



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παύλου Σ. Κατσιβέλη

Επιβλέπων: Καθηγητής Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Αθήνα, Νοέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

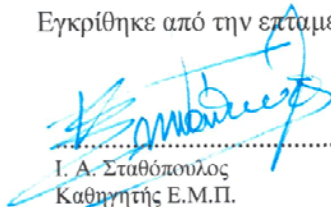
Παύλου Σ. Κατσιβέλη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ι. Α. Σταθόπουλος

Τ. Γ. Κουσιουρής

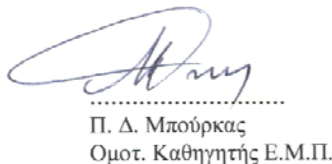
Φ. Β. Τοπαλής

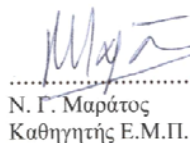
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 22^α Νοεμβρίου 2011.

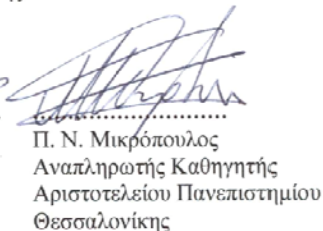

.....
Ι. Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

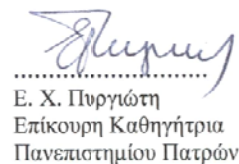

.....
Τ. Γ. Κουσιουρής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Φ. Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Π. Α. Μπούρκας
Ομοτ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Ν. Γ. Μαράτος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Π. Ν. Μικρόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Αριστοτελείου Πανεπιστημίου
Θεσσαλονίκης


.....
Ε. Χ. Πυργιώτη
Επίκουρη Καθηγήτρια
Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....

Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παύλος Σ. Κατσιβέλης, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη μελέτη του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, στην ανάδειξη των λιγότερο φωτισμένων και φτωχότερα μετρημένων παραμέτρων του, μέσω πειραμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - γειωμένου μετάλλου, στην κριτική και βελτίωση των μαθηματικών εκφράσεων για το ρεύμα εκφόρτισης, με αναφορά σε πειραματικά δεδομένα, με εφαρμογή μεθόδων, που αναπτύχθηκαν και στη σύνθεση παθητικών κυκλωμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Οι μετρήσεις μας κατέδειξαν ότι, ο χρόνος ανόδου του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορεί να είναι, όχι μόνο πολύ μικρότερος από αυτόν, που ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2:2009 (ειδικά για πολύ χαμηλές τάσεις φόρτισης), αλλά και μικρότερος από ευρήματα άλλων ερευνητών. Οι παράμετροι του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχουν, εν γένει, διαφορετικές τιμές από αυτές που ορίζονται στο ίδιο Πρότυπο, ενώ ακόμα και η συμπεριφορά τους, για διαφορετικές τάσεις φόρτισης, είναι διαφορετική, από αυτήν που περιγράφεται στο Πρότυπο, η προσέγγιση του οποίου στο φαινόμενο είναι, μάλλον, αρκετά θεωρητική και γενική, αρκούμενη στην επέκταση κάποιων παρατηρήσεων, που έχουν γίνει για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, στο σύνολο του φαινομένου.

Παρουσιάζεται μια μέθοδος για την αξιολόγηση των μετρήσεων των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης, που αναπτύχθηκε, μέσω υπολογισμού αβεβαιοτήτων.

Περαιτέρω, άλλες μετρήσεις διερευνούν τη συμπεριφορά χαρακτηριστικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης, συναρτήσεως των διαφόρων ταχυτήτων προσέγγισης του φορτισμένου ανθρώπου προς το μεταλλικό γειωμένο στόχο.

Αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες αναπτύχθηκαν εξ ολοκλήρου στο πλαίσιο της διατριβής και άλλες, που τροποποιήθηκαν, ειδικά για τις ανάγκες της, απέδωσαν βελτιωμένες μαθηματικές περιγραφές για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σε αντιστοιχία με αυτήν του Προτύπου, και νέες εκφράσεις, υπό τη μορφή αθροίσματος εκθετικών συναρτήσεων, με αναφορά στα πειραματικά μας δεδομένα.

Παρουσιάζονται, τέλος, μέθοδοι σύνθεσης δικτύων, που παράγουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενεργητικών και παθητικών, με αναφορά στις καμπύλες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Προτύπου, των εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και των πειραματικών δεδομένων εκφόρτισης ανθρώπου σε μέταλλο. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στην παρουσίαση των παθητικών κυκλωμάτων, που δίνουν το ρεύμα το παραγόμενο από ανθρώπινα σώματα, όπως αυτό μετρήθηκε στα πειράματά μας, υπό διάφορες τάσεις φόρτισης.

Λέξεις Κλειδιά

Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση, Πρότυπο IEC 61000-4-2, Ρεύμα Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης, Μετρήσεις Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης Ανθρώπου-Μετάλλου, Τόξο Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης, Γενετικός Αλγόριθμος, Μέθοδος Ανάκτησης Κρουστικής Απόκρισης, Σύνθεση Δικτύων, Προγραμματιστικό Περιβάλλον Matlab, Προσομοίωση

ABSTRACT

The aim of this PhD thesis is to focus on the study of the electrostatic discharge current, and to highlight the less known and more poorly measured parameters through human-to-metal electrostatic discharge experiments. This thesis also aims at the critique and improvement of the mathematical expressions of the discharge current via methods developed by the author, with real experiments data reference. Finally, the synthesis of passive circuits generating the current measured in real electrostatic discharge experiments is a main goal.

The measurements of this thesis show that the rise time of the electrostatic discharge can be, not only much smaller than the one defined in the IEC 61000-4-2 Standard (especially for very small charging voltages), but also, smaller from the findings of other researchers. In general, the parameters of the electrostatic discharge current present different values than the ones defined in the Standard, while their behavior, regarding different charging voltages, is also different from the Standard's, which approaches the phenomenon in a rather theoretical and general manner. What is arbitrary enough is that, certain observations made on the electrostatic discharge current under specific conditions are expanded, in the same Standard, to present definitions for the whole phenomenon.

A method was developed for the evaluation of the discharge current parameters based on the calculation of the uncertainties.

Additional measurements under different approaching speeds are carried-out, and presented. The behavior of important electrostatic discharge current parameters versus speed and arc length is examined and presented.

Numerical methods, that were developed in this thesis from scratch and others, that were modified specially for its needs, resulted in improved mathematical expressions, corresponding to the mathematical expression of the Standard. Also, new expressions under the form of series of exponentials are found, with experimental data reference.

Both passive and active circuit synthesis methods, producing the electrostatic discharge current, are presented. They use IEC Standard's current waveform, commercial electrostatic discharge current waveform and experimental real human-to-metal discharge data reference. The presentation of passive circuits that produce the current of human discharge, as measured in our experiments, is emphasized.

Key Words

Electrostatic Discharge, IEC 61000-4-2 Standard, Electrostatic Discharge Current, Human-to-Metal Electrostatic Discharge Measurements, Electrostatic Discharge Arc, Genetic Algorithm, Impulse Response Recovery Method, Circuit Synthesis, Matlab Programming Environment, Simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη – Λέξεις κλειδιά.....	i
Abstract – Key words.....	ii
Περιεχόμενα.....	iii
Πρόλογος	ix

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή..... 1

1.1. Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα - ορισμοί.....	1
1.2. Η ηλεκτροστατική φόρτιση του ανθρώπινου σώματος	4
1.3. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic Discharge - ESD)	6
1.3.1 Γενικά.....	6
1.3.2 Δημιουργία της ηλεκτροστατικής φόρτισης στα διάφορα υλικά.....	7
1.4. Οι επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό.....	9
1.5. Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.....	11
1.5.1 Γενικά.....	11
1.5.2 Το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model – HBM)	13
1.5.3 Το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM).....	15
1.5.4 Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM).....	16
1.6. Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά το Πρότυπο 61000-4-2	16

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... 19

2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Προσομοιώσεις	20
2.3 Μετρήσεις	27
2.3.1 Προσομοιωτές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	27
2.3.2 Πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	34

2.4	Κυκλωματικά μοντέλα.....	43
2.4.1	Κυκλωματικό μοντέλο του Προτύπου.....	43
2.4.2	Κυκλωματικά μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρία.....	44
Κεφάλαιο 3: Εξοπλισμός και διατάξεις		53
3.1.	Εισαγωγή.....	53
3.2.	Ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τις δοκιμές ατρωσίας έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.....	53
3.2.1.	Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	54
3.2.1.1.	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433.....	54
3.2.1.2.	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438	55
3.2.1.3.	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων Dito	57
3.2.1.4.	Σύγκριση διαθέσιμων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	57
3.2.2.	Ομοαξονικοί προσαρμοστές μέτρησης	59
3.2.3.	Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.....	59
3.2.4.	Εξασθενητής.....	60
3.2.5.	Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B	60
3.2.6.	Υπολογισμός του ρεύματος.....	61
3.3.	Συμπλήρωση και αναβάθμιση εξοπλισμού – Περιγραφή πειραματικών διατάξεων.....	62
3.3.1.	Παραγωγή ρεύματος πραγματικής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος	62
3.3.1.1.	Γεννήτρια φόρτισης Glassman High Voltage MJ20P700.....	62
3.3.1.2.	Βολτόμετρα μέτρησης της τάσης φόρτισης.....	63
3.3.1.3.	Υπολογισμός χρόνου φόρτισης ανθρώπου και ρεύματος που τον διαρρέει.....	65
3.3.1.4.	Μεταλλική ράβδος φόρτισης - εκφόρτισης – Γειωμένη μεταλλική επιφάνεια – Μονωτικό υλικό έδρασης του ανθρώπινου σώματος.....	68

3.3.2. Καταγραφή κυματομορφών ρεύματος και μήκους τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	70
3.3.2.1. Παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi	71
3.3.2.1.1. Σημείωση για τη μετρητική ικανότητα των παλμογράφων	73
3.3.2.2. Ομοαξονικό καλώδιο SUCOFLEX 106	73
3.3.2.3. Ψηφιακός αισθητήρας PointGrey Research Dragonfly2 .	74
3.3.2.3.1. Διάταξη καταγραφής μήκους τόξου.....	76

Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 79

4.1. Εισαγωγή	79
4.2. Συνδεσμολογία – διαδικασία μετρήσεων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρωπίνου σώματος.....	80
4.2.1. Μέτρηση ρεύματος.....	80
4.2.2. Μέτρηση μήκους τόξου	83
4.3. Μετρήσεις ρεύματος παραγομένου από έναν άνθρωπο – Παλμογράφος TDS 7254B (Tektronix) – Τάση φόρτισης 2 kV	84
4.4. Σειρές μετρήσεων σε πλήθος ανθρωπίνων σωμάτων, σε εύρος τάσεων φόρτισης, με τον παλμογράφο LeCroy SDA 816 Zi	89
4.4.1. Κορυφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι τάσης φόρτισης.....	91
4.4.2. Χρόνος ανόδου ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι τάσης φόρτισης.....	94
4.4.3. I_{30} και I_{60} έναντι τάσης φόρτισης	96
4.4.4. Δεύτερο τοπικό μέγιστο έναντι τάσης φόρτισης.....	99
4.4.5. Σχόλια για τη συμπεριφορά των χαρακτηριστικών μεγεθών, συναρτήσε κλιματικών και σωματομετρικών χαρακτηριστικών..	104

4.5.	Επίδραση της ταχύτητας προσέγγισης και του μήκους τόξου στο ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	105
4.5.1.	Επεξεργασία φωτογραφίας σπινθήρα τόξου και προσδιορισμός του μήκους τόξου.....	106
4.5.2.	Επεξεργασία βίντεο εκφόρτισης και προσδιορισμός της ταχύτητας προσέγγισης	107
4.5.3.	Μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου -μετάλλου, με αργή και γρήγορη προσέγγιση	108
4.6.	Υπολογισμός αβεβαιοτήτων σε μετρήσεις πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	118
4.6.1.	Εισαγωγή.....	118
4.6.2.	Μεθοδολογία.....	120
4.6.3.	Εφαρμογή - Σχολιασμός.....	122
4.7.	Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις	128

Κεφάλαιο 5: Προσεγγιστικές μέθοδοι διατύπωσης εξισώσεων

	για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.....	133
5.1.	Εισαγωγή.....	133
5.2.	Βελτίωση της εξίσωσης του Προτύπου, με χρήση βελτιωμένου Γενετικού Αλγόριθμου και αναφορά στα πειραματικά δεδομένα.....	134
5.2.1.	Εισαγωγή.....	134
5.2.2.	Βασική λειτουργία Γενετικών Αλγορίθμων	136
5.2.3.	Ο αναπτυχθείς Γενετικός Αλγόριθμος	137
5.2.4.	Εφαρμογή – Η εξίσωση	139
5.3.	Μέθοδος Prony - Προσέγγιση κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων	146
5.4.	Ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων	149
5.4.1.	A' προσεγγιστική μέθοδος.....	149
5.4.2.	B' προσεγγιστική μέθοδος.....	154
5.5.	Εύρεση προσεγγιστικών εξισώσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με χρήση της B' προσεγγιστικής μεθόδου.....	156

5.5.1	Εύρεση προσεγγιστικών εξισώσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με αναφορά στην καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Heidler	157
5.5.2	Εύρεση προσεγγιστικών εξισώσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με αναφορά στα πειραματικά δεδομένα	158
5.5.3	Εύρεση προσεγγιστικών εξισώσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με αναφορά στην καμπύλη ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εμπορικών γεννητριών	161
Κεφάλαιο 6: Κυκλωματική μοντελοποίηση		163
6.1	Κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος του Heidler με ενεργητικό δίκτυο RC	163
6.1.1	Εφαρμογή: κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εμπορικών γεννητριών, με ενεργητικό δίκτυο RC	168
6.2	Κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος του Προτύπου, με παθητικό δίκτυο RC	172
6.3	Κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος πειραματικών δεδομένων, με παθητικό δίκτυο RLC	176
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα		193
7.1	Ανακεφαλαίωση της διατριβής	193
7.2	Συμβολή - Πρωτοτυπία της διατριβής	194
7.3	Η επόμενη μέρα	197
Παράρτημα		201
Π.1	Σχόλιο για τον υπολογισμό του ρεύματος	201
Π.2	Κώδικας Matlab, για την επεξεργασία των δεδομένων από πραγματικές εκφορτίσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου	202

Π.2.1	Κώδικας επεξεργασίας των δεδομένων της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και δημιουργίας αρχείων ρεύματος ανά εκφορτισθέντα άνθρωπο.	202
Π.2.2	Κώδικας επεξεργασίας των αρχείων ρεύματος όλων των εκφορτισθέντων ανθρώπων, εξαγωγής χαρακτηριστικών μεγεθών, και δημιουργίας γραφημάτων.	208
Π.2.3	Συναρτήσεις	220
Π.3	Κώδικας υπολογισμού κρουστικής απόκρισης της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$	223
Π.4	Κώδικας Matlab, για τη σύνθεση παθητικού δικτύωματος RLC, αντίστοιχου δεδομένης συνάρτησης μεταφοράς, για βηματική είσοδο $V_{in}=V_{charge} \cdot u(t)$, με τη μέθοδο Bott - Duffin	229
Βιβλιογραφία:.....		233

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, διεξήχθη στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου από το 2007 έως και το 2011, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλου και ασχολείται με τη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η διατριβή πραγματεύεται την ανάδειξη των λιγότερο φωτισμένων πτυχών του φαινομένου (εστιάζοντας στο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης) μέσω πειραμάτων βασικής έρευνας, τη βελτίωση και εξέλιξη των προτεινομένων για το ρεύμα μαθηματικών εκφράσεων, με αναφορά στα πειραματικά ευρήματα πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου – μετάλλου, μέσω της ανάπτυξης μαθηματικών εργαλείων γραμμικής άλγεβρας και ασαφούς λογικής, όπως, επίσης, και τη μοντελοποίηση του φαινομένου, μέσω της εκπόνησης μεθοδολογίας σύνθεσης κυκλωμάτων παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με έμφαση στη σύνθεση παθητικών κυκλωμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται σύντομα το γνωστικό πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και τα βασικά της στοιχεία. Έπειτα, γίνεται περιγραφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενώ παρουσιάζονται, παράλληλα, οι τρόποι με τους οποίους δημιουργείται το φαινόμενο. Περιγράφεται η δημιουργία ηλεκτροστατικής φόρτισης στα διάφορα υλικά, αναλύονται τα τρία υπάρχοντα μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ενώ, επίσης, παρουσιάζονται οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν από το φαινόμενο αυτό. Τέλος, δίνονται συνοπτικά οι ορισμοί του Προτύπου IEC 61000-4-2 για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εκτίθεται η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, με έμφαση σε προσπάθειες μετρήσεων σημαντικών μεγεθών εμπλεκόμενων σε περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και σε προτάσεις για κυκλωματικές μοντελοποιήσεις του φαινομένου, με βασικό στόχο την παραγωγή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται λεπτομερώς ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., που χρησιμοποιείται για τη μελέτη φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό αφορά τόσο σε εξοπλισμό τεχνητής αναπαραγωγής του φαινομένου (γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων), όσο και σε μετρητικό εξοπλισμό για καταγραφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (παλμογράφο, καλώδια,

προσαρμοστές). Επίσης παρουσιάζεται, ο εξοπλισμός που, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, προτάθηκε και το εργαστήριο προμηθεύτηκε, στη συνέχεια, για της ανάγκες της. Ακολούθως, περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις, που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, και χρησιμοποιούνται, από παλαιότερα, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, αλλά και καινοτόμες διατάξεις και ιδιοκατασκευές, που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της διατριβής. Παρουσιάζονται μετρήσεις κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρωπίνου σώματος, υπό ορισμένη τάση φόρτισης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εκτεταμένες σειρές μετρήσεων κατά την εκφόρτιση 75 ατόμων σε 4 επίπεδα τάσης, με χρήση αναβαθμισμένου μετρητικού εξοπλισμού. Παρουσιάζονται, επίσης, οι μετρήσεις που έγιναν με φόρτιση του ίδιου ατόμου σε διάφορα επίπεδα τάσης, υπό ελεγχόμενες ταχύτητες προσέγγισης του φορτισμένου σώματος προς το γειωμένο μεταλλικό «στόχο» εκφόρτισης, ώστε να μελετηθεί η επίδραση της ταχύτητας στο μήκος του τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και στη συμπεριφορά των τιμών των χαρακτηριστικών παραμέτρων του ρεύματος. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που ερμηνεύουν το φαινόμενο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μέθοδοι ασαφούς λογικής για τη βελτίωση των προτύπων μαθηματικών εκφράσεων, με αναφορά στα νέα πειραματικά δεδομένα, καθώς, επίσης, και αριθμητικές μέθοδοι που οδηγούν σε μαθηματικές εκφράσεις της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, οι οποίες μπορούν να προσεγγίσουν μια ποικιλία από πειραματικές καμπύλες ρεύματος. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση στην προσεγγιστική μέθοδο, που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Οι ευρεθείσες μαθηματικές εκφράσεις αξιοποιούνται στο επόμενο (έκτο) κεφάλαιο της διατριβής, στο οποίο παρουσιάζονται μέθοδοι σύνθεσης ενεργών και παθητικών δικτύων, τα οποία παράγουν την επιλεγμένη κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η μεθοδολογία σύνθεσης των παθητικών δικτύων παρουσιάζεται με ξεχωριστή λεπτομέρεια, λόγω της πολυπλοκότητάς της. Στο κεφάλαιο αυτό εκτίθεται σειρά κυκλωμάτων, που σχεδιάστηκαν, με έμφαση στα παθητικά κυκλώματα, που παράγουν το ρεύμα το καταγεγραμμένο από τα

πειράματα μας σε πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τα κυκλώματα προσομοιώνονται και αξιολογούνται.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην πρωτοτυπία της διατριβής και στη συμβολή της στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και, ιδιαίτερα, στην ανάδειξη της συμπεριφοράς του ρεύματός της. Γίνονται προτάσεις για την αξιοποίηση των ευρημάτων και μεθοδολογιών της παρούσας διατριβής και παρατηρήσεις για την κατεύθυνση της έρευνας, αλλά και της προτυποποίησης μεγεθών σχετικών με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Στο τέλος της διατριβής παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία ενώ, επίσης, παρουσιάζονται, σε παράρτημα, οι κώδικες που συντάχθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Σ' αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω από βάθους καρδιάς τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ιωάννη. Αθ. Σταθόπουλο. Η οξυδέρκεια, οι γνώσεις του και η πολύχρονη εμπειρία του είναι αρετές του, οι οποίες με βοήθησαν πολύ στο, μέχρι τώρα, έργο μου. Νοιώθω υπόχρεος για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αλλά και για τον καθοδηγητικό του ρόλο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Φραγκίσκο. Β. Τοπαλή, για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τη διαρκή του υποστήριξη και τις συμβουλές του, καθώς και την έμπρακτη βοήθεια της έρευνάς μου από τον ίδιο και τους συνεργάτες του, μεταξύ των οποίων θα ήθελα να ευχαριστήσω, ιδιαιτέρως, τον κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση, για την τεχνική του βοήθεια και τις επιστημονικές του συμβουλές, κατά τη διαδικασία της φωτογράφησης και μέτρησης του τόξου εκφόρτισης.

Τις θερμότερες ευχαριστίες εκφράζω, προς τον Καθηγητή κ. Τρύφωνα Γ. Κουσιουρή, για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τη διαρκή του υποστήριξη: ο Καθηγητής κ. Κουσιουρής με στήριξε, από την αρχή της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, με ζήλο, τόσο με το ευρέως γνωστό πλάτος και βάθος των γνώσεων του, όσο και με το χρόνο, που μου αφιέρωσε, σε κάθε δυσκολία που μου παρουσιάστηκε. Η ακεραιότητα και η διαύγεια του χαρακτήρα του αποτελούν έμπνευση και σχολείο για μένα.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στο Διδάκτορα κ. Ιωάννη. Φ. Γκόνο, ο οποίος, με την καθοδήγησή του και την πολύχρονη εργαστηριακή του εμπειρία στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, στάθηκε πολύτιμος αρωγός στο έργο μου. Το εύρος των γνώσεών του και οι

εύστοχες παρατηρήσεις του έχουν συμβάλει τα μέγιστα στην παρούσα εργασία. Η επιστημονική αξία του Δρ. Γκόνου δεν έχει ανάγκη των δικών μου επιβεβαιώσεων, καθώς είναι ένας από τους σημαντικότερους επιστήμονες στο πεδίο του στην Ελλάδα και όχι μόνο. Ιδιαίτερος ευχαριστώ τη Διδάκτορα Κυρία Βασιλική. Θ. Κονταργύρη, που είναι δίπλα μου πάντα, όποτε τη χρειάζομαι, παρέχοντας μου ουσιαστική βοήθεια.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω, ιδιαίτερος, το Διδάκτορα κ. Γεώργο Π. Φώτη, για τη βοήθειά του στην εισαγωγή μου στον κόσμο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Επίσης, ευχαριστίες απευθύνω στους συναδέλφους Διδάκτορα κ. Χρήστο Α. Χριστοδούλου και Κυρία Φανή Η. Ασημακοπούλου, για τη συνεργασία που είχαμε τα τελευταία χρόνια.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες αξίζουν και στα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και συγκεκριμένα στην Κυρία Νικολέτα Χ. Ηλία, υπεύθυνη του Συστήματος Ποιότητας του Εργαστηρίου, για την εργαστηριακή της βοήθεια, στην Κυρία Χρύσα Σιγάλα, για τη γραμματειακή υποστήριξη, αλλά και στους κυρίους Χρήστο Κ. Ηλία και Αριστείδη Γιάννακα, για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν.

Ευχαριστίες αξίζουν σε όλους τους σπουδαστές Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Υπολογιστών, οι οποίοι ενεπλάκησαν με τη δουλειά μου, στο πλαίσιο των διπλωματικών τους εργασιών, και τροφοδότησαν την επιστημονική μου αναζήτηση με τις παρατηρήσεις τους, καθώς και τις δεκάδες των σπουδαστών, που ανιδιοτελώς προσφέρθηκαν και έλαβαν μέρος στα πειράματα της παρούσας διατριβής, ως υποκείμενα των πειραμάτων. Ιδιαίτερος θέλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους Κυρία Χ. Αναγνωστοπούλου και κ.κ. Χ. Πουλιάση, Β. Πάντζαλη, Γ. Ψαρρό, Γ. Παλαιολόγου και Α. Σολωμού, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια όλων αυτών των ετών.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου, με τη βοήθεια και τη συναισθηματική στήριξη των οποίων, η εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής κατέστη εφικτή.

1.1 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα - ορισμοί

Όταν μιλάμε για τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility, EMC) εννοούμε τη μελέτη της δυνατότητας ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων να συνυπάρχουν αρμονικά. Η εφαρμογή της βασικής φυσικής στο πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας γίνεται με στόχο τα συστήματα να εκτελούν τις λειτουργίες για τις οποίες είναι προορισμένα, με ικανοποιητικό τρόπο.

Από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων - πριν περίπου ένα αιώνα - το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος, ή τμήματός του, σε κάποιο άλλο σύστημα, ή τμήμα αυτού, έχει απασχολήσει πολύ τους επιστήμονες· τούτο, δε, συγκεντρώνει ευρύτερο ενδιαφέρον κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα, κατά το οποίο η εξέλιξη και διεύρυνση της μεταφοράς ενέργειας, αλλά και των ενσύρματων και ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων, σε συνδυασμό με τη γενίκευση της χρήσης ηλεκτρονικών συσκευών σε κάθε πτυχή της ζωής, δημιουργεί ένα πραγματικό “λαβύρινθο” από αγόμενα και εκπεμπόμενα σήματα γύρω μας.

Με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων αναπτύχθηκε το γνωστικό πεδίο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Κατά το IEEE [1]:

Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference) 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.

Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility - EMC), είναι η ικανότητα μιας διάταξης, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον, χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σ' αυτό.

(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 ποιότητας 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 αυτό παραμένει ικανή/ό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

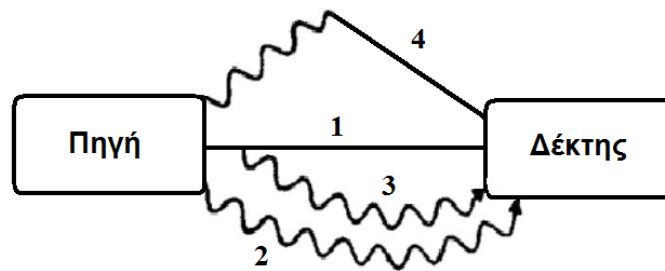
Όριο Ατρωσίας (*Immunity Limit*) είναι η καθορισμένη στάθμη ατρωσίας.

Περιθώριο Ατρωσίας (*Immunity Margin*) είναι ο λόγος του ορίου ατρωσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος προς τη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι, όταν αντιμετωπίζει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, είναι σημαντικό να έχει στο νου του ότι, τα αναφερόμενα προβλήματα σχετίζονται άμεσα με το περιεχόμενο συχνοτήτων της κυματομορφής και με τη σχετική θέση (απόσταση, προσανατολισμός) μεταξύ πομπού και δέκτη.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι, όλα τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών έχουν μια πηγή (ή εναλλακτικά πομπό), έναν αριθμό διαδρόμων ή τρόπων σύζευξης και έναν δέκτη. Η σύζευξη μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί να γίνει δι' ακτινοβολίας ή/και δι' αγωγής. Είναι φανερό, ότι μπορούν να υπάρξουν και άλλοι πιθανοί τρόποι σύζευξης, όπως

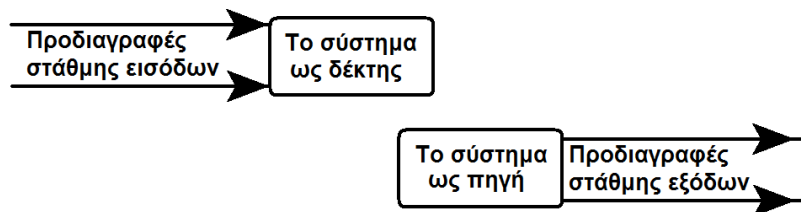
φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



1. Σύζευξη μόνο δι'αγωγής
2. Σύζευξη μόνο δι'ακτινοβολίας
3. Σύζευξη μόνο δι'αγωγής ακολουθούμενος και με σύζευξη δι'ακτινοβολίας
4. Σύζευξη μόνο δι'ακτινοβολίας ακολουθούμενος και με σύζευξη δι'αγωγής

Σχήμα 1.1: Σχηματικό διάγραμμα των πιθανών τρόπων σύζευξης [2]

Μέσα σε ένα σύστημα, όλες οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνιστώσες πρέπει να συνυπάρχουν αρμονικά. Το Σχήμα 1.2 δείχνει ότι, κάθε σύστημα που λειτουργεί ως δέκτης θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά, όταν εκτίθεται σε καθορισμένες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (προδιαγραφές στάθμης εισόδων). Την ίδια ώρα το ίδιο σύστημα θα πρέπει να μην είναι πηγή ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, πάνω από κάποια καθορισμένα όρια (προδιαγραφές στάθμης εξόδων).



Σχήμα 1.2: Σύνδεση των προδιαγραφών της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας με ένα σύστημα όταν αυτό λειτουργεί ως πομπός ή ως δέκτης

Συνήθως, ο σχεδιαστής ενός υπο-συστήματος δεν έχει την ελευθερία να καθορίζει τα δικά του όρια ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, αλλά πρέπει να σχεδιάζει και να κατασκευάζει συσκευές σύμφωνα με εξωγενώς θεσμοθετημένα όρια, μερικά από τα οποία μπορεί να αποτελούν νομικές υποχρεώσεις ή να έχουν συμβουλευτικό χαρακτήρα. Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να μην υπάρχουν καθόλου προδιαγραφές και, τότε, ο σχεδιασμός πρέπει να γίνει με προσοχή, ώστε να εξασφαλίζεται ότι το σύστημα θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να εισάγει στο και να υφίσταται παρενοχλήσεις από το αναμενόμενο περιβάλλον λειτουργίας του.

1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση του ανθρώπινου σώματος

Ας υποθέσουμε πως αρχικά ένα ανθρώπινο σώμα είναι αφόρτιστο και κινείται πάνω από ένα χαλί, με υποδήματα φτιαγμένα από συνθετικά μονωτικά υλικά, τα οποία έρχονται σε απευθείας τριβή με το χαλί. Ανάλογα με τη μοριακή δομή των υποδημάτων και του χαλιού υπάρχει ανταλλαγή ηλεκτρονίων από το ένα σώμα στο άλλο (τριβοηλεκτρικό φαινόμενο). Ως αποτέλεσμα θα υπάρξει μια φόρτιση στα υποδήματα και η αντίθετη φόρτιση θα δημιουργηθεί σε κάθε αποτύπωμα του πέλματός του ατόμου, κατά το χρόνο που τούτο περπατά, ενώ υπάρχει ένα όριο στο φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί [3]. Η φόρτιση αυτή μεταφέρεται στο ανθρώπινο σώμα, δεδομένης της αγωγιμότητάς του. Έτσι, μια τάση δημιουργείται μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και των γειτονικών αντικειμένων, οπότε είναι εύκολο να συμβούν ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Μια σχηματική απεικόνιση μιας τέτοιας φόρτισης φαίνεται στο Σχήμα 1.3 (α) που ακολουθεί [4]. Ο Osamu Fujiwara [4, 5] παρουσίασε ένα κυκλωματικό μοντέλο για την ανάπτυξη του δυναμικού, όταν ο άνθρωπος κινείται πάνω σε ένα δάπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3 (β). Θεωρώντας C_0 τη συνολική χωρητικότητα, που είναι συγκεντρωμένη στην περιοχή επαφής, C την χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας του υλικού του δαπέδου, C_B τη χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος και S την επιφάνεια πέλματος τότε ισχύει η σχέση:

$$C_0 = S \cdot C + C_B \quad (1.1)$$

Ως αρχή των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων (x, y) λαμβάνεται το κεντρικό σημείο της περιοχής επαφής μεταξύ του πέλματος και του δαπέδου. Θεωρώντας $V(x, y, t)$ το δυναμικό τη χρονική στιγμή t , $J_x(x, y, t)$ και $J_y(x, y, t)$ τις επιφανειακές πυκνότητες ρεύματος στις κατευθύνσεις x και y αντιστοίχως και R την αντίσταση της επιφάνειας του υλικού του δαπέδου, ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -R \cdot J_x \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = -R \cdot J_y \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = -C \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1.4)$$

Αν $V_B(t)$ είναι το δυναμικό του ανθρώπινου σώματος, τότε το ρεύμα $C_0 \cdot \frac{\partial V_B}{\partial t}$ ρέει στο

εξωτερικό της ισοδυναμικής περιοχής. Συνεπώς, ισχύει η ακόλουθη οριακή συνθήκη:

$$-C_0 \cdot \frac{\partial V_B}{\partial t} = \oint (J_y dx + J_x dy) \quad (1.5)$$

Από την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων μπορεί να υπολογιστεί το δυναμικό του ανθρωπίνου σώματος $V_B(t)$. Για την απλούστερη επίλυση των παραπάνω εξισώσεων χρησιμοποιούνται πολικές συντεταγμένες (r, θ) , οπότε οι εξισώσεις λαμβάνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -R \cdot J_r \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial J_r}{\partial r} + \frac{J_r}{r} = -C \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1.7)$$

με οριακή συνθήκη την:

$$-C_0 \cdot \frac{\partial V_B}{\partial t} = 2\pi d J_r(d, t) \quad (1.8)$$

(d είναι η ακτίνα κύκλου επί του επιπέδου (x, y)).

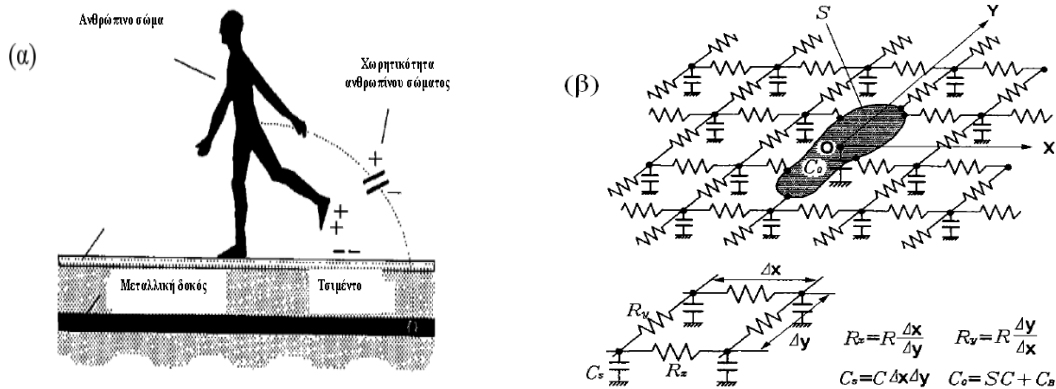
Με τον μετασχηματισμό Laplace της εξίσωσης (1.8) και θεωρώντας V_0 το αρχικό δυναμικό του ανθρωπίνου σώματος, λαμβάνουμε τη σχέση:

$$\frac{V_B(s)}{V_0} = -\frac{\pi K_0(2\xi\sqrt{s\tau})}{sK_0(2\xi\sqrt{s\tau}) + \sqrt{s\tau}K_1(2\xi\sqrt{s\tau})} \quad (1.9)$$

$$\text{όπου: } \tau = \frac{C_0 R}{4\pi\xi} \quad (1.10)$$

$$\text{και } \xi = \frac{\pi d^2 C}{C_0} \quad (1.11)$$

όπου K_0 και K_1 είναι οι συναρτήσεις Bessel μηδενικής και πρώτης τάξης αντίστοιχα. Άρα το ανθρώπινο δυναμικό μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση (1.9) μέσω του αντιστρόφου μετασχηματισμού Laplace, με γνωστό όρο μόνο το ξ .



Σχήμα 1.3: α) Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτροστατικής φόρτισης του ανθρωπίνου σώματος όταν αυτό κινείται πάνω σε δάπεδο, β) Κύκλωμα του δαπέδου για την ανάλυση του δυναμικού του ανθρωπίνου σώματος [4]

1.3 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic Discharge-ESD)

1.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε, η ανταλλαγή ηλεκτρονίων που παρατηρείται κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται σε επαφή (τριβοηλεκτρικό φαινόμενο) έχει ως αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [1, 6]. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών (10 έως 25 kV), με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα, το οποίο παρουσιάζει απότομες μεταβολές και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές. Σοβαρά προβλήματα έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, όπως εκρήξεις σε δεξαμενόπλοια, κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους, ζημιές και καταστροφές μικρο-κυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους, εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας αεροσκαφών με καύσιμα και βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις [6-8]. Μπορεί να διαταράξει ή και να καταστρέψει ακόμη ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα, τα οποία βρίσκονται κοντά σε αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από τα μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος

(έμμεση εκφόρτιση).

Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [2, 7] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατιστικό μέγεθος από τη φύση του και, έτσι, συνήθως, καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

1.3.2 Δημιουργία της ηλεκτροστατικής φόρτισης στα διάφορα υλικά

Είναι γνωστό ότι, οποτεδήποτε δύο αντικείμενα, όπως μια γυάλινη ράβδος ή ένα μεταξωτό ύφασμα, έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και κατόπιν αποχωριστούν, τότε τα δύο αυτά αντικείμενα έχουν φορτιστεί ηλεκτρικά. Εάν δύο φελλοί φορτιστούν από μια γυάλινη ράβδο, τότε θα απωθούνται μεταξύ τους, ενώ εάν ο ένας φορτιστεί από μία γυάλινη ράβδο και ο άλλος από μετάξι, τότε οι δύο φελλοί θα έλκονται. Η φόρτιση αυτών των αντικειμένων γίνεται, είτε λόγω προσθήκης ηλεκτρονίων στις εξωτερικές τους στιβάδες (αρνητική φόρτιση), είτε λόγω αφαίρεσης ηλεκτρονίων από τις εξωτερικές τους στιβάδες (θετική φόρτιση) [9]. Βέβαια, αιτίες της στατικής ηλεκτρικής φόρτισης των υλικών μπορεί να είναι, εκτός της διαδικασίας της τριβής, και άλλες όπως οι δέσμες ιόντων, φόρτιση Corona, κ.λπ.. Το συσσωρευόμενο φορτίο παραμένει στάσιμο (στατικό) στο αντικείμενο για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν δύο φορτισμένα αντικείμενα προσεγγίζουν το ένα το άλλο σε απόσταση μικρότερη μιας οριακής τιμής, συμβαίνει απότομη μεταφορά φορτίου, που καλείται ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Το αν το υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση των τριβομένων υλικών. 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.: Είδος φορτίου (θετικό ή αρνητικό) που αποκτούν τα διάφορα υλικά λόγω της τριβής[6]

Τριβοηλεκτρική σειρά διαφόρων υλικών	
+++	-
Υλικά που φορτίζονται θετικά	Υλικά που φορτίζονται αρνητικά
Αέρας	Κερί γυαλισματος
Ανθρώπινο δέρμα	Σκληρό λάστιχο
Γυαλί	Κόλλα συγκόλλησης
Ανθρώπινα μαλλιά	Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι
Νάilon	Ανοξειδωτο ατσάλι
Μαλλί	Συνθετικό λάστιχο
Γούνα	Ακρυλικό
Μόλυβδος	Αφρός πολυουρεθάνης
Μετάξι	Πολυεστέρας
Αλουμίνιο	Πολυαιθυλένιο
Χαρτί	PVC
Πολυουρεθάνη	TEFLON
Βαμβάκι	Λάστιχο σιλικόνης
Ξύλο	
Ατσάλι	---
+	

Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και εκφόρτιση των υλικών [6]

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

Το στατικό φορτίο μπορεί να μετρηθεί, είτε, άμεσα, με έναν συμβατικό μετρητή φορτίου (κουλομπόμετρο), είτε, έμμεσα, μέσω μέτρησης του ηλεκτροστατικού δυναμικού ή το πεδίο που παράγει. Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που παράγονται από διαφορετικά

γεγονότα φαίνονται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις [6]

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		
	10%	40%	55%
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35 kV	15 kV	7.5 kV
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο από βινύλιο	12 kV	5 kV	3 kV
Κινήσεις ενός εργαζομένου σε ένα γραφείο	6 kV	0.8 kV	0.4 kV

1.4 Οι επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Η συγκέντρωση του ενδιαφέροντος στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση οφείλεται σε μια σειρά από λόγους που εκτίθενται στη συνέχεια· οι αναφλέξεις ή και εκρήξεις που μπορεί να προκαλέσουν οι σπινθήρες κατά την εκφόρτιση σε εύφλεκτα υλικά είναι ένας σημαντικότερος κίνδυνος για την πετρελαϊκή, χημική, φαρμακευτική και στρατιωτική βιομηχανία. Στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών, μοντέρνα ηλεκτρονικά εξαρτήματα μικροσκοπικού μεγέθους μπορούν να καταστραφούν από μια εκφόρτιση μερικών δεκάδων Volt. Εκφορτίσεις μερικών μJ μπορεί να προκαλέσουν εκρήξεις [10]. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών, με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους. Σε συνθήκες αυξημένης πεδιακής έντασης, μπορεί να παρατηρηθεί ηλεκτροστατική εκφόρτιση [6].

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να λάβουν χώρα:

- 1) Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων. Λόγου χάρη, το φορτίο που διοχετεύεται στο κέλυφος μιάς συσκευής πληροφορικής από ένα φορτισμένο σώμα κατά τη διάρκεια ενός περιστατικού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι δυνατόν να μεταφερθεί με μια δευτερεύουσα εκκένωση στα ολοκληρωμένα κυκλώματα που βρίσκονται στο εσωτερικό του και να τα καταστρέψει.
- 2) Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των

κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: είτε στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, είτε/και 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.

- 3) 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.
- 4) Μαγνητική επαγωγή, εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

Για να προστατευθεί ο ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός έναντι των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων χρειάζεται να ληφθούν προληπτικά μέτρα, και να αναπτυχθούν τεχνικές προστασίας που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματα των εκφορτίσεων όταν αυτές εμφανιστούν.

Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων:

- 1) 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 αγώγιμο στρώμα.
- 2) 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 [11], με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακκούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, οι Fowler, Klein και Fromm [12] 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 ΜΩ, αλλά από την άλλη θα πρέπει να είναι αρκούντως μονωτικά, ώστε να μην υπάρχει κανένας κίνδυνος για την ασφάλεια των ανθρώπων.

Η προστασία του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού, από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, μπορεί να γίνει με τα ακόλουθα μέτρα:

- 1) Πλήρη ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή δευτερευουσών εκφορτίσεων.
- 2) Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οπότε εξασφαλίζεται μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- 3) Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- 4) Εγκατάσταση συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

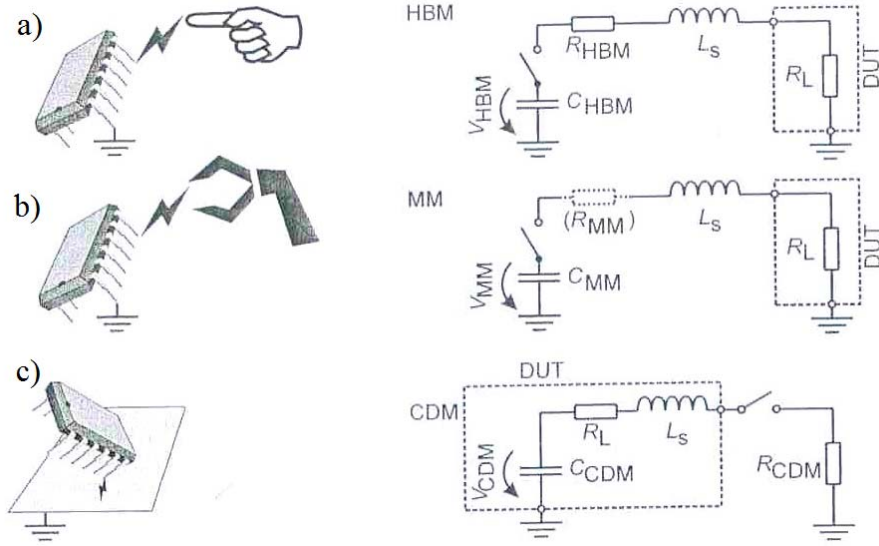
Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο κέλυφος (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Προκειμένου τα κελύφη να είναι αποτελεσματικά πρέπει να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα, μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα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

1.5 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.5.1 Γενικά

Καθημερινά συμβαίνουν διάφορα είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα οποία εμπλέκονται ποικίλα είδη σωμάτων. Η ένταξη αυτών των συμβάντων σε ομάδες, που να μπορούν να μοντελοποιηθούν ξεχωριστά, ώστε να εκτιμηθούν οι επιδράσεις που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα, αποτελούν αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων [6, 11, 13]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model – HBM), το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM).

Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 1.4. Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από δευτέρας τάξεως διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες ισχύουν στα κυκλώματα RLC.



Σχήμα 1.4: Παραδείγματα εκφορτίσεων (a,b,c) σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM, αντιστοίχως) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [11].

Θεωρώντας R_{ESD} τη συνολική ωμική αντίσταση του κυκλώματος, δηλαδή το άθροισμα της ίδιας ωμικής αντίστασης R_i (R_{HBM} , R_{MM} , R_{CDM} , κατά περίπτωση) του κυκλώματος και της ωμικής αντίστασης R_L της υπό εξέταση συσκευής (Device Under Test - DUT), C_{ESD} τη χωρητικότητα, η οποία αρχικά είναι φορτισμένη σε τάση V_{ESD} και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης, η διαφορική εξίσωση 2^{ης} τάξεως, που ισχύει, είναι:

$$L_S \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0 \quad (1.12)$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh\left(\left(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) \cdot t\right), \text{ για } \alpha > \omega_0 \quad (1.13)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin\left(\left(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}\right) \cdot t\right), \text{ για } \alpha < \omega_0 \quad (1.14)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \alpha^2 t e^{-\alpha t}, \text{ για } \alpha = \omega_0 \quad (1.15)$$

όπου $\alpha = \frac{R_{ESD}}{2L_S}$ ο συντελεστής απόσβεσης και $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_{ESD}}}$ η κυκλική συχνότητα

ταλάντωσης, αν δεν υπάρχει απόσβεση.

Τυπικές τιμές των κυκλωματικών παραμέτρων και των παραμέτρων των παραγομένων κυματομορφών, για τα τρία μοντέλα, φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [11]

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
V_{ESD}	4000 V	200 V	500 V
$R_{HBM}/R_{MM}/R_{CDM}$	1.5 kΩ	5 Ω	10 Ω
C_{ESD}	100 pF	200 pF	10 pF
L_S	5000 nH	750 nH	750 nH
R_L	10 Ω	10 Ω	10 Ω
I_{ESD}	2.6 A	2.8 A	10.4 A
$t_{rise}(10\% / 90\%)$	≈ 7 ns	≈ 11 ns	≈ 0.3 ns
A	$1.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$0.1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$10 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
ω_0	$0.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$0.8 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$30 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$

1.5.2 Το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model – HBM)

Το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος προσομοιώνει την εκφόρτιση που λαμβάνει χώρα από ένα άτομο πάνω σε μια γειωμένη συσκευή. Το κύκλωμα του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 1.4.a. Οι τιμές της αντίστασης και του πυκνωτή διαφέρουν ανάλογα με τα διάφορα Πρότυπα (Standards) τα οποία υπάρχουν, αλλά, ποιοτικά, τα στοιχεία του κυκλώματος, ανεξάρτητα από την τιμή τους, παραμένουν τα ίδια. Ο πυκνωτής στο κύκλωμα είναι μια μέση αναπαράσταση της χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι μερικές χιλιάδες pF, αλλά συνήθως βρίσκεται μεταξύ 50 και 250 pF. Η αντίσταση του κυκλώματος είναι η αντίσταση του ανθρωπίνου σώματος. Εφ' όσον η αντίσταση του κυκλώματος είναι μια συνάρτηση της περιοχής επαφής, της πίεσης και της αλατότητας, η αντίσταση του ανθρωπίνου σώματος μπορεί να ποικίλει από 100 Ω έως 10 kΩ, αλλά συνήθως είναι μεταξύ 1000 και 1500 Ω.

Το ρεύμα εκφόρτισης του κυκλώματος του HBM όταν $L_S=0$, $R_L=0$ δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{HBM}(t) = \frac{V_{HBM}}{R_{HBM}} e^{-\frac{t}{R_{HBM} C_{HBM}}} \quad (1.16)$$

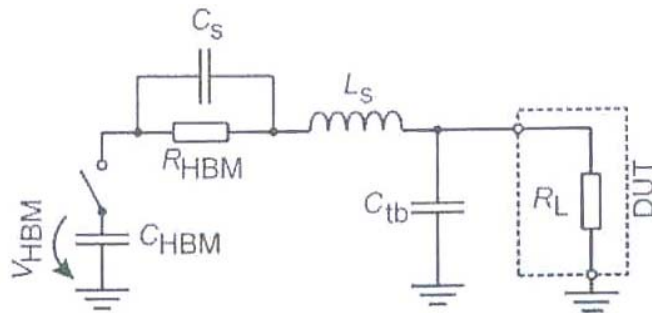
Τυπικές τιμές της L_S είναι της τάξης των $5 \div 10 \mu\text{H}$. Επομένως σύμφωνα με τον Πίνακα 1.4, $\alpha = 1.5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} > \omega_0 = 0.5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ και ο χρόνος ανόδου είναι:

$$t_{\text{rise}} = \frac{1}{2\sqrt{a^2 - \omega_0^2}} \ln \left(\frac{a - \sqrt{a^2 - \omega_0^2}}{a + \sqrt{a^2 - \omega_0^2}} \right) \quad (1.17)$$

Η εξίσωση 1.16, εφ' όσον το a είναι συγκρίσιμο με το ω_0 , γίνεται προσεγγιστικά:

$$t_{\text{rise}} \approx \frac{2L_S}{R_{HBM}} \quad (1.18)$$

Το κύκλωμα RLC , όντας υπερβολικά απλοϊκό, δεν είναι σε θέση να αναπαραστήσει τις πραγματικές κυματομορφές εκφόρτισης. Όταν η εκφόρτιση περιγράφεται από ένα απλοποιημένο κυκλωματικό μοντέλο RLC (για $R_L > 200 \Omega$), αυτό αποτυγχάνει. Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο προτάθηκε από τους Rozendaal και Verhaege [11], με την προσθήκη μιας παρασιτικής χωρητικότητας C_S στην αντίσταση του ανθρωπίνου σώματος και της χωρητικότητας C_{tb} παράλληλα προς την υπό εξέταση συσκευή (DUT), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Κυκλωματική αναπαράσταση του μοντέλου του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model – HBM) [11]

Πρέπει να σημειωθεί ότι, το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 61000-4-2 περιγράφει το κύκλωμα που πρέπει να έχει η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και την κυματομορφή του ρεύματος που θα πρέπει αυτή να παράγει, το κύκλωμα, όμως, αυτό χαρακτηρίζεται, επίσης, από απλοϊκότητα και αδυναμία να παράξει την επιθυμητή έξοδο. Πιο αναλυτικά κυκλώματα που έχουν προταθεί για την προσομοίωση συμβάντων, κατά τα οποία ένας άνθρωπος εκφορτίζεται σε εξοπλισμό, θα παρουσιασθούν στο κεφάλαιο 2.

1.5.3 Το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM)

Η περίπτωση ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου, το οποίο εκφορτίζεται σε μία συσκευή, αναπαριστάται από το μοντέλο της μηχανής. Είναι παρόμοιο με αυτό του μοντέλου ανθρωπίνου σώματος, εκτός από το ότι τα ηλεκτρικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν το ανθρώπινο σώμα αντικαθίστανται με τα, χαρακτηριστικά ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου, ηλεκτρικά στοιχεία. Το κύκλωμα του μοντέλου της μηχανής απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4.b.

Ο συντελεστής απόσβεσης στις εξισώσεις (1.13) και (1.14) είναι:

$$\alpha = \frac{R_{MM} + R_L}{2L_S} \quad (1.19)$$

Η μορφή των κυματομορφών εκφόρτισης εξαρτάται από το λόγο $\frac{\alpha}{\omega_0}$:

- Για $\alpha > \omega_0$ προκύπτει μια κυματομορφή παρόμοια με αυτή του HBM (βλ. εξίσωση 1.13). Οι κυματομορφές του μοντέλου MM δείχνουν μια γρήγορη εκθετική αύξηση, ακολουθούμενη από μια εκθετική μείωση. Στην κυματομορφή εκφόρτισης, η R_L είναι σημαντικότερη παράμετρος έναντι της L_S .
- Για $\alpha < \omega_0$ η εκφόρτιση οδηγεί στη χαρακτηριστική κυματομορφή ταλάντωσης με μέγιστο ρεύμα κορυφής (peak current):

$$I_{MM} = V_{MM} \sqrt{\frac{C_{MM}}{L_S}} \quad (1.20)$$

με συχνότητα ταλάντωσης χωρίς απόσβεση ω_0 και συντελεστή απόσβεσης α .

Όταν $\omega_0 \gg \alpha$ η εξίσωση (1.14) γίνεται:

$$I_{MM}(t) = V_{MM} \sqrt{\frac{C_{MM}}{L_S}} e^{-\alpha t} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{L_S C_{MM}}}\right) \quad (1.21)$$

Η σημαντικότερη παράμετρος στην κυματομορφή εκφόρτισης είναι η L_S , η οποία επηρεάζει τη συχνότητα ταλάντωσης, το χρόνο ανόδου και την κορυφή του ρεύματος. Η παράμετρος R_L έχει μικρή, μόνον, επίδραση στο πλάτος της πρώτης κορυφής, αλλά αυξάνει το συντελεστή απόσβεσης α .

1.5.4 Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (*Charged Device Model – CDM*)

Το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (CDM) είναι διαφορετικό από τα δύο προηγούμενα μοντέλα, επειδή προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση από μια συσκευή και όχι προς μια συσκευή. Κυκλωματική αναπαράσταση του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 1.4.c, όπου αναπαριστάται η φόρτιση μιας γειωμένης συσκευής ή η εκφόρτιση μιας αρχικά φορτισμένης συσκευής μέσω μιας χαμηλής ωμικής αντίστασης. Η κύρια παράμετρος του μοντέλου αυτού είναι η αντίσταση του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου R_{arc} , η οποία, προσεγγιστικά, λαμβάνεται ως μια σταθερά εν σειρά αντίσταση. Η R_{arc} , η οποία είναι της τάξεως των 5÷30 Ω, δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, αλλά εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους (πίεση, θερμοκρασία κ.λπ.). Στην περίπτωση αυτή ισχύει ο νόμος των Rompe-Weisel [14].

$$R(t) = \frac{l}{\sqrt{\frac{2a_{arc}}{p} \int_0^t i(\xi)^2 d\xi}} \quad (1.22)$$

όπου:

$R(t)$: η αντίσταση του σπινθήρα τη χρονική στιγμή t

l : το μήκος του διακένου

a_{arc} : σταθερά του σπινθήρα, η οποία καθορίζεται από την πίεση, τη φύση και τη θερμοκρασία του αερίου μέσου. Οι τιμές της υπό κανονικές συνθήκες κυμαίνονται από $0.5 \cdot 10^{-4}$ έως $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}^2\text{s}$.

p : η πίεση.

$i(t)$: το ρεύμα που ρέει κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

1.6 Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά το Πρότυπο 61000-4-2

Το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [8] πραγματεύεται την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το διεθνές αυτό Πρότυπο σχετίζεται με την ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και περιγράφει τη μέθοδο και τις διαδικασίες, που πρέπει να ακολουθηθούν, για τη διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκκενώσεων σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα, με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και στα όργανα μέτρησης.

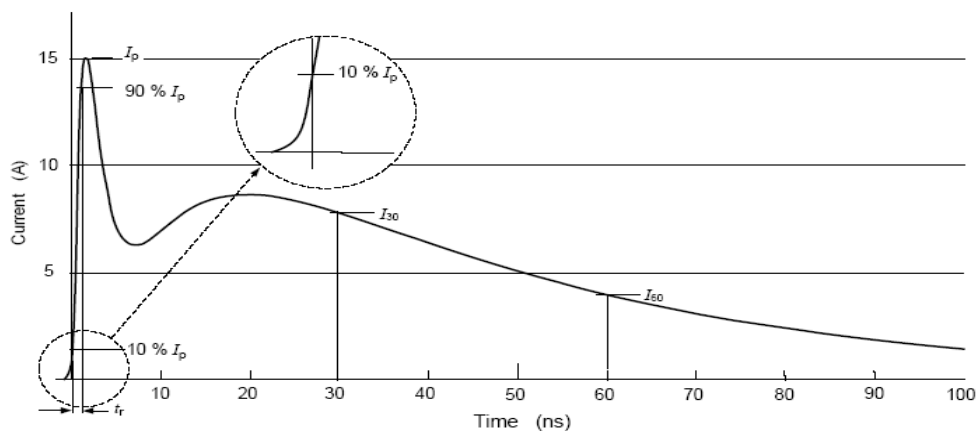
Σε αυτό καθορίζονται:

- Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος
- Τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής
- Ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός
- Η διαδικασία των δοκιμών

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο [8] βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Το κύκλωμα αυτό θα παρουσιασθεί στο κεφάλαιο 2, μαζί με άλλα κυκλώματα, που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η κυματομορφή ρεύματος, που ορίζει το Πρότυπο, [8] παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6. Τα εμφανιζόμενα, στο Σχήμα 1.6, μέσω των συμβόλων τους, χαρακτηριστικά μεγέθη είναι τα εξής.

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



Σχήμα 1.6: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4 kV [8]

Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, σύμφωνα με το Σχήμα 1.6, μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο του ρεύματος (initial peak), το οποίο αντιστοιχεί

στην εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο (second peak), το οποίο αντιστοιχεί στην εκφόρτιση του υπόλοιπου ανθρωπίνου σώματος.

Οι οριζόμενες από Πρότυπο τιμές για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανάλογα με το επίπεδο τάσης φόρτισης, φαίνονται στον Πίνακα 1.5.

Πίνακας 1.5: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο [8].

Τάση φόρτισης (kV)	Μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (A) Ανοχή: ±15%	Χρόνος ανόδου t_r (ns) Ανοχή: ±25%	Ρεύμα στα 30 ns (A) Ανοχή: ±30%	Ρεύμα στα 60 ns (A) Ανοχή: ±30%
2.0	7.5	0.8	4.0	2.0
4.0	15.0	0.8	8.0	4.0
6.0	22.5	0.8	12.0	6.0
8.0	30.0	0.8	16.0	8.0

Στο Πρότυπο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας EN 61000-4-2:2009 [8] έχουν γίνει κάποιες αλλαγές σε σχέση με την παλαιότερη έκδοσή του (Πρότυπο EN 61000.04.02:1995 [2]).

Μεταξύ άλλων, το Πρότυπο [8] δίνει, για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, την τυπική μαθηματική έκφραση, που φαίνεται στην εξίσωση (1.23), η οποία, σημειωτέον, δεν υπήρχε στις προηγούμενες εκδόσεις του Προτύπου.

$$I(t) = \frac{I_1}{k_1} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \cdot \exp(-t/\tau_2) + \frac{I_2}{k_2} \cdot \frac{(t/\tau_3)^n}{1+(t/\tau_3)^n} \cdot \exp(-t/\tau_4) \quad (1.23)$$

όπου

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

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

και

$$\tau_1=1.1 \text{ ns}; \tau_2=2 \text{ ns}; \tau_3=12 \text{ ns}; \tau_4=37 \text{ ns};$$

$$I_1=16.6 \text{ A}; I_2=9.3 \text{ A}; n=1.8$$

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, σχετικά με το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Δόθηκε έμφαση στην παρουσίαση διεθνούς βιβλιογραφίας που ασχολείται με μετρήσεις σε πραγματικά συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όσο και του ανθρώπινου σώματος, καθώς και με τη μοντελοποίηση του φαινομένου.

Με τη βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται εύκολη η σύγκριση μεταξύ της πραγματικής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ανθρώπων ή μηχανών) και των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει ότι, εργασίες διάφορων ερευνητών καταλήγουν σε διαφορετικές τιμές για τα μεγέθη, που συμβατικά θεωρείται ότι χαρακτηρίζουν το φαινόμενο, από αυτές που έχουν καθιερωθεί [8].

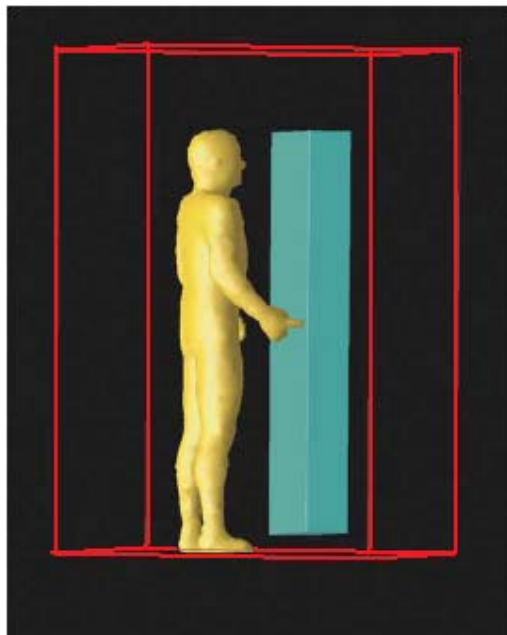
Επιπλέον, παρουσιάζονται μετρήσεις και άλλων παραμέτρων της κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, πλην των τεσσάρων βασικών, καθώς επίσης και ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Η παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήσαν στις μετρήσεις τους οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με το φαινόμενο, και κυρίως του εμπλεκόμενου με πραγματικά συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος αλλά και του καταγραφικού εξοπλισμού, είναι σημαντική για τη συνέχιση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, παρουσιάζονται κυκλωματικά μοντέλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς από ερευνητές για την προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

2.2 Προσομοιώσεις

Οι **E. Okoniewska**, **M. A. Stuchly** και **M. Okoniewski** στο άρθρο τους [15] προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν την επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο ανθρώπινο σώμα μέσω της τεχνικής FDTD (finite difference time domain method) και ενός ανισοτροπικού μοντέλου του σώματος. Η σχετική διάταξη αποτελείται από ένα ετερογενές μοντέλο ανθρώπου το δάχτυλο του οποίου δείχνει προς ένα παραλληλεπίπεδο υπό κατάλληλη γωνία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.

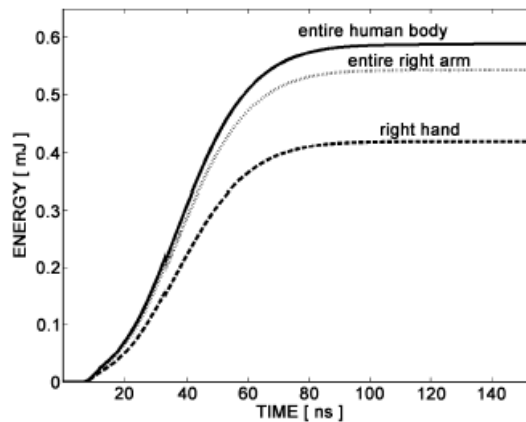


Σχήμα 2.1: Σενάριο που αντιπροσωπεύει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση μεταξύ ενός απομονωμένου μεταλλικού αντικειμένου (γαλαζοπράσινο) και του ανθρώπινου σώματος ισταμένου επί του εδάφους. Η κόκκινη γραμμή παρουσιάζει την τοποθέτηση των υπολογιστικών ορίων. Το άτομο στέκεται κατά μήκος του z-άξονα και δείχνει προς την y-κατεύθυνση [15]

Το ανθρώπινο σώμα έχει ύψος 1,76 m και βάρος 76 kg. Ο υπολογιστικός χώρος που φαίνεται με κόκκινο στο Σχήμα 2.8 έχει διαστάσεις 126,36 cm × 135,54 cm × 210,06 cm. Το μεταλλικό κουτί έχει τις διαστάσεις 54 cm (πλάτος) × 18,36 cm (πάχος) × 167,94 cm (ύψος). Η απόσταση μεταξύ του δαχτύλου και του κουτιού είναι 10,8 mm.

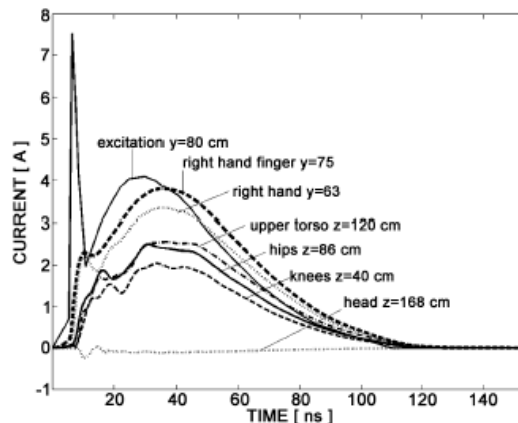
Ένας κατάλληλα τροποποιημένος κώδικας FDTD χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η έγχυση ρεύματος στα αγωγά αντικείμενα και να λάβει τη κατανομή του στη μόνιμη κατάσταση. Οι υπολογισμοί των συγγραφέων έδειξαν ότι, η χωρητικότητα του

ανθρώπινου σώματος περιορίζει το φασματικό περιεχόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα περισσότερα μέλη του σώματος σε συχνότητες δεκάδων MHz. Μόνο πολύ κοντά στο δάχτυλο, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ηλεκτροστατική εκφόρτιση, κάποιο μέρος της ενέργειας εντοπίζεται στις υψηλότερες συχνότητες (μέχρι περίπου 1 GHz). Γενικά, ένα ανθρώπινο σώμα με τη κατανομημένη του χωρητικότητα, λειτουργεί όπως ένα βαθυπερατό φίλτρο. Τέλος, απέδειξαν ότι, ακόμα και για παλμούς ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεγάλης, σχετικά, ενέργειας, τα ανθρώπινα όργανα και ιστοί δεν κινδυνεύουν από τα εκπεμπόμενα πεδία. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η ενέργεια που μεταφέρεται σε διάφορα μέρη του ανθρώπινου σώματος.



Σχήμα 2.2: Μεταφερόμενη ενέργεια σε μέρη του ανθρώπινου σώματος [15]

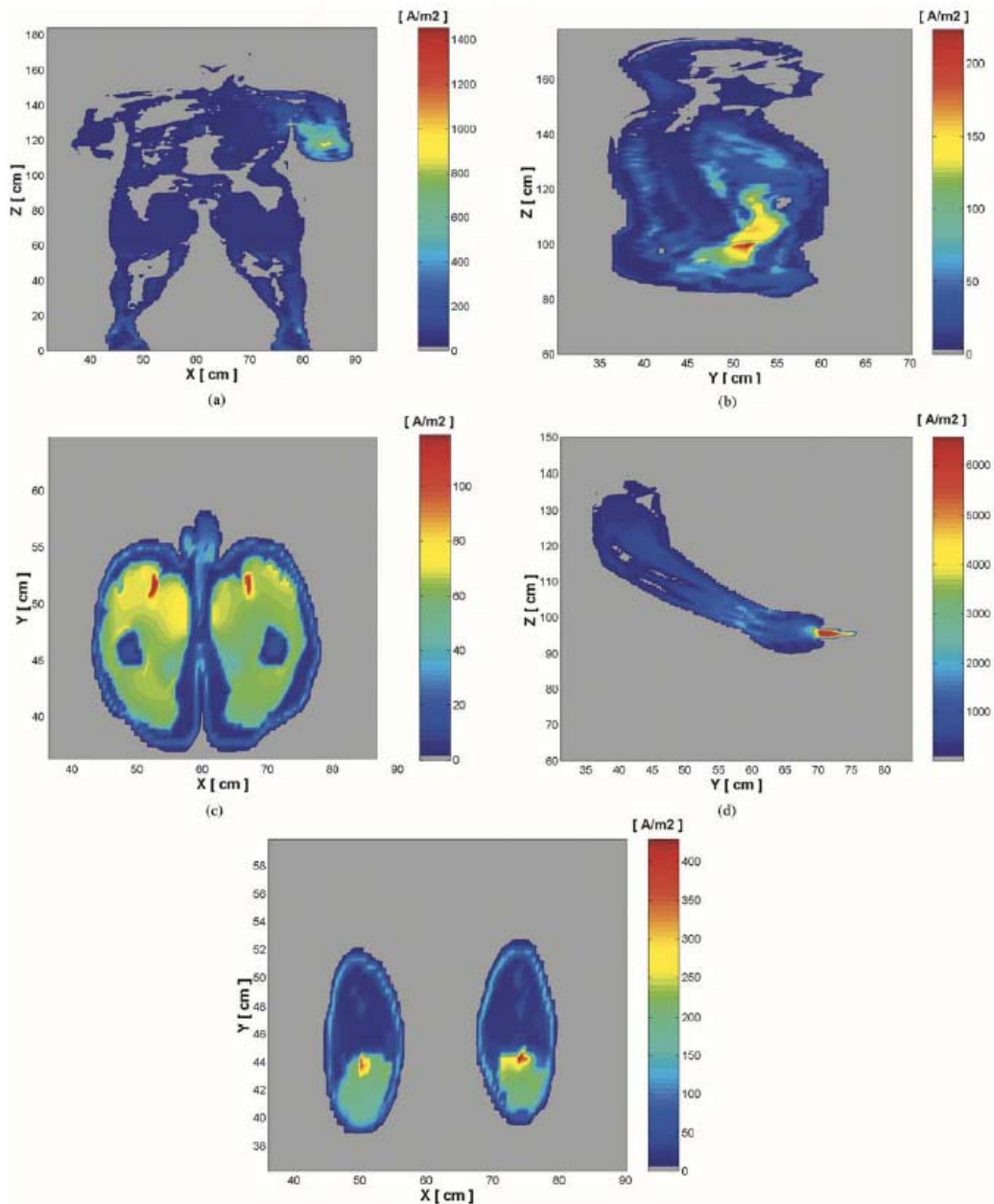
Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το ρεύμα που ρέει σε διάφορα μέρη του ανθρώπινου σώματος κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως και το συνολικό ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 2.3: Ρεύμα σε διάφορα μέρη του ανθρώπινου σώματος κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, παρουσιάζεται επίσης και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (excitation)

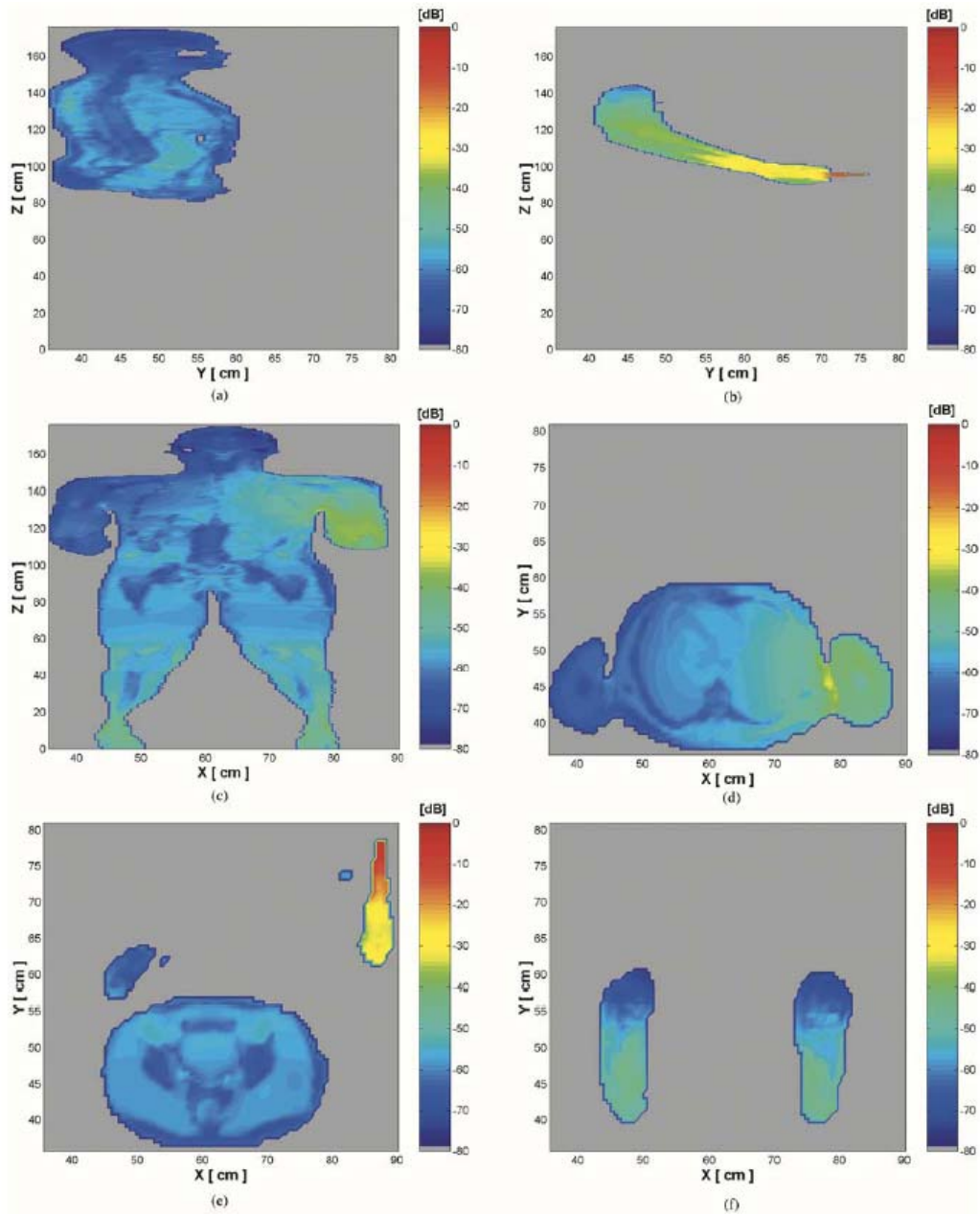
[15]

Οι ίδιοι ερευνητές παρατήρησαν ότι, οι επιμέρους ιστοί έχουν διαφορετική αγωγιμότητα και αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



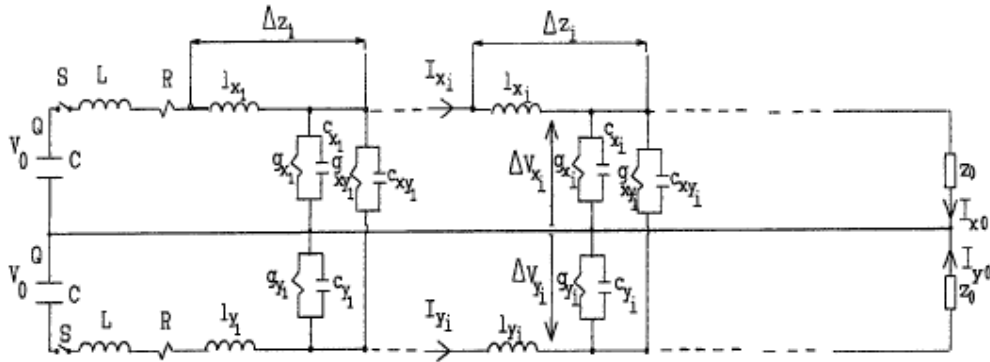
Σχήμα 2.4: Πυκνότητα ρεύματος A/m^2 στο ανθρώπινο σώμα κατά τη διάρκεια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (το ανθρώπινο σώμα θεωρείται, εκάστοτε, σε τομή): (a) μέσα από το κέντρο του σώματος $y=47\text{ cm}$ και $t=37,1\text{ ns}$, (b) μέσα από το κέντρο του σώματος $x=61\text{ cm}$ και $t=30,9\text{ ns}$ (c) μέσα από τους γοφούς $z=86\text{ cm}$ και $t=31,2\text{ ns}$ (d) μέσα από το δεξί χέρι $x=86,2\text{ cm}$ και $t=35,6\text{ ns}$ (e) μέσα από τα γόνατα $z=45\text{ cm}$ και $t=33,9\text{ ns}$ [15]

Στο Σχήμα 2.5 μπορούμε να δούμε τη χωρική κατανομή της απορροφούμενης ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα, σε διάφορες τομές, στο τέλος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



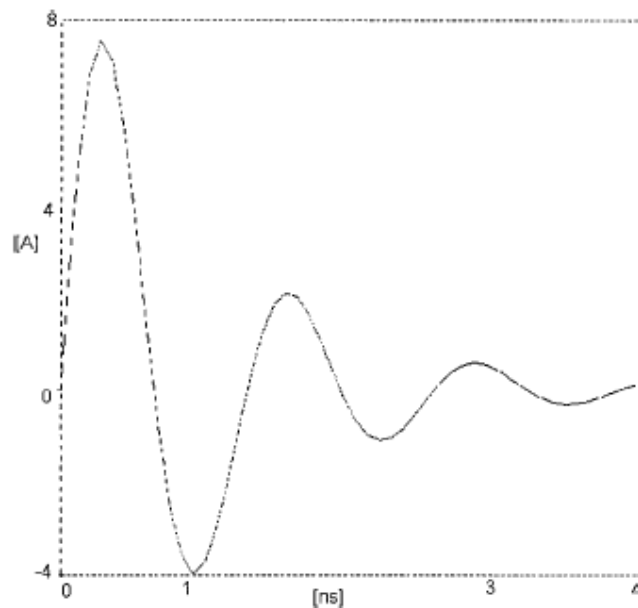
Σχήμα 2.5: Χωρική κατανομή της απορροφούμενης ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα, σε διάφορες τομές, στο τέλος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. (a) μέσα από το κέντρο του σώματος $x=61,02 \text{ cm}$ (b) μέσα από το δεξί χέρι $x=86,2 \text{ cm}$ (c) μέσα από το κέντρο του σώματος $y=46,44 \text{ cm}$ (d) μέσα από τους ώμους $z=130,14 \text{ cm}$ (e) μέσα από τον κορμό $z=95,58 \text{ cm}$ (f) μέσα από τα πόδια $z=1,62 \text{ cm}$ [15]

Άρθρο της **Concettina Buccella** [16] προτείνει ένα ηλεκτρικό ανάλογο με το οποίο προσομοιώνει τις εξισώσεις του Maxwell σε διαφορική μορφή και να αναλύσει το πρόβλημα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πάνω σε σύνθετα υλικά. Το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από αγωγιμότητες, αυτεπαγωγές, και χωρητικότητες, των οποίων οι τιμές συσχετίζονται με τα φυσικά χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού. Δίνοντας τις εξής τιμές $C=4$ pF, $R=20$ Ω και $L=10$ nH, και για τάση $V=500$ V, η συγγραφέας υπολόγισε ότι $I_p=7.8$ A, $t_r=0.35$ ns. Το Σχήμα 2.6 δείχνει το χρησιμοποιηθέν κύκλωμα.



