίσταση φόρτισης R_c
- πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας C_s
- κατανεμημένη χωρητικότητα C_d
- αντίσταση εκφόρτισης R_d
- ενδείκτη τάσης
- διακόπτη εκφόρτισης (discharge switch)
- διακόπτη φόρτισης (charge switch)

- εναλλάξιμα άκρα του ηλεκτροδίου εκφόρτισης (interchangeable tips of the discharge electrode)
- καλώδιο επιστροφής εκφόρτισης
- τροφοδοτικό (DC HV supply)

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπου ισχύει ότι:

- Η χωρητικότητα C_d είναι μια κατανεμημένη χωρητικότητα που υφίσταται ανάμεσα στη γεννήτρια και όσων την περιβάλλουν
- Το άθροισμα χωρητικότητων $C_d + C_s$ έχει τυπική τιμή 150pF
- Η αντίσταση R_d έχει τυπική τιμή 330Ω [29]



Σχήμα 2.9: Απλοποιημένο κύκλωμα γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 [29]

2.4.2.2 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις της γεννήτριας ESD

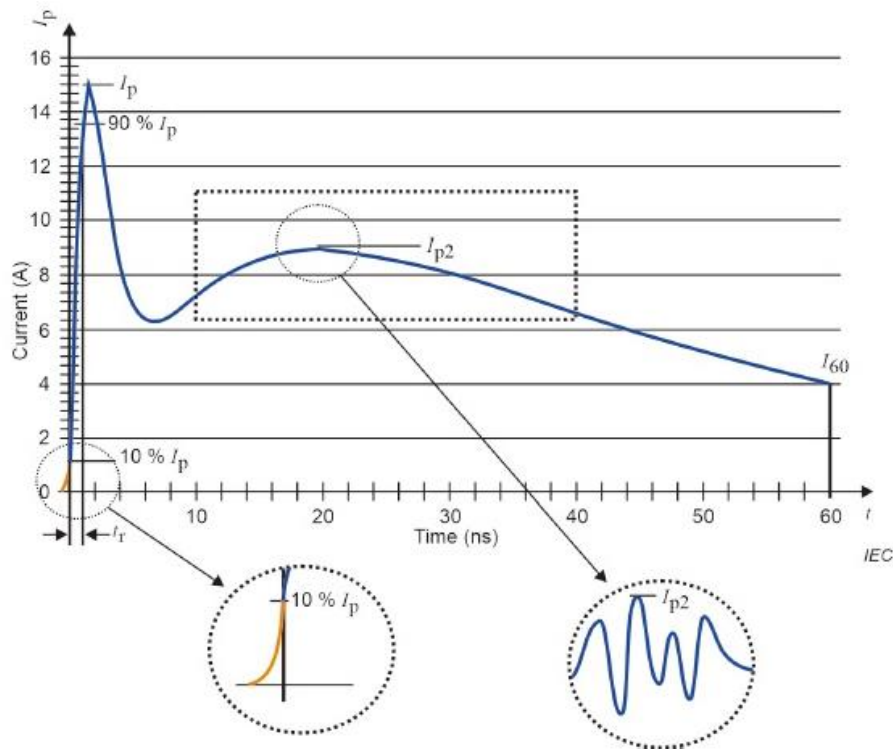
Οι γενικές προδιαγραφές της γεννήτριας ESD παραμένουν ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 2.3. Η διαφοροποίηση της νεότερης αναθεώρησης IEC 61000-4-2 Ed 3.0 αφορά στις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Στον Πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι όπως καθορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.

Πίνακας 2.5: Παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0

Επίπεδο		Ένδειξη Τάσης [kV]	Ρεύμα 1 ^{ης} κορυφής I_p ($\pm 15\%$) [A]	Χρόνος ανόδου t_r ($\pm 25\%$) [ns]	Ρεύμα 2 ^{ης} κορυφής I_{p2} ($\pm 30\%$) [A]	Ρεύμα ($\pm 30\%$) στα 60ns [A]
Δοκιμή Επαφής	Δοκιμή Αέρα					
1	1	2	7,5	0,8	4,5	2
2	2	4	15	0,8	9	4
3	-	6	22,5	0,8	13,5	6
4	3	8	30	0,8	18	8
-	4	15	56,3	0,8	33,8	15
Παρατηρήσεις: 1. Το ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης. 2. Ο χρόνος ανόδου t_r είναι ο χρόνος μεταξύ του 10% και 90% της 1^{ης} κορυφής του ρεύματος. 3. Το ρεύμα 2^{ης} κορυφής I_{p2} είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης στο διάστημα από 10ns έως 40ns από η χρονική στιγμή που το ρεύμα φτάνει για πρώτη φορά το 10% της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης. 4. Το ρεύμα στα 60ns I_{60} είναι η τιμή του ρεύματος 60ns μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα φτάνει για πρώτη φορά το 10% της 1ης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.						

Η σημαντικότερη αλλαγή που εισέρχεται σε αυτή την αναθεώρηση είναι το ρεύμα 2^{ης} κορυφής I_{p2} . Μέχρι την προηγούμενη αναθεώρηση IEC 61000-4-2 Ed 2.0 τα ρεύματα I_{30} και I_{60} ήταν απλώς σταθερά μεμονωμένα σημεία τα οποία επιλέγονταν τυχαία. Ωστόσο, τα αποτελέσματα ερευνών στο παρελθόν έδειξαν ότι το κουδούνισμα, το οποίο συμβαίνει τυχαία σε διαθέσιμες γεννήτριες ESD, επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των δοκιμών εντός του παραθύρου 10 – 40 ns και ότι το ρεύμα I_{p2} παίζει σημαντικό ρόλο. Επομένως, το κουδούνισμα πρέπει να μειωθεί.

Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης $I(t)$ στα 4kV για την εκφόρτιση με επαφή, καθώς και οι παράμετροί της που αναφέρονται στον Πίνακα 2.5.



Σχήμα 2.10 Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4kV κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 [29]

Η εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης για την ιδανική κυματομορφή του Σχήματος 2.10 περιγράφεται από την εξίσωση [2.1].

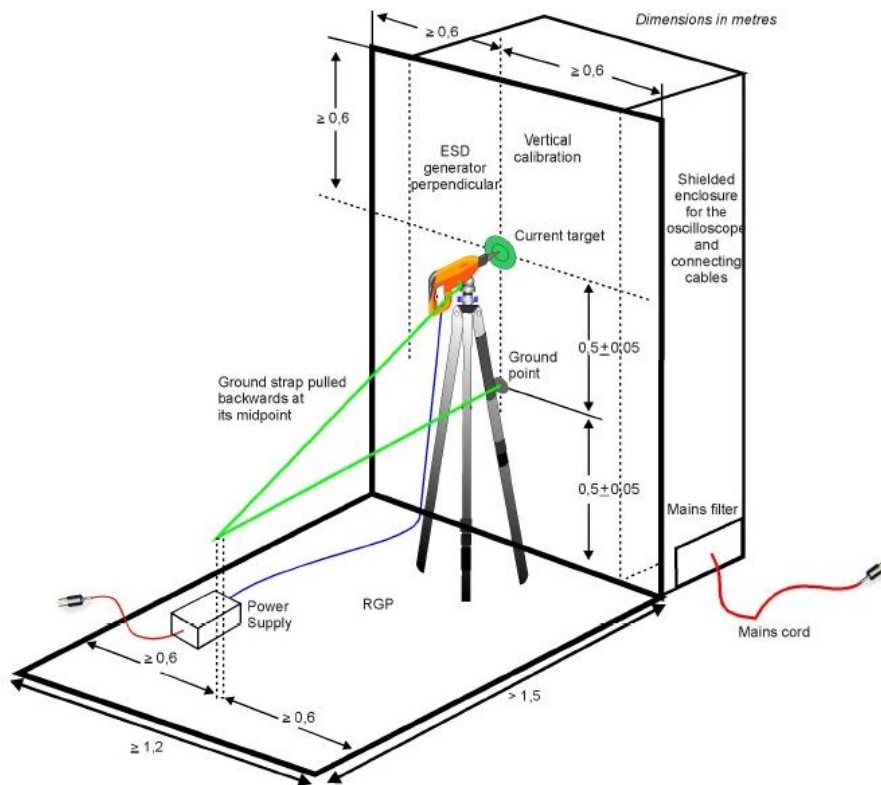
Η γεννήτρια θα πρέπει να διαθέτει τα απαραίτητα μέσα αποτροπής ακούσιων εκπομπών (επαγόμενων ή ακτινοβολούμενων), είτε συνεχείς είτε σε μορφή παλμού, ώστε να μη διαταράσσονται από παράσιτα η υπό εξέταση συσκευή και ο εξοπλισμός δοκιμής.

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 προς το προσωπικό ή προς αγωγίμες επιφάνειες εκτός από την απόληξή του, κατά τη δοκιμή ESD [29].

2.4.3 Διάταξη διακρίβωσης της γεννήτριας ESD για τη μέθοδο εκφόρτισης με επαφή σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0

Για τη διακρίβωση μιας γεννήτριας ESD σύμφωνα με το IEC 61000-4-2 Ed 3.0 απαιτείται ο εξής εξοπλισμός:

- παλμογράφος με εύρος ζώνης ≥ 2 GHz και ρυθμό δειγματοληψίας ≥ 8 GS/s
- Ομοαξονική αλυσίδα στόχου ρεύματος – εξασθενητή – καλωδίου
- Μετρητής υψηλής τάσης, ικανός να μετράει τουλάχιστον 15kV. Για τη διακρίβωση της DC τάσης εξόδου, θα χρησιμοποιείται ένας ωμικός διαιρέτης υψηλής τάσης συνδεδεμένος 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 τάσης εξαρτάται από το μοντέλο της γεννήτριας ESD και καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ηλεκτροστατικό βολτόμετρο με την ίδια ακρίβεια. Η τυπική τιμή για την αντίσταση εισόδου διαιρέτη τάσης είναι από 10 GΩ έως 100 GΩ και χρειάζεται προσοχή ώστε να μην προκύψουν εκκενώσεις Corona εντός της διάταξης μέτρησης, οι οποίες θα επηρεάσουν το αποτέλεσμα της.
- Κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης με τον ομοαξονικό στόχο ρεύματος, τοποθετημένο έτσι ώστε να απέχει τουλάχιστον 0,6m από τον στόχο έως οποιοδήποτε άκρο του επιπέδου.
- Επίπεδο αναφοράς (reference ground plane, RGP). Το RGP είναι επίπεδη αγωγίμη επιφάνεια που έχει το ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό με το έδαφος αναφοράς, χρησιμοποιείται ως κοινή αναφορά και συμβάλλει σε μια αναπαραγώγιμη παρασιτική χωρητικότητα με το περιβάλλον του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT). Θα πρέπει να έχει διαστάσεις όπως καθορίζονται στο Σχήμα 2.11 και πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε το τραβηγμένο προς τα πίσω καλώδιο γείωσης να καλύπτεται πλήρως.
- Εξασθενητή/ ές με επαρκή ικανότητα ισχύος, ανάλογα με τις ανάγκες



Σχήμα 2.11: Τυπική διάταξη διακρίβωσης γεννήτριας ESD σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 Ed 3.0 [29]

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

- Ο στόχος ρεύματος τοποθετείται στο κέντρο του κατακόρυφου επιπέδου διακρίβωσης.
- Η σύνδεση του καλωδίου ρεύματος επιστροφής της γεννήτριας ESD (ιμάντας γείωσης) πρέπει να γίνεται στο κάτω κέντρο του επιπέδου διακρίβωσης 0,5m κάτω από τον στόχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.
- Το καλώδιο γείωσης πρέπει να τραβιέται προς τα πίσω στη μέση του καλωδίου, σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο. Δεν επιτρέπεται να ακουμπά στο πάτωμα κατά τη διακρίβωση και δεν επιτρέπεται να το κρατά κάποιος χειριστής. Το επίπεδο RGP πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε το τραβηγμένο προς τα πίσω καλώδιο γείωσης να είναι πλήρως καλυμμένο.
- Η πηγή τάσης της γεννήτριας ESD πρέπει να είναι τοποθετημένη πάνω στο επίπεδο RGP, ενώ δεν επιτρέπεται να υπάρχουν αντικείμενα μεταξύ των ελάχιστων διαστάσεων της διάταξης διακρίβωσης που φαίνονται στο Σχήμα 2.11.
- Η γεννήτρια πρέπει να εγκατασταθεί σε τρίποδο ή ισοδύναμο μη μεταλλικό στήριγμα χαμηλών απωλειών και πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα

χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το επίπεδο RGP και το κατακόρυφο επίπεδο πρέπει να είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα. [29]

2.4.4 Συνάφεια δοκιμής εκφόρτισης αέρα - επαφής

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.

Στη μέθοδο εκφόρτισης επαφής, το άκρο εκφόρτισης έρχεται πρώτα σε επαφή με την υπό εξέταση συσκευή (EUT) και δημιουργείται στο ρελέ υψηλής τάσης, που είναι ενσωματωμένο στη γεννήτρια ESD, μια σταθεροποιημένη εκφόρτιση μικροκενού σε μια επαφή κινούμενη με υψηλή ταχύτητα σε αδρανές αέριο υψηλής πίεσης. Η πρώτη κορυφή του ρεύματος εκφόρτισης επαφής που περιγράφεται σε αυτό το Πρότυπο είναι μια αναλογία $3,75 \text{ A/kV}$ και είναι μια ρύθμιση ρεύματος εκφόρτισης μικρότερη κατά αρκετά kV σε σχέση με αυτήν για την εκφόρτιση μέσω αέρα, αλλά πάνω από 5 kV, έτσι ώστε να υπερβαίνει πάντα το ρεύμα εκφόρτισης μέσω αέρα. Για τη δεύτερη κορυφή, λαμβάνεται ρεύμα εκφόρτισης λόγω μεταφοράς φορτίου που είναι περίπου ισοδύναμο με αυτό τόσο της εκφόρτισης μέσω αέρα όσο και της εκφόρτισης με επαφή.

Όταν υπάρχουν καλές συνθήκες για εκφόρτιση μέσω αέρα, παρατηρείται χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης πολύ υψηλής ταχύτητας περίπου 0,3 ns, αλλά η απόσταση εκφόρτισης είναι πολύ μικρή με χαμηλή τάση φόρτισης.

Δεδομένου ότι η εκφόρτιση μέσω αέρα εφαρμόζεται στα αγωγίμα μέρη μέσα σε ένα περίβλημα, τα οποία δεν μπορούν να αγγιχθούν, καθορίζεται σε αυτό το Πρότυπο, ένα διάκενο εκκένωσης αέρα μεταξύ του άκρου εκκένωσης και του εσωτερικού αντικειμένου, που είναι τουλάχιστον 1 mm, έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλης ταχύτητας χρόνος ανόδου. Η εκφόρτιση επαφής διατηρεί 0,8 ns σε οποιαδήποτε εφαρμοζόμενη τάση που είναι μια αρκετά σοβαρή κατάσταση.

Σε χαμηλή τάση, το ρεύμα εκφόρτισης της πρώτης κορυφής αυξάνει το ρεύμα της εκφόρτισης μέσω αέρα, αλλά αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ανεβάζοντας την εφαρμοζόμενη τάση. Σε κανονικά περιβάλλοντα, μπορεί να εφαρμοστεί εκφόρτιση επαφής 8 kV, αντί για εκφόρτιση αέρα 15 kV, επειδή η απόσταση εκφόρτισης είναι μεγάλη και το μέγιστο ρεύμα μειώνεται λόγω της αντίστασης τόξου. Ωστόσο, μια εκκένωση αέρα 15 kV σε καλές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η χαμηλή υγρασία και οι καθαρές επιφάνειες των άκρων εκκένωσης, μερικές φορές είναι αδύνατο να περιοριστεί με μια εκκένωση επαφής 8 kV [29].

Κεφάλαιο 3 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην προσομοίωση γεννητριών ESD

3.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί, μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή του σεναρίου εκφόρτισης ESD ανθρώπου – μετάλλου κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής εκφόρτισης ESD σε επίπεδο συστήματος. Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης πρέπει να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 [27, 29] και τα οποία επιβεβαιώνονται μέσω της ρύθμισης διακρίβωσης πριν την πραγματική δοκιμή ESD, όπως αυτή περιγράφεται στο Πρότυπο [27, 29].

Η συχνή διεξαγωγή δοκιμών ESD σε πραγματικό επίπεδο αποτελεί μια ιδιαίτερα δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία. Είναι σημαντική λοιπόν, η ανάπτυξη αποτελεσματικών τρόπων ανάλυσης μιας σύζευξης ESD στη συσκευή υπό δοκιμή (DUT) μέσω προσομοίωσης κυκλωματικών μοντέλων ή μέσω αριθμητικών μοντέλων πλήρους κύματος προσομοιωμένων σε κατάλληλο ηλεκτρομαγνητικό λογισμικό. Με την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων, γίνεται καλύτερη η κατανόηση της διαδικασίας σύζευξης και μπορούν να σχεδιαστούν οι κατάλληλες στρατηγικές προστασίας μιας συσκευής από φαινόμενα ESD.

Για την εκτέλεση των δοκιμών ESD με κυκλωματικό ή αριθμητικό μοντέλο, απαιτείται και η σχεδίαση του κυκλώματος ή του μοντέλου πλήρους κύματος της γεννήτριας ESD που θα παράγει την τυπική κυματομορφή ESD. Οι τεχνικές προσομοίωσης για έναν προσομοιωτή ESD μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κλάδους: αναλυτική μοντελοποίηση, μοντελοποίηση κυκλώματος για προσομοίωση στον προσομοιωτή κυκλώματος τύπου SPICE, ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση και πλήρους κύματος χρησιμοποιώντας διαφορετικά εμπορικά ηλεκτρομαγνητικά εργαλεία, που βασίζονται σε διάφορες αριθμητικές τεχνικές, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, ο τομέας χρόνου πεπερασμένων διαφορών (FDTD) και η τεχνική πεπερασμένης ολοκλήρωσης (FIT) [25].

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας που αναφέρεται σε διάφορα κυκλωματικά και αριθμητικά μοντέλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς από ερευνητές, για την προσομοίωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής

εκφόρτισης. Το τελευταίο αριθμητικό μοντέλο αυτής της ανασκόπησης [25] αποτέλεσε και τη βάση για το σχεδιασμό του μοντέλου που προσομοιώθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

3.2 Προκλήσεις της προσομοίωσης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε επίπεδο συστήματος

Οι **David Pommerenke**, **Jun Fan** και **Jim Drewniak** στο άρθρο τους [32] μελετάνε τις προκλήσεις της προσομοίωσης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) σε επίπεδο συστήματος, λόγω της πολυπλοκότητας των ηλεκτρονικών συστημάτων, της έλλειψης μοντέλων για μαλακές αστοχίες των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC) και της μοντελοποίησης τόξου. Για την προσομοίωση ESD σε επίπεδο συστήματος απαιτείται το μοντέλο προσομοίωσης να αποτελείται από ένα σύνολο υποδομών, καθώς χρειάζεται να μοντελοποιηθεί η συσκευή υπό δοκιμή (DUT), αλλά και η γεννήτρια ESD και η απόκριση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε σχέση με τη ζημιά ή την αστοχία.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, κατά τη δημιουργία της προσομοίωσης ενός μοντέλου γεννήτριας ESD θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν αν πρόκειται για εκφόρτιση επαφής ή για εκφόρτιση μέσω αέρα, καθώς στην περίπτωση εκφόρτισης μέσω αέρα θα πρέπει να συμπεριληφθεί η συμπεριφορά του τόξου. Επίσης, αναφέρουν ότι το Πρότυπο IEC 61000-4-2 ορίζει ένα ρεύμα που πρέπει να εγχυθεί από μια γεννήτρια ESD εάν εκφορτιστεί σε λειτουργία επαφής σε ένα μεγάλο επίπεδο γείωσης. Για να περιγραφεί αυτό το ρεύμα υπάρχει μια ποικιλία μαθηματικών εκφράσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διέγερση σε προσομοιώσεις ESD. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ότι αυτή η κυματομορφή ρεύματος βασίζεται σε μια εκφόρτιση σε ένα μεγάλο επίπεδο γείωσης. Εάν το ίδιο ρεύμα εντυπωθεί σε ένα μικρό, μη γειωμένο αντικείμενο, όπως ένα κινητό τηλέφωνο 5 cm πάνω από το έδαφος, τότε το κινητό τηλέφωνο θα έφτανε σε μια εξωπραγματική υψηλή τάση καθώς το φορτίο εγχέεται σε μια μικρή χωρητικότητα. Έτσι, αυτά τα εντυπωθέντα ρεύματα δεν αντικατοπτρίζουν την επίδραση της σύνθετης αντίστασης φορτίου και ισχύουν μόνο για συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Επιπρόσθετα, επισημαίνουν ότι τα ισοδύναμα κυκλώματα που προσπαθούν να μοντελοποιήσουν την επίδραση των δομικών στοιχείων μιας γεννήτριας ESD, αν και παρέχουν καλή αντιστοίχιση με τη μετρούμενη κυματομορφή ρεύματος, εμφανίζουν αξιοσημείωτες διαφορές, εάν εκφορτιστούν σε αντίσταση φορτίου διαφορετική από βραχυκύκλωμα. Καθώς αυτή η κατάσταση δεν προσδιορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-

4-2, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ποια συμπεριφορά πρέπει να αναμένεται από τη σκοπιά του Προτύπου. Κατά συνέπεια, η χρήση γεννητριών ESD διαφορετικών κατασκευαστών θα οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα της σύνθετης αντίστασης φορτίου στο ρεύμα.

Σχετικά με τη μοντελοποίηση του τόξου, οι συγγραφείς διακρίνουν τις δύο περιπτώσεις που είναι απαραίτητη. Η πρώτη είναι η εκφόρτιση σε μια συσκευή μέσω αέρα, ενώ η δεύτερη, που είναι πιο περίπλοκη, αφορά στη δημιουργία εσωτερικού τόξου όταν μια εκφόρτιση μιας συσκευής φορτίζει ένα κενό στο εσωτερικό της.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της δομής του DUT, μια βασική απόφαση που πρέπει να ληφθεί είναι αν θα γίνει χρήση μεθόδων στον τομέα του χρόνου ή της συχνότητας. Εάν δημιουργηθούν παράμετροι S σε ένα σύστημα πολλαπλών θυρών και μεταγενέστερα μοντέλα IC ή προστεθούν εξισώσεις τόξου, τότε ένας επιλυτής τομέα συχνότητας μπορεί να είναι κατάλληλος, καθώς η προσομοίωση πρέπει να εκτελεστεί μόνο μία φορά, ενώ μια λύση τομέα χρόνου θα απαιτούσε μία εκτέλεση για κάθε θύρα. Εάν επιλεγεί μέθοδος στον τομέα του χρόνου, τότε υπάρχουν δύο επιλογές:

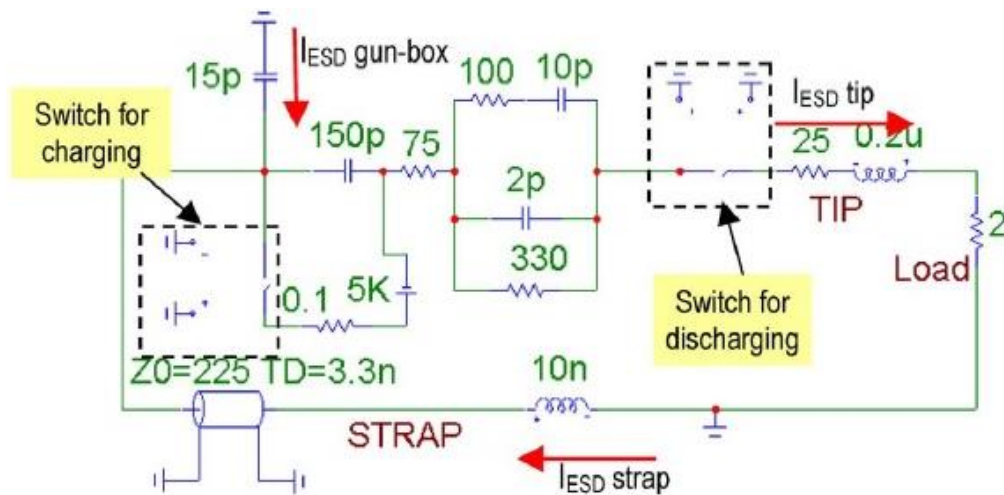
- Η πρώτη είναι ότι το ολοκληρωμένο κύκλωμα αντικαθίσταται από παθητικές συσκευές. Όλες οι είσοδοι μοντελοποιούνται ως αρκετά pF χωρητικότητας, όλες οι έξοδοι μοντελοποιούνται ως αντιστάσεις στην περιοχή των 50Ω. Το V_{dd} μοντελοποιείται ως πυκνωτής που ισούται με τη χωρητικότητα $V_{dd}-V_{ss}$ του ακροδέκτη. Μετά την πρώτη εκτέλεση της προσομοίωσης, ο χειριστής πρέπει να αναλύσει ποιες ακίδες IC εμφανίζουν τάση $> V_{dd}$ ή μικρότερη από 0V. Για αυτές τις ακίδες θεωρείται ότι η προστασία ESD θα ενεργοποιηθεί. Σε μια τέτοια περίπτωση, η προσομοίωση εκτελείται ξανά με τις εν λόγω ακίδες μοντελοποιημένες από αντιστάσεις χαμηλής τιμής (π.χ. 1Ω). Αυτή η τιμή επιλέγεται για να προσεγγίσει τις τυπικές δυναμικές αντιστάσεις των on-chip κυκλωμάτων προστασίας ESD. Στην επόμενη εκτέλεση μπορεί κανείς να προσδιορίσει τα ρεύματα που εισρέουν στην προστασία ESD, για να εκτιμήσει εάν θα προκύψει κάποιο σφάλμα bit ή βλάβη στο IC.
- Η δεύτερη χρησιμοποιεί συν-προσομοίωση στην οποία οι ακίδες IC αναπαρίστανται άμεσα ως μη γραμμικά στοιχεία. Αυτά τα μη γραμμικά κυκλώματα μπορεί να είναι μοντέλα IBIS ή άλλα μοντέλα δομών προστασίας ESD.

Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η προσομοίωση της ESD σε επίπεδο συστήματος εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση, ειδικά εάν λαμβάνονται υπόψη μη γραμμικά φαινόμενα, όπως το τόξο ή οι μη γραμμικές αποκρίσεις IC. Η κατάσταση είναι ακόμη πιο περίπλοκη εάν ληφθούν υπόψη όχι μόνο οι σκληρές αστοχίες, αλλά και οι μαλακές αστοχίες που προκαλούνται από ESD. Σε αυτήν την περίπτωση χρειάζονται μοντέλα του IC με μαλακή αστοχία, τα οποία υπολογίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες θα διαταραχθεί το IC και πώς αντιδρούν τα διαφορετικά επίπεδα λογισμικού σε μια τέτοια διαταραχή.

3.3 Κυκλωματική και αριθμητική προσομοίωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι **Spartaco Caniggia** και **Francesca Romana Maradei** στο άρθρο τους [33] προτείνουν δύο μοντέλα γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που επιτρέπουν την αναπαραγωγή του ρεύματος εκφόρτισης στη λειτουργία επαφής, λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του φορτίου. Το πρώτο μοντέλο βασίζεται σε μια κυκλωματική προσέγγιση και είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε οποιοδήποτε εμπορικό προσομοιωτή κυκλώματος. Το δεύτερο μοντέλο βασίζεται στην αριθμητική λύση των εξισώσεων πεδίου με τη χρήση του εμπορικού αριθμητικού κώδικα Microwave Studio που βασίζεται στην τεχνική της πεπερασμένης ολοκλήρωσης.

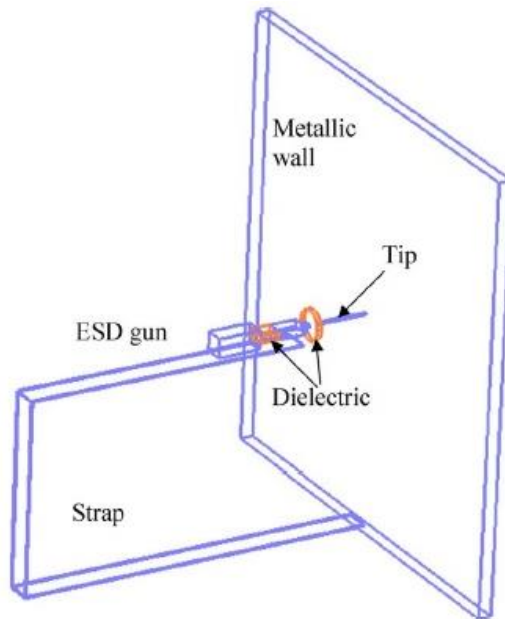
Το κυκλωματικό μοντέλο μιας γεννήτριας ESD που αναπαράγει την τυπική ESD ανθρώπου-μετάλλου και που προτείνουν οι συγγραφείς, φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Σε αυτό το κυκλωματικό μοντέλο, το οποίο σύμφωνα με τους συγγραφείς μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε οποιονδήποτε προσομοιωτή κυκλώματος που βασίζεται στο SPICE, τα ομαδοποιημένα κυκλώματα του Σχήματος 3.1 επιλέγονται ως τυπικές τιμές που προσομοιώνουν τα αποτελέσματα του σώματος και του βραχίονα του ατόμου που προκαλεί ESD. Η χωρητικότητα 150pF και η αντίσταση 330Ω ορίζονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2, ενώ οι άλλες παράμετροι επιλέχθηκαν για να αναπαραχθεί η ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, σύμφωνα με την αναλυτική έκφραση που ορίζεται στο Πρότυπο [34] (οι συγγραφείς για την έρευνα τους βασίστηκαν σε παλαιότερες εκδόσεις του Προτύπου, καθώς την περίοδο που γράφεται το άρθρο δεν είχε εκδοθεί το IEC 61000-4-2 Ed 2.0).



Σχήμα 3.1: Ισοδύναμο κύκλωμα SPICE τυπικής γεννήτριας ESD [33]

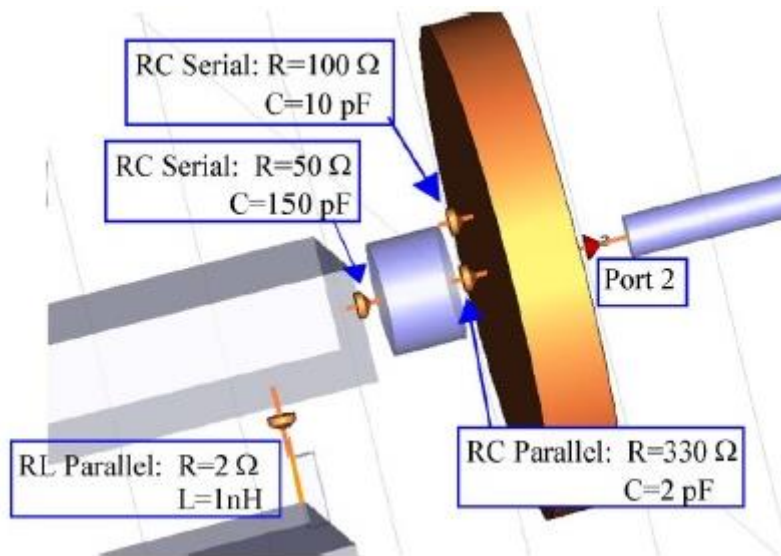
Στο κύκλωμα του Σχήματος 3.1 υπάρχουν δύο διακόπτες: ο πρώτος (στην αριστερή πλευρά) χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του πυκνωτή 150 pF στην τυπική τάση των 5 kV, ενώ ο δεύτερος διακόπτης (στη δεξιά πλευρά) παρέχει την εκφόρτιση. Το επίπεδο καλώδιο που χρησιμοποιείται ως μάντας ESD συνδεδεμένος στη γείωση μοντελοποιείται από τη σύνδεση σε σειρά της γραμμής μετάδοσης χωρίς απώλειες, που χαρακτηρίζεται από χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση 225Ω, χρόνο διάδοσης 3,3ns και της επαγωγής 10nH που μοντελοποιεί το καλώδιο που χρησιμοποιείται για να συνδεθεί το επίπεδο καλώδιο με τον μεταλλικό τοίχο. Η χωρητικότητα 15pF μοντελοποιεί τη χωρητική σύζευξη μεταξύ του πιστολιού ESD και του μεταλλικού τοιχώματος. Το άκρο ESD διαμορφώνεται από τη σειρά μιας αντίστασης 25Ω με την αυτεπαγωγή 0,2μH. Πρέπει να σημειωθεί ότι το φορτίο αντιπροσωπεύει την αντίσταση του στόχου και, στην εξεταζόμενη προσομοίωση, δίνεται από αντίσταση 2Ω.