Σχήμα 2.6: Μοντέλο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε σύνθετο υλικό [16]

Η καταγραφείσα κυματομορφή φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Τυπικό ρεύμα εκφόρτισης, για $V= 500$ V, $C= 4$ pF, $R= 20$ Ω και $L= 10$ nH [16]

Οι **Zhiyong Yuan**, **Tun Li**, **Jinliang He**, **Shuiming Chen**, **Weiyuan Chen** και **Rong Zeng** αναφέρουν [17] ότι, οι περισσότερες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχουν κατασκευαστεί για να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές που αναφέρονται στο

Πρότυπο EN 61000-4-2 [8], το οποίο διευκρινίζει λίγες από τις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος: υπενθυμίζεται ότι, αυτές είναι ο χρόνος ανόδου (*Rise Time*), η μέγιστη τιμή του ρεύματος (I_{max}), η τιμή του ρεύματος 30 ns αφότου το ρεύμα έχει υπερβεί το 10% του I_{max} (I_{30}) και η τιμή του ρεύματος 60 ns αφότου το ρεύμα έχει υπερβεί το 10% του I_{max} (I_{60}). Επίσης, αν και το HUMAN BODY MODEL διευκρινίζεται στο Πρότυπο EN 61000-4-2 [8], δεν ορίζεται ακόμα η μαθηματική περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος (την περίοδο που γράφεται το άρθρο δεν είχε συμπεριληφθεί ακόμα μαθηματική περιγραφή η οποία εντάχθηκε στο Πρότυπο μόλις το 2009). Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να διαταράξει ένα ηλεκτρονικό σύστημα, όχι μόνο εξαιτίας του μεταβατικού ρεύματος εξ επαφής, αλλά και εξαιτίας του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Παρόλα αυτά, το μεταβατικό αυτό πεδίο δεν προσδιορίζεται στο Πρότυπο [8] για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι ίδιοι ερευνητές αξιολογούν τον «σύνθετο μαθηματικό τύπο ο οποίος χρησιμοποιείται, συχνά, για την περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης» (αυτός που έμελλε μετά να συμπεριληφθεί στο πρότυπο) ως μη κατάλληλο, επειδή η χρονική παράγωγος του δεν ανταποκρίνεται στη φυσική πραγματικότητα: όπως αναφέρουν οι ίδιοι ερευνητές και στο άρθρο τους [18] η τιμή της παραγωγού του ρεύματος για $t=0$ δεν είναι μηδέν.

Στο [19] αναφέρεται, ότι, αν και οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγονται από διάφορους κατασκευαστές συμμορφώνονται με το Πρότυπο [8], ο υπό δοκιμή εξοπλισμός (EUT) μπορεί να περνάει ή όχι τη δοκιμή σε διαφορετικά επίπεδα τάσης εκφόρτισης ανάλογα με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που χρησιμοποιείται, κάτι το οποίο, ενδεχομένως, θα πρέπει να αποδοθεί στην, ανά γεννήτρια, διαφορετική εκπεμπόμενη ενέργεια, ή / και πεδίο.

Στο [18] αναφέρεται επίσης ότι η κυματομορφή του ρεύματος συνεισφέρει μόνο κατά ένα μέρος στη διαταραχή που προκαλείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, καθώς σε πολλές περιπτώσεις, η μεταβατική παρεμβολή των πεδίων είναι η κυρίαρχη διαταραχή. Συνεχίζοντας, στο ίδιο άρθρο, αναφέρουν ότι, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες μαθηματικές περιγραφές, σύμφωνα με το Πρότυπο [8] όπως: μια τετραπλο-εκθετική συνάρτηση, μια γκαουσιανή συνάρτηση, τη διωνυμική βηματική συνάρτηση, αλλά και μια σύνθετη μαθηματική περιγραφή, προερχόμενη από την πρότυπη μαθηματική έκφραση του κεραυνού (εξίσωση του Heidler). Οι αναφερθείσες μαθηματικές περιγραφές φαίνονται αντίστοιχα στις εξισώσεις (2.1) έως (2.4).

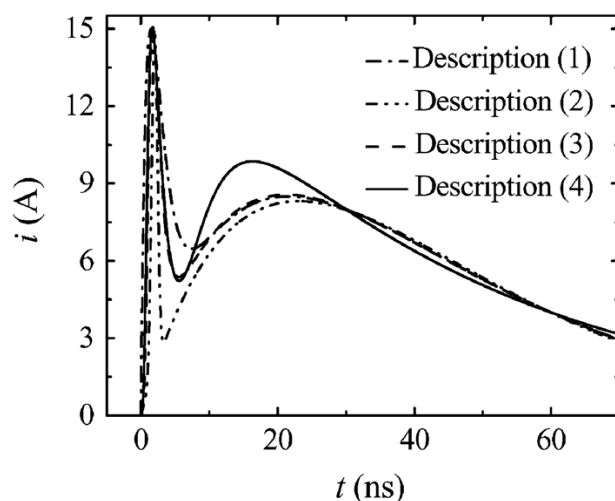
$$i(t) = 498(e^{-t/1.4} - e^{-t/1.3}) + 148.5(e^{-t/23.37} - e^{-t/20}) \quad (2.1)$$

$$i(t) = 13.25 \exp[-(t - 2/0.6)^2] + 391t \exp[-(t - 300/122.2)^2] \quad (2.2)$$

$$i(t) = 106.5(1 - \exp[-t/0.62])^8 \exp[-t/1.1] + 60.5(1 - \exp[-t/55]) \exp[-t/26] \quad (2.3)$$

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp[t/\tau_2] + \frac{i_2}{k_2} \frac{(t/\tau_3)^n}{1 + (t/\tau_3)^n} \exp[t/\tau_4] \quad (2.4)$$

Οι κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για καθεμία από τις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις φαίνονται στο Σχήμα 2.8.



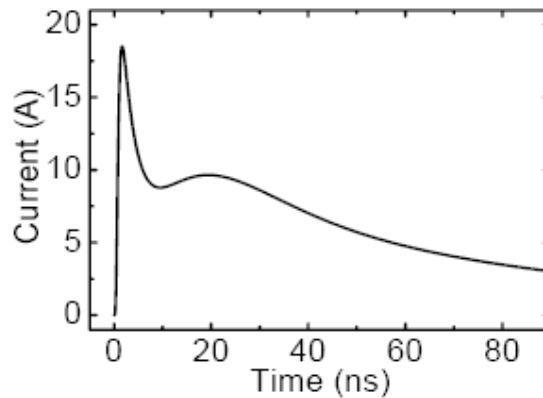
Σχήμα 2.8: Κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για τις μαθηματικές περιγραφές 2.1 - 2.4 [18]

Επιπλέον, οι ίδιοι στο άρθρο τους [17] για την ανάλυση της επίδρασης της κυματομορφής της πηγής ρεύματος, παραγοντοποίησαν μια μαθηματική εξίσωση για να αναπαραστήσουν την κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτή η κυματομορφή του ρεύματος περιγράφεται ως μια εξαπλο-εκθετική συνάρτηση:

$$i(t) = I_0(1 - \exp[-t/\tau_1])^p \exp[-t/\tau_2] + I_1(1 - \exp[-t/\tau_3])^q \exp[-t/\tau_4] + I_2(1 - \exp[-t/\tau_5])^r \exp[-t/\tau_6] \quad (2.5)$$

με παραμέτρους, $I_0=31$, $\tau_1=0.4$, $\tau_2=3.708$, $p=5.93$, $I_1=100$, $\tau_3=30$, $\tau_4=10.91$, $q=2$, $I_2=10$, $\tau_5=10$, $\tau_6=74.76$, $r=2$.

Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης που έλαβαν στην περίπτωση μιας τέτοιας πηγής φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης [17]

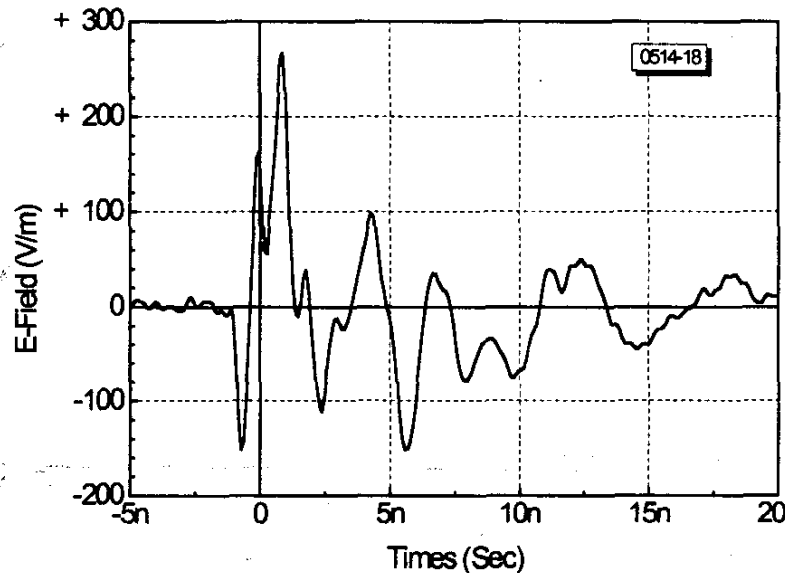
Από το Σχήμα 2.9 προκύπτουν οι τιμές $I_p=18.5$ A, $t_r=1$ ns, $I_{30ns}=6.5$ A και $I_{60ns}=2.7$ A. Στην προσομοίωση FDTD, το πλέγμα είχε διαστάσεις $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν έναν υπολογιστή Pentium 4 1.7 GHz, ο οποίος εκτελούσε τον κώδικα FDTD.

2.3 Μετρήσεις

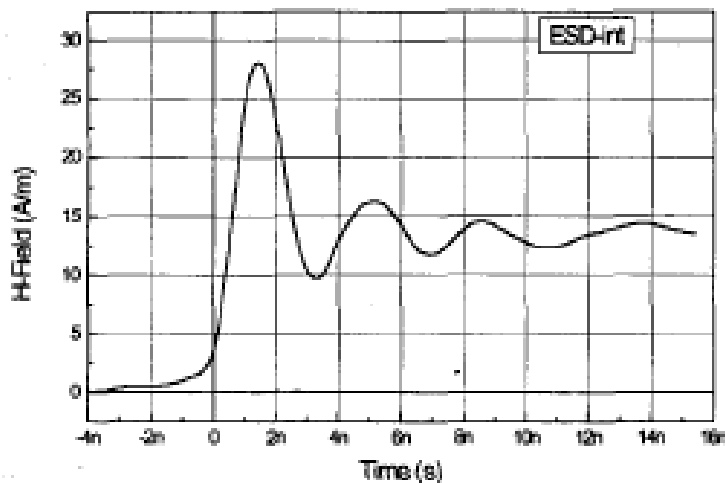
2.3.1 Προσομοιωτές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι **Huang Jiu-Sheng, Liu Fang, Deng Qi-Bin** και **Liu Pei-Zhu** [19] αναφέρουν ότι, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι μια από τις πιο κοινές επιβλαβείς ηλεκτρομαγνητικές πηγές στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, αλλά η εξέταση του ηλεκτρομαγνητικού της πεδίου είναι πολύ δύσκολη, γιατί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι μια μεταβατική διαδικασία που διαρκεί πάρα πολύ μικρό χρόνο. Ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης είναι μικρότερος από 1 ns και η διάρκεια της εκφόρτισης μικρότερη από 1 μ s. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, τους το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση 10 cm από άνθρωπο που κρατά ένα μεταλλικό αντικείμενο με δυναμικό 2 kV το οποίο εκφορτίζεται στο έδαφος είναι $E_{pp}=410$ V/m και το μαγνητικό πεδίο είναι $H_{pp}=28$ A/m σε απόσταση 3 cm από την εκφόρτιση. Επίσης, το εύρος συχνοτήτων είναι **εξαιρετικά μεγάλο**, και κυμαίνεται από μερικά MHz έως πέραν του 1 GHz. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν μια μονοπολική κεραία μήκους 10 mm με εύρος ζώνης 12 GHz και μια βροχοειδή κεραία, με διάμετρο βρόχου 10 mm, η οποία ήταν προστατευμένη από το ηλεκτρικό πεδίο καθώς και ένα ψηφιακό παλμογράφο εύρους ζώνης 1.5 GHz. Με δεδομένο το εύρος ζώνης του χρησιμοποιηθέντος παλμογράφου συμπεραίνουμε ότι, οι μετρήσεις τους δεν πρέπει, πιθανότατα, να ήταν πολύ ακριβείς, ιδίως η μέτρηση του χρόνου ανόδου του ρεύματος

εκφόρτισης. Οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου φαίνονται στα Σχήματα 2.10 και 2.11.



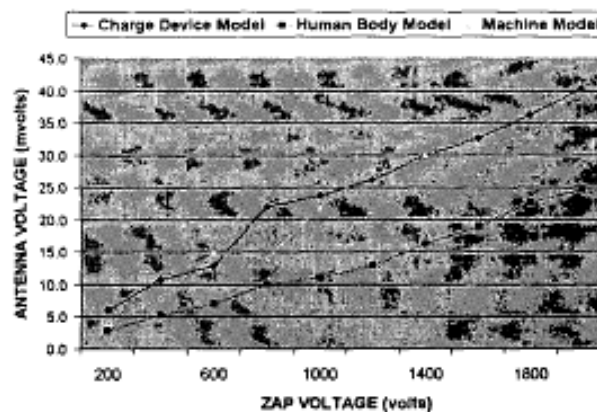
Σχήμα 2.10: Κυματομορφή του πεδίου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (2 kV, 10 cm, $E_{pp}=410$ V/m) [19]



Σχήμα 2.11: Η κυματομορφή του μαγνητικού πεδίου (2 kV, 3 cm, $H_{pp}=28$ A/m) [19]

Σύμφωνα με τους **Jesus L. Muñoz, Jonah Tan, Carlito Adriano, Erwin Roldan, και Jack Sadie** [20], λόγω της φύσης του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (είναι πολύ γρήγορο και εμφανίζεται σποραδικά στη φύση), ο εντοπισμός του με ακρίβεια είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Ένα συμβάν ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πραγματοποιείται, κατά τους συγγραφείς του άρθρου, σε 100 ns ή λιγότερο και αυτό δημιουργεί μια απότομη έκρηξη ενέργειας, γνωστή, επίσης, ως ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (EMI). Η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 10

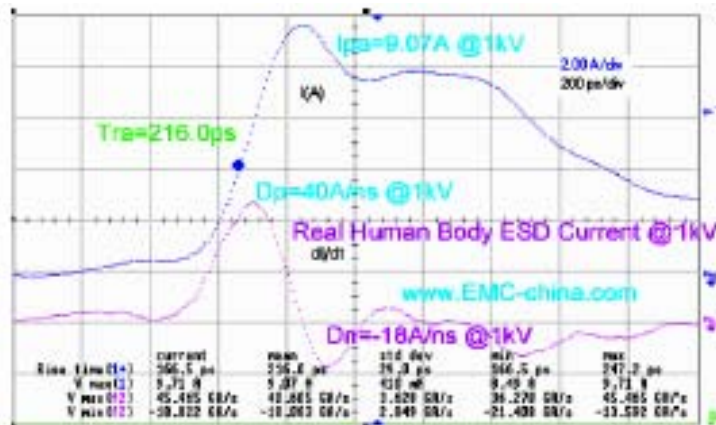
MHz και 2 GHz, σύμφωνα με τους συγγραφείς, και μπορεί να εντοπισθεί με ένα γρήγορο ψηφιακό παλμογράφο και μια βροχοειδή κεραία, η οποία, παρ' όλο που έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, εντοπίζει, αρκετά αποτελεσματικά, τα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η κεραία είναι κατασκευασμένη από ένα ομοαξονικό καλώδιο μήκους 2.5 m και ένα σύνδεσμο (connector) τύπου BNC. Ο βρόχος έχει διάμετρο 10 cm και η εν λόγω κεραία είναι τοποθετημένη κάθετα στην πηγή της ηλεκτροστατικής παρεμβολής για μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας. Κατασκευάζοντας, λοιπόν, μια τέτοια κεραία και χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, προσπάθησαν να αποδείξουν μια σχέση μεταξύ της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της πραγματικής αιχμής της τάσης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην εργασία τους αυτή χρησιμοποιούν ένα κύκλωμα παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, αντιστοίχων με τις παραγόμενες κατά τα τρία μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, χαρακτηριζόμενο ως Zapmaster Keytek 512 zapper. Διεπίστωσαν, λοιπόν, ότι, υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ των καταγραφόμενων τιμών από την κεραία και της τάσης φόρτισης του προσομοιωτή και για τα τρία μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Charged Device Model, Human Body Model, Machine Model). Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν ένα ψηφιακό παλμογράφο 500 MHz ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την κεραία. Στο Σχήμα 2.12 φαίνονται οι καταγραφόμενες τιμές τάσης από την κεραία, όπως αυτές εμφανίστηκαν στον συνδεδεμένο με αυτήν παλμογράφο, έναντι της τάσης φόρτισης του προσομοιωτή, για τα τρία μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 2.12: Γραφικές παραστάσεις των ενδείξεων της βροχοειδούς κεραίας σε σχέση με το πλάτος της τάσης φόρτισης, για τα τρία μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [20]

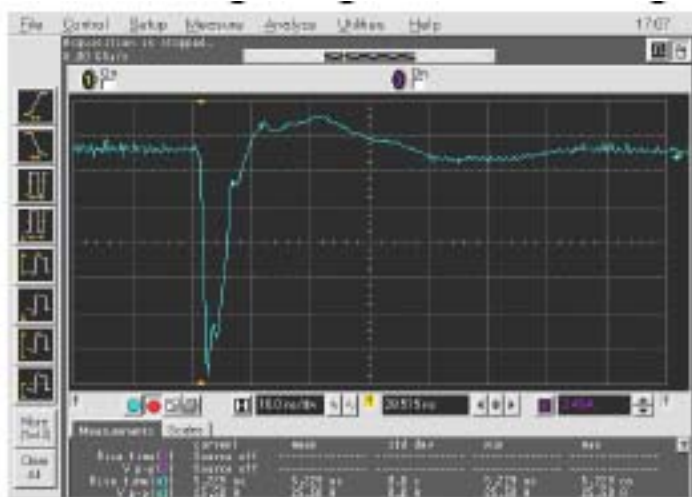
Οι **Jiusheng Huang, Liu Suling, Wang Xiqin, Zhou Feng, Wang και Langfeng, Gaoyougan** εισάγουν την έννοια του ρεύματος μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESDDC) [21]. Το εν λόγω ρεύμα “ρέει” μέσα στο χώρο προς όλα τα μέρη

του υπό δοκιμή εξοπλισμού, όταν συμβαίνει μια εκφόρτιση και συνεισφέρει, και αυτό, στην αστοχία του εξοπλισμού πέραν του ρεύματος εκφόρτισης και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που εκπέμπεται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους έδειξαν, ότι το ρεύμα αυτό είναι ένα κύριο χαρακτηριστικό της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, πέραν του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του ρεύματος εκφόρτισης. Θεωρούν, λοιπόν, ότι, το γεγονός ότι, η κανονική λειτουργία του ίδιου υπό δοκιμή εξοπλισμού διαταράσσεται σε διαφορετικές τάσεις φόρτισης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οφείλεται, εκτός από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, στο ρεύμα μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν ένα παλμογράφο 4 GHz, 20 GS/s και ημικυκλικούς βροχοειδείς αισθητήρες (probes). Ύστερα από μετρήσεις διεπίστωσαν ότι, για το μοντέλο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης άνθρωπος - μέταλλο και τάση 1000V, προκύπτουν οι τιμές $I_p=9.7$ A. και $t_r=0.21$ ns. Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται η κυματομορφή που κατέγραψαν η οποία συγκρίνεται με αυτή του προτύπου.



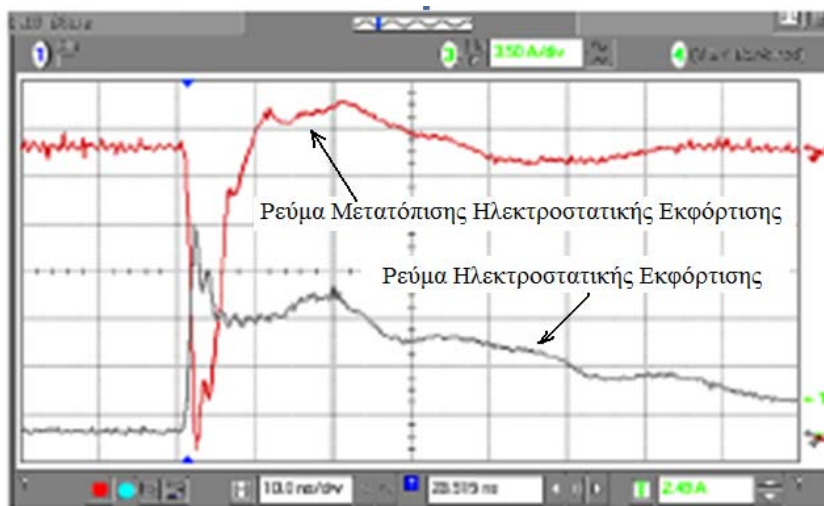
Σχήμα 2.13: Σύγκριση μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για πραγματική ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου μετάλλου και της αντίστοιχης του Προτύπου EN [21]

Η κυματομορφή του ρεύματος μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Κυματομορφή του ρεύματος μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [21]

Επίσης, παρατήρησαν ότι, η παράγωγος του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου ήταν 40 GA/s, 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του Προτύπου που είναι 4.2 GA/s, για την ίδια τάση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό καταδεικνύει και τη μεγάλη ταχύτητα μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου. Τέλος, έφθασαν στο συμπέρασμα ότι, το ρεύμα μετατόπισης, το οποίο είναι αποτέλεσμα της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο, ίσως έχει μεγαλύτερη κορυφή από το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Δύο κυματομορφές ρεύματος στην ίδια ηλεκτροστατική εκφόρτιση συγκρίνοντας: το ρεύμα μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [21]

Οι Zhang Xijun, Ruan Xiaofen, Liu Shanghe και Wei Ming [22] μελετούν την επίδραση του ηλεκτρονόμου της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στη δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Χρησιμοποιώντας ένα γειωμένο μεταλλικό πλέγμα, για να περιορίσουν την επίδραση του πεδίου που δημιουργείται από τον ηλεκτρονόμο (θεωρούν ότι) βελτιώνουν την προσομοίωση τους, η οποία (πιστεύουν ότι) ανταποκρίνεται περισσότερο στο πραγματικό φαινόμενο και ότι τα πειραματικά τους αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση αυτού του πλέγματος, μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που εισάγεται από τη συμπεριφορά του εσωτερικού ηλεκτρονόμου της γεννήτριας, χωρίς να επηρεάζεται το πεδίο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, την οποία θεώρησαν συνυπεύθυνη για συμβάντα αποτυχίας δοκιμαζόμενου εξοπλισμού. Οι συγγραφείς, για να λάβουν ακριβείς μετρήσεις πραγματοποίησαν το πείραμα 10 φορές με και 10 φορές χωρίς πλέγμα. Οι μετρήσεις που έλαβαν φαίνονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1: Μετρούμενες τιμές παραμέτρων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με πλέγμα [22]

ESD voltage [kV]	I_p [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]	t_r [ns]
2	7.06	3.48	2.65	0.894
4	14.08	8.36	3.85	0.896
6	21.99	12.46	5.74	0.911
8	28.65	15.80	8.86	0.896

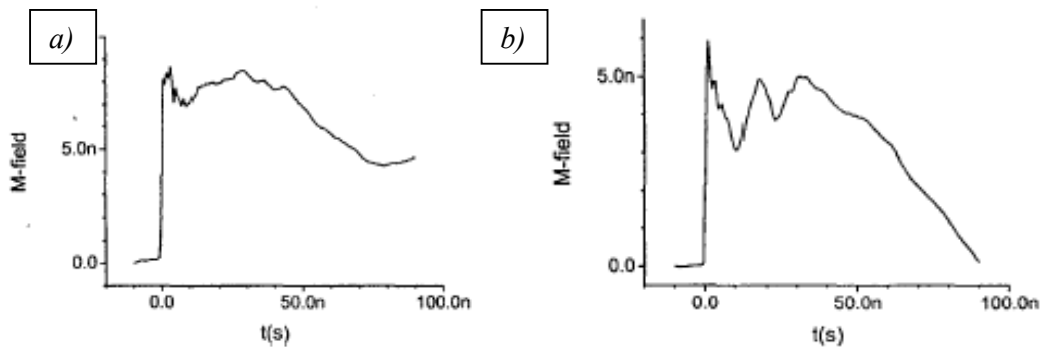
Πίνακας 2.2: Μετρούμενες τιμές παραμέτρων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χωρίς πλέγμα [22]

ESD voltage [kV]	I_p [A]	I_{30ns} [A]	I_{60ns} [A]	t_r [ns]
2	7.05	3.81	2.40	0.883
4	14.35	8.11	4.39	0.923
6	21.66	12.32	6.73	0.896
8	29.33	16.35	9.00	0.892

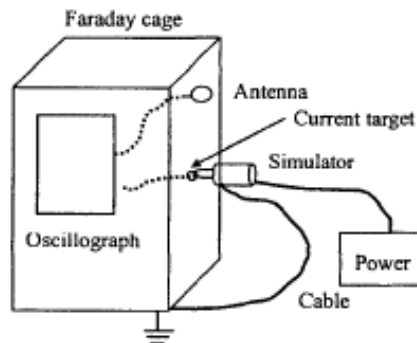
Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες παρατήρησαν ότι, οι παράμετροι του παραγομένου ρεύματος υπό της προστατευμένης και της μη προστατευμένης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές του Προτύπου EN 61000-4-2 [8] και συνεπέραναν ότι, το εν λόγω πλέγμα δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη

μορφή του ρεύματος που προκαλείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Επίσης, παρατήρησαν ότι, οι κυματομορφές του μαγνητικού πεδίου, πριν και μετά την τοποθέτηση του πλέγματος, διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και ότι, στην περίπτωση της προστατευμένης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το πλάτος της κυματομορφής του μαγνητικού πεδίου μειώνεται, εξασθενεί γρηγορότερα μετά από 50 ns και μειώνεται στο μηδέν στα 100 ns, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.16.

Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ένα κλωβό Faraday, σε πλευρικό τοίχωμα του οποίου ήταν τοποθετημένος ο στόχος της εκφόρτισης, μια κεραία στο πίσω μέρος του κλωβού, τα καλώδια εξόδου και έναν παλμογράφο 1 GHz, ο οποίος βρισκόταν μέσα στον κλωβό. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είχε τη δυνατότητα να παράγει τάση εύρους 0.2 kV÷30 kV. Σχηματικά η παραπάνω διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.16: Κυματομορφή μαγνητικού πεδίου a)) μη προστατευμένης και b) προστατευόμενης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [22]



Σχήμα 2.17: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και πεδίου [22]

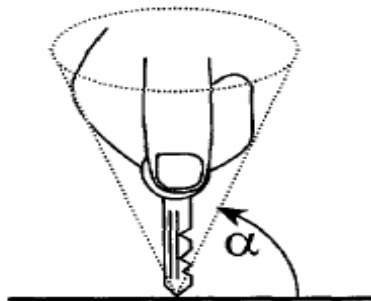
Οι **P.Wilson** και **M.T.Ma** [23] αναφέρουν ότι, έχει δοθεί μεγάλη σημασία στις κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης και όχι στα εκπεμπόμενα πεδία, κατά τη

διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το λόγο αυτό, στο άρθρο τους χρησιμοποιούν ένα, σχετικά απλό, διπολικό μοντέλο για το ηλεκτρικό τόξο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με σκοπό να προβλέψουν τα εκπεμπόμενα πεδία. Ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιούν αποτελείται από μια κεραία ευρέος φάσματος, για τη μέτρηση των πεδίων, συνδεδεμένη με ένα ψηφιακό παλμογράφο 1 GHz, και ένα υπολογιστή. Στη συνέχεια, οι μετρούμενες κυματομορφές του ρεύματος εφαρμόζονταν στο διπολικό μοντέλο, με σκοπό την πρόβλεψη των πεδίων. Οι μετρούμενες και προβλεφθείσες τιμές έδειξαν να συμφωνούν αρκετά. Ισχυρίζονται ότι, το πιο συνηθισμένο λάθος που γίνεται στη μέτρηση του πεδίου, είναι η έλλειψη απομόνωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κεραία, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πεδίου να μην λαμβάνει μόνο το πεδίο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αλλά και το πεδίο που δημιουργείται από την ίδια τη γεννήτρια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το λόγο αυτό, στο πείραμά τους θωράκισαν τη γεννήτρια.

Ο **Michael Mardigian**, όμως, σε άρθρο του [24] - απάντηση στο άρθρο των P.Wilson και M.T.Ma [23] καθιστά σαφές ότι, πομπός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν είναι μόνο το ηλεκτρικό τόξο, αλλά ολόκληρο το κύκλωμα, αποτελούμενο από τη γεννήτρια, την κεφαλή εκφόρτισης, το στόχο και την ταινία γείωσης. Τούτο ισχύει και σε μια πραγματική εκφόρτιση, όπου ολόκληρη η δομή (χέρι, σώμα, κέλυφος του υπό δοκιμή εξοπλισμού) που φέρει το ρεύμα εκπέμπει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

2.3.2 Πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι **David Pommerenke** και **Martin Aidam** [25], με σκοπό να αποσαφηνίσουν τις παραμέτρους που ορίζουν τα ρευμάτα εκφόρτισης που προέρχονται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις χρησιμοποίησαν κωνικό μοντέλο προσέγγισης της αντίστασης του τόξου. (Σχήμα 2.18).



Σχήμα 2.18: Κωνικό μοντέλο προσέγγισης [25]

Κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα :

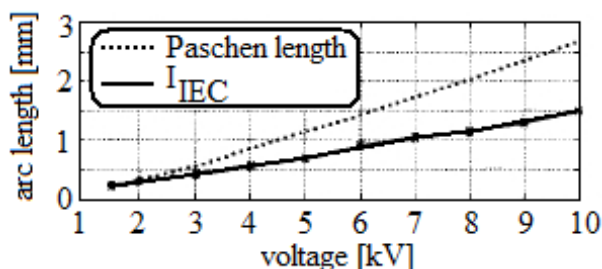
Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επηρεάζεται από :

1. Το σχετικό μήκος του τόξου

Το μήκος του τόξου εξαρτάται από τη στατική απόσταση εκφόρτισης και την «ελάττωση μήκους διακένου».

Η «ελάττωση μήκους διακένου» (reduction gap distance) είναι συνάρτηση της ταχύτητας προσέγγισης της μεταλλικής ακίδας προς το σημείο εκφόρτισης.

Για την περίπτωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος όταν ο γειωμένος στόχος εκφόρτισης έχει προσεγγιστεί γρήγορα, διαπιστώνεται ότι το μήκος του σχετικού τόξου είναι περίπου το μισό από το θεωρητικό μήκος τόξου που υπολογίζεται με τη βοήθεια του Νόμου του Paschen (για μηδενική ταχύτητα), για τάση φόρτισης 10 kV. (Σχήμα 2.19)



Σχήμα 2.19: Υπολογισμένο μήκος τόξου, για χρόνο ανόδου I_{ns} , σε σύγκριση με μήκος τόξου, που προκύπτει από εκφόρτιση χωρίς κίνηση των ακροδεκτών (νόμος του Paschen) [25]

Να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός του μήκους τόξου στην εν λόγω πειραματική διάταξη έγινε με τη βοήθεια ειδικού αισθητήρα. Το σφάλμα του μηχανισμού ήταν 3%.

2. Την τάση φόρτισης

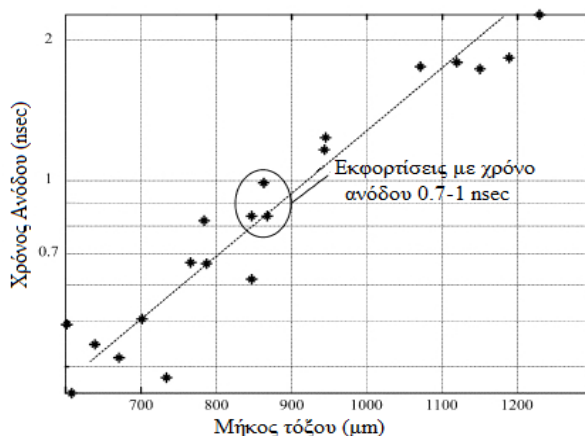
3. Το μήκος της ακίδας

Παρατηρήθηκε ότι, κρατώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους, αν μεταβάλλεται το μήκος και η διάμετρος του μεταλλικού αντικειμένου το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης επηρεάζεται άμεσα. Σε πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, μεταλλική λαβίδα και, στη συνέχεια, τυπικό μεταλλικό δοχείο (κουτάκι) αναψυκτικού. Παρατηρήθηκε ότι, οι κορυφές των ρευμάτων εκφόρτισης του μεταλλικού δοχείου αναψυκτικού ήταν μεγαλύτερες από αυτές της λαβίδας. (Πίνακας 2.3).

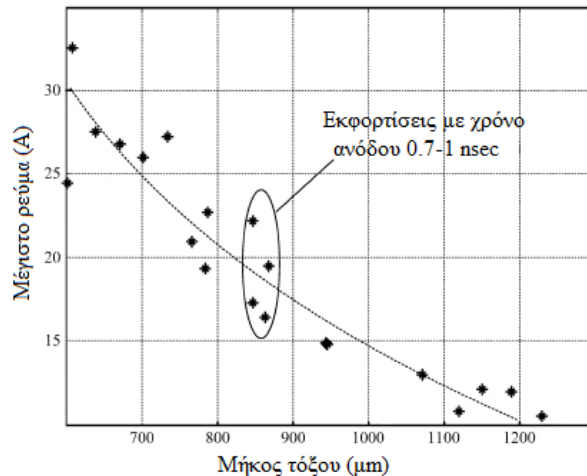
Πίνακας 2.3: Πίνακας μεγίστων ρευμάτων, για λαβίδα και τυπικό κουτάκι αναψυκτικού [25]

Μήκος τόξου (mm)	Κορυφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (A)	
	Μεταλλική λαβίδα	Μικρό μεταλλικό δοχείο αναψυκτικού
0.01	7.24	34.3
0.03	6.62	29.7
0.05	6.03	25.0
0.07	5.49	21.1
0.09	0.05	17.9
0.11	4.66	15.3
0.13	4.29	13.1

Σε άλλο άρθρο του ο **David Pommerenke** [26] έκρινε, ως καλύτερη μέθοδο προσέγγισης της καμπύλης του τόξου εκφόρτισης, τη διαφορική εξίσωση του Rompe and Weizel [14] για τάσεις φόρτισης όμως άνω των 2 kV. Συμπλήρωσαν, ότι κάτω των 2 kV είναι αρκετά δυσχερής η οποιαδήποτε μαθηματική προσέγγιση καθώς έχουμε πολύ μικρό μήκος τόξου και ο ιονισμός της εκκένωσης σε αυτήν την περίπτωση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το υλικό της καθόδου παρά από τον τύπο αερίου του διακένου όπως συμβαίνει στις πιο ψηλές τάσεις. Στο ίδιο άρθρο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι γραφικές παραστάσεις του χρόνου ανόδου συναρτήσει του μήκους τόξου (Σχήμα 2.20) καθώς και του μεγίστου ρεύματος εκφόρτισης συναρτήσει του μήκους τόξου (Σχημα 2.21). Το εύρος τιμών του χρόνου ανόδου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.20 είναι 600-1300 ps (για 5 kV και 850 μm μήκος τόξου). Αντίστοιχα το εύρος τιμών της μεγίστου τιμής του ρεύματος εκφόρτισης είναι 10-35 A όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21.



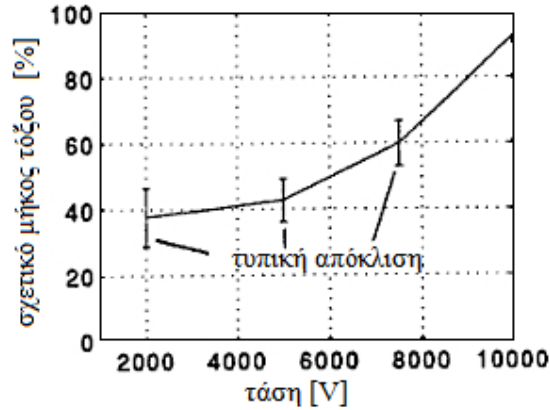
Σχήμα 2.20: Γραφική παράσταση του χρόνου ανόδου συναρτήσει του μήκους τόξου στα 5 kV [26]



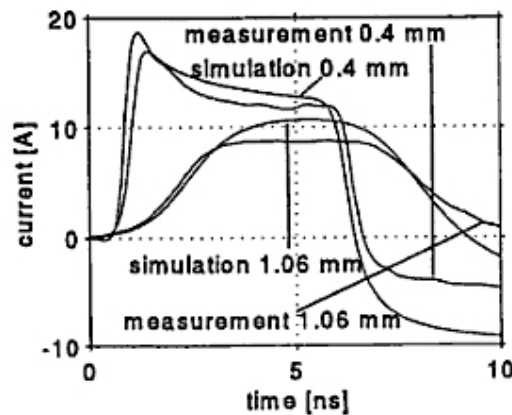
Σχήμα 2.21: Γραφική παράσταση του μεγίστου ρεύματος εκφόρτισης συναρτήσει του μήκους τόξου στα 5 kV [26]

Επίσης ο **David Pommerenke** σε ένα τρίτο άρθρο του [27] διαχωρίζει σε ομάδες το φαινόμενο ESD βάσει του μήκους τόξου:

- «Ελάχιστη» εκφόρτιση (minimum ESD)
Ορίζεται ως η εκφόρτιση που χαρακτηρίζεται από μήκος τόξου που είναι ισοδύναμο με το μήκος τόξου (Paschen's Law) που αντιστοιχεί σε εκφόρτιση με ακίνητο ηλεκτρόδιο. Αυτό το μήκος τόξου είναι το μεγαλύτερο δυνατό μήκος τόξου που μπορούμε να συναντήσουμε σε ESD. Μεγαλύτερο μήκους τόξου συνεπάγεται μικρότερη τιμή του μεγίστου ρεύματος εκφόρτισης. Η συγκεκριμένη μάλιστα κατηγορία ESD έχει την μικρότερη πιθανότητα να προκαλέσει πρόβλημα σε μια κυκλωματική διάταξη.
- «Κανονική» εκφόρτιση (normal ESD)
Υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και αναπτύσσοντας ορισμένη ταχύτητα προσέγγισης έχουμε μικρότερο μήκος τόξου από την περίπτωση του ακίνητου ηλεκτροδίου. Η διαφοροποίηση του μήκους τόξου μιας «κανονικής» εκφόρτισης από μία «ελάχιστη» οφείλεται σε παράγοντες όπως η υγρασία, η πίεση και η ταχύτητα προσέγγισης. Η συμπεριφορά αυτή του μήκους προσδιορίζεται ποσοτικά στο Σχήμα 2.22. Συγκεκριμένα το σχετικό μήκος τόξου είναι στο 93% για τάση φόρτισης 10 kV και στο 43% για τάση 5 kV. Μια τυπική «κανονική» κυματομορφής εκφόρτισης και μία «ελάχιστη» φαίνονται στο Σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.22: Γραφική παράσταση του σχετικού μήκους τόξου συναρτήσει της τάσης φόρτισης. Το σχετικό μήκος τόξου ορίζεται από το λόγο του μήκους τόξου της κανονικής εκφόρτισης προς το μήκος τόξου της ελαχίστης εκφόρτισης (ταχύτητα προσέγγισης 3cm/s, διάμετρος μεταλλικής ακίδας 6mm, σχετική υγρασία 40%, θερμοκρασία 20° C) [27]



Σχήμα 2.23: Γραφικές παράστασεις πειραματικής και θεωρητικής εκφόρτισης για διαφορετικά μήκη τόξου. Τα 0.4 mm αντιστοιχούν σε «κανονική» εκφόρτιση, ενώ το 1.6 mm θεωρείται «ελάχιστη» εκφόρτιση [27]

- «Μέγιστη» εκφόρτιση (maximum ESD)
Ορίζεται ως η εκφόρτιση που έχει μήκος τόξου που είναι μικρότερο του 30% του ισοδύναμου στατικού μήκους τόξου. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή τη κατηγορία εκφορτίσεων οι ιδιότητες του τόξου προσεγγίζονται με ένα ιδανικό διακόπτη. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται για τάσεις φόρτισης μικρότερες των 200 V.

Κατά τον **Jon Barth** [28], τα υπάρχοντα Πρότυπα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι βασισμένα στις μετρήσεις που έγιναν 20 έτη πριν, με όργανα που, μετά βίας, θα θεωρούσαμε ακριβή σήμερα. Τα κυκλώματα που σχεδιάζονται, ακόμα και σήμερα, και

αποτελούν ακόμα τη βάση του σημερινού εξοπλισμού δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι βασισμένα σε εκείνες τις μετρήσεις. Επιπλέον, καθώς τα ολοκληρωμένα κυκλώματα έγιναν πολυπλοκότερα, με περισσότερες συνδέσεις με τον εξωτερικό κόσμο, ο αριθμός των ακίδων (pins) που πρέπει να εξετασθούν έχει αυξηθεί. Η ορισμένη από το Πρότυπο [8] κυματομορφή του οργάνου δοκιμής άλλαξε για να προκαλείται η ελάχιστη παραμόρφωση σε αυτήν. Ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης, που παρατηρήθηκε σε πραγματικά συμβάντα και ήταν μικρότερος από 1 ns, επιβραδύνθηκε συμβατικά στα 2 ± 10 ns για να αποτρέψει την ταλάντωση της κυματομορφής κατά τον έλεγχο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτές και άλλες υποθέσεις, που έγιναν τότε, αγνόησαν μερικές από τις πραγματικές παραμέτρους, που υπάρχουν στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Οι μετρήσεις των πραγματικών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, επίσης, αποκάλυψαν ότι, η υγρασία που υπάρχει στον αέρα έχει σημαντική επίδραση στο πλάτος του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (για δεδομένη τάση, όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας, τόσο αυξάνει η κορυφή του ρεύματος).

Οι **Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka** [29], με σκοπό να αποσαφηνίσουν τη συμπεριφορά των ρευμάτων εκφόρτισης των προερχομένων από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις χαμηλής τάσης, χρησιμοποίησαν ένα ψηφιακό παλμογράφο 6 GHz και μέτρησαν, μέσω ενός μετρητικού στοιχείου 50 Ω με σύνδεση τύπου SMA, τα ρεύματα εκφόρτισης τα προκαλούμενα από την επαφή ενός μεταλλικού στοιχείου που κρατάει ένας άνθρωπος, φορτισμένος με τάση που κυμαίνεται από 200 V έως 2000 V. Παρατηρήθηκε ότι, για τάσεις φόρτισης χαμηλότερες των 600 V, η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου παρέμενε σχεδόν σταθερή, ενώ για τάσεις μεγαλύτερες των 600 V μειωνόταν, κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από έναν εμπειρικό τύπο βασισμένο στο νόμο του Paschen:

$$E_s = \frac{V_c}{V_c - V_0} \times E_0, \quad (2.6)$$

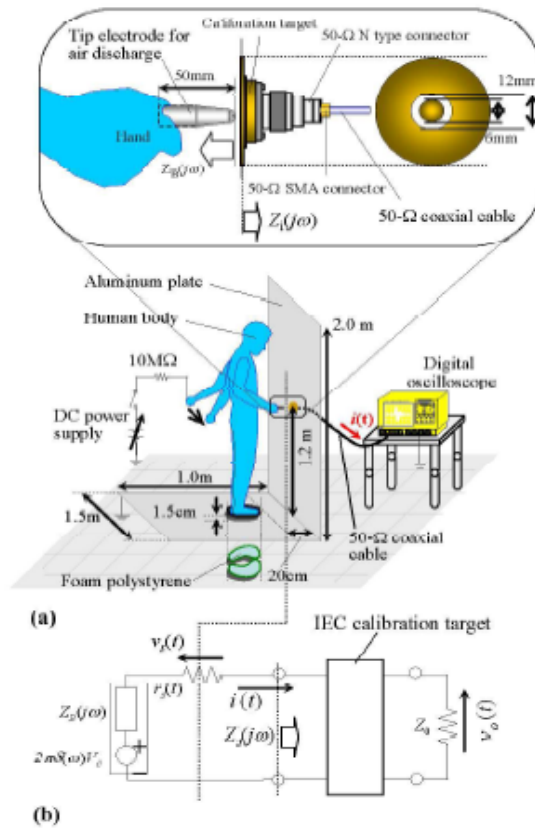
όπου $E_0 = 8.8425 \times 10^6 [V/m]$ και $V_0 = 376[V]$

Σημειώνεται ότι, μια δοκιμή ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο EN 61000-4-2 [8], πραγματοποιείται με εκφορτίσεις μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε εύρος τάσης από 2 kV έως 8 kV, παρόλο που η φόρτιση ενός ανθρώπου κυμαίνεται από λίγα Volt έως και δεκάδες kV. Στη συνέχεια με ένα ψηφιακό παλμογράφο 12 GHz μετρήθηκαν τα ρεύματα εκφόρτισης ενός φορτισμένου ανθρώπου υπό τάση που

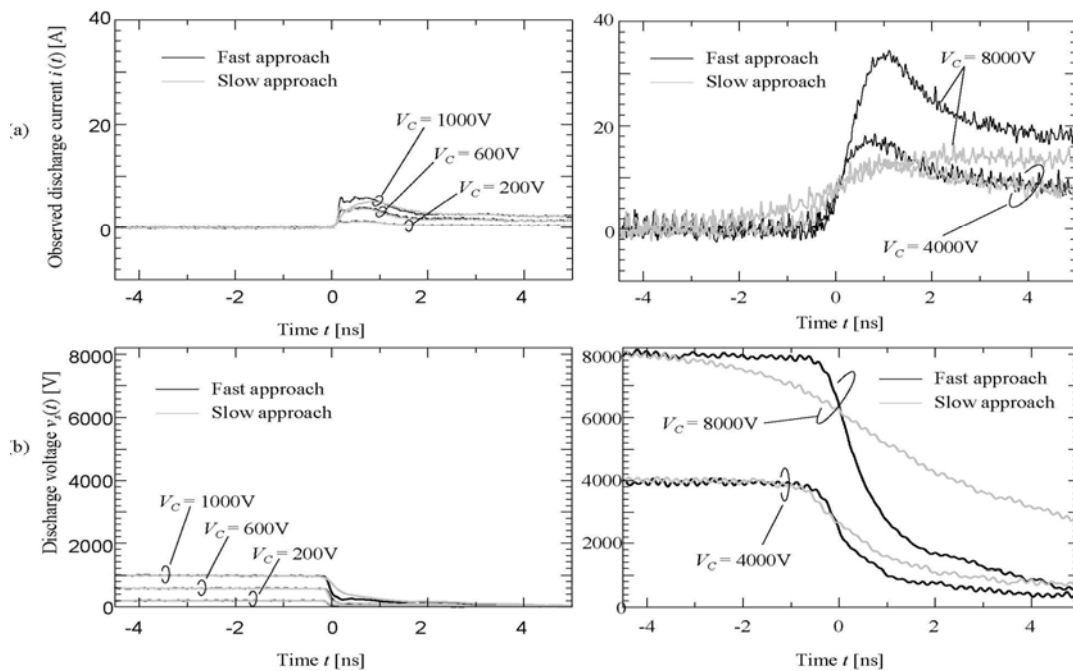
κυμαινόταν από 200 V έως 8000 V καλύπτοντας, έτσι, το εύρος που ορίζει η δοκιμή ατρωσίας [2] σε ένα πρότυπο στόχο, και δείχθηκε η εξάρτηση του πεδίου από την τάση, για ένα μεγάλο εύρος της. Επίσης, διαπιστώθηκε η μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης, του μεταλλικού στοιχείου στο μετρητικό στοιχείο, δίνει ρεύμα εκφόρτισης μεγαλύτερης τιμής και βραχύτερο χρόνο ανόδου, για τάσεις άνω των 1000 V. Επίσης παρατηρήθηκε ότι, η ταχύτητα προσέγγισης δεν επηρεάζει τα ρεύματα εκφόρτισης για τάσεις κάτω από 1000 V, αν και, σύμφωνα με προηγούμενα άρθρα τους, τάση περίπου 800 V τα επηρέαζε σημαντικά, πράγμα που αποδόθηκε στο ότι τα ρεύματα εκφόρτισης, στα παλαιότερα άρθρα τους, μετρήθηκαν μέσω ενός πρότυπου στόχου εσωτερικής σύνθετης αντίστασης 1 Ω και όχι μέσω συνδέσμου αντίστασης 50 Ω (Pelegriini Target), όπως στο [29]. Σύμφωνα με τις μετρήσεις τους στην περίπτωση της ταχείας προσέγγισης και για τάση 4000 V προκύπτουν οι τιμές $I_p=16$ A, $t_r=0.5$ ns και για τάση 8000 V $I_p=35$ A, $t_r=0.7$ ns, ενώ στην περίπτωση της βραδείας προσέγγισης οι ίδιες παράμετροι παίρνουν τις τιμές $I_p=12$ A, $t_r=0.6$ ns και $I_p=18$ A, $t_r=0.8$ ns, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 2.24 φαίνεται η μετρητική διάταξη των Fujiwara και Taka η οποία αποτελείται από ένα ψηφιακό παλμογράφο 6 GHz, ένα ομοαξονικό καλώδιο 50 Ω, ένα μετρητικό στοιχείο τύπου SMA 50 Ω, μια πλάκα από αλουμίνιο, ένα ηλεκτρόδιο, του οποίου η αιχμή είχε σφαιρική απόληξη ακτίνας 4 mm και την τροφοδοσία συνεχούς τάσεως, η οποία φορτίζει το ανθρώπινο σώμα μέσω μιας αντίστασης 10 MΩ (η χρήση της αντίστασης επιβάλλεται για την ομαλή φόρτιση του ανθρώπινου σώματος). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.24 ο, ύψους 167 cm και βάρους 60 kg άνθρωπος, στέκεται πάνω σε πολυστυρόλιο. Στη συνέχεια χρησιμοποίησαν έναν πολύ πιο «γρήγορο» παλμογράφο (12 GHz), για να μετρήσουν τις παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κάτι που τους έδωσε τη δυνατότητα να μετρήσουν με καλή ακρίβεια το χρόνο ανόδου του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο Σχήμα 2.25 φαίνονται οι μετρούμενες κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης από 200 V έως 8000 V, καθώς και οι κυματομορφές των τάσεων εκφόρτισης που προέκυψαν από τις κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης.

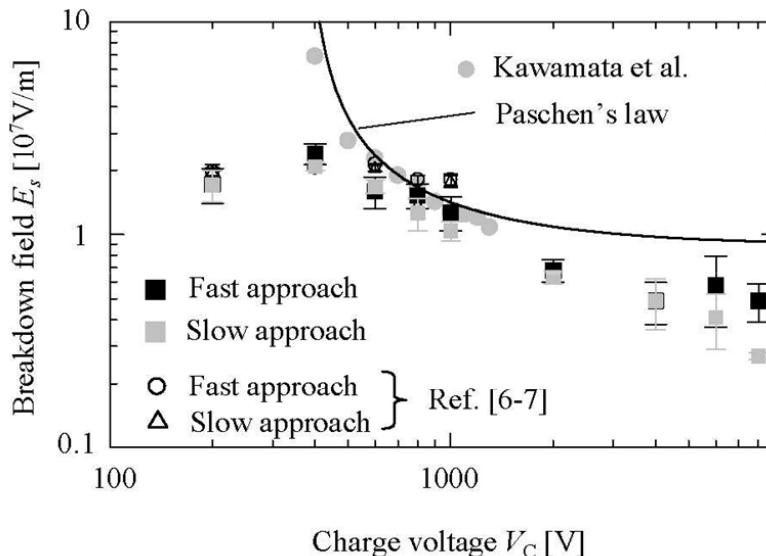


Σχήμα 2.24: Μετρητική διάταξη για (α) το ρεύμα εκφόρτισης και (β) το υπολογιστικό του μοντέλο [29]



Σχήμα 2.25: (α) Καταγεγραμμένες κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης και (β) εξαγόμενες κυματομορφές των τάσεων εκφόρτισης [29]

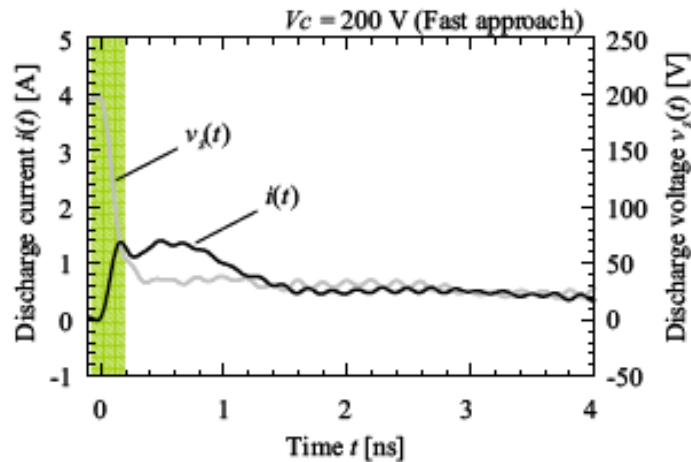
Στο Σχήμα 2.26 φαίνεται η εξάρτηση του πεδίου από την τάση φόρτισης. Οι γκρι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις που πραγματοποίησε ο **Kawamata** [30], ενώ η συνεχής γραμμή έχει υπολογισθεί με βάση το νόμο του Paschen.



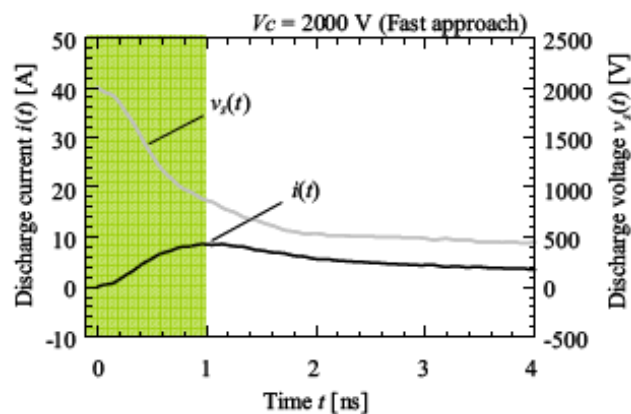
Σχήμα 2.26: Εξάρτηση του πεδίου κατάρρευσης E_s από την τάση φόρτισης [30]

Οι **Fujiwara** και **Taka** σε άλλο άρθρο τους [31] προσπαθούν να διευκρινίσουν την αρχική διαδικασία εκφόρτισης (ή, εναλλακτικά, τη διαδικασία σπινθήρα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων), με σκοπό να αποσαφηνίσουν το φαινόμενο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φορτισμένων κινούμενων σωμάτων, η οποία προκαλεί βλάβη στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Για το σκοπό αυτό, μέτρησαν το ρεύμα εκφόρτισης που προκαλείται από την επαφή ενός μεταλλικού αντικειμένου που κρατάει ένας φορτισμένος άνθρωπος, σε ένα πρότυπο στόχο. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα σε δύο μαθηματικούς τύπους που έχουν προταθεί από τους **Rompe-Weizel** [14] και **Toepler** [32], οπότε και επαληθεύθηκε η πειραματική τους διαπίστωση, κατά την οποία, στην αρχική φάση της διαδικασίας δημιουργίας σπινθήρα (δηλαδή πριν το ρεύμα εκφόρτισης λάβει τη μέγιστη τιμή του), η αγωγιμότητα του σπινθήρα αυξάνει με την αύξηση της τάσης. Το πείραμά τους πραγματοποιήθηκε 5 φορές για τις τάσεις 200 V και 2000 V και ευρέθηκε, όσον αφορά στη μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης του μεταλλικού στοιχείου στο μετρητικό στοιχείο, ότι ισχύει $I_p=1.4$ A, $t_r=0.25$ ns και $I_p=10$ A, $t_r=0.9$ ns αντίστοιχα. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων φαίνονται στα Σχήματα 2.27 και 2.28. Η πειραματική διάταξη είναι η ίδια

που χρησιμοποιήθηκε και στο άρθρο [29] και η οποία έχει, ήδη, προαναφερθεί (Σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.27: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για τάση 200 V [31]



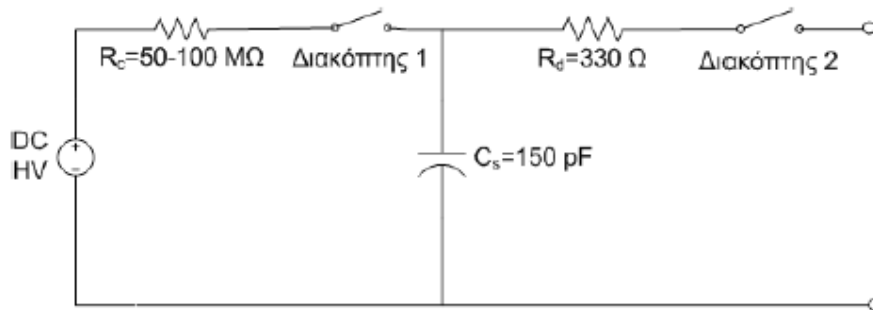
Σχήμα 2.28: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για τάση 2000 V [31]

2.4 Κυκλωματικά μοντέλα

2.4.1 Κυκλωματικό μοντέλο του Προτύπου

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο [8] βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model), στο Σχήμα, δε, 2.29 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της. Σύμφωνα με το [2], αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c ($50 \div 100 \text{ M}\Omega$), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s ($150 \text{ pF} \pm 10\%$) και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος ($330 \text{ }\Omega \pm 10\%$). Προσομοιώνεται, εδώ, η περίπτωση εκφόρτισης ανθρώπου σε μεταλλικό αντικείμενο, μέσω μιας μεταλλικής ράβδου, την οποία αυτός κρατά στο

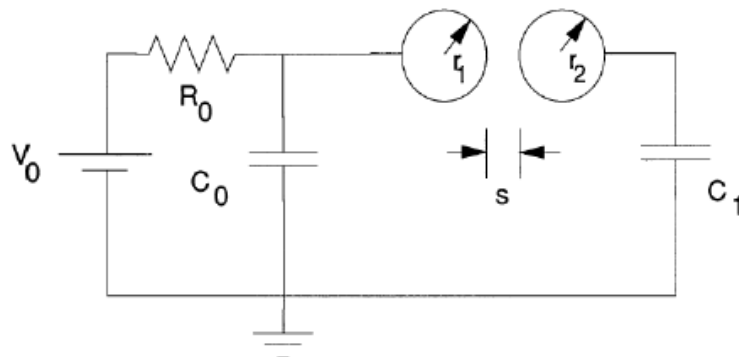
χέρι του. Γι' αυτό το λόγο όταν ένας άνθρωπος κρατάει ένα κομμάτι μετάλλου, το δέρμα επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα εκφόρτισης. Συνεπώς, όταν λάβει χώρα μία εκφόρτιση το τόξο θα προσπέσει στο μέταλλο και όχι στο δέρμα. Προφανώς R_d είναι η συνολική αντίσταση της επιδερμίδας και όχι μόνο της περιοχής κοντά στο σημείο της εκφόρτισης, γι' αυτήν, δε, επιλέχθηκε η τιμή των 330Ω , ενώ η τιμή της χωρητικότητας C_s είναι αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρώπινου σώματος.



Σχήμα 2.29: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [8]

2.4.2 Κυκλωματικά μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρία

Ο Greason [33] παρουσιάζει μια νέα τεχνική για την προσομοίωση της εκφόρτισης ενός ηλεκτροδίου με δεδομένη γεωμετρία. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση γίνεται κυκλωματικά, καθώς μια μεταβλητή πηγή συνεχούς ρεύματος (V_0) και ένα κύκλωμα RC τροφοδοτούν δύο μεταλλικές σφαίρες με διάκενο μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30. Το κύκλωμα αυτό προσομοιώνει την προσέγγιση δύο φορτισμένων σωμάτων. Ο έλεγχος των R_0 , C_0 , C_1 , V_0 του κυκλώματος δίνει τη δυνατότητα μελέτης ταχυτήτων προσέγγισης των δύο φορτισμένων σωμάτων, μεταξύ 1 και 100 cm/s.



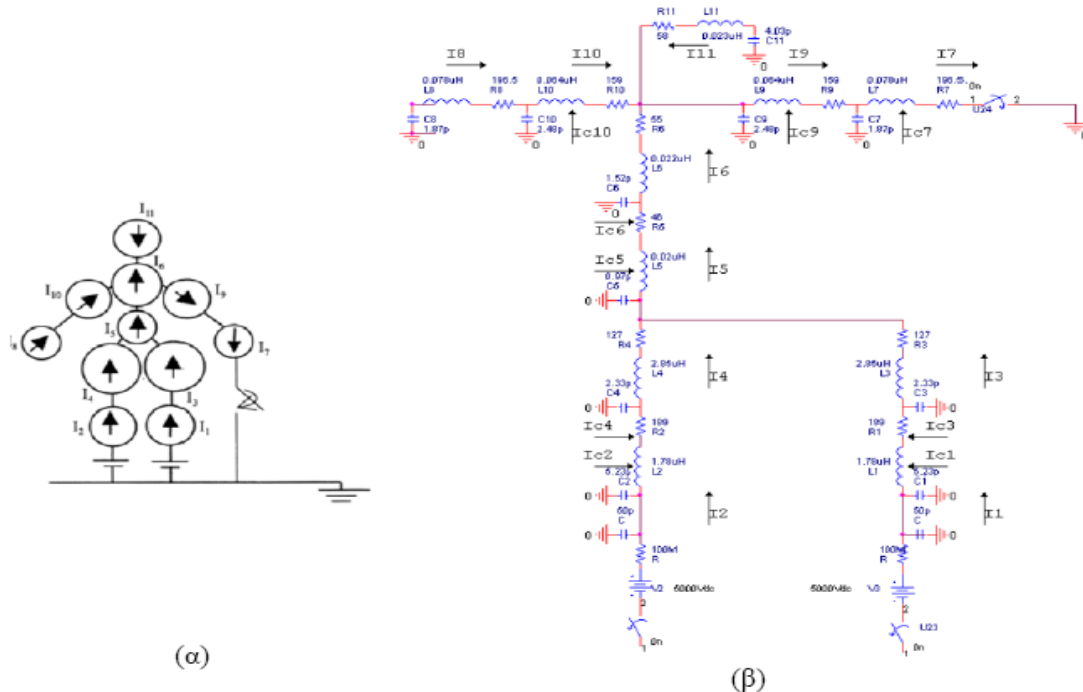
Σχήμα 2.30: Κύκλωμα προσομοίωσης της ταχύτητας προσέγγισης ενός ηλεκτροδίου [33]

Οι Amoruso, Helali και Lattarulo [34] “διαμερίζουν”, για τους σκοπούς της έρευνάς τους, το ανθρώπινο σώμα σε 11 βασικά μέρη, τα οποία προσομοιώνονται με τα

αντίστοιχα ηλεκτρικά τους ανάλογα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4. Το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο προτείνεται και το οποίο αναπαριστά το ανθρώπινο σώμα είναι ένα κύκλωμα RLC . Το κύκλωμα αυτό επιλύεται μέσω του προγράμματος Spice, οπότε υπολογίζεται το ρεύμα εκφόρτισης για διάφορες θέσεις του ανθρώπινου σώματος και για διάφορες ανθρώπινες κατατομές. Τα βασικά μέρη του ανθρώπινου σώματος και ο τρόπος που αυτά υλοποιούνται στο Pspice φαίνονται στο Σχήμα 2.31.

Πίνακας 2.4: Ηλεκτρικές παράμετροι των βασικών μερών του ανθρώπινου σώματος [34]

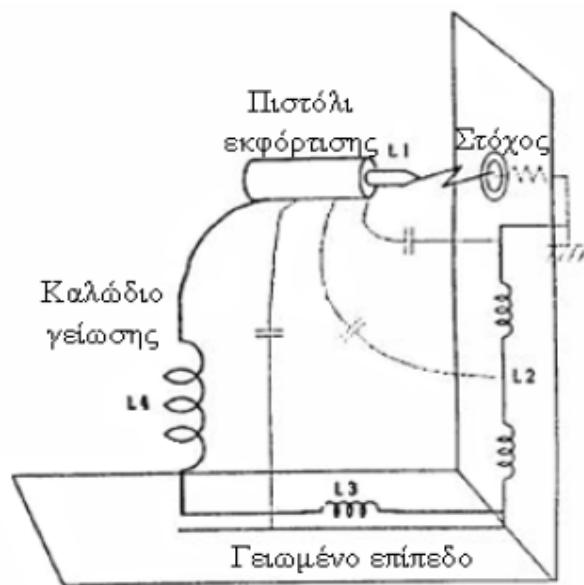
Στοιχείο	Χωρητικότητα (pF)	Επαγωγή (μH)	Αντίσταση (Ω)
Κνήμη	5.23	1.78	189
Μηρός	2.33	2.85	127
Κοιλιακή χώρα	0.97	0.02	46
Στήθος	1.52	0.022	55
Πήχης	1.87	0.078	196.5
Βραχίονας	2.48	0.064	159
Κεφάλι	4.03	0.023	58



Σχήμα 2.31: α) Τα 11 βασικά μέρη του ανθρώπινου σώματος, β) Κυκλωματική αναπαράσταση του ανθρώπινου σώματος στο Pspice [34]

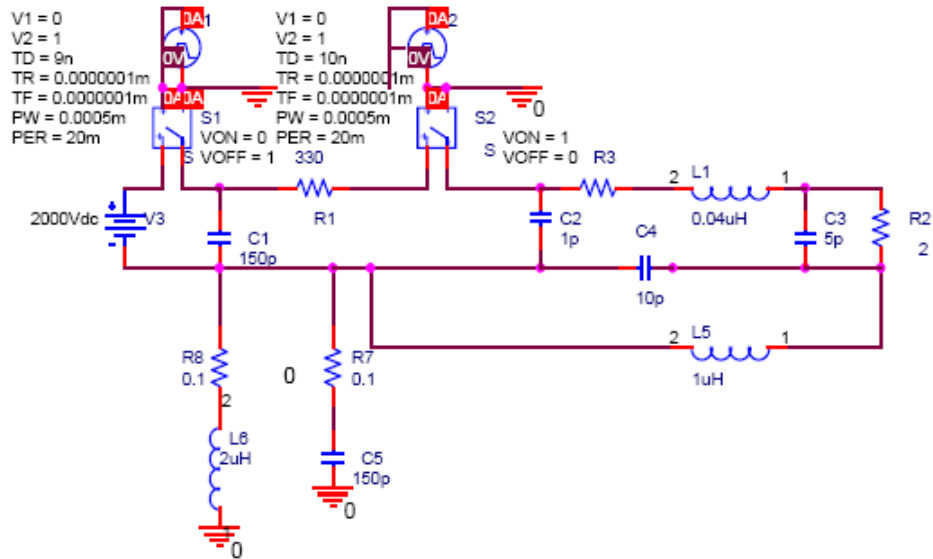
Οι **Giannetti** και **Tellini** [35] προσομοιώνουν το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω μιας ολοκληρωτικής μεθόδου για εκφορτίσεις αέρα. Τα ηλεκτρόδια και το διηλεκτρικό μοντελοποιούνται μέσω ενός δικτύου μη γραμμικών αντιστάσεων σχεδιασμένων στο Spice. Η ευκολία του προτεινομένου μοντέλου έγκειται στο γεγονός ότι, μπορεί να υπολογισθεί, με σχετικά καλή ακρίβεια, το ρεύμα εκφόρτισης, για διάφορες γεωμετρίες ηλεκτροδίων, χωρίς να χρειάζεται να είναι γνωστή η μεταξύ των ηλεκτροδίων χωρητικότητα.

Ένα κυκλωματικό μοντέλο έχει προτείνει επίσης ο **Nobuo Murota** [36]. Στο Σχήμα 2.32 φαίνονται μοντελοποιημένα ηλεκτρικά μεγέθη που είναι παρόντα στη διάταξη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για την κατασκευή μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψη αυτά τα παράσιτα στοιχεία, γεγονός που καθιστά περίπλοκη την κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

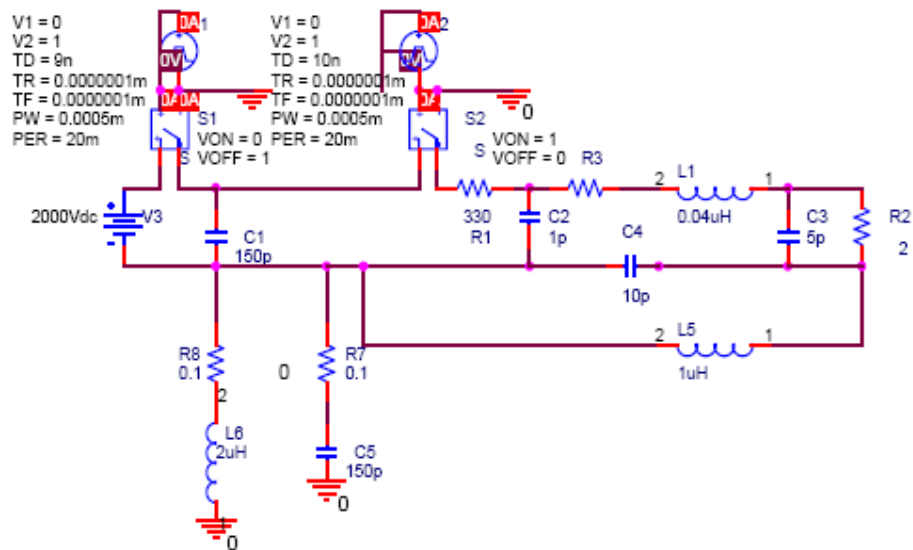


Σχήμα 2.32: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας μιας δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [36]

Στο Σχήμα 2.33 φαίνεται ένα πρώτο κυκλωματικό μοντέλο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο προτάθηκε από τον Nobuo Murota. Οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος προσδιορίζονται μερικώς από το Πρότυπο και μερικώς από τον συγγραφέα, σε μία προσπάθεια μοντελοποίησης των παράσιτων στοιχείων που εμφανίζονται στη γεωμετρία ενός περιστατικού εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου. Το πρώτο κυκλωματικό μοντέλο που προτάθηκε από τον Nobuo Murota φαίνεται στο Σχήμα 2.33, στο Σχήμα, δε, 2.34, φαίνεται μία παραλλαγή του.

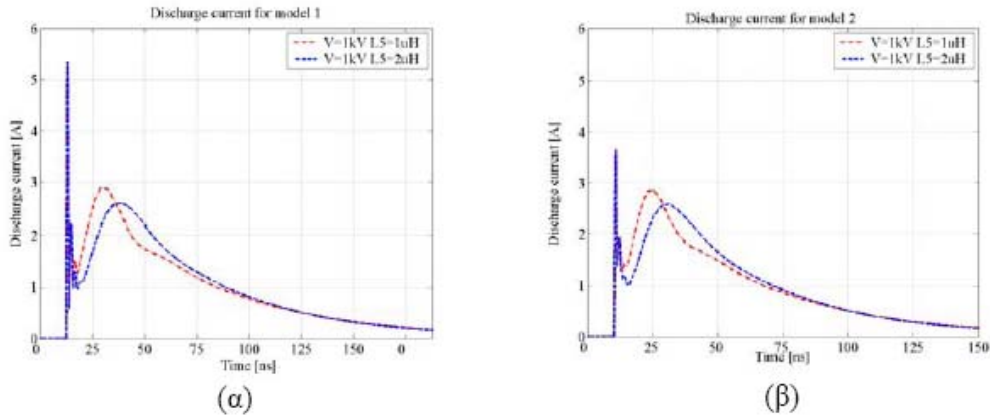


Σχήμα 2.33: Κυκλωματικό μοντέλο 1 [36]



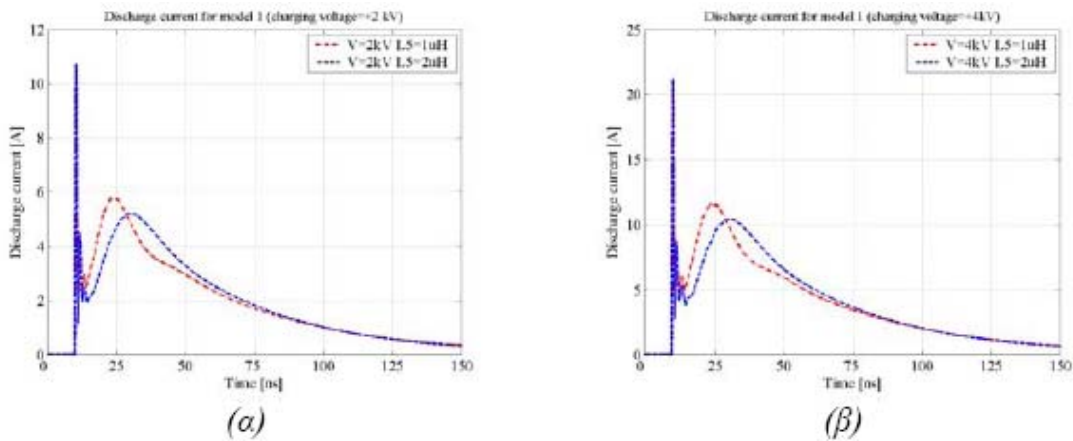
Σχήμα 2.34: Κυκλωματικό μοντέλο 2 [36]

Οι αποκρίσεις των δύο παραλλαγών του κυκλωματικού μοντέλου, για τάση φόρτισης +1 kV, έτσι όπως τις υπολόγισε ο Γ. Π. Φώτης στη διδακτορική του διατριβή [37], φαίνονται στο Σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.35: Αποκρίσεις κυκλωματικών μοντέλων για τάση φόρτισης +1 kV:
 α) Μοντέλο 1 και β) Μοντέλο 2 [37]

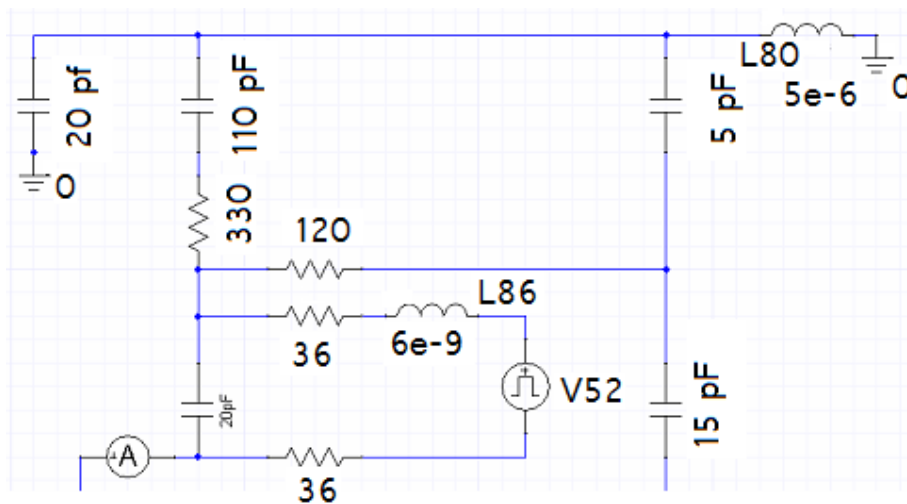
Με τη βοήθεια του προγράμματος Pspice, υλοποιήθηκαν από τον Γ. Π. Φώτη [37] τα δύο αυτά κυκλώματα και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τιμές τάσεων φόρτισης +2 kV και +4 kV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.36.



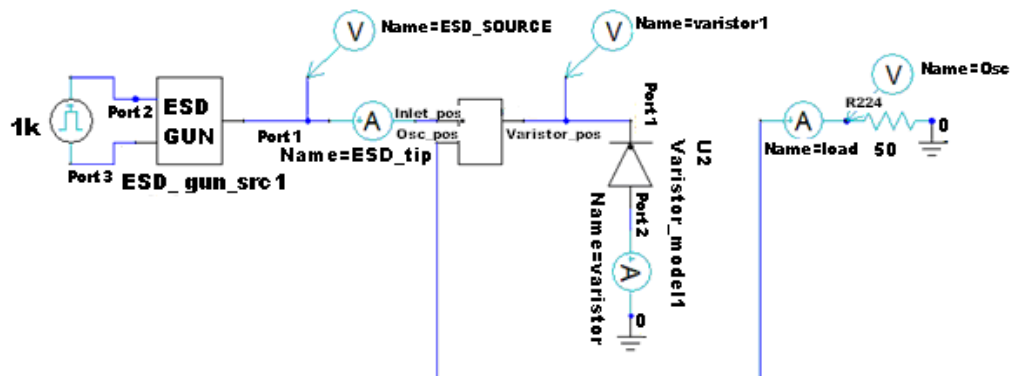
Σχήμα 2.36: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1 για τάση φόρτισης:
 α) +2kV και β) +4 kV [37]

Στο [37], όπου γίνεται εκτενέστερη ανάλυση και σχολιασμός, εκτίθενται συγκρίσεις του κυκλώματος αυτού και του παραγομένου ρεύματος με το αντίστοιχο κύκλωμα του Προτύπου [8] και χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με την ορθότητα και χρησιμότητα του κυκλώματος του Προτύπου. Το [37] αποφαινεται αρνητικά ως προς την ορθότητα του προτεινομένου από το Πρότυπο κυκλώματος, και προτείνει την αναθεώρηση του πρότυπου κυκλώματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Οι David Pommerenke, Byong-Su Seol, Jong-Sung Lee, Jae-Deok Lim, Hyungseok Lee, HarkByeong Park, και Argha Nandy σε σχετικά πρόσφατη εργασία τους [38] προτείνουν ένα κυκλωματικό μοντέλο για την προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο περιβάλλον PSpice, όπου η γεννήτρια εγχύει ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο δοκίμιο (πλακέτα) και μετράται η διαταραχή σε διάφορα σημεία του. Στην εργασία τους συμπεριλαμβάνεται ένα βαρίστορ ως προστασία έναντι της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το ισοδύναμο κύκλωμα για την γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.37 ενώ το ολικό κύκλωμα, που περιέχει τη γεννήτρια και το δοκίμιο υπό έλεγχο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις απεικονίζεται στο Σχήμα 2.38.



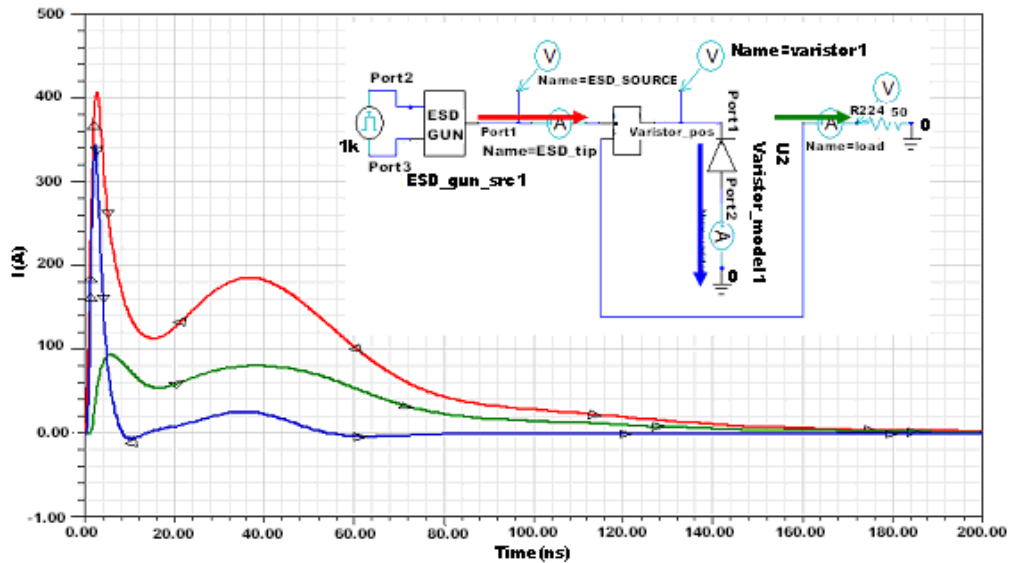
Σχήμα 2.37: Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης



Σχήμα 2.38: Πλήρες κυκλωματικό μοντέλο του δοκιμίου (πλακέτας) μαζί με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και το βαρίστορ

Η απόκριση του βαρίστορ προστασίας της πλακέτας μπορεί να μοντελοποιηθεί, όπως οι συγγραφείς προτείνουν, από έναν μη γραμμικό αντιστάτη σε παράλληλη σύνδεση με μία χωρητικότητα.

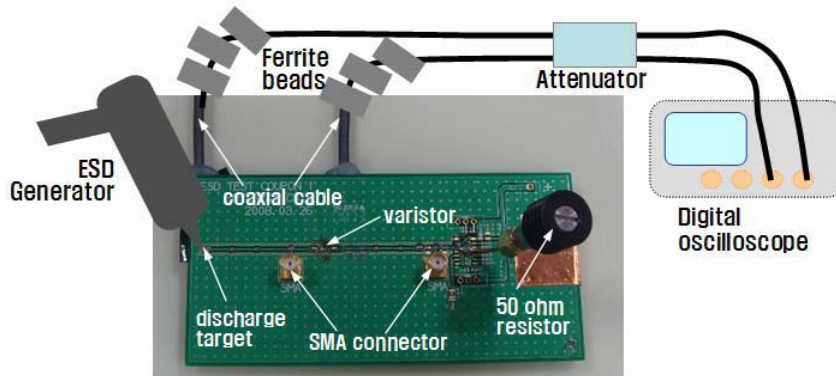
Στην προσομοίωση που φαίνεται στο Σχήμα 2.39, η τάση ρυθμίστηκε στο 1 kV και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που εγχύθηκε στην πλακέτα είναι περίπου 4 A (κόκκινη γραμμή). Επίσης φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά το ρεύμα προς γη που περνάει από το βαρίστορ.



Σχήμα 2.39: Αποτελέσματα προσομοίωσης της καμπύλης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βαρίστορ

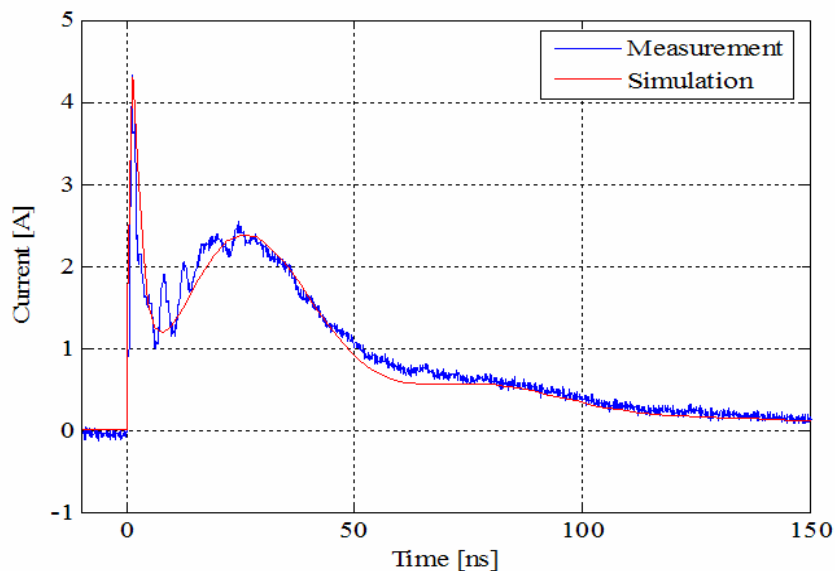
Οι συγγραφείς κατέγραψαν το ρεύμα που απάγει το βαρίστορ και βρήκαν την κορυφή του ίση με 3.4 A (μπλε γραμμή).

Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που εγχέεται από τη γεννήτρια και η εφαρμοζόμενη τάση κατά μήκος του βαρίστορ μετρώνται, προς επαλήθευση του προτεινόμενου κυκλωματικού μοντέλου, με τη βοήθεια της διάταξης του Σχήματος 2.40, την οποία οι συγγραφείς ονομάζουν δοκιμή πλακέτας με βαρίστορ.



Σχήμα 2.40: Δοκιμή πλακέτας

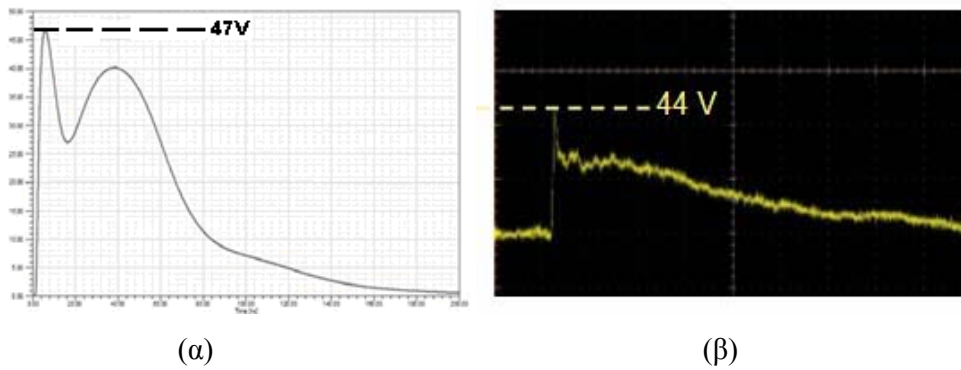
Το Σχήμα 2.41 δείχνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η κόκκινη γραμμή είναι η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, συγκρινόμενη με το αποτέλεσμα της μέτρησης (μπλε γραμμή)



Σχήμα 2.41: Σύγκριση προσομοίωσης και μέτρησης για τη κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Σημειώνεται όμως ότι σε αυτήν τους την εργασία, οι τιμές των στοιχείων στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.37, τροποποιούνταν από τους συγγραφείς, βασιζόμενοι στο αποτέλεσμα της σύγκρισης της προσομοίωσης, για το εγγυόμενο ρεύμα, με τη μέτρηση αυτού σε πολλές δοκιμές, ώστε να συμπίπτουν καλύτερα οι δύο καμπύλες. Στο Σχήμα 2.41 φαίνεται ότι η πρώτη και η δεύτερη κορυφή (peak) συμπίπτουν αρκετά καλά.

Τέλος το Σχήμα 2.42 δείχνει μία σύγκριση ανάμεσα στην κυματομορφή της τάσης που μετράται κατά μήκος του βαρίστορ και σε αυτήν που προκύπτει από την προσομοίωση για την ίδια θέση μέτρησης.



Σχήμα 2.42: Σύγκριση κυματομορφής τάσης μεταξύ (α) προσομοίωσης και (β) μέτρησης

3.1 Εισαγωγή

Για τις μετρήσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης απαιτείται υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμός, τόσο για πειράματα με γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όσο και για τη διεξαγωγή μετρήσεων σε πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα ταχύτατο γεγονός και, άρα, χρειάζεται αρκετά «γρήγορος» εξοπλισμός για να καταγράψει τα εμπλεκόμενα μεγέθη, αν και είναι αλήθεια πως είναι διαφορετικές οι απαιτήσεις όταν έχουμε πειράματα με γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε αντιδιαστολή με αυτά πραγματικών συμβάντων.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται εξοπλισμός παραγωγής και καταγραφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Παρακάτω παρουσιάζεται ο εξοπλισμός αυτός, καθώς και ο εξοπλισμός που πρόκειται να χρειαστεί στη συνέχεια της εκπόνησης της εργασίας.

3.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τις δοκιμές ατρωσίας έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και διακρίβωση σχετικού εξοπλισμού

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των δοκιμών που ορίζει το Πρότυπο EN 61000-4-2, και ήταν ήδη διαθέσιμος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή.
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.
- Εξασθενητές (attenuators).
- Παλμογράφος TDS 7254B.
- Κλωβός Faraday.

3.2.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που είναι διαθέσιμες στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων είναι οι εξής:

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

Πειράματα έγιναν και με τις τρεις, αλλά δεν κρίθηκε σκόπιμο να καταγραφούν και να παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια δεδομένα από πειράματα με την γεννήτρια NSG-433, καθώς για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας οι δύο άλλες γεννήτριες είναι υπεραρκετές, γιατί είναι πολύ πιο σύγχρονα μοντέλα, είναι πολύ πιο εύχρηστες και παρουσιάζουν αναβαθμισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά, σε σχέση με την NSG-433, όπως θα φανεί στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

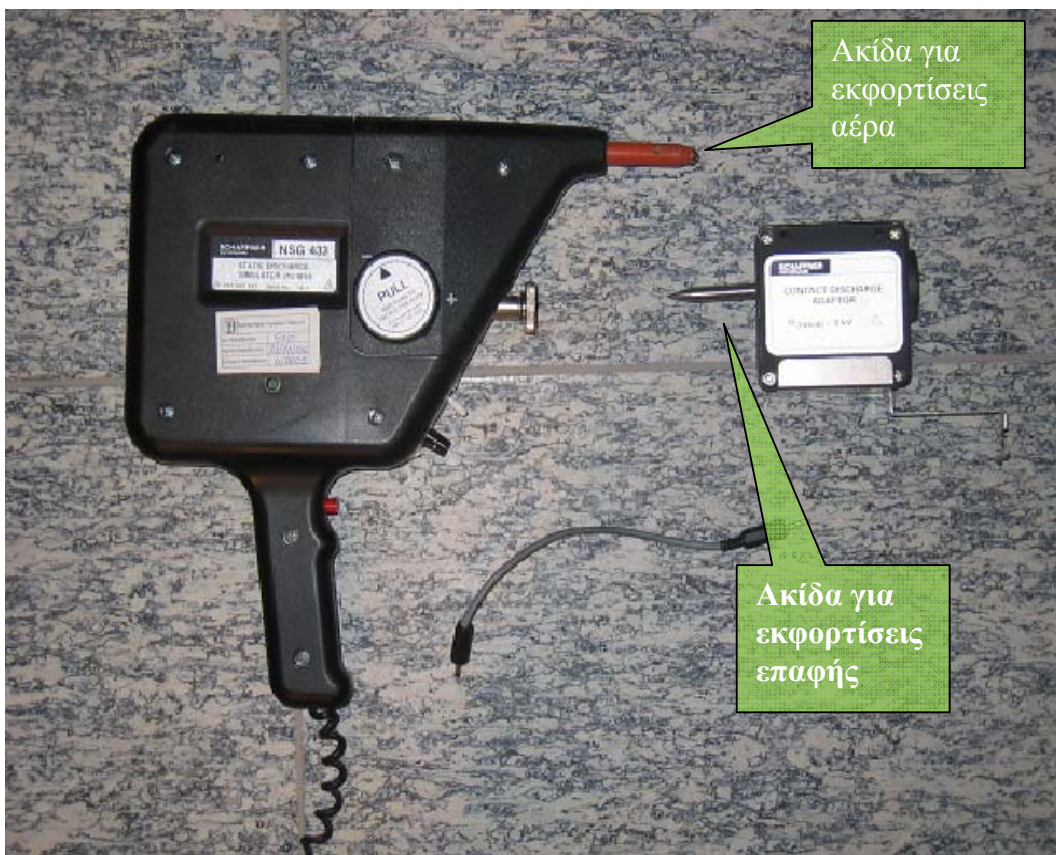
3.2.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.1 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τάση φόρτισης μεταξύ -18 kV και $+18\text{ kV}$ και χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns . Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο “πιστόλι”, μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο, το οποίο δείχνει την τάση φόρτισης.



Σχήμα 3.1: Η γεννήτρια NSG-433

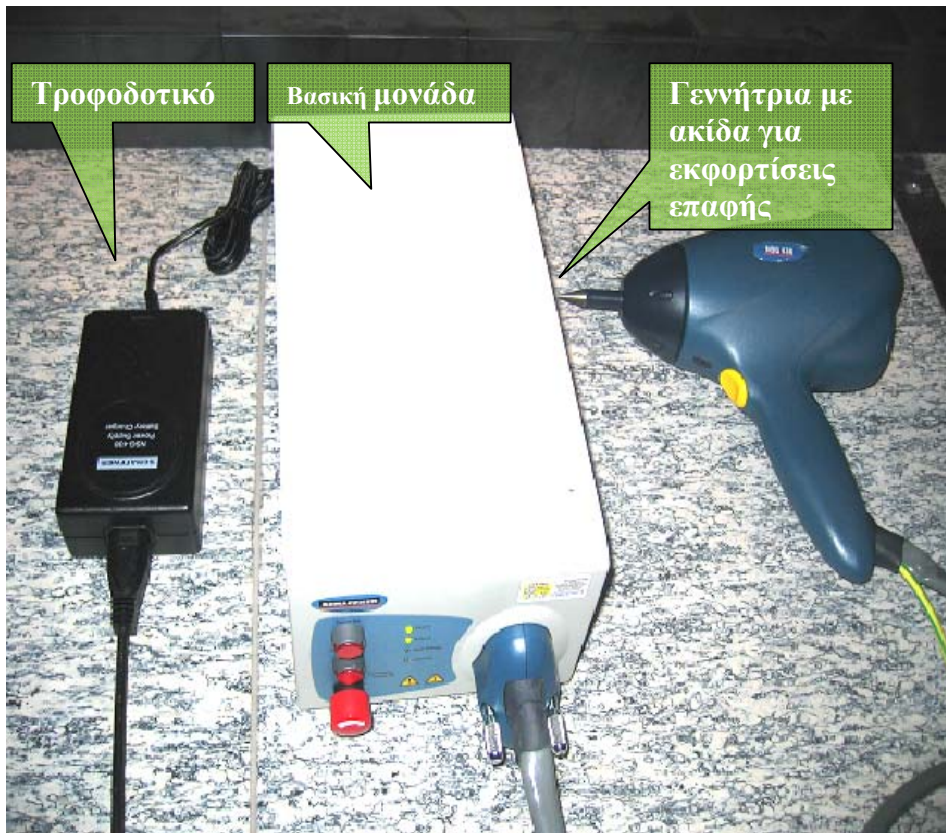
Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία, καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή, η οποία ονομάζεται προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής, καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκφορτίσεων μέσω αέρα φαίνονται στο Σχήμα 3.2. Η γεννήτρια NSG-433 περιλαμβάνει, επίσης, τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκφορτίσεων, που πραγματοποιούνται.



Σχήμα 3.2: Ακίδες για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής για τη γεννήτρια NSG-433

3.2.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τάση φόρτισης μεταξύ -30 kV και $+30$ kV. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η συγκεκριμένη συσκευή διαθέτει οθόνη αφής, μέσω της οποίας γίνονται οι αναγκαίοι χειρισμοί.



Σχήμα 3.3: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.4 και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, τη γεννήτρια και το ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock).
- Η γεννήτρια στην οποία βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στη λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν, το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει είσοδο 100-250 Vac, 50-60 Hz, 1 A και δίνει στη βασική μονάδα 24 Vdc, 2,3 A.



Σχήμα 3.4: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα κομβία χειρισμού και τις ενδεικτικές λυχνίες

3.2.1.3 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τάση φόρτισης μεταξύ $-16,5$ kV και $+16,5$ kV και παρουσιάζει αξιοσημείωτα βελτιωμένη εργονομία σε σχέση με τα παλαιότερα μοντέλα που είναι διαθέσιμα στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Η γεννήτρια DITO αποτελείται μόνο από μία συσκευή και δεν έχει περιφερειακά. Το μόνο που χρειάζεται για την λειτουργία της είναι η εξασφάλιση μιας σταθερής γείωσης. Για την τροφοδοσία της χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

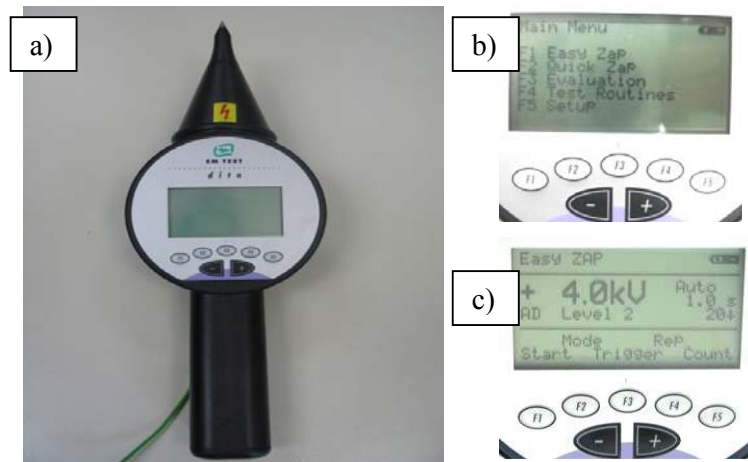
Όλες οι χρήσιμες ενδείξεις / πληροφορίες βρίσκονται στην οθόνη της. Ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι εκφορτίσεις (αέρος ή επαφής, απλές ή επαναλαμβανόμενες) ο αριθμός των επαναλήψεων, η μετρούμενη τάση φόρτισης είναι κάποιες από τις πληροφορίες που παρέχονται στην οθόνη.

Το ειδικά διαμορφωμένο λογισμικό της γεννήτριας απλοποιεί πολύ τη διαδικασία των δοκιμών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η γεννήτρια DITO της EMTEST, μαζί με δύο χαρακτηριστικές οθόνες διαλόγου, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της.

3.2.1.4 Σύγκριση διαθέσιμων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται, συγκεντρωτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433, NSG-438 και DITO.



Σχήμα 3.5: Η γεννήτρια DITO a) γενική άποψη της γεννήτριας, b) οθόνη επιλογής προγράμματος λειτουργίας, c) οθόνη κατά τη διάρκεια λειτουργίας.

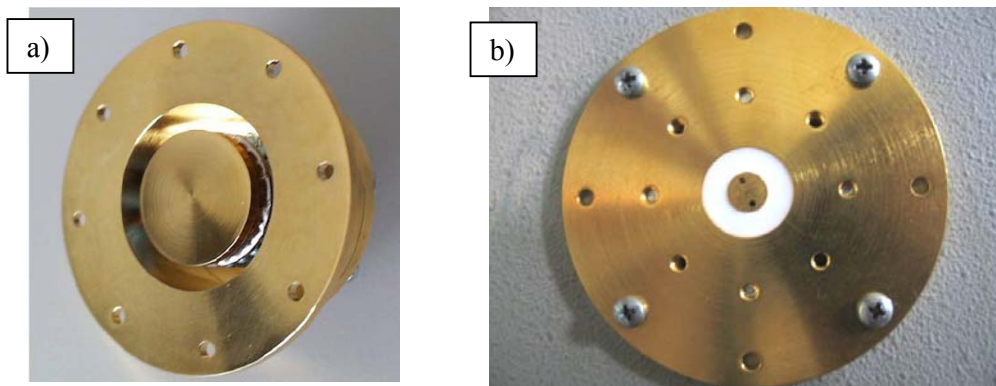
Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Γεννήτρια ESD		NSG-433	NSG-438	DITO
Τεχνικά χαρακτηριστικά				
Πυκνωτής εκκένωσης C_s		150 pF ± 10%	150 pF ± 10%	150 pF ± 10%
Αντίσταση εκκένωσης R_d		330 Ω ± 10%	330 Ω ± 10%	330 Ω ± 10%
Αντίσταση φόρτισης R_c		100 MΩ	50 MΩ	
Τάση εξόδου V_0	Εκφορτίσεις αέρος	2÷18 kV	200 V÷30 kV	500V÷16.5 kV
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	2÷9 kV		500V÷10 kV
Πολικότητα τάσης εξόδου		Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική
Χρόνος διατήρησης του 90% της τάσης φόρτισης (90% V_0)		>5 s	>5 s	>5 s
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (t_r)	Εκφορτίσεις αέρος	< 1 ns (για τάσεις ≤ 8 kV)	< 1 ns (για τάσεις ≤ 8 kV)	0.7÷1 ns
	Εκφορτίσεις εξ επαφής	0.7÷1 ns	0.7÷1 ns	
Μέγιστο ρεύματος (I_p)		2 kV: 7.5A ±10% 4 kV: 15A ±10% 6 kV: 22.5A ±10% 8 kV: 30A ±10%	2 kV: 7.5A ±10% 4 kV: 15A ±10% 6 kV: 22.5A ±10% 8 kV: 30A ±10%	2 kV: 7.5A ±10% 4 kV: 15A ±10% 6 kV: 22.5A ±10% 8 kV: 30A ±10%
Τάση τροφοδοσίας		100/120/220/240 Vac, 50÷60 Hz	100/120/220/240 Vac, 50÷60 Hz	Battery NiCd 12V
Κατανάλωση		25 VA	25 VA	
Θερμοκρασία λειτουργίας		5÷40 °C	5÷40 °C	10÷35 °C
Υγρασία λειτουργίας		20%÷80%	20%÷80%	20%÷80%

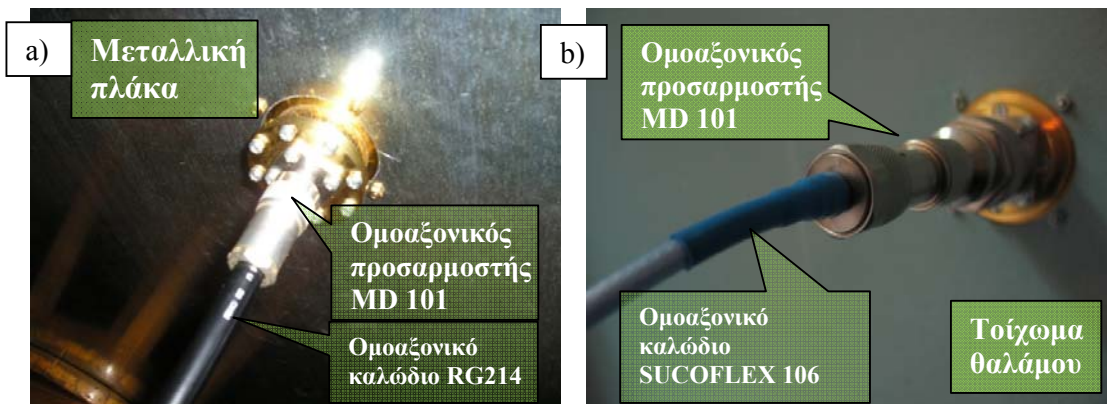
3.2.2 Ομοαξονικοί προσαρμοστές μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer), με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Είναι γνωστός και ως Pellegrini target. Στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο MD 101 της Schaffner, και έπειτα ο MD 103 της TESEQ, σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύσσεται στην παράγραφο 3.3.

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι δύο ομοαξονικοί προσαρμοστές, που χρησιμοποιήθηκαν και στο Σχήμα 3.7 οι ομοαξονικοί προσαρμοστές τοποθετημένοι στη μετρητική διάταξη.



Σχήμα 3.6: Οι ομοαξονικοί προσαρμοστές a) MD 101 και b) MD 103



Σχήμα 3.7: Οι ομοαξονικοί προσαρμοστές τοποθετημένοι στη διάταξη: a) MD 101 και b) MD 103

3.2.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

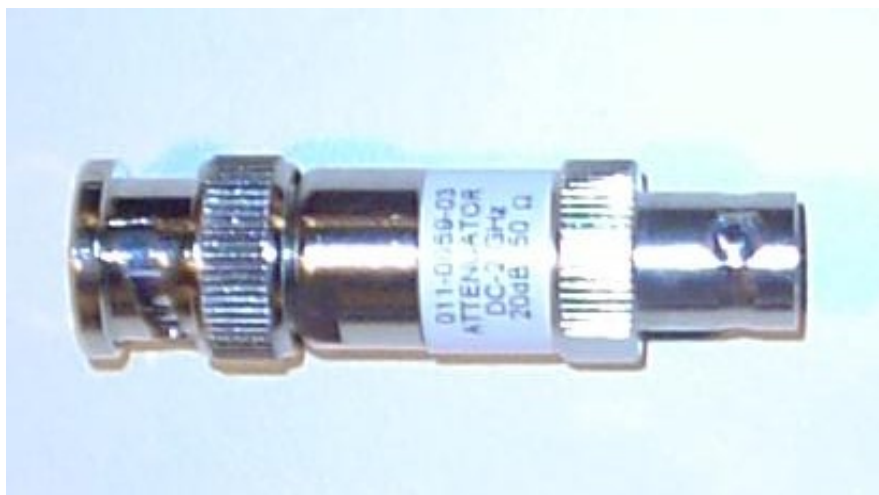
Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Για αυτό το λόγο απαιτείται τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά

σήματος υψηλής συχνότητας.

Κατ' αρχήν χρησιμοποιήθηκαν καλώδια τύπου RG214, και έπειτα καλώδια τύπου SUCOFLEX 106, τα οποία έχουν καλύτερη απόκριση συχνότητας, όπως αναλύεται στην §3.3.

3.2.4 Εξασθενητής

Όταν χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD101 έπρεπε να χρησιμοποιηθεί και ο εξασθενητής, ώστε να μην διατρέχει κίνδυνο καταστροφής το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix, με εύρος ζώνης από συνεχή τάση έως 2GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Ο εν λόγω εξασθενητής φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD103 έχει ενσωματωμένο εξασθενητή με μεγαλύτερο εύρος ζώνης (μεγαλύτερο από 6 GHz). Το καλώδιο τύπου SUCOFLEX, και ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD103 έχουν κατασκευασθεί και διακριβωθεί ως ενιαίο σύστημα, κατάλληλο για τη μέτρηση του ρεύματος των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (electrostatic discharge current – ESD current) [39].



Σχήμα 3.8: Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix

3.2.5 Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Ο παλμογράφος Tektronix μοντέλο TDS 7254B λειτουργεί στα 2.5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του Προτύπου EN 61000-4-2 [8] για το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, (αναφέρει ότι ο παλμογράφος πρέπει να έχει οριακή συχνότητα τουλάχιστον

1 GHz). Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024 x 768, μονάδα οδηγού δισκέτας 3,5” (floppy disk drive) για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.9: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου TDS 7254B

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

3.2.6 Υπολογισμός του ρεύματος

Ο υπολογισμός της έντασης του ρεύματος σε A, μέσω της ένδειξης τάσης του παλμογράφου, γίνεται δεκαπλασιάζοντας την τιμή της τάσης αυτής (σε V), όπως συνοπτικά φαίνεται στο Παράρτημα Π.1 και αναλύεται στο [37].

3.3 Συμπλήρωση και αναβάθμιση εξοπλισμού – Περιγραφή πειραματικών διατάξεων

3.3.1 Παραγωγή ρεύματος πραγματικής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος

Όσο αφορά τις εφαρμογές τις παρούσας διατριβής, που εμπλέκουν εμπορικές γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, χρησιμοποιήθηκαν οι **γεννήτριες** NSG-433 και NSG-438 της εταιρείας Schaffner και DITO της εταιρείας EM TEST. Κρίθηκε, όμως, σκόπιμο να μην παρουσιαστεί επεξεργασία των πειραμάτων που έγιναν με χρήση της (παλιάς) γεννήτριας NSG-433, αφού οι δύο (νεότερες) γεννήτριες είναι υπεραρκετές, για τις ανάγκες μας.

Για τη φόρτιση του ανθρώπινου σώματος και τη δημιουργία ρεύματος, μέσω της εκφόρτισης του τελευταίου, χρειάστηκε να στηθεί η διάταξη, που παρουσιάζεται στη συνέχεια και απαρτίζεται από τα ακόλουθα:

- Γεννήτρια φόρτισης
- Βολτόμετρα υψηλής και χαμηλής τάσης
- Ιδιοκατασκευές, απαραίτητες, για τη σύνδεση και τη λειτουργικότητα της διάταξης.

3.3.1.1 Γεννήτρια φόρτισης Glassman High Voltage MJ20P700

Η τάση εισόδου της γεννήτριας πρέπει να είναι από 210-250V RMS, με συχνότητα ανά φάση από 48 έως 420 Hz, και ρεύμα 0.25A. Παρέχεται επίσης ακροδέκτης 3 θέσεων με κατάλληλο κάλυμμα. Στην έξοδο της γεννήτριας παίρνουμε τάση συνεχής, σταθερής ρύθμισης με τιμές από 0 έως την τιμή που επιθυμούμε (μέγιστη δυνατή τάση εξόδου 20 kV). Η ρύθμιση γίνεται από μεταβλητή αντίσταση (ποτενσιόμετρο), που μπορεί να περιστραφεί μέχρι 10 φορές, με ακρίβεια 0.05%. Η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι μικρότερη από 0.05% RMS της ονομαστικής τάσης στο πλήρες φορτίο. Η κυμάτωση είναι ανάλογη του φορτίου και μειώνεται γραμμικά περίπου στο 0.01% εν κενώ. Για την καταγραφή της τάσης, η γεννήτρια διαθέτει δύο ακροδέκτες με διαφορά δυναμικού ανάλογη της εξόδου της γεννήτριας (0 V για τάση εξόδου 0 V, έως 10 V για τάση εξόδου 20 V). Η ακρίβεια ανάγνωσης της τάσης είναι ίση με 0.5% της τιμής ανάγνωσης + 0.2% της ονομαστικής τάσης εξόδου της γεννήτριας. Όσον αφορά στο θερμοκρασιακό συντελεστή, αυτός είναι 0.001% ανά βαθμό Κελσίου (°C). Κατά την λειτουργία της γεννήτριας η θερμοκρασία περιβάλλοντος πρέπει να κυμαίνεται από -20 °C έως +60 °C, ενώ σε κατάσταση μη λειτουργίας από -40 °C έως +80 °C.

Αυτόματος έλεγχος ρεύματος προστατεύει την γεννήτρια έναντι όλων των συνθηκών υπερφόρτισης, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρικών τόξων και βραχυκυκλωμάτων. Ασφάλειες τήξης, αντιστάσεις περιορισμού υπερτάσεων, και στοιχεία χαμηλής ενέργειας παρέχουν απόλυτη προστασία στη συσκευή.

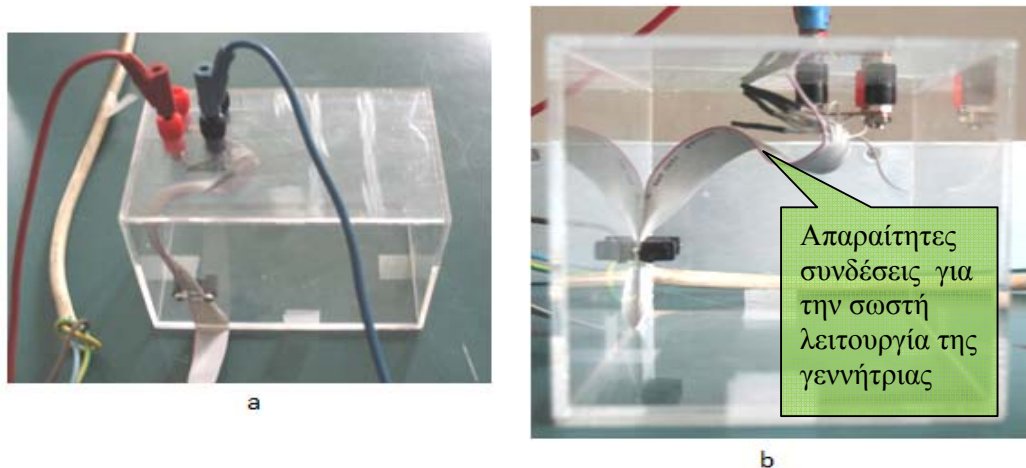
Για να γίνει η λήψη της υψηλής τάσης από τη γεννήτρια χρησιμοποιείται εξωτερικό αποσπώμενο καλώδιο υψηλής τάσης μήκους περίπου 2.5 μέτρων. Επίσης, παρέχεται θωράκιση υψηλής τάσης RG8U, για το εν λόγω ομοαξονικό καλώδιο. Η γεννήτρια φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Γεννήτρια φόρτισης άνθρωπου MJ20P700

3.3.1.2 Βολτόμετρα μέτρησης της τάσης φόρτισης

Στο εργαστήριο για τη διευκόλυνση της διεξαγωγής των μετρήσεων αποφασίστηκε να γίνουν οι απαραίτητες συνδέσεις, ώστε να τεθεί η γεννήτρια σε λειτουργία αλλά και για να καταγραφεί η έξοδος της στη χαμηλή τάση, λίγο πιο μακριά από τη γεννήτρια. Έτσι κατασκευάστηκε ένα κουτί Plexiglass, Σχήμα 3.11, στο οποίο και οδηγήθηκαν οι ακροδέκτες από τη συσκευή εξόδου της γεννήτριας και έγιναν οι κατάλληλες συνδέσεις.



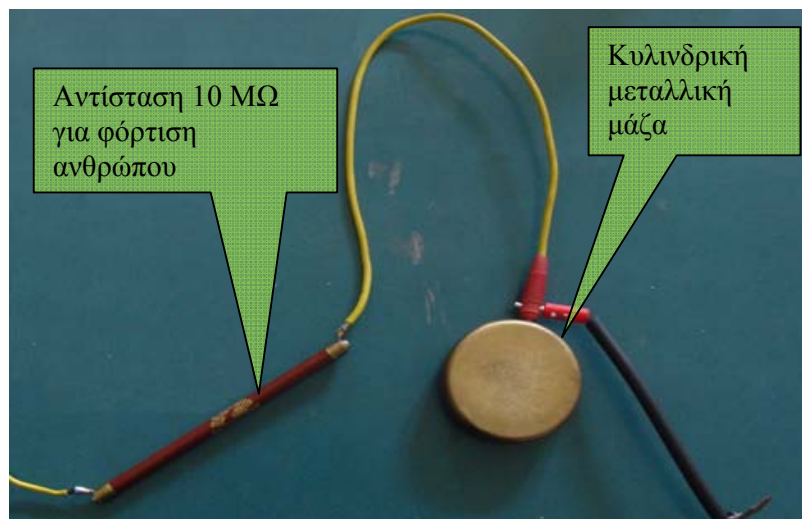
Σχήμα 3.11: Κουτί plexiglass

Η καταγραφή της τάσης φόρτισης του ανθρώπου, που λάμβανε μέρος στο πείραμα, γινόταν με δύο τρόπους. Μέσω ενός βολτομέτρου χαμηλής τάσης το οποίο μετρά το σήμα $0 \div 10 \text{ Vdc}$, που παρέχεται από τη γεννήτρια υψηλής συνεχούς τάσης (ανάλογο με την τιμή της τάσης εξόδου $0 \div 20 \text{ kVdc}$ της γεννήτριας) και άμεσα με ένα βολτόμετρο υψηλής τάσης. Η συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Βολτόμετρο Χαμηλής και Υψηλής τάσης

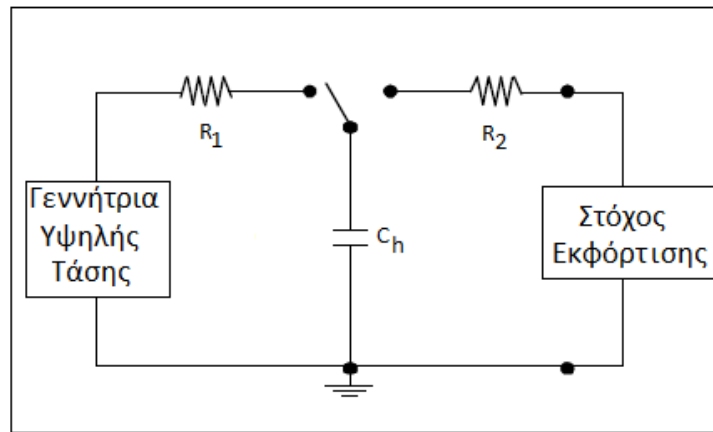
Η τάση από την έξοδο της γεννήτριας οδηγείται μέσω του καλωδίου υψηλής τάσης και με την παρεμβολή αντίστασης υψηλής τιμής $10\text{M}\Omega$ σε μία κυλινδρική μεταλλική μάζα διαμέτρου 7cm και ύψους 2cm που χρησιμοποιήθηκε για την φόρτισή του ανθρώπου, Σχήμα 3.13. Ο προς φόρτιση άνθρωπος ακουμπούσε είτε άμεσα την κυλινδρική επιφάνεια είτε έμμεσα μέσω της ράβδου εκφόρτισης. Η αντίσταση που χρησιμοποιήθηκε είχε υψηλή τιμή για τον περιορισμό του ρεύματος, που ρέει στο κύκλωμα και, κατ' επέκταση, την ασφάλεια του ανθρώπου που φορτίζεται.



Σχήμα 3.13: Αντίσταση φόρτισης και κυλινδρική μεταλλική μάζα

3.3.1.3 Υπολογισμός χρόνου φόρτισης ανθρώπου και ρεύματος που τον διαρρέει

Το μοντέλο του κυκλώματος ανθρώπου – αντίστασης - γεννήτριας είναι το ακόλουθο με βάση το Πρότυπο (Σχήμα 3.14 - απλοποιημένο κύκλωμα):



Σχήμα 3.14: Απλοποιημένο κύκλωμα γεννήτριας – ανθρώπου - αντίστασης (στόχου εκφόρτισης)

Όπου,

C_h : ανθρώπινη χωρητικότητα

R_1 : αντίσταση που τοποθετούμε ανάμεσα στην πηγή και το ανθρώπινο σώμα.

R_2 : αντίσταση ανθρώπινου σώματος

Όταν ο προς φόρτιση άνθρωπος ακουμπήσει την αντίσταση R_1 τότε έχουμε τον εξής διαιρέτη τάσης:

$$V_c(s) = V_{hv}(s) \frac{1}{1 + sR_1C_h} \quad (3.1)$$

Επειδή η τάση που δίνει η γεννήτρια είναι συνεχής (DC) τότε θα πρέπει να περιμένουμε ένα χρονικό διάστημα να φορτιστεί ο πυκνωτής (άνθρωπος) και στην συνέχεια να αποκτήσει στα άκρα του την τάση της γεννήτριας εφόσον θα έχει φορτιστεί οπότε και λειτουργεί σαν ανοιχτόκύκλωμα εφόσον στο συνεχές ρεύμα ισχύει ότι:

Συχνότητα Μηδενική, $\omega=0 \Rightarrow s=0$ στην μόνιμη κατάσταση και από την 3.1 $\Rightarrow V_c(s) = V_{hv}(s)$.

Αν μεταφέρουμε τη σχέση 3.1 στο πεδίο του χρόνου, θεωρώντας ότι, η γεννήτρια δίνει τάση σταθερής τιμής A (με μετασχηματισμό Laplace γίνεται $V_{hv}(s) = \frac{A}{s}$):

$$V_c(s) = A \left(1 - e^{-t/R_1C_h} \right) \quad (3.2)$$

Έστω, τώρα, στην περίπτωση μας ότι έχουμε π.χ. $R_1 = 10M\Omega$ και, έστω, μέγιστη τιμή χωρητικότητας ανθρώπινου σώματος $C = 250pF$.

Η τιμή του χρόνου φόρτισης θα πρέπει να κείται στο διάστημα, που ικανοποιεί την ανισότητα (3.3):

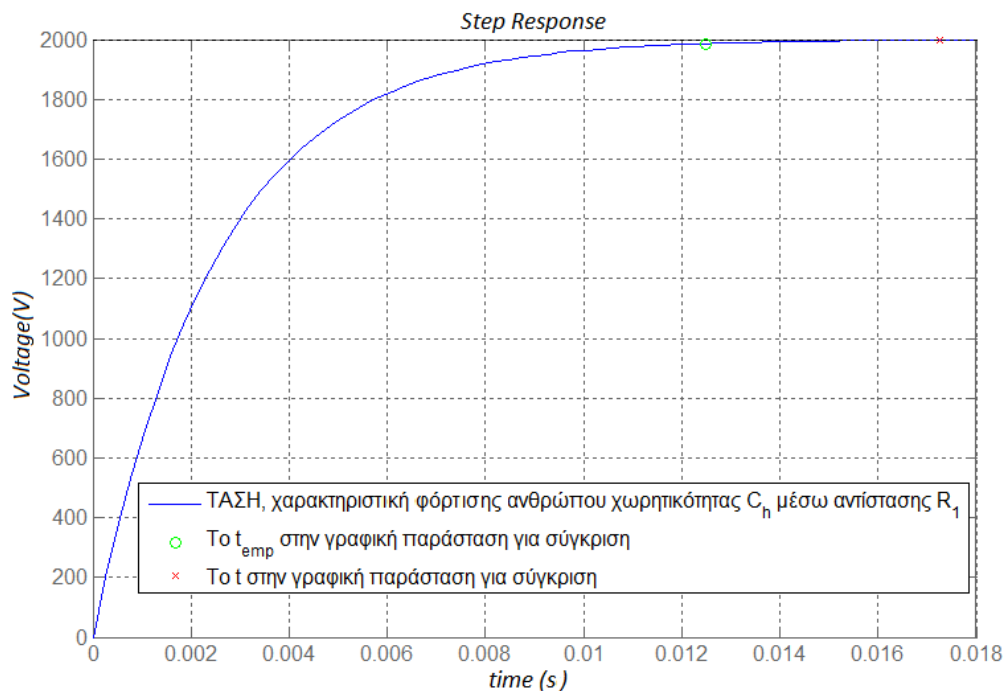
$$A \left(1 - e^{-t/R_1 C_h} \right) \geq 0.999 A \quad (3.3)$$

Με τις παραπάνω τιμές από το Matlab με τάση εισόδου 2000V έχουμε, για την τάση αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.15.

Ο εμπειρικός τύπος, που δίνει το χρόνο φόρτισης ενός πυκνωτή, είναι ο:

$$t_{emp} = 5 \cdot R_1 C_h \quad (3.4)$$

(Για χρονικό διάστημα φόρτισης, μεγαλύτερου του ως άνω υπολογιζομένου, ο πυκνωτής έχει φορτιστεί σε τάση μεγαλύτερη του 99.3% της εφαρμοζόμενης.)



Σχήμα 3.15: ΤΑΣΗ, χαρακτηριστική φόρτισης ανθρώπου χωρητικότητας C_h μέσω αντίστασης R_1

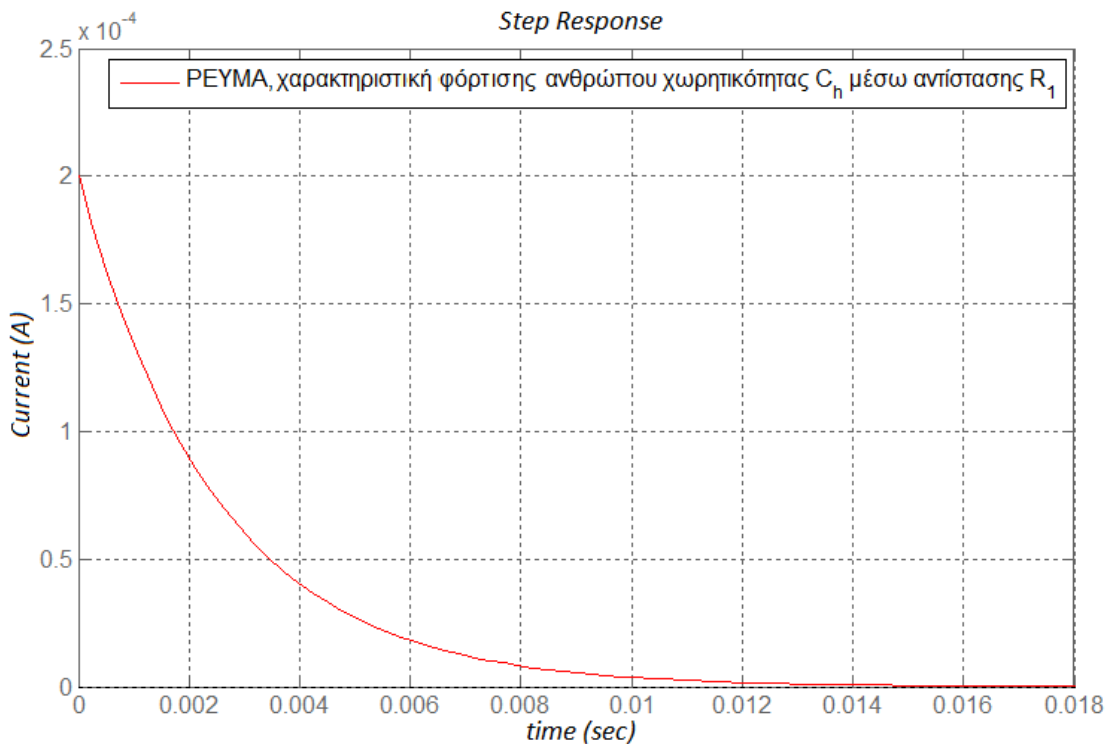
Εν πάση περιπτώσει, παρατηρούμε, ότι, είτε με τον εμπειρικό τύπο, είτε αναλυτικά υπολογιζόμενος ο χρόνος φόρτισης είναι εξαιρετικά μικρός δηλαδή είναι 0.0125 s και 0.0173 s αντίστοιχα. Επομένως, φόρτιση για 1 s θεωρείται υπεραρκετή για να φτάσει το ανθρώπινο σώμα σε δυναμικό ίσο με το δυναμικό της γεννήτριας.

Τέλος, για την ασφάλεια του φορτιζόμενου ατόμου, καλό είναι να υπολογιστεί το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει μεταβατικά το ανθρώπινο σώμα.

Το ρεύμα που ρέει για αυτό το χρονικό διάστημα παίρνει τιμή ίση με:

$$I(s) = \frac{V_{hv}(s) - V_c(s)}{R_1} = V_{hv} \frac{sC_h R_1}{R_1 + sC_h R_1^2} \quad (3.5)$$

Με αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace και με τη βοήθεια του Matlab έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για το ρεύμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16:

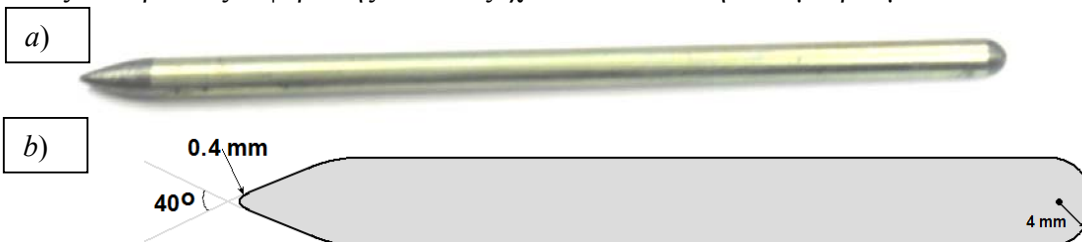


Σχήμα 3.16: PEYMA, χαρακτηριστική φόρτισης ανθρώπου χωρητικότητας C_h μέσω αντίστασης R_1

Παρατηρούμε ότι, το μέγιστο ρεύμα σε αυτήν την περίπτωση είναι 0.2 mA που θεωρείται ασφαλές. Ρεύμα που γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο είναι αυτό που έχει υπερβεί την τιμή του 1 mA και αρχίζει να γίνεται επιβλαβές για την σωματική υγεία του ανθρώπου για τιμές που ξεπερνούν τα 10 με 20 mA. Σε κάθε περίπτωση αν θέλουμε να αυξήσουμε πολύ παραπάνω την τάση φόρτισης του ανθρώπου για την διεξαγωγή άλλων πειραμάτων μπορούμε να παρεμβάλουμε αντίσταση μεγαλύτερη από 10 MΩ, ανάμεσα στον άνθρωπο και την γεννήτρια. Βέβαια, με αυτή την αλλαγή, θα πρέπει να υπολογισθούν, εκ νέου, οι χρόνοι φόρτισης του ανθρώπου, που εξαρτώνται από την τιμή της αντίστασης γραμμικά, όπως γίνεται φανερό και από τον εμπειρικό τύπο 3.4.

3.3.1.4 Μεταλλική ράβδος φόρτισης - εκφόρτισης – Γειωμένη μεταλλική επιφάνεια – Μονωτικό υλικό έδρασης του ανθρώπινου σώματος

Για την φόρτιση και την εκφόρτιση του φορτισμένου ανθρώπου που συμμετείχε στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική ράβδος για την προσέγγιση του στόχου εκφόρτισης (Σχήμα 3.17). Η ράβδος αυτή είχε την μία της πλευρά διαμορφωμένη έτσι ώστε να είναι αιχμηρή και να σχηματίζει γωνία περίπου 40 μοιρών, ώστε να ακολουθούνται οι οδηγίες του Προτύπου [8], και την άλλη πλευρά στρογγυλεμένη και πάλι βάσει του Προτύπου [8], ώστε να είναι δυνατό να γίνουν σειρές πειραμάτων και με τους δύο τρόπους εκφόρτισης και να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.



Σχήμα 3.17: Ράβδος φόρτισης – εκφόρτισης: a) φωτογραφία, b) σχηματική αναπαράσταση και τιμές κρίσιμων μεγεθών της ράβδου

Μετά το πέρας της διαδικασίας εκφόρτισης του ανθρώπου, για να αποβληθούν πλήρως τα φορτία από το σώμα του, αυτός ακουμπούσε σε μία γειωμένη μεταλλική επιφάνεια (Σχήμα 3.18).



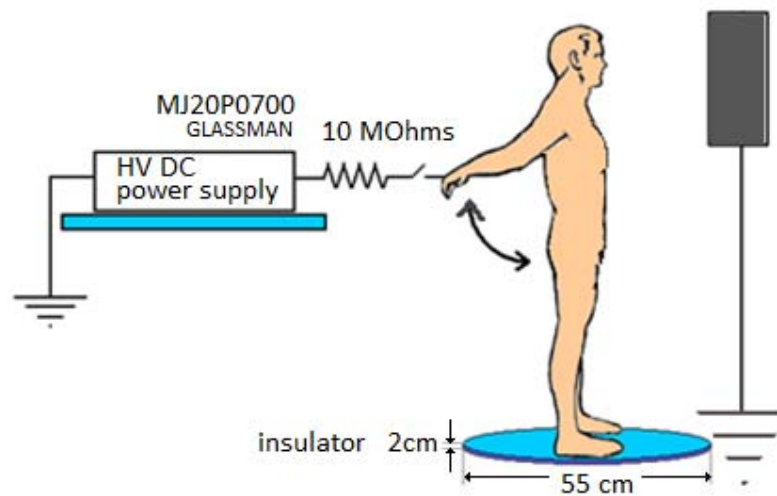
Σχήμα 3.18: Γειωμένη μεταλλική επιφάνεια

Κατά την διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του ανθρώπου, αυτός πατάει πάντα πάνω σε μονωτικό υλικό μορφής κανονικού οκταγωνικού πρίσματος μεγάλης διαγωνίου 55cm και ύψους 1 cm (Σχήμα 3.19). Η ύπαρξη του μονωτικού κρίνεται απαραίτητη για να μην έρχεται ο εκφορτιζόμενος σε άμεση επαφή με τη γη. Επίσης, έχει υπολογισθεί [5] ότι, το

πάχος του μονωτικού αυτού επηρεάζει σε κάποιο βαθμό τη συνολική χωρητικότητα του ανθρώπου, που φορτίζεται και εκφορτίζεται. Στο Σχήμα 3.20 φαίνεται σχέδιο όπου αναπαριστάται η διαδικασία φόρτισης του ανθρώπινου σώματος που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή.

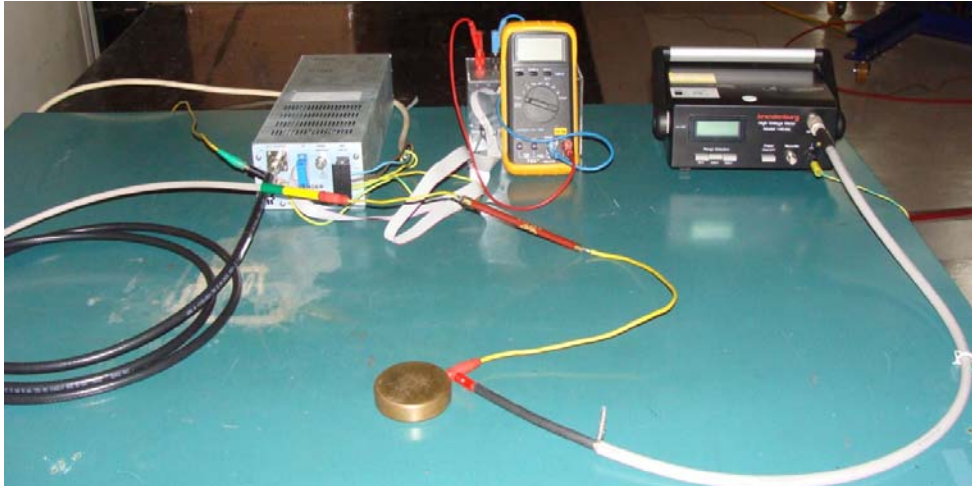


Σχήμα 3.19: Επιδαπέδιο μονωτικό (βακελίτης)



Σχήμα 3.20: Διάταξη για τη φόρτιση του ανθρώπινου σώματος

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση των ανθρώπων που συμμετείχαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. φαίνεται στο Σχήμα 3.21:

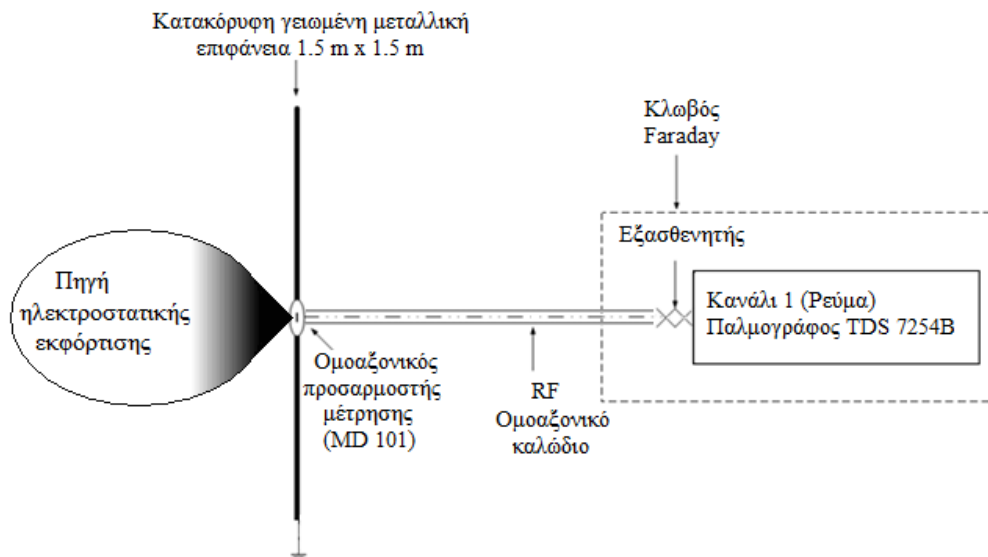


Σχήμα 3.21: Εξοπλισμός φόρτισης: Γεννήτρια DC, βολτόμετρα και ακροδέκτης Υψηλής Τάσης

3.3.2 Καταγραφή κυματομορφών ρεύματος και μήκους τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τυχαία σήματα, τα πειράματα πραγματοποιούνται στον **ανηχωτικό θάλαμο**.

Η **κατακόρυφη γειωμένη επιφάνεια** $1,2\text{ m} \times 1,2\text{ m}$ εκτός από επιφάνεια αναφοράς για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αποτέλεσε αρχικά και τη μηχανική βάση στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή μέτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22.

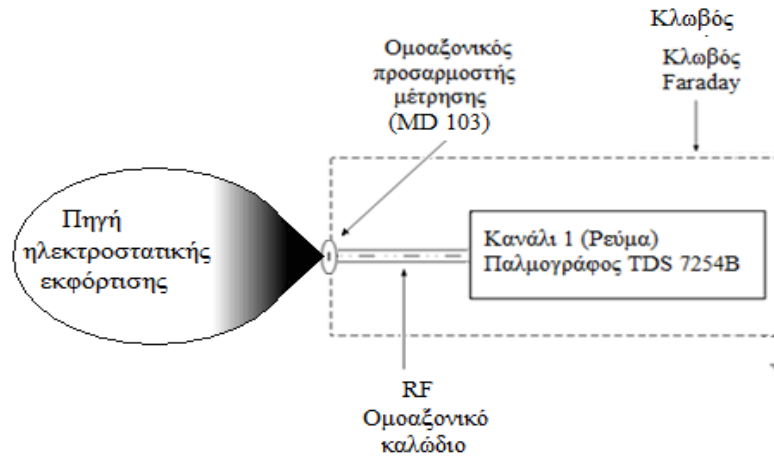


Σχήμα 3.22: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης (αρχική μορφή)

Η κατακόρυφη γειωμένη επιφάνεια απομακρύνθηκε και ο ομοαξονικός προσαρμοστής

μέτρησης αναρτήθηκε σε πλευρικό τοίχωμα του κλωβού Faraday, αφού παρατηρήθηκε ότι, σε αυτήν την περίπτωση, αναβαθμίζεται πολύ η αναπαραγωγιμότητα εκφορτίσεων πάνω στο στόχο, δεδομένου του ακλόνητου της καινούριας βάσης στήριξης, ενώ, η τελευταία, λειτουργεί όπως η κατακόρυφη γειωμένη πλάκα (όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως) σε σχέση με το από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση εκπεμπόμενο πεδίο.

Η διάταξη που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο φαίνεται στο Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Σχηματική αναπαράσταση της νέας τροποποιημένης πειραματικής διάταξης

Εκτός του εξοπλισμού που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατά τη διάρκεια της διατριβής κρίθηκε απαραίτητο να προμηθευτούμε κάποιον επιπλέον εξειδικευμένο εξοπλισμό για τη διαδικασία της καταγραφής του ρεύματος εκφόρτισης:

- Παλμογράφο, επίσης, με μεγαλύτερη απόκριση
- Ομοαξονικό καλώδιο υψηλότερου εύρους συχνοτήτων
- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για την αποτύπωση του τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

3.3.2.1 Παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε αρχικά, ήταν ο TDS 7254B.

Για τη μέτρηση κυματομορφών ρεύματος πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi, ο οποίος τέθηκε στη διάθεσή μας από την αντίστοιχη εταιρεία για περιορισμένο διάστημα, μέσα στο οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις από τους ανθρώπους που συμμετείχαν στο πείραμα, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 5. Ο παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi, που φαίνεται στο Σχήμα 3.24 είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της LeCroy με εύρος ζώνης 16 GHz.

Θεωρείται ένας από τους καλύτερους, στον κόσμο με πολύ μεγάλο εύρος συχνότητας (16 GHz), και πολύ μικρό χρόνο ανόδου (rise time), όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, που αφορούν, τόσο στην ευκολία χειρισμού του, όσο στην αποθήκευση και μεταφορά δεδομένων, είναι ασύγκριτα ανώτερα από τα αντίστοιχα του Tektronix TDS 7254B.



Σχήμα 3.24: Ο παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi

Πίνακας 3.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του παλμογράφου LeCroy SDA 816 Zi

Κανάλια Εισόδου	4
Εύρος ζώνης	16 GHz
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	29 ps
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	22 ps
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 1\%$
Σύζευξη εισόδου	DC, GND
Αντίσταση εισόδου	$50 \Omega \pm 2\%$
Εναισθησία εισόδου στα 50Ω	2 mV/div έως 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	$\pm 2 V_{max}@ \leq 100mV/div$, $5.5V_{rms}@ > 100mV/div$
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας	40 GS/s

3.3.2.1.1 Σημείωση για τη μετρητική ικανότητα των παλμογράφων

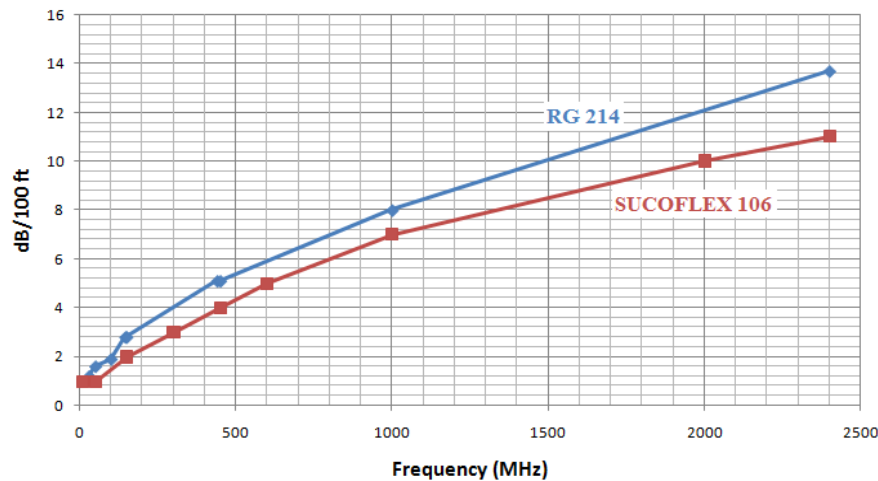
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, στις πολύ χαμηλές τάσεις φόρτισης (500 V ή 1000 V), όπου αναμένονται χρόνοι ανόδου (10%-90%) μικρότεροι ακόμα και από το χρόνο ανόδου του παλμογράφου, δεν είναι δυνατόν να έχουμε ακριβή μέτρηση αλλά μόνο ένα άνω όριο του χρόνου ανόδου που θέλουμε να μετρήσουμε. Παλμογράφοι με ακόμα ευρύτερη απόκριση στη συχνότητα θα απαιτούντο για κάτι τέτοιο, αλλά η προμήθεια τέτοιου εξοπλισμού φάνηκε αδύνατη στο χρονικό πλαίσιο που εκπονήθηκε η παρούσα εργασία.

Ένας εμπειρικός τύπος, που χρησιμοποιείται ευρέως, για τον υπολογισμό του πραγματικού χρόνου ανόδου του μετρούμενου σήματος, αν λάβουμε υπ' όψιν και τον εσωτερικό χρόνο ανόδου του παλμογράφου, είναι αυτός που δίνεται στην εξίσωση 3.6.

$$RiseTime_{real} = \sqrt{RiseTime_{measured}^2 - RiseTime_{scope}^2} \quad (3.6)$$

3.3.2.2 Ομοαξονικό καλώδιο SUCOFLEX 106

Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκκένωσης και να πάρουμε τις κυματομορφές του, χρησιμοποιούμε **ομοαξονικό καλώδιο**. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε καλώδιο τύπου RG 214. Ιδανικά θα επιθυμούσαμε ένα ολοπερατό καλώδιο να μεταφέρει το σήμα προς καταγραφή στον παλμογράφο μας. Προς αυτήν την κατεύθυνση έγινε, αντικατάσταση, του καλωδίου **RG 214** με το **SUCOFLEX 106**. Οι χαρακτηριστικές απώλειες των δύο καλωδίων, όπως δίνονται από τους κατασκευαστές τους, φαίνονται στο Σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.25: Απώλειες στο πεδίο της συχνότητας για τα καλώδια RG 214 και SUCOFLEX 106 [39]

Επειδή το ρεύμα που δημιουργείται έχει μεγάλες τιμές (περίπου 3,5A/kV) πρέπει να εξασθενήσουμε τα αντίστοιχο σήμα, προτού αυτό εισέλθει στον παλμογράφο.

Αρχικά, για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε, ο **εξασθενητής** της Tektronix (011-0059-03). Όμως με την αντικατάση του καλωδίου **RG214**, δεν χρησιμοποιήθηκε πλέον εξωτερική εξασθένηση, αφού το καλώδιο **SUCOFLEX 106** έχει ενσωματωμένο εξασθενητή.

Ο **ομοαξονικός προσαρμοστής** μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε αρχικά ήταν ο MD 101 της Schaffner.