Το δεύτερο μοντέλο που παρουσιάζουν βασίζεται στην τρισδιάστατη (3-D) αριθμητική προσομοίωση της γεννήτριας ESD από το εμπορικό αριθμητικό κώδικα (MWS), με βάση την τεχνική πεπερασμένης ολοκλήρωσης, φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Περιέχει διηλεκτρικά μέρη, μεταλλικά μέρη και στοιχεία κυκλώματος που επιτρέπουν την αναπαραγωγή της φυσικής μορφής μιας τυπικής γεννήτριας ESD και του ρεύματος εκφόρτισης αναφοράς.



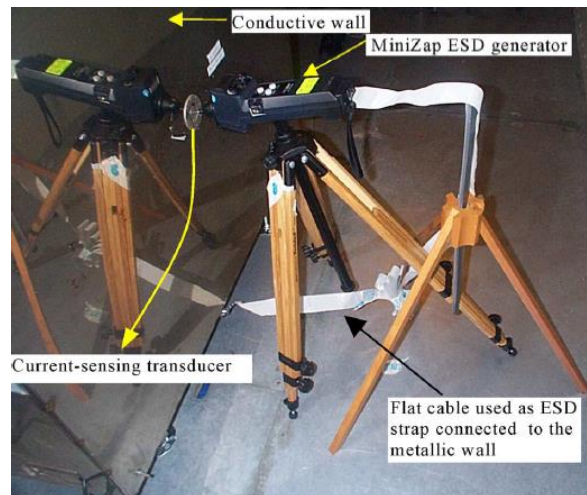
Σχήμα 3.2: Προσομοιωτής Γεννήτριας ESD μοντελοποιημένος σε MWS [33]

Τα στοιχεία κυκλώματος που έχουν υιοθετηθεί στο μοντέλο MWS φαίνονται στο Σχήμα 3.3. Το μοντέλο διεγείρεται στη θύρα 2 (Port 2) από μια ιδανική πηγή ρεύματος με $25\ \Omega$, υποθέτοντας χρόνο ανόδου βήματος $1\ \text{ns}$ για την αναπαραγωγή της πραγματικής αργής διαδικασίας φόρτισης, μεταγωγής και ταχείας εκφόρτισης μιας γεννήτριας ESD σε λειτουργία επαφής.



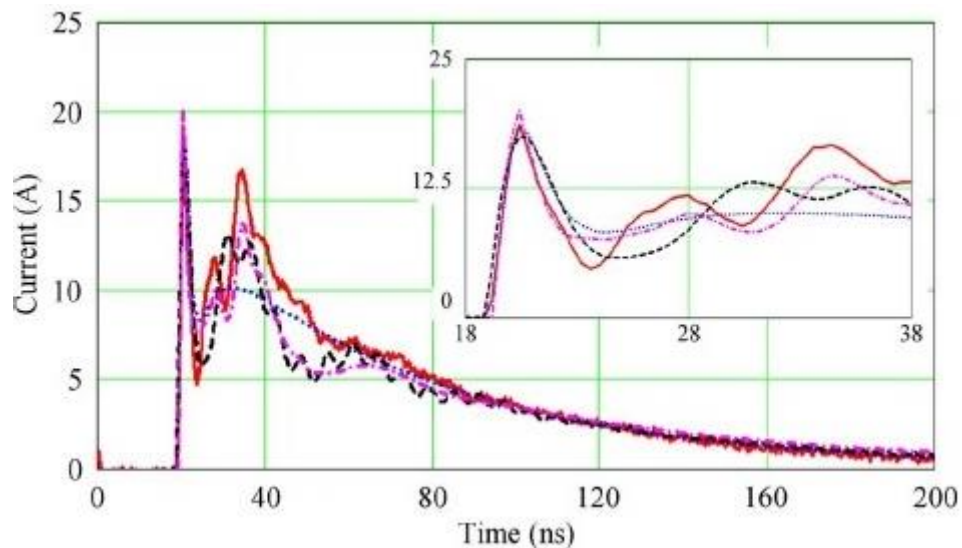
Σχήμα 3.3: Στοιχεία κυκλώματος για την αναπαραγωγή της φυσικής μορφής μιας γεννήτριας ESD και του προτεινόμενου ρεύματος εκφόρτισης αναφοράς [33]

Για να επαληθευτεί εάν τα προτεινόμενα μοντέλα είναι κατάλληλα για την προσομοίωση μιας τυπικής εμπορικής γεννήτριας ESD, το ρεύμα στο άκρο και στο καλώδιο μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη πειραματική ρύθμιση για τη διακρίβωση ρεύματος ESD που φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

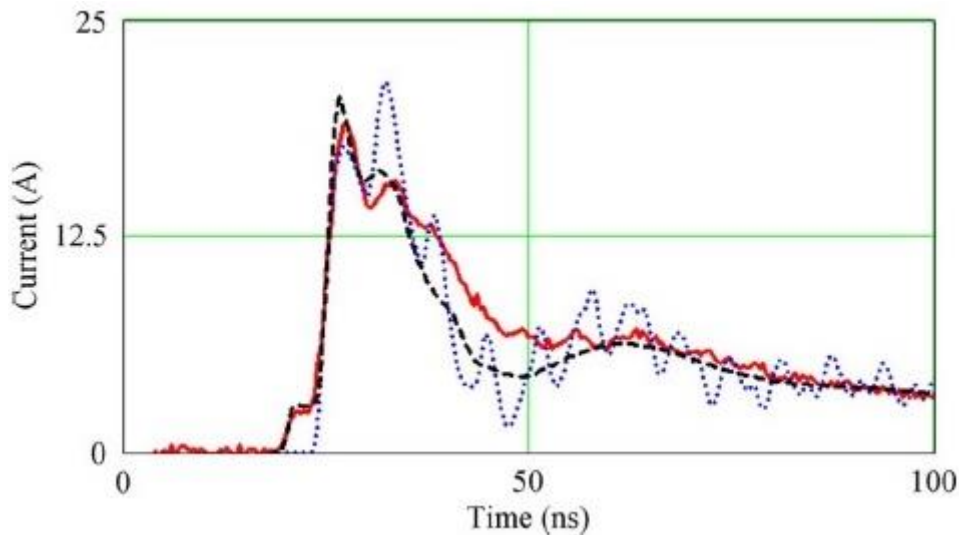


Σχήμα 3.4: Διάταξη δοκιμής για τη διακρίβωση του ρεύματος ESD [33]

Τα ρεύματα άκρου και καλωδίου που λαμβάνονται από τα δύο προτεινόμενα μοντέλα φαίνονται στα Σχήματα 3.5 και 3.6.



Σχήμα 3.5: Ρεύμα άκρου: μετρημένο (συνεχής γραμμή), Πρότυπο IEC (γραμμή με κουκίδες), ισοδύναμο κύκλωμα SPICE (διακεκομμένη γραμμή), και μοντέλο MWS (διακεκομμένη και κουκίδες γραμμή) [33]



Σχήμα 3.6: Ρεύμα καλωδίου: μετρημένο (συνεχής γραμμή), ισοδύναμο κύκλωμα SPICE (διακεκομμένη γραμμή), και μοντέλο MWS (διακεκομμένη και κουκίδες γραμμή) [33]

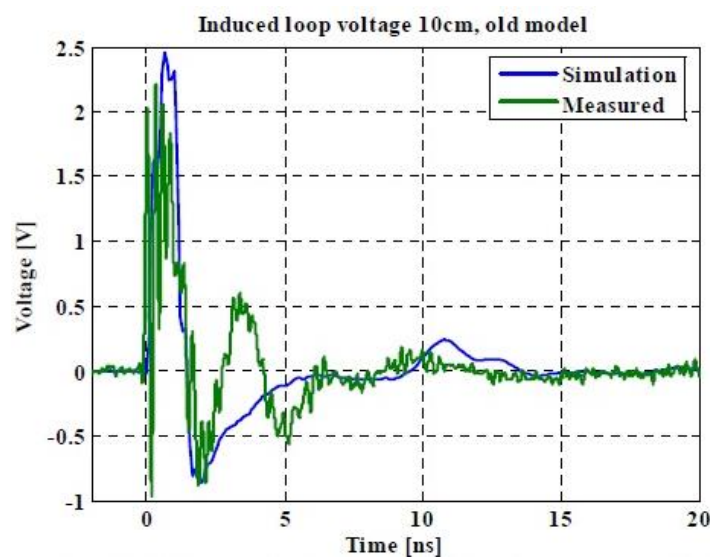
Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων δίνει πολύ καλή ακρίβεια και κάνουν τις εξής παρατηρήσεις:

- Ο πρώτος χρόνος γρήγορης ανόδου (λιγότερο από 1 ns) αναπαράγεται και ταιριάζει καλά με το ρεύμα αναφοράς IEC
- Οι μετρημένες και προσομοιωμένες κυματομορφές μετά την πρώτη κορυφή ακολουθούν αρκετά καλά με μικρές ταλαντώσεις του ρεύματος αναφοράς IEC. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μήκος και τον προσανατολισμό του ιμάντα.
- Το ρεύμα στον ιμάντα έχει πιο αργό χρόνο ανόδου από το ρεύμα στην άκρη. Αυτό οφείλεται στην χωρητικότητα μεταξύ της γεννήτριας ESD και του περιβάλλοντος, που επιτρέπει μια εναλλακτική διαδρομή για την πρώτη κορυφή του ρεύματος ESD

3.4 Προηγμένο μοντέλο γεννήτριας ESD πλήρους κύματος για προσομοίωση σύζευξης σε επίπεδο συστήματος

Οι Cai Qing, Jayong Koo, Argha Nandy, David Pommerenke, Jong Sung Lee και Byong Su Seol, στο άρθρο τους [35] επισημαίνουν την ανάγκη μοντελοποίησης μιας γεννήτριας ESD με το μοντέλο πλήρους κύματος, καθώς μόνο τα μοντέλα πλήρους κύματος είναι σε θέση να προβλέψουν τη σύζευξη πεδίου. Η σύζευξη πεδίου είναι απαραίτητη, ειδικά για την πρόβλεψη μαλακών σφαλμάτων, που συχνά προκαλούνται από τις συνιστώσες συχνότητας των μεταβατικών πεδίων ESD μεγαλύτερες από 1GHz.

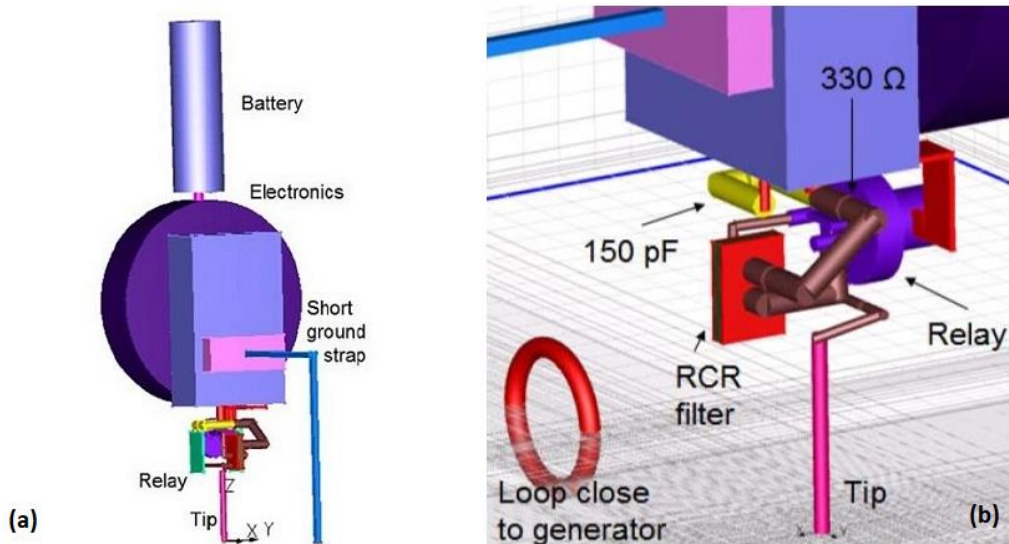
Οι συγγραφείς παραθέτουν τον προβληματισμό τους σχετικά με το μοντέλο που έχει προταθεί από τους συγγραφείς του άρθρου [36], το οποίο είναι κατάλληλο για λειτουργία σε τυπικό ηλεκτρομαγνητικό λογισμικό, όπως το CST Microwave Studio και το οποίο έχει επίσης μεταφερθεί στο FlowEMC (Microstrips). Το μοντέλο αυτό μιμείται τη δομή της γεννήτριας ESD χονδροειδώς και διεγείρει τη δομή με μια συνάρτηση βήματος που έχει χρόνο ανόδου 1 ns, κάτι που αντιτίθεται στο γεγονός ότι η κατάρρευση τάσης στα ρελέ υψηλής τάσης, που χρησιμοποιούνται συνήθως, συμβαίνει σε 50-100 ps. Καθώς το Πρότυπο απαιτεί χρόνο ανόδου 700 – 1000 ps του ρεύματος στο άκρο εκφόρτισης, υπάρχει ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης σε κάθε ESD γεννήτρια. Έτσι, το εγχυόμενο ρεύμα περιέχει κυρίως στοιχεία συχνότητας κάτω των 300 MHz (μπορεί να περιέχει και μερικές υψηλότερες συχνότητες εάν η άνοδος του ρεύματος δεν είναι ομαλή). Η γρήγορη κατάρρευση της τάσης στο ρελέ, ωστόσο, διεγείρει την γεννήτρια ESD και προκαλεί ακτινοβολία ισχυρών μεταβατικών πεδίων ESD με συνιστώσες συχνότητας μεγαλύτερες από 1 GHz, που συχνά οδηγούν σε μαλακά σφάλματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό επηρεάζεται έντονα από τη λεπτομερή κατασκευή κάθε μοντέλου γεννήτριας ESD. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι, λόγω της γρήγορης κατάρρευσης τάσης, τα μοντέλα γεννητριών ESD θα πρέπει να μοντελοποιούν το ρελέ και τα σχετικά χαμηλοπερατά φίλτρα, συμπεριλαμβανομένων των δομών ακτινοβολίας του με επαρκείς λεπτομέρειες για την ακριβή πρόβλεψη των ακτινοβολούμενων πεδίων. Αν δεν συμβαίνει αυτό, τότε τα αποτελέσματα μπορεί να μην ταιριάζουν με τη συμπεριφορά υψηλής συχνότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Επαγόμενη τάση βρόχου προηγούμενου μοντέλου γεννήτριας ESD [36] σε σύγκριση με μετρήσεις [35]

Η προσομοιωμένη κυματομορφή είναι ομαλή σε σχέση με τη μετρούμενη κυματομορφή, επομένως οι συνιστώσες υψηλής συχνότητας που υπάρχουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δεν έχουν μοντελοποιηθεί με επαρκή ακρίβεια.

Η πρόταση των συγγραφέων [35] είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος, που να επιτρέπει την προσομοίωση της σύζευξης σε συστήματα για συχνότητες έως τουλάχιστον 2 GHz, έχοντας χρόνους υπολογισμού ωρών (όχι ημερών). Για την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ένα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό, το Microstripes. Για το μοντέλο πλήρους κύματος χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια ESD που είναι εμπορικά διαθέσιμη. Η επισκόπηση του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 3.8(α).



Σχήμα 3.8: Γεννήτρια ESD πλήρους κύματος (α) Επισκόπηση μοντέλου γεννήτριας ESD πλήρους κύματος, (β) Λεπτομέρειες των τμημάτων σχηματισμού παλμών [35]

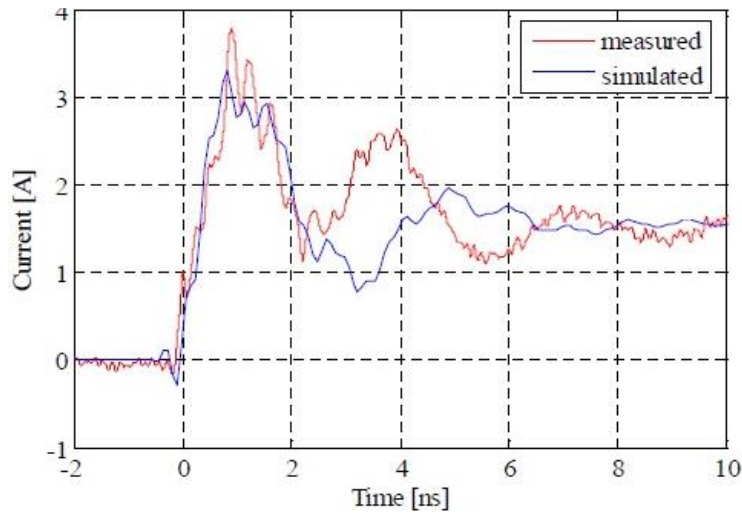
Το μοντέλο που προτείνουν οι συγγραφείς αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια μέρη:

- *Πηγή τάσης.* Ως πηγή, έχει χρησιμοποιηθεί βηματική συνάρτηση, της οποίας ο χρόνος ανόδου είναι περίπου 200ps. Έχει σχεδιαστεί με βάση έναν ενσωματωμένο παλμό Gauss για να εξασφαλίζει ομαλή ανύψωση άκρου. Οι εναλλακτικές προσεγγίσεις θα βασίζονται στην αύξηση στη λειτουργική συμπεριφορά της αντίστασης τόξου μέσα στο ρελέ, π.χ., όπως εκφράζεται από το νόμο των Rompe & Weizel. Το σχήμα και ο χρόνος ανόδου αυτού του παλμού επιτρέπει να υιοθετηθεί το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων της γεννήτριας ESD για να προσαρμοστούν περίπου άλλα μοντέλα γεννήτριας ESD.

- *Χαμηλοπερατό φίλτρο.* Το ρελέ συνδέεται με τα άλλα μέρη της γεννήτριας ESD μέσω ενός φίλτρου χαμηλής διέλευσης R-C-R. Οι αντιστάσεις είναι αντιστάσεις διακριτής σύνθεσης άνθρακα, ενώ ο πυκνωτής είναι κατασκευασμένος από RR-4 PCB. Η δομή R-C-R σχηματίζει επίσης έναν βρόχο, έτσι ώστε η αυτεπαγωγή του να βελτιώνει τη λειτουργία του φίλτρου χαμηλής διέλευσης.
- *Κύρια στοιχεία RC.* Το πρότυπο ESD ζητά μια κύρια χρονική σταθερά $330\ \Omega / 150\ \text{pF}$ της γεννήτριας ESD. Αυτό υλοποιείται ως συνδυασμός πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά (λόγω της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης για τους πυκνωτές) και μιας σειράς σύνδεσης αντιστάσεων.
- *Άκρο Εκφόρτισης.* Το άκρο εκφόρτισης είναι μια μεταλλική προέκταση.
- *Δομικά στοιχεία της γεννήτριας ESD και ηλεκτρονικών.* Οι πλακέτες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, η οθόνη και η μπαταρία διαμορφώνονται ως μεταλλικά μπλοκ.
- *Καλώδιο γείωσης.* Η κύρια λειτουργία του είναι να επιτρέπει την επιστροφή χαμηλής συχνότητας συνιστωσών του ρεύματος (επιστροφή φορτίου). Ωστόσο, στις περισσότερες γεννήτριες ESD το καλώδιο γείωσης δεν αποσυνδέεται για ραδιοσυχνότητες, από τα τμήματα της γεννήτριας ESD που δημιουργούν παλμό. Έτσι, ισχυρά ρεύματα ραδιοσυχνοτήτων, π.χ., που δημιουργούνται από την αρχική κορυφή της διάσπασης θα ρέουν στο καλώδιο γείωσης. Το καλώδιο γείωσης μοντελοποιείται ως μεταλλική σύνδεση.
- *Πρόσθετες λεπτομέρειες.* Πρόσθετες λεπτομέρειες, όπως η σύνθετη αντίσταση που εξετάζει την παροχή υψηλής τάσης έχουν μετρηθεί και εφαρμόζεται στο μοντέλο.

Λεπτομέρειες των τμημάτων που σχηματίζουν παλμούς φαίνονται στο Σχήμα 3.8(b). Η πηγή της βηματικής συνάρτησης βρίσκεται μέσα στο ρελέ.

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης του προτεινόμενου μοντέλου φαίνονται στο Σχήμα 3.9. Το ρεύμα που εγχέεται σε ένα μεγάλο επίπεδο γείωσης έχει μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν τρέχοντα στόχο ESD ($> 4\ \text{GHz}$) και έναν παλμογράφο $4\ \text{GHz}$, $20\ \text{GS/sec}$. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η συμπεριφορά ταχείας ανόδου και πιθανώς κουδουνίσματος της πρώτης κορυφής στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, κυριαρχούν στις διαταραχές στο ηλεκτρονικό σύστημα.



Σχήμα 3.9: Ρεύμα εκφόρτισης ESD μετρημένο(κόκκινο) και προσομοίωσης(μπλε), για τα πρώτα 10ns [35]

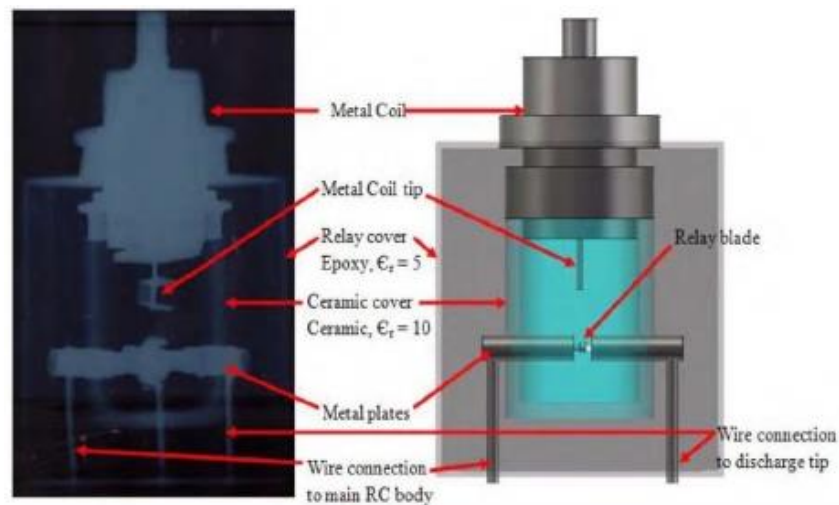
Συμπεραίνουν ότι τα δεδομένα του Σχήματος 3.9 υποδεικνύουν καλή αντιστοίχιση για τον αρχικό παλμό. Αν και το κουδούνισμα του παλμού δεν είναι μοντελοποιημένο πολύ καλά, η απόκλιση που εμφανίζεται έχει γίνει αποδεκτή προς το παρόν από τους συγγραφείς, καθώς από την άποψη του επαγόμενου θορύβου, ο αρχικός παλμός συχνά κυριαρχεί στην απόκριση του DUT.

3.5 Μοντέλο πλήρους κύματος για την προσομοίωση μια γεννήτριας ESD Noiseken

Ένα συμβάν ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), όπως έχει αναφερθεί, μπορεί να αναστατώσει ένα προϊόν, όχι μόνο λόγω του ρεύματος εκφόρτισης του, αλλά και λόγω παροδικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Διάφορα κυκλωματικά μοντέλα γεννητριών ESD μπορούν να περιγράψουν καλά τις κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης, ωστόσο το μεταβατικό πεδίο λόγω ενός συμβάντος ESD χρειάζεται να προσομοιωθεί με μοντελοποίηση πλήρους κύματος. Οι **Dazhao Liu, Argha Nandy, David Pommerenke, Soon Jae Kwon** και **Ki Hyuk Kim** στο άρθρο τους [37] προτείνουν ένα μοντέλο πλήρους κύματος για την προσομοίωση του ρεύματος εκφόρτισης και του μεταβατικού πεδίου μιας γεννήτριας ESD. Η προσομοίωση έγινε με χρήση του CST Microwave Studio, όπου μεμονωμένα εξαρτήματα της γεννήτριας ESD Noiseken (ESS-2000) μοντελοποιήθηκαν, επικυρώθηκαν και συνδυάστηκαν μαζί για να σχηματίσουν ολόκληρο το μοντέλο της γεννήτριας ESD.

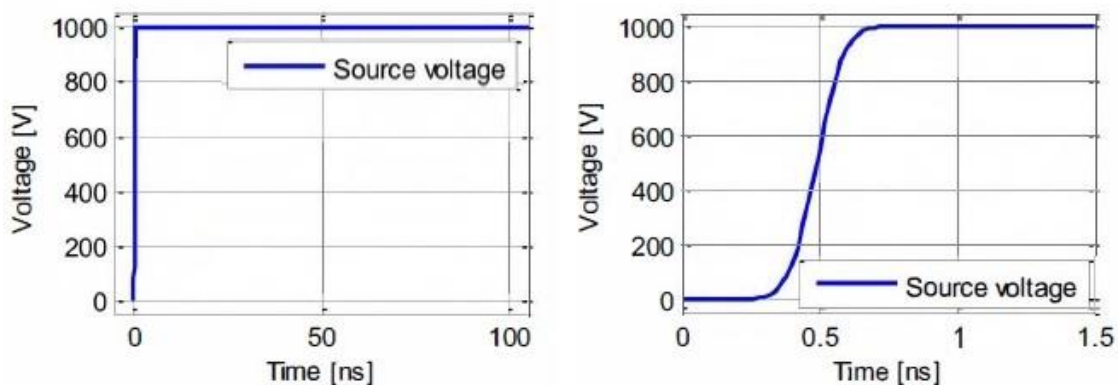
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, το ρελέ φορτίζει τον κύριο πυκνωτή (150 pF) μέχρι την τάση φόρτισης της γεννήτριας ESD. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, το ρελέ κλείνει και προκαλεί ταχεία διακοπή τάσης. Εκείνη τη στιγμή το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στη μονάδα πυκνωτή αποφορτίζεται μέσω του άκρου εκφόρτισης.

Στο αριστερό τμήμα του Σχήματος 3.10 φαίνεται μια εσωτερική όψη του ρελέ μέσα στη γεννήτρια ESD Noiseken, ενώ στο δεξιό τμήμα είναι το ρελέ, όπως έχει διαμορφωθεί από τους συγγραφείς στο CST . Όλα τα μέταλλα μοντελοποιούνται ως PEC. Μια θύρα τάσης παραμέτρου S αντικαθιστά την επαφή του ρελέ.



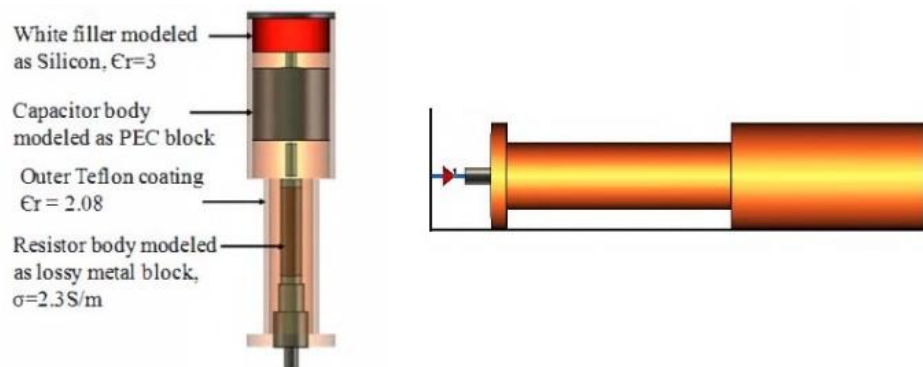
Σχήμα 3.10: Μοντελοποίηση του ρελέ [37]

Η αντίσταση πηγής έχει οριστεί στα 25 Ω, καθώς αυτό φαίνεται να μοντελοποιεί καλύτερα την αντίσταση τόξου από μια θύρα 50 Ω. Το Σχήμα 3.11 δείχνει το σήμα διέγερσης στη θύρα. Είναι μια συνάρτηση βήματος, της οποίας ο χρόνος ανόδου 200 ps αντιπροσωπεύει την ταχεία κατάρρευση τάσης στην αρχή της διαδικασίας εκφόρτισης.



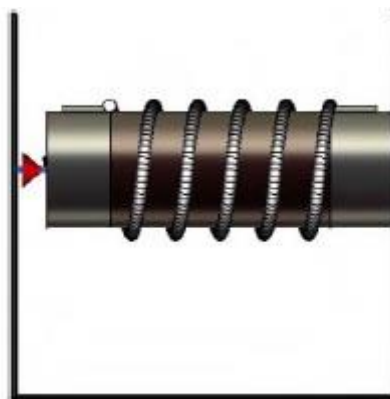
Σχήμα 3.11: Σήμα διέγερσης [37]

Στο αριστερό τμήμα του Σχήματος 3.12 φαίνεται η εσωτερική όψη του κύριου πυκνωτή εκφόρτισης και του σώματος της αντίστασης, ενώ στα δεξιά φαίνεται η μονάδα του πυκνωτή μοντελοποιημένη σε CST. Ο πυκνωτής και η αντίσταση του κύριου σώματος RC καλύπτονται με κάλυμμα από τεφλόν που υποδεικνύεται με το κίτρινο χρώμα. Το κάλυμμα τεφλόν μοντελοποιείται με σχετική διαπερατότητα $\epsilon_r = 2,08$. Το σώμα του πυκνωτή έχει μοντελοποιηθεί ως σώμα PEC συνδεδεμένο με ένα στοιχείο 150 pF. Η αντίσταση εκφόρτισης μοντελοποιείται ως μέτρια αγώγιμο σώμα. Οι διαστάσεις της αντίστασης εκφόρτισης είναι γνωστές και η αγωγιμότητα υπολογίζεται ως $\sigma = 2,3 \text{ Sm}^{-1}$.



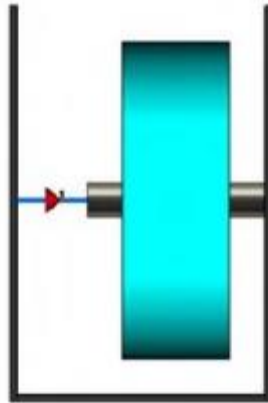
Σχήμα 3.12: Στα αριστερά εσωτερική όψη της μονάδας πυκνωτή και της αντίστασης εκφόρτισης, στα δεξιά η μονάδα πυκνωτή μοντελοποιημένη σε CST στο πεδίο της συχνότητας [37]

Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται η προσομοίωση στο πεδίο της συχνότητας της δομής του πηνίου που έγινε σε CST. Η θύρα αναλυτή δικτύου ορίζεται ως θύρα παραμέτρων S με σύνθετη αντίσταση πηγής 50 Ω.



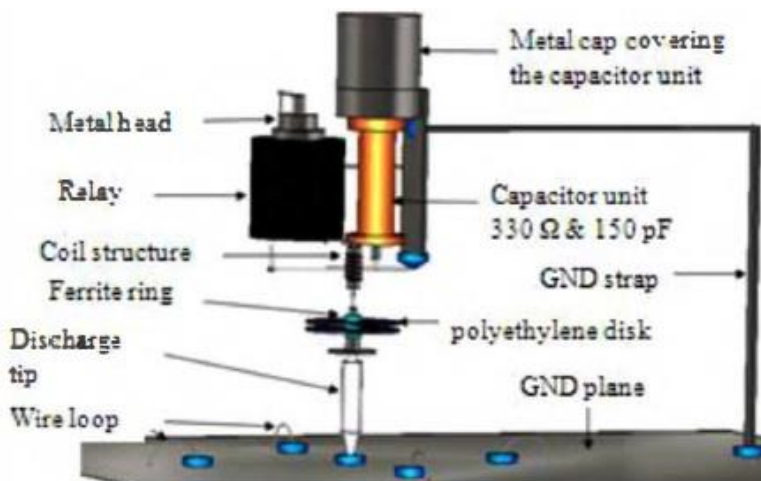
Σχήμα 3.13: Ισοδύναμο μοντέλο της δομής πηνίου στο πεδίο της συχνότητας μοντελοποιημένο σε CST [37]

Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται η προσομοίωση του ισοδύναμου μοντέλου του δακτυλίου φερρίτη στο πεδίο της συχνότητας, μοντελοποιημένο σε CST.