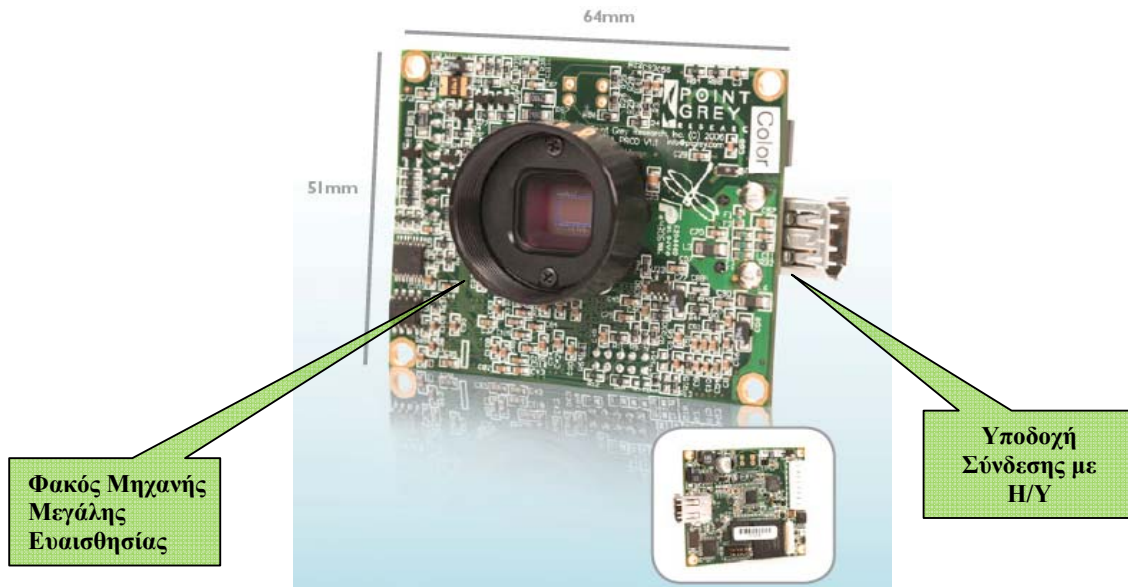
Για την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας του εμπλεκόμενου εξοπλισμού έγινε αντικατάσταση του ανωτέρω **ομοαξονικού προσαρμοστή μέτρησης** MD 101 της Schaffner με τον **ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης** MD 103. Ο τελευταίος έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.2.4, επίσης, έχει ενσωματωμένο τον επιθυμητό εξασθενητή και, άρα, είναι επαρκής, χωρίς τον εξασθενητή στη διάταξη.

3.3.2.3 Ψηφιακός αισθητήρας PointGrey Research Dragonfly2

Ο ψηφιακός αισθητήρας PointGrey Research Dragonfly2 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του μήκους τόξου εκφόρτισης ESD καθώς και για τον προσδιορισμό της ταχύτητας προσέγγισης. Ο ψηφιακός αισθητήρας μηχανή PointGrey Research Dragonfly2 έχει αισθητήρα 1/3" monochrome CC και ανάλυση 1024x768 pixels. Η εν λόγω φωτογραφική μηχανή είναι ικανή να αποτυπώνει σημεία του χώρου που παρουσιάζουν φωτεινότητα μεγαλύτερη από ένα κατώφλι, το οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατό το προσδιορισμό του μήκους τόξου, αφού βαθμονομήσουμε σωστά την εικόνα, βρίσκοντας τη σχέση μονάδων μήκους με τα pixels. Επιπρόσθετα για μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις φωτογραφίες που λήφθηκαν χρησιμοποιήθηκε μεγεθυντικός φωτογραφικός φακός Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor που ενσωματώθηκε στον αισθητήρα.

Ο ψηφιακός αισθητήρας PointGrey Research Dragonfly2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.26 και τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 3.4.

Ο φωτογραφικός φακός Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.27 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 3.5.



Σχήμα 3.26: Ψηφιακή Φωτογραφική Μηχανή PointGrey Research Dragonfly2 [40]

Πίνακας 3.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακού αισθητήρα PointGrey Research Dragonfly2 [40]

Αισθητήρας	Sony® 1/3" progressive scan CCDs
Μέγεθος pixels αισθητήρα	3.75μm square pixels
Μέγιστη Ανάλυση	1296x964 at 20 FPS
Μέγιστος Ρυθμός Στιγμιότυπων (Maximum Frame Rate)	20 FPS
Έξοδος βίντεο	8, 16 and 24-bit digital data



Σχήμα 3.27: Φωτογραφικός Φακός Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor 55-200mm f/4-5.6G ED [41]

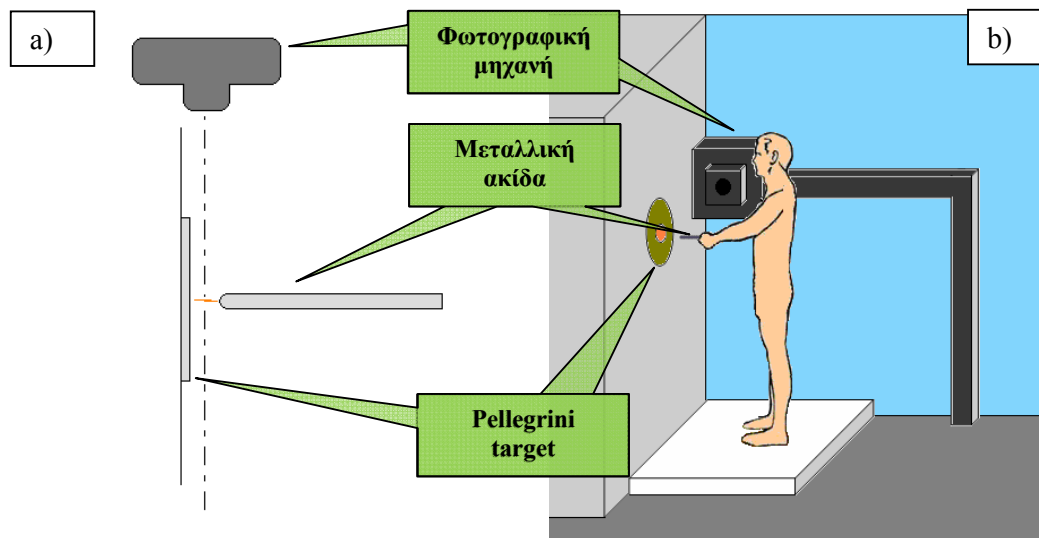
Πίνακας 3.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φωτογραφικού Φακού Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor 55-200mm f/4-5.6G ED [41]

Εστιακό Μήκος	55-200mm
Διάφραγμα	f/4-5.6
Ελάχιστη Απόσταση Εστίασης	1,1 m
Μέγεθος Φίλτρου	52 mm

3.3.2.3.1 Διάταξη καταγραφής μήκους τόξου

Η φωτογραφική μηχανή τοποθετήθηκε, με τη βοήθεια βάσης στήριξης, σε τέτοια θέση ώστε να μπορεί να φωτογραφίσει κάθετα την κίνηση της μεταλλικής ακίδας προς το Pellegrini target, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.28.

Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης καταγραφής του μήκους τόξου με τη βοήθεια μεγεθυντικού φωτογραφικού φακού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.28: a) Κάτοψη διάταξης φωτογράφισης τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

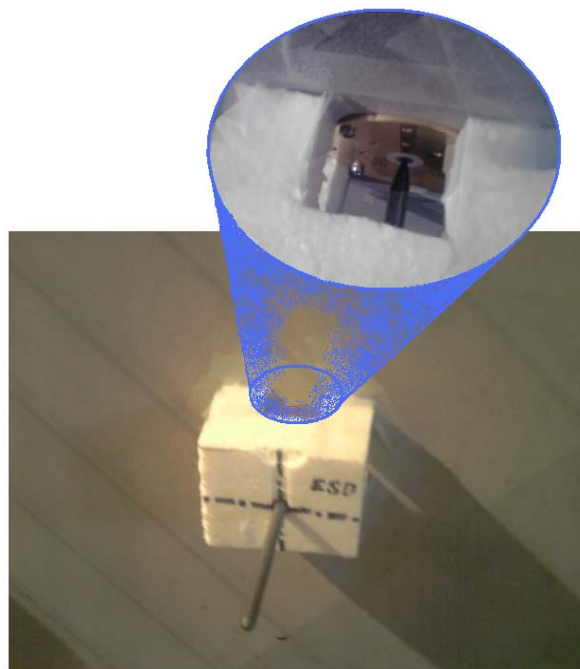
b) Πειραματική διάταξη καταγραφής μήκους τόξου Human ESD

Η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή ήταν συνδεδεμένη, δια μέσου θύρας USB, με Η/Υ. Το γεγονός αυτό έδινε τη δυνατότητα στον χειριστή του Η/Υ να ρυθμίζει τις παραμέτρους λήψης της φωτογραφίας (χρόνος ανοικτού κλείστρου, ευαισθησία φακού κτλ). Συγκεκριμένα, ο χρόνος ανοικτού κλείστρου (δηλαδή η διάρκεια κατά την οποία η φωτογραφική μηχανή απορροφά φως) είχε ρυθμιστεί στα 4 s για γρήγορες προσεγγίσεις (fast approach Human ESD) και 10 s για αργές προσεγγίσεις (slow approach Human ESD).



Σχήμα 3.29: Πειραματική διάταξη καταγραφής του τόξου εκφόρτισης, με τη βοήθεια ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής μεγάλης ευαισθησίας

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στη λήψη της φωτογραφίας του σπινθήρα του τόξου, χρησιμοποιήθηκε αυτοσχέδιος οδηγός (από πολυεστέρα) που επέτρεπε την κάθετη προσέγγιση της ακίδας προς το pellegrini target. Ο αυτοσχέδιος οδηγός (Σχήμα 3.30) ήταν διαμορφωμένος και ελεγμένος ώστε να μην επηρεάζει, ούτε τη ταχύτητα προσέγγισης, ούτε την κυματομορφή εκφόρτισης.



Σχήμα 3.30: Ο αυτοσχέδιος οδηγός που βοηθούσε στη κάθετη προσέγγιση

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής στόχευσαν βασικά στην ενδεδειγμένη μελέτη του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγεται όταν φορτισμένο υπό ορισμένη τάση ανθρώπινο σώμα εκφορτιστεί πάνω σε γειωμένη συσκευή. Στην εργασία αυτή ως «στόχος εκφόρτισης» (το σημείο δηλαδή στο οποίο θα πλήξει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης) χρησιμοποιήθηκε το σύστημα MD 103 της TESEQ, το οποίο είναι ειδικά κατασκευασμένο για την αξιολόγηση της ποιότητας λειτουργίας των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (διακρίβωση).

Στην παρούσα διατριβή έγινε προσπάθεια να διερευνηθούν συστηματικά ορισμένες πτυχές του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου – γειωμένου μετάλλου. Σχετικά ευρήματα ή υπόνοιες ευρημάτων, που μπορούν να βρεθούν στη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. κεφάλαιο 2), βασίζονται σε σποραδικά πειράματα τα οποία έχουν γίνει και παρουσιαστεί με τρόπο μερικό. Η κοινότητα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διεθνώς, δεν προσανατολίζεται στην ευθυγράμμιση των απαιτήσεων των σχετικών με την προσομοίωση ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Ο κύριος λόγος είναι η αδυναμία των κατασκευαστών και των εργαστηρίων να κατασκευάσουν και να διακριβώσουν προσομοιωτές ηλεκτρικών εκφορτίσεων που θα παράγουν καμπύλες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης οι οποίες θα συμμορφώνονται με τα ευρήματα αυτά.

Στην παρούσα διατριβή έγινε επανειλημμένως η καταγραφή κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε πολύ μεγάλο πλήθος ανθρώπινων σωμάτων και για διάφορες τάσεις φόρτισης. Η αξιοπιστία των συμπερασμάτων σχετικών με τις κυματομορφές αυτές αναβαθμίζεται, όταν στηρίζεται σε μια μεγάλη σειρά από πειράματα, και, σύμφωνα με αυτή την αρχή, εξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής. Ορισμένα στοιχεία των μετρήσεων αυτών, βέβαια, απομονώθηκαν

και αξιοποιήθηκαν σε πιο συγκεκριμένες κατευθύνσεις της διατριβής, όπως φαίνεται στα Κεφάλαια 6 και 7.

Στην παράγραφο 4.2 παρουσιάζεται η διάταξη παραγωγής και μέτρησης του ρεύματος που παράγεται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ενός ανθρώπινου σώματος, και δίνονται ορισμένες πληροφορίες που αφορούν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της δουλειάς αυτής.

Οι αρχικές μετρήσεις έγιναν με τον παλμογράφο TDS 7254B της TEKTRONIX και αφορούσαν ένα συγκεκριμένο ανθρώπινο σώμα. Έπειτα αφού κατέστη δυνατόν να έχουμε στη διάθεσή μας τον παλμογράφο της LeCroy, SDA 816 Zi έγιναν οι εκτεταμένες σειρές μετρήσεων που παρουσιάζονται.

Στην παράγραφο 4.3 εκτίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα γραφήματα των εν λόγω κυματομορφών, και στην παράγραφο 4.4 τα σχετικά συμπεράσματα από την επεξεργασία αυτών των δεδομένων.

4.2 Συνδεσμολογία – διαδικασία μετρήσεων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος

4.2.1 Μέτρηση ρεύματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος για την λήψη των μετρήσεων, πρέπει να τονιστεί ότι δεν περιγράφεται στο Πρότυπο [8].

Το Πρότυπο περιγράφει εκφορτίσεις επαφής για ηλεκτροστατικές γεννήτριες. Ωστόσο καμία εκφόρτιση που λαμβάνει χώρα, στην πράξη, δεν είναι εκφόρτιση επαφής. Όλες οι εκφορτίσεις ακόμα και αυτές που γίνονται μέσω γεννητριών εκφόρτισης, είναι εκφορτίσεις αέρος, καθώς, αν και ο ηλεκτρονόμος που διαθέτουν οι γεννήτριες αυτές είναι πολύ γρήγορος, δεν παύει να χρειάζεται ένα μικρό χρονικό διάστημα για να κλείσει. Έτσι, παρότι το “πιστόλι” (γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων) ακουμπά άμεσα στον στόχο, η εκφόρτιση δεν μπορεί να θεωρηθεί εκφόρτιση επαφής, καθώς προηγείται αυτής, εκφόρτιση αέρος στον ηλεκτρονόμο.

Ο κάθε άνθρωπος που εκφορτίζεται στο πείραμά μας επομένως, εκφορτίζεται μέσω του αέρα με την δημιουργία τόξου (εκκένωση). Η ταχύτητα προσέγγισης του στόχου εκφόρτισης επιλέχθηκε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώστε να γίνεται πιο γρήγορα

η εκφόρτιση και να μειώνεται η αντίσταση του αέρα (η αντίσταση του τόξου εξαρτάται από την απόσταση, η οποία εξαρτάται από το χρόνο).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει ως εξής. Αρχικά το τροφοδοτικό υψηλής συνεχούς τάσης του εργαστηρίου τροφοδοτούνταν με εναλλασσόμενη τάση 230 V/ 50 Hz μέσω του δικτύου της Δ.Ε.Η.. Στην συνέχεια γινόταν η ρύθμιση της τιμής της τάσης εξόδου του τροφοδοτικού με την βοήθεια ενσωματωμένης μεταβλητής αντίστασης (ποτενσιόμετρο) στην επιθυμητή τιμή της συνεχούς τάσης. Η τιμή αυτή της τάσης καταγράφονταν τόσο με την βοήθεια ενός βολτομέτρου υψηλής τάσης όσο και με την βοήθεια ενός βολτομέτρου χαμηλής τάσης το οποίο μετρούσε το σήμα $0 \div 10 \text{ V dc}$ (ανάλογο με την τάση της γεννήτριας $0 \div 20 \text{ kV dc}$, μέσω ενσωματωμένου ωμικού καταμεριστή).

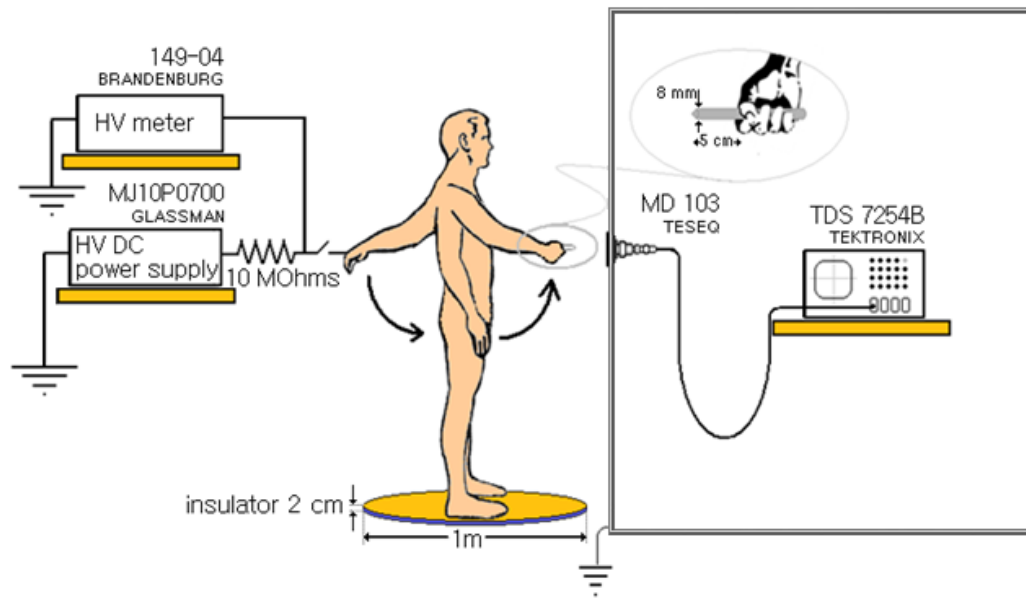
Ο άνθρωπος που λάμβανε μέρος στο πείραμα (υποκείμενο πειράματος) έχοντας προηγουμένως εκφορτιστεί στη γείωση του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων (για να αποβάλει όλα τα φορτία του σώματος του), ερχόταν σε επαφή με κατάλληλη κυλινδρική επιφάνεια, συνδεδεμένη με το τροφοδοτικό μέσω αντίστασης τιμής $10 \text{ M}\Omega$ (για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του υποκειμένου) (βλ. §3.3.2.1.2 και §3.3.2.1.3), ώστε να φορτιστεί στην επιθυμητή τάση. Κατά την διεξαγωγή όλων των πειραμάτων ο εκφορτιζόμενος βρισκόταν πάνω σε ένα μονωτικό υλικό κυλινδρικής μορφής για να μην έρχεται σε άμεση επαφή με την γη. Ο χρόνος επαφής του υποκειμένου με την κυλινδρική επιφάνεια για την επιτυχή φόρτιση έχει υπολογιστεί ήδη (βλ. §3.3.2.1.3) και αρκεί να είναι της τάξης του 1 s. Ωστόσο, κατά τη διεξαγωγή του πειράματος η φόρτιση γινόταν για χρόνο κοντά στα 3 s. Η μέτρηση του χρόνου φόρτισης γινόταν με την βοήθεια χρονομέτρου με ακρίβεια μέτρησης δεκάτων δευτερολέπτου. Το υποκείμενο φόρτισης από την στιγμή που άρχισε να μετράει ο χρόνος ερχόταν σε επαφή με την μεταλλική κυλινδρική επιφάνεια μέσω την ράβδου φόρτισης-εκφόρτισης. Μετά το πέρας 3 s και αφού η διαδικασία φόρτισης είχε ολοκληρωθεί με επιτυχία ο εκφορτιζόμενος ήταν έτοιμος να εκφορτιστεί για να γίνει καταγραφή της κυματομορφής.

Για την καταγραφή της κυματομορφής, ένας παρατηρητής βρισκόταν στον κλωβό που είναι τοποθετημένος ο παλμογράφος. Ακριβώς μετά την εκφόρτιση, η οθόνη του παλμογράφου κατέγραφε το γράφημα του ρεύματος εκφόρτισης του ανθρώπινου σώματος και ο παρατηρητής που βρισκόταν μέσα στον κλωβό έβλεπε στον παλμογράφο το γράφημα αυτό. Το ελάχιστο διάστημα δειγματοληψίας εξαρτάται από τις δυνατότητες

του χρησιμοποιούμενου παλμογράφου. Τα δείγματα αυτά αποθηκεύονται από τον παρατηρητή για περαιτέρω επεξεργασία στη συνέχεια.

Με το πέρας της εκφόρτισης του ανθρώπου, αυτός ακουμπούσε στην μεταλλική πλάκα γείωσης για να αποβληθούν πλήρως όσα φορτία είχαν παραμείνει στο σώμα του κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, και το πείραμα επαναλαμβάνονταν εκ νέου.

Συνοπτικά, τα προηγούμενα φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

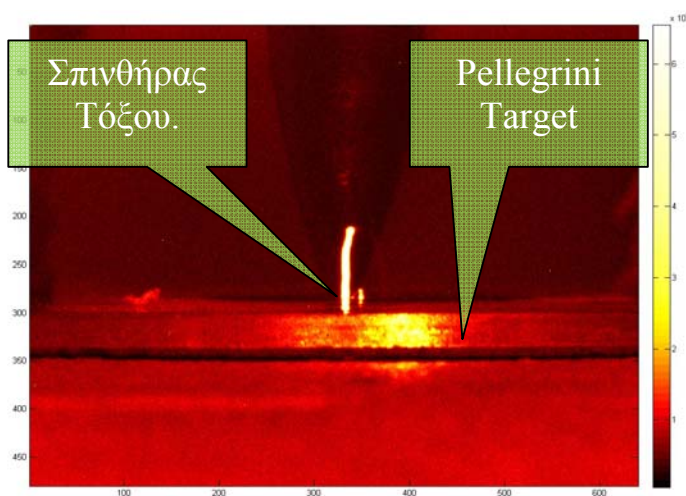


Σχήμα 4.1: Διάταξη φόρτισης - εκφόρτισης

4.2.2 Μέτρηση μήκους τόξου

Λόγω του γεγονότος ότι διαδικασία προσδιορισμού του μήκους τόξου για κάθε μία πειραματική εκφόρτιση ESD είναι αρκετά χρονοβόρα, ήταν δύσκολο να γίνουν μετρήσεις του μήκους του παραγόμενου τόξου σε κάθε έναν άνθρωπο από αυτούς που πήραν μέρος στο πείραμά μας. Ο χρονικός περιορισμός ετίθετο λόγω του ότι, σημαντικό μέρος του εξοπλισμού, μάς είχε παραχωρηθεί ως “δάνειο χρήσεως”, όπως προαναφέρθηκε. Άλλωστε ο απαραίτητος χρόνος θα αύξανε ακόμα περισσότερο, σε αυτή την περίπτωση καθώς, άνθρωποι με λιγότερη εμπειρία στο συγκεκριμένο πείραμα θα χρειάζονταν πολλαπλάσιο χρόνο για να πετύχουν ικανοποιητική επαναληψιμότητα στη μέτρηση αυτή, παράμετρος που είναι πολύ σημαντική για τις μετρήσεις του τόξου. Έτσι, ένα συγκεκριμένος άνθρωπος επιλέχθηκε να είναι αυτός που θα αξιοποιηθεί για τις συγκεκριμένες μετρήσεις. Ο άνθρωπος αυτός, άλλωστε, είχε ήδη διενεργήσει το πείραμα εκατοντάδες φορές πριν. Αυτό συμβάλλει στην αντιπροσωπευτικότερη μέτρηση της ταχύτητας.

Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης που ακολουθήθηκε είναι η ίδια όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.1. Επιπρόσθετα, ένας νέος παρατηρητής, με τη βοήθεια ενός H/Y, κατέγραφε τις φωτογραφίες του σπινθήρα του τόξου και τις αποθήκευε. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω του χρονικού περιορισμού της ευαισθησίας της φωτογραφικής μηχανής απαιτείτο συγχρονισμός και συνεργασία μεταξύ των 3 ατόμων (χειριστή H/Y, εκφορτιζομένου και παρατηρητή παλμογράφου). Χαρακτηριστικό παράδειγμα φωτογραφίας του σπινθήρα τόξου που λήφθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Οι αναγραφόμενες κλίμακες εκφράζουν pixels.



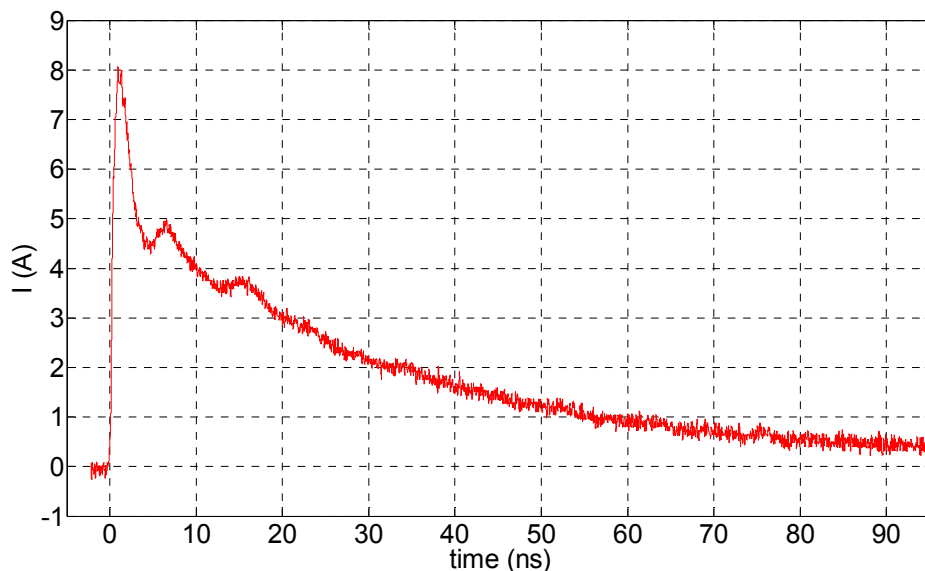
Σχήμα 4.2: Χαρακτηριστική φωτογραφία του σπινθήρα που προκαλείται από το τόξο

Ο τελικός προσδιορισμός του μήκους τόξου και της ταχύτητας προσέγγισης έγινε με ψηφιακή επεξεργασία των φωτογραφιών που είχαν ληφθεί με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου της Matlab. Η ψηφιακή αυτή επεξεργασία παρουσιάζεται στην ενότητα 4.5.

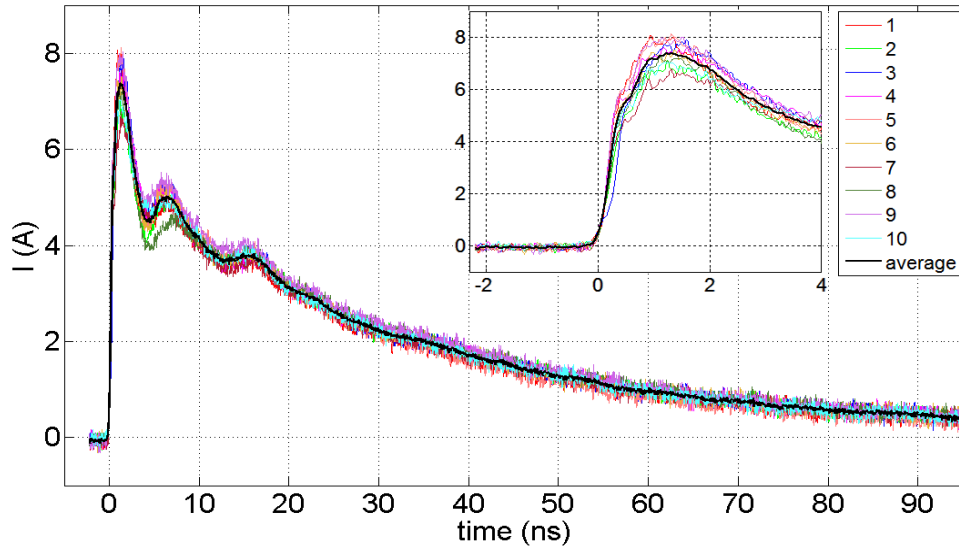
4.3 Μετρήσεις ρεύματος παραγομένου από έναν άνθρωπο –

Παλμογράφος TDS 7254B (Tektronix) – Τάση φόρτισης 2 kV

Συνολικά το υποκείμενο μελέτης εκφορτίστηκε 10 φορές πλησιάζοντας τον στόχο με την αιχμηρή πλευρά της ράβδου εκφόρτισης και άλλες 10 φορές πλησιάζοντας τον στόχο με τη στρογγυλευμένη πλευρά της ράβδου εκφόρτισης. Ο προς εκφόρτιση άνθρωπος, φορτισμένος σε τάση 2000 V, πλησίαζε γρήγορα (fast approach για την τιμή της ταχύτητας στην γρήγορη προσέγγιση, βλέπε §4.5.2) τον στόχο (pellegrini target) με τη ράβδο εκφόρτισης και λάμβανε χώρα η διαδικασία της εκφόρτισης, όπως στο Σχήμα 4.1. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται μία από τις καταγραφές των καμπυλών του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όταν ο άνθρωπος είναι φορτισμένος σε τάση 2 kV και κρατάει μεταλλική ράβδο, όπως περιγράφεται στην §3.3.1.4 με προτεταμένη την αιχμηρή πλευρά του, ενώ στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι 10 κυματομορφές και η μέση τιμή τους.



Σχήμα 4.3: Μία χαρακτηριστική, καταγεγραμμένη στον παλμογράφο TDS 7254B της Tektronix, καμπύλη ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανθρώπου φορτισμένου υπό τάση 2 kV, ο οποίος κρατά αιχμηρή μεταλλική ράβδο



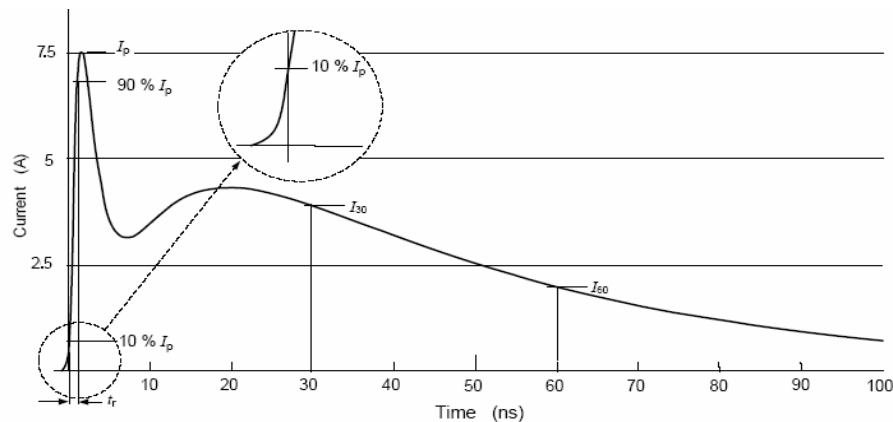
Σχήμα 4.4: Καταγεγραμμένες, στον παλμογράφο TDS 7254B της Tektronix, καμπύλες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανθρώπου φορτισμένου υπό τάση 2 kV, ο οποίος κρατά αιχμηρή μεταλλική ράβδο

Η ανωτέρω μέση γραφική παράσταση παρουσιάζει τιμές, για τις οριζόμενες από το Πρότυπο [8] παραμέτρους, αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι μέσης γραφικής για προσέγγιση στόχου με την αιχμηρή πλευρά της ράβδου εκφόρτισης

Παράμετρος	Τιμή
I_{peak}	7.372 A
t_r	0.727 ns
I_{30}	2.238 A
I_{60}	0.989 A

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ποια είναι η μορφή της γραφικής παράστασης του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο [8].



Σχήμα 4.5: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης

Συγκρίνοντας την μορφή των γραφικών παραστάσεων των Σχημάτων 4.4 και 4.5 παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση του Σχήματος 4.4 παρουσιάζει 3 ευδιάκριτα τοπικά μέγιστα ενώ η γραφική παράσταση του Σχήματος 4.5, που ορίζει το Πρότυπο, παρουσιάζει 2 τοπικά μέγιστα. Είναι επίσης φανερό ότι το δεύτερο μέγιστο της γραφικής παράστασης του Σχήματος 4.5 είναι αρκετά πιο ευρύ και δεν είναι τόσο απότομο και αιχμηρό, όσο το 2^ο και 3^ο τοπικό μέγιστο του Σχήματος 4.4. Μία ακόμη διαφορά που παρατηρείται είναι το 2^ο και 3^ο τοπικό μέγιστο της γραφικής παράστασης του Σχήματος 4.5 εμφανίζονται πολύ πιο γρήγορα από το 2^ο τοπικό μέγιστο που εμφανίζει η γραφική παράσταση του Σχήματος 4.5.

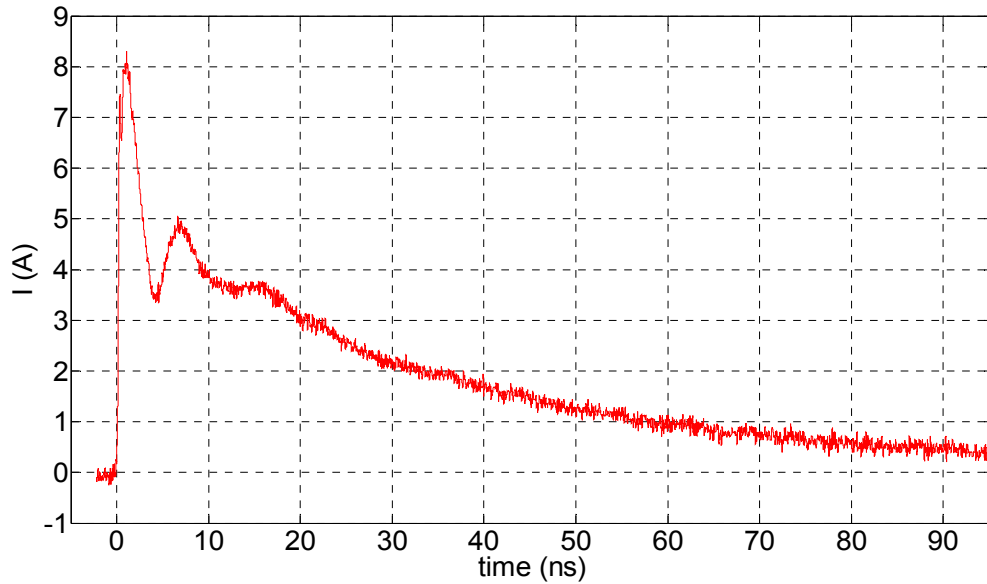
Όσον αφορά στην ποσοτική σύγκριση των παραμέτρων, που έχουν καταγραφεί με αυτές που ορίζει το Πρότυπο, πρέπει να σημειώσουμε ότι, παρατηρούμε σαφείς διαφορές. Αρχικά, όσον αφορά στο χρόνο ανόδου, βλέπουμε ότι, ενώ το πρότυπο ορίζει χρόνο ίσο με 0.8 ns, ο χρόνος, που υπολογίσαμε για τη μέση γραφική παράσταση και φαίνεται στον Πίνακα 4.1, είναι ελαφρώς μικρότερος και ίσος με 0.727 ns. Επίσης, είναι φανερό ότι, οι τιμές για τις παραμέτρους I_{30} και I_{60} , που σύμφωνα με το Πρότυπο αναμένονται 4 A και 2 A, αντίστοιχα, αποκλίνουν σημαντικά και έχουν υπολογιστεί ότι είναι 2.238 A και 0.989 A. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το φαινόμενο είναι αρκετά ταχύτερο από αυτό που το Πρότυπο περιγράφει. Τέλος, όσον αφορά στην τιμή του I_{peak} , παρατηρούμε ότι, έχει μέση τιμή ίση με 7.372 A, που είναι αρκετά κοντά στην προδιαγραφόμενη από το Πρότυπο (7.5 A).

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται μία από τις καταγραφές των καμπυλών του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όταν ο άνθρωπος, φορτισμένος με τάση 2 kV, κρατάει μεταλλική ράβδο, όπως περιγράφεται στην §3.3.1.4, με προτεταμένη την αμβλεία (στρογγυλευμένη) πλευρά της, ενώ στο Σχήμα 4.7 φαίνονται οι 10 κυματομορφές και η μέση τιμή τους.

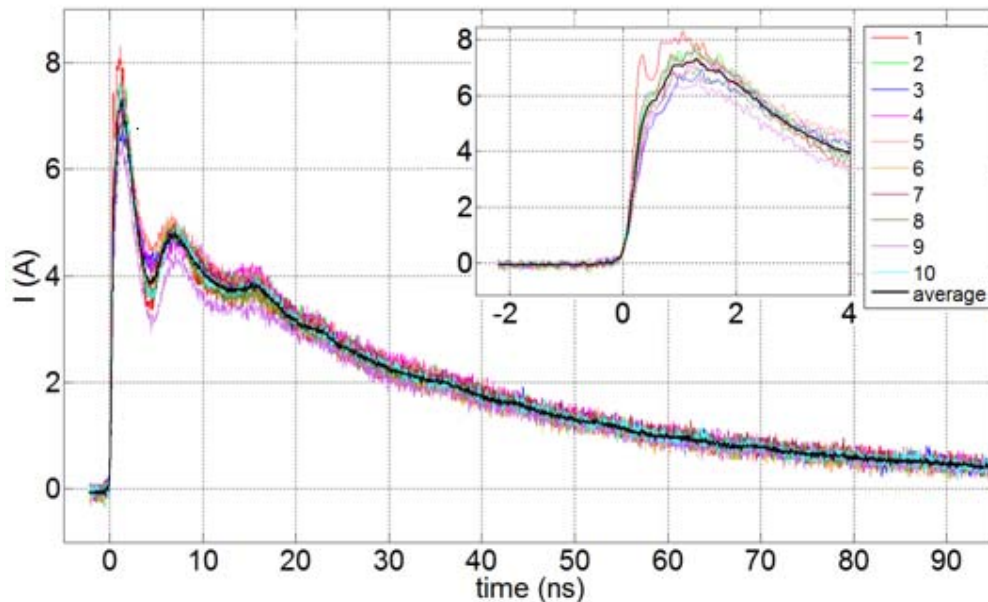
Τα χαρακτηριστικά αυτής της γραφικής παράστασης φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι μέσης γραφικής για προσέγγιση στόχου με την στρογγυλευμένη πλευρά της ράβδου εκφόρτισης

Παράμετρος	Τιμή
I_{peak}	7.306 A
t_r	0.726 ns
I_{30}	2.228 A
I_{60}	0.994 A



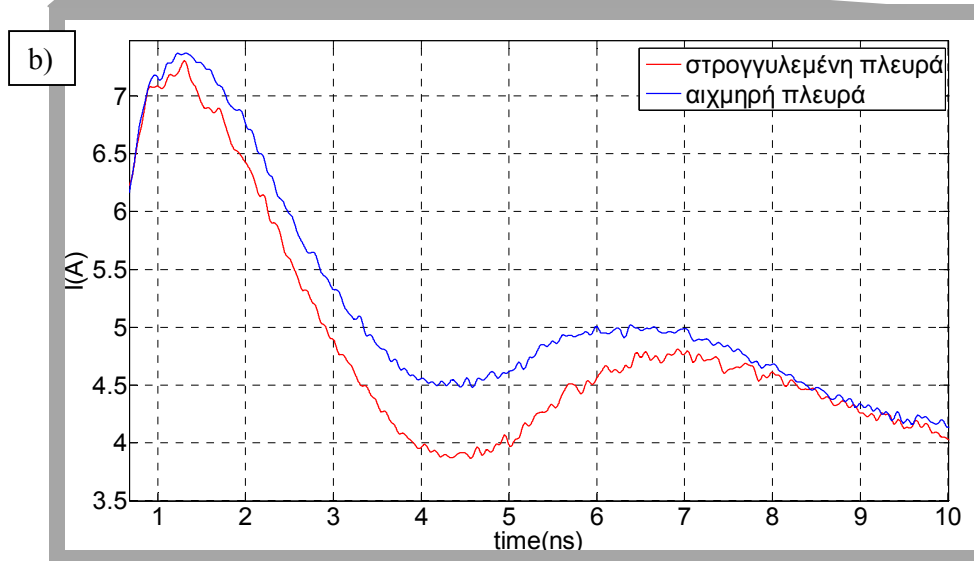
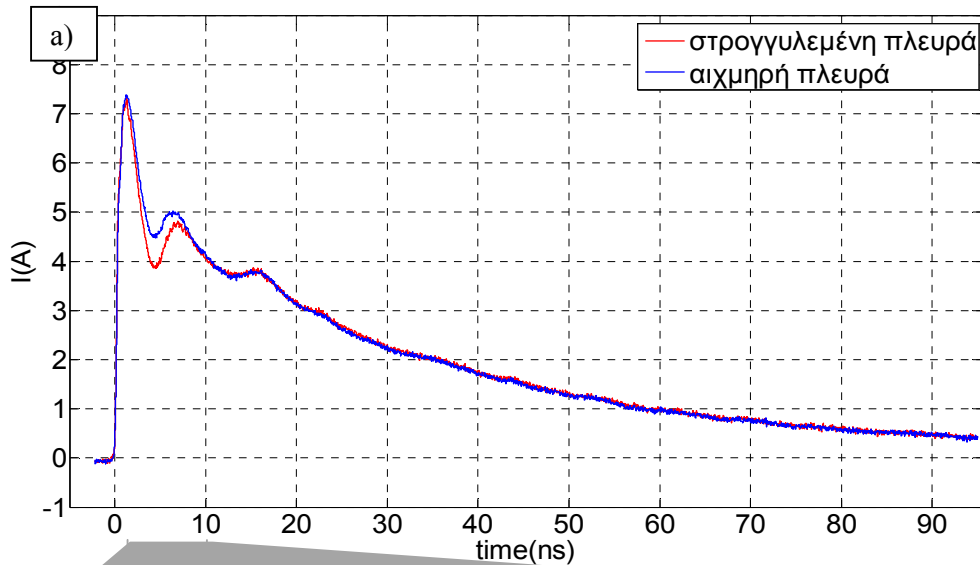
Σχήμα 4.6: Μία χαρακτηριστική, καταγεγραμμένη στον παλμογράφο TDS 7254B της Tektronix, καμπύλη ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανθρώπου φορισμένου υπό τάση 2 kV, ο οποίος κρατά μεταλλική ράβδο με αμβλύ (στρογγυλεμένο) άκρο



Σχήμα 4.7: Καταγεγραμμένες, στον παλμογράφο TDS 7254B της Tektronix, καμπύλες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανθρώπου φορισμένου υπό τάση 2 kV, ο οποίος κρατά μεταλλική ράβδο με αμβλύ (στρογγυλεμένο) άκρο

Οι τιμές αυτές έχουν μικρή απόκλιση από τις τιμές του Πίνακα 4.1 και άρα μπορούν να εξαχθούν ανάλογα συμπεράσματα.

Στο Σχήμα 4.8 βλέπουμε μία σύγκριση ανάμεσα στις μέσες τιμές των δύο συνόλων μετρήσεων (με αιχμηρή / με αμβλεία άκρη της μεταλλικής ράβδου, που χρησιμοποιείται για την εκφόρτιση).



Σχήμα 4.8: (α) Μέσες τιμές γραφικών παραστάσεων για την εκφόρτιση ανθρώπου με την στρογγυλευμένη και την αιχμηρή πλευρά της ράβδου εκφόρτισης, (β) λεπτομέρεια του (α)

Αυτό που παρατηρούμε από το Σχήμα 4.8 είναι ότι, οι δύο γραφικές παραστάσεις σχεδόν ταυτίζονται, για το μεγαλύτερο μέρος του φαινομένου. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, η μόνη ουσιαστική διαφοροποίηση που παρατηρείται, εμφανίζεται κοντά στο 1 ns και διαρκεί μέχρι περίπου το 8^ο ns και αφορά στο 1^ο τοπικό ελάχιστο και στο 2^ο τοπικό μέγιστο των καμπυλών. Έτσι, παρατηρούμε ότι, η καμπύλη, που προέκυψε από την προσέγγιση με το στρογγυλεμένο άκρο της ράβδου, παρουσιάζει μικρότερες τιμές ρεύματος στο διάστημα αυτό, όπου παρατηρείται η διαφοροποίηση ανάμεσα στις

γραφικές. Στο Σχήμα 4.8b παρουσιάζεται, με αλλαγή της κλίμακας χρόνου στην απεικόνιση, το χρονικό διάστημα, όπου παρατηρείται η διαφοροποίηση και φαίνονται τα γραφήματα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Εν γένει, ωστόσο, αυτό που παρατηρούμε είναι ότι, για τη συγκεκριμένη τάση φόρτισης (2000 V), δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις 2 αυτές γραφικές παραστάσεις και, επομένως, βλέπουμε ότι, δεν επηρεάζεται σημαντικά το αποτέλεσμα της μέτρησης από το αν η εκφόρτιση συμβεί με το στρογγυλευμένο ή το αιχμηρό άκρο της ράβδου εκφόρτισης.

4.4 Σειρές μετρήσεων σε πλήθος ανθρωπίνων σωμάτων, σε εύρος τάσεων φόρτισης, με τον παλμογράφο LeCroy SDA 816 Zi

Στην φάση αυτή της εκπόνησης της διατριβής, έγινε κατορθωτό να προμηθευτούμε για σύντομο χρονικό διάστημα τον παλμογράφο LeCroy SDA 816 Zi. Ο παλμογράφος αυτός παρουσιάζει μεγάλο εύρος απόκρισης συχνοτήτων (16 GHz).

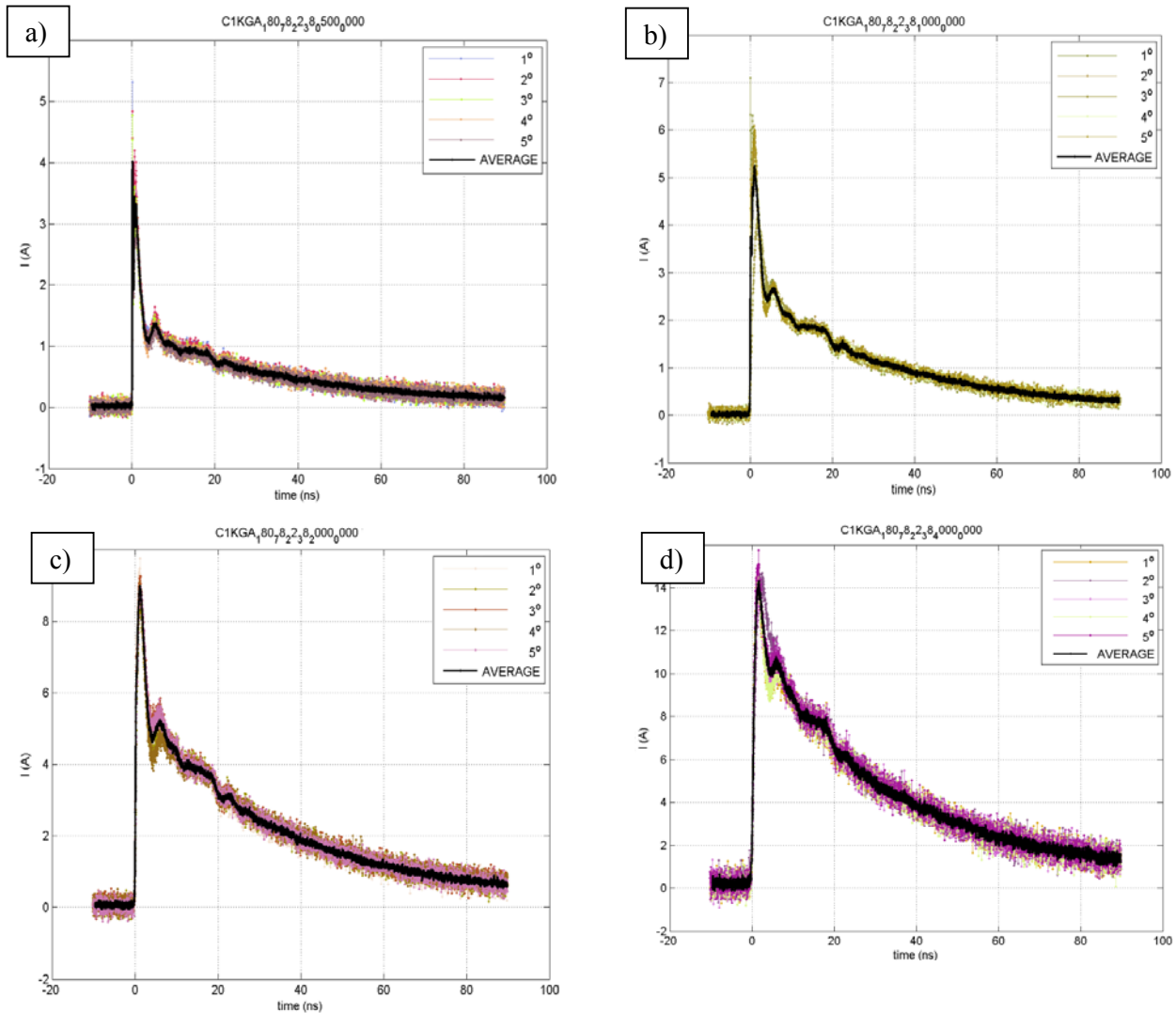
Εβδομήντα πέντε (75) άτομα έλαβαν μέρος στο πείραμά μας.

Η συνδεσμολογία και διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αυτή που περιγράφεται στην §4.2, και οι τάσεις φόρτισης ήταν 0.5 kV, 1 kV, 2 kV, 4 kV. Ελήφθησαν, σε ορισμένες περιπτώσεις, κάποιες μετρήσεις και για τάση φόρτισης 8 kV.

Ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία ονοματοδοσίας για κάθε άτομο που συμμετείχε. Κατ'αυτόν τον τρόπο αποδόθηκε στον-ην καθένα-μια που συμμετείχε ένας αριθμός ταυτοποίησης στον οποίο εμπεριέχονταν με κωδικοποιημένο τρόπο το ύψος και το βάρος του ατόμου και οι κλιματολογικές συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος. Τα μετρητικά δεδομένα αποθηκεύονταν σε αποθηκευτική μονάδα (USB) και έπειτα μεταφέρθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Με τη βοήθεια του πακέτου λογισμικού Matlab, δημιουργήθηκε κώδικας διαθέσιμος στο παράρτημα Π.2, ο οποίος με αυτόματο τρόπο επεξεργάστηκε τον μεγάλο, αυτό, όγκο της πληροφορίας και μας έδωσε τιμές μεγεθών και γραφήματα που συσχετίζουν μεγέθη μεταξύ τους.

Τα πειράματά μας έλαβαν χώρα υπό κλιματικές συνθήκες που παρουσίαζαν μικρές αποκλίσεις, όπως άλλωστε και τα σωματομετρικά μεγέθη που καταγράψαμε. Έτσι, τα ευρήματά μας, τα σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης, δεν είναι δυνατόν να καταδείξουν την, ενδεχόμενη, εξάρτησή τους από τα κλιματικά και σωματομετρικά μεγέθη.

Όλες οι μετρήσεις αυτές υπάρχουν στο [42]. Ενδεικτικά παρατίθενται, στο Σχήμα 4.9, οι μετρήσεις για ένα ανθρώπινο σώμα φορτισμένο στα τέσσερα αυτά επίπεδα τάσης.



Σχήμα 4.9: Καταγεγραμμένες από τον παλμογράφο κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ανθρώπινου σώματος υπό τάση φόρτισης α) 500 V, β) 1000 V, γ) 2000 V και δ) 4000 V

Σημαντική παρατήρηση: Αξίζει να σημειωθεί ότι στη σειρά μετρήσεων που παρουσιάζεται, διενεργήσαμε μετρήσεις που προσομοιώνουν περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης «γρήγορης προσέγγισης» της επιφάνειας εκφόρτισης (βλ §2.3.2). Αυτό σημαίνει ότι, οι περισσότερες κυματομορφές ρεύματος, που περιμένουμε, είναι “normal” (βλέπε κατηγοριοποίηση Rommerenke §2.3.2), για τάσεις φόρτισης 1, 2, 4 kV, και “maximum”, για τάση φόρτισης 0.5 kV. Ιδιαίτερη σημασία έχει, όμως, το

γεγονός ότι, αν και οι άνθρωποι που συμμετείχαν είχαν σαφείς οδηγίες και επίβλεψη, ώστε να εκτελούν μια “γρήγορη” εκφόρτιση, αυτό δεν έγινε πάντα κατορθωτό και, έτσι, διαπιστώνεται ορισμένο μικρό μέρος καμπυλών ρεύματος εκφόρτισης, οι οποίες έχουν διαφορετική συμπεριφορά (πχ στα 4 kV, είχαμε και κάποιες καμπύλες τύπου minimum (βλ. §2.3.2)). Στο παρόν κεφάλαιο έχει γίνει διάκριση των καμπυλών που λάβαμε σύμφωνα με τη μορφή τους, και παρουσιάζεται η σχέση ορισμένων μεγεθών του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με την τάση φόρτισης. Αυτό γίνεται για κάθε έναν από τον τύπο κυματομορφών που λάβαμε, χωριστά αλλά και για το σύνολό τους.

Οι όροι διεξαγωγής των πειραμάτων μας δεν μας επέτρεπαν να μετράμε σε κάθε μία από αυτές τις εκφορτίσεις την ταχύτητα προσέγγισης και το μήκος του τόξου, εν τούτοις, επειδή είναι σημαντικό να έχουμε εικόνα της τιμής, τόσο της “αργής”, όσο και της “γρήγορης” προσέγγισης, καθώς και του μήκους του τόξου, ασχοληθήκαμε χωριστά με τη διερεύνηση αυτών των μεγεθών και της σχέσης τους, όπως φαίνεται στην §4.5.

4.4.1 Κορυφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι τάσης φόρτισης

Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται οι τιμές των μέσων όρων των μέγιστων αυτών ρευμάτων μαζί με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες από το Πρότυπο για τις ανάλογες τάσεις. Με αυτές, πρέπει να συμμορφώνονται οι γεννήτριες (προσομοιωτές) ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που κατασκευάζονται για δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Πίνακας 4.3: Μέσες τιμές μέγιστου ρεύματος

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή Μέγιστου Ρεύματος [A]				Μέγιστη τιμή ρεύματος σύμφωνα με το [8] [A] ($3.75 \cdot \text{Τάση Φόρτισης [kV]}$)
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	normal	maximum	Όλες οι μορφές	
500 ^{II}		3.1897	4.0508	4.0282	-
1000 ^{III}		4.9686	5.8473	5.2298	-
2000 ^{III}		8.4507	8.0283	8.4276	7.500
4000 ^{IV}	6.879231	12.5258		12.1390	15.000
<p>[I] (πλήθος maximum ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 97.37 % [II] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 70.27 % [III] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 94.52 % [IV] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 93.15 %</p>					

Για τάση φόρτισης 8000 V υπήρξε περιορισμένο διαθέσιμο δείγμα τιμών, οπότε η αξιοπιστία των συμπερασμάτων που θα μπορούσαν να παρουσιασθούν θα ήταν περιορισμένη.

Η συμπεριφορά των μέγιστων ρεύματος έναντι της τάσης φόρτισης εξηγείται εύκολα από τη φυσική του φαινομένου και άλλωστε συμφωνεί με τα συμπεράσματα των άλλων

ερευνητών (κεφάλαιο 2) και ακολουθεί το πνεύμα του Προτύπου. Για τάσεις φόρτισης 2000 V και 4000 V οι ευρεθείσες τιμές είναι κοντά σε αυτές που προδιαγράφονται από το Πρότυπο. Ας σημειωθεί ότι, το μέγιστο ρεύμα ρεύμα, για τάση φόρτισης 4000 V, είναι σταθερά περί τα 2.5 A κάτω από εκείνο του Προτύπου, και αυτό φαίνεται και σε άλλες εργασίες [29-31].

Για τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, ακολουθούνται τυπικές διαδικασίες.

- Ευρίσκεται η μέση τιμή (μ_i) και η τυπική απόκλιση (σ_i) των μετρήσεων και διαγράφονται οι τιμές που δεν ανήκουν στο διάστημα $[\mu_i \pm 2\sigma_i]$.
- Υπολογίζεται νέα μέση τιμή και νέα τυπική απόκλιση $[\mu_2 \pm 2\sigma_2]$.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχουν τιμές εκτός του διαστήματος $[\mu_i \pm 2\sigma_i]$

Την διαδικασία αυτή εφαρμόζουμε στην 5^η στήλη του Πίνακα 4.3, στην οποία παρουσιάζονται συνολικά οι μέγιστες τιμές ρεύματος για όλες τις μορφές ESD. Οι τελικές μέσες τιμές, που προέκυψαν έτσι, φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

*Πίνακας 4.4: Μέσες τιμές μεγίστου ρεύματος, μετά τη στατιστική επεξεργασία.
(Τιμές εντός του $[\mu \pm 2\sigma]$)*

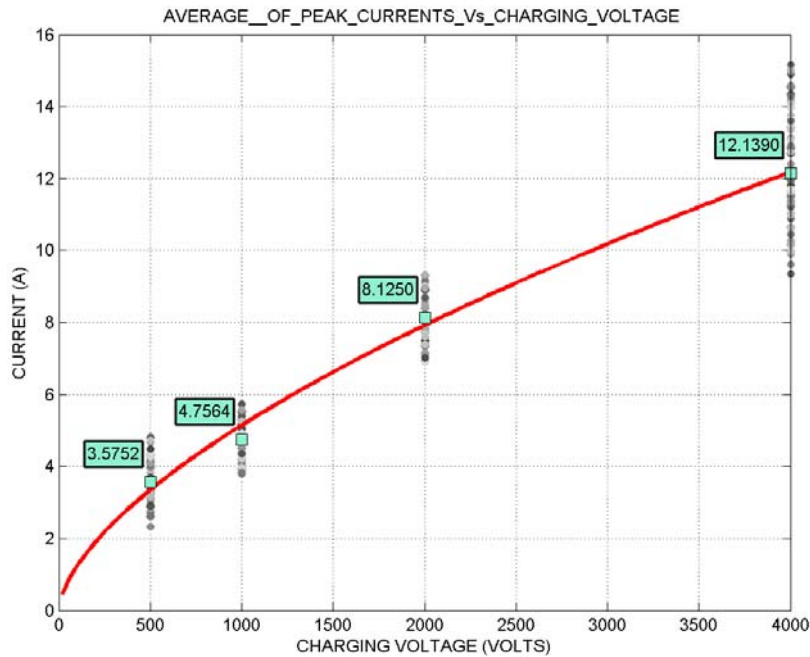
Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή μ [A]	Τυπική Απόκλιση σ [A]
500	3.575233	0.631593
1000	4.756386	0.509082
2000	8.125008	0.655964
4000	12.13901	1.522416

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται η γραφική παράσταση των μέσων όρων των μέγιστων ρευμάτων (μετά τη στατιστική επεξεργασία) των εξετασθέντων ανθρωπίνων σωμάτων έναντι της τάσης φόρτισης. Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η απεικόνιση μιας μαθηματικής έκφρασης της μορφής $I=aV^b$ που προκύπτει με γραμμική παρεμβολή.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει μέγιστα που αυξάνονται με την αύξηση της τάσης φόρτισης. Μάλιστα στην περιοχή [1000V, 4000V] βάσει των πειραματικών μας δεδομένων αλλά και της μαθηματικής έκφρασης, η εξάρτηση μέγιστη ρευμάτων απο την τάση είναι σχεδόν γραμμική.

Η εξίσωση που αντιστοιχεί στην καμπύλη του Σχήματος 4.10 είναι η (4.1).

$$I_{\max,1}(A) = 5.144 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.6215} \quad (4.1)$$



Σχήμα 4.10: Μέσοι όροι των μέγιστων ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης (όλες οι μορφές ESD)

Το Πρότυπο ορίζει για την τιμή του μέγιστου ρεύματος, σε A, το γινόμενο της τάσης φόρτισης επί το συντελεστή 3.75 (εκτός της περίπτωσης των 500 V στην οποία δεν αναφέρεται). Έτσι θα έχουμε για τάσεις 1, 2 και 4 kV, μέγιστες τιμές ρευμάτων, 3.75, 7.5 και 15 A αντίστοιχα.

Αν χρειαζόταν να κάνουμε μια αντιστοίχιση της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αλλά και της συμπεριφοράς των ρευμάτων αυτών ως προς την αλλαγή της τάσης, με το Πρότυπο [8], θα λέγαμε ότι αυτό περιγράφει τις “normal” εκφορτίσεις, για τάση φόρτισης 2000 V. Από το Σχήμα 4.10, διαπιστώνεται ότι, η ευρεθείσα τιμή του πειράματός μας (8.125 A) είναι παραπλήσια της τιμής του Προτύπου (7.5 A), αποκλίνουσα αυτής λιγότερο του 10%.

Στις “καινούριες” τάσεις που ελέγχθησαν στην παρούσα διατριβή (500 και 1000 V), οι οποίες απαντώνται συχνά σε περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, και μάλιστα θεωρούνται ιδιαίτερα επικίνδυνες, διαπιστώσαμε αδυναμία προσέγγισης τους από μια γραμμική σχέση όπως ορίζει το Πρότυπο. Προτείνουμε εδώ μια εναλλακτική σχέση: αυτήν που περιγράφεται στην (4.1).

Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι, ενώ, στις χαμηλότερες τάσεις (1000 V), θα περιμέναμε, σύμφωνα με το Πρότυπο, μικρότερες τιμές για τα μέγιστα ρεύματα, οι τιμές είναι μεγαλύτερες.

Τέλος, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον, το Πρότυπο να κάνει αναφορά και στα 500 V, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει. Σ' αυτήν την περίπτωση (τάση φόρτισης 500 V) βλέπουμε ότι, το μέγιστο ρεύμα είναι πολύ μεγάλο και αυτό εξηγείται, αν λάβουμε υπ' όψη ότι, η μορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δεν είναι όμοια για όλες τις τάσεις φόρτισης (βλ. και κεφάλαιο 2), διαπίστωση, όμως, την οποία θα έπρεπε, τότε, να δεχθεί, το ίδιο, το Πρότυπο.

4.4.2 Χρόνος ανόδου ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι τάσης φόρτισης

Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι τιμές των μέσων όρων των καταγεγραφθέντων χρόνων ανόδου των ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μαζί με τη μοναδική ορισμένη, από το Πρότυπο τιμή.

Πίνακας 4.5: Μέσες τιμές χρόνου ανόδου

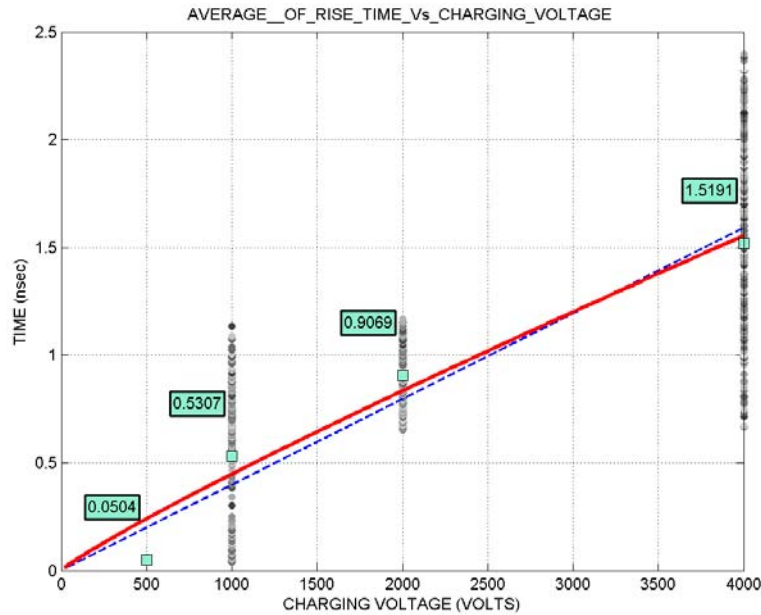
Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή Χρόνου Ανόδου [ns]				Χρόνος Ανόδου σύμφωνα με το [8] [ns]
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	normal	maximum	Όλες οι μορφές	0.8000
500 ^[I]		0.0689	0.0499	0.0504	
1000 ^[II]		0.5355	0.5244	0.5322	
2000 ^[III]		0.9080	0.887927	0.9069	
4000 ^[IV]	5.6289	2.5799		2.7888	
<p>[I](πλήθος maximum ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 97.37 % [II](πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 70.27 % [III](πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 94.52 % [IV](πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 93.15 %</p>					

Για την στατιστική επεξεργασία των τιμών ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα με την § 4.4.1. Τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Μέσες τιμές χρόνου ανόδου, μετά τη στατιστική επεξεργασία. (Τιμές εντός του $[\mu \pm 2\sigma]$)

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή μ [A]	Τυπική Απόκλιση σ [A]
500	0.0504	0.0067
1000	0.5322	0.3074
2000	0.9069	0.1312
4000	1.5191	0.4421

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται η γραφική παράσταση των μέσων όρων του χρόνου ανόδου των ανθρώπων, που έλαβαν μέρος στα πειράματα, έναντι της τάσης φόρτισης.



Σχήμα 4.11: Μέσοι όροι του χρόνου ανόδου των ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης (όλες οι μορφές ESD)

Στο σημείο αυτό, μπορούμε να κάνουμε, πάλι, ορισμένες παρατηρήσεις: είναι προφανές ότι, ο χρόνος ανόδου δεν είναι ίδιος για όλες τις τάσεις φόρτισης, όπως θέλει το Πρότυπο [8], αλλά διαφέρει για κάθε μια, γεγονός που συμφωνεί με την παρατήρηση του Barth [28].

Όπως και πριν, προσεγγίσαμε τα ανωτέρω ζεύγη τιμών με μια μαθηματική εξίσωση της μορφής $t_r = aV^b$, όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.2.

$$t_r (ns) = 0.4468 \cdot (V_{ESD} (kV))^{0.8986} \quad (4.2)$$

Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε ότι, σύμφωνα με τα ευρήματα της παρούσας έρευνας, φαίνεται ότι, το γράφημα του χρόνου ανόδου είναι πολύ κοντά σε μία γραμμική εξίσωση που περνά από την αρχή των αξόνων. Αυτή φαίνεται στο ίδιο Σχήμα με μπλε διακεκομμένη γραμμή.

$$t_r (ns) = 0.3975 \cdot (V_{ESD} (kV)) \quad (4.3)$$

Στην πραγματικότητα, οι μετρούμενοι χρόνοι ανόδου, ειδικά στο πρώτο επίπεδο τάσης φόρτισης “500 V”, έχουν τη χρηστική αξία “άνω ορίου” καθώς επιχειρούμε να μετρήσουμε τιμές που βρίσκονται στα όρια ή και κάτω από την ικανότητα του χρησιμοποιούμενου παλμογράφου, όπως περιγράφεται στην §3.3.2.1.1. Συνεπώς, είναι βέβαιο ότι ο χρόνος ανόδου, για τάση φόρτισης 500 V, είναι χαμηλότερος από την τιμή

που παρουσιάζεται ακριβώς πριν, στο Σχήμα 4.11, σύμφωνα με τον εμπειρικό προσεγγιστικό τύπο (3.6).

4.4.3 I_{30} και I_{60} έναντι τάσης φόρτισης

Οι παράμετροι I_{30} και I_{60} χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ορθότητας των παραχθειςών από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων κυματορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι τιμές τους πρέπει να κείνται ανάμεσα στα όρια που θέτει το Πρότυπο, ανάλογα με το επίπεδο τάσης φόρτισης.

Όπως έχει ήδη δειχθεί, καθώς η παρούσα διατριβή αμφισβητεί την καθολικότητα της μορφής του ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο, η τιμή των παραμέτρων δεν αναμένεται να αυξάνεται ευθέως ανάλογα με την αύξηση της τάσης φόρτισης. Κυρίως επειδή η μορφή των καμπυλών ρεύματος δεν είναι η ίδια για κάθε τάση φόρτισης. Όμοια με πριν, παρατίθενται τιμές και γραφήματα για τις τιμές των εν λόγω παραμέτρων και τη συμπεριφορά τους, συναρτήσει της τάσης φόρτισης (Πίνακας 4.7 και στατιστική επεξεργασία, όπως πριν, στον Πίνακα 4.8).

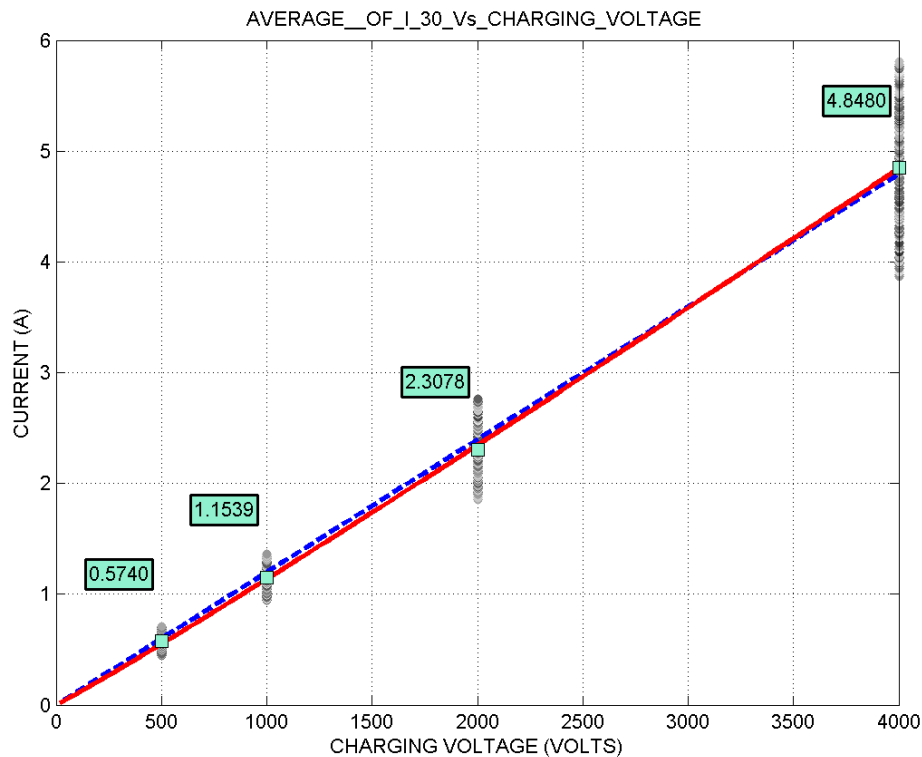
Πίνακας 4.7: Μέσες τιμές των παραμέτρων I_{30} και I_{60}

I_{30}					
Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή Ρεύματος I_{30} [A]				Τιμή ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο [8] [A] (2*Τάση Φόρτισης [kV])
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	normal	maximum	Όλες οι μορφές	
500		0.6348	0.7019	0.7001	-
1000		1.1698	0.9802	1.1134	-
2000		2.2650	2.1838	2.2606	4
4000	5.8553	4.7418		4.8180	8
I_{60}					
Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή Ρεύματος I_{60} [A]				Τιμή ρεύματος σύμφωνα με το Πρότυπο [8] [A] (1*Τάση Φόρτισης [kV])
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	normal	maximum	Όλες οι μορφές	
500		0.2496	0.3169	0.3151	-
1000		0.5243	0.3849	0.4829	-
2000		1.0183	1.0219	1.0185	2
4000	2.4115	2.1418		2.1603	4

Στα Σχήματα 4.12 και 4.13 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων αυτών αναφορικά με την τάση φόρτισης. Γίνεται φανερό ότι, η σχέση τους προσεγγίζεται από μία ευθεία γραμμή, που περνά από την αρχή των αξόνων. Όμως, οι τιμές τους είναι πολύ διαφορετικές από αυτές που προτείνονται στο Πρότυπο, καθώς φαίνεται στον Πίνακα 4.7 και στον Πίνακα 4.8 που προκύπτει μετά από στατιστική επεξεργασία.

Πίνακας 4.8: Μέσες τιμές I_{30} και I_{60} , μετά τη στατιστική επεξεργασία.
(Τιμές εντός του $[\mu \pm 2\sigma]$)

Τάση Φόρτισης [V]	I_{30}		I_{60}	
	Μέση Τιμή μ [A]	Τυπική Απόκλιση σ [A]	Μέση Τιμή μ [A]	Τυπική Απόκλιση σ [A]
500	0.5740	0.0648	0.2651	0.0512
1000	1.1543	0.1039	0.5215	0.0823
2000	2.3080	0.2317	1.0807	0.1974
4000	4.8478	0.4919	2.1645	0.3855



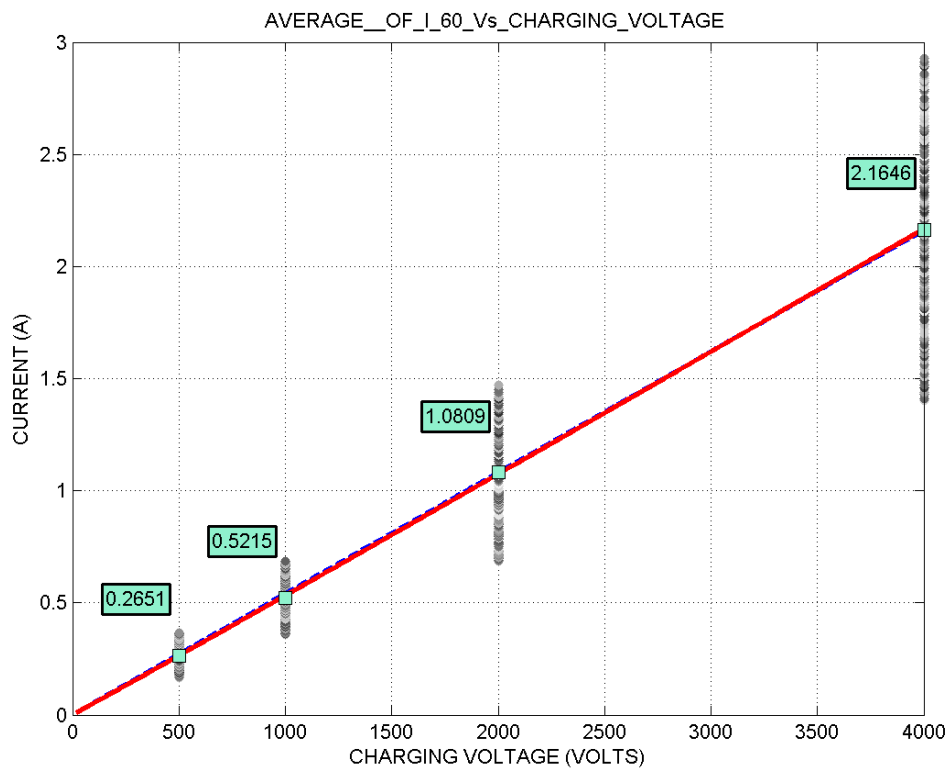
Σχήμα 4.12: Μέσοι όροι των παραμέτρων I_{30} των ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης (όλες οι μορφές ESD)

Όπως και πριν, προσεγγίσαμε τα ανωτέρω ζεύγη τιμών με μια μαθηματική εξίσωση της μορφής $I=aV^b$, όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.4.

$$I_{30}(A) = 1.1357 \cdot (V_{ESD}(kV))^{1.046} \quad (4.4)$$

Όπως και σε προηγούμενη περίπτωση, βλέπουμε ότι, η μαθηματική εκφράση σε μορφή «δύναμης» είναι πολύ κοντά σε μια ευθεία γραμμή, που περνάει από την αρχή των αξόνων. Άρα, μπορεί να γίνει και μία γραμμική προσέγγιση πάλι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12, με μπλε διακεκομμένη γραμμή.

$$I_{30}(A) = 1.198 \cdot (V_{ESD}(kV)) \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.13: Μέσοι όροι των παραμέτρων I_{60} των ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης (όλες οι μορφές ESD)

Μια προσέγγιση με μαθηματική εξίσωση της μορφής $I=aV^b$, φαίνεται στην εξίσωση 4.6, σε σχέση με το I_{60} :

$$I_{60}(A) = 0.5314 \cdot (V_{ESD}(kV))^{1.014} \quad (4.6)$$

Μάλιστα, μπορεί να εξαχθεί, και σ' αυτήν την περίπτωση, μία γραμμική μαθηματική έκφραση, με πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων:

$$I_{60}(A) = 0.54 \cdot (V_{ESD}(kV)) \quad (4.7)$$

4.4.4 Δεύτερο τοπικό μέγιστο έναντι τάσης φόρτισης

Το δεύτερο τοπικό μέγιστο της καμπύλης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ορίζεται στο Πρότυπο [8] μέσω της μαθηματικής έκφρασης του ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζει τιμή ορισμένη με αναφορά την μέγιστη τιμή ρεύματος, και λαμβάνει χώρα ορισμένη χρονική στιγμή. Αυτό, σύμφωνα με το Πρότυπο, ισχύει για κάθε τάση, και κάθε περίπτωση εκφόρτισης. Στις μετρήσεις που λήφθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, ανέκυψαν διαφορετικά δεδομένα, τα οποία εκτίθενται στην παρούσα παράγραφο. Για το σύνολο των μετρήσεων που ελήφθησαν παρουσιάζονται οι τιμές του Πίνακα 4.9. (Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία στατιστικής επεξεργασίας και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.10).

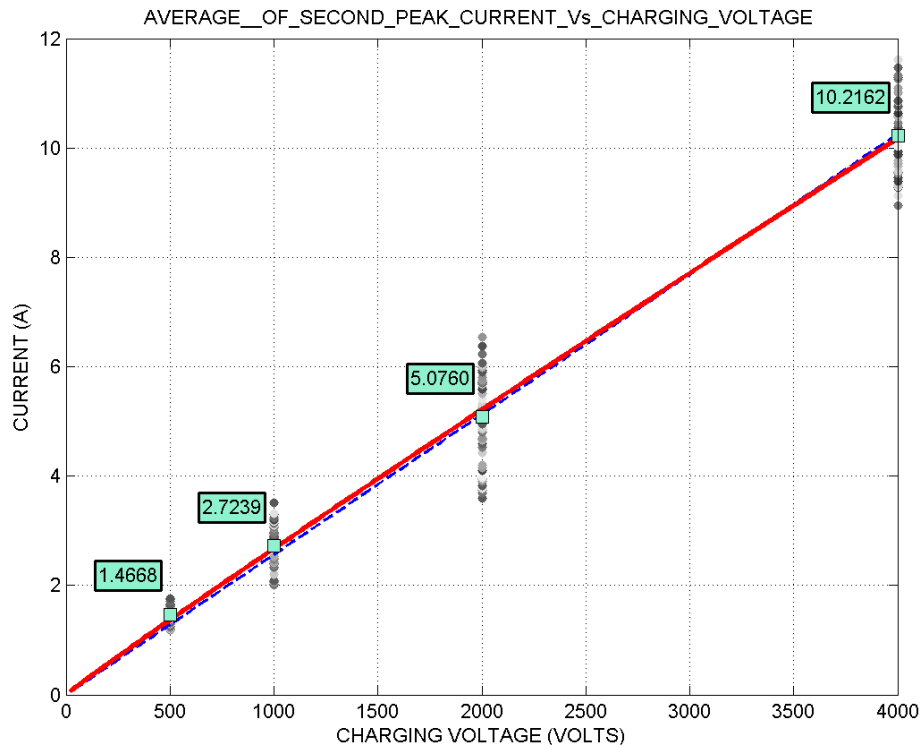
Πίνακας 4.9: Μέσες τιμές Δεύτερου Μεγίστου

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή Δεύτερου Μεγίστου [A]				Δεύτερο Μέγιστο σύμφωνα με την εξίσωση ρεύματος του [8] [A]
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	Normal	maximum	Όλες οι μορφές	
500 ^{II}		1.3547	1.5402	1.5353	-
1000 ^{III}		2.6334	2.9054	2.7142	-
2000 ^{III}		4.8827	5.4870	4.9158	4.36
4000 ^{IV}	6.5168	10.3337		10.0722	8.72
<p>[I] (πλήθος maximum ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 97.37 % [II] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 70.27 % [III] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 94.52 % [IV] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 93.15 %</p>					

Πίνακας 4.10: Μέσες τιμές Δεύτερου Μεγίστου, μετά τη στατιστική επεξεργασία. (Τιμές εντός του $[\mu \pm 2\sigma]$)

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή μ [A]	Τυπική Απόκλιση σ [A]
500 ^{II}	1.4667	0.15201
1000 ^{III}	2.7238	0.3987
2000 ^{III}	5.0759	0.7900
4000 ^{IV}	10.2161	0.7022

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται η τιμή του ρεύματος του δεύτερου τοπικού μεγίστου ως προς την τάση φόρτισης.



Σχήμα 4.14: Μέσοι όροι του ρεύματος του δεύτερου τοπικού μεγίστου έναντι της τάσης φόρτισης)

Όπως και προηγούμενα, μία μαθηματική έκφραση με τη μορφή της δύναμης εφαρμόστηκε για να προσεγγίσει τα δεδομένα μας.

$$I_{\max,2}(A) = 2.6693 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.9654} \quad (4.8)$$

Στην περίπτωσή μας, έχουμε μια σχεδόν γραμμική σχέση που περνάει από την αρχή των αξόνων. Μια τέτοια ευθεία είναι αυτή της εξίσωσης 4.9, που φαίνεται στο Σχήμα 4.14 με μπλε διακεκομμένη γραμμή.

$$I_{\max,2}(A) = 2.5630 \cdot (V_{ESD}(kV)) \quad (4.9)$$

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται ο λόγος του δεύτερου προς το πρώτο μέγιστο του ρεύματος εκφόρτισης, έναντι της τάσης φόρτισης.

Από τις μετρήσεις μας προέκυψε ότι δεν υπάρχει ένας σταθερός λόγος του δεύτερου προς το πρώτο μέγιστο. Για τις «γρήγορες» εκφορτίσεις που ήταν ο κανόνας στις εν λόγω σειρές μετρήσεων, βλέπουμε ότι ο λόγος, όχι μόνο δεν είναι σταθερός αλλά αυξάνει με την αύξηση της τάσης φόρτισης, όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.15 και στο Σχήμα 4.15. Αυτό σημαίνει πως το δεύτερο μέγιστο αυξάνει και πλησιάζει το πρώτο, με την αύξηση της τάσης. Στους Πίνακες 4.11 και 4.12 φαίνονται οι τιμές του λόγου αυτού και αντίστοιχες επεξεργασίες.

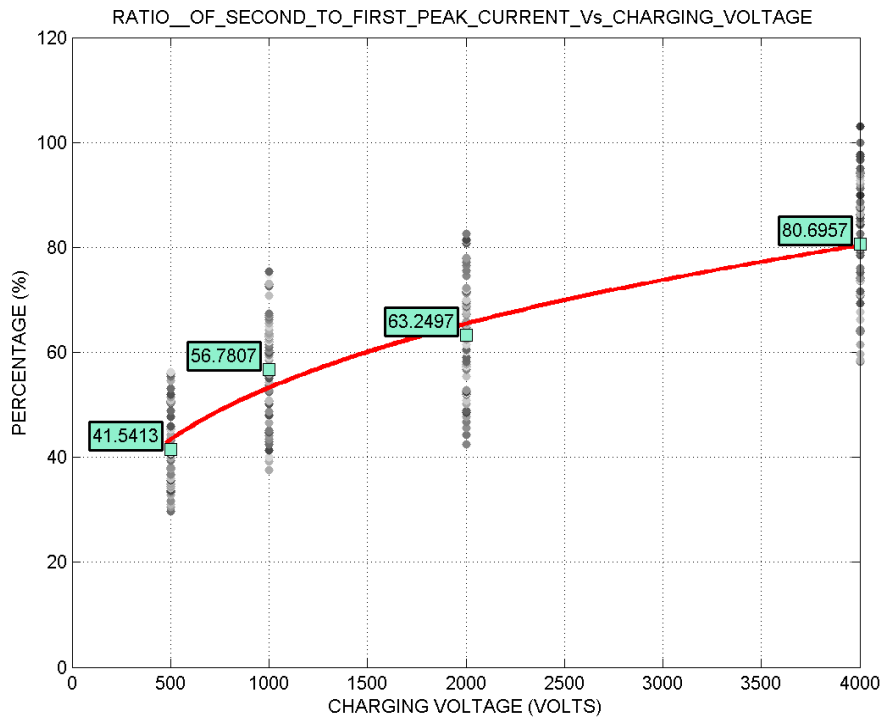
Πίνακας 4.11: Μέσες τιμές του λόγου [δεύτερο μέγιστο / πρώτο μέγιστο] του ρεύματος

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση τιμή του λόγου [δεύτερο προς πρώτο μέγιστο] [%]				Δεύτερο προς Πρώτο Μέγιστο, σύμφωνα με την εξίσωση ρεύματος του [8] [%]
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	normal	maximum	Όλες οι μορφές	
500 ^[I]		42.47	38.02	38.14	-
1000 ^[II]		53.00	49.69	52.02	-
2000 ^[III]		57.78	68.35	58.36	57.75%
4000 ^[IV]	94.73	82.49		83.33	

[I] (πλήθος maximum ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 97.37 %
 [II] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 70.27 %
 [III] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 94.52 %
 [IV] (πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 93.15 %

Πίνακας 4.12: Μέση τιμή του λόγου [δεύτερο μέγιστο / πρώτο μέγιστο] του ρεύματος, μετά τη στατιστική επεξεργασία. (Τιμές εντός του $[\mu \pm 2\sigma]$)

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή μ [%]	Τυπική Απόκλιση σ [%]
500 ^[I]	41.54	7.39
1000 ^[II]	56.78	9.86
2000 ^[III]	63.25	10.59
4000 ^[IV]	80.69	11.28

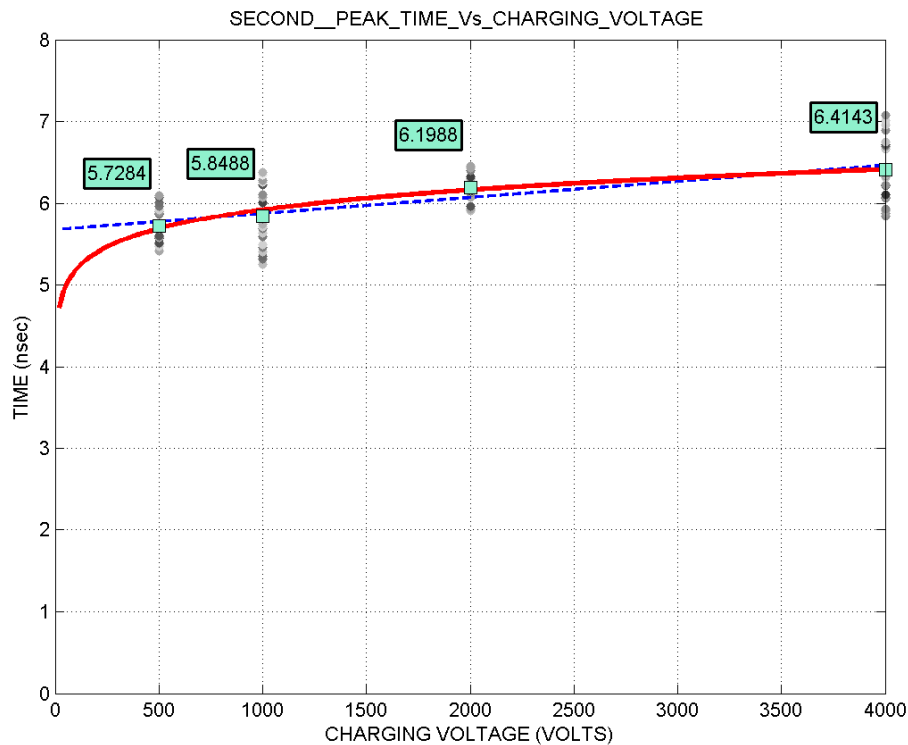


Σχήμα 4.15: Μέσοι όροι του λόγου [δεύτερο μέγιστο / πρώτο μέγιστο] του ρεύματος εκφόρτισης, έναντι της τάσης φόρτισης

Τα ευρήματα μας και εδώ αντίκεινται στον ορισμό του Προτύπου: η μορφή του ρεύματος, σύμφωνα με το Πρότυπο, ορίζει συγκεκριμένο λόγο του δευτέρου τοπικού μεγίστου ως προς το πρώτο και αυτός είναι ίσος με 58%. Από τα πειράματα μας προέκυψαν αντίθετα αποτελέσματα: το δεύτερο τοπικό μέγιστο μεγαλώνει ως ποσοστιαία αναλογία του πρώτου, με την αύξηση της τάσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.12, και αυτή η μεταβολή μπορεί να προσεγγιστεί με μια μαθηματική έκφραση της μορφής:

$$RATIO(\%) = 53.2591 \cdot V_{ESD} (kV)^{0.2965} \quad (4.10)$$

Στο Σχήμα 4.16 φαίνεται η χρονική στιγμή στην οποία εμφανίζεται το δεύτερο μέγιστο έναντι της τάσης φόρτισης. Οι Πίνακες 4.13 και 4.14 περιέχουν τα αντίστοιχα δεδομένα.



Σχήμα 4.16: Μέσοι όροι του χρόνου εμφάνισης του δευτέρου τοπικού μεγίστου του ρεύματος εκφόρτισης, έναντι της τάσης φόρτισης

Πίνακας 4.13: Μέσες τιμές του χρόνου εμφάνισης του δευτέρου μεγίστου

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή Χρόνου Εμφάνισης Δευτέρου Μεγίστου [ns]				Χρόνος Εμφάνισης Δευτέρου Μεγίστου σύμφωνα με την εξίσωση ρεύματος του [8] [ns]
	Μορφή καμπύλης				
	minimum	normal	maximum	Όλες οι μορφές	
500 ^{III}		5.6945	5.3852	5.3933	19.66
1000 ^{III}		5.9821	5.7592	5.9158	
2000 ^{III}		6.4985	6.2482	6.4847	
4000 ^{IV}	7.9506	6.5874		6.6807	
<i>[I](πλήθος maximum ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 97.37 %</i> <i>[II](πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 70.27 %</i> <i>[III](πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 94.52 %</i> <i>[IV](πλήθος normal ESD) / (συνολικό πλήθος ESD) = 93.15 %</i>					

Πίνακας 4.14: Μέσες τιμές του χρόνου εμφάνισης του δευτέρου μεγίστου, μετά τη στατιστική επεξεργασία. (Τιμές εντός του $[\mu \pm 2\sigma]$)

Τάση Φόρτισης [V]	Μέση Τιμή μ [ns]	Τυπική Απόκλιση σ [ns]
500 ^{III}	5.728385	0.192804
1000 ^{III}	5.848786	0.329447
2000 ^{III}	6.198762	0.144812
4000 ^{IV}	6.414348	0.37563

Σύμφωνα με το Πρότυπο, ο χρόνος που αντιστοιχεί στο δεύτερο τοπικό μέγιστο είναι περίπου 20 ns. Ακόμα και αν υποθέσουμε ότι η σύμβαση αυτή έχει γίνει για εκφορτίσεις τύπου normal, δεν επαληθεύεται ότι η χρονική στιγμή του δευτέρου μεγίστου είναι μία και σταθερή ίση με 20 ns. Από τις δικές μας μετρήσεις προέκυψε ότι η τιμή αυτή είναι μεταβλητή (αυξάνει με την αύξηση της τάσης). Αυτά συμβαίνουν ακόμα και στην περίπτωση που λαμβάνουμε υπόψιν μας μόνο τις εκφορτίσεις τύπου normal (βλ. Σχήμα 4.16 τάση φόρτισης 1, 2, και 4 kV). Οι χρονικές στιγμές που παρουσιάζεται το δεύτερο μέγιστο βρίσκονται κάτω από τα 8 ns, σε κάθε περίπτωση. Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλη, που ορίζει το Πρότυπο, δεν μπορεί, με κανένα τρόπο, να περιγράψει την μορφή του ρεύματος εκφόρτισης αφού η προτεινόμενη από αυτό μορφή είναι παραμορφωμένη σε σχέση με τα ευρήματά μας, που βασίζονται στα δεδομένα πολλών σειρών μετρήσεων.

Στο Σχήμα 4.16, όπως προηγούμενα έχουμε προσεγγίσει τα πειραματικά δεδομένα με μία μαθηματική έκφραση υπό τη μορφή δύναμης:

$$t_{\max,2} (n \text{ sec}) = 5.9224 \cdot (V_{ESD} (kV))^{0.0576} \quad (4.11)$$

αλλά και με μία ευθεία, που, όμως, δεν περνάει από την αρχή των αξόνων (μπλε διακεκομμένη).

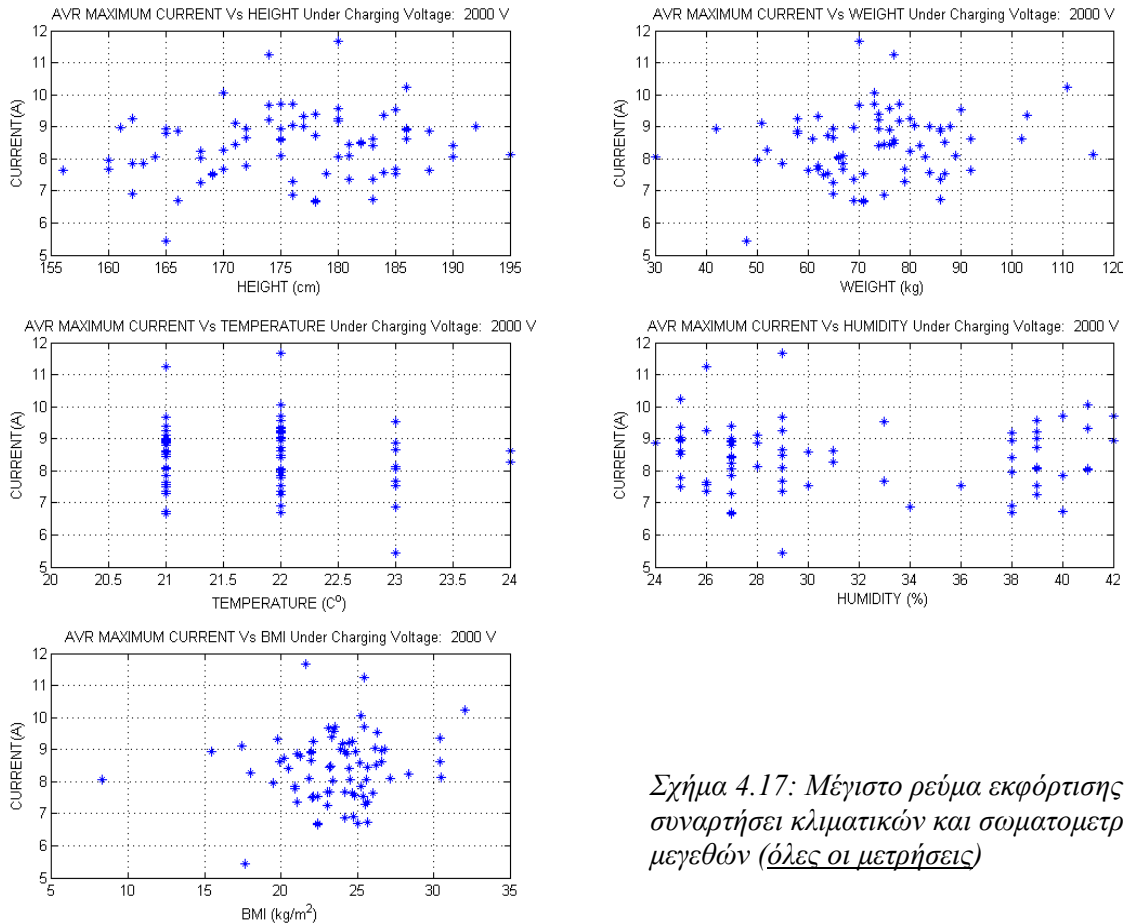
$$t_{\max,2} (n \text{ sec}) = 0.1963 \cdot V_{ESD} (kV) + 5.6790 \quad (4.12)$$

4.4.5 Σχόλια για τη συμπεριφορά των χαρακτηριστικών μεγεθών, συναρτήσκει κλιματικών και σωματομετρικών χαρακτηριστικών

Στις μετρήσεις, που λάβαμε, έγινε καταγραφή των συνθηκών πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας καθώς και του ύψους, βάρους και του δείκτη μάζας BMI (Body Mass Index = mass/height² [kg/m²]) των ανθρώπων, που έλαβαν μέρος στο πείραμα.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δεν έγινε διερεύνηση της συμπεριφοράς των χαρακτηριστικών μεγεθών της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αναφορικά με μεγάλο εύρος κλιματικών συνθηκών και σωματομετρικών μεγεθών, λόγω έλλειψης υποδομών, αλλά και της μικρής διασποράς που παρουσιάζουν, στον πληθυσμό των ατόμων που έλαβαν μέρος στο πείραμά μας, τα δεδομένα του ύψους και του βάρους.

Σε κάθε περίπτωση, εκπονήθηκε μεθοδολογία επεξεργασίας αυτού του όγκου δεδομένων και αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας αυτοματοποιημένης επεξεργασίας ο οποίος φαίνεται στο παράρτημα Π.2. Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται ενδεικτικά, για τάση 2000 V, η συμπεριφορά του μέγιστου ρεύματος συναρτήσκει των προαναφερθεισών παραμέτρων. Στην εργασία [42] εκτίθενται όλα τα ανάλογα γραφήματα που προέκυψαν.



Σχήμα 4.17: Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει κλιματικών και σωματομετρικών μεγεθών (όλες οι μετρήσεις)

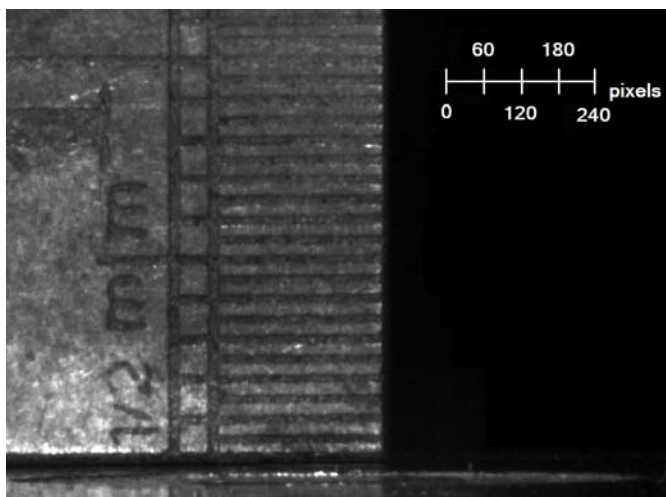
4.5 Επίδραση της ταχύτητας προσέγγισης και του μήκους τόξου στο ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Όπως είδαμε στην §4.4 η «μεγάλη» ταχύτητα προσέγγισης μας απέφερε καμπύλες ρεύματος που ανήκουν στους τύπους maximum (κατά κύριο λόγο υπό τάση φόρτισης 0.5 kV), normal (κατά κύριο λόγο υπό τάση φόρτισης 1, 2, και 4 kV), και minimum (κάποιες μόνο στα 4 kV και στα 8 kV).

Ποιά είναι όμως αυτή η ταχύτητα προσέγγισης που έδωσε αυτά τα αποτελέσματα; Όπως προαναφέρθηκε, δεν είχαμε τη δυνατότητα μέτρησης της ταχύτητας προσέγγισης και του μήκους τόξου για κάθε μία από τις μετρήσεις που κάναμε. Έτσι παρουσιάζουμε μόνο μία εκτίμηση της «μεγάλης» και της «μικρής» ταχύτητας, βάσει κάποιων πιλοτικών μετρήσεων που έγιναν, σε ένα αρκετά ευρύ σύνολο τάσεων φόρτισης, ώστε να αποκτήσουμε αυτή την πληροφορία.

4.5.1 Επεξεργασία φωτογραφίας σπινθήρα τόξου και προσδιορισμός του μήκους τόξου

Αρχικά ήταν αναγκαία η βαθμονόμηση για την αντιστοίχιση των ψηφιακών pixels σε μονάδα μήκους (mm). Αυτό επιτεύχθηκε με τη βοήθεια της φωτογραφίας ενός βαθμονομημένου χάρακα που τοποθετήθηκε ακριβώς στο pellegrini target. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ότι 1mm αντιστοιχεί σε 60 pixels. Η βαθμονόμηση αυτή έγινε με βάση την εικόνα του Σχήματος 4.18.

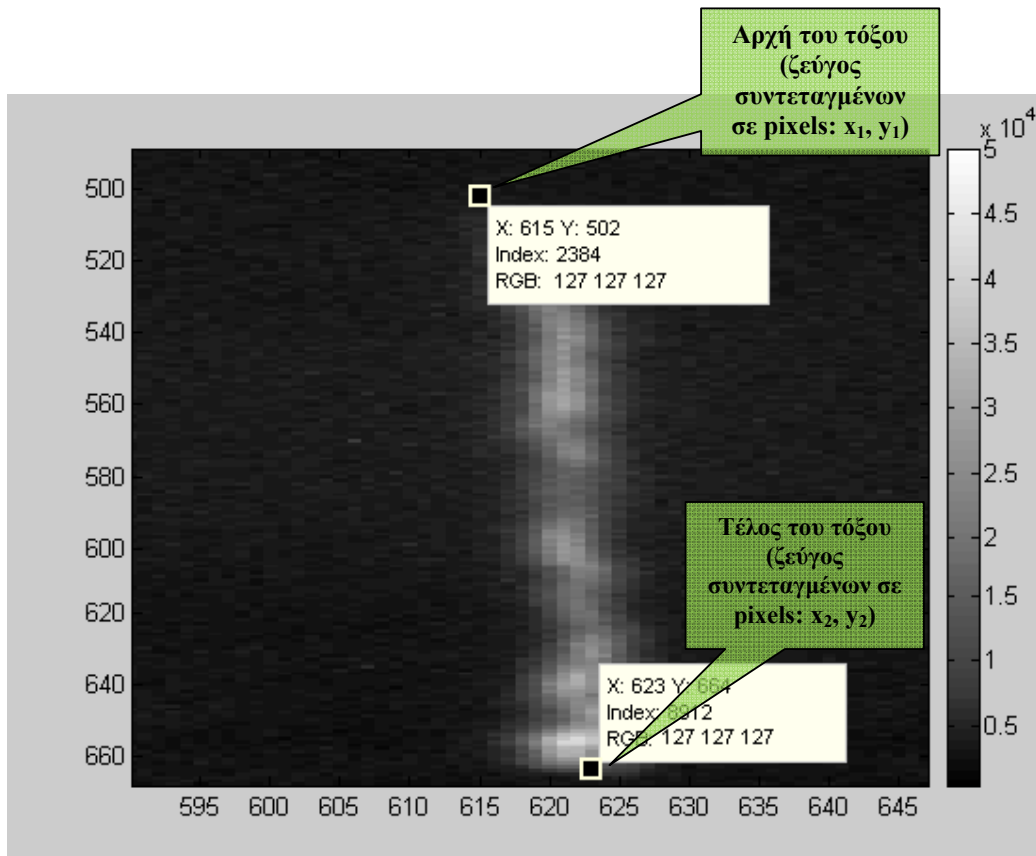


Σχήμα 4.18: Βαθμονόμηση των εικόνων, που λαμβάνονται, για τη μέτρηση του μήκους του τόξου. $1\text{mm} \Leftrightarrow 60\text{ pixels}$

Στη συνέχεια, έγινε μέτρηση του μήκους του τόξου (σε pixels) για κάθε μια φωτογραφία – εκφόρτιση, με τη βοήθεια του πακέτου λογισμικού Matlab. Το Matlab έχει τη δυνατότητα να μεγεθύνει συγκεκριμένα σημεία της φωτογραφίας, που μας ενδιαφέρουν (αρχή και τέλος του τόξου), με ακρίβεια δεκαδικού pixel. Η επιλογή των σημείων αρχής και τέλους του τόξου έγινε με την βοήθεια προκαθορισμένης γκρι απόχρωσης ενός pixel. Η απόχρωση αυτή, ήταν η 127-127-127 σε RGB (Red Blue Green) χρωματική κλίμακα. Αφού λοιπόν προσδιορίστηκε η αρχή και το τέλος του τόξου με 2 ζεύγη συντεταγμένων (εκφρασμένα σε pixels) υπολογίστηκε, με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης, το μήκος τόξου (απόσταση τέλους από την αρχή του τόξου):

$$\text{ArcLength}_{\text{pixel}} = \sqrt{(x_{2,\text{pixel}} - x_{1,\text{pixel}})^2 + (y_{2,\text{pixel}} - y_{1,\text{pixel}})^2} \quad (4.13)$$

Στη συνέχεια εκφράζαμε το μήκος τόξου σε mm με την βοήθεια της προκαθορισμένης βαθμονόμησης (1mm/60pixels). Χαρακτηριστικό παράδειγμα προσδιορισμού της αρχής και του τέλους του τόξου φαίνεται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19: Επεξεργασμένη φωτογραφία προσδιορισμού του μήκους τόξου. Διακρίνονται τα ζεύγη συντεταγμένων αρχής και τέλους του τόξου καθώς και η προκαθορισμένη επιλογή γκρι απόχρωσης (RGB 127-127-127). Η αναγραφόμενη κλίμακα είναι σε pixels

4.5.2 Επεξεργασία βίντεο εκφόρτισης και προσδιορισμός της ταχύτητας προσέγγισης

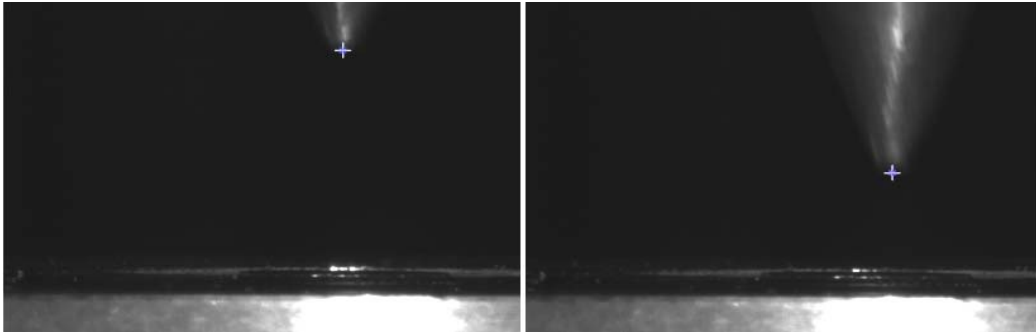
Η ταχύτητα προσέγγισης προσδιορίστηκε και πάλι με τη βοήθεια της φωτογραφικής μηχανής και του πακέτου λογισμικού Matlab. Η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή PointGrey Research Dragonfly2 μπορεί να καταγράψει βίντεο με 20fps (αποθήκευση 20 εικόνων ανά δευτερόλεπτο). Βιντεοσκοπήσαμε, λοιπόν, αρκετές ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις του ανθρώπου (“αργές” και “γρήγορες”) και καθορίσαμε το μέσο όρο ταχύτητας προσέγγισης, τόσο των αργών όσο και γρήγορων προσεγγίσεων. Οι υπολογισμοί μας για τις ταχύτητες αργής και γρήγορης προσέγγισης είναι:

$$\text{Ταχύτητα Αργής Προσέγγισης} = 0.6 \text{ cm/s}$$

$$\text{Ταχύτητα Γρήγορης Προσέγγισης} = 9 \text{ cm/s}$$

Η διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας βίντεο που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της ταχύτητας προσέγγισης είναι η εξής:

Αρχικά προσδιορίσθηκε, όπως και στην επεξεργασία φωτογραφίας, ο αντίστοιχος λόγος μεταξύ pixel και mm. (60pixel/1mm). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του Matlab αναλύθηκε το βίντεο σε μεμονωμένες εικόνες (frames). Δεδομένου ότι, η συχνότητα των εικόνων είναι 20fps, ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών μεμονωμένων εικόνων είναι 0.05 s. Προσδιορίζοντας, έτσι, την άκρη της μεταλλικής ακίδας σε δύο διαδοχικές εικόνες και υπολογίζοντας την απόσταση (εξίσωση 4.13) που διανύει η ακίδα σε 0.05 s έχουμε την ταχύτητα προσέγγισης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υπολογισμού της ταχύτητας προσέγγισης φαίνεται στο Σχήμα 4.20.



Στιγμιότυπο 34 από 200

Στιγμιότυπο 38 από 200

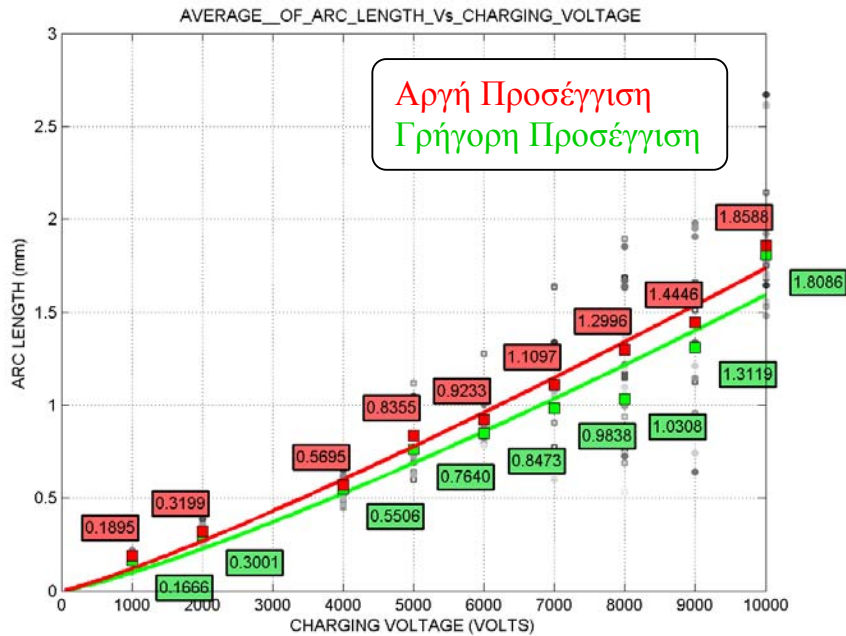
Σχήμα 4.20: Απεικόνιση δύο διαφορετικών στιγμιότυπων από την ψηφιακή επεξεργασία του βίντεο. Διακρίνονται (με “+”) τα ζεύγη συντεταγμένων της άκρης της μεταλλικής ακίδας για δύο στιγμιότυπα

4.5.3 Μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου – μετάλλου, με αργή και γρήγορη προσέγγιση

Παρουσιάζονται πιο κάτω οι σχετικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα επεξεργασίας τους· αρχικά, για μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης (9 cm/s), στη συνέχεια για μικρή ταχύτητα προσέγγισης (0.6 cm/s) και, τέλος, συγκριτικά για τις δύο ταχύτητες.

Στη συνέχεια, φαίνεται η επίδραση της τάσης φόρτισης σε χαρακτηριστικά μεγέθη της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Εκτός από τα τέσσερα μεγέθη, που ορίζονται από το Πρότυπο 61000-4-2, μελετώνται το μήκος του τόξου και το δεύτερο μέγιστο (πλάτος, χρονική στιγμή εμφάνισης και σχέση με το πρώτο μέγιστο). Οι πράσινες καμπύλες αντιστοιχούν στις περιπτώσεις γρήγορης προσέγγισης, ενώ οι κόκκινες σε αυτές της αργής. Τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται με μία μαθηματική έκφραση, είτε υπό τη μορφή δύναμης, είτε εκθετική, ή και με μία ευθεία όπου αυτό είναι εφικτό – οι γραμμικές προσεγγίσεις δεν παρουσιάζονται γραφικά για λόγους ευκρίνειας των σχημάτων.

Μήκος του τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.21: Μέσοι όροι του μήκους τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

Εξίσωση δύναμης: $Arclength(mm) = 0.1196 \cdot (V_{ESD}(kV))^{1.162}$ (4.14)

Γραμμική: $Arclength(mm) = 0.1664 \cdot V_{ESD}(kV)$ (4.15)

Γρήγορη προσέγγιση:

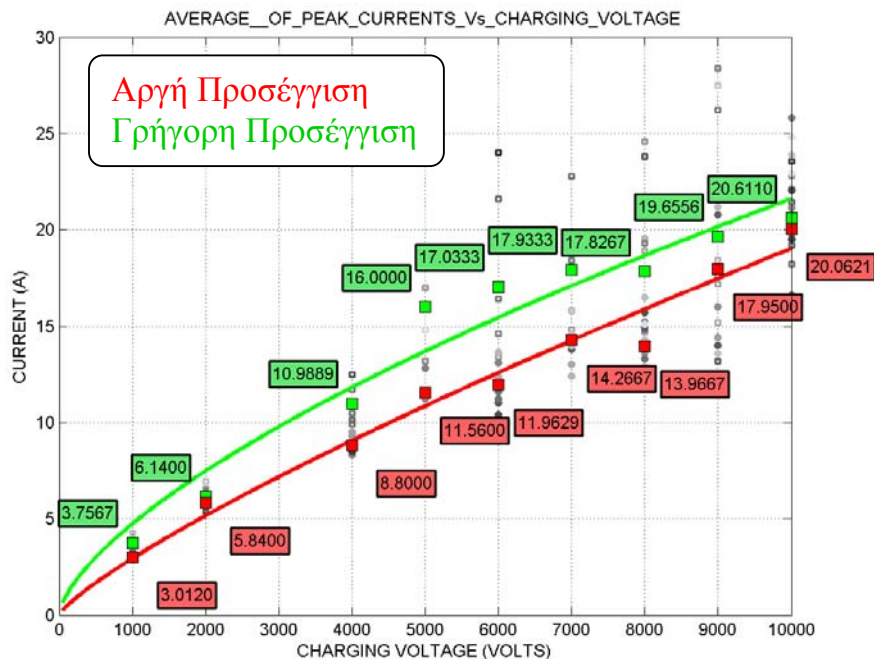
Εξίσωση δύναμης: $Arclength(mm) = 0.0977 \cdot (V_{ESD}(kV))^{1.212}$ (4.16)

Γραμμική: $Arclength(mm) = 0.1513 \cdot V_{ESD}(kV)$ (4.17)

Πίνακας 4.15: Μήκος τόξου έναντι τάσης φόρτισης (αργή και γρήγορη προσέγγιση)

Τάση Φόρτισης [V]	Μήκος τόξου [mm]				$\frac{ArcLength_{FastApproach}}{ArcLength_{SlowApproach}}$ [%]
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	
1000	0.1895	0.0204	0.1666	0.0209	87.92
2000	0.3199	0.0485	0.3001	0.0284	93.81
4000	0.5695	0.0497	0.5506	0.0880	96.68
5000	0.8355	0.1668	0.7640	0.2080	91.44
6000	0.9233	0.1110	0.8473	0.2392	91.77
7000	1.1097	0.1426	0.9838	0.4097	88.65
8000	1.2996	0.3511	1.0308	0.3332	79.32
9000	1.4446	0.5072	1.3119	0.2541	90.81
10000	1.8588	0.5013	1.8086	0.3193	97.30

Κορυφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.22: Μέσοι όροι των μέγιστων ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

$$\text{Εξίσωση δύναμης: } I_{\max,l}(A) = 2.9351 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.8118} \quad (4.18)$$

$$\text{Γραμμική: } I_{\max,l}(A) = 2.0030 \cdot V_{ESD}(kV) \quad (4.19)$$

Γρήγορη προσέγγιση:

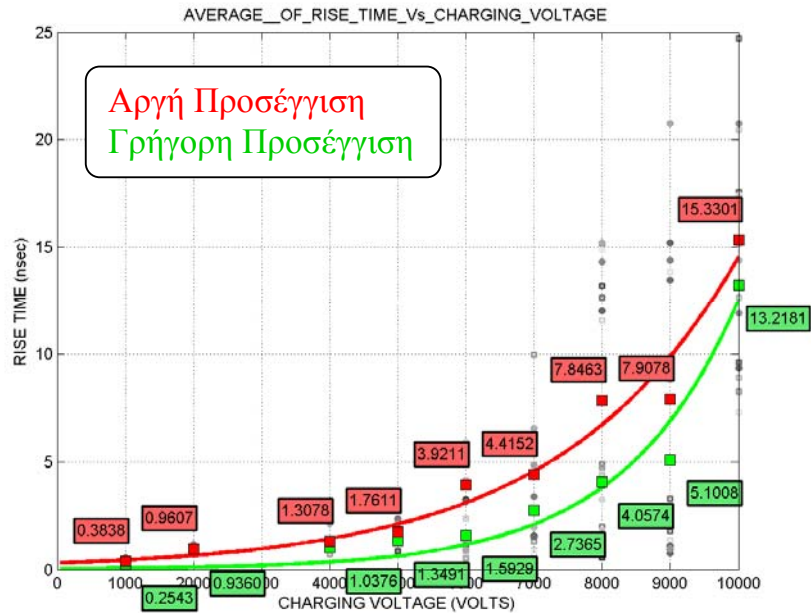
$$\text{Εξίσωση δύναμης: } I_{\max,l}(A) = 4.7306 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.6599} \quad (4.20)$$

$$\text{Γραμμική: } I_{\max,l}(A) = 2.3760 \cdot V_{ESD}(kV) \quad (4.21)$$

Πίνακας 4.16: Μέσες τιμές μεγίστου ρεύματος (αργή και γρήγορη προσέγγιση)

Τάση Φόρτισης [V]	Μέγιστο ρεύμα I_p [A]				$\frac{I_{peakFastApproach}}{I_{peakSlowApproach}}$
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	[%]
1000	3.0120	0.4363	3.7567	0.4603	124.72
2000	5.8400	0.2875	6.1400	0.8163	105.14
4000	8.8000	0.4660	10.9889	1.5120	124.87
5000	11.5600	0.7537	16.0000	1.9545	138.41
6000	11.9629	1.0993	17.0333	4.7386	142.38
7000	14.2667	1.8960	17.9333	2.7674	125.70
8000	13.9667	1.8711	17.8267	4.2178	127.64
10000	20.0621	3.5692	20.6110	1.8611	102.74

Χρόνος ανόδου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.23: Μέσοι όροι των χρόνων ανόδου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

$$\text{Εκθετική συνάρτηση: } RiseTime(n\text{ sec}) = 0.3053 \cdot e^{0.3865 \cdot V_{ESD}(kV)} \quad (4.22)$$

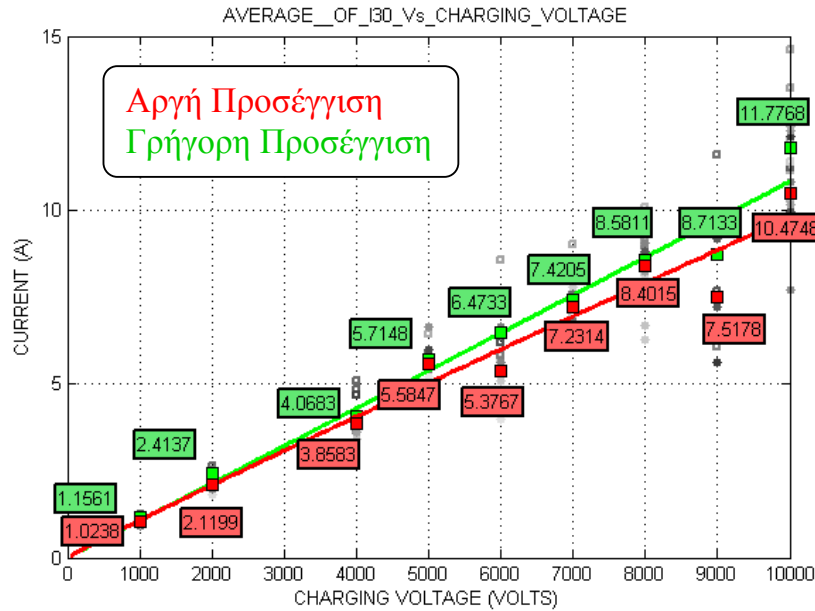
Γρήγορη προσέγγιση:

$$\text{Εκθετική συνάρτηση: } RiseTime(n\text{ sec}) = 0.03285 \cdot e^{0.5942 \cdot V_{ESD}(kV)} \quad (4.23)$$

Πίνακας 4.17: Μέσες τιμές χρόνου ανόδου ρεύματος (αργή και γρήγορη προσέγγιση)

Τάση Φόρτισης [V]	Χρόνος ανόδου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [ns]				$\frac{RiseTime_{FastApproach}}{RiseTime_{SlowApproach}}$ [%]
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	
1000	0.3838	0.1236	0.2543	0.0465	66.26
2000	0.9607	0.1226	0.9360	0.1119	97.43
4000	1.3078	0.8241	1.0376	0.3390	79.34
5000	1.7611	0.3696	1.3491	0.5016	76.61
6000	3.9211	1.8055	1.5929	1.4149	40.62
7000	4.4152	1.9341	2.7365	3.6157	61.98
8000	7.8463	6.7186	4.0574	4.6558	51.71
9000	7.9078	7.1597	5.1008	5.1186	64.50
10000	15.3301	4.7155	13.2181	6.2054	86.22

I_{30} έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.24: Μέσοι όροι του I_{30} έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

$$\text{Εξίσωση δύναμης: } I_{30} = 1.0611 \cdot (V_{ESD} (kV))^{0.9645} \quad (4.24)$$

$$\text{Γραμμική: } I_{30} = 0.9870 \cdot V_{ESD} (kV) \quad (4.25)$$

Γρήγορη προσέγγιση:

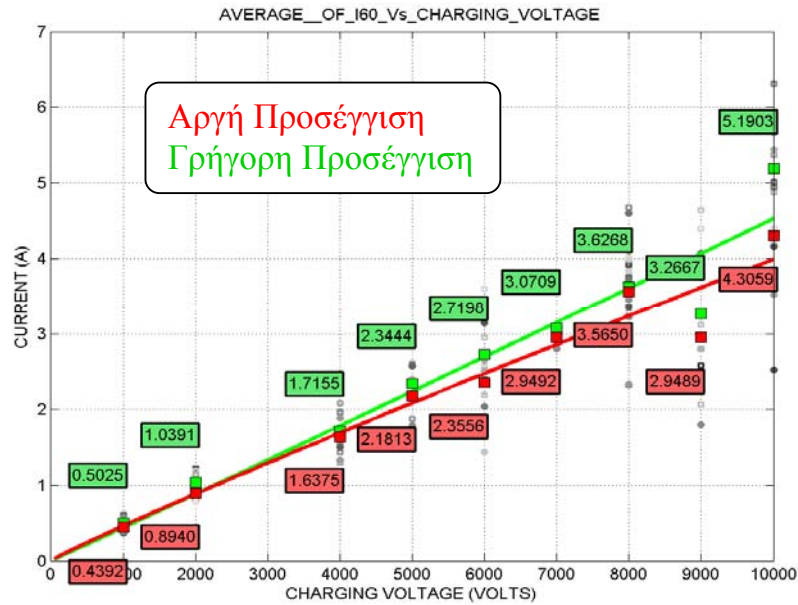
$$\text{Εξίσωση δύναμης: } I_{30} = 1.0561 \cdot (V_{ESD} (kV))^{1.01} \quad (4.26)$$

$$\text{Γραμμική: } I_{30} = 1.0810 \cdot V_{ESD} (kV) \quad (4.27)$$

Πίνακας 4.18: Μέσες τιμές του I_{30} (αργή και γρήγορη προσέγγιση)

Τάση Φόρτισης [V]	I_{30} [A]				$\frac{I_{30}^{FastApproach}}{I_{30}^{SlowApproach}}$ [%]
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	
1000	1.0380	0.0852	1.1561	0.0556	111.37
2000	2.1199	0.1785	2.4137	0.1652	113.85
4000	3.8583	0.2526	4.0683	0.6289	105.44
5000	5.5847	0.6386	5.7148	0.4813	102.32
6000	5.3767	0.9486	6.4733	0.9682	120.39
7000	7.2314	0.5840	7.4206	0.8103	102.61
8000	8.4015	1.3311	8.5811	1.0202	102.14
9000	7.5178	1.3930	8.7133	1.7993	115.90
10000	10.4748	1.4994	11.7768	1.3363	112.42

I₆₀ έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.25: Μέσοι όροι του I_{60} έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

Εξίσωση δύναμης: $I_{60} = 0.4581 \cdot (V_{ESD} (kV))^{0.9403}$ (4.28)

Γραμμική: $I_{60} = 0.4058 \cdot V_{ESD} (kV)$ (4.29)

Γρήγορη προσέγγιση:

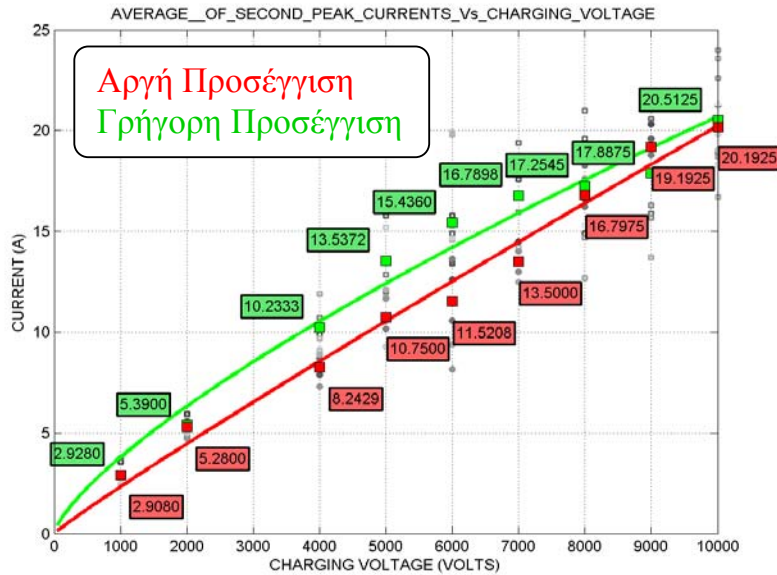
Εξίσωση δύναμης: $I_{60} = 0.4336 \cdot (V_{ESD} (kV))^{1.019}$ (4.30)

Γραμμική: $I_{60} = 0.4503 \cdot V_{ESD} (kV)$ (4.31)

Πίνακας 4.19: Μέσες τιμές του I_{60} (αργή και γρήγορη προσέγγιση)

Τάση Φόρτισης [V]	I_{60} [A]				$\frac{I_{60}^{FastApproach}}{I_{60}^{SlowApproach}}$ [%]
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	
1000	0.4392	0.0628	0.5025	0.0764	114.41
2000	0.8940	0.0743	1.0391	0.1136	116.23
4000	1.6375	0.1606	1.7155	0.3308	104.76
5000	2.1813	0.3053	2.3444	0.3423	107.48
6000	2.3556	0.5264	2.7198	0.4553	115.46
7000	2.9492	0.2108	3.0710	0.3428	104.13
8000	3.5650	0.7589	3.6268	0.5249	101.73
9000	2.9489	0.7845	3.2667	0.9432	110.78
10000	4.3059	0.9506	5.1903	0.6204	120.54

Πλάτος του δεύτερου τοπικού μεγίστου του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.26: Μέσοι όροι των δεύτερων τοπικών μεγίστων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

Εξίσωση δύναμης: $I_{2ndPeak ESD} (A) = 2.3216 \cdot (V_{ESD} (kV))^{0.9402}$ (4.32)

Γραμμική: $I_{2ndPeak ESD} (A) = 2.0550 \cdot V_{ESD} (kV)$ (4.33)

Γρήγορη προσέγγιση:

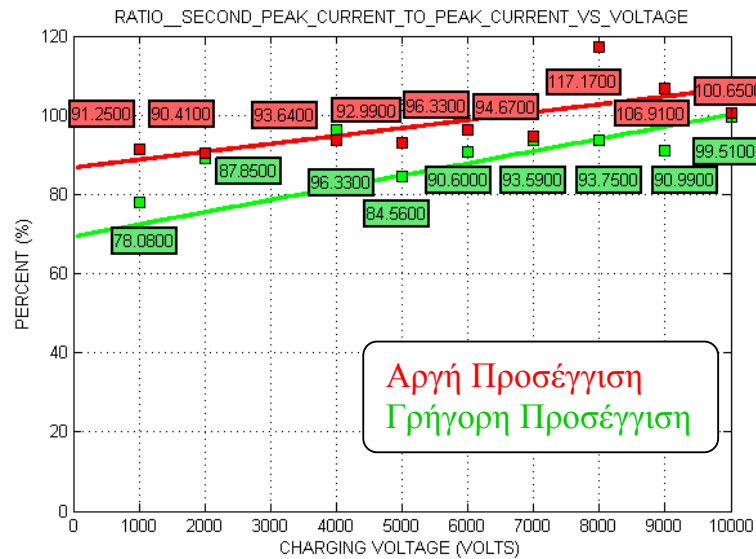
Εξίσωση δύναμης: $I_{2ndPeak ESD} (A) = 3.7908 \cdot (V_{ESD} (kV))^{0.737}$ (4.34)

Γραμμική: $I_{2ndPeak ESD} (A) = 2.2250 \cdot V_{ESD} (kV)$ (4.35)

Πίνακας 4.20: Μέσες τιμές δευτέρων κορυφών ρεύματος (αργή και γρήγορη προσέγγιση)

Τάση Φόρτισης [V]	Δευτέρα κορυφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [A]				$\frac{I_{peakFastApproach}}{I_{peakSlowApproach}}$ [%]
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	
1000	2.9080	0.5055	2.9280	0.3649	100.69
2000	5.2800	0.3702	5.3900	0.4177	102.08
4000	8.2429	0.5255	10.2333	0.9688	124.15
5000	10.7500	1.1358	13.5372	2.0818	125.93
6000	11.5208	2.3265	15.4360	2.6469	133.98
7000	13.5000	0.7906	16.7898	2.2249	124.37
8000	16.7975	0.4894	17.2545	2.5017	102.72
9000	17.8467	0.9903	17.8875	2.8782	100.22
10000	20.1925	0.9903	20.5125	2.7252	101.58

Λόγος του πλάτους του δεύτερου προς το πλάτος του πρώτου τοπικού μεγίστου του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.27: Μέσοι όροι των λόγων δεύτερης προς την πρώτη κορυφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

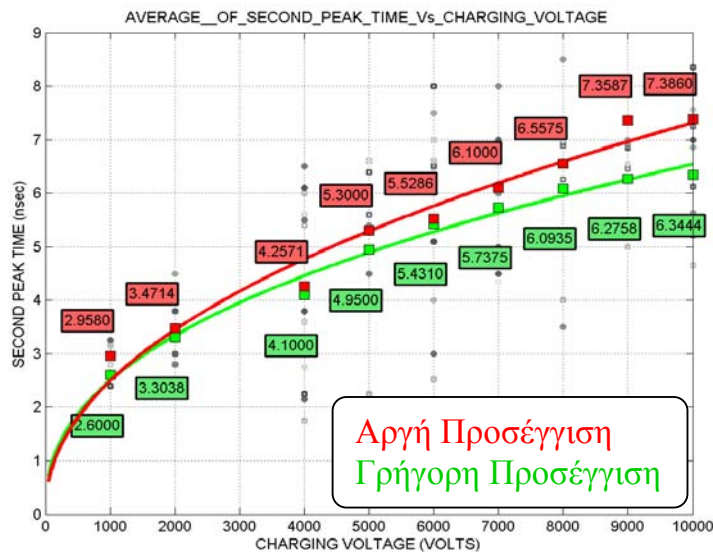
Αργή προσέγγιση:

Γραμμική εξίσωση: $Ratio_{2ndpeak/1stpeak} (\%) = 1.9940 \cdot V_{ESD} (kV) + 86.71$ (4.36)

Γρήγορη προσέγγιση:

Γραμμική εξίσωση: $Ratio_{2ndpeak/1stpeak} (\%) = 3.0820 \cdot V_{ESD} (kV) + 69.29$ (4.37)

Χρόνος εμφάνισης του δευτέρου τοπικού μεγίστου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης



Σχήμα 4.28: Μέσοι όροι των χρόνων δευτέρων κορυφών ρευμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης, για αργή και γρήγορη προσέγγιση

Αργή προσέγγιση:

$$\text{Εξίσωση δύναμης: } \text{SecondPeakTime}(ns) = 2.4905 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.4681} \quad (4.38)$$

Γρήγορη προσέγγιση:

$$\text{Εξίσωση δύναμης: } \text{SecondPeakTime}(ns) = 2.4965 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.4179} \quad (4.39)$$

Πίνακας 4.21: Μέσες τιμές χρόνου δεύτερου τοπικού μεγίστου ρεύματος

Τάση Φόρτισης [V]	Χρονός τοπικού μεγίστου ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [ns]				$\frac{2ndPeakTime_{FastApproach}}{2ndPeakTime_{SlowApproach}}$
	Αργή Προσέγγιση		Γρήγορη Προσέγγιση		
	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	Μέση Τιμή μ	Τυπική Απόκλιση σ	[%]
1000	2.9580	0.7487	2.6000	0.6325	87.90
2000	3.4714	0.6849	3.3038	0.5072	95.17
4000	4.2571	1.7546	4.1000	1.8300	96.31
5000	5.3000	1.0630	4.9500	1.8710	93.40
6000	5.5286	1.6388	5.4310	2.0320	98.23
7000	6.1000	1.4318	5.7375	0.9499	94.06
8000	6.5575	2.1424	6.0935	1.0792	92.92
9000	7.3587	0.7024	6.2758	0.7405	85.28
10000	7.3860	0.5754	6.3444	1.4220	85.90

Παρατηρήσεις

Το μήκος τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του ανθρώπινου υποκειμένου αυξάνει με την αύξηση της τάσης φόρτισης, τόσο για την αργή όσο και για τη γρήγορη προσέγγιση. Σύμφωνα με τις μετρήσεις μας, το μήκος τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με αργή προσέγγιση είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μήκος τόξου με γρήγορη προσέγγιση.

Για τις ταχύτητες προσέγγισης, που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματά μας, παρατηρήθηκε ότι, ο λόγος του μήκους τόξου γρήγορης προσέγγισης προς το μήκος τόξου αργής προσέγγισης κυμαίνεται, για τις τάσεις φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν, σε τιμές λίγο υπολειπόμενες του 100%, (μεταξύ του 88% - 97%).

Η διακριτική ικανότητα της φωτογραφικής μηχανής ήταν τέτοια, ώστε, εν τέλει, και για τη βαθμονόμηση που περιγράφηκε πιο πριν, λαμβάναμε το μήκος του εκάστοτε τόξου, εκφρασμένο σε ένα μικρό μόνο αριθμό pixels (κοντά στα δέκα pixels). Αυτό σημαίνει ότι οι διαφορές στα μήκη τόξου που καταγράφηκαν δεν ήταν εύκολο να κατανεμηθούν σε μεγάλο εύρος τιμών. Ωστόσο, είναι σαφές ότι, για την ίδια τάση φόρτισης, το μήκος του

τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση της αργής, παρά στη γρήγορη προσέγγιση του στόχου εκφόρτισης.

Η ολική ισοδύναμη αντίσταση που βλέπει το ρεύμα εκφόρτισης αποτελείται από δύο τμήματα, το γραμμικό τμήμα και το μη γραμμικό. Το γραμμικό τμήμα της αντίστασης (αντίσταση προσαρμογής) οφείλεται στον εξοπλισμό της πειραματικής διάταξης εκφόρτισης ανθρώπου. Οφείλεται, δηλαδή, στο στόχο (pellegrini target), στον εξασθενητή, στο καλώδιο του παλμογράφου κ.α. (βλ. §3.2). Το μη γραμμικό τμήμα της αντίστασης είναι αποτέλεσμα του τόξου εκφόρτισης, του οποίου η αντίσταση είναι ευθέως ανάλογη του μήκους του (σύμφωνα με όλες τις γνωστές μαθηματικές εκφράσεις [43]).

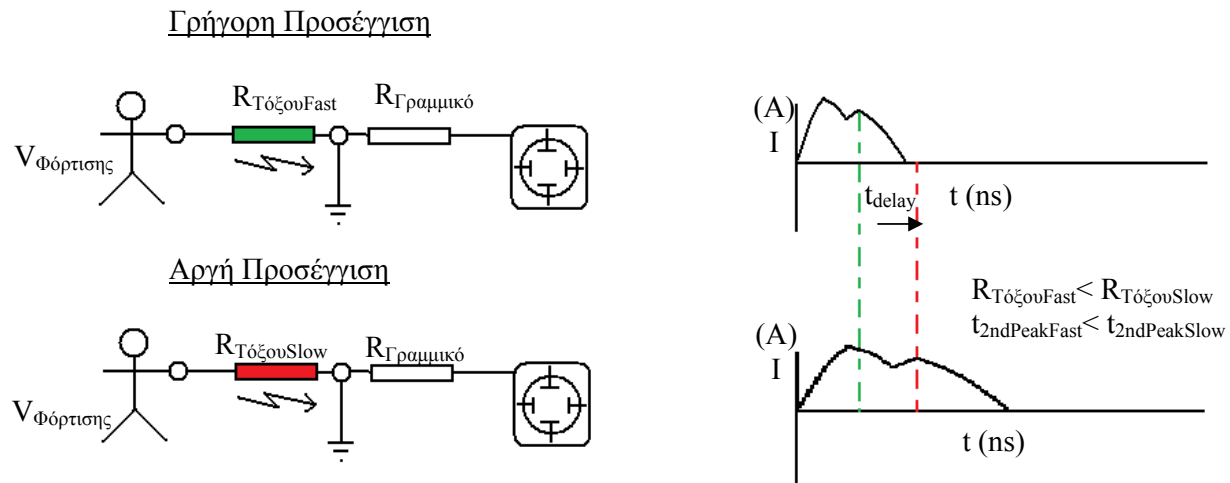
Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αργής προσέγγισης συναντά μεγαλύτερη αντίσταση τόξου, αφού αυτό παρουσιάζει μεγαλύτερο μήκος, απ' ό,τι στη γρήγορη προσέγγιση. Έτσι, δικαιολογείται η χαμηλότερη τιμή του μέγιστου του ρεύματος εκφόρτισης στην περίπτωση της γρήγορης περίπτωσης, απ' ό,τι σε αυτήν της αργής. Επίσης, και για τον ίδιο λόγο, ο χρόνος ανόδου του ρεύματος είναι, μεγαλύτερος για την αργή προσέγγιση, απ' ό,τι στη γρήγορη προσέγγιση, και αντίστοιχα, κλίση του μετώπου είναι πιο αμβλεία.

Οι τιμές των παραμέτρων I_{30} και I_{60} παρουσιάζουν γραμμική, ως έγγιστα, συμπεριφορά σε σχέση με την τάση φόρτισης, τόσο για την περίπτωση της αργής, όσο και της γρήγορης προσέγγισης του στόχου εκφόρτισης.

Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει μεγαλύτερα δεύτερα τοπικά μέγιστα στη γρήγορη προσέγγιση, απ' ό,τι στην αργή προσέγγιση.

Ο λόγος “δεύτερη προς πρώτη κορυφή ρεύματος” παρουσιάζει μία μικρή αύξηση, καθώς αυξάνει η τάση φόρτισης (τόσο στη γρήγορη προσέγγιση, όσο και στην αργή προσέγγιση). Η μικρή αύξηση σημαίνει ότι, όσο αυξάνει η τάση φόρτισης, τόσο πιο πολύ πλησιάζει η τιμή της δεύτερης κορυφής την τιμή της πρώτης κορυφής. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, όσο αυξάνει η τάση φόρτισης, στη γρήγορη προσέγγιση, τόσο πιο “επικίνδυνη” γίνεται η τιμή της δεύτερης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης.

Ο χρόνος εμφάνισης της δεύτερης κορυφής αυξάνει με την αύξηση της τάσης φόρτισης. Το γεγονός αυτό ισχύει, τόσο για την αργή προσέγγιση, όσο και για τη γρήγορη, όμως, για την ίδια τάση φόρτισης, ο χρόνος δεύτερης κορυφής είναι μεγαλύτερος στην αργή απ' ό,τι στη γρήγορη προσέγγιση (Σχήματα 4.28 και 4.29).



Σχήμα 4.29: Άμβλυνση κυματομορφής εκφόρτισης και μετατοπισμός της δεύτερης κορυφής λόγω της αντίστασης τόξου

Σημείωση. Αν συγκρίνουμε τις καμπύλες της γρήγορης προσέγγισης, που προέκυψαν από ένα, μόνον, άτομο, με τις καμπύλες που προκύπτουν από την περίπτωση των εκτεταμένων σειρών μετρήσεων με πολλά άτομα (γρήγορες προσεγγίσεις), παρατηρούμε ότι, για τάσεις φόρτισης 1000, 2000, και 4000 Volt, οι τιμές τους σχεδόν ταυτίζονται, και η μορφή που μας δίνουν είναι η ίδια.

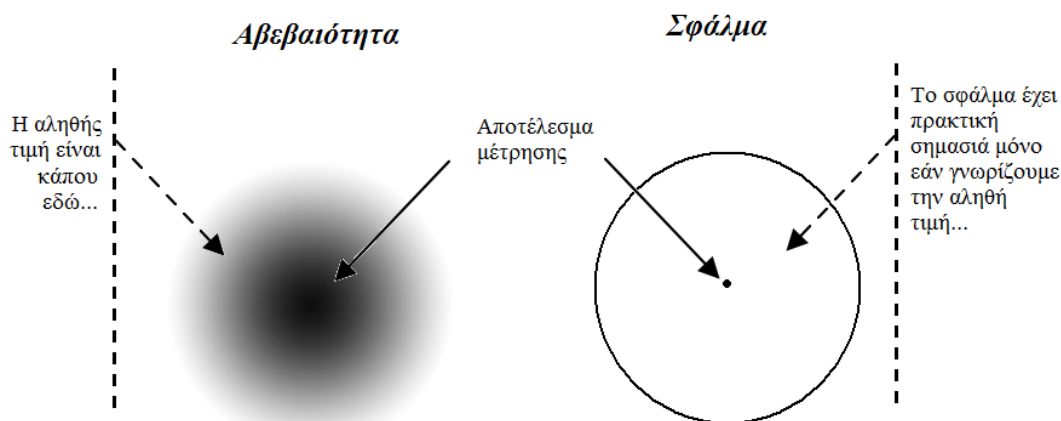
4.6 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων σε μετρήσεις πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

4.6.1 Εισαγωγή

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και, εν τέλει, η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Τις τελευταίες, όμως, δεκαετίες έγινε επιτακτική η ανάγκη για έναν κοινά αποδεκτό και έγκυρο **τρόπο ποσοτικού προσδιορισμού της ποιότητας μέτρησης**, αφού έχει μεγάλη σημασία τα όργανα όχι μόνο να μετράνε σωστά, αλλά και να είναι γνωστό το πόσο σωστά μετράνε. Κοινώς αποδεκτός ενιαίος μηχανισμός αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, είναι η εκτίμηση της **αβεβαιότητας (uncertainty)** [44].

Η αβεβαιότητα, σε αντίθεση με το **σφάλμα**, είναι ένα στατιστικό μέγεθος που εκφράζει την πιθανότητα μιας τιμής να βρίσκεται μέσα σε ένα δεδομένο διάστημα τιμών, όπως, π.χ. στο Σχήμα 4.30. Το σφάλμα είναι μια πιά παραωχημένη προσέγγιση της ποιότητας

μιάς μέτρησης, που, ενώ θεωρητικά, εκφράζει τη διαφορά της μετρούμενης από την «πραγματική» τιμή ενός μεγέθους, στην πράξη μπορεί να έχει μικρή χρησιμότητα, αφού η πραγματική αυτή τιμή είναι άγνωστη [44 - 45].



Σχήμα 4.30: Η αβεβαιότητα, συγκρινόμενη με το σφάλμα, δίνει μια πιθανολογική αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα επιστημονικό πεδίο στο οποίο πολλές και εξεζητημένες μετρήσεις λαμβάνουν χώρα παγκοσμίως και πολύ περισσότερες αναμένονται στο μέλλον. Τα μεγέθη που πρέπει να μετρηθούν βρίσκονται πολλές φορές στα όρια των δυνατοτήτων του χρησιμοποιούμενου μετρητικού εξοπλισμού.

Σε ένα πείραμα μέτρησης ρεύματος εκφόρτισης ανθρώπου σε πραγματικό χρόνο, υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες αβεβαιότητας όπως, ταχύτητα και ο τρόπος προσέγγισης του στόχου, η κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου, η μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή-καλωδίου, το μονωτικό δάπεδο, οι κλιματικές συνθήκες κ.τ.λ.. Οι μετρήσεις είναι απαιτητικές και η ποιότητά τους πρέπει να είναι εξασφαλισμένη, ώστε η παράθεση επιστημονικών στοιχείων, νέων ευρημάτων, η αντιπαράθεση μεταξύ επιστημόνων ακόμα και οι προτάσεις προς αναθεώρηση του σχετικού Προτύπου [8], να έχουν επαρκή επιστημονική βάση.

Μία ορισμένη μεθοδολογία υπολογισμού των αβεβαιοτήτων των μετρήσεων που λαμβάνονται σε μια μετρητική διάταξη θεωρήθηκε απαραίτητη για να δώσει ένα μέτρο της ποιότητας των μετρήσεων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίστηκε στη μέθοδο υπολογισμού αβεβαιοτήτων του Προτύπου [8], και του UKAS [46].

Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την αβεβαιότητα σε μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βλ. [47].

Σύμφωνα με τα ανωτέρω η συνολική αβεβαιότητα είναι συνισταμένη δυο συνιστωσών. Της αβεβαιότητας **Τύπου A** (U_A), και της αβεβαιότητας **Τύπου B** (U_B). Η αβεβαιότητα Τύπου A υπολογίζεται κάνοντας χρήση σειρών μετρήσεων, ενώ η Τύπου B υπολογίζεται με τη χρήση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών, των σχετικών με την μεταβλητότητα των μετρούμενων μεγεθών, όπως πιστοποιητικά διακρίβωσης, παλαιότερα δεδομένα μετρήσεων, προδιαγραφές μετρητικού εξοπλισμού, διαδικασία μέτρησης, εμπειρία, ικανότητα και υποκειμενική κρίση αυτού, που διεξάγει τη μέτρηση [46].

Η **Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα** προκύπτει από το συνδυασμό όλων των ξεχωριστών συνιστωσών, δεδομένης της πιθανοτικής κατανομής της καθεμίας.

4.6.2 Μεθοδολογία

Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της μέτρησης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η Αβεβαιότητας Τύπου A προσεγγίστηκε ως συνισταμένη δύο παραμέτρων:

- Της **Επαναληψιμότητας** (U_{A1}) (όταν ένας άνθρωπος επαναλαμβάνει Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις).
- Της **Αναπαραγωγιμότητας** (U_{A2}) (όταν διαφορετικοί άνθρωποι εκτελούν Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις).

Η **Επαναληψιμότητα** και η **Αναπαραγωγιμότητα** υπολογίζονται όπως φαίνεται στις εξισώσεις (4.40) και (4.41) αντίστοιχα.

Επαναληψιμότητα:

$$U_{A1} = \frac{s_{A1}}{\sqrt{n_{A1}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{A1} \cdot (n_{A1} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{A1}} (x_i - x_m)^2} \quad (4.40)$$

n_{A1} είναι το πλήθος των εκφορτίσεων, x_i είναι η μετρούμενη τιμή, x_m είναι η μέση τιμή των n_{A1} μετρήσεων, και s_{A1} είναι η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής.

Αναπαραγωγιμότητα:

$$U_{A_2} = \frac{s_{A_2}}{\sqrt{n_{A_2}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{A_2} \cdot (n_{A_2} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{A_2}} (y_i - y_m)^2} \quad (4.41)$$

n_{A_2} είναι ο αριθμός των ανθρώπων, y_i είναι η μετρούμενη τιμή, y_m είναι η μέση τιμή των n_{A_2} μετρήσεων, και s_{A_2} είναι η τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή.

Η Συνολική Αβεβαιότητα Τύπου A δίνεται από την εξίσωση (4.42).

$$U_A = \sqrt{U_{A_1}^2 + U_{A_2}^2} \quad (4.42)$$

Έχοντας υπολογίσει την Αβεβαιότητα Τύπου A, η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα υπολογίζεται ως συνδυασμός των αβεβαιοτήτων Τύπου A και Τύπου B.

Γνωρίζοντας την κατανομή της κάθε αβεβαιότητας, η Αβεβαιότητα Τύπου B υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.43), όπου U_{B_i} είναι η κατανομή κάθε πηγής αβεβαιότητας.

$$U_B = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_{B_i}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{s_{B_i}}{k_i}\right)^2} \quad (4.43)$$

s_{B_i} είναι η μέγιστη αβεβαιότητα που εισάγει η πηγή i , και k_i είναι ο συντελεστής κάλυψης της αντίστοιχης κατανομής.