Σχήμα 3.14: Ισοδύναμο μοντέλο του δακτυλίου φερρίτη στο πεδίο της συχνότητας μοντελοποιημένο σε CST [37]

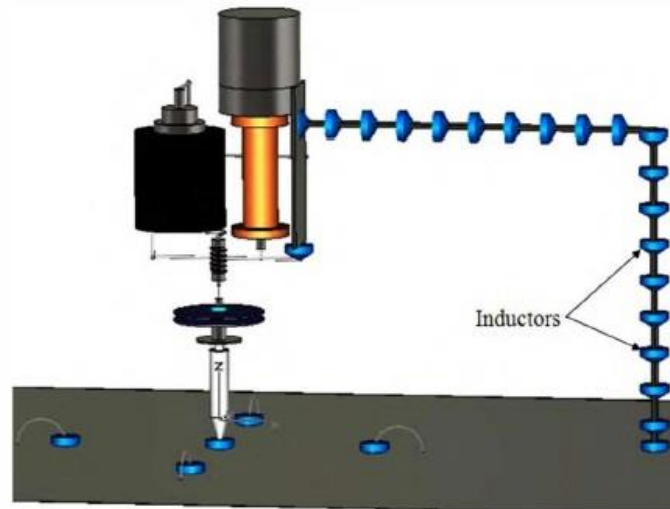
Οι συγγραφείς μοντελοποίησαν ολόκληρη τη γεννήτρια ESD πλήρους κύματος στο CST MWS συνδυάζοντας τα επιμέρους τμήματα. Σύμφωνα με όσα αναφέρουν, οι πρόσθετες απώλειες στο μοντέλο κατανομούνται με την ανάθεση αγωγιμότητας $\sigma = 4000 \text{ S/m}$ στα καλώδια διασύνδεσης και αγωγιμότητα $\sigma = 30 \text{ S/m}$ στο άκρο εκφόρτισης. Η γεννήτρια ESD Noiseken που φαίνεται στο Σχήμα 3.15 έχει μοντελοποιηθεί με κοντό καλώδιο γείωσης, με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου στο CST.



Σχήμα 3.15: Γεωμετρία της γεννήτριας ESD σε προσομοίωση πλήρους κύματος [37]

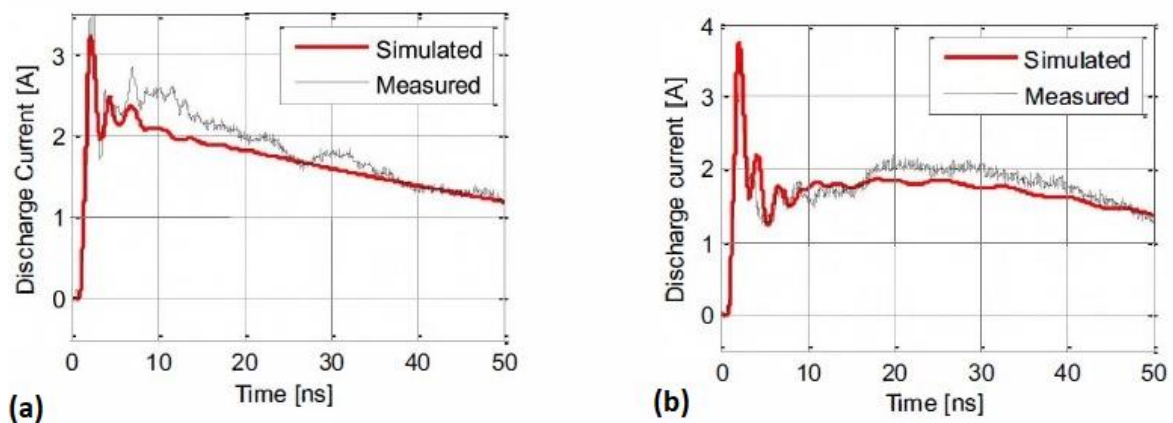
Το μήκος του καλωδίου γείωσης δεν επηρεάζει την αρχική κορυφή του ρεύματος εκκένωσης. Επηρεάζει μόνο τη θέση της δεύτερης κορυφής της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Η κατανεμημένη αυτεπαγωγή κατά μήκος του καλωδίου γείωσης

μπορεί να αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα του μακριού καλωδίου γείωσης. Το Σχήμα 3.16 δείχνει το μοντέλο με μακρύ καλώδιο γείωσης.



Σχήμα 3.16: Γεωμετρία της γεννήτριας ESD με μακρύ καλώδιο γείωσης σε προσομοίωση πλήρους κύματος [37]

Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης του προσομοιωμένου και του μετρούμενου ρεύματος εκφόρτισης με κοντό (Σχήμα 3.17(a)) και μακρύ (Σχήμα 3.17(b)) καλώδιο γείωσης.



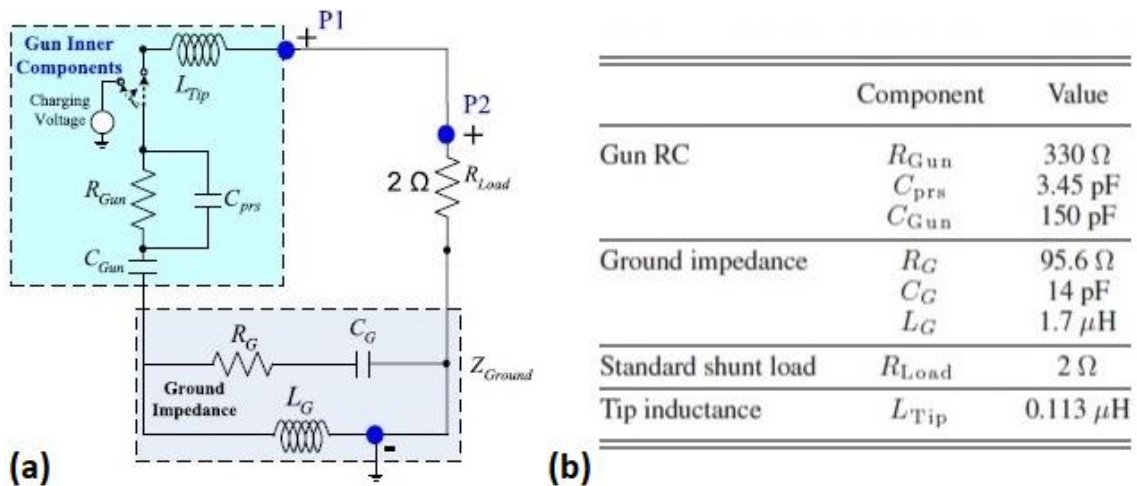
Σχήμα 3.17: Σύγκριση προσομοιούμενου και μετρούμενου ρεύματος εκφόρτισης με (α) κοντό καλώδιο γείωσης, (b) μακρύ καλώδιο γείωσης [37]

Οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι τα αποτελέσματα της σύγκρισης δείχνουν ότι οι κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης της προσομοίωσης και της μέτρησης ταιριάζουν καλά και ότι το μοντέλο πλήρους κύματος της γεννήτριας ESD NoiseKen (ESS 2000) που παρουσιάζουν επιτρέπει την προσομοίωση του ρεύματος εκφόρτισης και του μεταβατικού πεδίου EM γύρω από τη γεννήτρια ESD και μέσα σε ένα προϊόν.

3.6 Αποτελεσματικό κυκλωματικό και αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

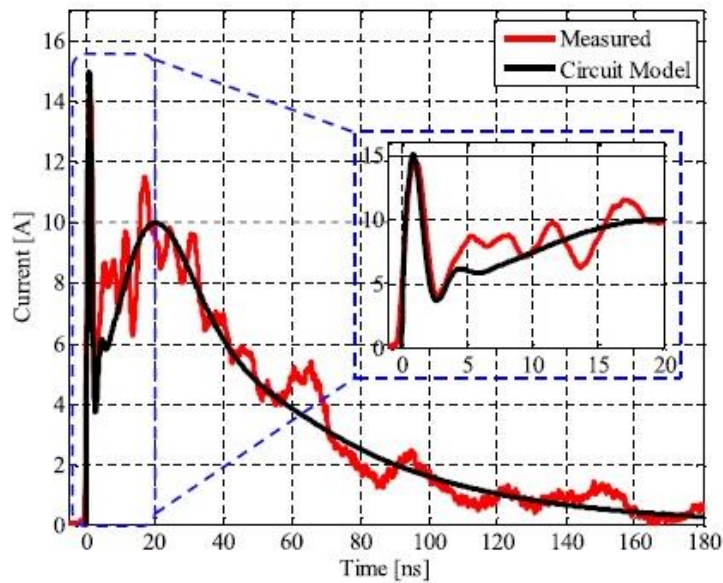
Οι Jawad Yousaf, Myeongkoo Park, Hosang Lee, Jinsung Youn, Daehee Lee, Chanseok Hwang και Wansoo Nah στο άρθρο τους [25] προτείνουν μια νέα τεχνική για ένα αποτελεσματικό, απλό και γρήγορο ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο και την αριθμητική μοντελοποίηση πλήρους κύματος μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Το κυκλωματικό μοντέλο που προτείνουν οι συγγραφείς φαίνεται στο Σχήμα 3.18(a) και αποτελεί ένα ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για γεννήτρια ESD NoiseKen, TC-815 χρησιμοποιώντας την απόκριση τομέα συχνότητας. Περιλαμβάνει τρία κύρια μέρη: στοιχεία εκφόρτισης πιστολιού (R_{Gun} , C_{prs} και C_{Gun}), σύνθετη αντίσταση γείωσης (C_G , L_G και R_G) και φορτίο στόχου βαθμονόμησης (R_{Load}) μαζί με επαγωγή άκρου ηλεκτροδίου (L_{Tip}). Οι τιμές των στοιχείων του προτεινόμενου κυκλωματικού μοντέλου, όπως υπολογίστηκαν από τους συγγραφείς, φαίνονται στο Σχήμα 3.18(b).



Σχήμα 3.18: (α) Ισοδύναμο προτεινόμενο κυκλωματικό μοντέλο, (β) Τιμές στοιχείων ισοδύναμου προτεινόμενου κυκλωματικού μοντέλου [25]

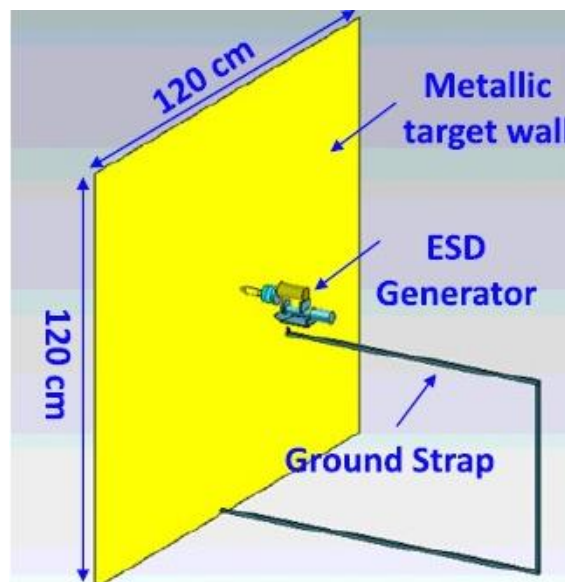
Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε διακρίβωση του ρεύματος εκφόρτισης αναφοράς. Η κυματομορφή αναφοράς ESD για τη λειτουργία εκφόρτισης επαφής μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την τυπική ρύθμιση του προτύπου δοκιμής IEC 61000-4-2 Ed.2.0 [27]. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης του κυκλωματικού μοντέλου και της μετρούμενης κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, φαίνεται στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Σύγκριση προσομοιωμένης κυκλωματικής (μαύρο) και μετρούμενης (κόκκινο) κυματομορφής ESD για το επίπεδο τάσης εκφόρτισης +4KV [25]

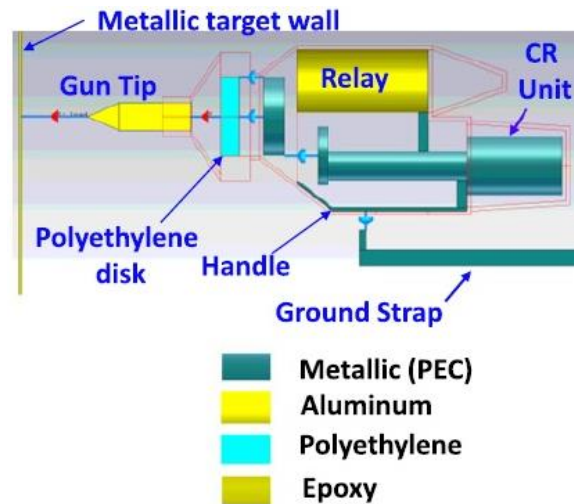
Σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα αποτελέσματα του μοντέλου κυκλώματος ταιριάζουν πολύ καλά με τη μετρούμενη κυματομορφή αναφοράς όσον αφορά την τιμή πρώτης κορυφής, το χρόνο ανόδου της κυματομορφής και τις τρέχουσες τιμές στα 30ns και 60ns.

Το απλοποιημένο τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο πλήρους κύματος για τη γεννήτρια ESD NoiseKen TC-815, που παρουσιάζουν οι συγγραφείς, μοντελοποιημένο στο CST MWS φαίνεται στο Σχήμα 3.20.



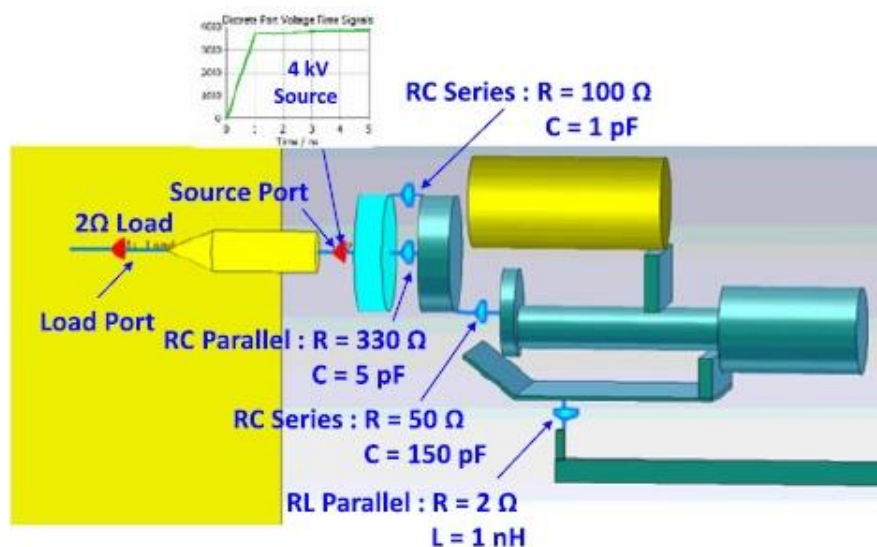
Σχήμα 3.20: Αριθμητικό μοντέλο γεννήτριας ESD [25]

Η γεννήτρια ESD συνδέεται στον μεταλλικό τοίχο γείωσης του στόχου χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο γείωσης μήκους 2m. Οι διαστάσεις του μεταλλικού τοίχου, του καλωδίου γείωσης και άλλων φυσικών στοιχείων του τρισδιάστατου μοντέλου είναι παρόμοιες, όπως της πραγματικής γεννήτριας στην πραγματική διάταξη μέτρησης. Οι λεπτομέρειες των υλικών και μια πιο ακριβής εικόνα του μοντέλου φαίνονται στο Σχήμα 3.21.



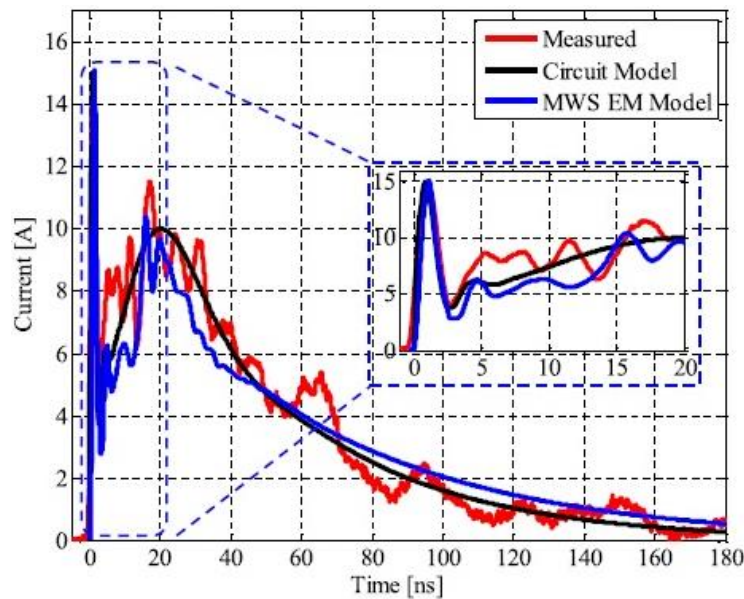
Σχήμα 3.21: Λεπτομέρειες υλικών αριθμητικού μοντέλου MWS [25]

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζονται τα επιμέρους στοιχεία που συνιστούν το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο. Η γεννήτρια διεγείρεται χρησιμοποιώντας μια πηγή βήματος 4 kV με χρόνο ανόδου 1 ns και εσωτερική σύνθετη αντίσταση πηγής 25 Ω . Η πηγή βήματος χρησιμοποιείται για να μιμηθεί το πραγματικό ρελέ, τη λειτουργία γρήγορης εναλλαγής και τη διαδικασία ταχείας εκφόρτισης, όπως στην πραγματική γεννήτρια ESD.



Σχήμα 3.22: Περιγραφή στοιχείων αριθμητικού μοντέλου MWS [25]

Το σήμα ESD μεταφέρεται γρήγορα στην αντίσταση φορτίου $2\ \Omega$. Οι τιμές των στοιχείων στο αριθμητικό μοντέλο είναι παρόμοιες με τις τιμές που εμφανίζονται στο Σχήμα 3.18(b). Η βελτιστοποίηση αυτών των στοιχείων γίνεται για την ακριβή παραγωγή των χαρακτηριστικών κυματομορφής αναφοράς. Στο Σχήμα 3.23 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης της κυματομορφής από το κυκλωματικό μοντέλο, τη μετρούμενη κυματομορφή και την κυματομορφή του τρισδιάστατου μοντέλου σε MWS.



Σχήμα 3.23: Σύγκριση προσομοιωμένης κυκλωματικής (μαύρο), μετρούμενης (κόκκινο) και προσομοιωμένης σε MWS αριθμητικής κυματομορφής ESD (μπλε) για το επίπεδο τάσης εκφόρτισης +4KV [25]

Οι συγγραφείς συμπεραίνουν ότι και τα τρία αποτελέσματα έχουν πολύ καλή συμφωνία. Συγκεκριμένα, επισημαίνουν ότι η πρώτη κορυφή και ο χρόνος ανόδου και των τριών κυματομορφών είναι σχεδόν ο ίδιος. Επίσης, τα άλλα χαρακτηριστικά και των τριών κυματομορφών ταιριάζουν μεταξύ τους και βρίσκονται εντός του καθορισμένου ορίου του προτύπου IEC. Επίσης, αναφέρουν ότι η ακριβής αναπαραγωγή της τρέχουσας κυματομορφής του συγκεκριμένου εμπορικού προσομοιωτή ESD εξαρτάται από το τρισδιάστατο σχήμα του μοντελοποιημένου πιστολιού και την ακριβή μοντελοποίηση των διαφόρων παρασιτικών στοιχείων.

Κεφάλαιο 4 : Μελέτη παραμέτρων προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

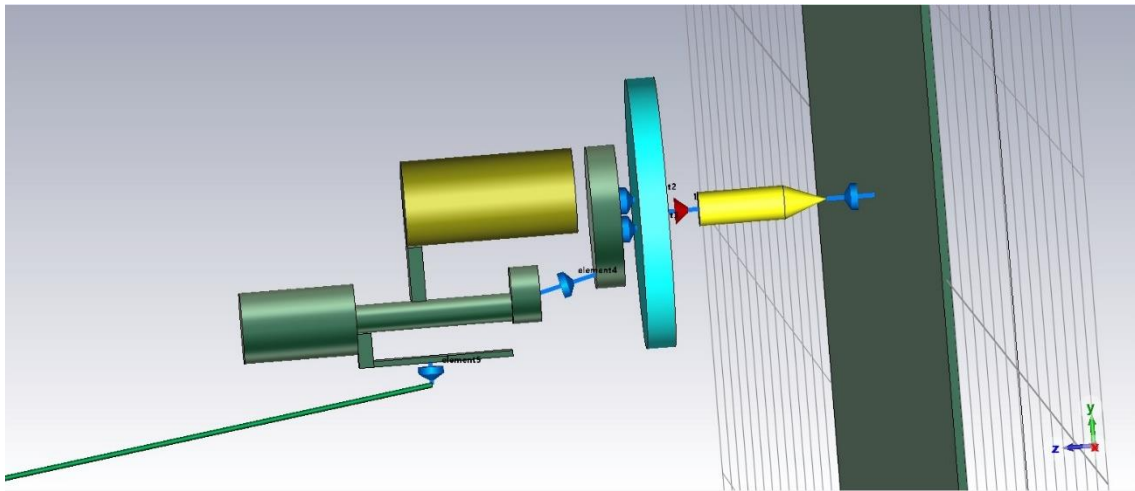
4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η επίδραση των παραμέτρων ενός προσομοιωμένου μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) στο περιβάλλον του λογισμικού προσομοίωσης CST Studio Suite. Το CST Studio Suite είναι ένα υψηλής απόδοσης πακέτο λογισμικού τρισδιάστατης ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων και συστημάτων [38].

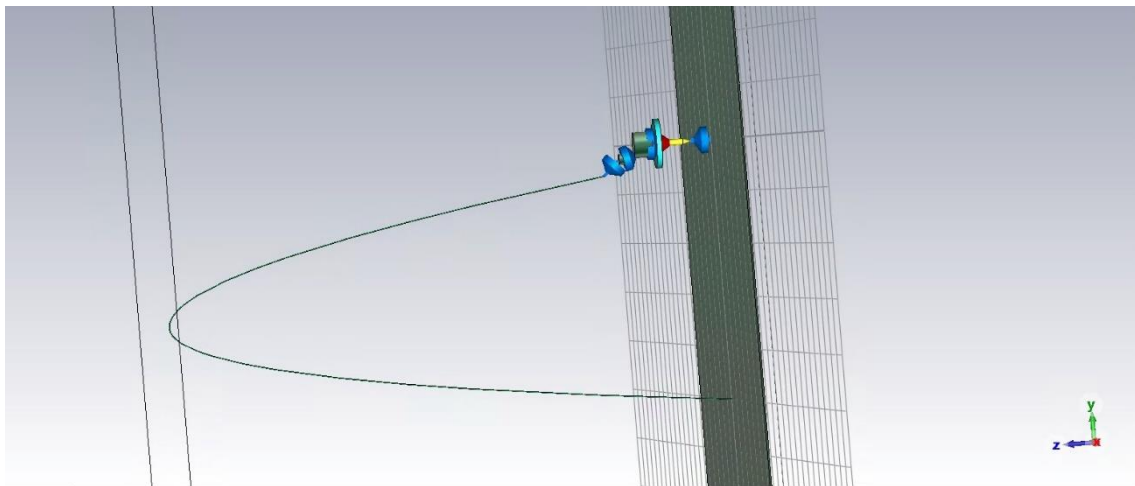
Αρχικά, παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία που απαρτίζουν την προσομοίωση της γεννήτριας ESD και οι παράμετροι που τα εκφράζουν στο περιβάλλον του λογισμικού CST Studio Suite. Στην 3^η ενότητα αυτού του κεφαλαίου ερευνάται η επίδραση των παραμέτρων των επιμέρους στοιχείων και η σημασία των μεταβολών των τιμών τους στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου, γίνεται χρήση των παρατηρήσεων για την επίδραση ή μη όλων των παραμέτρων που μελετώνται, με σκοπό την παραμετροποίηση της προσομοίωσης του τρισδιάστατου μοντέλου γεννήτριας ESD. Η προσπάθεια παραμετροποίησης έγινε στοχεύοντας στην αναπαραγωγή κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης από μία μετρημένη κυματομορφή της γεννήτριας ESD Dito, του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου.

4.2 Στοιχεία προσομοίωσης μοντέλου γεννήτριας ESD

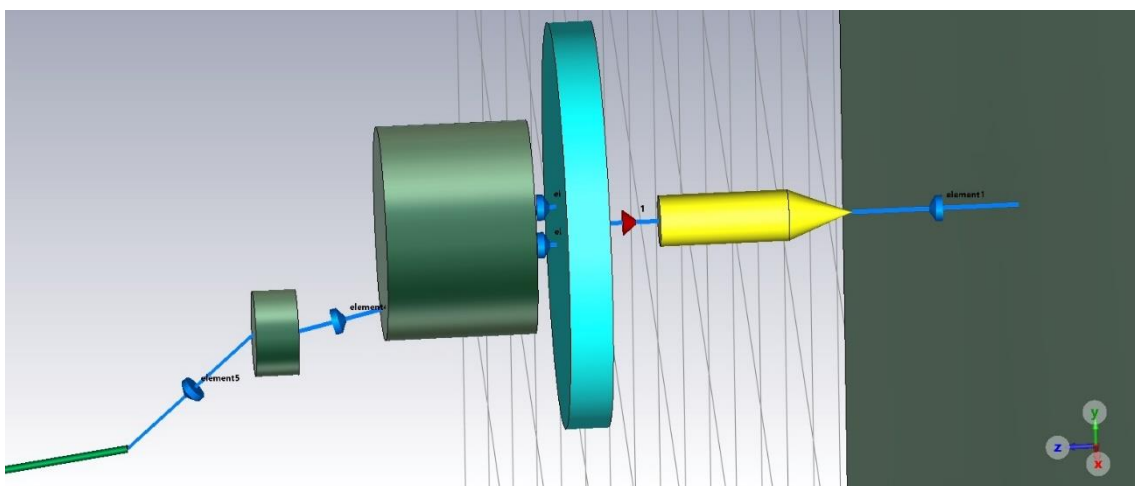
Η προσομοίωση του μοντέλου της γεννήτριας ESD έγινε στο λογισμικό CST Studio Suite, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Το περιβάλλον του λογισμικού περιλαμβάνει τρισδιάστατη απεικόνιση της προσομοίωσης, γραμμή εργαλείων και εντολών, καθώς και τις διαδρομές αναζήτησης σχετικά με τα στοιχεία που την αποτελούν. Επίσης, διαθέτει τα απαραίτητα εργαλεία για την απεικόνιση δομής οποιασδήποτε γεωμετρίας με δεδομένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά.



Σχήμα 4.3: Στόχος ρεύματος πρώτου μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας ESD



Σχήμα 4.4: Δεύτερο (απλοποιημένο) μοντέλο προσομοίωσης γεννήτριας ESD



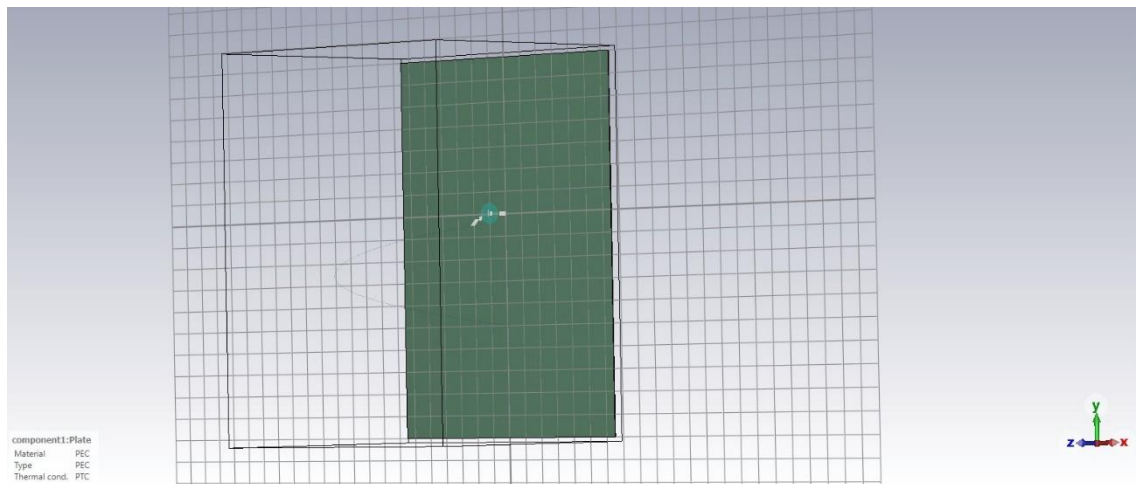
Σχήμα 4.5: Στόχος ρεύματος δεύτερου μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας ESD

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το πρώτο μοντέλο προσομοίωσης, ωστόσο λόγω της πολυπλοκότητας του συγκεκριμένου μοντέλου και της μεγάλης χρονικής καθυστέρησης των υπολογισμών της προσομοίωσης, εμφανίστηκε η ανάγκη για ένα ισοδύναμο μοντέλο, ικανό να εξάγει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Το δεύτερο μοντέλο αποτελεί απλοποίηση του πρώτου, καθώς αφαιρέθηκαν από αυτό στοιχεία τα οποία παρατηρήθηκε ότι δεν επηρεάζανε τα αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο, οι χρόνοι υπολογισμού της προσομοίωσης μειώθηκαν αισθητά, με τα αποτελέσματα να λαμβάνονται έως τα 160ns, σε αντίθεση με του πρώτου μοντέλου τα οποία έφταναν έως τα 60ns.

Για την εξαγωγή των παρατηρήσεων για τις παραμέτρους της προσομοίωσης του μοντέλου γεννήτριας ESD, χρησιμοποιήθηκε το δεύτερο μοντέλο, του οποίου τα στοιχεία αναλύονται παρακάτω.

Κατακόρυφο Επίπεδο

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται το κατακόρυφο επίπεδο της προσομοίωσης και έχει σχεδιαστεί με τις κατάλληλες διαστάσεις και αποστάσεις, ώστε να προσομοιώνει το μεταλλικό κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης, όπως αυτό ορίζεται στο Πρότυπο [27].