Η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα (U_c) υπολογίζεται όπως στην εξίσωση (4.44):

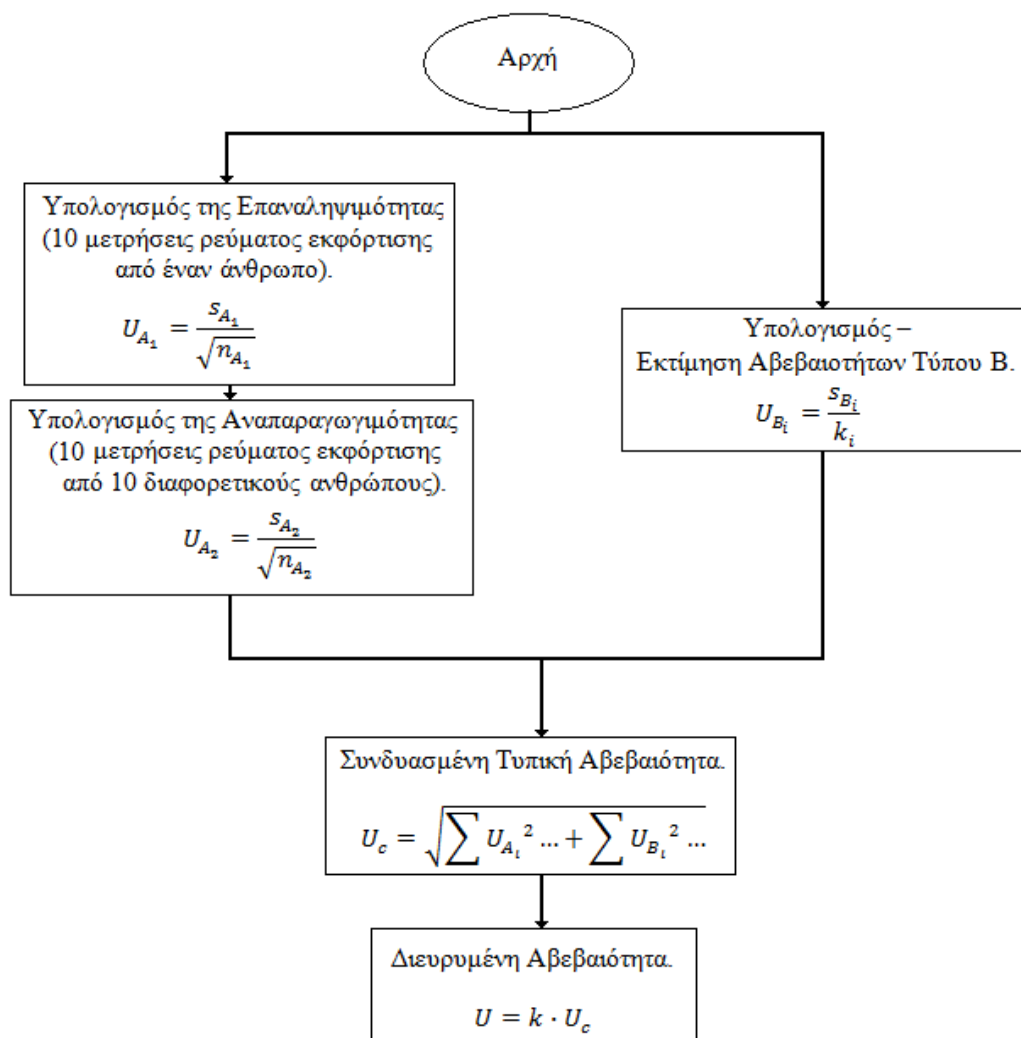
$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (4.44)$$

Η συνολική Διευρυμένη Αβεβαιότητα (U) υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.45):

$$U = k \cdot U_c \quad (4.45)$$

Για κάλυψη πιθανότητας 95%, ο πολλαπλασιαστής k λαμβάνει την τιμή $k=2$. (Η τιμή $k=2$ είναι, στην ουσία, στρογγυλοποίηση της τιμής 1.96, που αντιστοιχεί σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%, κάνοντας χρήση συνήθων κανόνων στατιστικής)

Συνοπτικά η μεθοδολογία φαίνεται στο Σχήμα 4.31.



Σχήμα 4.31. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας υπολογισμού της αβεβαιότητας μίας παραμέτρου της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης υπό δεδομένη τάση φόρτισης

4.6.3 Εφαρμογή - Σχολιασμός

Για να υπολογίσουμε την συνολική **Διευρυμένη Αβεβαιότητα** των μετρήσεων που ελήφθησαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, για μετρήσεις υπό τάση φόρτισης 2 kV, ακολουθούμε τη διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 4.31.

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας για τις παραμέτρους I_{max} , $Rise\ Time$, I_{30} , I_{60} , εκτίθεται στη συνέχεια. Είναι προφανές ότι, κάτω από την ίδια τάση φόρτισης, κρατώντας την ταχύτητα προσέγγισης σχεδόν σταθερή, οι τιμές των αβεβαιοτήτων είναι πολύ μικρές

σχετικά με τις παραμέτρους ESD, ακόμα και αυτές που εξαρτώνται έντονα από τις ιδιότητες του τόξου (I_{max} , $Rise\ Time$). Φυσικά οι τιμές των αβεβαιοτήτων I_{30} , I_{60} είναι πολύ χαμηλές επίσης.

Πίνακας 4.22. Τιμές των παραμέτρων ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ανθρώπινου σώματος (για 10 επαναλήψεις)
(Ύψος: 174 cm, Βάρος: 77 kgs)

	I_F (A)	t_r (ns)	I_{30} (A)	I_{60} (A)
1	8.065	0.673	2.160	1.041
2	7.106	0.764	2.147	0.967
3	7.913	0.918	2.232	1.042
4	7.599	0.722	2.322	1.115
5	8.118	0.739	2.147	0.965
6	7.517	0.756	2.212	1.069
7	6.790	0.830	2.236	0.904
8	7.269	0.827	2.239	0.909
9	8.022	0.672	2.297	1.051
10	7.034	0.799	2.363	0.911
Μέσες Τιμές	7.543	0.770	2.235	0.997
Τυπική Απόκλιση	0.479	0.076	0.074	0.076
Αβεβαιότητα Τύπου A_1 *	0.151	0.024	0.023	0.024
Σχετική Αβεβαιότητα Τύπου A_1 (%)	2.008	3.132	1.048	2.405

* Η Αβεβαιότητα Τύπου A_1 αποτελεί έκφραση της Επαναληψιμότητας και υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.40).

Πίνακας 4.23. Τιμές των παραμέτρων ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δέκα εκφορτίσεων δέκα διαφορετικών ανθρώπων.

	Ύψος (cm)	Βάρος (kg)	I_F (A)	t_r (ns)	I_{30} (A)	I_{60} (A)
1	164	66	7.216	0.732	1.708	1.083
2	165	42	8.769	0.567	1.937	0.830
3	168	66	7.967	0.914	2.397	0.995
4	170	52	9.243	0.565	2.263	1.121
5	174	74	10.208	0.895	2.261	1.032
6	175	74	8.402	0.775	2.442	1.036
7	177	84	9.384	0.95	3.111	1.493
8	183	82	8.056	0.908	2.174	1.188
9	183	102	9.125	0.688	2.333	1.166
10	185	79	7.896	1.098	2.549	1.296
Μέσες Τιμές			8.627	0.799	2.318	1.124
Τυπική Απόκλιση			0.885	0.191	0.372	0.181
Αβεβαιότητα Τύπου A_2			0.280	0.060	0.118	0.057
Σχετική Αβεβαιότητα Τύπου A_2 (%)			3.246	7.559	5.082	5.080

* Η Αβεβαιότητα Τύπου A_2 αποτελεί έκφραση της Αναπαραγωγιμότητας και υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.41).

Η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία ήταν, με μεγάλη προσέγγιση, σταθερές, εντός των ορίων 997 ± 6 mbars, 22 ± 1 °C και 39 ± 3 %, αντιστοίχως. Η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα και η Διευρυμένη Αβεβαιότητα υπολογίζονται στους Πίνακες 4.24 έως 4.27 ως εξής: οι τιμές των πηγών αβεβαιότητας, αφού διαιρεθούν με τον αντίστοιχο διαιρέτη που αντιστοιχεί στην κατανομή τους, υψώνονται στο τετράγωνο. Η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων είναι η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα, ενώ, αν τη διαιρέσουμε με τον αντίστοιχο διαιρέτη της κατανομής, λαμβάνουμε τη Διευρυμένη Αβεβαιότητα.

Πίνακας 4.24. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο I_T .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (%)	Διαιρέτης*	u_i (%)	u_i^2 (%) ²	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	2.01	1	2.01	4.033	Πίνακας 4.22
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	3.25	1	3.25	10.536	Πίνακας 4.23
Τύπου Β	Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική 2	0.82	2	0.41	0.168	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Μετρητική αλυσίδα Στόχου – εξασθενητή – καλωδίου	Κανονική 2	1.04	2	0.52	0.270	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Μη προσαρμογή αλυσίδας στον παλμογράφο.	Κατανομή U	1.08	$\sqrt{2}$	0.76	0.583	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	1.00	2	0.50	0.250	Εργαστηριακή εμπειρία
						u_c	15.841

* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. [46]

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.44) και (4.45), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα $U_c = 3.980$ %
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για $k=2$) $U = 7.960$ %

Πίνακας 4.25. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο t_r .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (ps)	Διαιρέτης* u_i (ps)	u_i^2 (ps) ²	Πηγή	
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	24.12	1	24.12	581.627	Πίνακας 4.22
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	60.42	1	60.42	3650.888	Πίνακας 4.23
Τύπου Β	Ανάγνωση μέγιστης τιμής	Κανονική 2	50.00	2	25.00	625.000	Αβεβαιότητα μέγιστης τιμής 3% Sampling Rate
	Ανάγνωση χρονικής στιγμής I_{90}	Ορθογωνική	25.00	$\sqrt{3}$	14.43	208.333	παλμογράφου 20 Gs/s
	Ανάγνωση χρονικής στιγμής I_{10}	Ορθογωνική	25.00	$\sqrt{3}$	14.43	208.333	παλμογράφου 20 Gs/s
	Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική 2	30.00	2	15.00	225.000	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Μη προσαρμογή αλυσίδας στον παλμογράφο.	Κανονική 2	30.00	2	15.00	225.000	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	25.00	2	12.5	156.250	Εργαστηριακή εμπειρία
	U_0					5880.432	

* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. [46]

Ας σημειωθεί ότι, κατά τον υπολογισμό της παραμέτρου t_r , οι τιμές της συνεισφοράς της κάθε πηγής αβεβαιότητας δίνονται σε μονάδες χρόνου στα έγγραφα του εξοπλισμού. Έτσι η συνολική αβεβαιότητα υπολογίζεται σε ps. Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.44) και (4.45), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα $U_0 = 76.684$ ps
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για $k=2$) $U = 153.368$ ps

Πίνακας 4.26. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο I_{30} .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (%)	Διαιρέτης*	u_i (%)	u_i^2 (%) ²	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	1.05	1	1.05	1.103	Πίνακας 4.22
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	5.08	1	5.08	25.806	Πίνακας 4.23
Τύπου Β	Αβεβαιότητα I_p	Κανονική 2	7.96	2	3.980	15.841	Πίνακας 4.7
	Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογωνική	0.17	$\sqrt{3}$	0.098	0.010	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	1.00	2	0.5	0.250	Εργαστηριακή εμπειρία
u_c						43.010	

* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. [46]

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.44) και (4.45), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα $u_c = 6.558$ %
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για $k=2$) $U = 13.116$ %

Πίνακας 4.27. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο I_{60} .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (%)	Διαιρέτης*	u_i (%)	u_i^2 (%) ²	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	1.05	1	2.41	5.810	Πίνακας 4.22
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	5.08	1	5.08	25.806	Πίνακας 4.23
Τύπου Β	Αβεβαιότητα I_p	Κανονική 2	7.96	2	3.980	15.841	Πίνακας 4.7
	Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογωνική	0.17	$\sqrt{3}$	0.098	0.010	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης 2010
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	1.00	2	0.5	0.250	Εργαστηριακή εμπειρία
u_c						47.717	

* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. [46]

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.44) και (4.45), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα $u_c = 6.908$ %
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για $k=2$) $U = 13.816$ %

Οι αβεβαιότητες παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των μετρήσεων. Αν οι τιμές των αβεβαιοτήτων είναι αρκετά μεγάλες η ποιότητα των μετρήσεων μπορεί να υποβαθμιστεί αρκετά, και να βλαφθεί η εγκυρότητα των παρατηρήσεων και συμπερασμάτων που βασίζονται σ' αυτές τις μετρήσεις.

Η μέθοδος υπολογισμού αβεβαιοτήτων που αναπτύχθηκε, έλαβε υπ' όψιν πηγές αβεβαιότητας που μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα, ενώ οι παράμετροι που κρατήθηκαν σταθερές (θερμοκρασία-υγρασία), δεν θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν τα αποτελέσματά μας. Το τόξο αντιμετωπίστηκε ιδιαίτερος. Το σενάριο γρήγορης προσέγγισης που εφαρμόστηκε σε όλες τις εκφορτίσεις, ήταν μέρος της προσπάθειας να κρατηθεί το μέγεθος του τόξου σταθερό και αρκούντος μικρό. Αυτό, είχε ως αποτέλεσμα να επιτύχουμε μικρές διακυμάνσεις ανάμεσα σε εκφορτίσεις του κάθε ανθρώπου: είναι σημαντικό, γιατί έτσι υπολογίζεται η μέτρηση της αβεβαιότητας για συγκεκριμένο σενάριο εκφόρτισης. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δεν γινόταν διάκριση ανάμεσα στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις που γίνονται με διαφορετικούς όρους, οι τιμές των αβεβαιοτήτων μας θα ήταν ιδιαίτερα αυξημένες.

Οι τιμές των αβεβαιοτήτων που ευρέθησαν στην ανωτέρω εφαρμογή είναι περίπου διπλάσιες από τις ανεκτές από το Πρότυπο [8], για τις ανάλογες παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη καθώς οι τιμές εκείνες που ορίζει το Πρότυπο ορίζονται προς συμμόρφωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες παράγουν εκφορτίσεις με πολύ πιο επαναλήψιμο τρόπο από αυτόν της πραγματικής εκφόρτισης ανθρώπου. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές μας είναι αρκετά χαμηλές και αυτό είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας των μετρήσεων που ελήφθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι, η προσπάθεια για ελάττωσή τους δεν θα πρέπει να είναι διαρκής. Παλαιότερες εργαστηριακές μετρήσεις μπορεί να βοηθήσουν πολύ σε αυτό το σημείο. Καθώς ο αριθμός των γνωστών μετρήσεων θα μεγαλώνει (χρησιμοποιώντας το αυτό μετρητικό σύστημα, χωρίς σημαντικές αλλαγές), η τιμή της τυπικής απόκλισης (υποθέτοντας κανονική κατανομή) θα μειώνεται. Έτσι οι μετρούμενες τιμές θα δηλώνονται με μεγαλύτερη σιγουριά, καθώς η συνολική αβεβαιότητα θα μειώνεται αναλόγως.

Κατά την εκτίμηση της αβεβαιότητας που παρουσιάστηκε σ' αυτήν την παράγραφο, παρουσιάστηκαν, επίσης, τα ειδικά χαρακτηριστικά της μετρητικής μας διάταξης, που αφορούν στην ικανότητά της να καταγράφει με συνέπεια τα αναπτυσσόμενα μεγέθη του υπό μελέτη φαινομένου. Από αυτά προκύπτει και μια υπόδειξη για την επικαιροποίηση του εξοπλισμού, που προβλέπεται από το Πρότυπο [8].

Στο βαθμό που πιο «γρήγορες» μετρητικές συσκευές διατίθενται στην επιστημονική κοινότητα, και λιγότερο γνωστές πτυχές του φαινομένου φωτίζονται, απαιτούνται από τους ερευνητές αυστηρότερα όρια για τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτά τα νέα πειραματικά ευρήματα, που αποτελούν την επιστημονική βάση για αυτές τις αυστηρότερες απαιτήσεις, θα πρέπει να συνοδεύονται πάντα από έναν υπολογισμό των αβεβαιοτήτων όπως αυτός που παρουσιάστηκε εδώ.

4.7 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Από τα αρχικά πειράματά μας, με **ένα ανθρώπινο σώμα, με ηλεκτρόδιο εκφόρτισης που έχει δυο διαφορετικές μεταξύ τους απολήξεις** συνάγεται ότι,

- οι καμπύλες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που προέκυψαν με χρήση της αιχμηρής απόληξης του ηλεκτροδίου, διαφοροποιούνται πολύ λίγο από εκείνες που αντιστοιχούν σε χρήση της αμβλείας απόληξής του.

Από τις μετρήσεις, που έγιναν, **κάνοντας χρήση πολλών ανθρωπίνων σωμάτων**, πρέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Επιβεβαιώνεται ότι η φυσική του φαινομένου είναι πιο πολύπλοκη από όσο νομιζόταν παλιότερα. Η δυσκολία ερμηνείας του φαινομένου, έγκειται σε μεγάλο βαθμό, στη δυσκολία διεξαγωγής αξιόπιστων μετρήσεων, και εξαγωγής συμπερασμάτων για τη σχέση των χαρακτηριστικών μεγεθών του φαινομένου. Είναι σαφές ότι, ο χρόνος ανόδου του ρεύματος μπορεί να λάβει πολύ χαμηλές τιμές, ειδικά σε πολύ χαμηλές τάσεις φόρτισης.
- Οι τιμές και η συμπεριφορά χαρακτηριστικών παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι σταθερά διαφορετικές από αυτές που ορίζονται στο Πρότυπο 61000-4-2 σε όλες τις αναθεωρήσεις του.
- Ο μετρητικός εξοπλισμός (με «καρδιά του» τον παλμογράφο), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως από το σύνολο των ερευνητών για πειράματα βασικής έρευνας πάνω στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση, είναι εν γένει συμβατός με τις

προδιαγραφές του Προτύπου. Σε αυτό προδιαγράφεται, μέσω του ορισμού διαφόρων επιπέδων τάσεων φόρτισης και αντιστοίχων τιμών για ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη, ένα πρότυπο φαινόμενο ESD το οποίο οφείλουν να προσομοιώνουν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Οι προδιαγραφές αυτές είναι όμως, αφ' ενός, πολύ διαφορετικές από τα μετρούμενα ευρήματα –όπως ειπώθηκε πριν-, και αφ' ετέρου ο μετρητικός εξοπλισμός που ικανοποιεί μόνο αυτές αδυνατεί να μετρήσει ορισμένες πτυχές του φαινομένου. Το Πρότυπο ορίζει ως κατάλληλο εύρος ζώνης παλμογράφου για τις μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης τα 2 GHz. Τυπικός χρόνος ανόδου που μπορεί να μετρήσει ένας τέτοιος παλμογράφος είναι τα 180 ps, ενώ στην παρούσα διατριβή έχει καταδειχθεί ότι υπάρχουν πολύ μικρότεροι χρόνοι ανόδου. Για τη βέβαιη μέτρηση των χρόνων ανόδου, όταν μετρούμε χρόνους μέχρι και λίγο μικρότερους από 30 ps (χρόνοι ανόδου που μετρήθηκαν για τάση φόρτισης 500 V), θα χρειαζόμασταν παλμογράφο με χρόνο ανόδου τουλάχιστον δύο φορές μικρότερο. Συγκεκριμένα χρόνος ανόδου παλμογράφου 17 ps αντιστοιχεί σε παλμογράφο με εύρος ζώνης 25 GHz, ενώ χρόνος ανόδου παλμογράφου 15 ps αντιστοιχεί σε παλμογράφο με εύρος ζώνης 30 GHz. Αυτό βεβαίως σημαίνει ότι πρέπει να γίνει χρήση πολύ ακριβούς εξοπλισμού.

- Μια διαφορετική παρατήρηση που βγαίνει από τα ευρήματά μας είναι ότι, δεν τεκμηριώνεται ότι υπάρχει ένας κοινός χρόνος ανόδου για όλες τις καμπύλες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ανεξάρτητα από το επίπεδο τάσης, όπως –εσφαλμένα- ορίζει το Πρότυπο. Στην πράξη ο χρόνος ανόδου που ορίζει το Πρότυπο αντιστοιχεί στην περίπτωση των 2 kV, ενώ έχουμε πολύ μικρότερους αλλά και μεγαλύτερους ανάλογα με την τάση φόρτισης (Σχήμα 4.23).
- Μια άλλη παρατήρησή μας, που αντίκειται στο Πρότυπο, πλην, όμως, αναδεικνύεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, είναι ότι, δεν υπάρχει αναλογική σχέση των τιμών των παραμέτρων I_p , I_{30} , I_{60} με την τάση φόρτισης.
- Οι τιμές του μέγιστου ρεύματος (I_p), είναι διαφορετικές από αυτές που ορίζει το Πρότυπο. Για τάση φόρτισης 4 kV το ρεύμα εκφόρτισης λαμβάνει τιμές σταθερά περί τα 2.5 A κάτω από τα 15 A που ορίζει το Πρότυπο. Το πλάτος του μέγιστου ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αυξάνεται όσο μεγαλώνει η τάση φόρτισης.
- Δεν διαπιστώθηκε να παρουσιάζεται μια και μόνη μορφή της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης η οποία απλώς αλλάζει κατά μία πολλαπλασιαστική

σταθερά. Αντιθέτως, διαπιστώθηκε ότι, μιλάμε για διαφορετικές μορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με την αλλαγή της τάσης. Αυτό μας υποδεικνύει ότι, ένας γενικός μαθηματικός τύπος που περιγράφει την καμπύλη του ρεύματος όπως ορίζεται στο Πρότυπο δεν έχει νόημα. Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι, οι δύο κορυφές της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μετατοπίζονται χρονικά με την αύξηση της τάσης φόρτισης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, παρατηρούνται περισσότερα από δύο τοπικά μέγιστα στην καμπύλη του ρεύματος.

- Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας έδειξαν ότι, η πλειοψηφία των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων αντιστοιχεί στην κατά Rommerenke κατηγορία “normal”. Η κατηγορία αυτή είναι και η πιο κοντινή από όλες, στην καμπύλη του Προτύπου, έστω κι αν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από αυτήν.
- Οι τιμές των I_{30} και I_{60} έχουν μικρότερες τιμές από τις προτυποποιημένες (σχεδόν σταθερά το μισό). Η μορφή της καμπύλης τύπου normal είναι, ως εκ τούτου, αρκετά διαφορετική από την καμπύλη του Προτύπου, έστω και αν οι άλλοι τύποι είναι ακόμα πιο διαφορετικοί. Υπάρχει, όντως, μια σχεδόν γραμμική σχέση των τιμών των παραμέτρων I_{30} και I_{60} (Σχήματα 4.12, 4.13) με την τάση φόρτισης.
- Η τιμή του δευτέρου τοπικού μεγίστου παρουσιάζει μια γραμμική συμπεριφορά συναρτήσει της τάσης φόρτισης (Σχήμα 4.14). Κάτι αντίστοιχο δεν συμβαίνει με την τιμή του πρώτου (ολικού) μεγίστου (Σχήμα 4.10). Αυτό έχει πολύ ενδιαφέρον, γιατί δείχνει ότι, η μορφή της καμπύλης ρεύματος εκφόρτισης μεταβάλλεται με την αύξηση της τάσης φόρτισης (Σχήμα 4.15).
- Το πλάτος του δευτέρου μεγίστου πλησιάζει εκείνο του πρώτου μεγίστου με την αύξηση της τάσης, η δε μορφή της καμπύλης, συνολικά, “διαστέλλεται” στο πεδίο του χρόνου. Μια αιτία για αυτό είναι ότι το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αργής προσέγγισης συναντά μεγαλύτερη αντίσταση απ’ ό,τι στη γρήγορη προσέγγιση (λόγω του μεγαλύτερου μήκους τόξου εκφόρτισης), όμως, καθώς το σύστημά μας είναι τάξης ανώτερης του 2, η μελέτη όλων των πόλων του συστήματος θα δώσει μια σαφέστερη ερμηνεία του φαινομένου, κάτι το οποίο, θα μπορούσε, ενδεχομένως, να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής εργασίας.
- Μια γενική παρατήρηση για τις μετρήσεις μας, είναι ότι, οι καταγραφείσες κυματομορφές θεωρούνται απηλλαγμένες θορύβου και χρησιμοποιούνται ως έχουν για τον υπολογισμό των παραμέτρων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Μια

καλύτερη προσέγγιση θα ήταν να κάνουμε μια εκτίμηση της πραγματικής κυματομορφής, με τη χρήση κάποιας μεθόδου απαλοιφής θορύβου.

Από τα πειράματα που έγιναν για τη διερεύνηση της επίδρασης του τόξου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο ρεύμα εκφόρτισης, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εν γένει το μήκος τόξου, που καταγράφεται, μεγαλώνει με την αύξηση της τάσης (περίπου δέκα φορές μεγαλύτερο το τόξο για τάση φόρτισης 10 kV, απ' ό,τι για 1 kV).
- Γίνεται φανερό ότι, το μήκος του τόξου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο για τις «αργές προσεγγίσεις», παρά για τις «γρήγορες».
- Για όλες τις τάσεις φόρτισης, το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει μεγαλύτερη κορυφή στην περίπτωση της «γρήγορης προσέγγισης», απ' ό,τι στην περίπτωση της «αργής προσέγγισης». Η ερμηνεία έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της «γρήγορης προσέγγισης», όπως είδαμε, το συνολικό μήκος της αντίστασης τόξου είναι μικρότερο, έτσι η συνολική αντίσταση είναι μικρότερη, και άρα το ρεύμα είναι μεγαλύτερο.
- Ο χρόνος ανόδου μεγαλώνει με την αύξηση της τάσης φόρτισης, και μάλιστα σχεδόν με τον ίδιο τρόπο για «αργή» και «γρήγορη» προσέγγιση (ας παρατηρηθεί ότι ο χρόνος ανόδου για τις τάσεις φόρτισης 1 έως 10 kV παρουσιάζει ευρεία γκάμα τιμών που είναι από 0.38 έως 15.33 ns («αργή προσέγγιση»), και 0.25 έως 13.22 ns («γρήγορη προσέγγιση») – μακριά πάντα από τη σταθερή τιμή 0.8 ns που αξιώνει το Πρότυπο). Σταθερά, όμως, η «αργή» περίπτωση παρουσιάζει μεγαλύτερους χρόνους ανόδου απ' ό,τι η «γρήγορη». Η ερμηνεία αυτής της διαπίστωσης είναι ότι κατά την «αργή» προσέγγιση το μήκος του τόξου είναι μεγαλύτερο, η αντίσταση του τόξου μεγαλύτερη και έτσι η κλίση του μετώπου του ρεύματος ελαττώνεται.

Τέλος, σε σχέση με τις **Αβεβαιότητες**, σημειώνεται ότι:

- Είναι εξαιρετικά σημαντικό να μιλάμε για τις αβεβαιότητες· μια μέτρηση που παρουσιάζεται δεν έχει νόημα, εάν δεν συνοδεύεται από έναν αντίστοιχο δείκτη της ποιότητάς της, και ως τέτοιος δείκτης μπορεί, κάλλιστα, να χρησιμοποιηθεί η αβεβαιότητά της.

- Οι τιμές των αβεβαιοτήτων, που υπολογίσθηκαν στην παρούσα διατριβή, λαμβανομένων υπ' όψιν των πολλών πηγών αβεβαιότητας, κρίνονται αρκούτως χαμηλές, και, ως εκ τούτου, ικανοποιητικές.
- Η διαδικασία εκτίμησης της αβεβαιότητας, σε μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, είναι πρωτότυπη: προτείνει τη συνεκτίμηση των παραγόντων της αναπαραγωγιμότητας και της επαναληψιμότητας, καθώς και των πληροφοριών από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης. Προτείνει, επίσης, τη διερεύνηση της προοπτικής θέσπισης ανοχών, για τις αβεβαιότητες, στις μετρήσεις μεγεθών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι υπολογισμένες τιμές αβεβαιοτήτων, που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή, μπορούν να συμβάλουν σ' αυτήν την κατεύθυνση. Βεβαίως, για να καταστεί εφικτός ο ορισμός συγκεκριμένων τιμών για τις ανοχές των αβεβαιοτήτων, είναι αναγκαία περαιτέρω διαβούλευση μεταξύ των ερευνητών της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και αξιοποίηση των σχετικών εμπειριών τους.

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Η προβληματική που έχει αναπτυχθεί γύρω από το ζήτημα της σχεδίασης και κατασκευής ενός μοντέλου παραγωγής περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [17, 18, 21 - 25], μπορεί να αντιμετωπισθεί με πολλούς τρόπους. Όπως γίνεται κατανοητό από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (κεφάλαιο 2), μόνο η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι προτυποποιημένη. Σε κάθε περίπτωση, η ορθότητά της, η μαθηματική της αρτιότητα και η συνέπεια με τα πειραματικά δεδομένα είναι υπό αίρεση. Κάποια τέτοια προτυποποίηση δεν έχει γίνει για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που, όντως [37], εκπέμπεται από το ανθρώπινο σώμα κατά τη διαδικασία της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Άρα, αγνοείται, εκούσια και εκ των προτέρων, η παράμετρος “ηλεκτρομαγνητικό πεδίο” κατά το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκε να εστιάσουμε στην προτυποποιημένη παράμετρο του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Το ζήτημα της βελτίωσης των τιμών των παραμέτρων της μαθηματικής έκφρασης που περιέχεται στο Πρότυπο [8], ώστε αυτή να περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα, απασχόλησε την παρούσα διατριβή. Οι ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι μαθηματικής προσέγγισης πειραματικών δεδομένων μας έδωσαν μαθηματικές εκφράσεις περιγράφουσες ικανοποιητικά τις πειραματικές κυματομορφές· ωστόσο, η ανάγκη να περιγραφούν, με μεγαλύτερη ακρίβεια, συγκεκριμένες συμπεριφορές της καμπύλης, οι οποίες κρίνονται πιο σημαντικές από την ελαχιστοποίηση, απλώς, του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, ώθησαν στη χρησιμοποίηση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης. Χρησιμοποιήθηκε ο Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ), όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.2, για την εύρεση μιας εξίσωσης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που να είναι της μορφής της εξίσωσης που εμπεριέχεται στο Πρότυπο [8], με κατάλληλες, σύμφωνα με τα ανωτέρω, τιμές παραμέτρων. Ο ΓΑ, που έχει

χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν από άλλους ερευνητές του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, και ο οποίος περιγράφεται σε αδρές γραμμές στις §5.2.1 και 5.2.2, έπρεπε να αναθεωρηθεί σε συγκεκριμένα σημεία του, ώστε να γίνει αποδοτικός για την εξεζητημένη μορφή των πειραματικών μας κυματομορφών. Οι βελτιώσεις αυτές περιγράφονται αναλυτικά στην §5.2.3.. Στην §5.2.4 φαίνεται αναλυτικά η εφαρμογή του αλγορίθμου στην εξίσωση του Προτύπου [8] για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ώστε να προσεγγίζει, κατά το δυνατόν ικανοποιητικά, τα πειραματικά μας δεδομένα.

Πέραν της εξίσωσης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Προτύπου [8], είναι δυνατόν να ορίσουμε άλλες εξισώσεις για το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Κάτι τέτοιο έχει γίνει στο παρελθόν, με τη χρήση μαθηματικών τύπων που προσέγγιζαν ίσως καλύτερα την καμπύλη του Προτύπου [8] ή τις παραγόμενες από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων καμπύλες ρεύματος, αλλά έμεναν, μόνιμα, μακριά από τις πραγματικές πειραματικές καμπύλες ρεύματος εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου, ενώ δεν ανεζητείτο, ταυτόχρονα, μια μορφή τέτοια που να είναι εύχρηστη για το σχεδιασμό του αντίστοιχου κυκλώματος παραγωγής της.

Η εξεύρεση αναλυτικών μορφών για το ηλεκτρικό ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που να αντιστοιχούν σε εξόδους γραμμικών κυκλωμάτων, είναι μεγάλης σημασίας, ακριβώς για την ίδια τη σύνθεση τέτοιων δικτύων. Στην παρούσα διατριβή, η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε, για την εύρεση τέτοιων μαθηματικών περιγραφών, είναι μια μέθοδος προσέγγισης που παράγει συναρτήσεις της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$. Η μέθοδος στηρίχθηκε, αρχικά, στη μέθοδο Prony [48], η οποία παρουσιάζεται στην §5.3. Η μέθοδος Prony αναθεωρήθηκε ριζικά (αποτελώντας, πλέον, αρχική αναφορά της παρούσας διατριβής) και αναπτύχθηκε ένα καινούριο εργαλείο προσέγγισης, που θα παρουσιασθεί, αναλυτικά, στην §5.4.

5.2 Βελτίωση της εξίσωσης του Προτύπου, με χρήση βελτιωμένου

Γενετικού Αλγόριθμου και αναφορά στα πειραματικά δεδομένα

5.2.1 Εισαγωγή

Η κεντρική ιδέα των γενετικών αλγορίθμων είναι η ανάπτυξη ενός πληθυσμού από υποψήφιες λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τελεστές εμπνευσμένους από τη φυσική γενετική μεταβολή και τη φυσική επιλογή. Στην περίπτωση των γενετικών

αλγορίθμων, οι μεταβλητές αναπαριστώνται ως γονίδια σε ένα χρωμόσωμα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι απεικονίζουν μία ομάδα υποψήφιων λύσεων (πληθυσμός) στην επιφάνεια ελέγχου (επιφάνεια ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης). Με χρήση φυσικής επιλογής και τελεστών γενετικής, όπως μετάλλαξη και διασταύρωση γονιδίων, βρίσκονται τα χρωμοσώματα με την καλύτερη «καταλληλότητα» (fitness). Η φυσική επιλογή εγγυάται ότι τα χρωμοσώματα με την καλύτερη καταλληλότητα θα διαδίδονται στους μελλοντικούς πληθυσμούς. Χρησιμοποιώντας τον τελεστή διασταύρωσης γονιδίων, ο γενετικός αλγόριθμος συνδυάζει γονίδια από χρωμοσώματα δύο γονέων και παράγει δύο νέα χρωμοσώματα (απογόνους), τα οποία έχουν μεγάλη πιθανότητα να έχουν καλύτερη καταλληλότητα από τους γονείς τους. Η μετάλλαξη επιτρέπει να ελεγχθούν νέες περιοχές της επιφάνειας ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο, η καταλληλότητα των χρωμοσωμάτων βελτιώνεται και μετά από πολλές γενιές θα δημιουργηθούν χρωμοσώματα που θα περιέχουν τις βέλτιστες τιμές των υπό μελέτη μεταβλητών (επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης) [49].

Οι λόγοι που καθιστούν συμφέρουσα τη χρήση γενετικών αλγορίθμων είναι ότι είναι υπολογιστικά απλοί και ισχυροί στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης (ελάχιστο ή μέγιστο). Επιπλέον, δεν περιορίζονται ουσιαστικά από υποθέσεις για το χώρο αναζήτησης, όπως υποθέσεις σχετικά με τη συνέχεια, την ύπαρξη παραγώγων και την ύπαρξη ενός μόνο μεγίστου. Λόγω της διαδικασίας της εξέλιξης, δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα, όπως συμβαίνει με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές βελτιστοποίησης, αφού αναπαριστούν τις παραμέτρους του προβλήματος με τη μορφή γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα, όπως στη βιολογία.

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους, που χρησιμοποιούν αιτιοκρατικούς κανόνες μετάβασης, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης για την καθοδήγηση της αναζήτησης.

Η χρήση των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα [49]:

- δεν απαιτούν γνώση ή πληροφορία για την κλίση της επιφάνειας ελέγχου
- πιθανές ασυνέχειες στην επιφάνεια ελέγχου έχουν μικρή επίδραση στη συνολική απόδοση της βελτιστοποίησης
- μπορούν να εφαρμοσθούν σε μία ευρεία κλίμακα προβλημάτων βελτιστοποίησης και, τέλος
- συμπεριφέρονται πολύ καλά σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα βελτιστοποίησης

Όμως, η χρήση των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, όπως:

- δεν καταφέρνουν πάντα να βρουν το ολικό ελάχιστο (ή μέγιστο, ανάλογα με το πρόβλημα)
- απαιτούν μεγάλο αριθμό υπολογισμών της συνάρτησης *καταλληλότητας*
- η *διαμόρφωση* (configuration) των παραμέτρων τους δεν είναι άμεση και απαιτεί δοκιμαστικές προσπάθειες.

5.2.2 Βασική λειτουργία Γενετικών Αλγορίθμων

Για εκτενή παρουσίαση της λειτουργίας του Γενετικού Αλγορίθμου βλ. [49]. Ο πυρήνας του γενετικού αλγορίθμου αποτελείται από έξι σημαντικά βήματα:

(α) *Αρχικοποίηση* (Initialization): Ο αρχικός πληθυσμός των χρωμοσωμάτων δημιουργείται είτε τυχαία, είτε διαταράσσοντας ένα χρωμόσωμα εισόδου. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν θεωρείται κρίσιμος, καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών (έχει ένα ποικιλόμορφο πληθυσμό).

(β) *Αξιολόγηση* (Evaluation): Στο δεύτερο βήμα υπολογίζεται η *καταλληλότητα*. Η συνάρτηση *καταλληλότητας* αποτελεί το κριτήριο για την αξιολόγηση των χρωμοσωμάτων, δηλαδή των υποψηφίων λύσεων.

Στις πραγματικές εφαρμογές μεθόδων βελτιστοποίησης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, το πιο κρίσιμο βήμα είναι η επιλογή της συνάρτησης *καταλληλότητας*.

(γ) *Αξιοποίηση* (Exploitation): Το τρίτο βήμα είναι η αξιοποίηση ή το βήμα της φυσικής επιλογής. Στο βήμα αυτό, τα χρωμοσώματα με τη *μεγαλύτερη βαθμολογία καταλληλότητας* (fitness score) τοποθετούνται μία ή περισσότερες φορές σε ένα *υποσύνολο ζευγαρώματος* (mating subset) με τρόπο, περίπου, τυχαίο.

(δ) *Διασταύρωση* (Ανασυνδυασμός - crossover): Στο τέταρτο βήμα, οι λύσεις του ενδιάμεσου πληθυσμού ανασυνδυάζονται για την παραγωγή του επόμενου πληθυσμού, με χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς.

(ε) *Μετάλλαξη* (mutation): Στο πέμπτο βήμα πραγματοποιείται μία τυχαία αλλαγή γονιδίων των απογόνων. Η διασταύρωση, αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων, δεν είναι σε θέση να παράξει πληροφορία, που δεν υπάρχει, ήδη, μέσα στον πληθυσμό.

Μετά το βήμα (ε) ο πληθυσμός είναι πλήρης από νέα χρωμοσώματα (απογόνους) και εκτελούνται ξανά τα βήματα (β) έως (ε). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσο δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια τερματισμού, δηλαδή είτε πρόκειται για ένα προκαθορισμένο

αριθμό γενεών, είτε μέχρι ο βαθμός καταλληλότητας της καλύτερης λύσης να είναι μεγαλύτερος από κάποιο συγκεκριμένο όριο.

(στ) *Σύγκλιση και ανανέωση*

Ο τρόπος επιλογής των χρωμοσωμάτων (γονέων) που θα ζευγαρώσουν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των γενετικών αλγορίθμων. Δύο προβλήματα που εμφανίζονται συχνά στους γενετικούς αλγορίθμους, και τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν με τροποποίηση της διαδικασίας επιλογής, είναι η *πρόωρη σύγκλιση (premature convergence)* και η *αργή σύγκλιση (slow convergence)*. *Σύγκλιση* είναι η επικράτηση ενός χρωμοσώματος ή μικρών παραλλαγών του, σε μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού.

5.2.3 Ο αναπτυχθείς Γενετικός Αλγόριθμος

Ένας απλός γενετικός αλγόριθμος βασίζεται στις διαδικασίες της αναπαραγωγής, της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation), για την επίτευξη του ολικού ή του μερικώς - ολικού βελτίστου. Για να ξεκινήσει η έρευνα, ο γενετικός αλγόριθμος απαιτεί ένα αρχικό σύνολο σημείων P_s , που ονομάζονται πληθυσμός, κατ' αναλογία με τα βιολογικά συστήματα. Μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιουργεί τον αρχικό πληθυσμό. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν είναι κρίσιμος, καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών. Όμως, αν υπάρχει γνώση για το σύστημα, η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό. Το αρχικό σύνολο μετατρέπεται σε δυαδικό σύστημα και θεωρείται ως χρωμοσώματα, δηλαδή ακολουθίες από 0 και 1. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία $P_s/2$ ζευγών από αυτά τα μέλη του πληθυσμού, που θεωρούνται ως γονείς για την αναπαραγωγή. Οι γονείς αναπαράγονται και ανταλλάσσουν N_p τμήματα του γενετικού τους υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διασταύρωση. Η διασταύρωση χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δύο νέων παιδιών από δύο γονείς, που λαμβάνονται από τον τρέχοντα πληθυσμό. Μετά τη διασταύρωση υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα μετάλλαξης, P_m . Η μετάλλαξη είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο επιλέγεται με τυχαίο τρόπο κάποια από τις θέσεις του χρωμοσώματος και το περιεχόμενό του μεταλλάσσεται (δηλαδή, αν περιέχει '0' γίνεται '1' ή το '1' γίνεται '0'). Η μετάλλαξη είναι απαραίτητη, καθώς, αν και η αναπαραγωγή και η διασταύρωση αναζητούν και αναμειγνύουν αποδοτικά του συνυπάρχοντες απογόνους, υπάρχει περίπτωση να εγκλωβισθεί η λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο της συνάρτησης. Η μετάλλαξη, περιστασιακά, μπορεί να προκαλέσει απώλεια μέρους του εν δυνάμει χρήσιμου γενετικού

υλικού, συνολικά, όμως, βοηθάει στην καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση. Υποθέτουμε ότι κάθε ζεύγος γεννητόρων δίνει N_c παιδιά. Μετά την αναπαραγωγή, το πλήθος των γονέων έχει εμπλουτιστεί με τα “παιδιά”. Έτσι αυξάνεται ο αρχικός πληθυσμός, αφού προστίθενται νέα μέλη. Οι γονείς πάντα θεωρούνται ως μέρος του ελεγχόμενου πληθυσμού (ευγονισμός), για να μη χάνεται η προηγούμενη πληροφορία. Ο νέος πληθυσμός αποτελείται, τώρα, από $P_s + N_c \cdot P_s / 2$ μέλη. Ακολούθως, εφαρμόζεται η διαδικασία, της φυσικής επιλογής. Σύμφωνα με αυτήν τη διαδικασία, μόνο P_s μέλη επιβιώνουν από τα $P_s + N_c \cdot P_s / 2$. Αυτά τα P_s μέλη επιλέγονται ως εκείνα που έχουν τις χαμηλότερες τιμές F_g , εφ’ όσον επιλύεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Το F_g αντιπροσωπεύει το σφάλμα μεταξύ των αρχικών δεδομένων και των βελτιστοποιημένων δεδομένων. Έτσι, δημιουργείται ο νέος πληθυσμός της επόμενης γενιάς.

Συνεχίζοντας τις επαναλήψεις της αναπαραγωγής με τις διασταυρώσεις, τις μεταλλάξεις και τη φυσική επιλογή, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει το ελάχιστο F_g . Οι βέλτιστες τιμές του πληθυσμού συγκλίνουν σε αυτό το σημείο. Το κριτήριο ικανοποιείται εάν, είτε η μέση τιμή του F_g στον αποτελούμενο από P_s μέλη πληθυσμό δεν βελτιώνεται περαιτέρω, είτε, όταν ο αριθμός των επαναλήψεων γίνει μεγαλύτερος από τον ορισμένο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων N_{max} .

Στο γενετικό αλγόριθμο, που αναπτύξαμε, το F_g ελαχιστοποιείται για τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις σφάλματος. Αυτές είναι το **σχετικό απόλυτο σφάλμα**, το **σχετικό τετραγωνικό σφάλμα**, το **απόλυτο σφάλμα** και, τέλος, το **μέγιστο σφάλμα**. Οι μαθηματικές περιγραφές αυτών των τεσσάρων συναρτήσεων F_g δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Συναρτήσεις σφάλματος F_g

ERROR NORM 1	Σχετικό απόλυτο F_g	$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{ I_i^m - I_i^c }{I_i^m}$
ERROR NORM 2	Σχετικό τετραγωνικό F_g	$F_g = \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i^m - I_i^c}{I_i^m} \right)^2$
ERROR NORM 3	Απόλυτο F_g	$F_g = \sum_{i=1}^N I_i^m - I_i^c $
ERROR NORM 4	Μέγιστο F_g	$F_g = \max I_i^m - I_i^c $

όπου το I_i^m είναι η τιμή του ρεύματος που προέκυψε από τις δεδομένες τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων του ρεύματος εκφόρτισης και το I_i^c η υπολογιζόμενη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης, για τις άγνωστες παραμέτρους των εξισώσεων.

Συνοπτικά, μπορούμε να πούμε ότι ο ΓΑ, που εφαρμόστηκε, ήταν βασισμένος σε προηγούμενη έρευνα του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων [49], ο οποίος, όμως, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, βελτιώθηκε κατά τα εξής:

1. Εφαρμόστηκε ένα νέο είδος ευγονισμού (ελιτισμού) στην επιλογή του αρχικού πληθυσμού, άρα ο ΓΑ μας αρχίζει από ένα “προνομιακό” σημείο.
2. Εξετάσαμε όχι μία, αλλά τέσσερις αντικειμενικές συναρτήσεις σφάλματος, για τον τερματισμό του ΓΑ, ώστε να πετύχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα.
3. Μία νέα δειγματοληψία εφαρμόστηκε, ώστε να αναδειχθούν, ιδιαίτερος, τμήματα της καμπύλης αυξημένου ενδιαφέροντος.

Ο γενετικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του MATLAB και η λειτουργία του περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 5.1), ενώ το διάγραμμα ροής της δειγματοληψίας είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

5.2.4 Εφαρμογή - Η εξίσωση

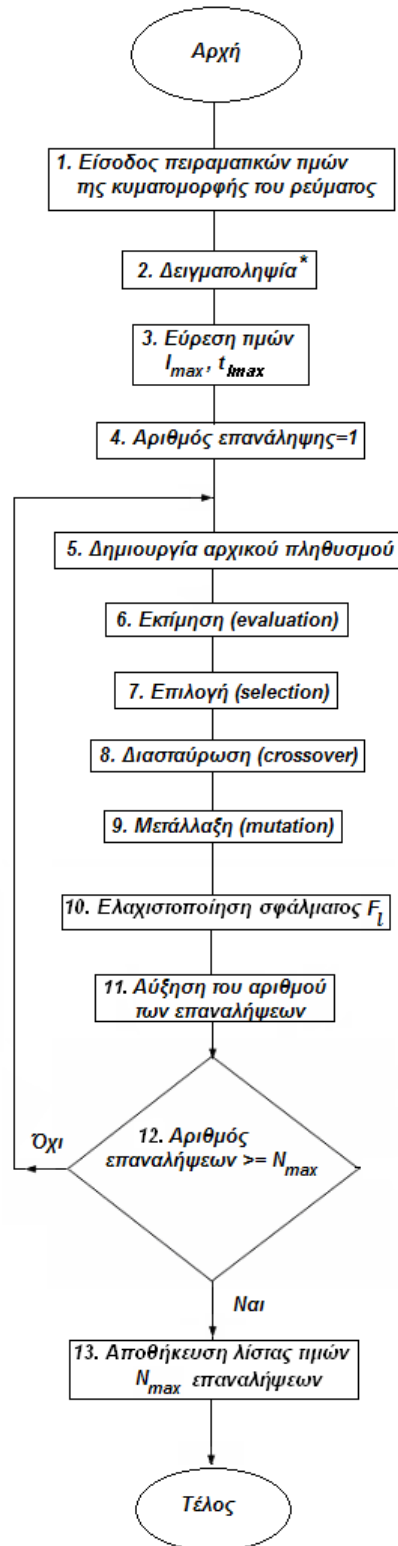
Η πανθομολογούμενη ([28]) αστοχία του μαθηματικού μοντέλου του Προτύπου να εκφράσει με συνέπεια τις καταγραφείσες κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, αλλά και όπως αυτές εκτίθενται σε εργασίες άλλων ερευνητών ([19, 20, 29, 31]) επιχειρείται να αντιμετωπισθεί σε αυτήν την παράγραφο.

Στόχος είναι να δοθεί μία μεθοδολογία η οποία να μπορεί να προσαρμόζει την μαθηματική έκφραση του Προτύπου [8] που φαίνεται εδώ στην εξίσωση 5.1, με συνέπεια στα αποτελέσματα μετρήσεων του ρεύματος της ηλεκτροστατικής φόρτισης.

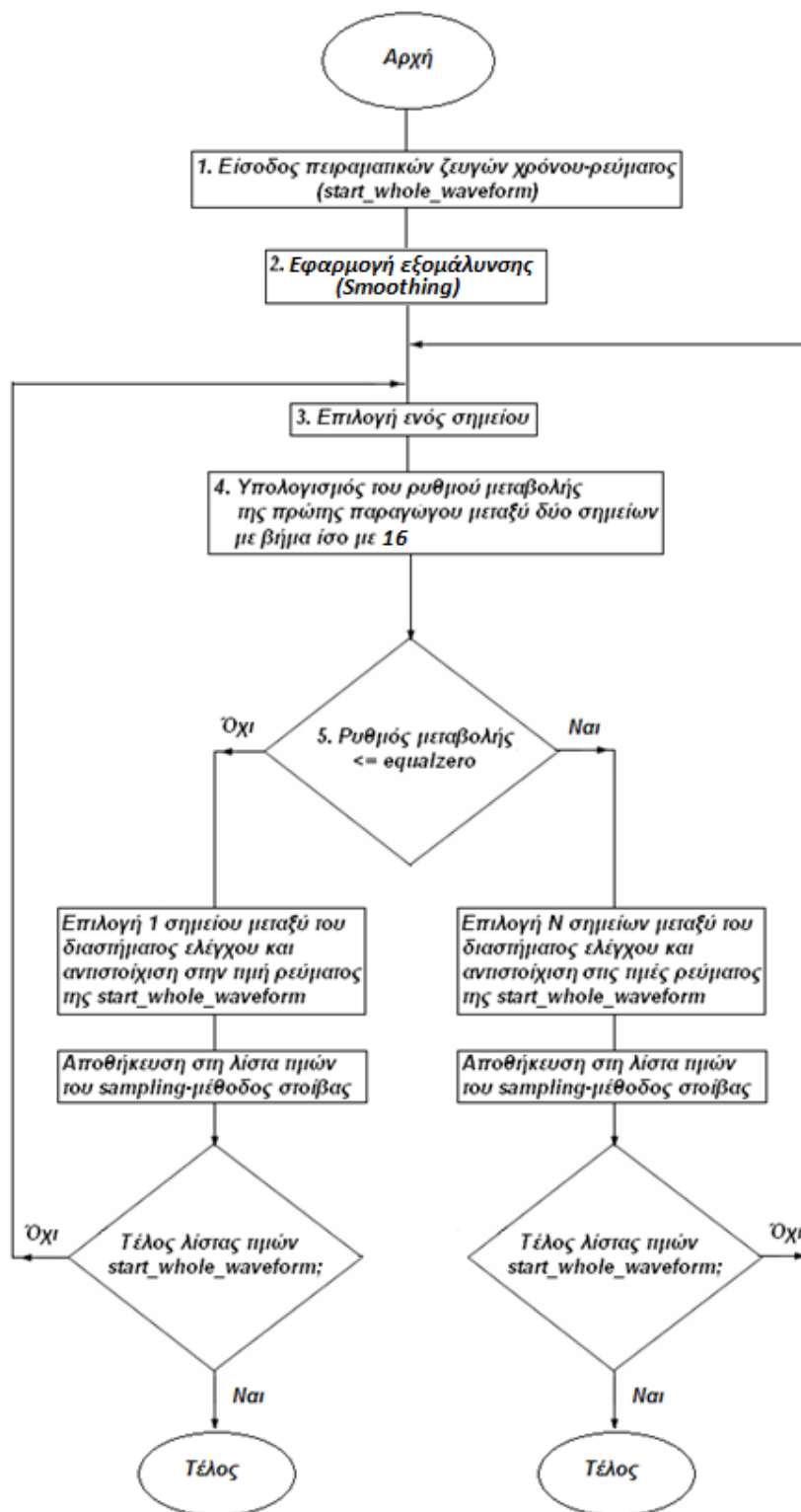
$$I(t) = I_1 \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)} + I_2 \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau_4}\right)} \quad (5.1)$$

Η καμπύλη που επιλέχθηκε για την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής είναι αυτή της § 4.3.

Η καμπύλη αυτή είναι χαρακτηριστική για τάση φόρτισης 2 kV, για την περίπτωση γρήγορης προσέγγισης και αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της ερευνητικής ομάδας του καθηγητή Fujiwara [29, 31].

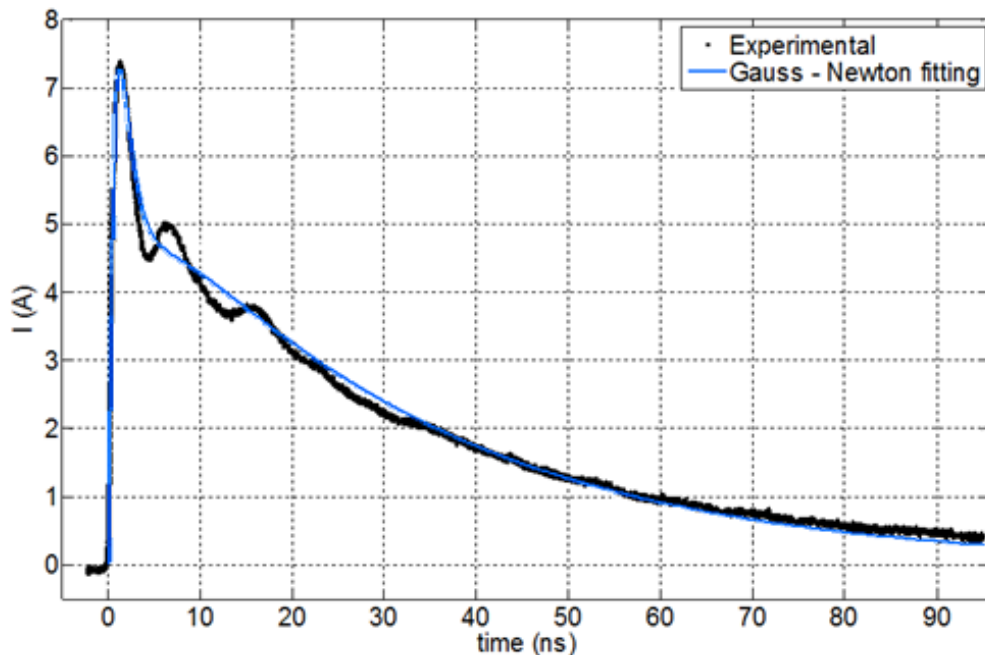


Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής γενετικού αλγόριθμου (* το διάγραμμα ροής της δειγματοληψίας δίνεται στο Σχήμα 5.2)



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής της δειγματοληψίας

Αρχικά, επιχειρήθηκε μια προσέγγιση της καταγραφείσης καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με τα «πιο απλά» εργαλεία που προσφέρει η μέθοδος Gauss Newton. Η προσαρμογή της καμπύλης στα δεδομένα ήταν πολύ ικανοποιητική, όμως δεν ήταν δυνατόν να παρουσιάσει τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία αξιολογούμε ως πολύ σημαντικά για την εφαρμογή μας. Η απαίτηση αυτή εξειδικεύεται στη συγκεκριμένη μορφή της καμπύλης που πρέπει να έχει δύο τοπικά μέγιστα, μορφή η οποία γίνεται ακόμα πιο δύσκολα προσεγγίσιμη στην περίπτωση που αυτά είναι αρκετά “κοντά” (στο πεδίο του χρόνου) μεταξύ τους, όπως ισχύει στην περίπτωση των πειραματικών μας αποτελεσμάτων. Το καλύτερο αποτέλεσμα, που μπορεί να ληφθεί, με αυτή τη μέθοδο, είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Η μαθηματική έκφραση της μορφής που ορίζει το Πρότυπο [8] για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με παραμέτρους βελτιωμένες με τη μέθοδο Gauss – Newton, ώστε να προσαρμόζεται στα πειραματικά μας δεδομένα

Η επιλογή της χρήσης μη ντετερμινιστικών αλγορίθμων ήταν το επόμενο μας βήμα. Έγινε χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου που παρουσιάστηκε εκτενώς στην § 5.2.3.

Στην παρούσα εφαρμογή, ο ΓΑ ξεκινά από ένα πληθυσμό $N=30$ τυχαίων τιμών για κάθε μία από τις παραμέτρους της εξίσωσης 5.1. Κάθε παράμετρος μετατρέπεται σε ένα 20-ψηφίο δυαδικό αριθμό, και έτσι λαμβάνουμε χρωμοσώματα μήκους 140 ψηφίων. Με διασταύρωση κάθε ζευγάρι παράγει $N_c=4$ απογόνους. Μετά από κάθε διασταύρωση υπάρχει μια πιθανότητα $P_m=10\%$ για μετάλλαξη. Μετά τη μετάλλαξη ο πληθυσμός των

«γονέων» συγχωνεύεται με τους “απογόνους” δημιουργώντας ένα σύνολο 90 χρωμοσωμάτων. Εφαρμόζοντας τη διαδικασία της φυσικής επιλογής μόνο $N=30$ χρωμοσώματα επιζούν. Πρόκειται για αυτά τα οποία αντιστοιχούν στις χαμηλότερες τιμές της εκάστοτε αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς επιλύεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Σε άλλες εργασίες [50-52], ο ΓΑ χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει τις παραμέτρους κάποιων εξισώσεων για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με αναφορά στην κυματομορφή ρεύματος γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τότε όταν δεν είχε, ακόμα, περιληφθεί στο Πρότυπο 61000-4-2:1996 [2] μαθηματική έκφραση για το ρεύμα. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά. Αυτός ο ΓΑ έπρεπε να υποστεί σημαντικές τροποποιήσεις, ώστε να παράξει χρήσιμα αποτελέσματα για την παρούσα περίπτωση, όπου τα δεδομένα εισόδου ήταν κυματομορφές πραγματικής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (όχι θεωρητικές κυματομορφές ή κυματομορφές γεννητριών).

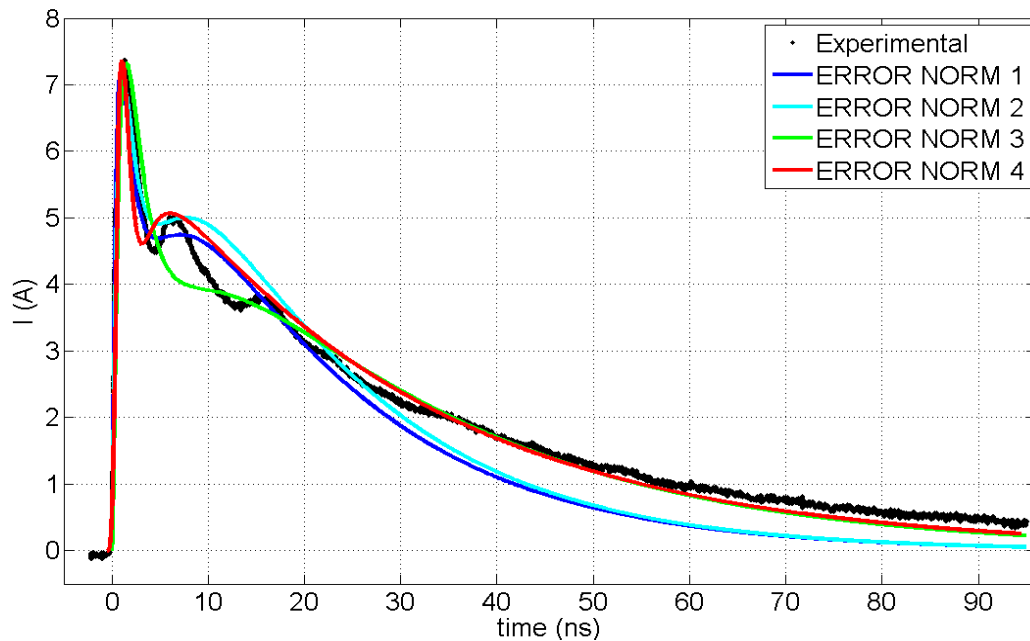
Η εναρκτήρια επιλογή του αρχικού πληθυσμού στην παρούσα διατριβή έγινε με ένα νέο είδος ελιτισμού, όπως αναφέρεται στην §5.2.3. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που εξετάστηκαν ήταν είναι αυτές που εκτίθενται στον Πίνακα 5.1. Η δειγματοληψία έγινε με τρόπο που αναδεικνύει, ιδιαιτέρως, τα χαρακτηριστικά της πειραματικής κυματομορφής, που μας ενδιαφέρει να αναδειχθούν με τη μαθηματική μας προσέγγιση.

Σημαντικό, για τη μαθηματική έκφραση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι να προσαρμόζεται πολύ καλά στο μέτωπο της πειραματικής καμπύλης, να παρουσιάζει σωστά το μέγιστο ρεύμα, όπως, επίσης, και τη δεύτερη κορυφή του ρεύματος, καθώς, επίσης, και τη χρονική στιγμή στην οποία αυτό παρουσιάζεται.

Μια αντιπροσωπευτική δειγματοληψία της πειραματικής κυματομορφής θα μπορούσε όχι μόνο να παράξει χρήσιμα αποτελέσματα, αλλά και να μας γλυτώσει από πολύ χρόνο. Αφού ο χρόνος είναι ζήτημα σημασίας για τις εφαρμογές ΓΑ, μια κατάλληλη διαδικασία δειγματοληψίας είναι κομβική. Σε αυτή την εργασία, θεωρήσαμε τρεις περιοχές δειγματοληψίας: $[0 \text{ ns} \div 3 \text{ ns}]$ (Μέτωπο – Πρώτη κορυφή), $[1.5 \div 10 \text{ ns}]$ (Δεύτερη κορυφή), $[10 \text{ ns} \div \text{τέλος}]$ (ουρά), και εφαρμόσαμε διαφορετικά είδη δειγματοληψίας σε καθένα. Η πυκνότητα δειγματοληψίας ήταν μεγαλύτερη στην πρώτη περιοχή και μειωνόταν σταδιακά καταλήγοντας σε ένα σύνολο 400 σημείων, από ένα αρχικό σύνολο 4000 σημείων. Μια τέτοια προσέγγιση απαντούσε στην ανάγκη να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις πρώτες δύο κορυφές, αφού αυτές περιέχουν την πιο ενδιαφέρουσα πληροφορία των ευρημάτων μας.

Για τους 30 γονείς και για 20 επαναλήψεις, ο χρησιμοποιούμενος υπολογιστής (dual-core, 32-bit, 3 GHz, 1 GB RAM) παρήγαγε αποτελέσματα σε ενάμισι λεπτό.

Ο ΓΑ εφαρμόστηκε στη μέση κυματομορφή των δέκα κυματομορφών που φαίνονται στο Σχήμα 4.4. Ο ΓΑ παρήγαγε διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της εξίσωσης όταν η αντικειμενική συνάρτηση ήταν κάποια διαφορετική από τις 4 του Πίνακα 4.1. Καθώς ο ΓΑ είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος, ο ΓΑ «έτρεξε» για πάνω από τριάντα φορές για κάθε μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τα καλύτερα αποτελέσματα (ένα για κάθε μία συνάρτηση) συγκρίνονται μεταξύ τους. Στο Σχήμα 5.4 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των τεσσάρων τροποποιήσεων της εξίσωσης 5.1 που προέκυψαν, σε κοινό γράφημα με τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 5.4: Γράφημα της εξίσωσης 5.1 για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων όπως υπολογίστηκαν από τον Γενετικό Αλγόριθμο για κάθε διαφορετική συνάρτηση σφάλματος

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων που παρήχθησαν από τον ΓΑ για την κάθε μία των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Πίνακας 5.2: Τιμές των παραμέτρων I_1 , I_2 , τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , και n που εξήχθησαν από τον Γενετικό Αλγόριθμο για κάθε μία από τις αντικειμενικές συναρτήσεις.

	I_1 (A)	I_2 (A)	τ_1 (ns)	τ_2 (ns)	τ_3 (ns)	τ_4 (ns)	n (-)
ERROR NORM 1	22.580	10.508	0.747	1.247	4.456	18.080	1.408
ERROR NORM 2	29.563	12.137	1.189	1.250	5.222	17.606	1.378
ERROR NORM 3	23.597	8.035	1.151	1.931	5.983	26.692	1.515
ERROR NORM 4	31.365	6.854	1.226	1.359	3.982	28.817	4.036

Όπως είναι προφανές, ο ΓΑ παράγει ικανοποιητικές τιμές για τις παραμέτρους, ώστε ο τύπος του 61000-4-2 [8] να προσαρμόζεται στα πειραματικά δεδομένα ικανοποιητικά.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές για τις τέσσερις χαρακτηριστικές παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (I_p , t_r , I_{30} και I_{60}), όπως αυτές ορίζονται στο 61000-4-2 [8], όπως, επίσης, και οι αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα. Οι αποκλίσεις των παραμέτρων $I_{2^{nd} peak}$ και $t_{2^{nd} peak}$ είναι επιπρόσθετα μεγέθη που περιλαμβάνονται, γιατί το δεύτερο τοπικό μέγιστο ήταν σημαντικός στόχος της προσέγγισής μας.

Πίνακας 5.3: Τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων I_{peak} , t_r , I_{30} , I_{60} , $I_{2^{nd} peak}$ και $t_{2^{nd} peak}$, για κάθε μία από τις τέσσερις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν.

	I_p (A)	t_r (ns)	I_{30} (A)	I_{60} (A)	$I_{2^{nd} peak}$ (A)	$t_{2^{nd} peak}$ (ns)
Πειραματικές Τιμές	7.37	0.73	2.24	1.00	5.02	6.39
ERROR NORM 1	7.17	0.53	1.87	0.37	4.74	7.10
Relative Error 1	-2.71%	-27.40%	-16.52%	-63.00%	-5.49%	11.13%
ERROR NORM 2	7.01	0.66	2.02	0.39	5.00	7.70
Relative Error 2	-4.88%	-9.59%	-9.82%	-61.00%	<u>-0.37%</u>	20.52%
ERROR NORM 3	7.33	0.82	2.39	0.82	-	-
Relative Error 3	-0.54%	12.33%	6.70%	-18.00%	-	-
ERROR NORM 4	7.36	0.74	2.38	0.84	5.07	6.05
Relative Error 4	<u>-0.14%</u>	<u>1.37%</u>	<u>6.25%</u>	<u>-16.00%</u>	0.97%	<u>-5.31%</u>

Η καλύτερη προσαρμογή επιτυγχάνεται για την τελευταία συνάρτηση σφάλματος (ERROR NORM 4). Η συνάρτηση αυτή παρουσιάζει μικρότερη τιμή σφάλματος, για όλες τις χαρακτηριστικές παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν, εκτός από το πλάτος του δεύτερου τοπικού μεγίστου, το οποίο, αν και έχει προσεγγιστεί πάρα πολύ καλά (σχετικό σφάλμα: 0.97%), υστερεί ελαφρώς έναντι του επιτευχθέντος με το δεύτερο κριτήριο (ERROR NORM 2). Το τελευταίο κριτήριο, έδωσε πολύ καλή προσαρμογή του μαθηματικού τύπου στην ουρά της κυματομορφής. (Ας σημειωθεί ότι, η χρήση του ERROR NORM 3 δεν παρήγαγε καθόλου δεύτερο τοπικό μέγιστο.)

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι, παρ' όλη τη σημαντική αποδοτικότητα του ΓΑ σε περιπτώσεις όπως η δικιά μας, είναι πρακτικά αδύνατον να παραχθούν τιμές για τις παραμέτρους της εξίσωσης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που περιλαμβάνεται στο Πρότυπο, τέτοιες ώστε αυτή να προσαρμόζεται στη πειραματικά δεδομένα, που μπορούν να έχουν παραπάνω από δύο τοπικά μέγιστα. Μία επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου θα πρέπει να λάβει υπ' όψιν αυτές τις διαφοροποιήσεις στη μορφή των καμπυλών ρεύματος ανά επίπεδο τάσης φόρτισης, όπως επισημαίνεται και στο κεφάλαιο 4, και να προτείνει νέες μαθηματικές εκφράσεις ικανές να τις περιγράψουν ακριβέστερα. Σε κάθε περίπτωση, η μαθηματική έκφραση της μορφής, που περιλαμβάνεται στο Πρότυπο, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά, για κάθε επίπεδο τάσης, με μία μεθοδολογία, όπως αυτή που προτάθηκε στο παρόν κεφάλαιο.

5.3 Μέθοδος Prony - Προσέγγιση κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων

Η μέθοδος προσέγγισης κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων (μέθοδος Prony) είναι μια εύχρηστη μέθοδος προσαρμογής (fitting) μαθηματικής έκφρασης της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$ σε ένα σύνολο σημείων, που λαμβάνονται με ίσες αποστάσεις μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου.

Παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος Prony στην αρχική της μορφή. Έστω $g_d(t)$ η κρουστική απόκριση του επιθυμητού δικτύου και $g(t)$ η απόκριση του γραμμικού σταθερού δικτύου, που προσεγγίζει την $g_d(t)$. Θα είναι:

$$g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(s_i t) \quad (5.2)$$

Η συνάρτηση $g(t)$ καλείται παρεμβολή n τάξεως στο σύνολο των ισαπεχόντων σημείων $t_k = kT$ εάν:

$$g_d(kT) = g(kT), \quad k = 0, 1, \dots, 2n-1 \quad (5.3)$$

Για τον προσδιορισμό των A_i, s_i , της εξίσωσης (5.2) τίθεται:

$$z_i = \exp(s_i T) \quad (5.4)$$

και σχηματίζεται το πολυώνυμο:

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^n (z - z_i) = \sum_{m=0}^n b_m z^m \quad (5.5)$$

$$\text{με } b_0 = 1 \quad (5.6)$$

Από τις σχέσεις (5.2) και (5.5) προκύπτει:

$$\sum_{m=0}^n g[(m+k)T] b_m = \sum_{m=0}^n \sum_{i=1}^n b_m A_i z_i^{m+i} = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{m=0}^n b_m z_i^{m+i} = 0 \quad (5.7)$$

για $k=0, 1, \dots, n-1$. Η σχέση (5.7) σε μητρική μορφή, λαμβάνοντας υπ' όψη τις σχέσεις (5.5) και (5.6), γράφεται:

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g(nT-T) & g(nT) & \cdot & \cdot & \cdot & g(2nT-2T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g(nT) \\ g(nT+T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(2nT-T) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Από τη σχέση (5.8) προκύπτουν οι συντελεστές b_i και από την εύρεση των λύσεων του πολυωνύμου $\psi(z)$ οι ρίζες z_i . Οι συντελεστές A_i προκύπτουν από τη μητρική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdot & \cdot & \cdot & z_n \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(nT-T) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Εφ' όσον είναι γνωστά τα z_i , τα s_i προκύπτουν από τη σχέση (5.4) ως εξής:

$$s_i = \frac{\text{Ln}(z_i)}{T} \quad (5.10)$$

Η τάξη n της παρεμβολής, και συνεπώς η διάσταση του τετραγωνικού πίνακα της (5.8),

καθορίζονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5 και όπως περιγράφεται ακολούθως. Έστω ο πίνακας P της εξίσωσης (5.11)

$$P = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \dots & g((N-1)T) \\ g(T) & g(2T) & \dots & g(NT) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g((N-1)T) & g(NT) & \dots & g(2NT-2T) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Ο πίνακας P της (5.11) περιέχει τιμές της συνάρτησης $g(t)$ για $t=0$ έως $t=2(N-1)T$. Για τη δημιουργία ενός συστήματος n -τάξης, θα περιορίσουμε τον ανωτέρω πίνακα σε έναν υποπίνακα, ο οποίος θα περιέχει τις τιμές της εξίσωσης του ρεύματος για $t = 0, T, 2T, \dots, (2n-1)T$.

Ο τρόπος, με τον οποίο επιλέγεται ο υποπίνακας, είναι ο ακόλουθος: σαρώνεται η τετραγωνική μήτρα P και βρίσκεται η τιμή της ορίζουσας του κάθε τετραγωνικού υποπίνακα, αρχίζοντας από πάνω αριστερά. Όταν η ορίζουσα πάρει τιμή ίση ή μικρότερη του επιλεγμένου “ισοδυνάμου μηδέν” (equivalent zero), η σάρωση σταματά και επιλέγεται ο πίνακας που έχει γίνει αποδεκτός ως αυτήν την στιγμή. Με τον προηγούμενο τρόπο και κριτήριο τη μη μηδενική ορίζουσα, ο πίνακας που έχει σχηματισθεί αποτελείται από γραμμικά ανεξάρτητα διανύσματα. Ο πίνακας που επιλέχθηκε είναι ο τετραγωνικός πίνακας που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.8). Επιλύεται, τώρα, η εξίσωση (5.8) για την εύρεση των συντελεστών b_i του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Το μήκος του διανύσματος των b_i είναι ίσο με το βαθμό του πίνακα που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.8).

Εδώ γίνεται φανερό πως, έτσι, οι τιμές της συνάρτησης που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο μπορεί να είναι - και όντως έτσι συμβαίνει - πολύ λιγότερες από αυτές που έχουν ληφθεί, αρχικά, από τη δειγματοληψία. Αυτό δείχνει ότι, η πληροφορία πάνω στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος είναι πολύ λιγότερη από αυτήν που έχουμε αρχικά. Ο αριθμός των σημείων $[N_s=2(N-1)+1]$, που θα επιλεγούν εδώ, είναι φανερό ότι, δεν επηρεάζει καθόλου το αποτέλεσμα της μεθόδου, όσο ισχύει $N > n$. Έτσι έχουμε, με αυτόν τον τρόπο, εισαγωγή αξιολογίας σφάλματος.

Αντίστοιχο πρόβλημα έχουμε και στην εξίσωση (5.9): εδώ λαμβάνονται οι δυνάμεις των λύσεων του χαρακτηριστικού πολυωνύμου, μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στη διάσταση

(n) του πίνακα, που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.8) και όχι άλλες, καθώς η τιμή αυτή έχει προεπιλεγεί, όπως δείχθηκε προηγουμένως.

Με την πρώτη ματιά είναι λογικό, στο σύστημα αυτό, το οποίο είναι προς επίλυση, να θέλουμε ο πίνακας, ο οποίος περιέχει τις ρίζες z_i να είναι τετραγωνικός. Έτσι, αφού έχει, ήδη, υπολογισθεί ο αριθμός (n) των ριζών (n στήλες), προκύπτει και το πλήθος των δυνάμεων που θα πάρουμε (n γραμμές). Επομένως, προκύπτει ο τετραγωνικός $n \times n$ πίνακας που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (5.9). Άρα, λαμβάνουμε δυνάμεις των z_i έως την τιμή ($n-1$) και όχι έως την τιμή ($N_\delta-1$), όπου N_δ το πλήθος των σημείων δειγματοληψίας. Αυτό, όμως, οδηγεί σε μια νέα απώλεια πληροφορίας.