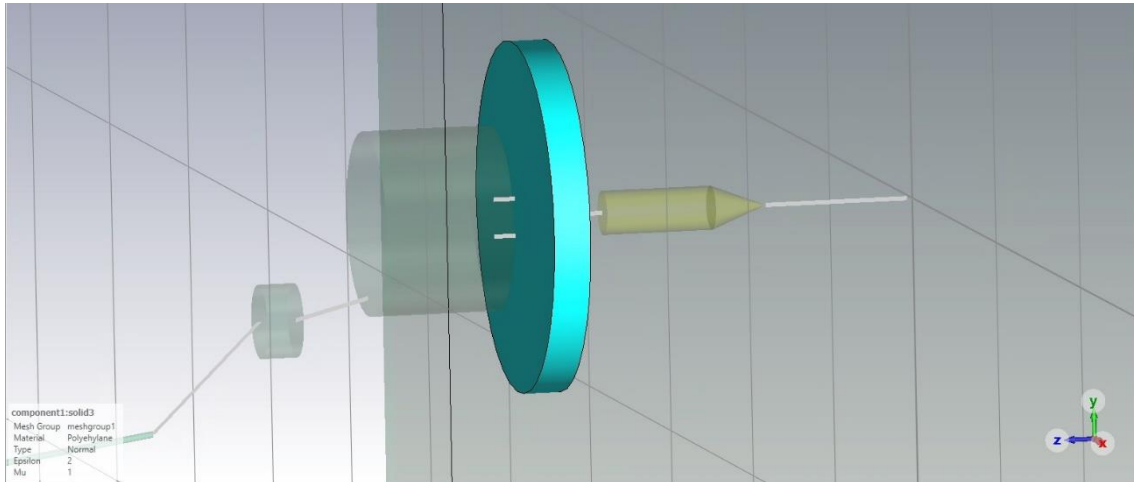


Σχήμα 4.6: Κατακόρυφο επίπεδο προσομοίωσης

Δίσκος_1 (Disk_1)

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται ο δίσκος 1 της προσομοίωσης, του οποίου το υλικό έχει οριστεί το πολυαιθυλένιο και αποτελεί δομικό στοιχείο της γεννήτριας ESD. Χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Disk1_Length: προσομοιώνει το μήκος του δίσκου 1 σε mm
- Disk1_Diameter: προσομοιώνει τη διάμετρο του δίσκου 1 σε mm

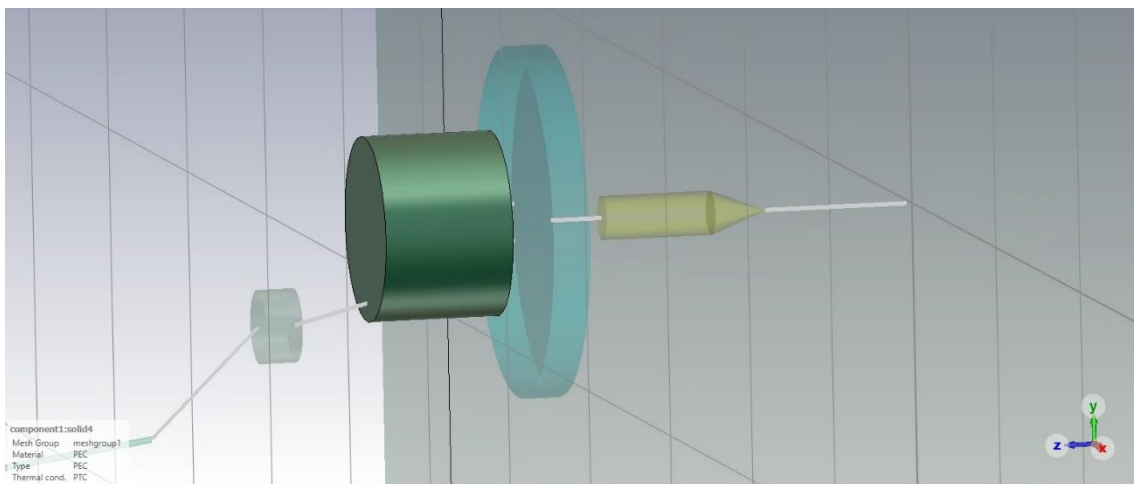


Σχήμα 4.7: Δίσκος_1 (Disk_1)

Δίσκος_2 (Disk_2)

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται ο δίσκος 2 της προσομοίωσης, ο οποίος προσομοιώνει τη χωρητικότητα του χεριού και του βραχίονα ενός ανθρώπου που κρατάει μεταλλικό αντικείμενο, βάσει του μοντέλου ανθρώπου-μετάλλου. Χαρακτηρίζεται από τις εξής παραμέτρους:

- Disk2_Length: προσομοιώνει το μήκος του δίσκου 2 σε mm
- Disk2_Diameter: προσομοιώνει τη διάμετρο του δίσκου 2 σε mm
- Disk2_Distance: προσομοιώνει την απόσταση του δίσκου 2 από το δίσκο 1

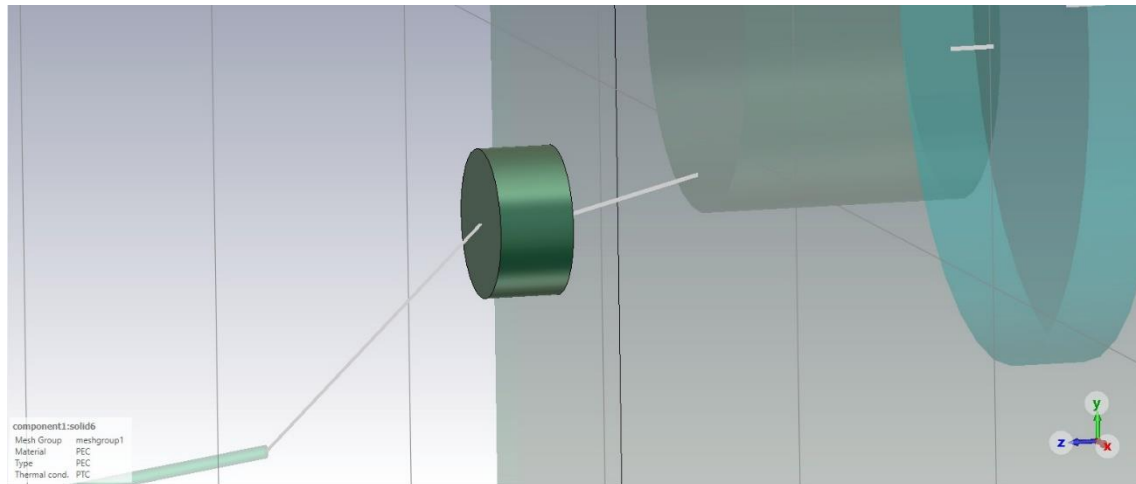


Σχήμα 4.8: Δίσκος_2 (Disk_2)

Δίσκος_3 (Disk_3)

Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται ο δίσκος 3 της προσομοίωσης, ο οποίος αποτελεί δομικό στοιχείο της γεννήτριας ESD. Χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Disk3_Length: προσομοιώνει το μήκος του δίσκου 3 σε mm
- Disk3_Diameter: προσομοιώνει το μήκος της διαμέτρου του δίσκου 3 σε mm
- Disk3_Distance: προσομοιώνει την απόσταση του δίσκου 3 από το δίσκο 2

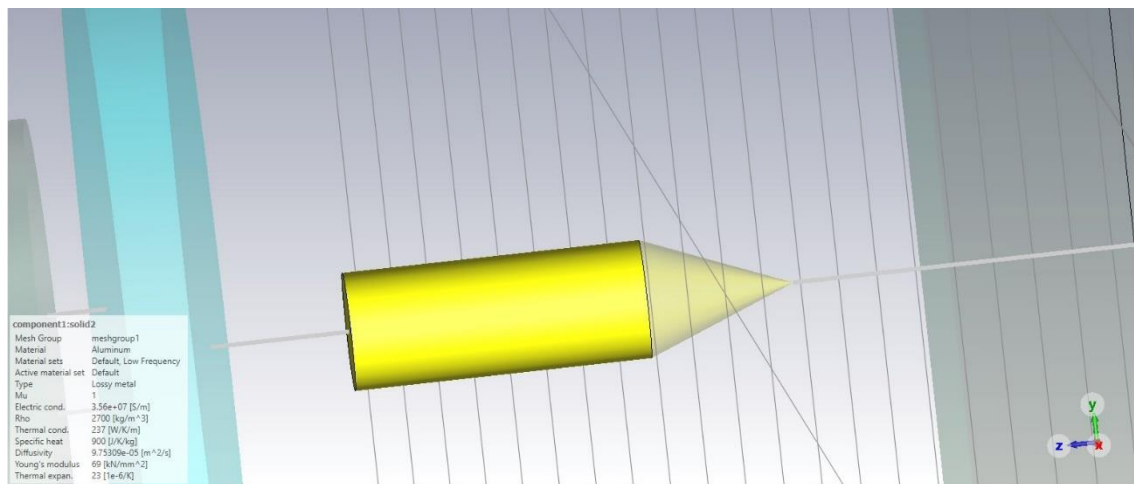


Σχήμα 4.9: Δίσκος_3 (Disk_3)

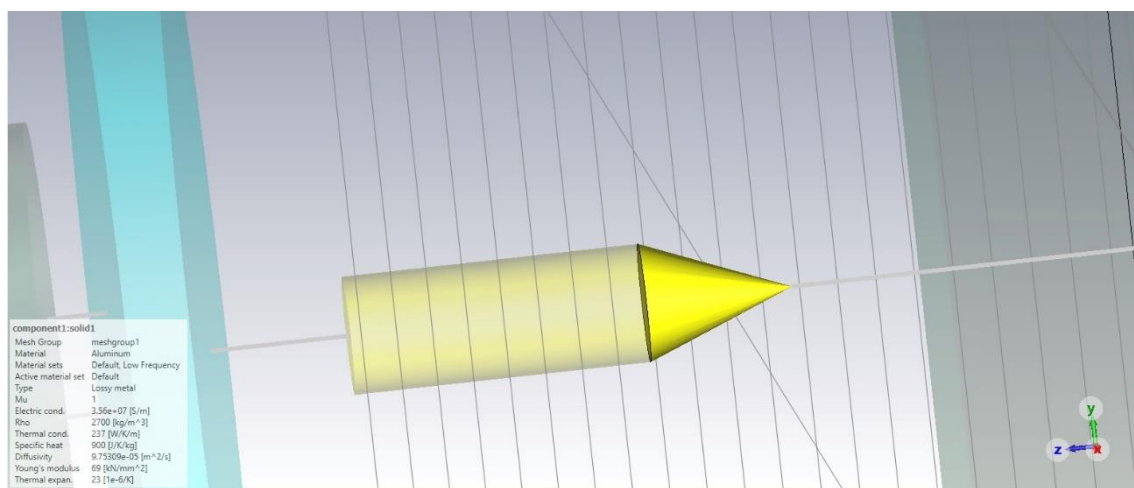
Άκρο εκφόρτισης (Discharge Tip)

Αποτελείται από ένα κυλινδρικό τμήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 και ένα κωνικό τμήμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Τα δύο αυτά τμήματα προσομοιώνουν το άκρο εκφόρτισης επαφής, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Πρότυπο [27]. Χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Tip_diameter: προσομοιώνει τη διάμετρο του άκρου εκφόρτισης
- Tip_length: προσομοιώνει το μήκος του κυλινδρικού τμήματος του άκρου εκφόρτισης
- Cone_Length: προσομοιώνει το μήκος του κωνικού τμήματος του άκρου εκφόρτισης



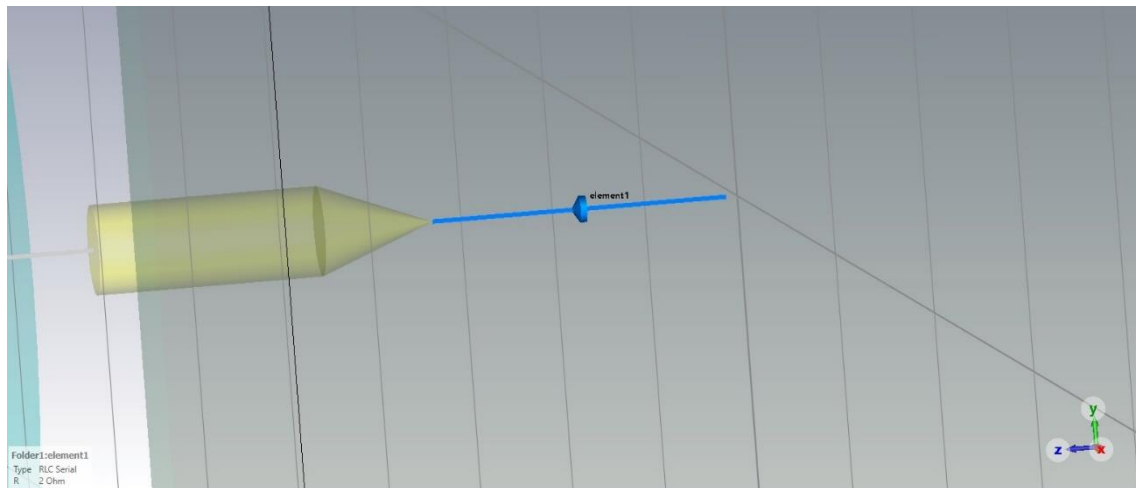
Σχήμα 4.10: Κυλινδρικό τμήμα άκρου εκφόρτισης



Σχήμα 4.11: Κωνικό τμήμα άκρου εκφόρτισης

Στοιχείο Element_1

Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται το στοιχείο element_1 της προσομοίωσης. Προσομοιώνει την αντίσταση του άκρου εκφόρτισης, η οποία έχει τιμή 2Ω . Με το άκρο εκφόρτισης συνδέεται επιπλέον η παράμετρος DP Length που προσομοιώνει την απόσταση του άκρου εκφόρτισης από τον στόχο. Στην πραγματικότητα, η απόσταση αυτή δεν υφίσταται, καθώς το άκρο εκφόρτισης ακουμπά πάνω στον στόχο.

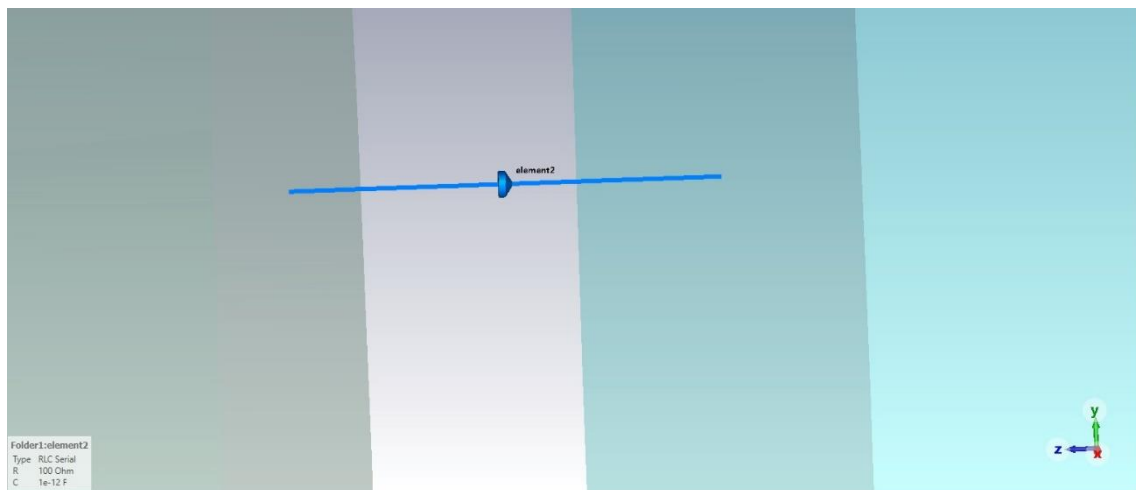


Σχήμα 4.12: Στοιχείο Element_1

Στοιχείο Element_2

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται το στοιχείο element_2 της προσομοίωσης, το οποίο χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Relement2(R2): αποτελεί στοιχείο του κυκλωματικού μοντέλου από το οποίο προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης
- Celement2(C2): αποτελεί στοιχείο του κυκλωματικού μοντέλου από το οποίο προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης

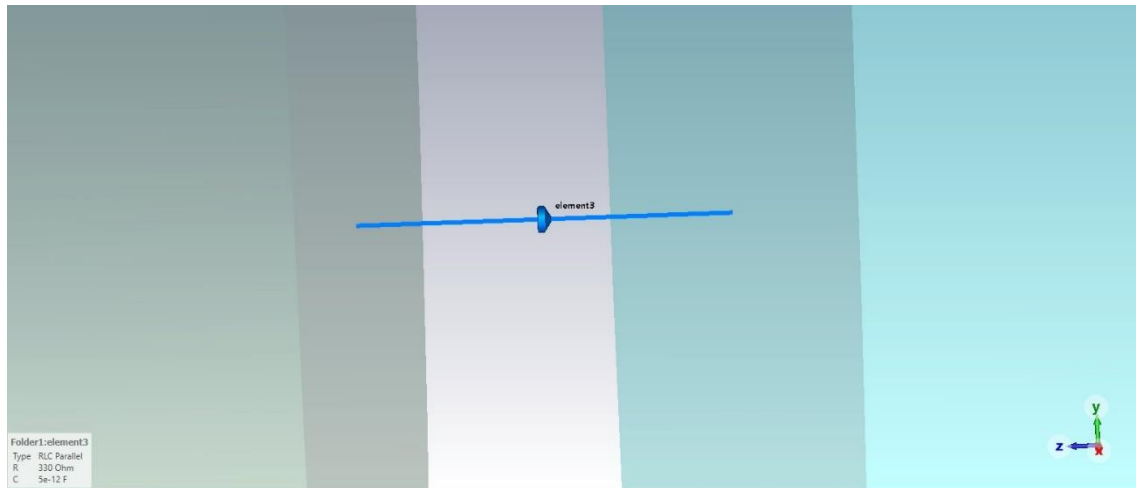


Σχήμα 4.13: Στοιχείο Element_2

Στοιχείο Element_3

Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται το στοιχείο element_3 της προσομοίωσης, το οποίο χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Relement3(R3): Έχει τυπική τιμή 330Ω και ορίζεται από το Πρότυπο [27] για τη συνολική αντίσταση ενός ανθρώπου που κρατάει μεταλλικό αντικείμενο.
- Celement3(C3): αποτελεί στοιχείο του κυκλωματικού μοντέλου από το οποίο προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης

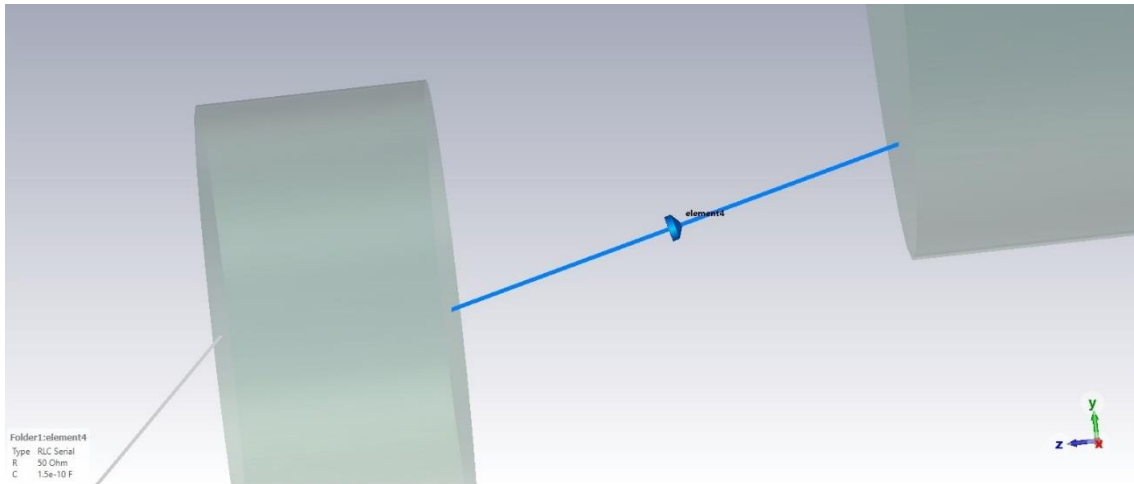


Σχήμα 4.14: Στοιχείο Element_3

Στοιχείο Element_4

Στο Σχήμα 4.15 απεικονίζεται το στοιχείο element_4 της προσομοίωσης, το οποίο είναι ένα στοιχείο αντίστασης και ένας πυκνωτής, συνδεδεμένα σε σειρά. Χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Relement4(R4): αποτελεί στοιχείο του κυκλωματικού μοντέλου από το οποίο προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης
- Celement4(C4): Έχει τυπική τιμή 150pF και ορίζεται από το Πρότυπο [27] για τη συνολική χωρητικότητα του ανθρωπίνου σώματος.

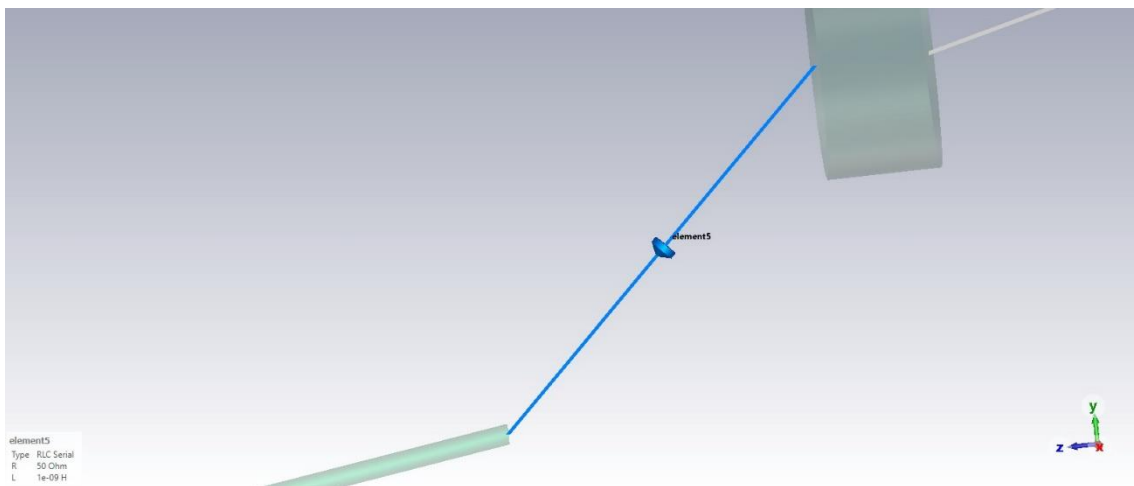


Σχήμα 4.15: Στοιχείο Element_4

Στοιχείο Element_5

Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται το στοιχείο element_5 της προσομοίωσης, το οποίο χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους:

- Relement5(R5): αποτελεί στοιχείο του κυκλωματικού μοντέλου από το οποίο προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης
- Lelement5(L5): αποτελεί στοιχείο του κυκλωματικού μοντέλου από το οποίο προέκυψε το τρισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης

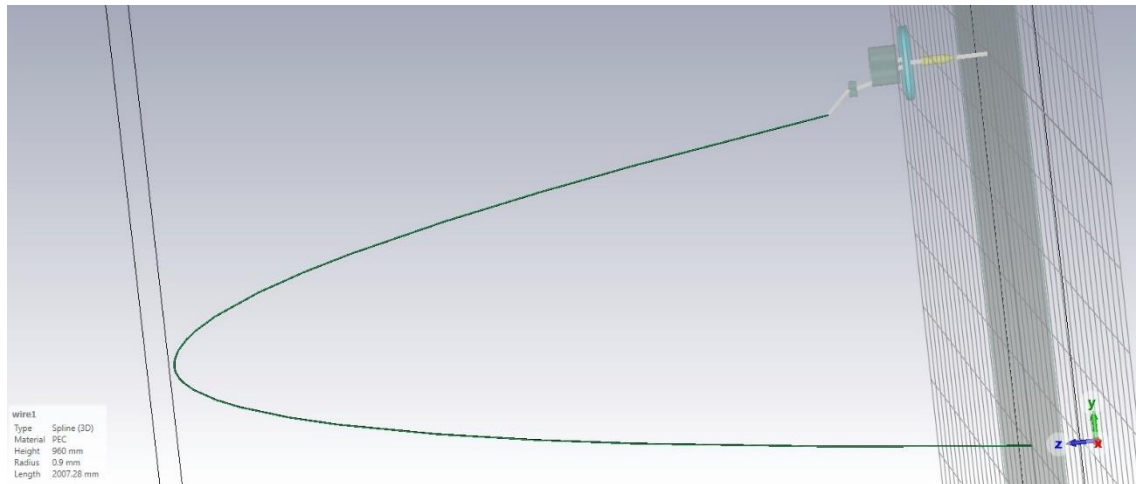


Σχήμα 4.16: Στοιχείο Element_5

Καλώδιο γείωσης

Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται το καλώδιο γείωσης της προσομοίωσης. Το καλώδιο γείωσης έχει μήκος 2m και έχει προσομοιωθεί με καμπύλη γεωμετρία, όπως σχηματίζεται

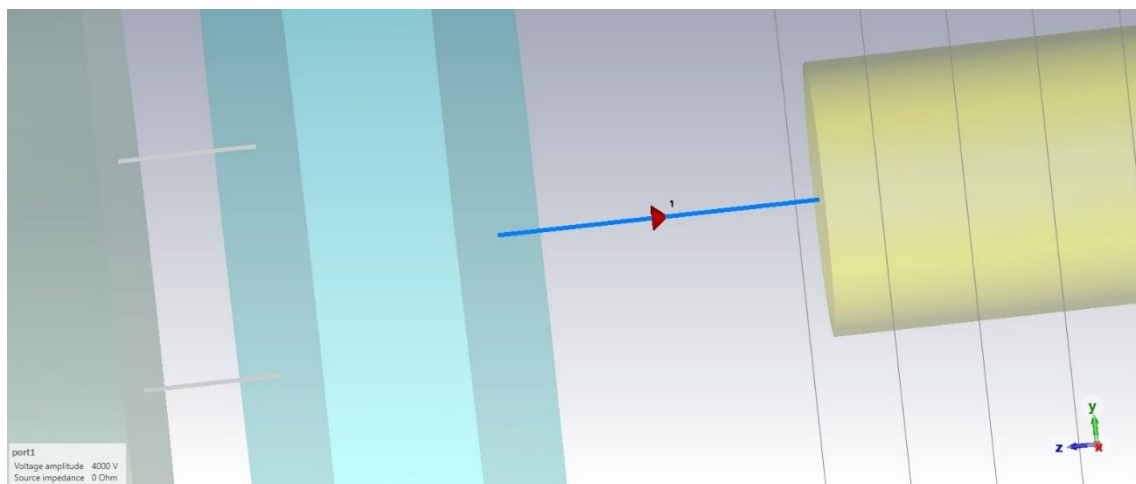
σε μια πραγματική πειραματική διάταξη, σε αντίθεση με παλαιότερες προσομοιώσεις [25,33,39], όπου το καλώδιο γείωσης είχε ορθογωνική γεωμετρία. Ακολουθεί τις απαιτήσεις του Προτύπου [27], με το μέσον του να είναι τραβηγμένο προς τα πίσω δημιουργώντας ένα ισοσκελές τρίγωνο με το κατακόρυφο επίπεδο.



Σχήμα 4.17: Καλώδιο γείωσης

Πηγή Τάσης

Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζεται η πηγή τάσης της προσομοίωσης, η οποία παρέχει την τάση των +4kV. Με την πηγή τάσης συνδέεται η παράμετρος DP_Length, η οποία προσομοιώνει το μήκος της θύρας φόρτωσης, στην οποία εφαρμόζεται η τάση. Είναι στοιχείο της προσομοίωσης και στην πραγματικότητα δεν υφίσταται.



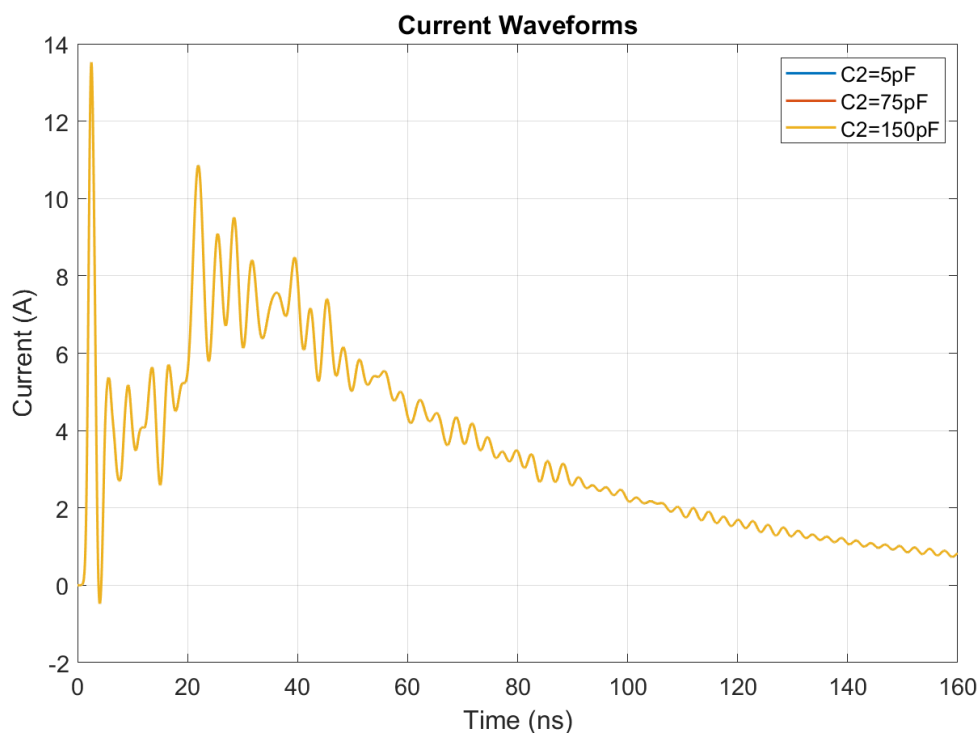
Σχήμα 4.18: Πηγή τάσης προσομοίωσης

4.3 Μελέτη παραμέτρων

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η συμπεριφορά των παραμέτρων του προσομοιωμένου μοντέλου της γεννήτριας ESD, προκειμένου να εντοπιστούν ποιες παράμετροι επηρεάζουν την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης και με ποιο τρόπο επιδρούν σε αυτή. Για κάθε μία από τις παραμέτρους, επιλέχθηκαν τυχαίες τιμές και η προσομοίωση «έτρεξε» για κάθε μία από αυτές. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Παράμετρος Celement2(C2)

Η επίδραση της παραμέτρου Celement2(C2) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της C2 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **C2=5pF**, **C2=75pF** και **C2=150pF**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της C2 φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.19 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.19: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement2

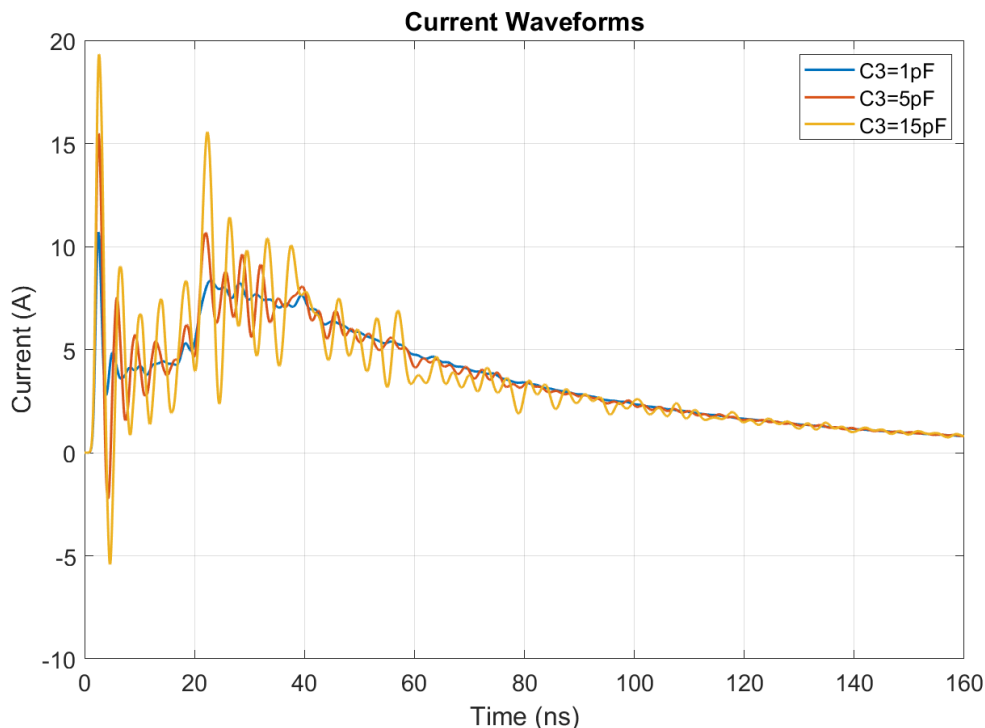
Από το Σχήμα 4.19 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της C2 δεν επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Ο Πίνακας 4.1 επιβεβαιώνει αυτή την παρατήρηση.

Πίνακας 4.1: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της C2

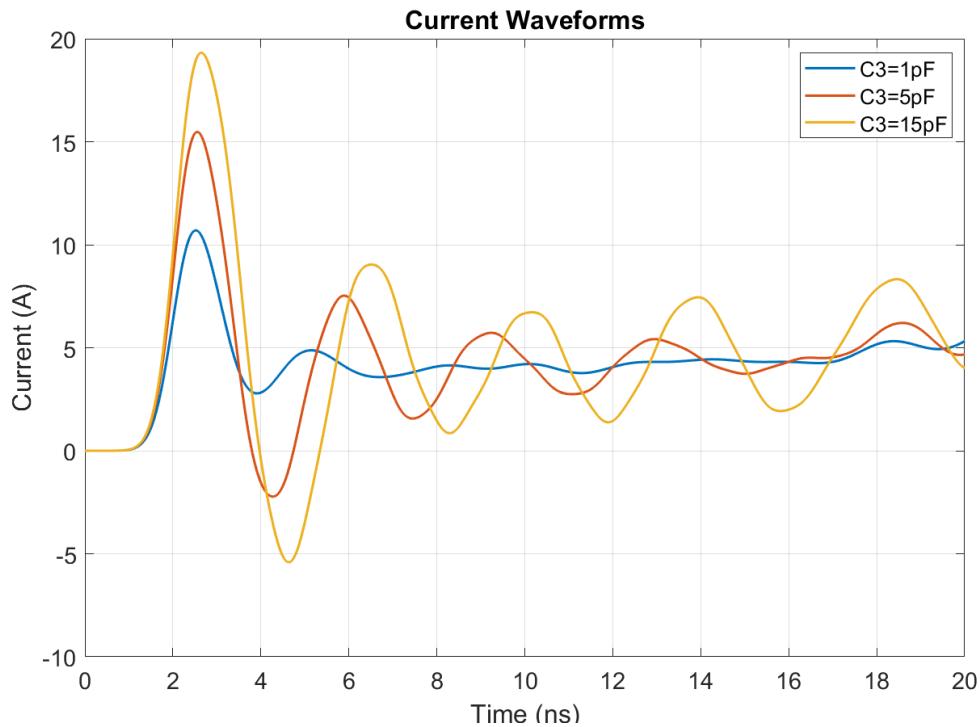
C2	I _p	I _{p2}	t _r	I ₃₀	I ₆₀
[pF]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
5	13,5207	10,8571	0,7743	8,3211	4,5446
75	13,5202	10,8570	0,7743	8,3211	4,5444
150	13,5202	10,8570	0,7743	8,3211	4,5444

Παράμετρος Celement3(C3)

Η επίδραση της παραμέτρου Celement3(C3) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της C3 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **C3=1pF**, **C3=5pF** και **C3=15pF**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της C3 φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.20 και 4.21 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.20: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement3



Σχήμα 4.21: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $C_{element3}$ για χρόνο $t=0-20ns$

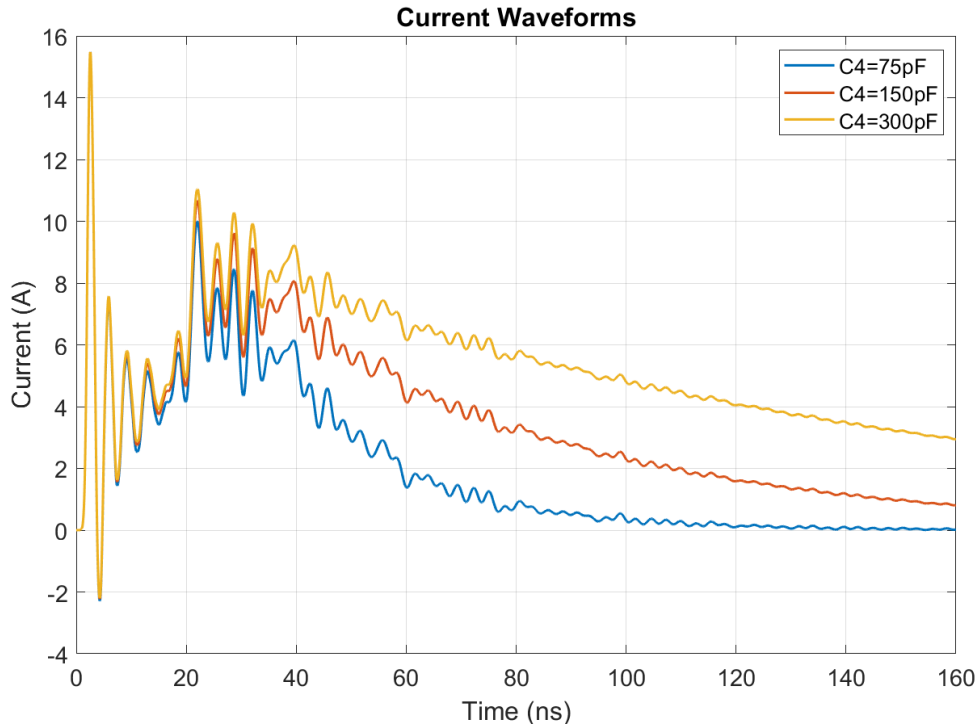
Από τα Σχήματα 4.20 και 4.21 παρατηρείται επίδραση των διαφορετικών τιμών της παραμέτρου στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Συγκεκριμένα, για τη μικρότερη τιμή της $C3$ εμφανίζεται η μικρότερη τιμή του ρεύματος $1^{η}$ κορυφής I_p , ενώ με την αύξηση της τιμής της $C3$, παρατηρείται αύξηση της τιμής του I_p . Επιπλέον, η ταλάντωση είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνει η τιμή της $C3$.

Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της $C3$

C3	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[pF]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
1	10,7018	8,3623	0,7820	7,6561	4,5964
5	15,4805	10,6694	0,7831	8,3490	4,5697
15	19,3267	15,5500	0,8140	4,8860	3,5119

Παράμετρος Celement4(C4)

Η επίδραση της παραμέτρου Celement4(C4) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της C4 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **C4=75pF**, **C4=150pF** και **C4=300pF**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της C4 φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.22 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.22: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Celement4

Πίνακας 4.3: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της C4

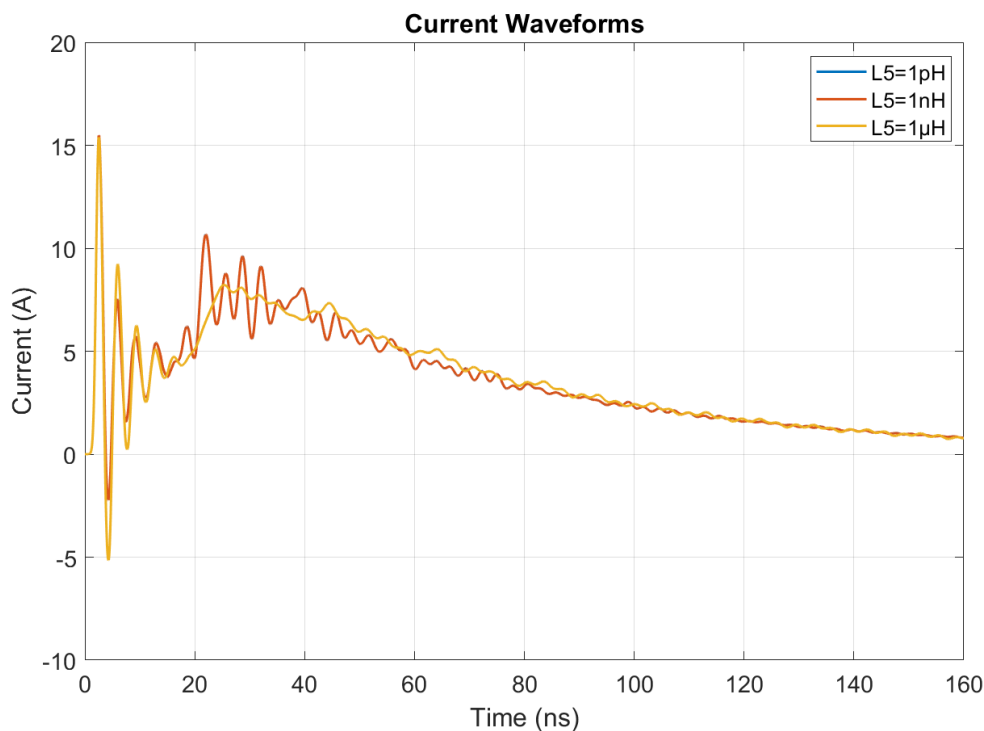
C4	I _p	I _{p2}	t _r	I ₃₀	I ₆₀
[pF]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
75	15,4790	10,0008	0,7830	7,0270	1,8243
150	15,4805	10,6694	0,7831	8,3490	4,5697
300	15,4812	11,0388	0,7831	9,1133	6,6174

Από το Σχήμα 4.22 και τον Πίνακα 4.3 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της C4 δεν επιδρά στην τιμή του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p. Η εικόνα των κυματομορφών

παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά ως προς το πλήθος, το πλάτος και τη διάρκεια των ταλαντώσεων. Ωστόσο, μετά τα 20ns, η αύξηση της τιμής της C4 προκαλεί ανόρθωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, με το ρεύμα να εξελίσσεται σε μεγαλύτερες τιμές. Ο Πίνακας 4.3 επιβεβαιώνει αυτή την παρατήρηση, καθώς η τιμή του ρεύματος I_{60} αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της C4.

Παράμετρος Lelement5(L5)

Η επίδραση της παραμέτρου Lelement5(L5) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της L5 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **L5=1pH**, **L5=1nH** και **L5=1μH**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της L5 φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.23 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.23: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Lelement5

Στο Σχήμα 4.23 είναι εμφανείς οι 2 από τις 3 κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κυματομορφή για L5=1pH ταυτίζεται με την κυματομορφή για L5=1nH, κάτι που επιβεβαιώνεται από τις τιμές του Πίνακα 4.4.

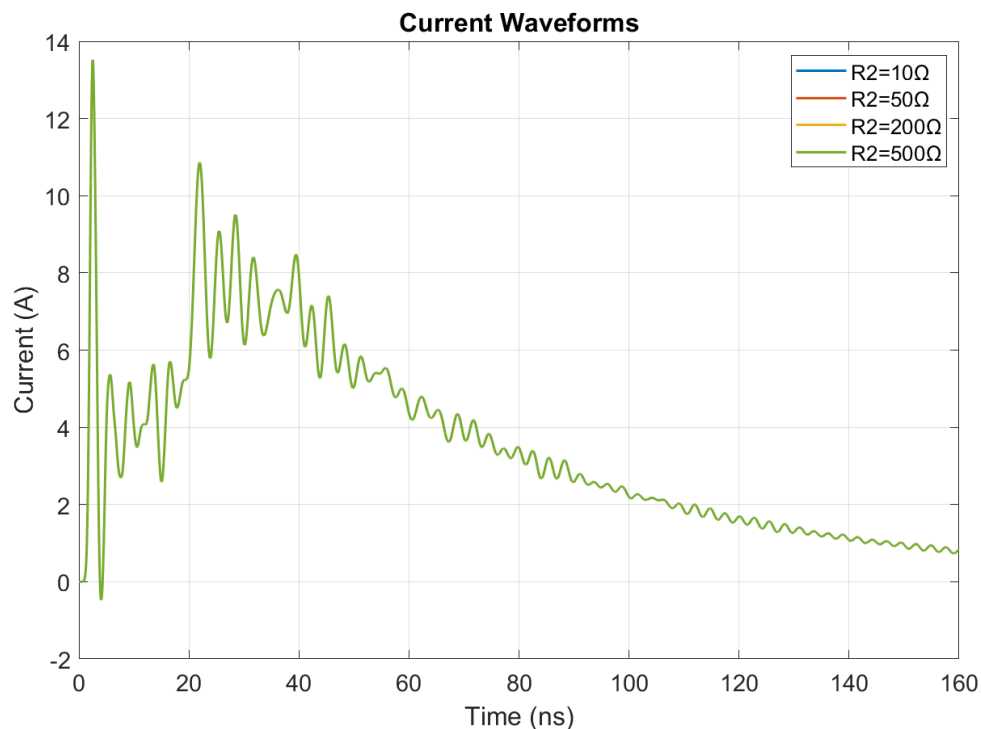
Πίνακας 4.4: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της L5

L5	I _p	I _{p2}	t _r	I ₃₀	I ₆₀
	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
1pH	15,4815	10,6708	0,7831	8,3534	4,5695
1nH	15,4805	10,6694	0,7831	8,3490	4,5697
1μH	15,3954	8,2223	0,7800	7,7242	4,9898

Παρατηρείται ότι η παράμετρος L5 δεν επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p. Με την αύξηση της τιμής της L5 η ταλάντωση της κυματομορφής μειώνεται και παράλληλα εμφανίζεται μετατόπιση της δεύτερης κορυφής σε σχέση με τις μικρότερες τιμές της L5. Η μετατόπιση της δεύτερης κορυφής είναι αναμενόμενη, λόγω της αύξησης της αυτεπαγωγής.

Παράμετρος Relement2(R2)

Η επίδραση της παραμέτρου Relement2(R2) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της R2 για τις



Σχήμα 4.24: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement2

οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **R2=10 Ω, R2=50 Ω, R2=200 Ω και R2=500 Ω**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της R2 φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.24 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).

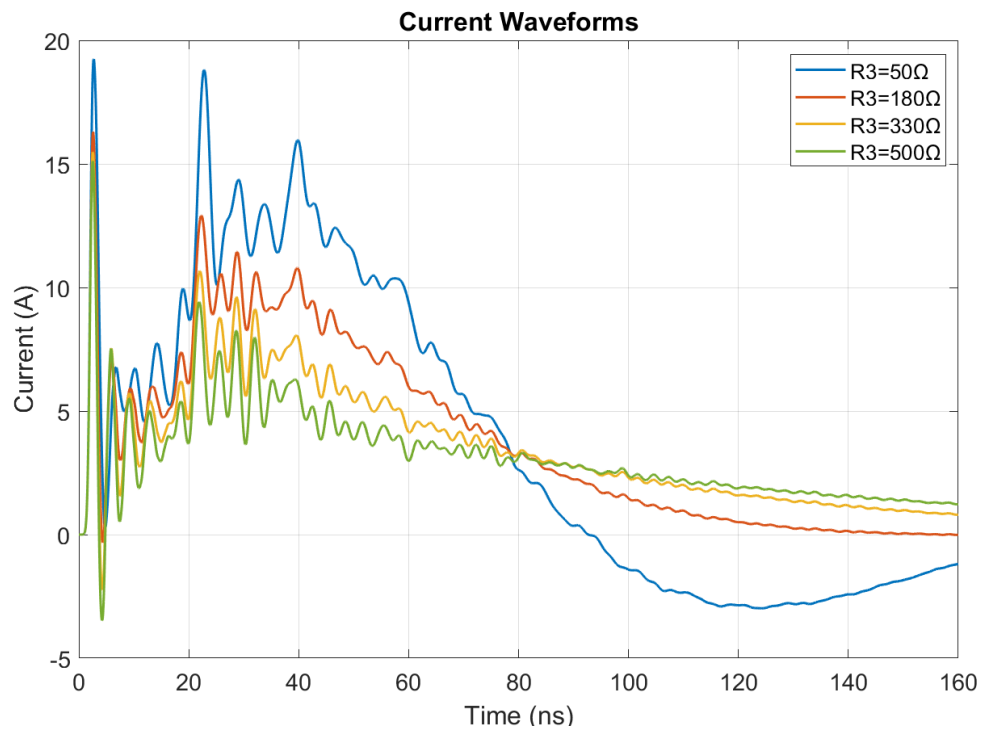
Πίνακας 4.5: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R2

R2	I_p	I_{p2}	t_r	I₃₀	I₆₀
[Ω]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
10	13.5220	10.8577	0.7743	8.3211	4.5452
50	13.5221	10.8577	0.7743	8.3211	4.5451
200	13.5222	10.8575	0.7743	8.3209	4.5451
500	13.5228	10.8572	0.7743	8.3205	4.5450

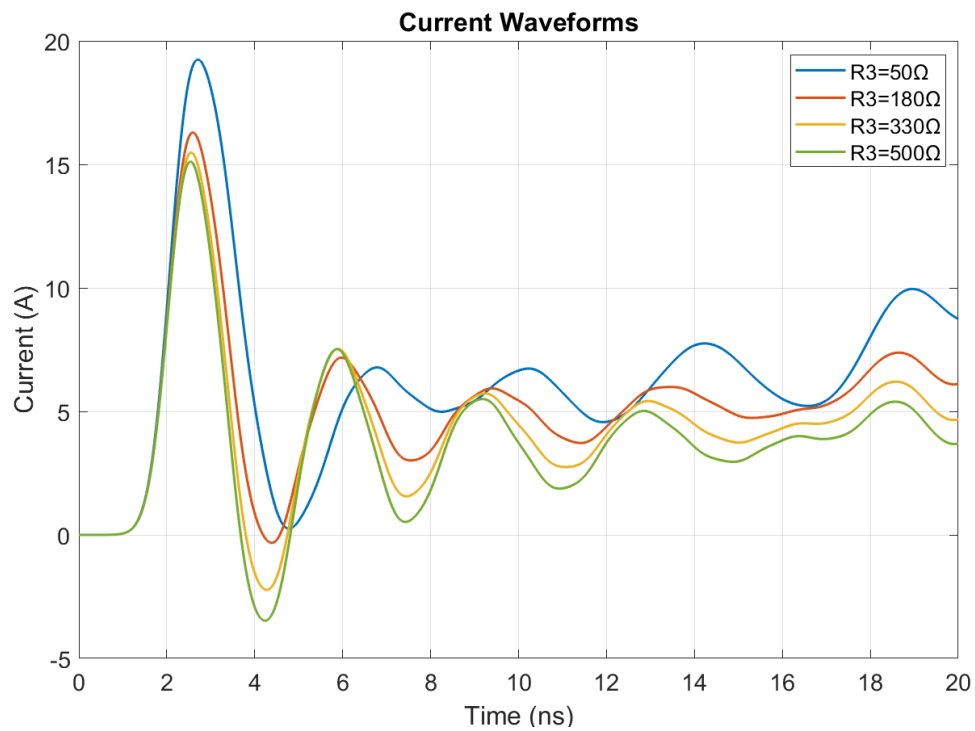
Από το Σχήμα 4.24 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της R2 δεν επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Ο Πίνακας 4.5 επιβεβαιώνει αυτή την παρατήρηση.

Παράμετρος Relement3(R3)

Η επίδραση της παραμέτρου Relement3(R3) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της R3 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **R3=50 Ω, R3=180 Ω, R3=330 Ω και R3=500 Ω**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της R3 φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.25 και 4.26 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.25: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $R_{element3}$



Σχήμα 4.26: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $R_{element3}$ για χρόνο $t=0-20ns$

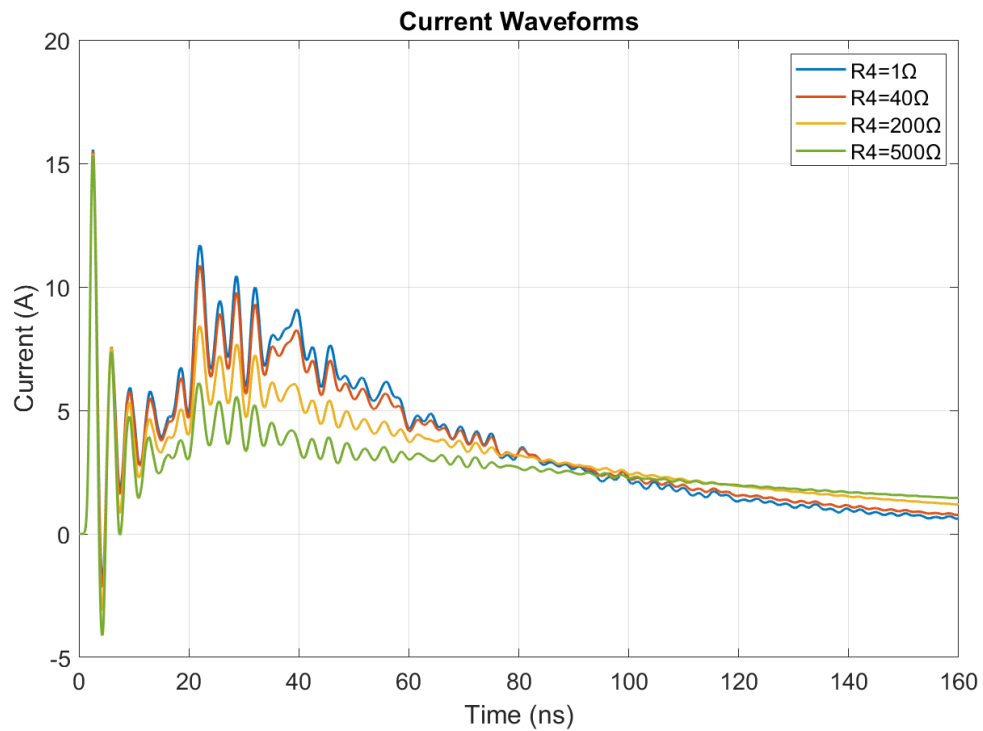
Πίνακας 4.6: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R3

R3	I_p	I_{p2}	t_r	I₃₀	I₆₀
[Ω]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
50	19,2451	18,8030	0,8411	11,3684	7,8466
180	16,2965	12,9099	0,7974	9,8015	5,8137
330	15,4805	10,6694	0,7831	8,3490	4,5697
500	15,1163	9,4141	0,7763	7,1863	3,8034

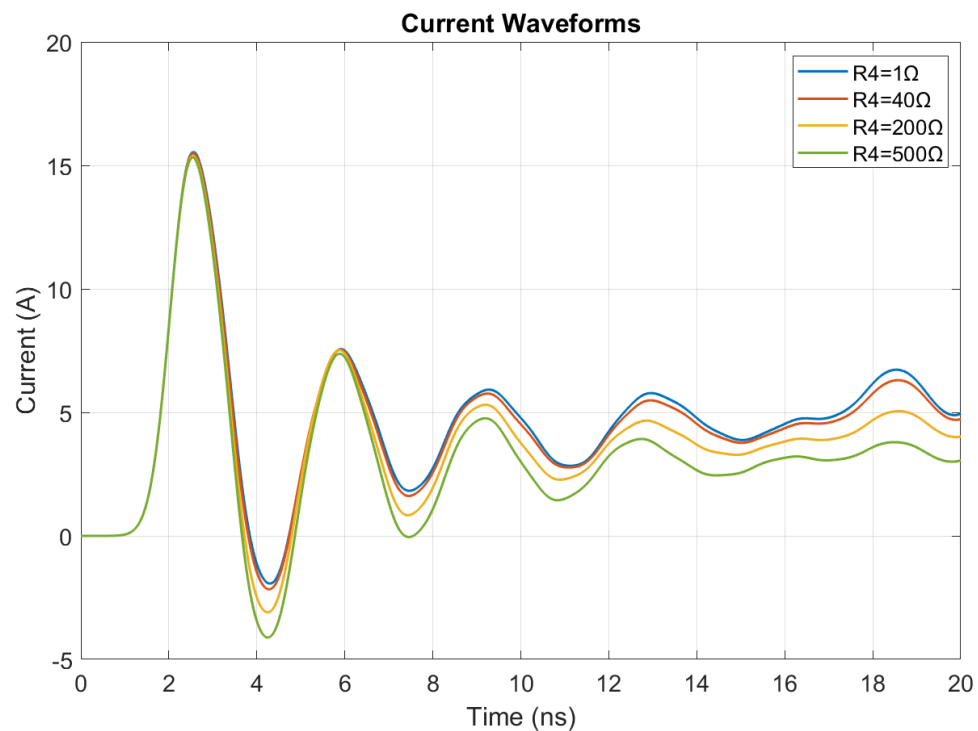
Από τα Σχήματα 4.25 και 4.26 και τον Πίνακα 4.6 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της R3 επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Συγκεκριμένα, η αύξηση της τιμής της R3 επιφέρει μείωση της τιμής του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p και της διάρκειας του 1^{ου} παλμού. Μετά την 1^η κορυφή, η κυματομορφή είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη, για την οποία παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της R3 έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερα πλάτη της κυματομορφής. Επίσης, παρατηρείται αύξηση της περιόδου ταλάντωσης για μικρότερες τιμές της R3.

Παράμετρος Relement4(R4)

Η επίδραση της παραμέτρου Relement4(R4) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της R4 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **R4=1 Ω, R4=40 Ω, R4=200 Ω και R4=500 Ω**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της R4 φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.27 και 4.28 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.27: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $R_{element4}$



Σχήμα 4.28: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $R_{element4}$ για χρόνο $t=0-20ns$

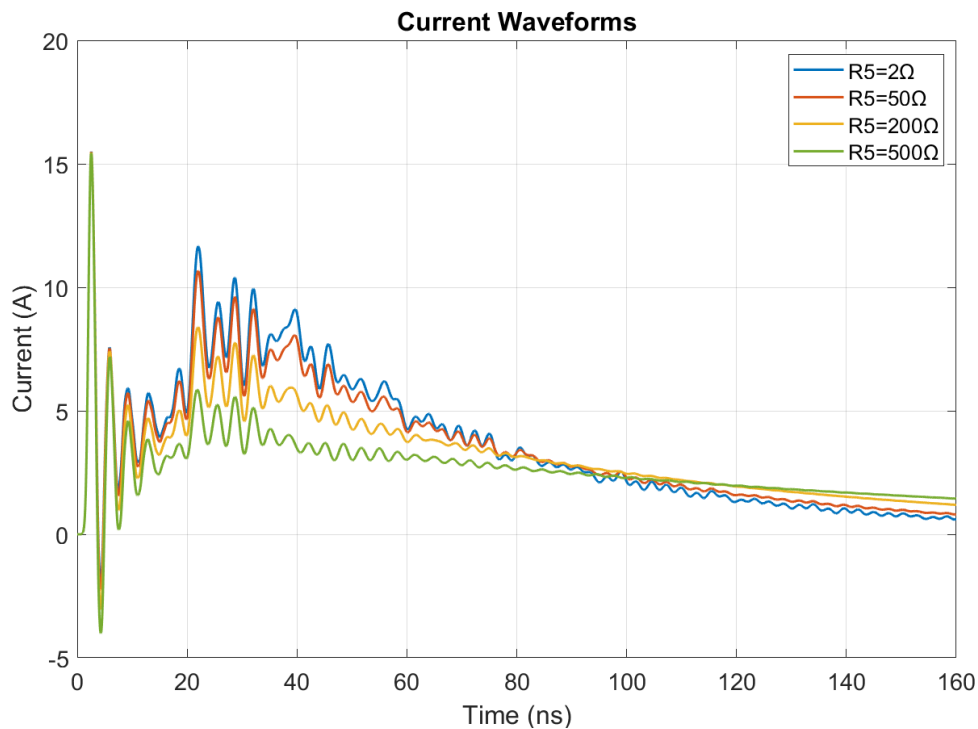
Πίνακας 4.7: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R4

R4	I_p	I_{p2}	t_r	I₃₀	I₆₀
[Ω]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
1	15,5452	11,6869	0,7850	9,1620	4,7915
40	15,4911	10,8628	0,7834	8,5019	4,6133
200	15,3889	8,4227	0,7803	6,6603	4,0188
500	15,3274	6,1168	0,7784	4,9076	3,2483

Από τα Σχήματα 4.27 και 4.28 και τον Πίνακα 4.7 παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της R4 δεν επιδρά στην τιμή του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p. Σε αντιστοιχία με τις παρατηρήσεις για την παράμετρο R3, μετά την 1^η κορυφή η κυματομορφή είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη, για την οποία παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της R4 έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερα πλάτη της κυματομορφής. Επίσης, παρατηρείται μικρή αύξηση της περιόδου ταλάντωσης για μικρότερες τιμές της R4.

Παράμετρος Relement5(R5)

Η επίδραση της παραμέτρου Relement5(R5) μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της R5 για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **R5=2 Ω, R5=50 Ω, R5=200 Ω και R5=500 Ω**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της R5 φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.29 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.29: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Relement5

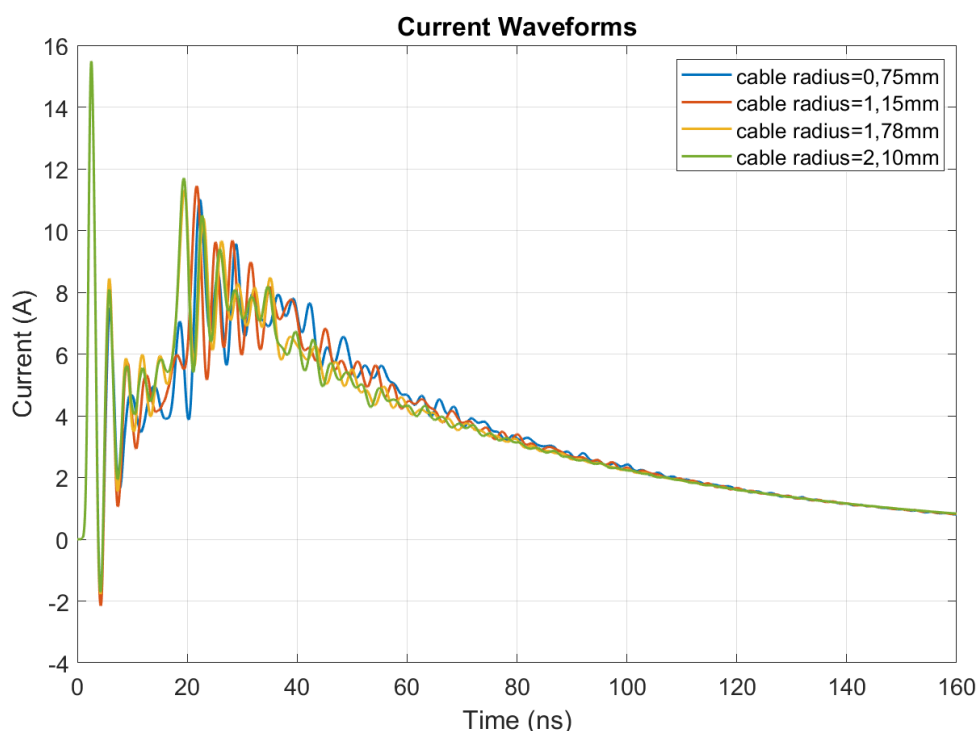
Πίνακας 4.8: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της R5

R5	I _p	I _{p2}	t _r	I ₃₀	I ₆₀
[Ω]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
2	15,4924	11,6605	0,7835	9,1110	4,7635
50	15,4805	10,6694	0,7831	8,3490	4,5697
200	15,4563	8,3912	0,7822	6,6143	4,0190
500	15,4330	5,8563	0,7814	4,6976	3,2190

Από το Σχήμα 4.29 και τον Πίνακα 4.8 παρατηρείται η επίδραση της R5 είναι παρόμοια με της παραμέτρου R4, καθώς η αύξηση της τιμής της R5 δεν επιδρά στην τιμή του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p, μετά την 1^η κορυφή η κυματομορφή είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη, για την οποία η αύξηση της τιμής της R5 έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερα πλάτη της κυματομορφής και η περίοδος της ταλάντωσης αυξάνεται για μικρότερες τιμές της R5.