Συνοπτικά η μέθοδος Prony παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής, Σχήμα 5.5.

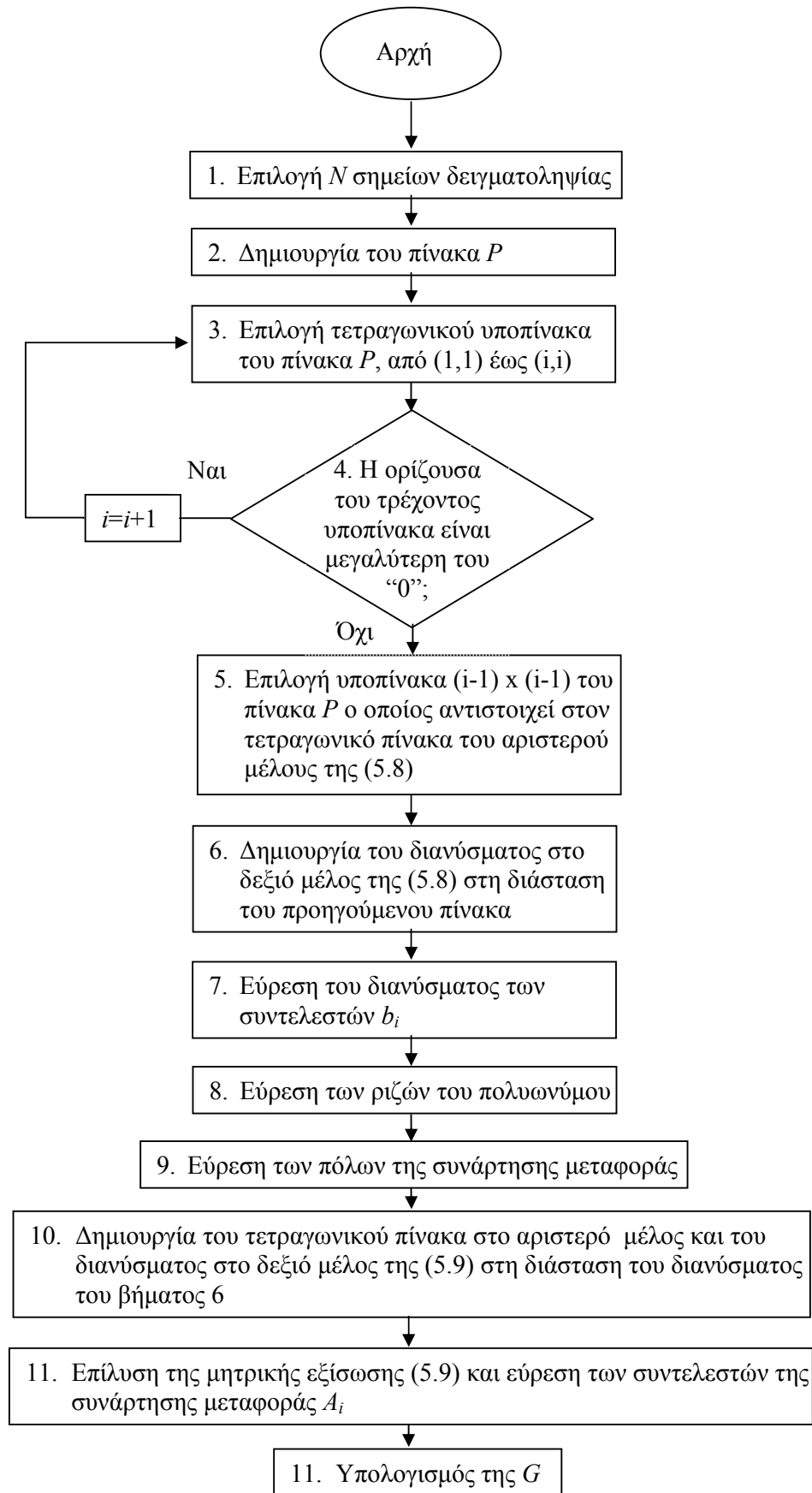
Στο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στην παρούσα διατριβή, παρουσιάζεται μια ιδιαίτερη δυσκολία η οποία εμφανίζεται στα stiff συστήματα (με απομακρυσμένες φυσικές συχνότητες). Δηλαδή, για να γίνει κατορθωτή μια προσέγγιση πεπερασμένης τάξης, προκύπτει το εξής ζήτημα: Με πυκνή δειγματοληψία δεν επιτρέπεται η θεώρηση του δεύτερου μεγίστου και της ουράς της κυματομορφής, ενώ με αραιή δειγματοληψία «εξαφανίζεται» το πρώτο μέγιστο.

5.4 Ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων

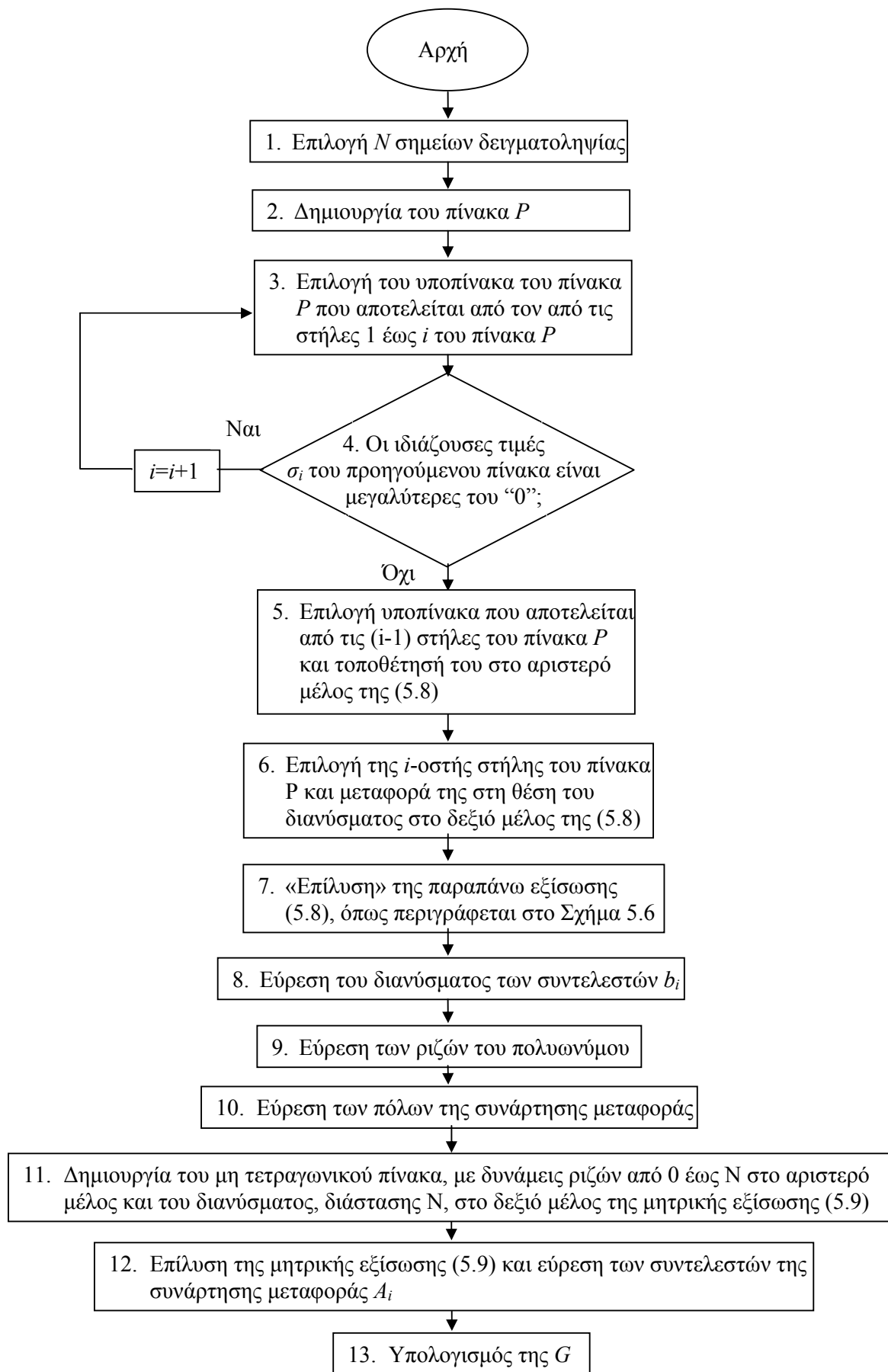
5.4.1 Α' προσεγγιστική μέθοδος

Στο Σχήμα 5.6 δίνεται το διάγραμμα ροής μιας βελτιωμένης προσεγγιστικής μεθόδου που, παρ' όλο που στηρίζεται στη μέθοδο Prony, παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στην προσέγγιση εξεζητημένων κυματομορφών, όπως είναι οι εξισώσεις με απομακρυσμένες φυσικές συχνότητες (stiff equations). Τέτοιες είναι και οι κυματομορφές, με τις οποίες ασχολείται, η παρούσα εργασία.

Στην προηγούμενη εφαρμογή της μεθόδου διαπιστώθηκε σειρά μειονεκτημάτων, τα οποία και καταγράφηκαν. Το μειονέκτημα που διαπερνά όλα τα προβλήματα, που παρουσιάζονται παραπάνω είναι ότι, για την εφαρμογή της μεθόδου πριν, ήμαστε αναγκασμένοι να αγνοήσουμε μεγάλο κομμάτι της πληροφορίας. Για παράδειγμα, για την επίλυση της (5.8) επιλέγεται, στη θέση της μήτρας που παρουσιάζεται στην εξίσωση, μια τετραγωνική υπομήτρα της μήτρας P , προκειμένου να γίνει η επίλυση της εξίσωσης με αντιστροφή της. Συνεπώς, δεν λαμβάνονται υπόψη οι τιμές της κυματομορφής αναφοράς, που αντιστοιχούν σε χρόνους, οι οποίοι υπερβαίνουν τις διαστάσεις της υπομήτρας.



Σχήμα 5.5: Ο αλγόριθμος της μεθόδου Prony



Σχήμα 5.6: Ο αλγόριθμος της A' προσεγγιστικής μεθόδου

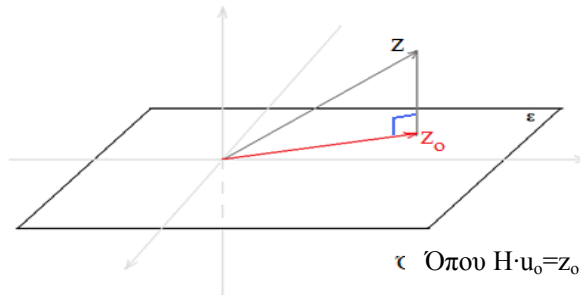
Στην τροποποίηση αυτή γίνεται προσπάθεια για απάλυνση των παραπάνω μειονεκτημάτων. Η επίλυση της (5.8) για την εύρεση των συντελεστών του χαρακτηριστικού πολυωνύμου γίνεται ως εξής: η σάρωση στήλη-στήλη του πίνακα P δημιουργεί στο τέλος έναν μη τετραγωνικό πίνακα (πίνακα με περισσότερες γραμμές από στήλες) που αποτελείται από στήλες – διανύσματα γραμμικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι, στην τροποποίηση της μεθόδου, χρησιμοποιούμε ως κριτήριο εξάρτησης των “έως τώρα επιλεγισών στηλών” τις ιδιάζουσες τιμές (singular values) του αντίστοιχου πίνακα που σχηματίζεται από αυτές τις στήλες. Οι ιδιάζουσες τιμές του πίνακα M ορίζονται ως $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$, όπου λ_i , μία ιδιοτιμή του πίνακα $M^T M$. Το κριτήριο εξάρτησης είναι το εξής: Όταν $0 < \min(\sigma_i) < \text{“ισοδύναμο μηδέν”}$ (equivalent zero), τότε ο πίνακας θεωρείται ότι αποτελείται από εξαρτημένα μεταξύ τους διανύσματα. Έτσι, επιλέγονται οι πρώτες n “ανεξάρτητες” στήλες.

Ως συνέπεια των ανωτέρω, οι επόμενες στήλες του πίνακα είναι γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η αμέσως επόμενη από τις ανεξάρτητες στήλες μεταφέρεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (5.8) και παίζει το ρόλο του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (5.8). Η επίλυση της τροποποιημένης αυτής εξίσωσης δίνει τον τρόπο με τον οποίο εξαρτάται η γραμμικώς εξαρτημένη στήλη από τις προηγούμενες, δηλαδή το διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές b_i του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Στην επίλυση λαμβάνονται, τώρα, υπ’ όψη τιμές του ρεύματος $i(t)$ για t μέχρι $(N-1)*T$, ήδη από την πρώτη στήλη!

Αξίζει να σημειωθεί ότι, με τη μέθοδο αυτή, για προσέγγιση μικρής τάξης, όπως στην περίπτωση μας, χρησιμοποιείται το μισό, περίπου, των δειγμάτων.

Η επίλυση της εξίσωσης (5.8), με τη $(n+1)$ -οστή στήλη στο δεξιό μέλος δίνει το διάνυσμα που περιέχει τα b_i ως σημειωθεί ότι, κάθε μεταφορά άλλου διανύσματος-στήλης $(n+i)$ στο δεξιό μέλος δίνει ένα διάνυσμα-λύση που υποδεικνύει μεν τον τρόπο εξάρτησης του $(n+i)$ -οστού διανύσματος-στήλης από τα διανύσματα του πίνακα (δηλαδή τις n πρώτες στήλες του πίνακα P), αλλά αυτό δεν είναι το διάνυσμα που περιέχει τους συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου.

Όμως, τώρα, έχουμε στο αριστερό μέλος της εξίσωσης έναν πίνακα που δεν είναι τετραγωνικός. Το πρόβλημά μας ανάγεται τώρα στο εξής: Επίλυση συστήματος με εξισώσεις περισσότερες από τους αγνώστους, με τον τρόπο, που φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.8: Βέλτιστη προσέγγιση του διανύσματος z με διάνυσμα z_0 του επιπέδου ε

Ομοίως, επιλύεται και η εξίσωση (5.8). Οι δυνάμεις στις οποίες υψώνονται οι ρίζες φθάνουν μέχρι το πλήθος των σημείων παρεμβολής. Συνεπώς, δημιουργείται, και εδώ, ένας μη τετραγωνικός πίνακας στο αριστερό μέλος και ένα σύστημα που είναι της μορφής του Σχήματος 5.7.α. Από εδώ συνεχίζεται η ίδια διαδικασία, για την εύρεση του διανύσματος που περιέχει τα A_i , τα οποία είναι οι συντελεστές της κρουστικής απόκρισης της σχέσης (5.1).

5.4.2 Β' προσεγγιστική μέθοδος

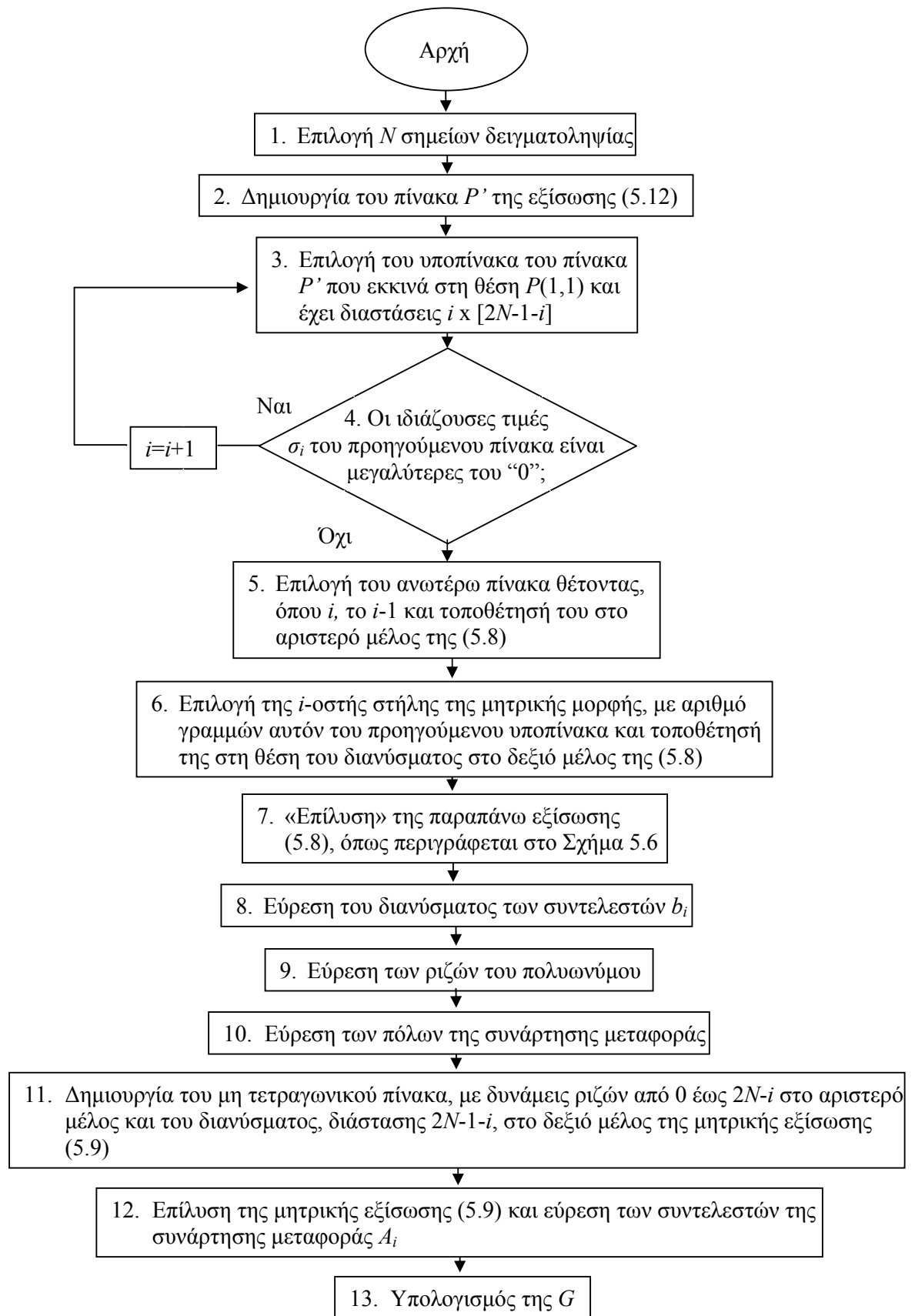
Στο Σχήμα 5.9 δίνεται το διάγραμμα ροής της δεύτερης βελτιωμένης προσεγγιστικής μεθόδου. Η Β' προσεγγιστική μέθοδος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από την αναπτυχθείσα Α'.

Ο λόγος που επιχειρήθηκε η ανάπτυξη δεύτερης προσεγγιστικής μεθόδου είναι, πάλι, η λήψη όσο το δυνατόν περισσότερης πληροφορίας στη διαδρομή προς την εύρεση μιας ικανοποιητικής προσέγγισης της συνάρτησης μεταφοράς.

Σχηματίζεται, εδώ, η μητρική μορφή P' , με αόριστες τιμές των στοιχείων στις θέσεις p'_{ij} , όπου $i+j > 2N+1$, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.12).

$$P' = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \dots & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & \dots & g(NT-T) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(NT-T) & g(NT) & \dots & g(2NT-2T) \\ g(NT) & \vdots & \dots & x \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & g(2NT-2T) & x & \vdots \\ g(2NT-2T) & x & x & x \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Για τον σχηματισμό πίνακα σε αντιστοιχία με τον πίνακα H της Α' προσεγγιστικής μεθόδου, ακολουθείται η διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.9: Ο αλγόριθμος της B' προσεγγιστικής μεθόδου

$$P' = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g(NT-T) & g(NT) & \cdot & \cdot & g(2NT-2T) \\ g(NT) & \cdot & \cdot & \cdot & x \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & g(2NT-2T) & x & \cdot & \cdot \\ g(2NT-2T) & x & x & \cdot & x \end{bmatrix}$$

Σχήμα 5.10: Επιλογή του μη-τετραγωνικού πίνακα της B' προσεγγιστικής μεθόδου

Η επιλογή υποπίνακα - στη θέση του πίνακα H - από τη μητρική μορφή P' , γίνεται με τη διαδικασία «μία γραμμή λιγότερη και μία στήλη περισσότερη κάθε φορά» (Σχήμα 5.8). Η σάρωση αυτή συνεχίζει όσο το επόμενο διάνυσμα είναι «γραμμικά ανεξάρτητο» από τα προηγούμενα. Ακριβέστερα, το κριτήριο για τον τερματισμό της σάρωσης και την επιλογή του υποπίνακα είναι, πάλι, η ισχύς της συνθήκης $0 < \min(\sigma_i) < \text{«ισοδύναμο μηδέν»}$ (equivalent zero), για τις ιδιάζουσες τιμές (singular values) του. Με τρόπο όμοιο, όπως κατά την εφαρμογή της A' προσεγγιστικής μεθόδου, σχηματίζεται το διάνυσμα του δεξιού μέλους της (5.8).

Με επιλεγμένο τον πίνακα H , η επίλυση της (5.9) γίνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο, όπως και στην εφαρμογή της A' προσεγγιστικής μεθόδου, αφού οι διαστάσεις είναι, ήδη, επιλεγμένες, ίδιες με εκείνες του πίνακα H .

5.5 Εύρεση προσεγγιστικών εξίσωσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με χρήση της B' προσεγγιστικής μεθόδου.

Για το σχεδιασμό των κυκλωμάτων παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 6, απαιτείται η γνώση των εκφράσεων του ρεύματος υπό τη μορφή εξόδου γραμμικού κυκλώματος. Η διαδικασία ανάκτησης τέτοιων εκφράσεων μπορεί να γίνει πολύ αποδοτικά με την προσεγγιστική μέθοδο, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και παρουσιάστηκε αναλυτικά στην §5.4.2.

5.5.1 Εύρεση προσεγγιστικών εξίσωσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με αναφορά στην καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Heidler.

Η μαθηματική έκφραση, που περιλαμβάνεται στο Πρότυπο [8], στηρίχθηκε στην εξίσωση του Heidler [52] για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

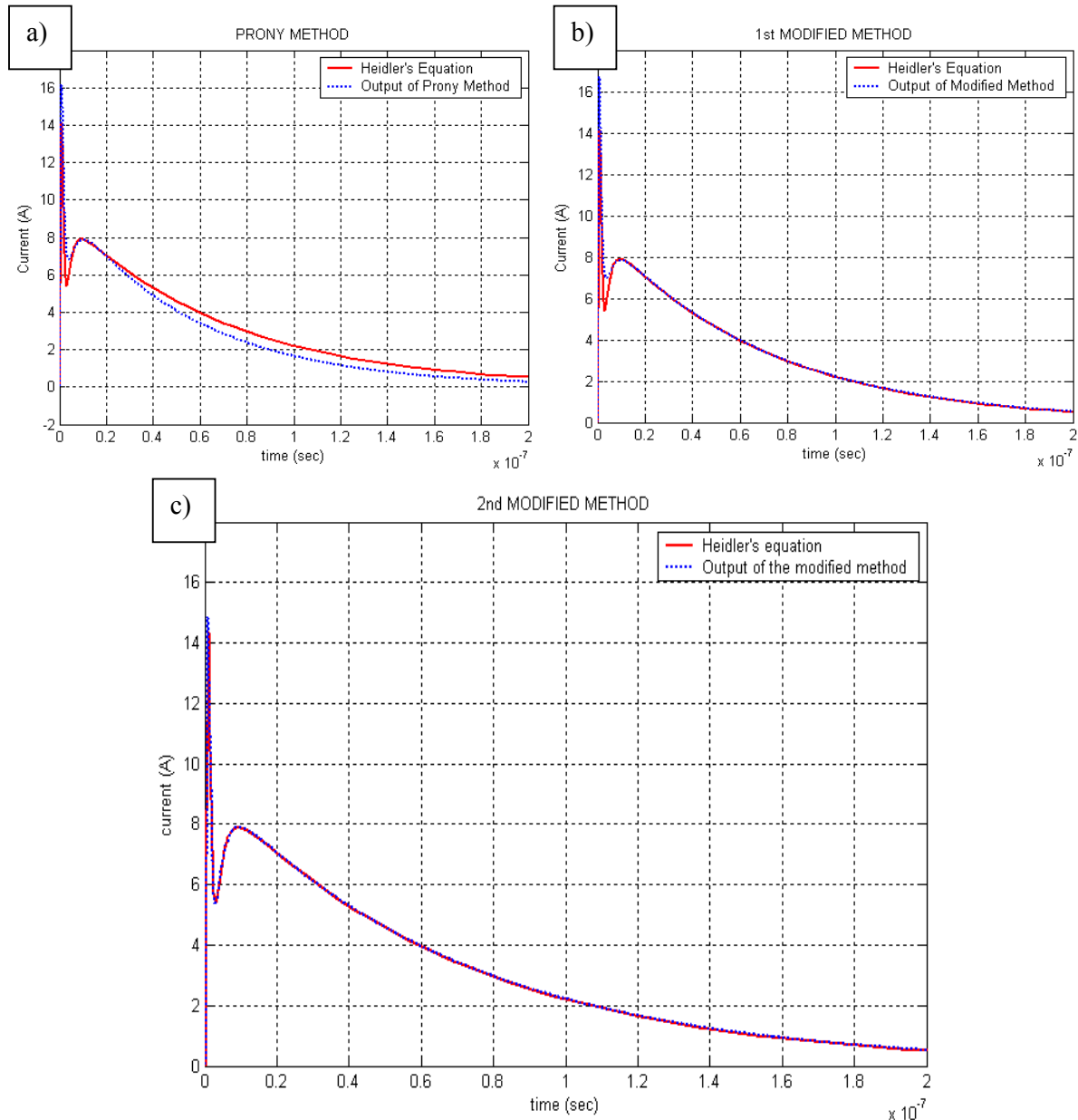
Την αναλυτική μαθηματική έκφραση αυτή, όπως δόθηκε σε προηγούμενη εργασία του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων [52], χρησιμοποιήσαμε ως αναφορά με προσεγγιστικό τρόπο (ως ζεύγη τιμών).

Η Β' προσεγγιστική μέθοδος δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της στην καμπύλη του Προτύπου. Για την συγκεκριμένη καμπύλη, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου σε κάθε έναν από τους δύο προσθετέους της εξίσωσης 5.1 (Η καμπύλη ρεύματος αναφοράς είναι αυτή του Προτύπου, με πλάτος που αντιστοιχεί σε τάση φόρτισης 4000 V). Η τακτική αυτή επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά βήματα για τις δύο προσεγγίσεις, ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσέγγιση με σύστημα πεπερασμένης τάξης. Έτσι, αντιμετωπίσαμε την περίπτωση της καμπύλης αυτής, που έχει δύο απομακρυσμένες φυσικές συχνότητες (stiff).

Ούτε η μέθοδος Prony, ούτε η Α' προσεγγιστική μέθοδος, έδωσαν, σε οποιαδήποτε περίπτωση, εφάμιλλα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η προσέγγιση που επιτεύχθη με τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους.

Με βήμα $T_{first}=0.08$ ns, για την καμπύλη, που αντιστοιχεί στον πρώτο προσθετέο της εξίσωσης (5.1) και $T_{second}=0.16$ ns, για την καμπύλη, που αντιστοιχεί στο δεύτερο προσθετέο της ίδιας εξίσωσης (5.1), επιτυγχάνεται μια πάρα πολύ καλή προσέγγιση της κυματομορφής του Προτύπου, η οποία έχει την αναλυτική μορφή της εξίσωσης (5.13) στο πεδίο της συχνότητας:

$$Y(s) = \frac{1}{1.2133 \cdot 10^9 + s} \cdot \frac{0.2761 \cdot 10^9 + s}{0.2368 \cdot 10^9 + s} \cdot \frac{3.2711 \cdot 10^{15} + s}{3.2775 \cdot 10^9 + s} \cdot \frac{251.8675 \cdot 10^{18} - 17.0497 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{2.1590 \cdot 10^{18} + 2.5759 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \cdot \frac{2.0834 \cdot 10^{18} + 2.6471 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{40.2104 \cdot 10^{18} + 10.4893 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \cdot \frac{4.55 \cdot 10^{-6} (0.2065 \cdot 10^{18} + 0.4688 \cdot 10^9 \cdot s + s^2)}{0.00854 \cdot 10^{18} + 0.6026 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (5.13)$$



Σχήμα 5.11: Η προσέγγιση της καμπύλης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Heidler: a) με τη μέθοδο Prony, b) με την A' προσεγγιστική μέθοδο και c) με τη B' προσεγγιστική μέθοδο

5.5.2 Εύρεση προσεγγιστικών εξισώσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με αναφορά στα πειραματικά δεδομένα

Η διαδικασία προσέγγισης των πειραματικών δεδομένων είναι πιο περίπλοκη από την προσέγγιση των θεωρητικών καμπυλών. Η προσέγγιση δεν έχει να αντιμετωπίσει ξεχωριστούς όρους που συνιστούν τη συνολική καμπύλη, αλλά ένα ενιαίο σύνολο τιμών

που, ως σημειωθεί, συμπεριλαμβάνει και το θόρυβο, που χαρακτηρίζει τις μετρήσεις. Η μορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σύμφωνα με το Πρότυπο, είναι ενιαία για όλες τις τάσεις φόρτισης και έχει πλάτος ανάλογο προς την εκάστοτε τάση φόρτισης. Τα πειράματά μας έδειξαν το αντίθετο, όπως περιγράφεται εκτενώς στο κεφάλαιο 4. Η προσέγγιση που γίνεται στην παρούσα παράγραφο θεωρεί ως καμπύλη αναφοράς το μέσο όρο όλων των κυματομορφών που ελήφθησαν, υπό ορισμένη τάση φόρτισης, μέσω των πειραμάτων που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και εξάγονται διαφορετικές κάθε φορά μαθηματικές εκφράσεις. Οι τρεις μαθηματικές προσεγγίσεις, για τάσεις 1000 V, 2000 V, 4000 V είναι αυτές που φαίνονται στις εξισώσεις (5.14) έως και (5.16).

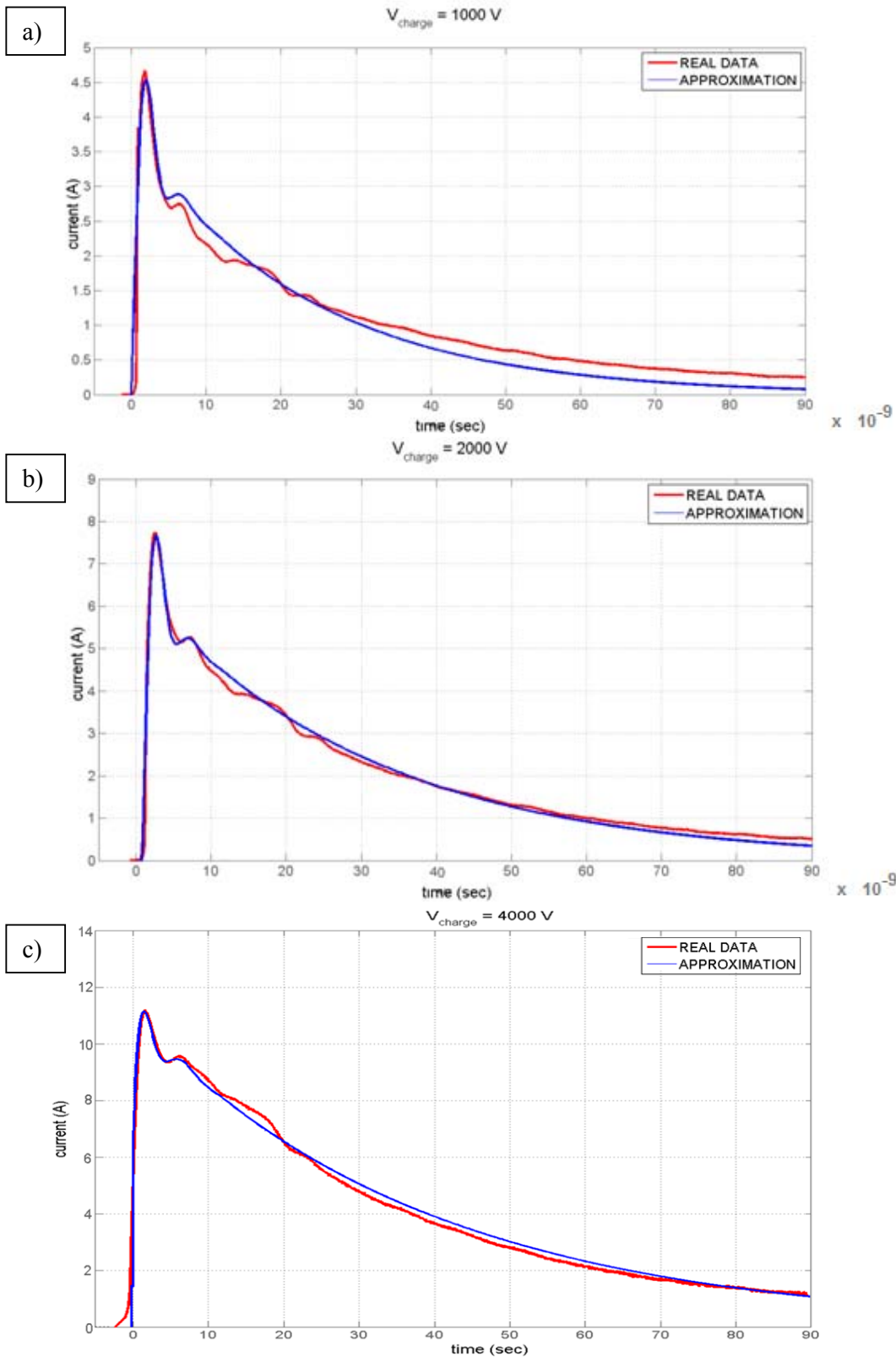
$$Y_{1000}(s) = \frac{1}{1000} \cdot \frac{-0.005859s^2 + 3.041s \cdot 10^9 + 6.957 \cdot 10^{18}}{s^3 + 1.202s^2 \cdot 10^9 + 1.910s \cdot 10^{18} + 0.080 \cdot 10^{27}} \quad (5.14)$$

$$Y_{2000}(s) = \frac{1}{2000} \cdot \frac{-0.0023184s^2 - 6.459s \cdot 10^9 + 13.170 \cdot 10^{18}}{s^3 + 1.263s^2 \cdot 10^9 + 2.131s \cdot 10^{18} + 0.068 \cdot 10^{27}} \quad (5.15)$$

$$Y_{4000}(s) = \frac{1}{4000} \cdot \frac{6.567s^3 + 21.530s^2 \cdot 10^9 + 22.650s \cdot 10^{18} + 16.910 \cdot 10^{27}}{s^4 + 2.058s^3 \cdot 10^9 + 2.371s^2 \cdot 10^{18} + 1.605s \cdot 10^{27} + 0.040 \cdot 10^{36}} \quad (5.16)$$

Οι μαθηματικές αυτές εκφράσεις αναπαρίστανται γραφικά μαζί με τα πειραματικά δεδομένα στο Σχήμα 5.12.

Τονίζεται με έμφαση το γεγονός ότι, η ακρίβεια των εφαρμοσθεισών προσεγγίσεων συναρτάται με την πολυπλοκότητα των εκφράσεων που επιλέγουμε εμείς, όπως φαίνεται στον κώδικα που παρουσιάζεται στο παράρτημα Π.3. Στην παρούσα διατριβή δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάδειξη του σωστού πλάτους και του χρόνου εμφάνισης των δύο πρώτων μεγίστων. Περισσότεροι όροι στις εξισώσεις (5.14) έως και (5.16) θα ήταν απαραίτητοι για την προσέγγιση και περαιτέρω λεπτομερειών των πειραματικών καμπυλών.

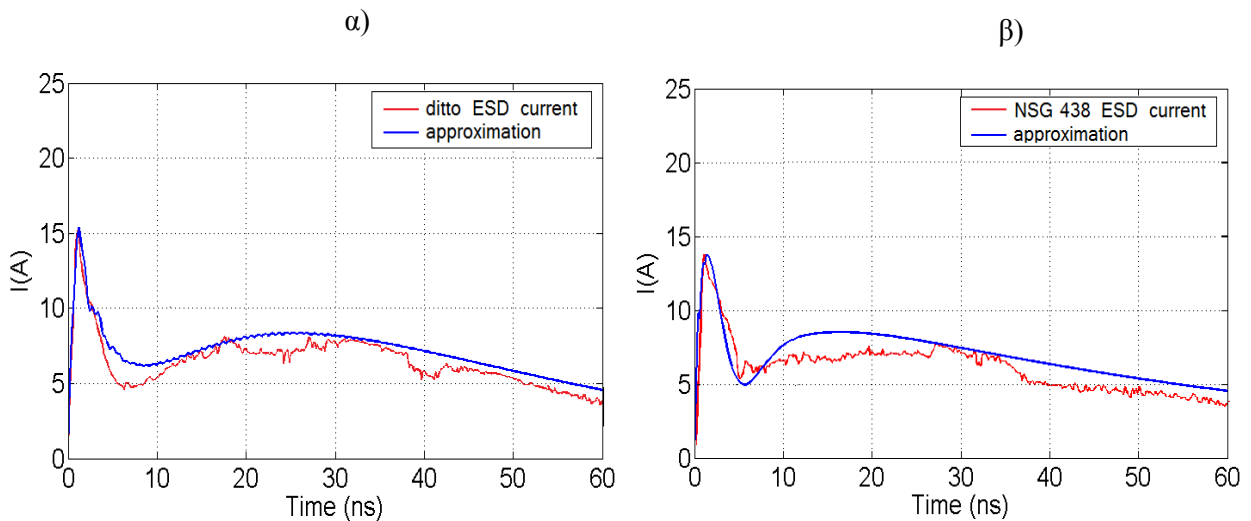


Σχήμα 5.12: Πειραματικά δεδομένα σε κοινό γράφημα με τις προσεγγίσεις που προέκυψαν από τη μέθοδο που αναπτύχθηκε. Οι καμπύλες ρεύματος αντιστοιχούν σε τάσεις φόρτισης a) 1000 V, b) 2000 V και c) 4000 V, αντίστοιχα

5.5.3 Εύρεση προσεγγιστικών εξισώσεων της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$, με αναφορά στην καμπύλη ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εμπορικών γεννητριών

Μία εφαρμογή των αναφερθεισών μεθόδων που καταλήγουν σε αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις ρεύματος εκφόρτισης, πραγματοποιήθηκε και για τις πειραματικές καμπύλες ρεύματος που παράγουν εμπορικές γεννήτριες ρεύματος ηλεκροστατικής εκφόρτισης. Οι μαθηματικές εκφράσεις της μορφής ($\sum A_i e^{-s_i t}$), που αποκτήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν, όπως θα δειχθεί στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο, για το σχεδιασμό μοντέλων, που θα παράγουν το ρεύμα, το οποίο κάθε μία από τις διαθέσιμες εμπορικές γεννήτριες ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δίνει.

Στο Σχήμα 5.13 φαίνονται οι καμπύλες ρεύματος εκφόρτισης που οι δύο γεννήτριες οι οποίες παρουσιάστηκαν στην §3.2.1, παράγουν για τάση φόρτισης 4 kV (καμπύλες κόκκινου χρώματος).



Σχήμα 5.13: Τυπικές κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παραγόμενου από γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. α) ditto, β) NSG-438

Με τη Β' προσεγγιστική μέθοδο που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στην §4.4.2 προέκυψαν, για το ρεύμα εκφόρτισης των δύο αυτών γεννητριών, οι μαθηματικές εκφράσεις που φαίνονται στις εξισώσεις (5.17) και (5.18). Οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις φαίνονται στο Σχήμα 5.13 (καμπύλες μπλε χρώματος).

$$Y_{DITTO,4000V}(s) = 1.0997 \frac{1}{s + 0.03 \cdot 10^9} \frac{s + 25.63 \cdot 10^9}{s + 0.07 \cdot 10^9} \frac{s^2 + 0.10 \cdot 10^9 \cdot s + 0.02 \cdot 10^{18}}{s^2 + 2.75 \cdot 10^9 \cdot s + 0.61 \cdot 10^{18}} \frac{s^2 + 0.99 \cdot 10^9 \cdot s + 15.07 \cdot 10^{18}}{s^2 + 1.35 \cdot 10^9 \cdot s + 9.90 \cdot 10^{18}} \quad (5.17)$$

$$Y_{NSG_438,4000V}(s) = 2.02 \frac{1}{s + 0.02 \cdot 10^9} \frac{s + 10.8 \cdot 10^9}{s + 0.17 \cdot 10^9} \frac{s^2 + 0.19 \cdot 10^9 \cdot s + 0.05 \cdot 10^{18}}{s^2 + 1.04 \cdot 10^9 \cdot s + 0.59 \cdot 10^{18}} \quad (5.18)$$

6.1 Κυκλωματικό μοντέλο, για την εξίσωση ρεύματος του Heidler με ενεργητικό δίκτυο RC

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιασθεί η σχεδίαση κυκλώματος, το οποίο παράγει την κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Heidler, όπως ορίζεται στο [51], και έχει προσεγγισθεί ως κρουστική απόκριση γραμμικού συστήματος στην εξίσωση 5.13.

Αν υποθέσουμε βηματική είσοδο για το δίκτυο μας με πλάτος 1 V τότε, για τη συνάρτηση μεταφοράς τού, θα ισχύει:

$$Y(s)=U(s) \cdot G(s) \Leftrightarrow G(s)=s \cdot Y(s) \quad (6.1)$$

$$G(s)=G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) \cdot G_4(s) \cdot G_5(s) \cdot G_6(s) \quad (6.2)$$

Όπου,

$$G_1(s) = \frac{s}{1.2133 \cdot 10^9 + s} \quad (6.3)$$

$$G_2(s) = \frac{0.2761 \cdot 10^9 + s}{0.2368 \cdot 10^9 + s} \quad (6.4)$$

$$G_3(s) = \frac{3.2711 \cdot 10^{15} + s}{3.2775 \cdot 10^9 + s} \quad (6.5)$$

$$G_4(s) = \frac{251.8675 \cdot 10^{18} - 17.0497 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{2.1590 \cdot 10^{18} + 2.5759 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (6.6)$$

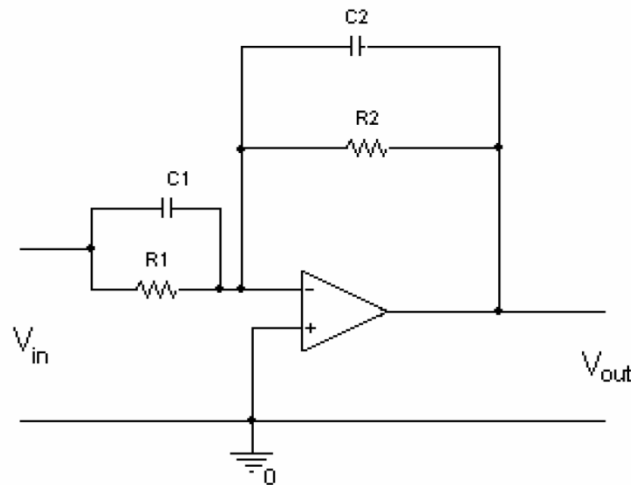
$$G_5(s) = \frac{2.0834 \cdot 10^{18} + 2.6471 \cdot 10^9 \cdot s + s^2}{40.2104 \cdot 10^{18} + 10.4893 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (6.7)$$

$$G_6(s) = \frac{4.55 \cdot 10^{-6} (0.2065 \cdot 10^{18} + 0.4688 \cdot 10^9 \cdot s + s^2)}{0.00854 \cdot 10^{18} + 0.6026 \cdot 10^9 \cdot s + s^2} \quad (6.8)$$

Η σύνθεση του δικτύου μας θα βασισθεί στην αλυσωτή σύνδεση των 6 κυκλωμάτων που χαρακτηρίζονται από τις συναρτήσεις μεταφοράς $G_i \mid_{i=1..6}$, με είσοδο τη βηματική συνάρτηση.

Ας παρατηρηθεί ότι, το κύκλωμα αυτό δεν υπακούει στην φυσική του φαινομένου, όσον αφορά στην τάση φόρτισης, παρά μόνο παράγει το ρεύμα εκφόρτισης, που το Πρότυπο ορίζει για τάση φόρτισης 4000 V. Δεδομένου του γεγονότος ότι, το Πρότυπο ορίζει μία μορφή για το ρεύμα εκφόρτισης, με πλάτος αναλογικό της τάσης φόρτισης, το κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω μπορεί να αντιστοιχεί σε οποιαδήποτε από αυτές τις τάσεις φόρτισης, αν κανονικοποιηθεί η τάση εισόδου του, με αναφορά στα 4000 V.

Οι συναρτήσεις G_1, G_2, G_3 υλοποιούνται από ένα απλό κύκλωμα με ένα τελεστικό ενισχυτή σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία, το οποίο και εικονίζεται παρακάτω στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Αναστρέφουσα συνδεσμολογία τελεστικού ενισχυτή, που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση

Το εν λόγω κύκλωμα έχει ως συνάρτηση μεταφοράς λόγου τάσεων την εξής:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2 + \frac{1}{s \cdot C_2}}{R_1 + \frac{1}{s \cdot C_1}} = -\frac{\frac{1}{C_2 \cdot \left(s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \right)}}{\frac{1}{C_1 \cdot \left(s + \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \right)}} \Rightarrow \quad (6.9)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{C_1 \cdot \left(s + \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \right)}{C_2 \cdot \left(s + \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \right)} \quad (6.10)$$

Αν $C_1=C_2=C$, τότε η εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \frac{s + a}{s + b} \quad (6.11)$$

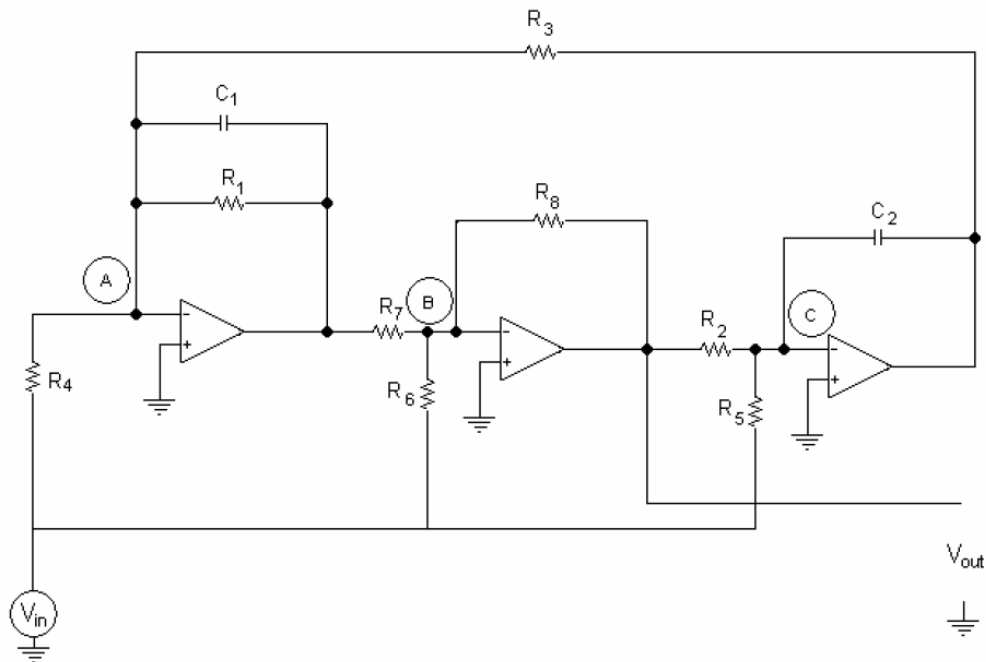
Όπου,

$$a=1/(R_1 \cdot C) \quad (6.12)$$

$$b=1/(R_2 \cdot C) \quad (6.13)$$

Με επισκόπηση των εξισώσεων (6.3) έως και (6.5) και της (6.11), εξάγουμε τις τιμές των στοιχείων.

Οι συναρτήσεις G_4 , G_5 , G_6 υλοποιούνται με τη χρήση πολυπλοκότερων κυκλωμάτων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχει επιλεγεί, για την υλοποίησή τους, το κύκλωμα των Tow - Thomas, το οποίο και εικονίζεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Το κύκλωμα των Tow - Thomas

Αναλύοντας το κύκλωμα και γράφοντας τις ανάλογες εξισώσεις για τους κόμβους A, B και C παίρνουμε τα εξής:

$$-\left(\frac{1}{R_1} + sC_1\right)V_1 - \frac{1}{R_3}V_3 = \frac{1}{R_4}V_{in} \quad (6.14)$$

$$-\frac{1}{R_7}V_1 - \frac{1}{R_8}V_2 = \frac{1}{R_6}V_{in} \quad (6.15)$$

$$-\frac{1}{R_2}V_2 - sC_2V_3 = \frac{1}{R_5}V_{in} \quad (6.16)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{s^2 + s\left(\frac{1}{R_1C_1} - \frac{R_6}{R_4C_1R_7}\right) + \frac{R_6}{R_7R_3R_5C_1C_2}}{s^2 + s\frac{1}{R_1C_1} + \frac{R_8}{R_7R_2R_3C_1C_2}} \quad (6.17)$$

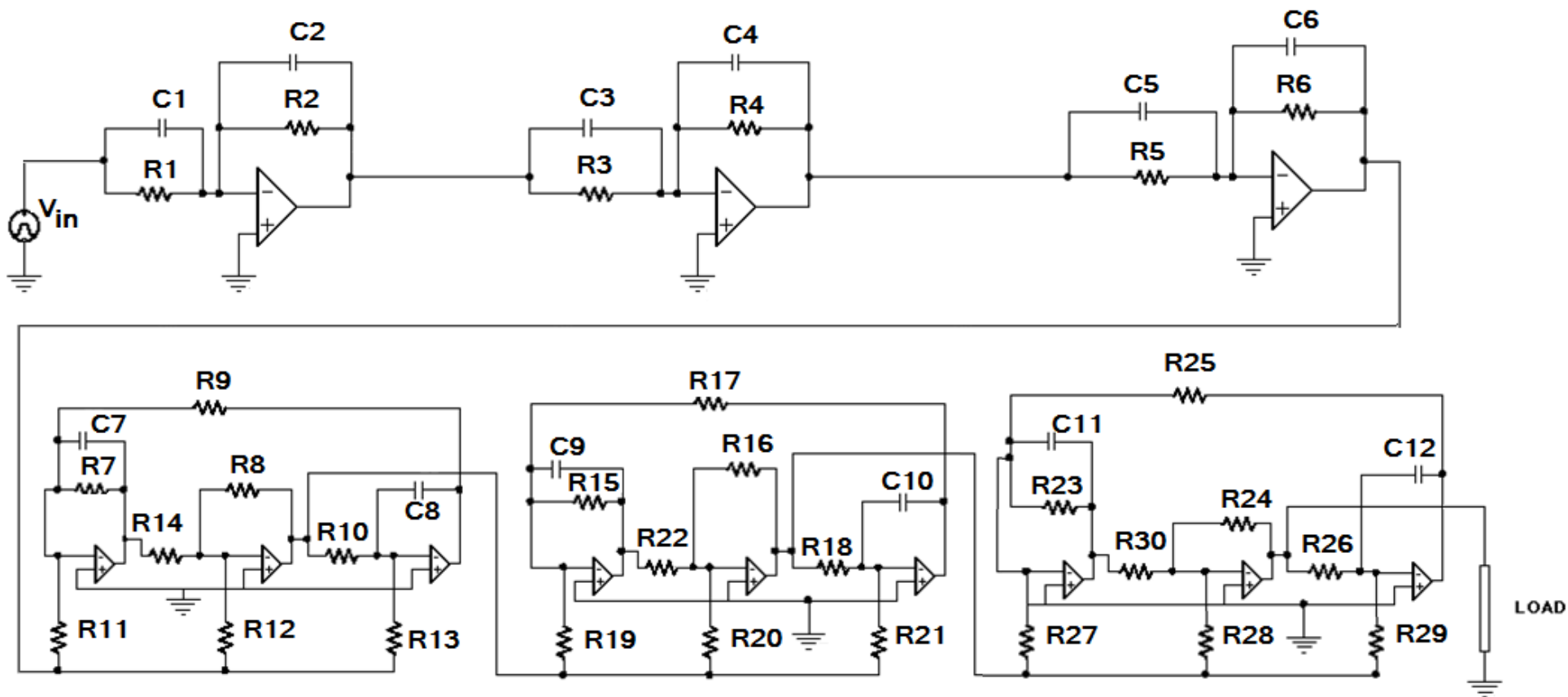
Ομοίως, για τις τιμές των στοιχείων, λύνονται εξισώσεις ταυτότητας των συντελεστών της (6.17) με αυτές των (6.6) έως και (6.8).

Κάθε ένα από τα κυκλώματα αυτά των ανωτέρω βαθμίδων κατασκευάστηκαν με τον τρόπο που εκτέθηκε και έπειτα ελέγχθηκε η σωστή απόκριση του καθενός, με αναφορά στις μαθηματικές εκφράσεις (6.3) έως και (6.8).

Το κύκλωμα που προκύπτει μετά την αλυσωτή σύνδεση είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Οι τιμές των στοιχείων φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

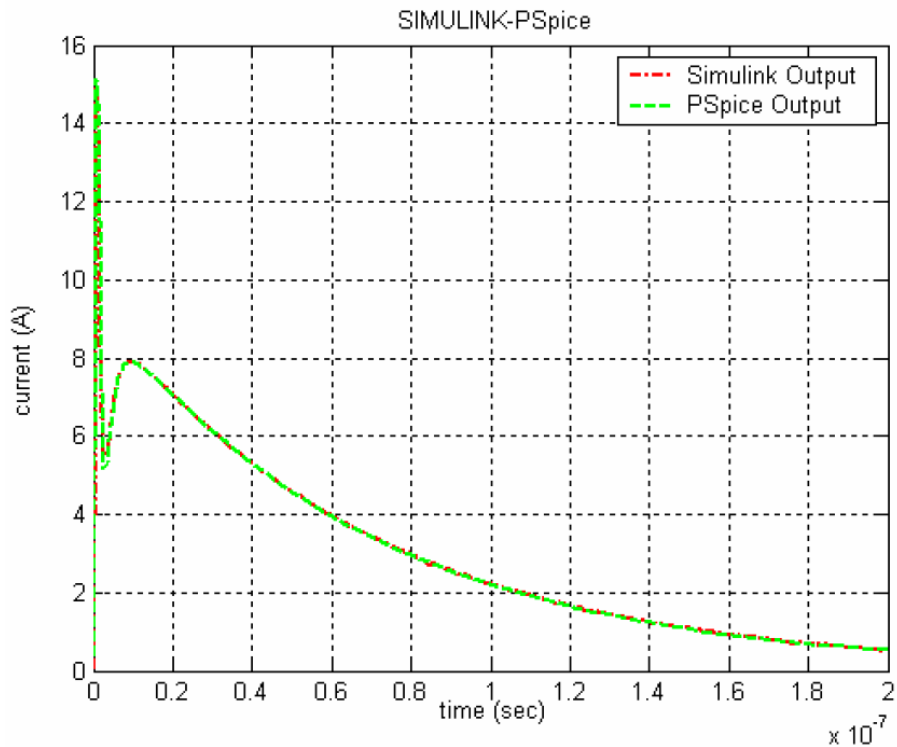
Πίνακας 6.1 Οι τιμές των στοιχείων του δικτύου του Σχήματος 6.3

C1	1pF	R1	3.621 kΩ	R13	3.970 Ω	R25	1.000 kΩ
C2	1pF	R2	4.223 kΩ	R14	10 Ω	R26	1.171 kΩ
C3	0.001pF	R3	305.705 mΩ	R15	95.335 Ω	R27	164.172 MΩ
C4	0.001pF	R4	305.108 kΩ	R16	100 Ω	R28	219.780 MΩ
C5	100pF	R5	∞ Ω	R17	100 Ω	R29	10.639 MΩ
C6	100pF	R6	8.242 Ω	R18	248.692 Ω	R30	1.000 kΩ
C7	10pF	R7	38.821 Ω	R19	127.514 Ω	LOAD	2 Ω
C8	10pF	R8	10 Ω	R20	100 Ω		
C9	1pF	R9	10 Ω	R21	4.799 Ω		
C10	1pF	R10	463.177 Ω	R22	100 Ω		
C11	10pF	R11	5.095 Ω	R23	165.934 Ω		
C12	10pF	R12	10 Ω	R24	1.000 kΩ		



Σχήμα 6.3: Το ενεργητικό κύκλωμα που παράγει την κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η έξοδος του κυκλώματος είναι μια εξαιρετική κυματομορφή που ταυτίζεται με την κυματομορφή του Προτύπου, την οποία προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε. Σε κοινό γράφημα, η έξοδος του κυκλώματος με την κυματομορφή αναφοράς φαίνονται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4: Η μαθηματική έκφραση του Heidler για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Simulink Output), μαζί με την έξοδο του κυκλώματος που προκύπτει από την προσομοίωσή του (PSpice Output)

6.1.1 Εφαρμογή: κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εμπορικών γεννητριών, με ενεργητικό δίκτυο RC

Αξιοποιώντας τις μαθηματικές εκφράσεις που βρέθηκαν στην §5.3.3, μπορούμε να συνθέσουμε ενεργά κυκλώματα για την παραγωγή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που αντιστοιχούν στις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τα κυκλώματα που θα σχεδιασθούν, με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προσομοιώσεις δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθώς είναι ευρέως γνωστό ότι, υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες ένα δοκίμιο, μπορεί να «περάσει» τη δοκιμή ατρωσίας έναντι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όταν αυτό γίνεται με μία γεννήτρια ηλεκτροστατικών

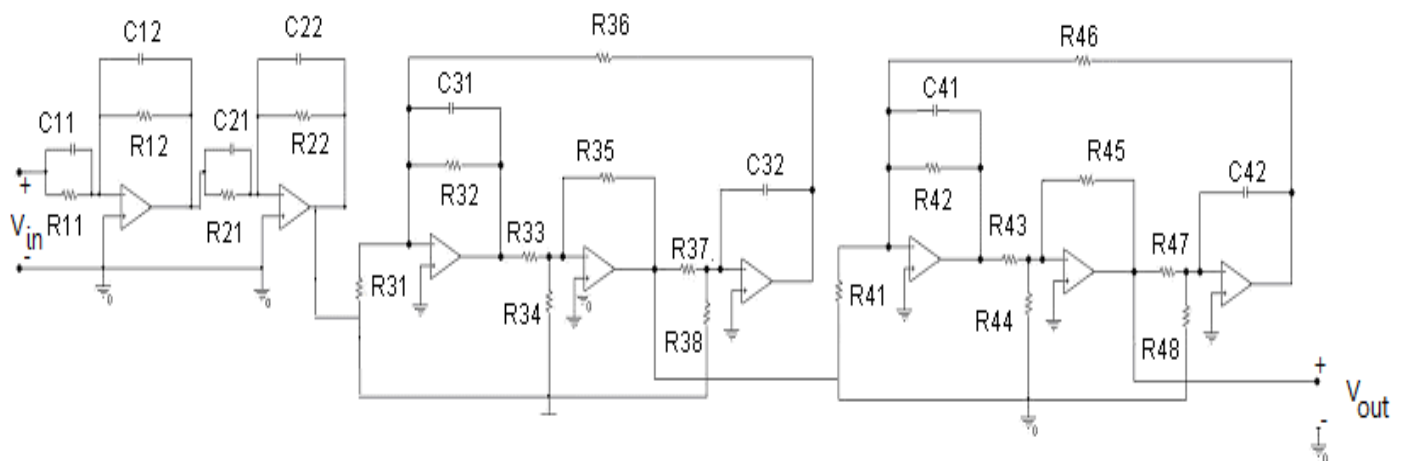
εκφορτίσεων, ενώ να αποτυγχάνει όταν χρησιμοποιείται μία άλλη. Στην παρούσα εφαρμογή θα χρησιμοποιηθούν οι δύο γεννήτριες που παρουσιάστηκαν στην §3.2.1.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις (5.17) και (5.18), και υποθέτοντας βηματική είσοδο, τότε θα έχουμε για τις συναρτήσεις μεταφοράς τις εξισώσεις (6.18) και (6.19).

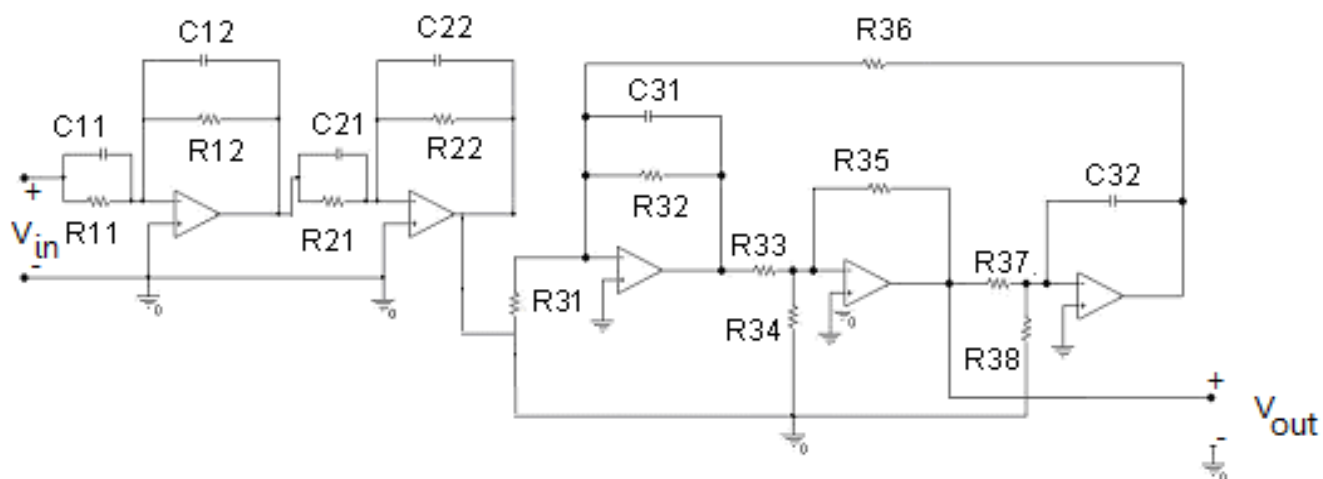
$$G_{DITTO,4000V}(s) = 1.0997 \frac{s}{s + 0.03 \cdot 10^9} \frac{s + 25.63 \cdot 10^9}{s + 0.07 \cdot 10^9} \frac{s^2 + 0.10 \cdot 10^9 \cdot s + 0.02 \cdot 10^{18}}{s^2 + 2.75 \cdot 10^9 \cdot s + 0.61 \cdot 10^{18}} \frac{s^2 + 0.99 \cdot 10^9 \cdot s + 15.07 \cdot 10^8}{s^2 + 1.35 \cdot 10^9 \cdot s + 9.90 \cdot 10^8} \quad (6.18)$$

$$G_{MSG_438,4000V}(s) = 2.02 \frac{s}{s + 0.02 \cdot 10^9} \frac{s + 10.8 \cdot 10^9}{s + 0.17 \cdot 10^9} \frac{s^2 + 0.19 \cdot 10^9 \cdot s + 0.05 \cdot 10^{18}}{s^2 + 1.04 \cdot 10^9 \cdot s + 0.59 \cdot 10^{18}} \quad (6.19)$$

Ακριβώς όπως πριν, και με τη χρήση αναστρεφουσών συνδεσμολογιών, καθώς και κυκλωμάτων Tow - Thomas, προκύπτουν για τις δύο γεννήτριες τα εξής αντίστοιχα κυκλώματα.



Σχήμα 6.5: Το ισοδύναμο κύκλωμα για την γεννήτρια Ditto της EM TEST



Σχήμα 6.6: Το ισοδύναμο κύκλωμα για την γεννήτρια NSG 438 της Schaffner

Για τα στοιχεία των κυκλωμάτων αυτών βρέθηκαν οι τιμές των στοιχείων, όμοια με τον τρόπο που αναπτύχθηκε στην §6.1: στον Πίνακα 6.2 φαίνονται οι τιμές των στοιχείων, που αντιστοιχούν στο κύκλωμα του Σχήματος 6.5, και στον Πίνακα 6.3 φαίνονται οι τιμές των στοιχείων που αντιστοιχούν στο κύκλωμα του Σχήματος 6.6.

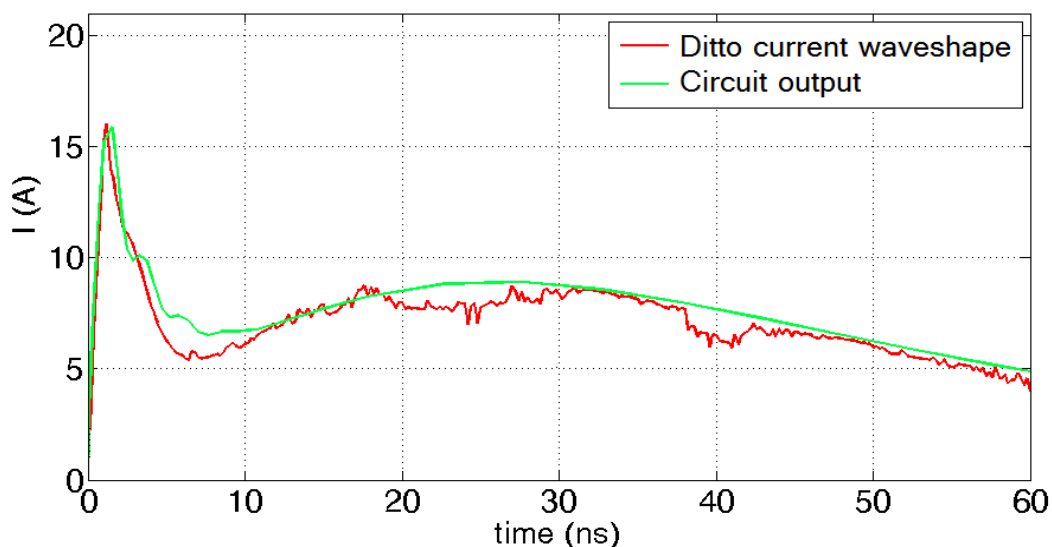
Πίνακας 6.2 Οι τιμές των στοιχείων του δικτύου του Σχήματος 6.5

$i \backslash j$	1	2	3	4
1	$R_{ij}=3.90\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$	$R_{ij}=\infty$ $C_{ij}=1\text{nF}$	$R_{ij}=37.69\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$	$R_{ij}=253.43\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$
2	$R_{ij}=1338.70\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$	$R_{ij}=33.22\Omega$ $C_{ij}=1\text{nF}$	$R_{ij}=36.28\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$	$R_{ij}=74.13\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$
3	x	x	$R_{ij}=10\Omega$	$R_{ij}=10\Omega$
4	x	x	$R_{ij}=10\Omega$	$R_{ij}=10\Omega$
5	x	x	$R_{ij}=10\Omega$	$R_{ij}=10\Omega$
6	x	x	$R_{ij}=10\Omega$	$R_{ij}=10\Omega$
7	x	x	$R_{ij}=1626.30\Omega$	$R_{ij}=100.98\Omega$
8	x	X	$R_{ij}=52438.40\Omega$	$R_{ij}=60.34\Omega$

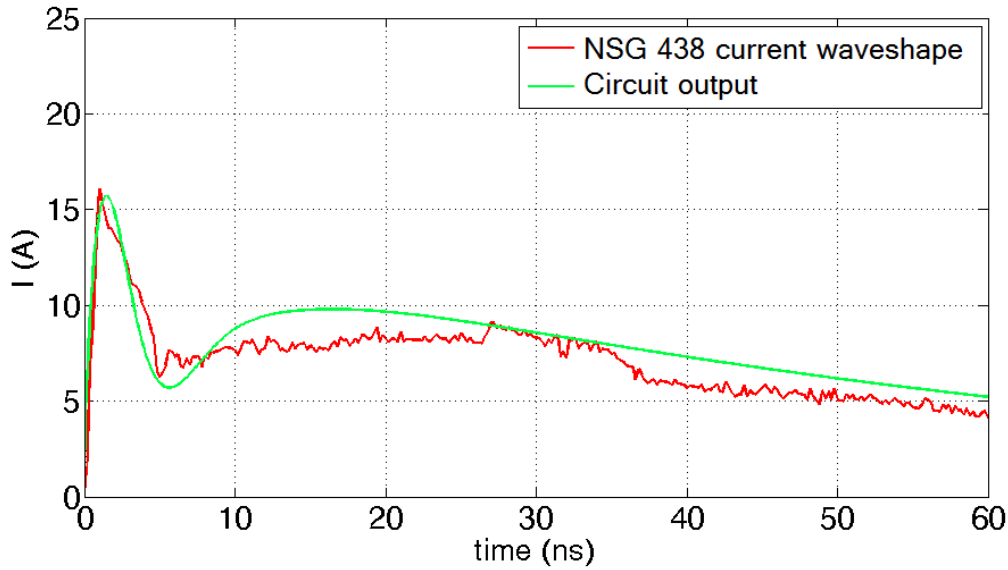
Πίνακας 6.3 Οι τιμές των στοιχείων του δικτύου του Σχήματος 6.6

i \ j	1	2	3
1	$R_{ij}=9.26\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$	$R_{ij}=\infty$ $C_{ij}=1\text{nF}$	$R_{ij}=117.55\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$
2	$R_{ij}=595.59\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$	$R_{ij}=58.85\Omega$ $C_{ij}=1\text{nF}$	$R_{ij}=95.8773\Omega$ $C_{ij}=10\text{pF}$
3	x	X	$R_{ij}=10\Omega$
4	x	X	$R_{ij}=10\Omega$
5	x	X	$R_{ij}=10\Omega$
6	x	X	$R_{ij}=10\Omega$
7	x	X	$R_{ij}=1670.30\Omega$
8	x	x	$R_{ij}=18601.20\Omega$

Στα Σχήματα 6.7 και 6.8, αντίστοιχα, φαίνονται οι έξοδοι των κυκλωμάτων αυτών, όπως προσομοιώθηκαν στο πακέτο λογισμικού Simulink του Matlab. Φαίνεται καθαρά ότι, πρόκειται για δύο μοντέλα που επιτυγχάνουν το στόχο τους, και παράγουν κυματομορφές ρεύματος εξόδου που προσαρμόζονται πολύ καλά στις αντίστοιχες των γεννητριών εκφόρτισης.



Σχήμα 6.7: Τα πειραματικά δεδομένα της γεννήτριας Ditto της EM TEST (Ditto current waveshape), μαζί με την έξοδο του μοντέλου (Circuit output)



Σχήμα 6.8: Τα πειραματικά δεδομένα της γεννήτριας NSG 438 της Schaffner (NSG 438 current waveshape), μαζί με την έξοδο του μοντέλου (Circuit output)

6.2 Κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος του Προτύπου, με παθητικό δίκτυο RC

Η ανάγκη για τη σύνθεση ενός δικτυώματος παραγωγής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με είσοδο την τάση με την οποία φορτίζεται το ανθρώπινο σώμα, ούτως ώστε να την παράξει, είναι το αντικείμενο αυτής της παραγράφου. Η κυματομορφή εξόδου είναι, πάλι, αυτή που ορίζεται από το Πρότυπο [8] και χρησιμοποιήθηκε, ήδη, στην προηγούμενη παράγραφο.

Καθώς, το Πρότυπο ορίζει κυματομορφές με πλάτος ανάλογο της τάσης φόρτισης, και ίδιες στη μορφή, το παρακάτω κύκλωμα που σχεδιάστηκε, μπορεί με μια απλή ρύθμιση της τάσης εισόδου, να δίνει τις προβλεπόμενες αντίστοιχες κυματομορφές ρεύματος.

Για τις ανάγκες αυτής της εφαρμογής αυτής έγινε μια λιγότερο αυστηρή (και άρα πιο ευέλικτη) προσέγγιση από την εξίσωση 6.2, που όπως θα δούμε, δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την επιτυχία της.