Παράμετρος cable radius

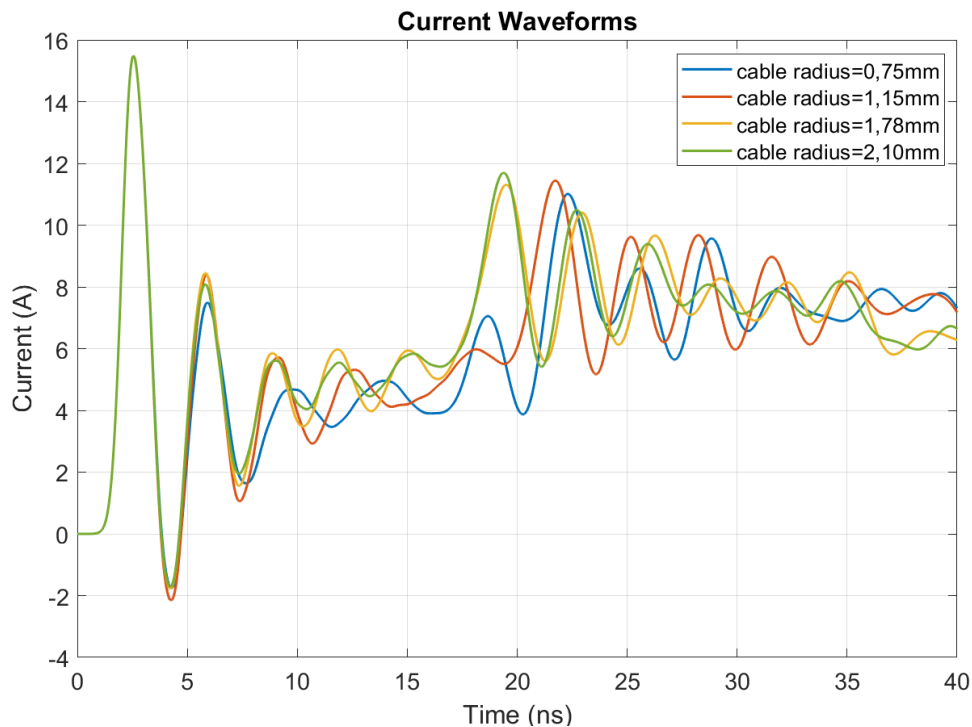
Η επίδραση της παραμέτρου cable radius μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της cable radius για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **cable radius=0.75mm**, **cable radius=1.15mm**, **cable radius=1.78mm** και **cable radius=2.1mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της cable radius φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.30 και 4.31 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.30: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου cable radius

Πίνακας 4.9: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της cable radius

cable radius	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
0,75	15,4830	11,0118	0,7832	7,7373	4,3619
1,15	15,4811	11,4437	0,7831	8,9692	4,3847
1,78	15,4833	11,3103	0,7832	7,4829	4,0810
2,10	15,4841	11,6950	0,7832	7,8258	4,0041



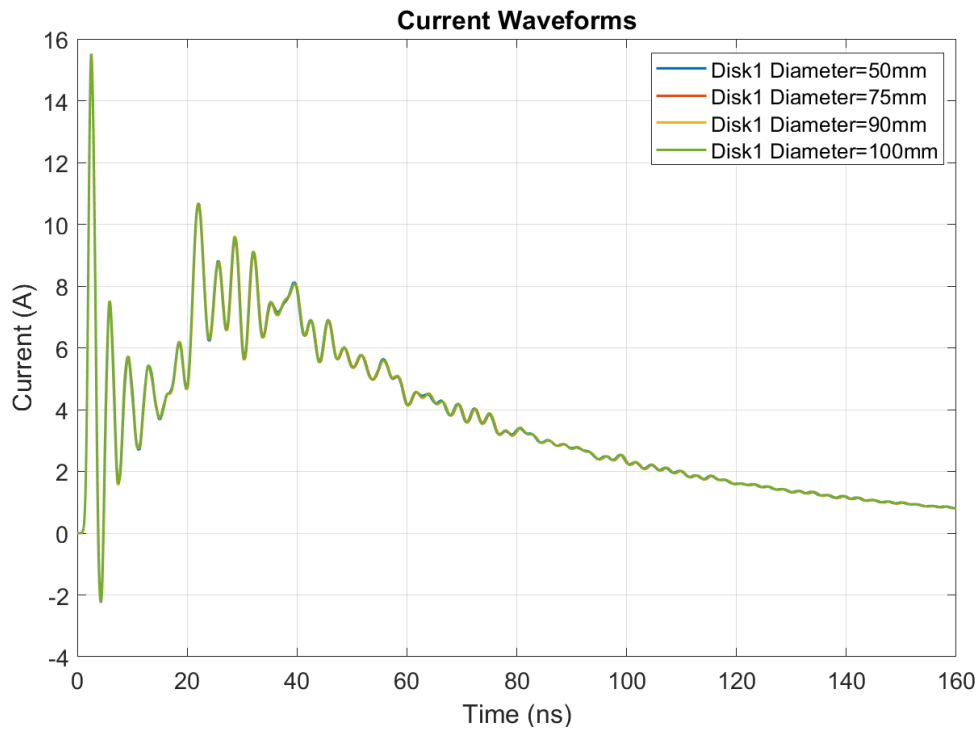
Σχήμα 4.31: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου cable radius για χρόνο $t=0-40\text{ns}$

Από τα Σχήματα 4.30 και 4.31 και τον Πίνακα 4.9 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, χωρίς όμως να επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Πρόκειται για μεταβολή της διατομής του καλωδίου γείωσης, με αλλαγή της ακτίνας του. Αρχικά, η μηδενική επίδραση στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p είναι αναμενόμενη, καθώς το ρεύμα 1^{ης} κορυφής ρέει μόνο μέσω του άκρου εκφόρτισης της γεννήτριας προς τη γη και δεν διαρρέει το καλώδιο επιστροφής του ρεύματος. Είναι εμφανές ότι με αύξηση της τιμής της παραμέτρου, όπου αυξάνεται και η διατομή του καλωδίου, μειώνεται η αυτεπαγωγή και για αυτό το λόγο υπάρχει μετατόπιση της δεύτερης κορυφής νωρίτερα στο χρόνο σε σχέση με τις μικρότερες τιμές της.

Παράμετρος Disk1 Diameter

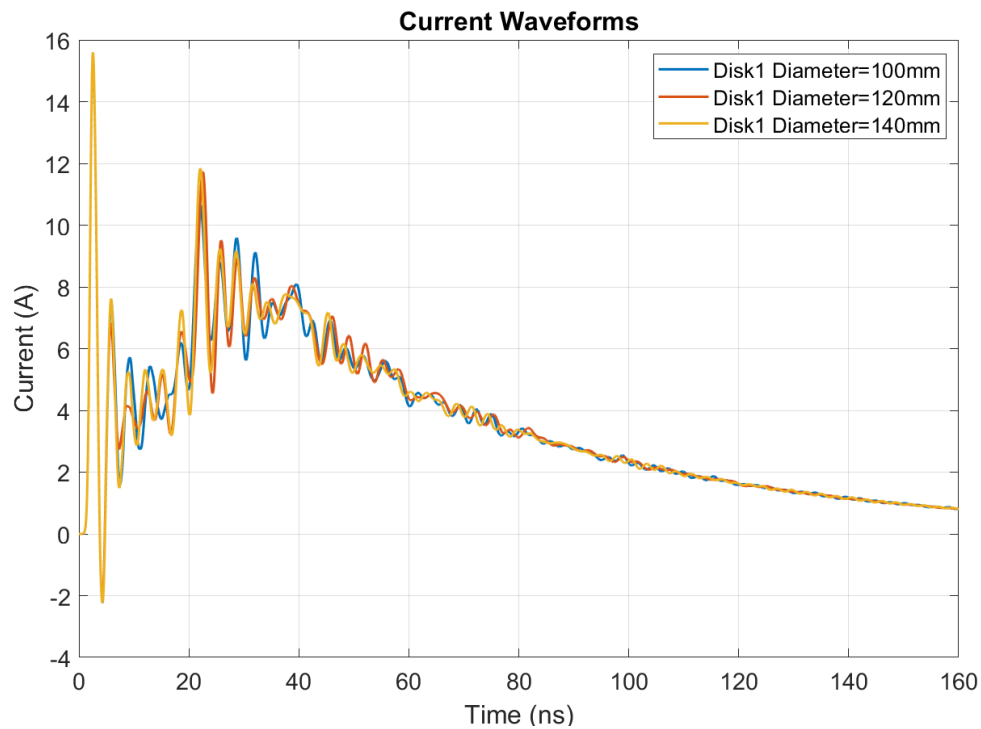
Η επίδραση της παραμέτρου Disk1 Diameter μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk1 Diameter για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk1 Diameter=50mm, Disk1 Diameter=75mm, Disk1 Diameter=90mm, Disk1 Diameter=100mm, Disk1 Diameter=120mm και Disk1 Diameter=140mm.** Οι

κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές Disk1 Diameter=50mm, 75mm, 90mm, 100mm φαίνονται στο Σχήμα 4.32 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.32: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Diameter

Από το Σχήμα 4.32 παρατηρείται ότι για τις συγκεκριμένες τιμές της Disk1 Diameter οι κυματομορφές ταυτίζονται. Στο επόμενο Σχήμα 4.33 φαίνονται οι κυματομορφές για τις τιμές Disk1 Diameter = 100mm, 120mm, 140mm. Κρατήθηκε τυχαία η τιμή Disk1 Diameter = 100mm, εφόσον έχει την ίδια εικόνα με τις υπόλοιπες τρεις για Disk1 Diameter=50mm, 75mm, 90mm.



Σχήμα 4.33: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Diameter

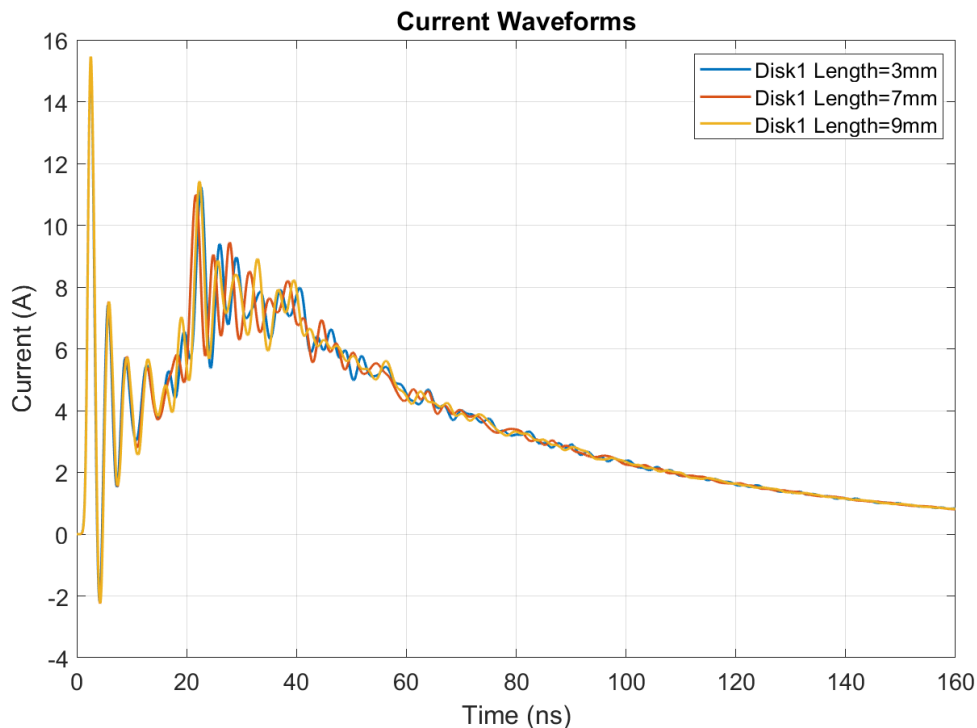
Πίνακας 4.10: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk1 Diameter

Disk1 Diameter	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
50	15,4505	10,6732	0,7891	8,2498	4,5455
75	15,4951	10,6754	0,7853	8,1684	4,5407
90	15,4691	10,6676	0,7824	8,3604	4,5718
100	15,5212	10,6642	0,7836	8,3295	4,5609
120	15,5976	11,7314	0,7840	8,0208	4,4273
140	15,5975	11,8367	0,7843	8,0839	4,3215

Από το Σχήμα 4.33 και τον Πίνακα 4.10 παρατηρείται ότι η αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου Disk1 Diameter δεν επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Μετά το ρεύμα 1^{ης} κορυφής το πλήθος, το πλάτος και η διάρκεια των ταλαντώσεων διαφέρουν, χωρίς όμως να εντοπίζεται κάποιο μοτίβο.

Παράμετρος Disk1 Length

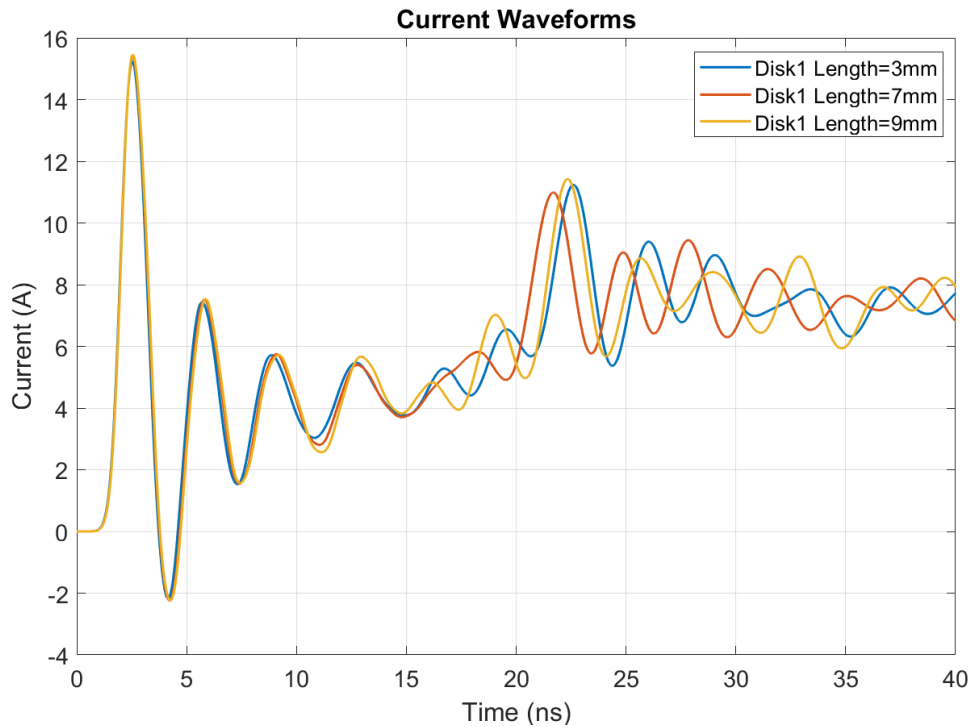
Η επίδραση της παραμέτρου Disk1 Length μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk1 Length για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk1 Length=3mm**, **Disk1 Length=7mm** και **Disk1 Length=9mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk1 Length φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.34 και 4.35 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.34: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Length

Πίνακας 4.11: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk1 Length

Disk1 Length	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
3	15,2433	11,2349	0,7866	7,1548	4,2791
7	15,4127	10,9889	0,7832	8,5018	4,6701
9	15,4585	11,4239	0,7832	6,6876	4,3124

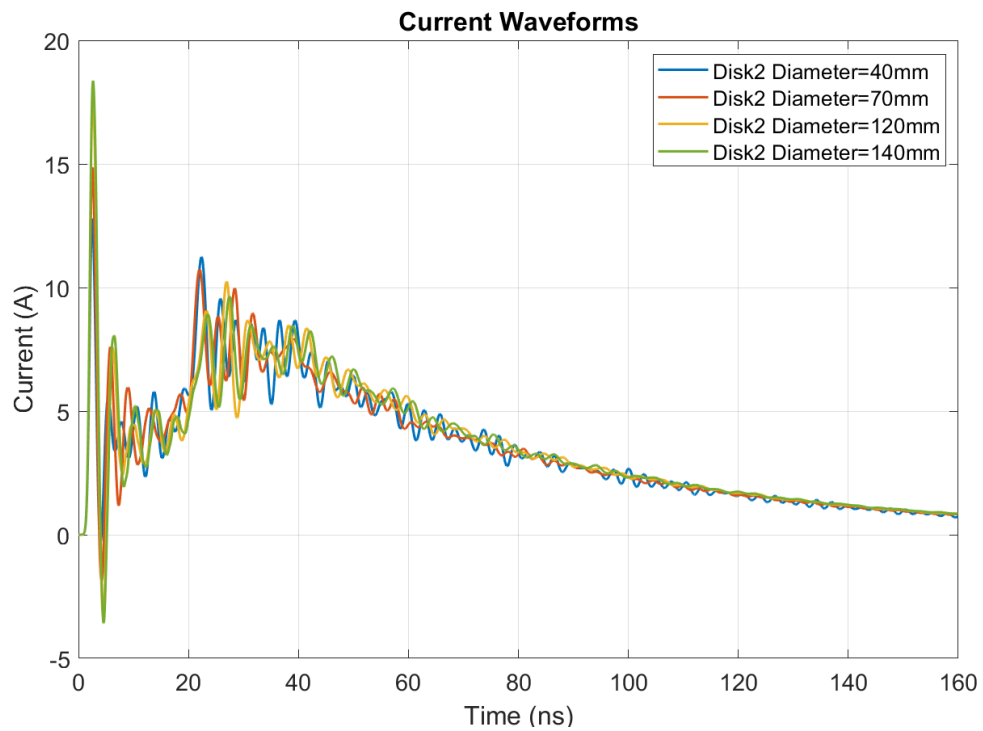


Σχήμα 4.35: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk1 Length για $t=0-40\text{ns}$

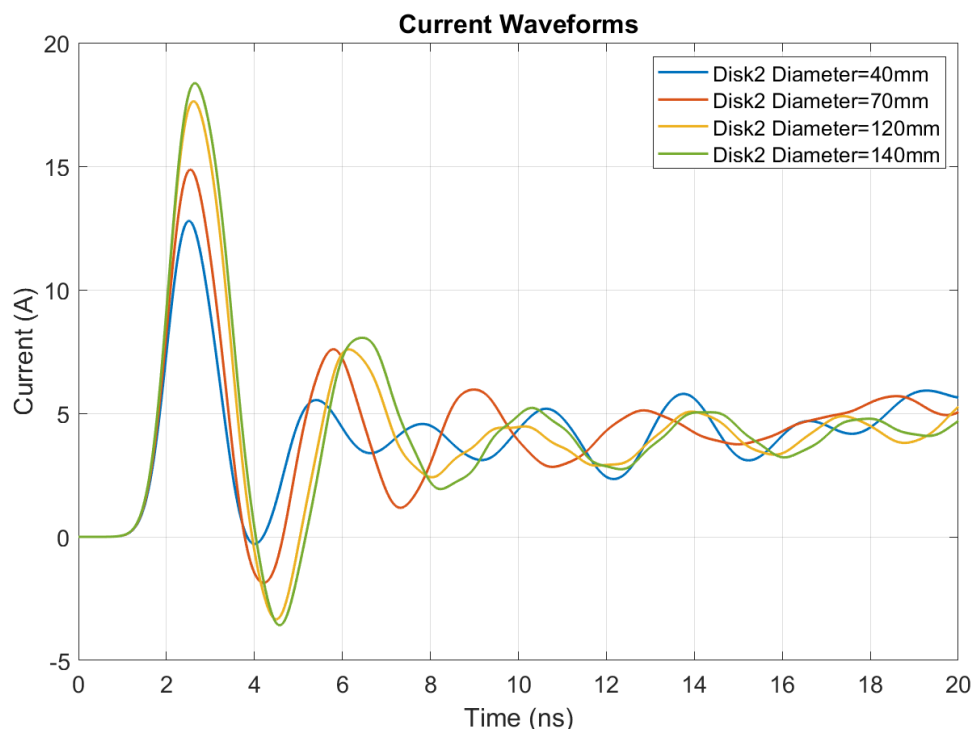
Από τα Σχήματα 4.34 και 4.35 και τον Πίνακα 4.11 παρατηρείται ότι η αλλαγή της τιμής της παραμέτρου Disk1 Length, επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, χωρίς όμως να επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Μετά το ρεύμα 1^{ης} κορυφής το πλήθος, το πλάτος και η διάρκεια των ταλαντώσεων διαφέρουν, χωρίς όμως να εντοπίζεται κάποιο μοτίβο.

Παράμετρος Disk2 Diameter

Η επίδραση της παραμέτρου Disk2 Diameter μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk2 Diameter για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk2 Diameter=40mm**, **Disk2 Diameter=70mm**, **Disk2 Diameter=120mm** και **Disk2 Diameter=140mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk2 Diameter φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.36 και 4.37 του ρεύματος εκφόρτισης $I(\text{A})$ και χρόνου $t(\text{ns})$.



Σχήμα 4.36: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Diameter



Σχήμα 4.37: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Diameter

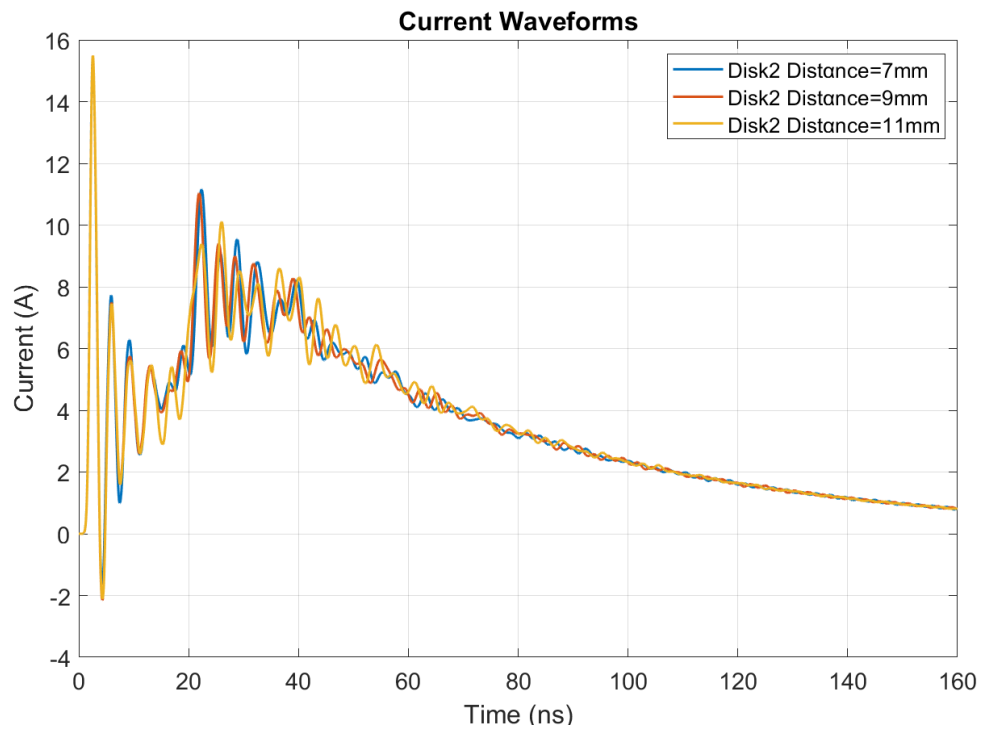
Πίνακας 4.12: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk2 Diameter

Disk2 Diameter	I _p	I _{p2}	t _r	I ₃₀	I ₆₀
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
40	12,7906	11,2375	0,7731	8,4712	3,8154
70	14,8622	10,7243	0,7804	8,8852	4,3776
120	17,6336	10,2473	0,8052	8,0554	4,5537
140	18,3672	9,6364	0,8170	8,4384	5,0484

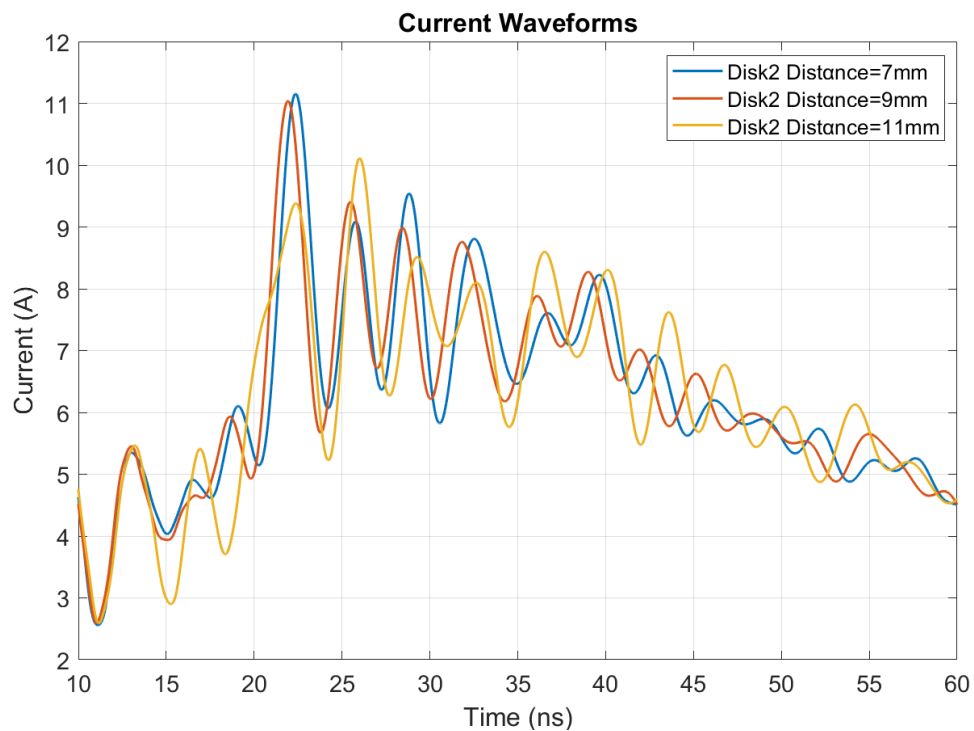
Από τα Σχήματα 4.36 και 4.37 και τον Πίνακα 4.12 παρατηρείται επίδραση της παραμέτρου Disk2 Diameter στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Η αύξηση της διαμέτρου του δίσκου 2 επιφέρει αύξηση της τιμής του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p και αύξηση της διάρκειας του πρώτου παλμού. Επίσης, παρατηρείται ότι για τις μικρότερες τιμές της Disk2 Diameter η δεύτερη κορυφή εμφανίζει μετατόπιση νωρίτερα στο χρόνο σε σχέση με τις μεγαλύτερες τιμές της Disk2 Diameter. Το πλήθος, το πλάτος και η διάρκεια των ταλαντώσεων διαφέρουν σε όλη την κυματομορφή, χωρίς όμως να εντοπίζεται κάποιο παραπάνω μοτίβο.

Παράμετρος Disk2 Distance

Η επίδραση της παραμέτρου Disk2 Distance μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk2 Distance για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk2 Distance=7mm**, **Disk2 Distance=9mm** και **Disk2 Distance=11mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk2 Distance φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.38 και 4.39 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.38: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Distance



Σχήμα 4.39: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Distance για $t=10-60\text{ns}$

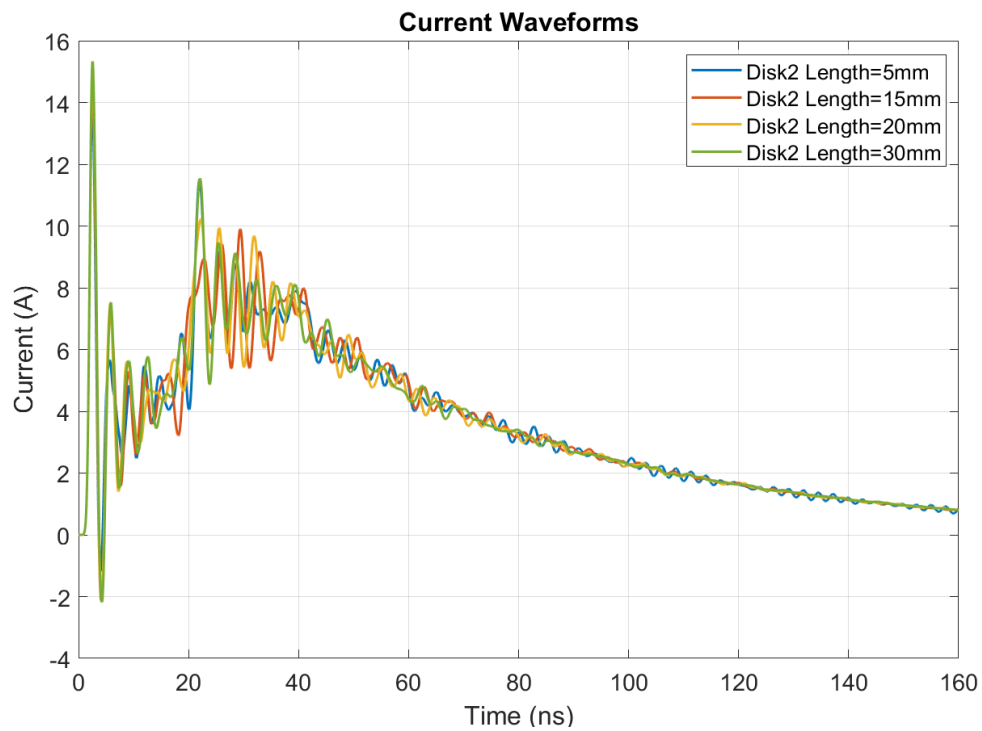
Πίνακας 4.13: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk2 Distance

Disk2 Distance	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
7	15,4792	11,1548	0,7834	7,4669	4,1035
9	15,4814	11,0396	0,7839	8,6226	4,4972
11	15,4910	10,1104	0,7849	7,3188	4,8330

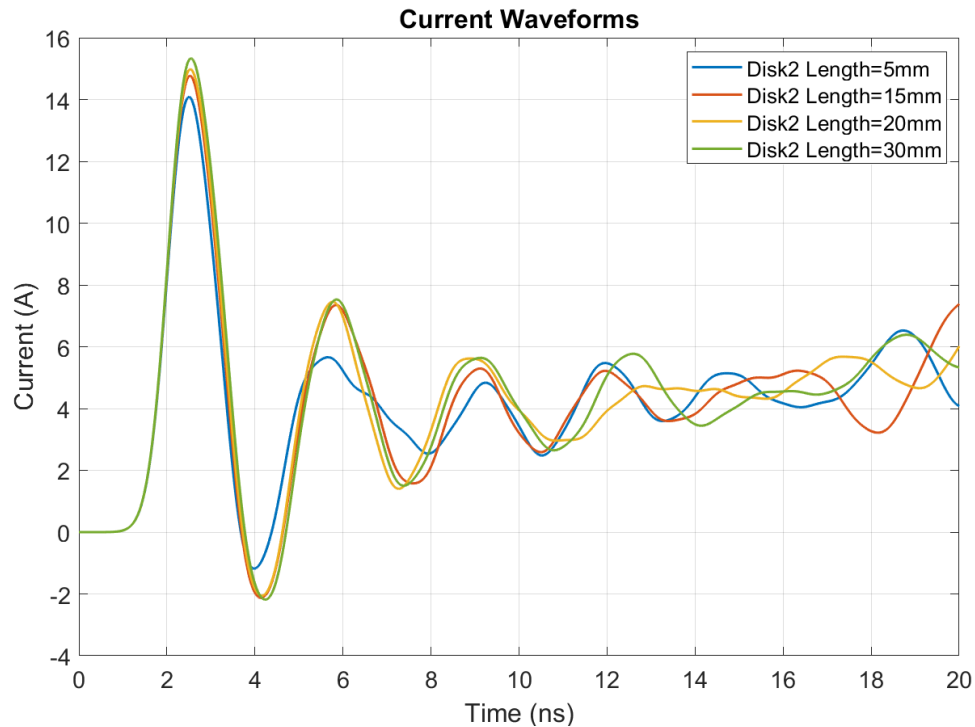
Από τα Σχήματα 4.38 και 4.39 και τον Πίνακα 4.13 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της Disk2 Distance δεν επιδρά καθόλου στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Η αύξηση της τιμής της Disk2 Distance έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή μετατόπιση της δεύτερης κορυφής νωρίτερα στο χρόνο σε σχέση με τις μικρότερες τιμές της Disk2 Distance. Από τα 15ns έως τα 60ns παρατηρείται διαφοροποίηση στο πλάτος, στο πλήθος και στη διάρκεια των ταλαντώσεων, ωστόσο μετά τα 60ns οι ουρές των κυματομορφών εξελίσσονται γύρω από τις ίδιες τιμές.

Παράμετρος Disk2 Length

Η επίδραση της παραμέτρου Disk2 Length μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk2 Length για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk2 Length=5mm, Disk2 Length=15mm, Disk2 Length=20mm και Disk2 Length=30mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk2 Length φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.40 και 4.41 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.40: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Length



Σχήμα 4.41: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk2 Length για $t=0-20\text{ns}$

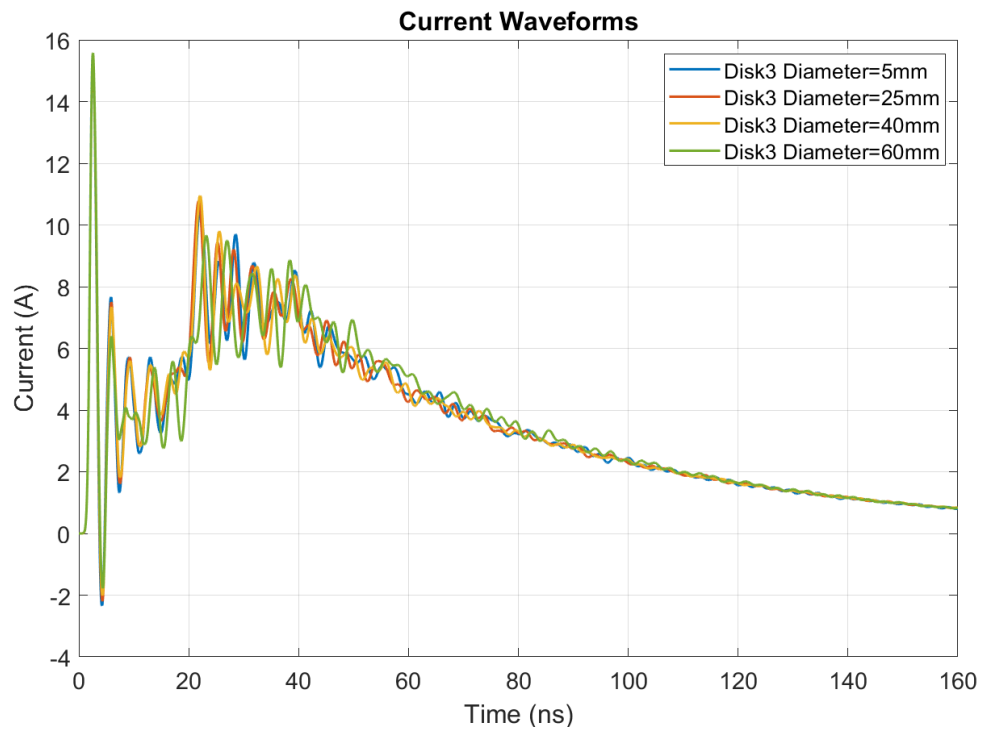
Πίνακας 4.14: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk2 Length

Disk2 Length	I _p	I _{p2}	t _r	I ₃₀	I ₆₀
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
5	14,0878	11,4919	0,7629	8,0219	4,1204
15	14,7710	9,9007	0,7711	6,0215	4,1078
20	14,9823	10,2356	0,7742	9,2264	4,7335
30	15,3328	11,5444	0,7803	7,4587	4,4869

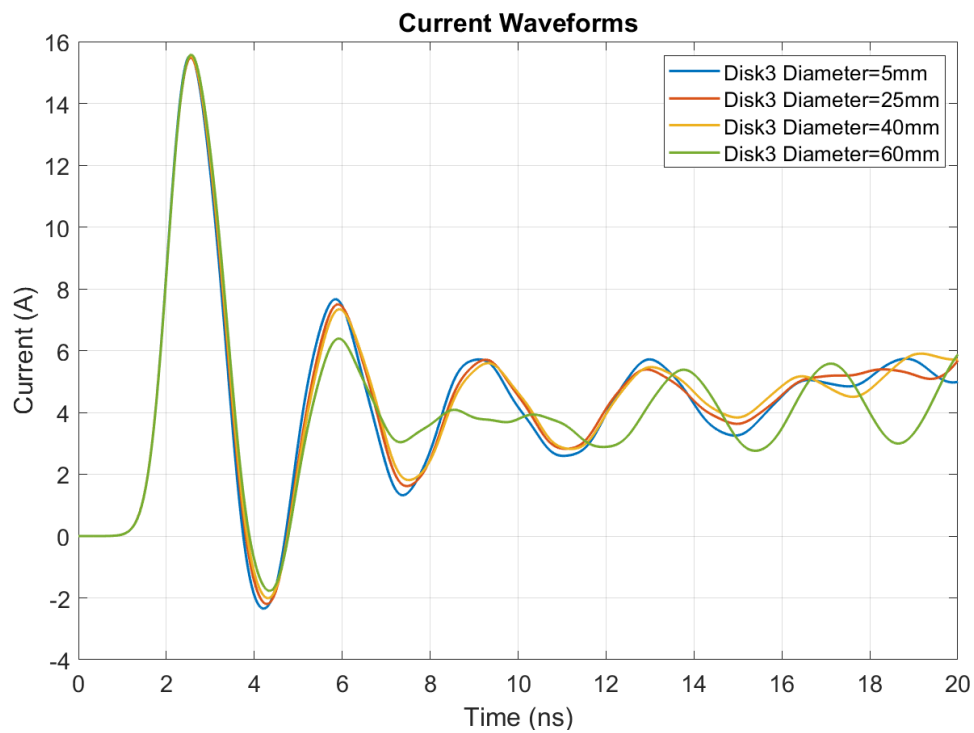
Από τα Σχήματα 4.40 και 4.41 και τον Πίνακα 4.14 παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής της Disk2 Length επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της Disk2 Length προκαλεί αύξηση της τιμής του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p και μικρή αύξηση της διάρκειας του πρώτου παλμού. Για την υπόλοιπη κυματομορφή παρατηρείται διαφοροποίηση στο πλάτος, στο πλήθος και στη διάρκεια των ταλαντώσεων, ωστόσο οι ουρές των κυματομορφών εξελίσσονται γύρω από τις ίδιες τιμές.

Παράμετρος Disk3 Diameter

Η επίδραση της παραμέτρου Disk3 Diameter μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk3 Diameter για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk3 Diameter=5mm, Disk3 Diameter=25mm, Disk3 Diameter=40mm και Disk3 Diameter=60mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk3 Diameter φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.42 και 4.43 του ρεύματος εκφόρτισης I(A) και χρόνου t(ns).



Σχήμα 4.42: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Diameter



Σχήμα 4.43: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Diameter για $t=0-20\text{ns}$

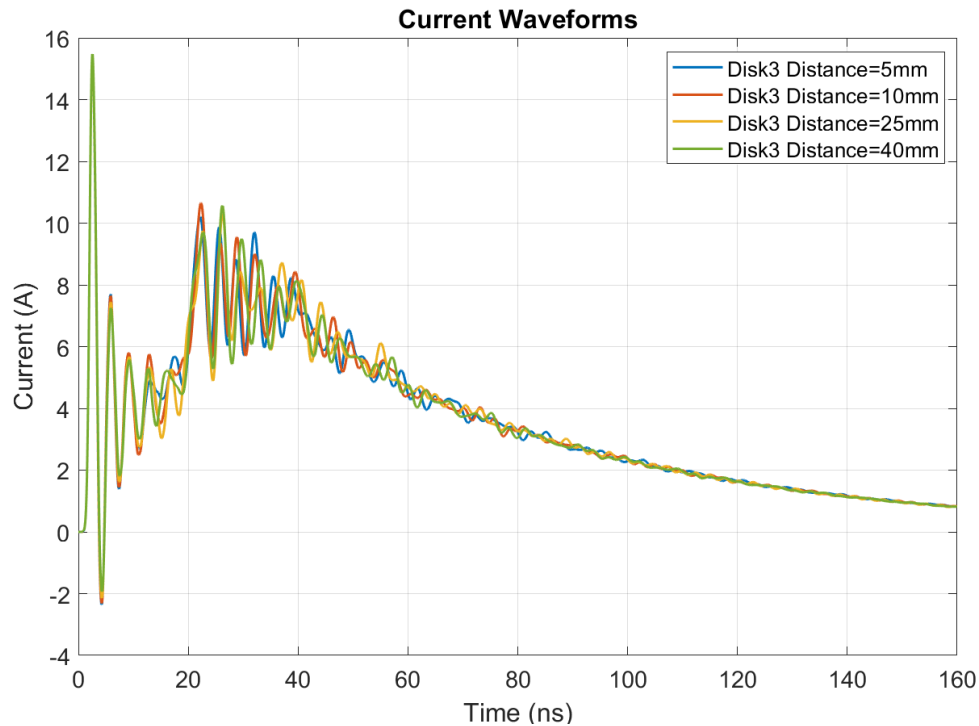
Πίνακας 4.15: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk3 Diameter

Disk3 Diameter	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
5	15,5427	10,5632	0,7761	8,5604	4,2121
25	15,4818	10,7684	0,7841	8,6732	4,6412
40	15,5320	10,9547	0,7837	7,8529	4,1927
60	15,5767	9,6565	0,7869	8,4167	4,9225

Από τα Σχήματα 4.42 και 4.43 και τον Πίνακα 4.15 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της Disk3 Diameter έχει επίδραση στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, χωρίς όμως να επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Μετά την 1^η κορυφή παρατηρείται διαφοροποίηση στο πλάτος, στο πλήθος και στη διάρκεια των ταλαντώσεων, χωρίς να εντοπίζεται κάποιο μοτίβο. Οι ουρές των κυματομορφών εξελίσσονται γύρω από τις ίδιες τιμές.

Παράμετρος Disk3 Distance

Η επίδραση της παραμέτρου Disk3 Distance μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk3 Distance για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk3 Distance=5mm, Disk3 Distance=10mm, Disk3 Distance=25mm και Disk3 Distance=40mm.** Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk3 Distance φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.44 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.44: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Distance

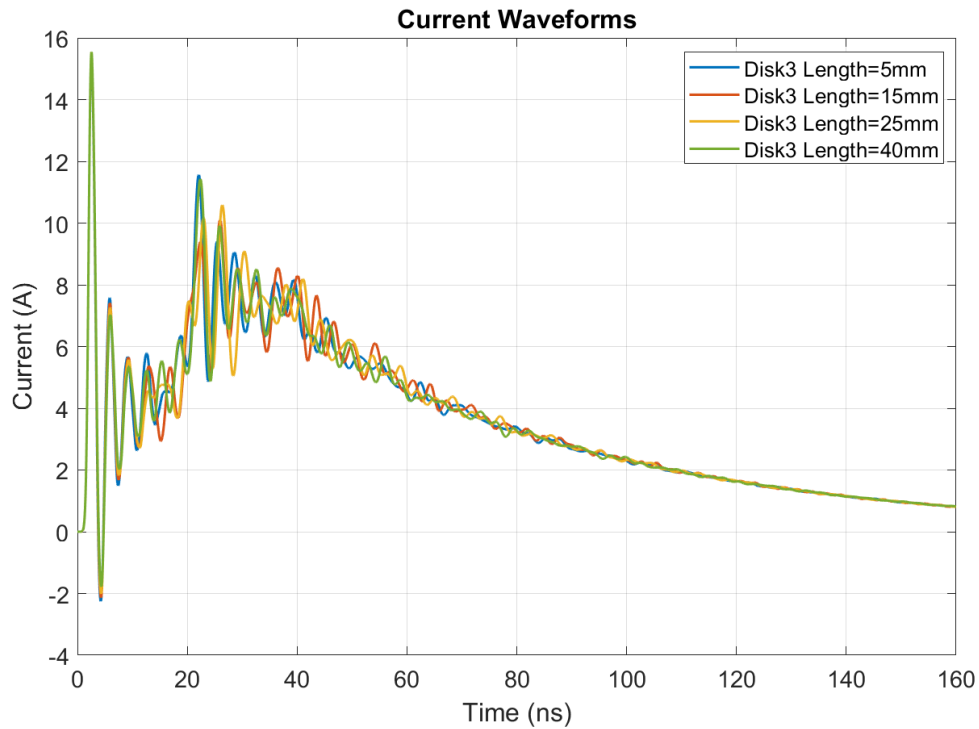
Πίνακας 4.16: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk3 Distance

Disk3 Distance	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
5	15,4123	10,2018	0,7813	8,9321	4,6261
10	15,4301	10,6515	0,7821	8,1330	4,3452
25	15,4385	10,3005	0,7825	7,1867	4,5897
40	15,4758	10,5653	0,7832	6,0725	4,0410

Από το Σχήμα 4.44 και τον Πίνακα 4.16 παρατηρείται επίδραση της μεταβολής της τιμής της Disk3 Distance, χωρίς να επηρεάζεται το ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Μετά την 1^η κορυφή και κυρίως μετά τα 15ns παρατηρείται διαφοροποίηση στο πλάτος, στο πλήθος και στη διάρκεια των ταλαντώσεων, χωρίς να εντοπίζεται κάποιο μοτίβο. Οι ουρές των κυματομορφών εξελίσσονται γύρω από τις ίδιες τιμές.

Παράμετρος Disk3 Length

Η επίδραση της παραμέτρου Disk3 Length μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Disk3 Length για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Disk3 Length=5mm, Disk3 Length=15mm, Disk3 Length=25mm και Disk3 Length=40mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Disk3 Length φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.45 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.45: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Disk3 Length

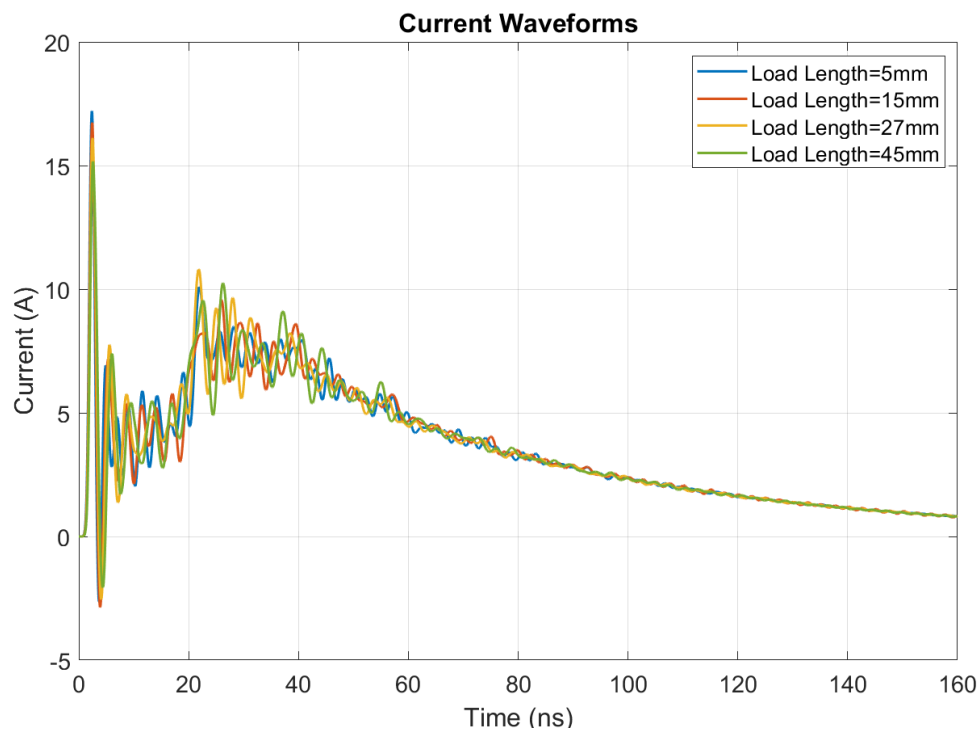
Πίνακας 4.17: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Disk3 Length

Disk3 Length	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
5	15,4191	11,5626	0,7820	7,4330	4,4687
15	15,5118	10,1031	0,7838	7,4082	4,8234
25	15,5322	10,5814	0,7845	7,4881	4,5392
40	15,5436	11,4251	0,7851	7,2849	4,3400

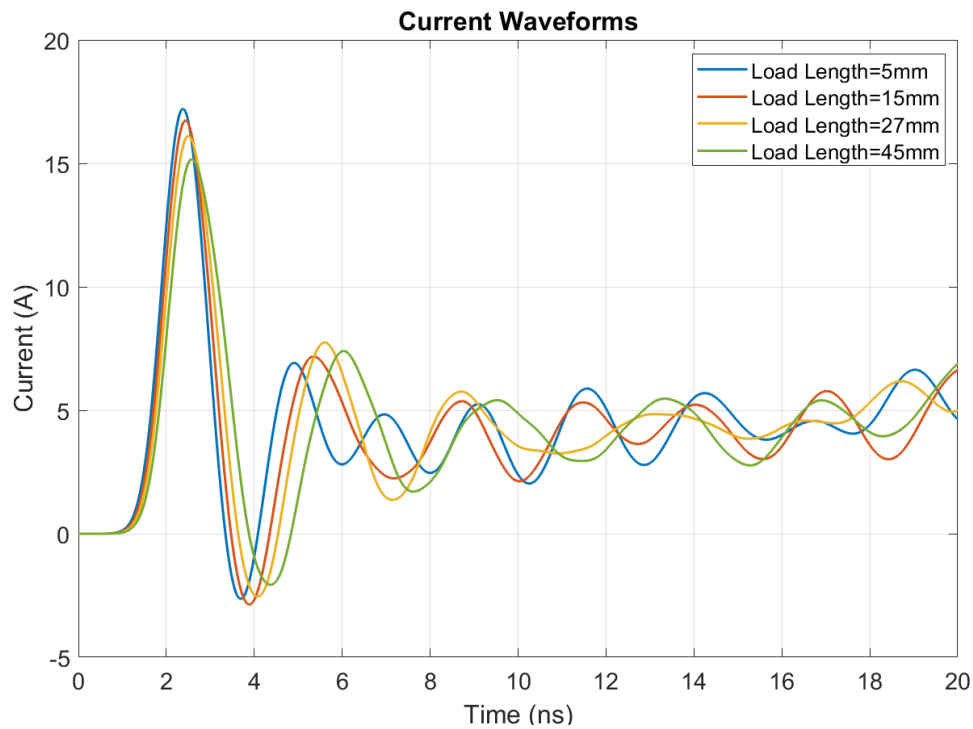
Από το Σχήμα 4.45 και τον Πίνακα 4.17 παρατηρείται εικόνα παρόμοια με αυτήν της παραμέτρου Disk3 Distance. Η μεταβολή της τιμής της Disk3 Length δεν επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p . Μετά την 1^η κορυφή και κυρίως μετά τα 15ns παρατηρείται διαφοροποίηση στο πλάτος, στο πλήθος και στη διάρκεια των ταλαντώσεων, χωρίς όμως να εντοπίζεται κάποιο μοτίβο. Οι ουρές των κυματομορφών εξελίσσονται γύρω από τις ίδιες τιμές.

Παράμετρος Load Length

Η επίδραση της παραμέτρου Load Length μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της Load Length για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **Load Length=5mm, Load Length=15mm, Load Length=27mm και Load Length=45mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της Load Length φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.46 και 4.47 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.46: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Load Length



Σχήμα 4.47: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Load Length για $t=0-20\text{ns}$

Πίνακας 4.18: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της Load Length

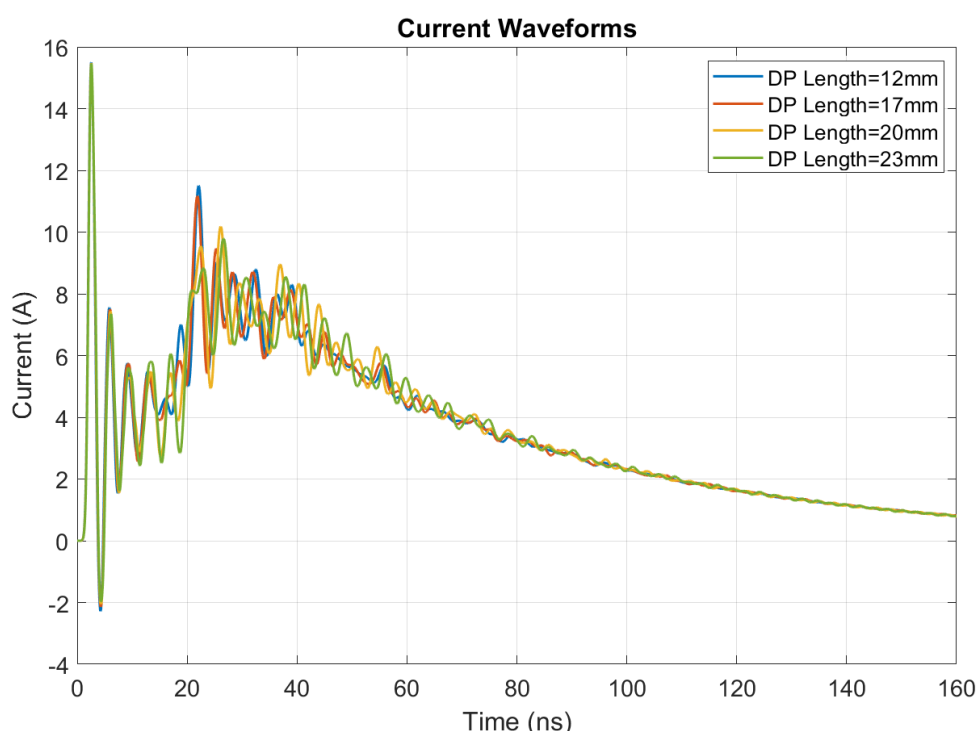
Load Length	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
5	17,2077	10,0945	0,7501	8,1079	4,1985
15	16,7370	9,634	0,7577	6,6665	4,7482
27	16,1132	10,8015	0,7697	8,7329	4,6523
45	15,1672	10,2471	0,7901	6,9555	4,7622

Από τα Σχήματα 4.46 και 4.47 και τον Πίνακα 4.18 παρατηρείται επίδραση της παραμέτρου Load Length στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Αρχικά, η αύξηση της τιμής της Load Length επιδρά πτωτικά στην τιμή του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p , ενώ η διάρκεια του πρώτου παλμού αυξάνεται. Για όλη την υπόλοιπη κυματομορφή, δεν προκύπτει κάποιο μοτίβο, καθώς το πλάτος, το πλήθος και η διάρκεια των

ταλαντώσεων διαφέρουν αρκετά, ωστόσο οι ουρές των κυματομορφών κυμαίνονται γύρω από τις ίδιες τιμές.

Παράμετρος DP Length

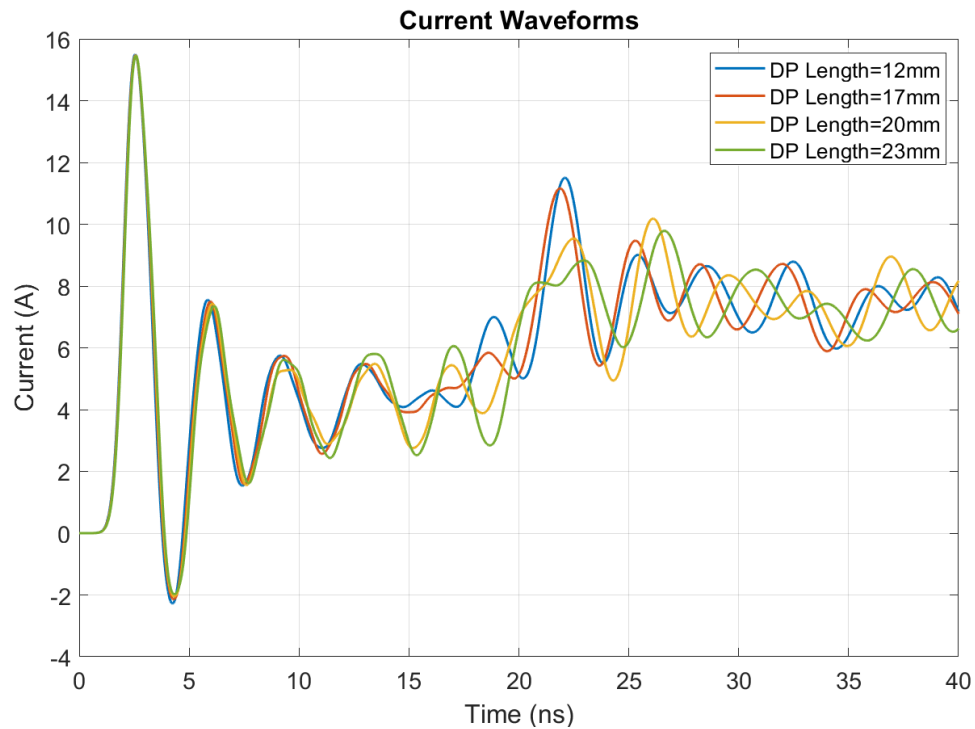
Η επίδραση της παραμέτρου DP Length μελετήθηκε για διαφορετικές τιμές της, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων. Οι τιμές της DP Length για τις οποίες «τρέξαμε» την προσομοίωση είναι οι εξής: **DP Length=12mm**, **DP Length=17mm**, **DP Length=20mm** και **DP Length=23mm**. Οι κυματομορφές που προέκυψαν για τις διαφορετικές τιμές της DP Length φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.48 και 4.49 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.48: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου DP Length

Από τα Σχήματα 4.48 και 4.49 και τον Πίνακα 4.19 παρατηρείται ότι η μεταβολή της τιμής της παραμέτρου DP Length επιδρά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει το ρεύμα της 1^{ης} κορυφής I_p . Με την αύξηση της τιμής της DP Length παρατηρείται μετατόπιση της δεύτερης κορυφής νωρίτερα στο χρόνο σε σχέση με τις μικρότερες τιμές της DP Length. Επίσης, με την αύξηση της τιμής της DP Length, η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης 2^{ης} κορυφής μεγίστου μειώνεται. Οι

ταλαντώσεις διαφέρουν ως προς το πλάτος, το πλήθος και τη διάρκειά τους και δεν προκύπτει μοτίβο.



Σχήμα 4.49: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου DP Length για $t=0-40ns$

Πίνακας 4.19: Τιμές παραμέτρων κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της DP Length

DP Length	I_p	I_{p2}	t_r	I_{30}	I_{60}
[mm]	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
12	15,4963	11,5066	0,7836	7,5129	4,6477
17	15,4728	11,1637	0,7822	8,4796	4,6138
20	15,4654	10,1819	0,7821	6,9300	4,9078
23	15,4588	9,7862	0,7819	8,0089	4,2682

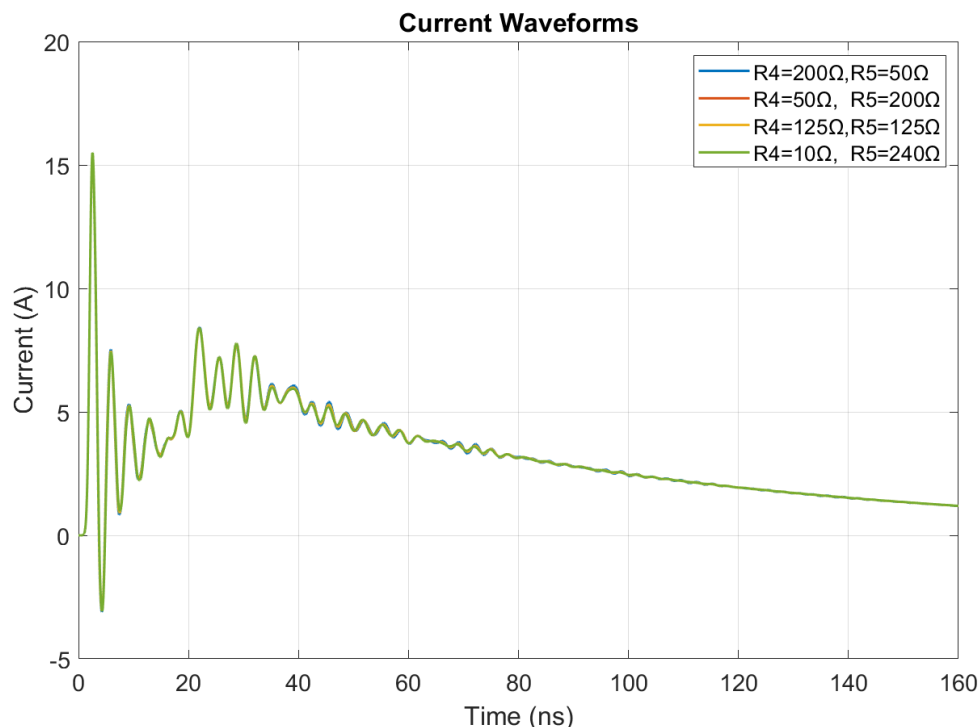
Συσχέτιση επίδρασης παραμέτρων Relement3(R3), Relement4(R4) και Relement5(R5)

Όπως παρατηρήθηκε, οι παράμετροι R3, R4 και R5 επιδρούν στο πλάτος της ταλάντωσης που δημιουργείται μετά το ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p .

Μεγαλύτερη τιμή αντίστασης στη διάταξη επιφέρει μικρότερο πλάτος, ενώ αντίστροφα μικρότερες τιμές αντίστασης αφήνουν το πλάτος να εξελιχθεί σε μεγαλύτερες τιμές.

Από τις αντιστάσεις η μοναδική αντίσταση η οποία επιδρά και στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p είναι η R3, κάτι το οποίο αποτελεί ενδιαφέρουσα παρατήρηση, καθώς για να γίνει μείωση του πλάτους μιας κυματομορφής χωρίς να αλλάξει το ρεύμα 1^{ης} κορυφής I_p , μπορούν να αλλάξουν οι τιμές των R4 και R5.

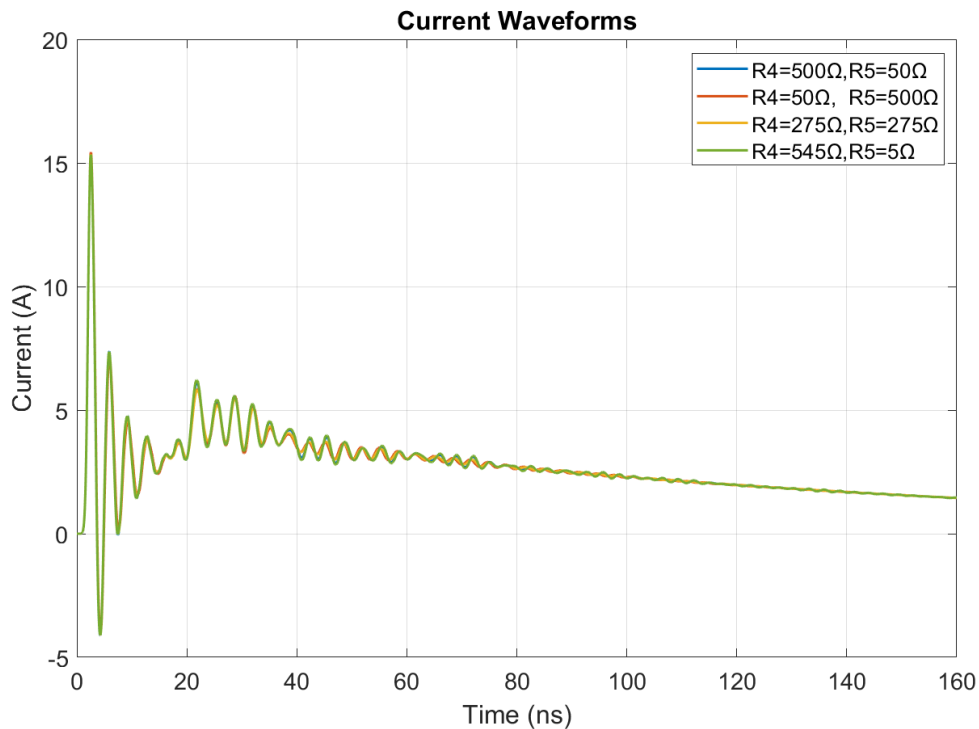
Εφόσον οι R4 και R5 επιδρούν στα πλάτη της κυματομορφής χωρίς να επηρεάζουν το I_p , προκύπτει το ερώτημα: ποια από τις δύο παραμέτρους πρέπει να αλλάξει; Παρακάτω μελετάται η συσχέτιση της επίδρασης της παραμέτρου Relement4(R4) με αυτή της παραμέτρου Relement5(R5). Στο Σχήμα 4.50 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τους συνδυασμούς R4=200Ω και R5=50Ω, R4=50Ω και R5=200Ω, R4=10Ω και R5=240Ω διατηρώντας σταθερή την υπόλοιπη διάταξη. Οι συνδυασμοί των R4 και R5 δημιουργούν το άθροισμα $R4+R5=250\Omega$.



Σχήμα 4.50: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R4+R5=250\Omega$

Στο Σχήμα 4.51 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τους συνδυασμούς R4=500Ω και R5=50Ω,

$R_4=50\Omega$ και $R_5=500\Omega$, $R_4=275\Omega$ και $R_5=275\Omega$, $R_4=545\Omega$ και $R_5=5\Omega$ διατηρώντας σταθερή την υπόλοιπη διάταξη. Οι συνδυασμοί των R_4 και R_5 δημιουργούν το άθροισμα $R_4+R_5=550\Omega$.



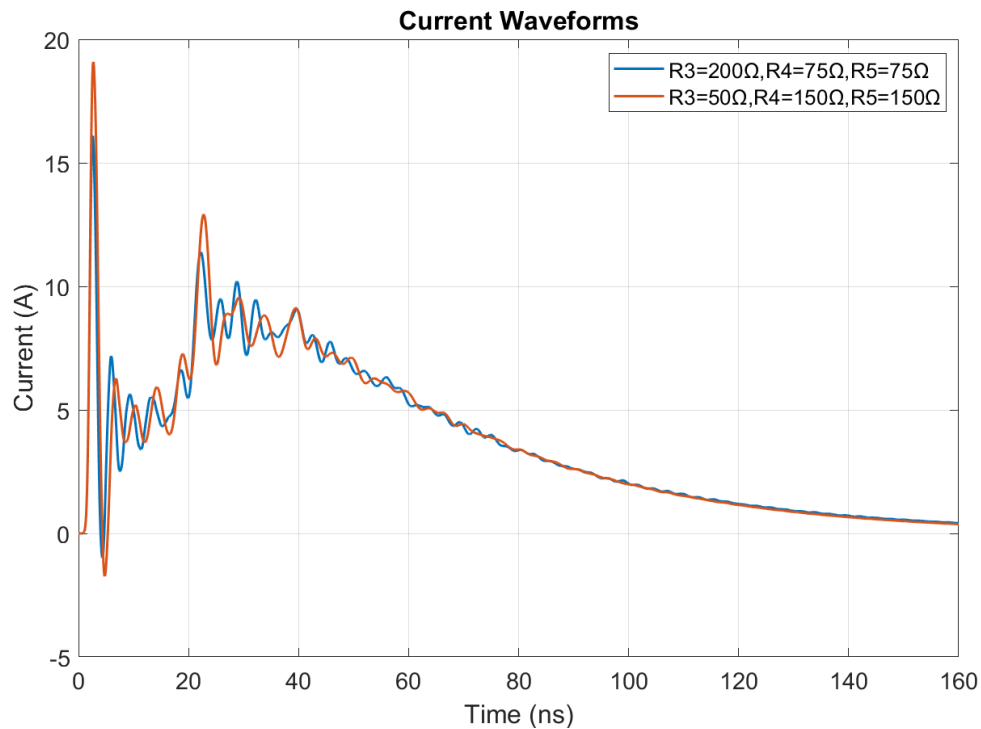
Σχήμα 4.51: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R_4+R_5=550\Omega$

Από τα Σχήματα 4.50 και 4.51 παρατηρείται ότι για το ίδιο άθροισμα αντίστασης R_4+R_5 οποιοσδήποτε συνδυασμός των R_4 και R_5 δίνει το ίδιο αποτέλεσμα. Οι κυματομορφές και στις δύο περιπτώσεις αθροισμάτων σχεδόν ταυτίζονται. Μια μικρή διαφορά που εντοπίζεται είναι ότι πριν τα 40ns για τις περιπτώσεις όπου η R_4 παίρνει μεγάλη τιμή από το κάθε άθροισμα, η κυματομορφή εμφανίζει μια μικρή μετατόπιση στο χρόνο προς τα αριστερά, ενώ μετά τα 40ns η κυματομορφή εμφανίζει μια μικρή μετατόπιση προς τα δεξιά.

Είναι δυνατόν λοιπόν, οι R_4 και R_5 να αντιμετωπίζονται ως άθροισμα το οποίο αλλάζει με οποιοδήποτε πιθανό συνδυασμό τους, έχοντας σαν παρατήρηση ότι η μεγάλη τιμή στην R_4 δημιουργεί μια μικρή μετατόπιση στην κυματομορφή.

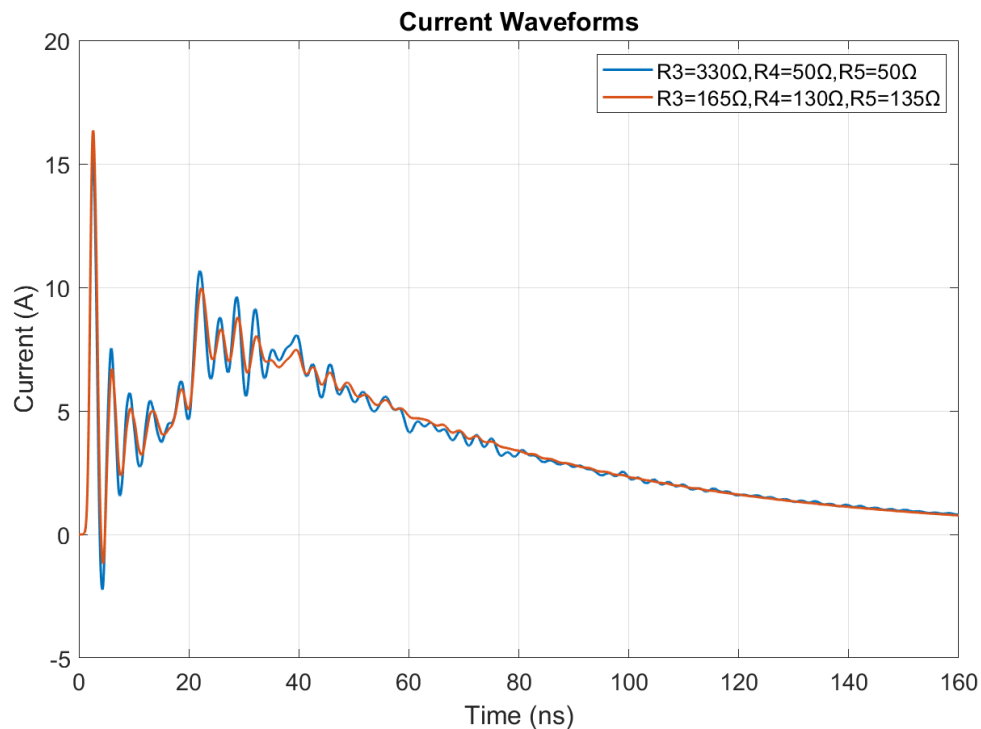
Στη συνέχεια εξετάζεται η συσχέτιση της επίδρασης των παραμέτρων Relement4(R_4) και Relement5(R_5) με αυτήν της Relement3(R_3). Στο Σχήμα 4.52 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τους

συνδυασμούς $R_3=200\Omega$, $R_4=75\Omega$, $R_5=75\Omega$ και $R_3=50\Omega$, $R_4=150\Omega$, $R_5=150\Omega$, διατηρώντας σταθερή την υπόλοιπη διάταξη. Το άθροισμα των αντιστάσεων σε αυτή την περίπτωση είναι $R_3+R_4+R_5= 350\Omega$.



Σχήμα 4.52: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R_3+R_4+R_5=350\Omega$

Στο Σχήμα 4.53 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τους συνδυασμούς $R_3=330\Omega$, $R_4=200\Omega$, $R_5=50\Omega$ και $R_3=165\Omega$, $R_4=130\Omega$, $R_5=135\Omega$, διατηρώντας σταθερή την υπόλοιπη διάταξη. Το άθροισμα των αντιστάσεων σε αυτή την περίπτωση είναι $R_3+R_4+R_5= 430\Omega$.



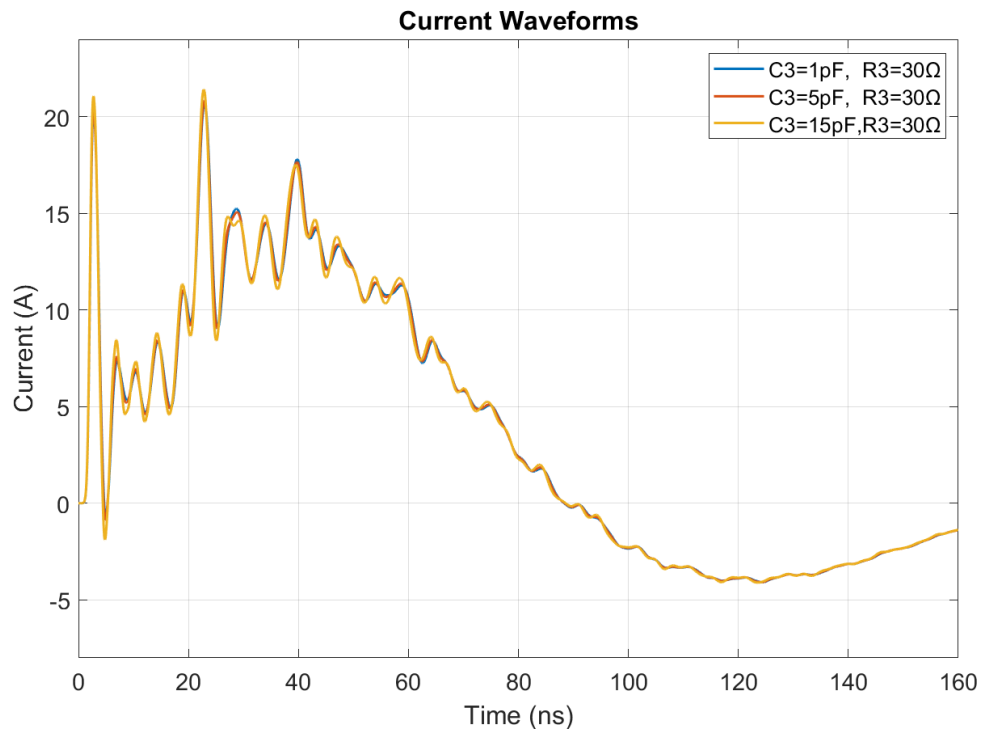
Σχήμα 4.53: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για άθροισμα παραμέτρων $R3+R4+R5=430\Omega$

Εφόσον οι R3, R4 και R5 επιδρούν στα πλάτη των κυματομορφών, αλλά μόνο η R3 επηρεάζει το ρεύμα εκφόρτισης 1^{ης} κορυφής I_p , θα αναμενόταν ότι, σε αντιστοιχία με τις R4 και R5, οι κυματομορφές για το ίδιο άθροισμα των R3, R4 και R5 θα ταυτίζονται, εκτός από το I_p και με μία μετατόπιση προς τα δεξιά για την περίπτωση όπου η R3 έχει τη μικρότερη τιμή της. Ωστόσο, από τις κυματομορφές των Σχημάτων 4.52 και 4.53 παρατηρούνται ορισμένες διαφορές. Όντως, η τιμή του ρεύματος 1^{ης} κορυφής I_p είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση όπου η R3 έχει τη μικρότερη τιμή της, και στα δύο αθροίσματα, και όντως σε αυτές τις περιπτώσεις η διάρκεια του ρεύματος 1^{ης} κορυφής είναι μεγαλύτερη, κάτι που τις κάνει να είναι μετατοπισμένες λίγο προς τα δεξιά. Μια αξιοσημείωτη διαφορά, επιπλέον, είναι ότι και στα δύο αθροίσματα, αμέσως μετά τον πρώτο παλμό, η ταλάντωση είναι μεγαλύτερη όταν η R3 παίρνει μεγαλύτερη τιμή. Αυτό οδηγεί στην υπόθεση ότι η R3 επηρεάζεται από την τιμή κάποιας άλλης παραμέτρου.

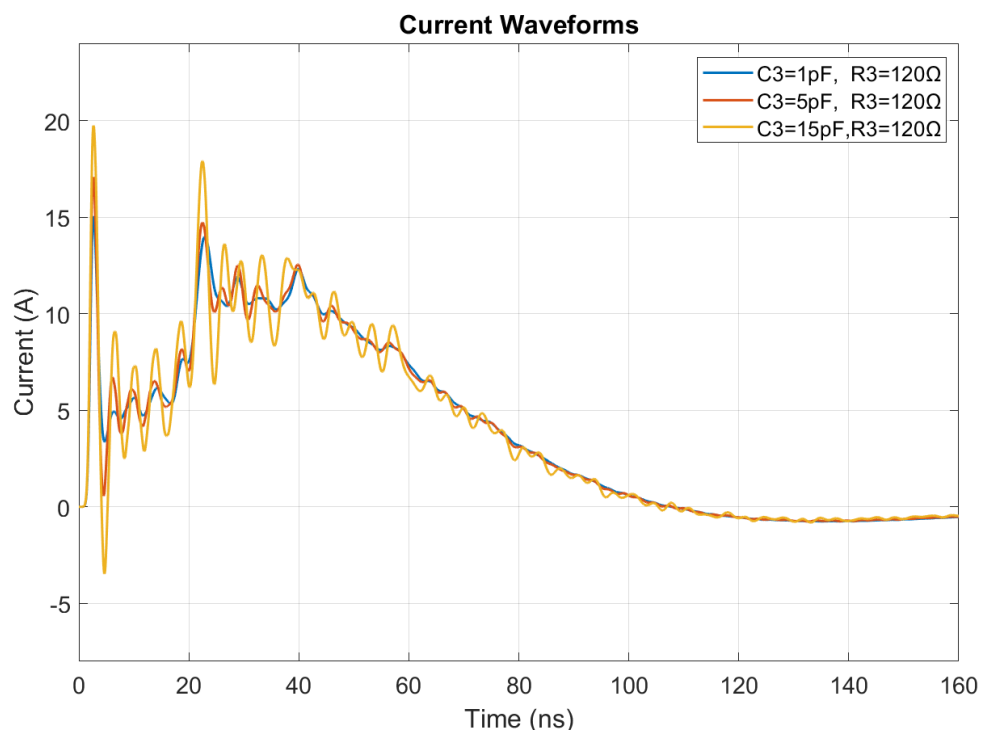
Συσχέτιση επίδρασης παραμέτρων Celement3 και Relement3(R3)

Μελετάται η αλληλεπίδραση μεταξύ της παραμέτρου Celement3(C3) σε σχέση με την παράμετρο Relement3(R3). Για το σκοπό αυτό «τρέξαμε» την προσομοίωση για

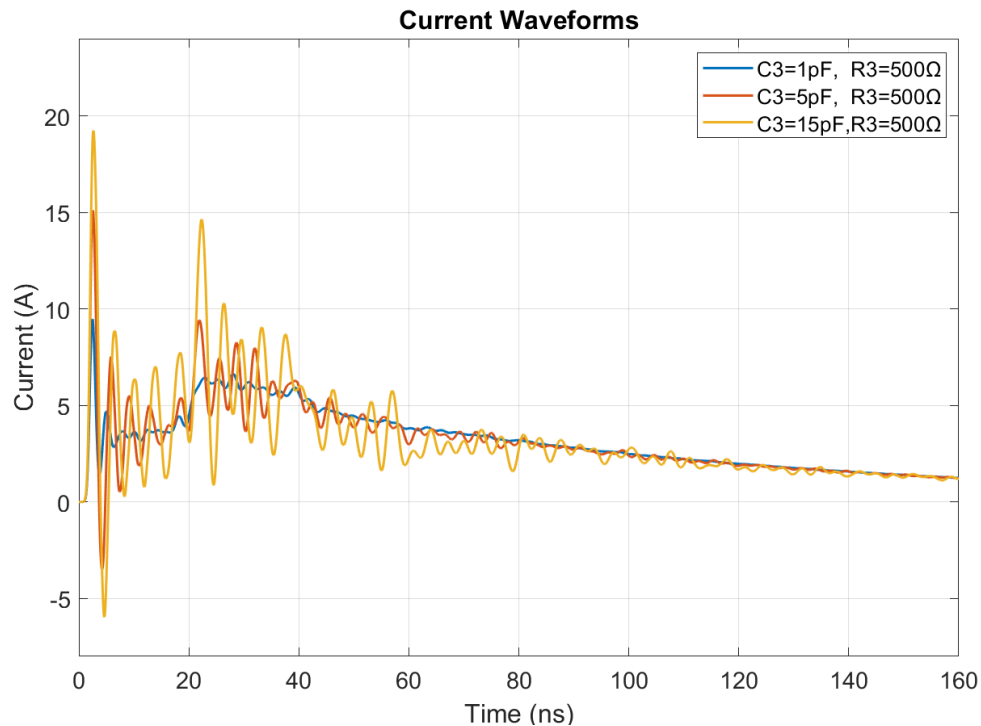
συνδυασμούς των $C3$ και $R3$ και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.54, 4.55 και 4.56 του ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$.



Σχήμα 4.54: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $C3$ συναρτήσει της παραμέτρου $R3=30\Omega$



Σχήμα 4.55: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $C3$ συναρτήσει της παραμέτρου $R3=120\Omega$



Σχήμα 4.56: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου C3 συναρτήσει της παραμέτρου R3=500Ω

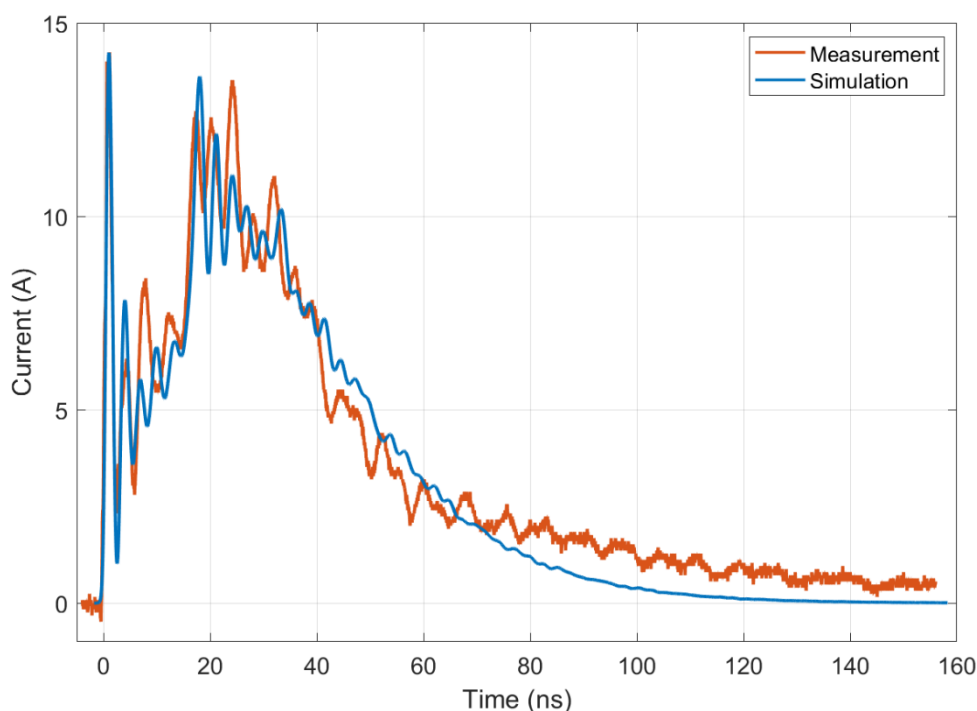
Από τα Σχήματα 4.54, 4.55 και 4.56 είναι εμφανές ότι όσα έχουν παρατηρηθεί έως τώρα για τις C3 και R3 ισχύουν. Πιο συγκεκριμένα, η C3 επιδρά στη διάρκεια και το πλάτος των ταλαντώσεων, καθώς και στο ρεύμα εκφόρτισης 1^{ης} κορυφής I_p , αφού η αύξηση της τιμής της προκαλεί αύξηση της τιμής του I_p και μεγαλύτερη ταλάντωση στην κυματομορφή. Επίσης, η R3 επιδρά στο ρεύμα εκφόρτισης 1^{ης} κορυφής I_p και στα πλάτη της ημιτονοειδούς καμπύλης που σχηματίζεται μετά από αυτό.

Η πρόσθετη παρατήρηση που λαμβάνεται είναι ότι η ταλάντωση που δημιουργείται στις κυματομορφές επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το συνδυασμό των C3 και R3. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της R3, τόσο πιο ευαίσθητη είναι στις μεταβολές της τιμής της C3. Στο Σχήμα 4.54, όπου R3=30Ω, υπάρχει μια μικρή ταλάντωση στις τρεις κυματομορφές όσο το C3 αυξάνεται, οριακά ορατή. Στο Σχήμα 4.55, όπου R3=120Ω, η ταλάντωση που δημιουργείται όσο το C3 αυξάνεται είναι περισσότερο εμφανής, ενώ στο Σχήμα 4.56, όπου R3=500Ω, η ταλάντωση είναι ιδιαίτερα έντονη. Αντίστοιχα, το ίδιο μοτίβο παρατηρείται για το ρεύμα εκφόρτισης 1^{ης} κορυφής I_p .

4.4 Αναπαραγωγή κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης από μετρημένη κυματομορφή της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Dito

Έπειτα από τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της προσομοίωσης στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, έγινε χρήση των παρατηρήσεων για τη δημιουργία ενός μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό το μοντέλο δημιουργήθηκε με τις κατάλληλες παραμέτρους, ώστε η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης του να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας Dito, η οποία μετρήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο Σχήμα 4.57 ρεύματος εκφόρτισης $I(A)$ και χρόνου $t(ns)$, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της μετρημένης στο εργαστήριο κυματομορφής με την προσομοιωμένη κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης.



Σχήμα 4.57: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης μετρημένης στο εργαστήριο της γεννήτριας ESD Dito και μοντέλου προσομοίωσης γεννήτριας

Στον Πίνακα 4.20 φαίνονται οι παράμετροι της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης που έχει προκύψει από τις μετρήσεις του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τη γεννήτρια Dito και της κυματομορφής από το προσομοιωμένο μοντέλο γεννήτριας.

Πίνακας 4.20: Σύγκριση παραμέτρων της μετρημένης κυματομορφής της γεννήτριας Dito με την προσομοιωμένη στο CST Studio Suite κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης

Γεννήτρια ESD	I_p	I_{p2}	t_r	I₃₀	I₆₀
	[A]	[A]	[ns]	[A]	[A]
Dito	14,2400	13,5200	0,8536	8,6196	3,1796
Μοντέλο προσομοί- ωσης	14,2316	13,6144	0,8590	9,6251	3,1472

Από το Σχήμα 4.57 και τον Πίνακα 4.20 παρατηρείται πολύ καλή αντιστοιχία μεταξύ της μετρημένης και της προσομοιωμένης κυματομορφής, όσον αφορά τις παραμέτρους της κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης. Συγκεκριμένα το ρεύμα εκφόρτισης 1^{ης} κορυφής I_p παρουσιάζει απόκλιση μικρότερη του 0,06%, το ρεύμα I_{p2} 0,70%, ο χρόνος ανόδου t_r 0,63%, το ρεύμα I₃₀ 11,67% και το ρεύμα I₆₀ 1,02%. Ωστόσο, το κουδούνισμα που υπάρχει στην μετρημένη κυματομορφή της γεννήτριας Dito, δεν έχει αποτυπωθεί σε μεγάλο βαθμό σε αυτή του προσομοιωμένου μοντέλου. Ο 3^{ος} παλμός της μετρημένης κυματομορφής δεν παρήχθη σε κανένα συνδυασμό παραμέτρων της προσομοίωσης, καθώς επίσης το ίδιο συνέβη και με το κουδούνισμα που εμφανίζεται στην ουρά της μετρημένης κυματομορφής. Με αυτές τις παρατηρήσεις τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, για την παραγωγή ενός αποτελεσματικού και γρήγορου μοντέλου προσομοίωσης της γεννήτριας ESD Dito, γίνονται αποδεκτά.

Κεφάλαιο 5 : Σύνοψη – Συμπεράσματα – Επόμενη ημέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια παραμετροποίησης ενός τρισδιάστατου μοντέλου γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, μέσω της μελέτης της επίδρασης που έχουν οι επιμέρους παράμετροι του μοντέλου στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Τα μοντέλα γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD), που διατίθενται στο εμπόριο από διάφορους κατασκευαστές, παρουσιάζουν διαφορές στα χαρακτηριστικά τους και στις κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης. Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης, ικανό να προσομοιώνει πλήθος τέτοιων γεννητριών ESD με αλλαγή των τιμών των παραμέτρων του, έχει απασχολήσει τα τελευταία χρόνια πλήθος ερευνητών. Ένα τέτοιο μοντέλο προσομοίωσης θα μπορούσε να εξοικονομήσει πολύτιμο χρόνο δοκιμών, αλλά και κόστος αφού δε θα ήταν απαραίτητη η αγορά κάθε εμπορικού μοντέλου γεννήτριας ESD από τα εργαστήρια για τις δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Έγινε λεπτομερής παρουσίαση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, των τρόπων με τους οποίους εμφανίζεται και τις συνέπειες που μπορεί να έχει στις ηλεκτρονικές συσκευές και τα συστήματά τους. Επίσης, παρουσιάστηκαν οι δύο τελευταίες εκδόσεις του Προτύπου IEC 61000-4-2 (Ed 2.0 και Ed 3.0(Draft)) σύμφωνα με το οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και διακριβώνονται οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Επιπλέον, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση σε διεθνή έρευνα σχετικά με τα μοντέλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς για την προσομοίωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του προσομοιωμένου μοντέλου γεννήτριας ESD έδειξε ότι υπάρχουν παράμετροι που επιδρούν στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης και πιο συγκεκριμένα στο ρεύμα εκφόρτισης 1^{ης} κορυφής, στο συνολικό πλάτος της κυματομορφής ή στη διάρκεια και το πλήθος των ταλαντώσεων. Σημαντική κρίνεται η παρατήρηση που αφορά στο καλώδιο γείωσης, καθώς η αύξηση της διατομής του προκαλεί σημαντική μετατόπιση της δεύτερη κορυφής μεγίστου νωρίτερα στο χρόνο, λόγω της μείωσης της αυτεπαγωγής του, χωρίς όμως να επιδρά στο ρεύμα 1^{ης} κορυφής. Αν και το σύνολο των παρατηρήσεων δείχνει έντονη επίδραση των παραμέτρων στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, δεν μπορεί να προκύψει ένα συγκεκριμένο

μοτίβο, το οποίο θα εξυπηρετεί τη δημιουργία του παραμετροποιημένου τρισδιάστατου μοντέλου που θα μπορεί να προσομοιώσει πλήθος γεννητριών.

Για την αναπαραγωγή της μετρημένης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης της γεννήτριας ESD Dito, το προσομοιωμένο μοντέλο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η παραμετροποίησή του οδήγησε στην κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης της οποίας οι παράμετροι είναι αρκετά κοντά σε αυτές της μετρημένης. Είναι εμφανές λοιπόν, ότι οι παρατηρήσεις που έγιναν λειτούργησαν για τη συγκεκριμένη γεννήτρια, αλλά δεν μπορούν να εφαρμοστούν για οποιαδήποτε άλλη, χωρίς να απαιτηθεί η επανάληψη της όλης μεθοδολογίας.

Τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας δύναται να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες έρευνες που αφορούν την προσομοίωση τρισδιάστατων μοντέλων γεννητριών ESD. Μια προέκταση της θα μπορούσε να είναι η περαιτέρω διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων της προσομοίωσης και το πως αυτή αποτυπώνεται στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Αντικείμενο μελλοντικής έρευνας μπορεί να αποτελέσει, επίσης, η διερεύνηση τρόπων διαμόρφωσης του μοντέλου, πιθανώς με τροποποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του και/ή εισαγωγή διαφορετικών στοιχείων με στόχο την προσομοίωση και άλλων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) – Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1992
- [2] ANSI C63.14 – 1998, “Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)”.
- [3] Henry W.OTT, “Electromagnetic Compatibility Engineering”, John Wiley & Sons Inc. Publication, August 2009.
- [4] Victor Oyedu, “Electromagnetic Compatibility (EMC) – The Fundamentals”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://afrienergyonline.com/electromagnetic-compatibility-emc-the-fundamentals/>
- [5] Clayton R. Paul, “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, John Wiley & Sons Inc. Publication, Second Edition, 2009
- [6] Learn EMC, “Introduction to EMC”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://learnemc.com/introduction-to-emc>
- [7] Steven McFadyen, “Electromagnetic Compatibility (EMC)”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://myelectrical.com/notes/entryid/196/electromagnetic-compatibility-emc>
- [8] Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης, “Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε τηλεπικοινωνιακές θύρες”, Διπλωματική Εργασία, Μάρτιος 2013, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [9] “Protection against ESD”, August 2019, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://blog.win-source.net/tutorials/protection-against-esd/>
- [10] EMC Directory, “What is Electromagnetic Pulse (EMP)”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.emc-directory.com/community/what-is-electromagnetic-pulse-emp>
- [11] Surgeprotection, “How Lightning affects Electronics”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://surgeprotection.co.za/how-lightning-affects-electronics>
- [12] “Tempest” διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.aysamaks.com/en/bilgi-bankasi/tempest/>
- [13] Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.geeksforgeeks.org/charging-by-induction/>
- [14] Παύλος Σ. Κατσιβέλης, “ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ”, Διδακτορική Διατριβή, Νοέμβριος 2011, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ

- [15] Αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.vecteezy.com/vector-art/6212194-diagram-showing-static-electricity-experiment>
- [16] Samuel J. Ling, William Moebs, Jeff Sanny, “University Physics Volume 2”, September 2016, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://pressbooks.online.ucf.edu/osuniversityphysics2/chapter/conductors-insulators-and-charging-by-induction/>
- [17] Teseq, “Transient Immunity Testing, Handy Guide”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.unittest.com/pdf/Transient_immunity_testing_e.pdf
- [18] Theodore Dangelmayer, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [19] Niels Johassen, “Explosions and ESD”, αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: www.ce-mag.com/archive/1999/novdec/mrstatic.html.
- [20] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.
- [21] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems”, αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpaper/sfowler/esd97/esd97.html>.
- [22] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, “Dielectric characteristics of materials - Electrostatic Discharge”, November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>.
- [23] RENESAS, “Understanding the Differences in ESD Device-Level Testing”, Technical Brief, May 2022, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.renesas.com/en/document/tcb/r70tb0002-understanding-differences-esd-device-level-testing>
- [24] Academy of EMC, “EMC Standards”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.academyofemc.com/emc-standards>
- [25] Jawad Yousaf, Myeongkoo Park, Hosang Lee, Jinsung Youn, Daehee Lee, Chanseok Hwang and Wansoo Nah, “Efficient Circuit and an EM Model of an Electrostatic Discharge Generator”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 60, NO. 4, August 2018
- [26] LISUN GROUP, “How ESD Simulator Gun Work and Why They are Important”, June 2023, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.lisungroup.com/news/technology-news/how-esd-simulator-gun-work-and-why-theyre->

important.html?srsltid=AfmBOoo9qGaRAIiliR7lBPXZ6jm_rL1XEI8mnGIWVtBtT4JkGq-pwVS5

- [27] IEC 61000-4-2 Ed2.0: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2008
- [28] Αρχεία διαθέσιμα στη διεύθυνση: <https://theemcshop.com/application-test-type/conducted-immunity/electrostatic-discharge-immunity-test/>
- [29] IEC 61000-4-2 Ed3.0: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test – Committee Draft”, 2023
- [30] Χαράλαμπος Κ. Κωνσταντίνου, “Διακρίβωση εξοπλισμού και οδηγός διενέργειας δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας”, Διπλωματική Εργασία, Μάιος 2012, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ
- [31] IEEE, “Human-metal electrostatic discharge in the IEC, ANSI and MIL standards — Frequency considerations”, 10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, September 2011
- [32] David Pommerenke, Jun Fan and Jim Drewniak, “Simulation Challenges in System Level Electrostatic Discharge Modeling”, 2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES), March 2016
- [33] Spartaco Coniggia, Francescaromana Maradei, “Circuit and Numerical Modeling of Electrostatic Discharge Generators”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 42, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2006
- [34] Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-2: Testing and Measurements Techniques – Section 2: Electrostatic Discharge (ESD) Immunity Test, 77B/491/CD, IEC-EN 61000-4-2, Dec 9, 2005
- [35] Cai Qing, Jayong Koo, Argha Nandy, David Pommerenke, Jong Sung Lee and Byong Su Seol, “Advanced full wave ESD generator model for system level coupling simulation”, 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2008
- [36] F. Centola, D. Pommerenke, K. Wang, T. V. Doren and S. Caniggia, “ESD excitation model for susceptibility study”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol.1, pp.58-63. 18-22 Aug. 2003

- [37] Dazhao Liu, Argha Nandy, David Pommerenke, Soon Jae Kwon and Ki Hyuk Kim, “Full Wave Model for simulating a Noiseken ESD Generator”, 2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, August 2009
- [38] Λογισμικό διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [39] Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Thomas Van Doren, James L. Drewniak and A.Shashindranath, “Numerical Modelling of Electrostatic Discharge Generators”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45 no. 2, pp. 258-271, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), May 2003.