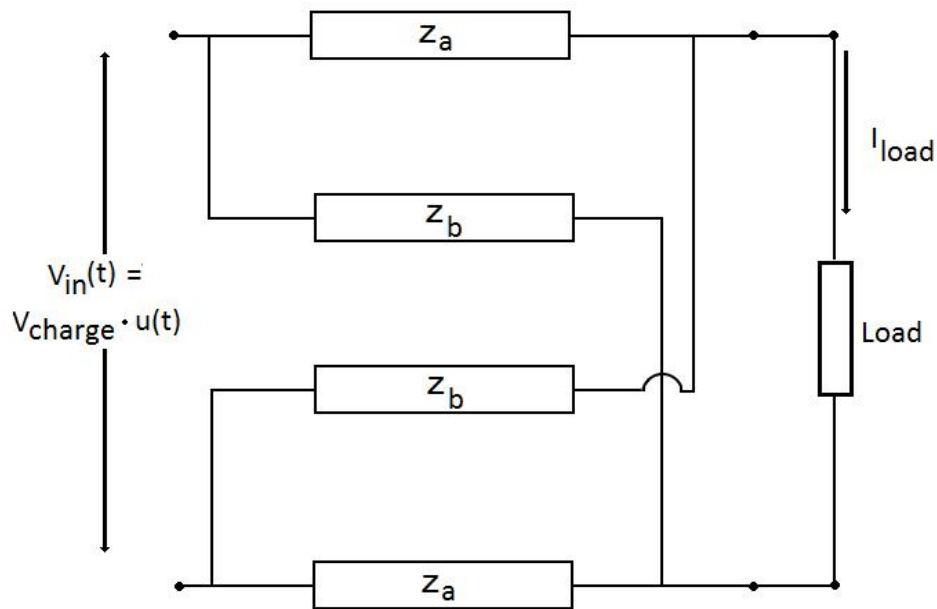
Η προσέγγιση της καμπύλης φαίνεται στην εξίσωση (6.20).

$$Y(s) = 28.8086 \frac{s^2 \cdot 10^{-9} + 0.1449 \cdot s + 0.03124 \cdot 10^9}{(s + 0.9214 \cdot 10^9)(s + 0.5536 \cdot 10^9)(s + 0.1201 \cdot 10^9)(s + 0.025 \cdot 10^9)} \quad (6.20)$$

Για είσοδο βηματική συνάρτηση πλάτους 4000 V και δοκίμιο 2 Ω, και για $s'=s \cdot 10^{-9}$ θα έχουμε τη συνάρτηση μεταφοράς:

$$G(s') = \frac{28.8086}{4000} \frac{s'^3 + 0.1449 \cdot s'^2 + 0.03124 \cdot s'}{(s' + 0.9214)(s' + 0.5536)(s' + 0.1201)(s' + 0.025)} \quad (6.21)$$

Η υλοποίηση που θα πραγματοποιηθεί θα είναι αυτή του συμμετρικού κιγκλιδώματος (symmetrical lattice), όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9: Το συμμετρικό κιγκλιδώμα (symmetrical lattice)

Για την κατασκευή του εν λόγω δικτυώματος ακολουθείται η εξής διαδικασία, που φαίνεται στο [48] και, συνοπτικά, παρουσιάζεται στη συνέχεια:

Έστω ο αριθμητής της συνάρτησης μεταφοράς.

$$\text{Nom}(s') = 0.0072 \cdot [s'^3 + 0.1449 \cdot s'^2 + 0.03124 \cdot s'] \quad (6.22)$$

$$\text{Den}(s') = s'^4 + 1.6201 \cdot s'^3 + 0.7271 \cdot s'^2 + 0.07844 \cdot s' + 0.001531 \quad (6.23)$$

Επιλέγουμε βοηθητικό πολυώνυμο Q , ώστε οι ρίζες του να αλληλοχωρίζονται με αυτές του παρονομαστή, το ακόλουθο:

$$Q(s') = (s' + 0.7)(s' + 0.3)(s' + 0.08)(s' + 0.01) = \quad (6.24)$$

$$s^4+1.09 \cdot s^3+0.3008s^2+0.0197s'+0.000168$$

Έτσι σχηματίζονται οι $z_{12} = \frac{Nom}{Q}$, $z_{11} = \frac{Den}{Q}$

$$(6.25)$$

$$z_{12}(s') = \frac{0.007202 \cdot s'^3 + 0.001044 \cdot s'^2 + 0.000225 \cdot s'}{s'^4 + 1.09 \cdot s'^3 + 0.3008 \cdot s'^2 + 0.0197 \cdot s' + 0.000168}$$

$$z_{11}(s') = \frac{s'^4 + 1.62 \cdot s'^3 + 0.7271 \cdot s'^2 + 0.07844 \cdot s' + 0.001532}{s'^4 + 1.09 \cdot s'^3 + 0.3008 \cdot s'^2 + 0.0197 \cdot s' + 0.000168}$$

$$(6.26)$$

Και αναλύοντας σε απλά κλάσματα:

$$z_{12}(s') = \frac{0.02473}{s'+0.7} - \frac{0.01316}{s'+0.3} + \frac{0.003143}{s'+0.08} - \frac{0.0003074}{s'+0.01}$$

$$(6.27)$$

$$z_{11}(s') = 1 + \frac{0.07414}{s'+0.7} + \frac{0.3055}{s'+0.3} + \frac{0.09205}{s'+0.08} + \frac{0.05841}{s'+0.01}$$

$$(6.28)$$

Συνεπώς, οι Z_a και Z_b προκύπτουν ως εξής:

$$Z_a = z_{11} - z_{12} = 1 + \frac{0.04941}{s'+0.7} + \frac{0.3187}{s'+0.3} + \frac{0.08890}{s'+0.08} + \frac{0.05872}{s'+0.01}$$

$$(6.29)$$

$$Z_b = z_{11} + z_{12} = 1 + \frac{0.09888}{s'+0.7} + \frac{0.2923}{s'+0.3} + \frac{0.09519}{s'+0.08} + \frac{0.05811}{s'+0.01}$$

$$(6.30)$$

Αυτές οι εκφράσεις αντιστάσεων αντιστοιχούν σε απλές παράλληλες συνδεσμολογίες πυκνωτών και αντιστάσεων. Γράφοντας τις παραπάνω εκφράσεις ως άθροισμα της μορφής της εξίσωσης (6.31),

$$Z_i(s') = \frac{1}{C_i \cdot s' + \frac{1}{R_i}}$$

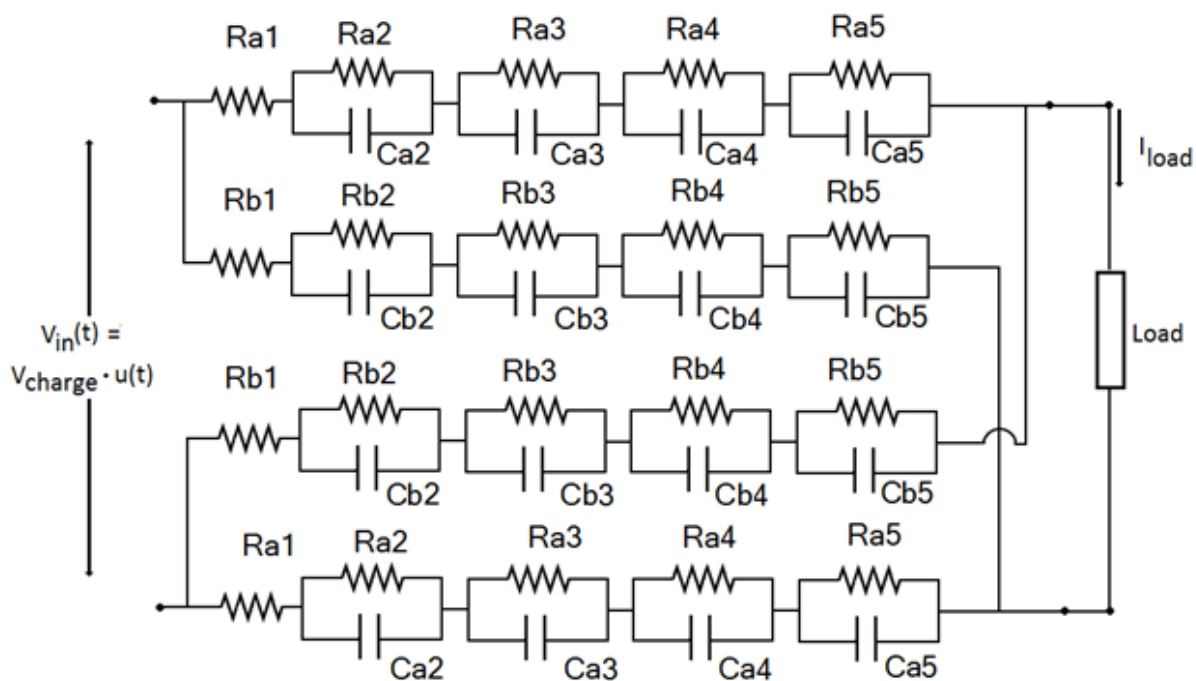
$$(6.31)$$

παραβάλλοντας με τις (6.29) και (6.30), και, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι $s=s'/10^9$, θα έχουμε για τις Z_a , και Z_b τις τιμές που φαίνεται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4 Οι τιμές των στοιχείων του δικτύου του Σχήματος 6.8

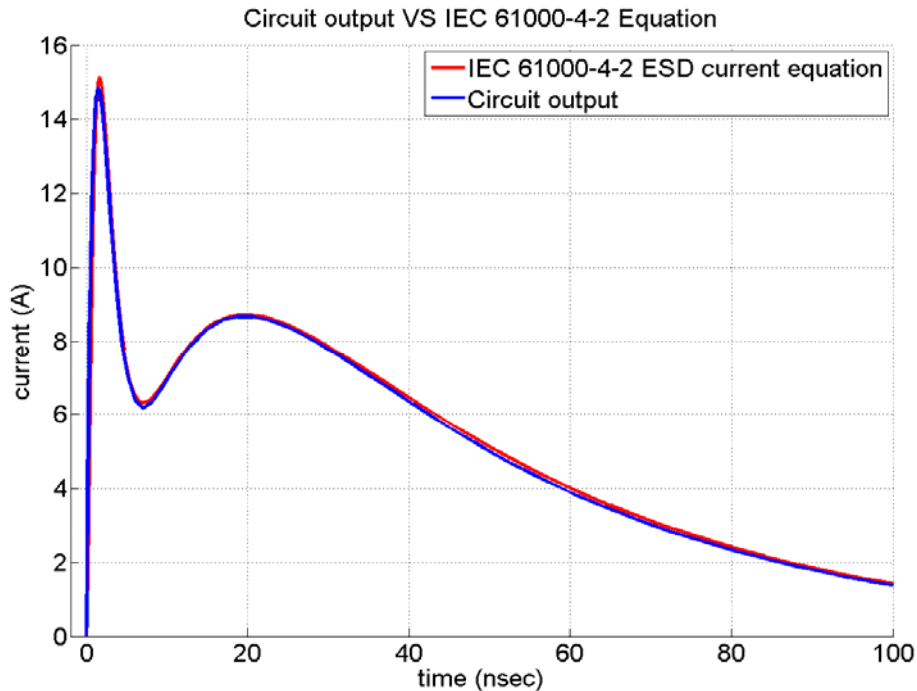
	$i \backslash j$	1	2	3	4	5
$R_{ij} (\Omega)$	a	0.005	$4.41253 \cdot 10^{-4}$	0.05201	0.00565	0.02929
	b	0.005	$6.17943 \cdot 10^{-4}$	0.00498	0.00585	0.02913
$C_{ij} (F)$	a		$3.23753 \cdot 10^{-6}$	$6.40863 \cdot 10^{-7}$	$2.21055 \cdot 10^{-6}$	$3.41481 \cdot 10^{-6}$
	b		$2.31181 \cdot 10^{-6}$	$6.69047 \cdot 10^{-7}$	$2.13632 \cdot 10^{-6}$	$3.43281 \cdot 10^{-6}$
Load (Ω)		2				
$V_{charge} (V)$		4000				

Το δίκτυο, τελικά, θα έχει τη μορφή συμμετρικού κυκλιδώματος (lattice), που φαίνεται στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10: Το παθητικό κύκλωμα που παράγει την κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Η έξοδος του κυκλώματος σε κοινό γράφημα με την προσεγγιζόμενη κυματομορφή του Προτύπου φαίνεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11: Η καμπύλη του Προτύπου για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (IEC 61000-4-2 ESD current equation) μαζί με την έξοδο του παθητικού κυκλώματος (Circuit output) του Σχήματος 6.8

6.3 Κυκλωματικό μοντέλο για την εξίσωση ρεύματος πειραματικών δεδομένων, με παθητικό δίκτυο RLC

Στα προηγούμενα κεφάλαια έχει αναδειχθεί, μέσω των μετρήσεών μας, το ζήτημα της μη καθολικής ισχύος μίας μορφής της καμπύλης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Σε αυτό έχουν συμφωνήσει και άλλοι μελετητές, όπως έχει αναφερθεί.

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν μοντέλα παθητικών κυκλωμάτων που παράγουν τη μορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτή βρέθηκε (διαφορετική) για κάθε μία περίπτωση τάσης φόρτισης (1000 V, 2000 V, 4000 V).

Η προσέγγιση κάθε μιας εκ των ανωτέρω κυματομορφών, έχει γίνει ξεχωριστά, αφού παρουσιάζουν διαφορετικές μορφές.

Οι προσεγγίσεις των καμπυλών αυτών φαίνονται στις εξισώσεις (6.35) έως και (6.37).

Σημειώνεται ότι, στα κυκλώματα που θα υλοποιηθούν, θα εφαρμοστεί βηματική είσοδος, και δεδομένου ότι,

$$Y(s) = G(s) * L\{V_{charge} * u(t)\}, \quad (6.32)$$

όπου $Y(s)$, θεωρείται η έξοδος του προς κατασκευή δικτύου, $G(s)$ η συνάρτηση μεταφοράς, $L\{V_{charge} * u(t)\}$ ο μετασχηματισμός Laplace της βηματικής εισόδου και V_{charge} η τάση φόρτισης $V_{charge} = \{1000 \text{ V}, 2000 \text{ V}, 4000 \text{ V}\}$. Τότε θα είναι,

$$Y(s) = \frac{V_{charge}}{s} G(s) \Leftrightarrow \quad (6.33)$$

$$G(s) = \frac{s}{V_{charge}} Y(s) \quad (6.34)$$

Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προέκυψαν, έτσι, για κάθε μία τάση φόρτισης, φαίνονται στις εξισώσεις (6.35) έως (6.37).

$$G_{1000}(s) = \frac{s}{1000} \cdot \frac{-0.005859s^2 + 3.041s + 6.957}{s^3 + 1.202s^2 + 1.910s + 0.080} \quad (6.35)$$

$$G_{2000}(s) = \frac{s}{2000} \cdot \frac{-0.0023184s^2 - 6.459s + 13.170}{s^3 + 1.263s^2 + 2.131s + 0.068} \quad (6.36)$$

$$G_{4000}(s) = \frac{s}{4000} \cdot \frac{6.567s^3 + 21.530s^2 + 22.650s + 16.910}{s^4 + 2.058s^3 + 2.371s^2 + 1.605s + 0.040} \quad (6.37)$$

Αν γράψουμε τις παραπάνω σχέσεις, στην (πιο εύχρηστη) παραγοντοποιημένη μορφή, θα έχουμε.

$$G_{1000}(s) = \frac{s}{1000} \cdot \frac{-0.005859(s - 521.239)(s + 2.278)}{(s + 0.043)(s^2 + 1.159s + 1.861)} \quad (6.38)$$

$$\text{έστω } K_{1000} = \frac{-0.005859}{1000} \quad (6.39)$$

$$G_{2000}(s) = \frac{s}{2000} \cdot \frac{-0.0023184(s - 2.037)(s + 2787.915)}{(s + 0.032)(s^2 + 1.231s + 2.090)} \quad (6.40)$$

$$\text{έστω } K_{2000} = \frac{-0.0023184}{2000} \quad (6.41)$$

$$G_{4000}(s) = \frac{s}{4000} \cdot \frac{6.567(s + 2.254)(s^2 + 1.024s + 1.142)}{(s + 1.178)(s + 0.026)(s^2 + 0.855s + 1.312)} \quad (6.42)$$

$$\text{έστω } K_{4000} = \frac{6.567}{4000} \quad (6.43)$$

Ή αλλιώς,

$$G_{1000}(s) = g_{1000}^I(s) \cdot g_{1000}^{II}(s) \quad (6.44)$$

$$\text{Όπου } g_{1000}^I(s) = k_{1000}^I \cdot \frac{s - 512.239}{s + 0.043}, \text{ και} \quad (6.45)$$

$$g_{1000}^{II}(s) = k_{1000}^{II} \cdot \frac{s^2 + 2.278 \cdot s}{s^2 + 1.159 \cdot s + 1.861}, \text{ και} \quad (6.46)$$

$$k_{1000}^I \cdot k_{1000}^{II} = K_{1000} \quad (6.47)$$

$$G_{2000}(s) = g_{2000}^I(s) \cdot g_{2000}^{II}(s), \quad (6.48)$$

$$\text{Όπου } g_{2000}^I(s) = k_{2000}^I \cdot \frac{s - 2.037}{s + 0.03269}, \text{ και} \quad (6.49)$$

$$g_{2000}^{II}(s) = k_{2000}^{II} \cdot \frac{s^2 + 2787.915 \cdot s}{s^2 + 1.231 \cdot s + 2.090}, \text{ και} \quad (6.50)$$

$$k_{2000}^I \cdot k_{2000}^{II} = K_{2000} \quad (6.51)$$

$$G_{4000}(s) = g_{4000}^I(s) \cdot g_{4000}^{II}(s) \cdot g_{4000}^{III}(s), \quad (6.52)$$

$$\text{Όπου } g_{4000}^I(s) = k_{4000}^I \cdot \frac{s + 2.254}{s + 1.178}, \text{ και} \quad (6.53)$$

$$g_{4000}^{II}(s) = k_{4000}^{II} \cdot \frac{s}{s + 0.026}, \text{ και} \quad (6.54)$$

$$g_{4000}^{III}(s) = k_{4000}^{III} \cdot \frac{s^2 + 1.024 \cdot s + 1.142}{s^2 + 0.855 \cdot s + 1.312}, \text{ και} \quad (6.55)$$

$$k_{4000}^I \cdot k_{4000}^{II} \cdot k_{4000}^{III} = K_{4000} \quad (6.56)$$

Έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η τάξη της προσέγγισης μικρή, την ίδια στιγμή που θα προσεγγίζει με ικανοποιητικό τρόπο τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι, αν είχε επιλεγεί μια πιο αυστηρή προσέγγιση (μικρότερο “ισοδύναμο μηδέν” [equivalent zero] – βλ. Παράρτημα Π.3), θα είχαν εξαχθεί μεγάλες και δύσχρηστες εκφράσεις για την κρουστική απόκριση, οι οποίες θα δυσχέραιναν τις προσπάθειες κυκλωματικής υλοποίησης που εκτίθενται στο παρόν κεφάλαιο. Οι ανωτέρω προσεγγίσεις, όμως, είναι πολύ καλά προσαρμοσμένες στα πειραματικά δεδομένα, και αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.12.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς $G_i(s) \Big|_{i=\{1000 \text{ V}, 2000 \text{ V}, 4000 \text{ V}\}}$ των εξισώσεων (6.35), (6.36) και (6.37) θα μοντελοποιηθούν ως αλυσωτή σύνδεση των κυκλωμάτων (βαθμίδων), με συναρτήσεις μεταφοράς τις εξισώσεις $g_i^j \Big|_{i=\{1000 \text{ V}, 2000 \text{ V}, 4000 \text{ V}\}, j=\{I, II, III \text{ (για } i=4000 \text{ V)}\}}$.

Η μορφή, που έχουν οι συναρτήσεις g_i^j , παραπέμπει, εύκολα, στην υλοποίησή τους. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κάθε βαθμίδας είναι, πάλι, αυτή του συμμετρικού κικκλιδωτού δικτύου (lattice) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9:

Κάθε βαθμίδα, λοιπόν, θα αντιστοιχεί σε ένα δίθυρο κύκλωμα με κέρδος τάσης

$$K_v = \frac{z_{21} \cdot z_\ell}{\Delta_z + z_{11} \cdot z_\ell} \quad (6.57)$$

όπου z_{11} και z_{21} είναι οι παράμετροι της μήτρας συνθέτων αντιστάσεων $z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$, και

Δ_z η ορίζουσα αυτής. Το φορτίο (z_l) στην περίπτωση μας, είναι καθορισμένο από το [8] και ίσο με $z_l = 2 \Omega$.

Για τις παραμέτρους της μήτρας συνθέτων αντιστάσεων, στη συνδεσμολογία κικκλιδώματος (lattice), ισχύουν, ακόμη, όπως πριν, τα εξής:

$$z_{11} = \frac{Z_a + Z_b}{2} = z_{22} \quad (6.58)$$

$$z_{12} = \frac{Z_b - Z_a}{2} = z_{21} \quad (6.59)$$

όπου Z_a και Z_b είναι οι αντιστάσεις του συμμετρικού κικκλιδώματος (lattice), που φαίνονται στο Σχήμα 6.10, καθώς, επίσης, και ότι

$$Z_a \cdot Z_b = z_l^2 \quad (6.60)$$

Σημειώνεται, επίσης, ότι, κάθε μία βαθμίδα του κυκλώματος θα πρέπει να έχει αντίσταση εισόδου ίση με z_l , δηλαδή θα πρέπει να ισχύει

$$Z_{in} = z_l. \quad (6.61)$$

Για $z_l=2 \Omega$, αντικαθιστώντας τις (6.58) και (6.59) στην (6.60) και χρησιμοποιώντας την (6.61) προκύπτει ότι

$$K_v = \frac{z_{21} \cdot z_\ell}{\Delta_z + z_{11} \cdot z_\ell} = \frac{2 - Z_a}{2 + Z_a} \quad (6.62)$$

$$\text{Αν θέσουμε στην τελευταία } K_v = g \quad (6.63)$$

όπου g , οποιαδήποτε από τις βαθμίδες, με συνάρτηση μεταφοράς g_i^j ,

$i = \{1000, 2000, 4000 \text{ V}\}$ και $j = \{I, II, III\}$,

και λύσουμε ως προς Z_a , τότε λαμβάνουμε

$$Z_a = 2 \cdot \frac{1-g}{1+g} = 2 \cdot \frac{\text{den} - \text{nom}}{\text{den} + \text{nom}} \quad (6.64)$$

όπου με nom , den συμβολίζουμε τον αριθμητή και τον παρονομαστή αντίστοιχα κάθε βαθμίδας, με συνάρτηση μεταφοράς g .

Συνεπώς, από την (6.60) έχουμε ότι

$$Z_b = \frac{4}{Z_a} = 2 \cdot \frac{1+g}{1-g} = 2 \cdot \frac{\text{den} + \text{nom}}{\text{den} - \text{nom}} \quad (6.65)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι, οι σταθερές k_i^j , $i = \{1000, 2000, 4000\}$ και $j = \{I, II, III\}$ που χρησιμοποιήθηκαν ανωτέρω, είναι απαραίτητο να ικανοποιούν κάποιες προϋποθέσεις – περιορισμούς ώστε να είναι υπαρκτή και πραγματοποιήσιμη η υλοποίηση με συνδεσμολογία κινκλιδώματος (lattice).

Ο **πρώτος περιορισμός** είναι ότι, οι συναρτήσεις $Z_a(s)$ και $Z_b(s)$ πρέπει να είναι **θετικές πραγματικές συναρτήσεις** (positive real functions, **p.r.f.**), δηλαδή απαιτείται όπως:

- α. Είναι πραγματικές για s πραγματικό
 - β. $\text{Re}\{Z(s)\} \geq 0$ όταν $\text{Re}\{s\} \geq 0$
- (6.66)

Παράδειγμα I

Στα 1000V, η πρώτη βαθμίδα έχει συνάρτηση μεταφοράς

$$g_{1000}^I(s) = k_{1000}^I \cdot \frac{s-a}{s+b} \text{ με } a = 512.239 \text{ και } b = 0.043 \quad (6.67)$$

συνεπώς, από τη σχέση

$$Z_a = 2 \cdot \frac{1-g}{1+g} = 2 \cdot \frac{\text{den} - \text{nom}}{\text{den} + \text{nom}} \quad (6.68)$$

προκύπτει ότι

$$Z_a^I = 2 \cdot \frac{s \cdot (1 - k_{1000}^I) + b + k_{1000}^I \cdot a}{s \cdot (1 + k_{1000}^I) + b - k_{1000}^I \cdot a} \quad (6.69)$$

Έτσι, οι περιορισμοί που προκύπτουν, προκειμένου η Z_a^I να είναι θετική πραγματική συνάρτηση (**p.r.f.**).

$$1 - k_{1000}^I \geq 0, \quad b - k_{1000}^I \cdot a \geq 0 \quad (6.70)$$

$$\Rightarrow k_{1000}^I \leq \frac{b}{a} \Rightarrow k_{1000}^I \leq 0.000082659 \quad (6.71)$$

Εμείς επιλέξαμε $k_{1000}^I = 8 \cdot 10^{-5}$.

Η τιμή του k_{1000}^II για την Z_a^{II} της δεύτερης βαθμίδας, λοιπόν, επιλέγεται τόση, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη $k_{1000}^I \cdot k_{1000}^II = K_{1000}$ (6.47), οπότε εδώ $k_{1000}^II = 0.146475$.

Με τον ίδιο τρόπο προκύπτουν οι περιορισμοί για τα k_i^j , $i = \{1000, 2000, 4000 \text{ V}\}$ και $j = \{I, II, III\}$.

Για τον πρώτο περιορισμό ισχύουν τα εξής κριτήρια:

Οι συναρτήσεις Z_a^I και Z_a^{II} είναι θετικές πραγματικές, αν και μόνο αν:

α. Είναι πραγματικές για s πραγματικό.

β. Το πολυώνυμο $p = \text{nom}(Z_a^j) + \text{den}(Z_a^j)$ είναι Hurwitz, δηλαδή οι ρίζες του είναι όλες τοποθετημένες στο αριστερό ημιεπίπεδο.

γ. $\text{Re}\{Z(j\omega)\} \geq 0$ για κάθε ω .

(6.72)

Όπου, $\text{nom}(Z_a^j)$ και $\text{den}(Z_a^j)$ ο αριθμητής και ο παρονομαστής της Z_a^j αντίστοιχα.

Παράδειγμα II

Αν πάρουμε την Z_a^I του Παραδείγματος I, τα κριτήρια α, και γ, είναι αυταπόδεικτα, ενώ για το β έχουμε τα εξής:

Έστω η $Z(s) = \text{nom}(Z_a^j) / \text{den}(Z_a^j)$ και έστω το πολυώνυμο $p(s) = \text{nom}(Z_a^j) + \text{den}(Z_a^j)$.

Πράγματι, με απλή αντικατάσταση των τιμών $a = 512.239$, $b = 0.043$ και $k_{1000}^I = 8 \cdot 10^{-5}$

$$\text{στην } Z_a^I = 2 \cdot \frac{s \cdot (1 - k_{1000}^I) + b + k_{1000}^I \cdot a}{s \cdot (1 + k_{1000}^I) + b - k_{1000}^I \cdot a} \text{ προκύπτει ότι } Z_a^I = 2 \cdot \frac{0.99992 \cdot s + 0.0847}{1.00008 \cdot s + 0.0013}$$

και το πολυώνυμο $p(s)$ γίνεται $p(s) = 4 \cdot s + 0.1724$, με ρίζα $s_1 = -0.0431 < 0$, δηλαδή είναι πολυώνυμο Hurwitz. Τα ίδια ισχύουν και για τις συναρτήσεις $Z_x^j |_{j=\{I, II\}, x=\{a, b\}}$.

Ο δεύτερος, κατά σειρά, **περιορισμός** είναι οι συναρτήσεις $Z_a(s)$ και $Z_b(s)$ να είναι **ελάχιστες (minimum functions)**, δηλαδή :

- α. Να μην έχουν πόλους ή μηδενικά επάνω στον φανταστικό άξονα
- β. Να έχουν πεπερασμένες πραγματικές θετικές τιμές στα σημεία $s = 0$ και $s = \infty$
- γ. Σε ένα πεπερασμένο αριθμό συχνοτήτων ω_i , να ισχύει $\text{Re}\{Z_{a,b}(j\omega_i)\} = 0$

Στην περίπτωση που η συνάρτηση Z δεν είναι ελάχιστη (minimum function), μπορούμε να «αφαιρέσουμε» ένα πραγματικό μέρος, ώστε να την καταστήσουμε ελάχιστη συνάρτηση (minimum function). Μια τέτοια διαδικασία παρουσιάζεται στον κώδικά μας, στο Παράρτημα Π.4.

Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται, συγκεντρωτικά, οι τιμές για τα $k_i^j |_{i=\{1000 \text{ V}, 2000 \text{ V}, 4000 \text{ V}\}, j = \{I, II, III \text{ (για } i=4000 \text{ V)}\}}$, που υπολογίσθηκαν, κατά τα ανωτέρω.

Πίνακας 6.5 : Τιμές των σταθερών $k_i^j |_{i=\{1000 \text{ V}, 2000 \text{ V}, 4000 \text{ V}\}, j = \{I, II, III \text{ (για } i=4000 \text{ V)}\}}$

1000 V		2000 V		4000 V		
k_{1000}^I	k_{1000}^{II}	k_{2000}^I	k_{2000}^{II}	k_{4000}^I	k_{4000}^{II}	k_{4000}^{III}
0.000083	0.146475	0.011592	0.0002	0.1	0.5	0.065673

Συνοπτικά, οι βαθμίδες με συνάρτηση της μορφής

$$g_i^j(s) = k_i^j \cdot \frac{s-a}{s+b} k_{4000}^{II} k_{4000}^{II} \quad (6.73)$$

όπως είδαμε και προηγουμένως, καταλήγουν στη μορφή

$$Z_a = 2 \cdot \frac{s \cdot (1 - k_i^j) + b + k_i^j \cdot a}{s \cdot (1 + k_i^j) + b - k_i^j \cdot a} \quad (6.74)$$

ή, ισοδύναμα, στη μορφή

$$Z_a = \frac{s \cdot m + n}{s \cdot m' + n'} = \frac{s \cdot m}{s \cdot m' + n'} + \frac{n}{s \cdot m' + n'} = \frac{s}{\frac{1}{L} + \frac{1}{R} \cdot s} + \frac{1}{C \cdot s + \frac{1}{R}} \quad (6.75)$$

εκ των οποίων ο πρώτος όρος είναι ο παράλληλος συνδυασμός RL και ο δεύτερος είναι ο παράλληλος συνδυασμός RC.

Αντίστοιχα, οι βαθμίδες της (γενικής) μορφής

$$g_i^j(s) = k_i^j \cdot \frac{a \cdot s^2 + b \cdot s + c}{d \cdot s^2 + e \cdot s + f} \quad (6.76)$$

με βάση τη σχέση

$$Z_a = 2 \cdot \frac{1 - g}{1 + g} = 2 \cdot \frac{den - nom}{den + nom} \quad (6.77)$$

καταλήγουν στη γενική μορφή για τη σύνθετη αντίσταση

$$Z_a(s) = 2 \cdot \kappa_i \cdot \frac{(d - k_i^j \cdot a) \cdot s^2 + (e - k_i^j \cdot b) \cdot s + (f - c)}{(d + k_i^j \cdot a) \cdot s^2 + (e + k_i^j \cdot b) \cdot s + (f + c)} \quad (6.78)$$

Η πραγματοποίηση των ελάχιστων αυτών θετικών συναρτήσεων γίνεται με τη μέθοδο Bott-Duffin. Πριν όμως παρουσιαστεί αυτή η μέθοδος σύνθεσης, απαιτείται η γνώση του ακόλουθου θεωρήματος που οφείλεται στον Richards.

Θεώρημα Richards

Εάν η συνάρτηση $Z(s)$ είναι θετική πραγματική, η συνάρτηση

$$R(s) = \frac{k \cdot Z(s) - s \cdot Z(k)}{k \cdot Z(k) - s \cdot Z(s)} \quad (6.79)$$

είναι θετική πραγματική για θετικές τιμές του k και η τάξη της δεν είναι μεγαλύτερη από την τάξη της $Z(s)$.

Από την σχέση (6.79) η $Z(s)$ μπορεί να γραφεί

$$\begin{aligned}
 Z(s) &= \frac{k \cdot Z(k) \cdot R(s) + Z(k) \cdot s}{k + s \cdot R(s)} = \frac{k \cdot Z(k) \cdot R(s)}{k + s \cdot R(s)} + \frac{Z(k) \cdot s}{k + R(s)} = \frac{1}{\frac{1}{Z(k) \cdot R(s)} + \frac{s}{k \cdot Z(k)}} + \frac{1}{\frac{k}{Z(k) \cdot s} + \frac{R(s)}{Z(k)}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{Z(k) \cdot R(s)} + \frac{s}{k \cdot Z(k)}} + \frac{1}{\frac{k}{Z(k) \cdot s} + \frac{R(s)}{Z(k)}} \quad (6.80)
 \end{aligned}$$

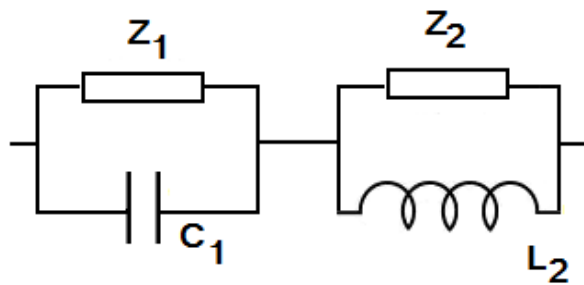
Η σχέση (6.80) αντιστοιχεί σε ένα δίκτυο της μορφής του Σχήματος (6.12) με:

$$Z_1(s) = Z(k)R(s) \quad (6.81)$$

$$Z_2(s) = Z(k)/R(s) \quad (6.82)$$

$$C_1 = 1/[kZ(k)] \quad (6.83)$$

$$L_2 = Z(k)/k \quad (6.84)$$



Σχήμα 6.12: Δομή δικτύου που προκύπτει από το θεώρημα του Richards

Καθώς η $Z(k)$ είναι θετική για θετικά k , και η $R(s)$ είναι θετική πραγματική συνάρτηση, οι συναρτήσεις $Z_1(s)$ και $Z_2(s)$ είναι θετικές πραγματικές. Ο υπολογισμός των $Z_1(s)$, $Z_2(s)$, L_2 και C_1 αρχίζει στο σημείο $s=j\omega_1$, όπου $\text{Re}\{Z(j\omega_1)\} = 0$, οπότε $Z\{j\omega_1\} = jX$, σχέση στην οποία το X μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Εξετάζονται οι δύο περιπτώσεις χωριστά.

α. περίπτωση θετικού X

Από την εξίσωση (6.80) λαμβάνεται

$$Z\{j\omega_1\} = jX = \frac{1}{\frac{1}{Z_1(j\omega_1)} + j\omega_1 \cdot C_1} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega_1 \cdot L_2} + \frac{1}{Z_2 \cdot (j\omega_2)}} \quad (6.85)$$

Μια λύση της σχέσεως (6.85) είναι δυνατή, όταν

$$\frac{1}{Z_1(j\omega_1)} = \infty \quad (6.86)$$

και

$$\frac{1}{Z_2(j\omega_1)} = 0 \quad (6.87)$$

Από τις σχέσεις (6.86), (6.87) προκύπτει ότι η $R(s)$ πρέπει να έχει ένα μηδενικό στο σημείο $s=j\omega_1$. Αυτό απαιτεί την ισχύ της (6.88)

$$kZ(j\omega_1) - j\omega_1 Z(k) = 0 \quad (6.88)$$

Από τη σχέση (6.88) λαμβάνεται

$$Z(j\omega_1)/(j\omega_1) = X/\omega_1 = L_2 = Z(k)/k \quad (6.89)$$

όπου υπάρχει μία μόνο θετική πραγματική τιμή του k , η οποία χρησιμοποιείται εδώ. Γνωρίζοντας το k και το L_2 , οι τιμές των $Z_1(s)$, $Z_2(s)$ και C_1 μπορούν να υπολογισθούν. Η σύνθετη αντίσταση $Z_1(s)$ έχει ένα μηδενικό στο $s = j\omega_1$ ενώ η $Z_2(s)$ έχει ένα πόλο σε αυτό το σημείο. Οι πόλοι των

$1/Z_1(s)$ και $Z_2(s)$ μπορούν να μετακινηθούν με τη χρησιμοποίηση των αναπτύξεων:

$$\frac{1}{Z_1(s)} = \frac{k_1 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{1}{Z_3(s)} \quad (6.90)$$

και

$$Z_2(s) = \frac{k_2 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + Z_4(s) \quad (6.91)$$

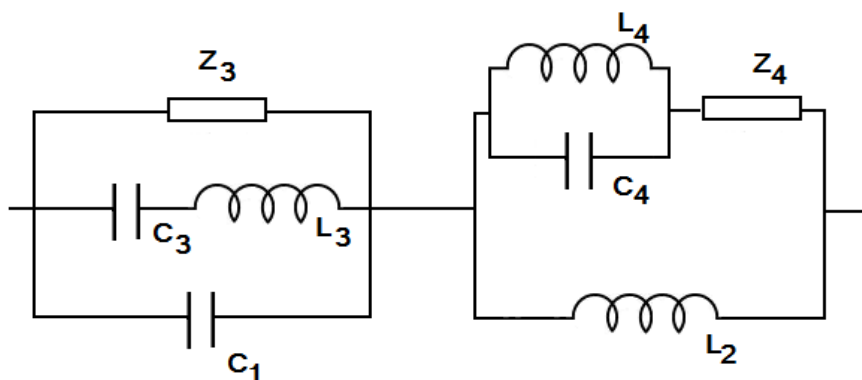
Αυτές οι μετακινήσεις των πόλων αφήνουν τις $Z_3(s)$, $Z_4(s)$ θετικές πραγματικές. Οι τιμές των k_1 και k_2 καθορίζουν τις τιμές των εν σειρά συνδεδεμένων στοιχείων L_3 , C_3 και των εν παραλλήλω συνδεδεμένων στοιχείων L_4 , C_4 , πρβλ. Σχήμα 6.13. Θα είναι:

$$C_3 = k_1 / \omega_1^2 \quad (6.92)$$

$$L_3 = 1/k_1 \quad (6.93)$$

$$C_4 = 1/k_2 \quad (6.94)$$

$$L_4 = k_2/\omega_1^2 \quad (6.95)$$



Σχήμα 6.13: Το δίκτυο που προκύπτει από την μέθοδο Bott και Duffin όταν $X > 0$

Όπως προκύπτει από το θεώρημα του Richards, η $R(s)$ έχει την ίδια τάξη με την $Z(s)$. Από τις σχέσεις (6.90) και (6.91) προκύπτει ότι οι $Z_3(s)$ και $Z_4(s)$ έχουν δύο μηδενικά και δύο πόλους λιγότερους από τη $Z(s)$. Η διαδικασία που περιγράφηκε μπορεί να συνεχισθεί μέχρι την πλήρη σύνθεση του δικτύου.

β. περίπτωση αρνητικού X

Όπως και στην περίπτωση $X > 0$, μία δυνατότητα για την ικανοποίηση της σχέσεως (6.80) είναι η $Z_1(s)$ να έχει πόλο το $s = j\omega_1$ και η $Z_2(s)$ να έχει ένα μηδενικό εκεί. Από τις σχέσεις (6.81) και (6.82) προκύπτει ότι, η $R(s)$ πρέπει να έχει ένα πόλο στο $s = j\omega_1$, οπότε:

$$k Z(k) - j\omega_1 Z(j\omega_1) = 0 \quad (6.96)$$

$$k Z(k) = -\omega_1 X \quad (6.97)$$

Συνεπώς, το $k Z(k)$ είναι πραγματικό και θετικό. Από τη σχέση (6.83) προκύπτει

$$C_1 = -1 / (\omega_1 X) \quad (6.98)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (6.97), για την πραγματική θετική τιμή του k , λαμβάνεται:

$$L_2 = Z(k) / k \quad (6.99)$$

και οι $Z_1(s)$ και $Z_2(s)$ υπολογίζονται. Μετακινώντας τους πόλους των $Z_1(s)$ και $1/Z_2(s)$ που είναι τοποθετημένοι στο σημείο $s = j\omega_1$, έχουμε

$$Z_1(s) = \frac{k_1 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + Z_3(s) \quad (6.100)$$

$$\frac{1}{Z_2(s)} = \frac{k_2 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{1}{Z_4(s)} \quad (6.101)$$

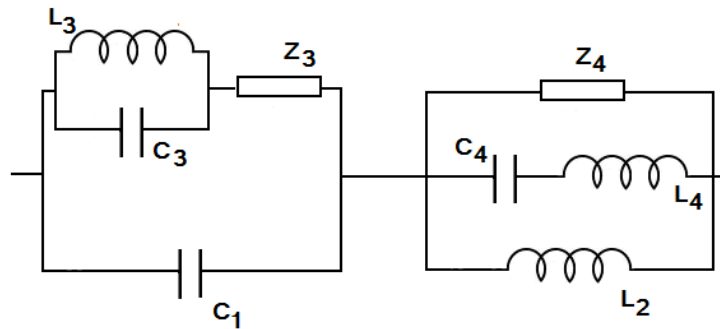
όπου οι $Z_3(s)$ και $Z_4(s)$ είναι θετικές πραγματικές συναρτήσεις. Στο Σχήμα 6.14 φαίνεται το αντίστοιχο του Σχήματος 6.13, για την περίπτωση $X < 0$ όπου

$$C_3 = 1/k_I \quad (6.102)$$

$$L_3 = k_{II} \omega_I^2 \quad (6.103)$$

$$C_4 = k_{2I} \omega_I^2 \quad (6.104)$$

$$L_4 = 1/k_I \quad (6.105)$$



Σχήμα 6.14: Το δίκτυο που προκύπτει από την μέθοδο Bott και Duffin όταν $X < 0$

Όπως και στην περίπτωση $X > 0$, η τάξη των $Z_3(s)$ και $Z_4(s)$ είναι μικρότερη της τάξης της $Z(s)$ και η διαδικασία αυτή μπορεί να συνεχισθεί μέχρι την πλήρη σύνθεση του δικτύου.

Ενδεικτικά, αναφέρουμε την υλοποίηση της βαθμίδας, με συνάρτηση $g_{1000}^{II}(s)$, η οποία είναι η

$$\text{εξής: } g_{1000}^{II}(s) = k_{1000}^{II} \cdot \frac{s^2 + 2.278 \cdot s}{s^2 + 1.159 \cdot s + 1.861} \quad (6.106)$$

$$\text{με } k_{1000}^{II} = 0.146475 < 0.508779$$

που επιτάσσει ο περιορισμός που δόθηκε στον Πίνακα 6.5. Έτσι, η εξίσωση της $Z_a(s)$, που προκύπτει από τη $g_{1000}^{II}(s)$, είναι η

$$Z_{a_{1000}}^{II}(s) = \frac{0.8535 \cdot s^2 + 0.8250 \cdot s + 1.8605}{1.1465 \cdot s^2 + 1.4923 \cdot s + 1.8605} \quad (6.107)$$

η οποία είναι θετική πραγματική συνάρτηση (positive real function), αλλά δεν είναι ελάχιστη (minimum). Για το λόγο αυτό, και προκειμένου να γίνει ελάχιστη και, άρα, να ικανοποιείται ο δεύτερος περιορισμός, αφαιρούμε μία εν σειρά θετική πραγματική ποσότητα (Z_{min}) με τιμή

ίση με αυτή που απαιτείται για να υπάρξει μηδενισμός του $\text{Re}\{Z_a(s)\}$, δηλαδή $\text{Re}\{Z_a(j\omega_1)\}=0$, για κάποια φυσική συχνότητα ω_1 . Με τη χρήση του κώδικα του παραρτήματος Π.4, υπολογίζονται, τόσο η τιμή αυτή της Z_{min} , που πρέπει να αφαιρεθεί, όσο και οι τιμές των στοιχείων που περιγράφονται στη μέθοδο Bott - Duffin, δηλαδή τις τιμές των στοιχείων:

$$C_1 = -1 / (\omega_1 X) \quad (6.108)$$

$$L_2 = Z(k) / k \quad (6.109)$$

$$C_3 = 1 / k_1 \quad (6.110)$$

$$L_3 = k_{1'} \omega_1^2 \quad (6.111)$$

$$C_4 = k_{2'} \omega_1^2 \quad (6.112)$$

$$L_4 = 1 / k_1 \quad (6.113)$$

αλλά και των συνθέτων αντιστάσεων Z_3 και Z_4 του Σχήματος 6.14.

Σημειώνεται εδώ ότι, χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι (6.102) έως και (6.105), για την περίπτωση αρνητικού X (αφού προέκυψε αρνητικό με χρήση του κώδικα του παραρτήματος Π.4). Αρνητικό, μάλιστα, X προέκυψε και για όλες τις περιπτώσεις, στις οποίες χρειάστηκε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο Bott - Duffin.

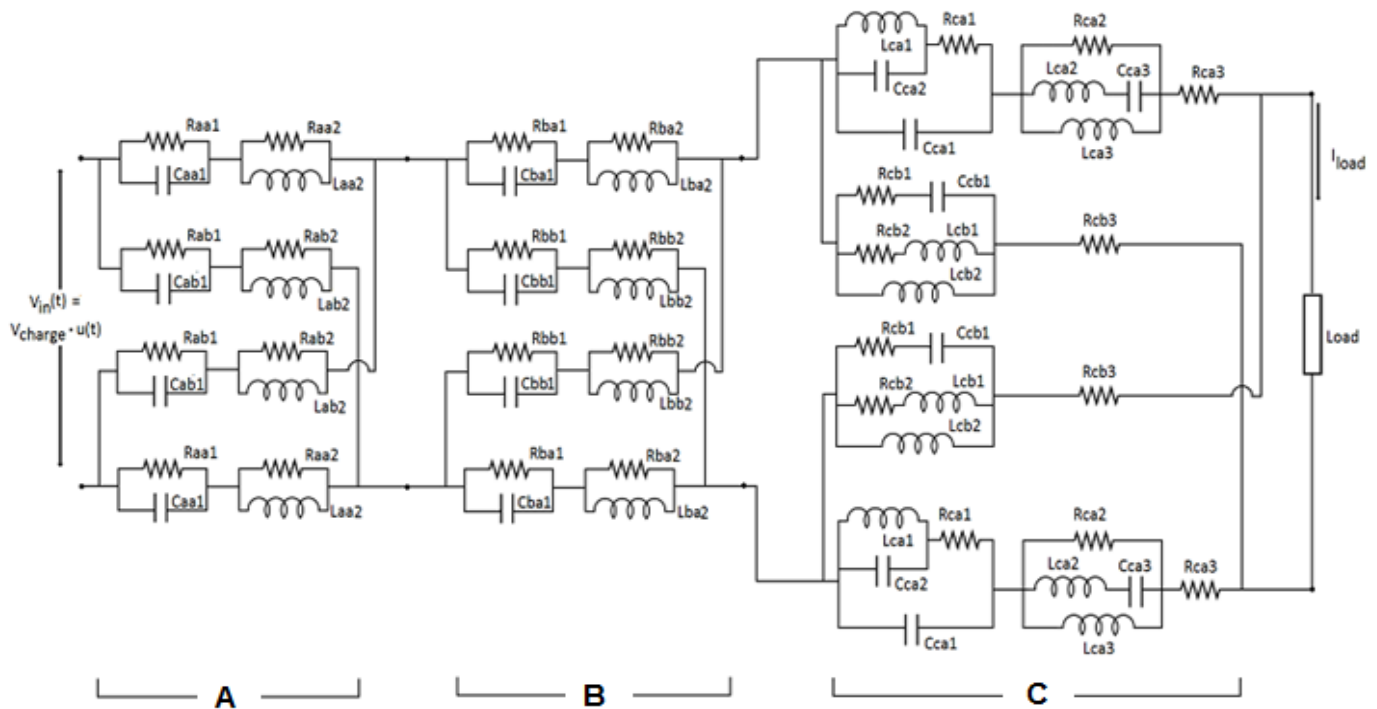
Με ανάλογο τρόπο υλοποιούμε και τη σύνθετη αντίσταση $Z_b(s)$.

Συνοψίζουμε, λοιπόν: με εφαρμογή, όπου χρειάστηκε, είτε του παράλληλου συνδυασμού RC εν σειρά με τον παράλληλο συνδυασμό RL, για τις βαθμίδες με συνάρτηση μεταφοράς της μορφής $g_i^j(s) = k_i^j \cdot \frac{s-a}{s+b}$, είτε της μεθόδου Bott - Duffin, για τις βαθμίδες με συνάρτηση

μεταφοράς της μορφής $g_i^j(s) = k_i^j \cdot \frac{a \cdot s^2 + b \cdot s + c}{d \cdot s^2 + e \cdot s + f}$, σχηματίζουμε τα τελικά μας κύκλωμα

για τα επίπεδα τάσης 1 kV, 2 kV και 4 kV.

Το κύκλωμα



Σχήμα 6.15: Το τελικό κύκλωμα με την αλυσωτή σύνδεση των κυκλιδωτών δικτύων (lattice)

Οι τιμές των στοιχείων του καθενός από τα τρία κυκλώματα που κατασκευάστηκαν (για τάσεις φόρτισης 1000 V, 2000 V, 4000 V) φαίνονται παρακάτω στους Πίνακες 6.6 έως 6.8. Ας σημειωθεί ότι, για τάσεις φόρτισης 1000, και 2000 V δεν υπάρχει η βαθμίδα A, του Σχήματος 6.15, συνεπώς δεν περιέχονται αντίστοιχες τιμές στοιχείων στους πίνακες.

Οι παρακάτω τιμές είναι κανονικοποιημένες για μονάδα χρόνου το 1 s.

Στην §5.5.2 παρουσιάστηκαν οι μέσες κυματομορφές, που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα για τα τρία επίπεδα τάσης (1, 2 και 4 kV). Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζονται σε κοινά γραφήματα τα αποτελέσματα (κυματομορφές) του κυκλώματος του σχήματος 6.15 και των πειραματικών δεδομένων για τα τρία επίπεδα τάσης.

Πίνακας 6.6: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος παραγωγής της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, για τάση φόρτισης 1000 V.

1000 V		Z_a			Z_b		
		1	2	3	1	2	3
A	R_a (Ω)						
	L_a (H)						
	C_a (F)						
B	R_b (Ω)	121.974	1.999		0.033	2.000	
	L_b (H)		$1.438 \cdot 10^{-6}$			$2.360 \cdot 10^{-8}$	
	C_b (F)	$5.897 \cdot 10^{-9}$			$3.601 \cdot 10^{-7}$		
C	R_c (Ω)	0.984	0.472	1.017	0.686	161.028	2
	L_c (H)	$6.182 \cdot 10^{-10}$	$3.208 \cdot 10^{-10}$	$1.231 \cdot 10^{-9}$	$7.070 \cdot 10^{-8}$	$7.170 \cdot 10^{-10}$	
	C_c (F)	$2.659 \cdot 10^{-9}$	$6.909 \cdot 10^{-10}$	$1.332 \cdot 10^{-9}$	$6.390 \cdot 10^{-10}$		

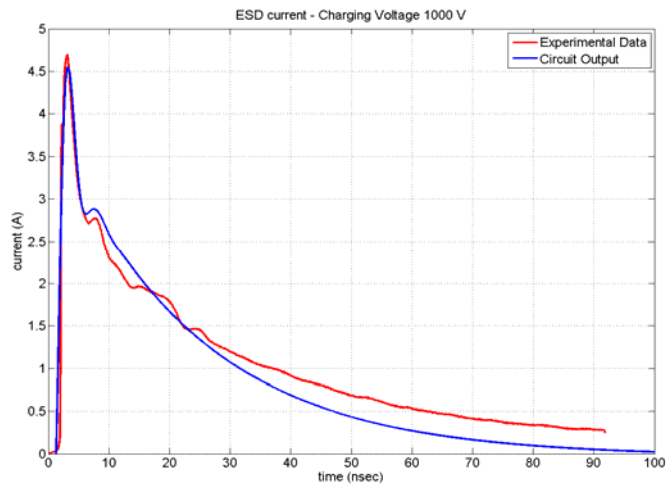
Πίνακας 6.7: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος παραγωγής της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, για τάση φόρτισης 2000 V.

2000 V		Z_a			Z_b		
		1	2	3	1	2	3
A	R_a (Ω)						
	L_a (H)						
	C_a (F)						
B	R_b (Ω)	12.409	1.954		0.322	2.046	
	L_b (H)		$2.178 \cdot 10^{-7}$			$3.590 \cdot 10^{-8}$	
	C_b (F)	$8.984 \cdot 10^{-9}$			$5.450 \cdot 10^{-8}$		
C	R_c (Ω)	1.249	1.244	0.753	0.001	3.318	2.000
	L_c (H)	$1.067 \cdot 10^{-9}$	$8.396 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1.190 \cdot 10^{-12}$	$1.070 \cdot 10^{-9}$	
	C_c (F)	$1.927 \cdot 10^{-6}$	$4.484 \cdot 10^{-10}$	$6.860 \cdot 10^{-10}$	$4.482 \cdot 10^{-10}$		

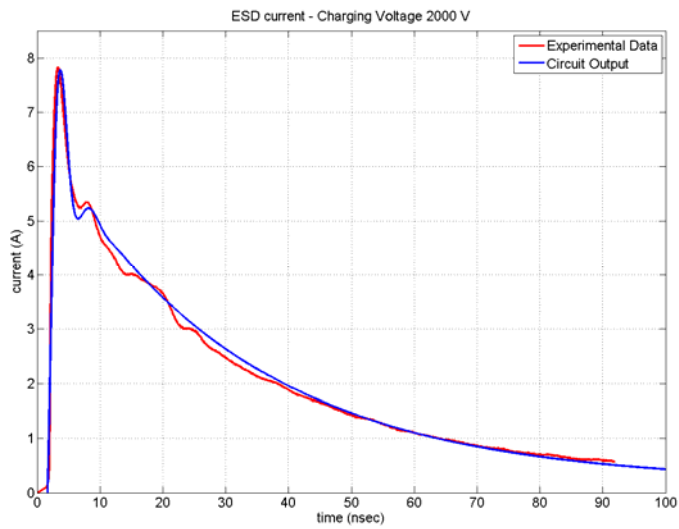
Πίνακας 6.8: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος παραγωγής της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, για τάση φόρτισης 4000 V.

4000 V		Z_a			Z_b		
		1	2	3	1	2	3
A	R_a (Ω)	1.358	1.636		2.946	2.444	
	L_a (H)		$1.283 \cdot 10^{-9}$			$2.310 \cdot 10^{-9}$	
	C_a (F)	$5.774 \cdot 10^{-10}$			$3.210 \cdot 10^{-10}$		
B	R_b (Ω)	2	0.667		2.000	6.000	
	L_b (H)		$3.855 \cdot 10^{-8}$			$1.160 \cdot 10^{-7}$	
	C_b (F)	$2.891 \cdot 10^{-8}$			$9.640 \cdot 10^{-9}$		
C	R_c (Ω)	0.008	0.051	1.702	0.039	0.366	2.242
	L_c (H)	$4.701 \cdot 10^{-11}$	$5.418 \cdot 10^{-11}$	$1.646 \cdot 10^{-10}$	$1.698 \cdot 10^{-10}$	$6.307 \cdot 10^{-11}$	
	C_c (F)	$3.937 \cdot 10^{-8}$	$1.296 \cdot 10^{-8}$	$1.124 \cdot 10^{-8}$	$1.197 \cdot 10^{-8}$		

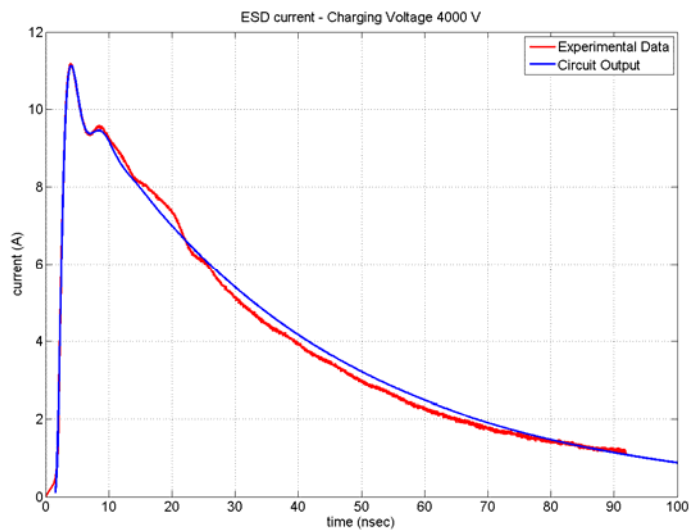
a)



b)



c)



Σχήμα 6.16: Οι παραγόμενες καμπύλες ρεύματος από τα σχεδιασθέντα κυκλώματα, για τάσεις φόρτισης a) 1000 V, b) 2000 V και c) 4000 V

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια ώστε, κυκλώματα μικρής τάξης να προσεγγίσουν, με επιτυχία, τις καμπύλες των πειραματικών δεδομένων. Ήταν, δηλαδή, συνειδητή επιλογή να σχεδιασθούν κυκλώματα τέτοια, που να “στοχεύουν” στο πρώτο και δεύτερο τοπικό μέγιστο, παρά το γεγονός ότι, τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν ενδιαφέρουσα συμπεριφορά και πέρα από αυτές τις περιοχές. Βασικά, πάντως, είναι αυτά τα δύο στοιχεία, που καθορίζουν τη συμπεριφορά της καμπύλης και η βέλτιστη προσέγγισή τους ήταν ο βασικός μας στόχος. Για συστήματα μικρής τάξης, όπως αυτά που υλοποιήθηκαν, η μέθοδος, που προτείνεται, αποδεικνύεται ιδιαίτερος αποδοτική και, επιπλέον, προσαρμόζεται πολύ καλά στα πειραματικά δεδομένα.

7.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με το επικίνδυνο, κυρίως για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι προτυποποιήσεις του φαινομένου έχουν κάνει ορισμένα βήματα για την ερμηνεία και τον ορισμό χαρακτηριστικών μεγεθών του, τέτοια, όμως, που δεν είναι σε θέση να το περιγράψουν με μέγιστη ακρίβεια και δεν είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα, που προκύπτουν από διάφορες ερευνητικές εργασίες, τα οποία, όμως, είναι, και αυτά, αποσπασματικά. Ας σημειωθεί ότι η, κατά διαστήματα, επικαιροποίηση του Προτύπου IEC 61000-4-2 έχει να κάνει, μόνο, με το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το Πρότυπο προτείνει και ένα απλοποιημένο κύκλωμα για την παραγωγή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο δεν είναι σε θέση, όμως, να παράγει μια τόσο εξεζητημένη κυματομορφή.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν υπάρξει προσπάθειες να παρουσιασθούν μετρήσεις πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου σε γειωμένο μέταλλο, εκείνες, ακριβώς, που ενδιαφέρουν περισσότερο. Πολλές αποσπασματικές πληροφορίες συνθέτουν ένα ικανό πλαίσιο αμφισβήτησης των ορισμών του Προτύπου, αλλά λείπει μια πλήρης παρουσίαση μετρήσεων σε διάφορα επίπεδα τάσης. Μία άλλη παράμετρος, που υπεισέρχεται σε αυτήν τη διαδικασία, είναι η αξιολόγηση του μετρητικού εξοπλισμού και, τελικά, της ποιότητας των ίδιων των μετρήσεων, που παρουσιάζονται.

Έχουν γίνει προσπάθειες να προταθούν κυκλώματα προσομοίωσης του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τα κυκλώματα των εμπορικών γεννητριών, όμως, συμμορφώνονται με το Πρότυπο και όχι με τα ευρήματα των ερευνητών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και, επίσης, δεν είναι διαθέσιμα στην επιστημονική κοινότητα. Εξ άλλου, τα κυκλώματα αυτά είναι στο σύνολό τους κατασκευασμένα με τη μέθοδο δοκιμής και βελτίωσης, (μέχρι να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα), ενώ δεν έχει προταθεί μια ευθεία μέθοδος, ώστε να σχεδιάζεται ένα κύκλωμα με αναφορά στην επιθυμητή έξοδο.

Η πρόταση για μαθηματική έκφραση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βελτιώθηκε, ώστε να μπορεί να προσαρμοσθεί πάνω σε πραγματικές μετρήσεις, οι οποίες έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της διατριβής.

Έγιναν εκτεταμένες σειρές μετρήσεων σε πολλές δεκάδες ανθρώπινα σώματα και τέσσερα επίπεδα τάσης φόρτισης, ώστε να αποκτηθεί συνολική εικόνα της συμπεριφοράς και της συσχέτισης παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με την τάση φόρτισης. Χρησιμοποιήθηκε υψηλής ποιότητας γρήγορος παλμογράφος. Εκτός αυτού, ελέγχθηκε πειραματικώς, η επίδραση της ταχύτητας προσέγγισης του φορτισμένου σώματος στο γειωμένο στόχο, επί του μήκους του τόξου και επί των παραμέτρων του ρεύματος.

Μελετήθηκε η μορφή της καμπύλης του ρεύματος εκφόρτισης και εξήχθησαν συμπεράσματα για την ερμηνεία των τιμών και των συμπεριφορών των εμπλεκόμενων παραμέτρων, αλλά και την αδυναμία του Προτύπου να περιγράψει σωστά το φαινόμενο.

Με αφετηρία τα μετρητικά μας δεδομένα, σχεδιάστηκαν κυκλώματα με παθητικά στοιχεία, που μπορούν να παράξουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η διαδικασία αυτή έγινε με μεθόδους σύνθεσης δικτύων και όχι με δοκιμές. Τα κυκλώματα προσομοιώθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον και αξιολογήθηκε η συμπεριφορά τους.

Έγινε, επίσης, η σχεδίαση κυκλωμάτων, με αναφορά στην εξίσωση του Προτύπου, αλλά, και του παραγομένου από εμπορικές γεννήτριες ρεύμα εκφόρτισης.

Επιπλέον, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της αξιολόγησης της ποιότητας των μετρήσεων και προτάθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία, για την αξιολόγηση των μετρήσεων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

7.2 Συμβολή - Πρωτοτυπία της διατριβής

Η διατριβή εστίασε στο μέγεθος του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγεται από ένα ανθρώπινο σώμα σε ένα πραγματικό περιστατικό ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς της καμπύλης του ρεύματος, που έχει γίνει στο παρελθόν, μειονεκτεί, διότι είχε γίνει με τρόπο αποσπασματικό και με μη εξελιγμένο εξοπλισμό, μη ικανό να αποκαλύψει και να φωτίσει τις λιγότερο γνωστές πτυχές του φαινομένου. Ως εκ τούτου, οι θεσπίσεις μεγεθών, παραμέτρων και τιμών σχετικών με παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που περιλαμβάνονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2:2009, είναι θεωρητικές και πολύ πιο

χαλαρές, από αυτές που αναδεικνύονται από πειράματα βασικής έρευνας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

- Μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σε μεγάλο αριθμό ανθρωπίνων σωμάτων, με παλμογράφο 16 GHz. Νέα ευρήματα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις με μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτές, όμως, ενέπλεξαν λίγα ανθρώπινα σώματα, και, έτσι, δεν μπορούσαν να λάβουν υπ' όψη τους τις μεγάλες αποκλίσεις, που μπορεί να προκύψουν μεταξύ των διαφόρων ανθρώπων. Επιπλέον, οι περισσότερες μετρήσεις διεξήχθησαν με παλμογράφους περιορισμένου εύρους ζώνης, με κάποιες εξαιρέσεις, κατά τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν δύο παλμογράφοι εύρους ζώνης 6 GHz και 12 GHz, αντιστοίχως. Έτσι, η εικόνα που παρουσιαζόταν για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ήταν παραμορφωμένη.

Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιήθηκαν 75 ανθρώπινα σώματα, και ένας παλμογράφος μεγάλου εύρους ζώνης (16 GHz). Προστέθηκαν, έτσι, πολύ σημαντικές πληροφορίες, για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η μορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δεν είναι μία και ενιαία αλλά διαφοροποιείται, ανάλογα με την τάση φόρτισης. Οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων είναι διαφορετικές από αυτές του Προτύπου. Φαίνεται ότι, ο χρόνος ανόδου μπορεί να λάβει εξαιρετικά χαμηλές τιμές, για μικρές τάσεις φόρτισης: διεπιστώθησαν χρόνοι ανόδου μικρότεροι, ακόμα και από ευρήματα άλλων ερευνητών.

Διαπιστώθηκε ότι, η κυματομορφή του ρεύματος “διαστέλλεται” στο πεδίο του χρόνου, με την αύξηση της τάσης φόρτισης.

- Μετρήσεις ρεύματος και τόξου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Υπάρχουν ορισμένες δημοσιεύσεις για την επίδραση της ταχύτητας προσέγγισης, του φορτισμένου ανθρώπου στη γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, επί του μήκους του τόξου και επί των χαρακτηριστικών παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: στην παρούσα διατριβή διερευνήθηκε η διακύμανση των τιμών των παραμέτρων του ρεύματος σε συνάρτηση με την ταχύτητα της προσέγγισης, με εφαρμογή δύο διαφορετικών ταχυτήτων προσέγγισης.

Κατά τη διάρκεια των σχετικών πειραματικών διαδικασιών, μελετήθηκε, ιδιαίτερα, η παράμετρος “δεύτερο μέγιστο”, τόσο κατά ην τιμή του, όσο και κατά τη χρονική στιγμή

εμφάνισής του, καθώς και η σχέση της τιμής του με την τιμή του πρώτου μεγίστου. Η σχέση αυτή είναι, άλλωστε, ενδεικτική και του βαθμού αλλοίωσης της μορφής της καμπύλης του ρεύματος εκφόρτισης, με την αλλαγή της τάσης φόρτισης.

- Βελτίωση των παραμέτρων της εξίσωσης του Προτύπου, ώστε αυτή να περιγράφει πιστά την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.

Η μαθηματική εξίσωση, η οποία περιλαμβάνεται για πρώτη φορά σε έκδοση του Προτύπου, περιγράφει την πρότυπη κυματομορφή, όπως αυτή ορίζεται στο ίδιο. Είναι γνωστό, όμως, ότι, η καμπύλη αυτή είναι αρκετά διαφορετική από τα πειραματικά δεδομένα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου-μετάλλου. Αυτό συμβαίνει ακόμα και για τάση φόρτισης 2 kV, στην οποία η καμπύλη ρεύματος είναι πιο «κοντά» σε αυτήν που ορίζεται από το Πρότυπο· αρκετά διαφορετική, όμως, παρά ταύτα. Γι' αυτήν την τάση φόρτισης, εφαρμόστηκαν μέθοδοι για την προσαρμογή μαθηματικής εξίσωσης της μορφής του Προτύπου σε πειραματικά δεδομένα. Ως πλέον αποτελεσματική μέθοδος, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, ανεδείχθη ο Γενετικός Αλγόριθμος. Μάλιστα, ο αλγόριθμος αυτός έπρεπε να τροποποιηθεί κατά συγκεκριμένο τρόπο, ώστε να γίνει ιδιαίτερος αποδοτικός. Μ' αυτόν τον τρόπο, εξήχθη μια έκφραση πολύ πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα.

- Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εύρεση αναλυτικών εκφράσεων για το ρεύμα εκφόρτισης.

Η μαθηματική έκφραση του Προτύπου για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι μια πολύπλοκη σχέση, που δεν αντιστοιχεί σε γραμμικό δίκτυο. Στην παρούσα διατριβή, αναπτύχθηκε αριθμητική μέθοδος, που προσεγγίζει δεδομένο σύνολο τιμών ως άθροισμα εκθετικών συναρτήσεων. Η αρχική μεθοδολογία, που χρησιμοποιήθηκε, ήταν η μέθοδος Prony. Στην παρούσα διατριβή, όμως, αναπτύχθηκε, και χρησιμοποιείται, πλέον, μια μεθοδολογία πολύ διαφορετική από τη μέθοδο Prony, διατηρούσα αυτήν μόνον ως αρχική αναφορά. Με τη βοήθεια της μεθόδου αυτής προσδιορίστηκαν μαθηματικές εκφράσεις, για διάφορα σύνολα τιμών αναφοράς, και χρήσιμες μαθηματικές εκφράσεις, οι οποίες είναι, μάλιστα, άμεσα αξιοποιήσιμες, στη σχεδίαση κυκλωμάτων παραγωγής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

- Σχεδίαση κυκλωμάτων παραγωγής ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η αναντιστοιχία του απλοποιημένου κυκλώματος του Προτύπου, για την παραγωγή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με την απαιτούμενη έξοδο (πρότυπη καμπύλη ρεύματος εκφόρτισης), είναι ευρέως γνωστή. Η σχεδίαση κυκλωμάτων, που προτείνεται στην παρούσα διατριβή, αντιστοιχεί σ' ένα ευθύ αλγόριθμο, με διαδοχικά βήματα και όχι με τη μέθοδο «δοκιμή και διόρθωση». Με πρώτο βήμα την εύρεση μαθηματικών εκφράσεων, που αντιστοιχούν σε κρουστικές αποκρίσεις γραμμικών δικτύων, στην οποία, ήδη, αναφερθήκαμε, επιλέγονται συγκεκριμένες μεθοδολογίες, για την κατασκευή ενεργών, αλλά και παθητικών κυκλωμάτων. Τα κυκλώματα αυτά σχεδιάζονται για μια σειρά από εφαρμογές (κύκλωμα που παράγει την εξίσωση του Προτύπου και την απόκριση εμπορικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων), μεταξύ των οποίων ξεχωρίζει η σύνθεση παθητικών κυκλωμάτων που παράγουν ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτό που καταγράφηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Η σύνθεση παθητικών δικτύων έγινε με τη χρήση κανόνων της Σύνθεσης Δικτύων, με τρόπο ώστε να μην εμπλέκονται χειροκίνητοι διακόπτες, ή μη γραμμικά στοιχεία, γεγονός που αποτελεί καινοτομία, σε σύγκριση με τα, μέχρι τώρα, δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

7.3 Η επόμενη μέρα

Εν όψει μιας μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας, που θα επεκτείνει τις μεθοδολογίες και τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι μετρήσεις μας ελήφθησαν με ένα πολύ «γρήγορο» παλμογράφο, με εύρος ζώνης 16 GHz και χρόνο ανόδου (rise time) (10%-90%) 29 ps (real time). Αυτή η τιμή, όπως επισημάνθηκε και στην παρούσα εργασία, είναι κοντά στο χρόνο ανόδου που παρουσιάζει το σήμα μας, κυρίως υπό χαμηλές τάσεις φόρτισης (500 ή 1000 Volt). Συνεπώς, η μέτρησή μας σε αυτή την περιοχή τιμών έχει το χαρακτήρα «κάτω ορίου», όταν οι τιμές που μετρώνται είναι περίπου 29 ps ή μικρότερες. Σε επόμενη εργασία θα πρέπει να ληφθεί ξεχωριστή μέριμνα για την ιδιαίτερα απαιτητική μέτρηση του χρόνου ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης. Μία προσέγγιση του χρόνου ανόδου, όταν γίνεται χρήση παλμογράφου με χρόνο ανόδου ίσο ή λίγο διαφορετικό από αυτόν του σήματός μας, μπορεί να γίνει με τη βοήθεια

μαθηματικής ανάλυσης. Σε κάθε περίπτωση, όμως, αυτή η διαδικασία συνεπάγεται σφάλμα, το οποίο, μάλιστα, αυξάνει όσο ο χρόνος ανόδου του πραγματικού σήματος γίνεται μικρότερος από αυτόν του παλμογράφου. Η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος είναι η χρήση ενός παλμογράφου, με ακόμη μεγαλύτερο εύρος συχνότητας (πάνω από 25 GHz), ο οποίος θα μπορεί με ασφάλεια να μετρήσει χρόνους μερικών ps.

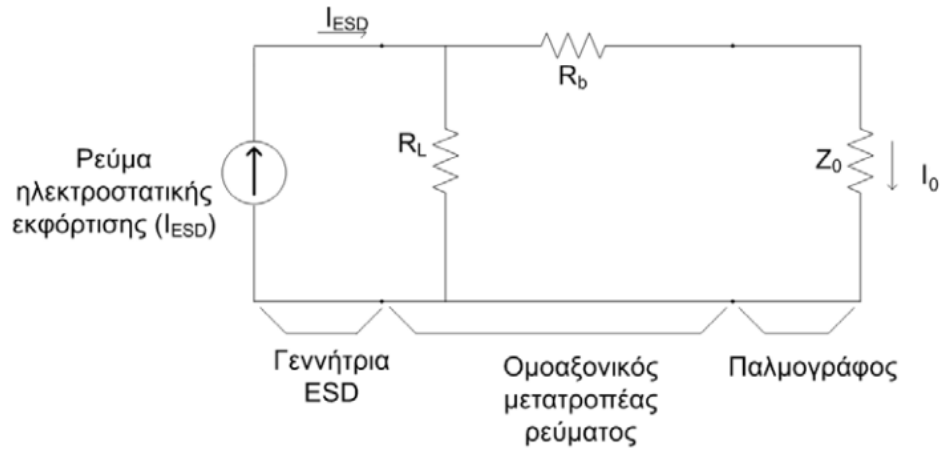
- Ακριβέστερες και πιο συστηματικά διερευνητικές μετρήσεις μπορούν να ληφθούν στο μέλλον, με τη χρήση μηχανισμού ελέγχου της ταχύτητας προσέγγισης και ακρίβειας της στόχευσης: αυτό το ρόλο θα μπορούσε να παίξει, ενδεχομένως, ένας ρομποτικός βραχίονας.
- Περαιτέρω επέκταση της επεξεργασίας των μετρήσεων, θα μπορούσε να αποτελέσει ο υπολογισμός του φορτίου $\left(\int i(t) \cdot dt\right)$ και της ειδικής ενέργειας του ρεύματος $\left(\int i^2(t) \cdot dt\right)$ ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που εγγέεται από τον άνθρωπο στην αφόρτιση συσκευή, καθώς και η χάραξη γραφημάτων συσχέτισης των ανωτέρω φυσικών ποσοτήτων έναντι της τάσης φόρτισης και της ταχύτητας προσέγγισης.
- Στη σχεδίαση των κυκλωμάτων μας έχουμε, στην ουσία, δύο βαθμίδες από όμοια κυκλώματα, για την προσομοίωση του ρεύματος, υπό τάσεις φόρτισης 1000 και 2000 Volt και τρεις (βαθμίδες), για την περίπτωση τάσης φόρτισης 4000 Volt. Μια, ενδεχόμενη, επέκταση της κυκλωματικής σχεδίασης θα ήταν, η εφαρμογή μίας μεθόδου σχεδίασης, απολήγουσας σε μία κοινή μορφή, για όλα τα κυκλώματα, όπου να απαιτείται, απλώς, η αλλαγή των τιμών των στοιχείων, για την προσομοίωση των τριών διαφορετικών καμπυλών ρεύματος (αντιστοίχων των τριών επιπέδων της τάσης φόρτισης). Τούτο θα διευκόλυνε ιδιαίτερα τόσο την προσομοίωση, όσο και τις προσπάθειες υλοποίησης με πραγματικά στοιχεία.
- Σε μελλοντική ερευνητική εργασία θα πρέπει, επίσης, να γίνουν σειρές μετρήσεων σε ανθρώπινα σώματα, σχετικές με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται κατά τα περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισής τους. Κάποια αρχική προτυποποίηση των τιμών των μεγεθών αυτών θα ήταν καθοριστικής συμβολής στη σχεδίαση και προσομοίωση γεννητριών ηλεκτροστατικής φόρτισης, νέας

γενιάς, ικανών να προσομοιώνουν το φυσικό φαινόμενο με μεγαλύτερη ακρίβεια, απ' όσο οι τώρα διαθέσιμες. Σε μία τέτοια περίπτωση, κυκλώματα, όπως αυτά που προτάθηκαν στην παρούσα εργασία, θα μπορούσαν να προσομοιωθούν στο χώρο, ώστε να βρεθεί εκείνη η στερεά μορφή, που προσεγγίζει το ρεύμα και το πεδίο των πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - γειωμένου μετάλλου.

- Μια συστηματική μελέτη διαφορετικών (καθ' ύψος και βάρος) τύπων σωμάτων ανθρώπων, θα μπορούσε να αποκαλύψει την επίδραση των σωματομετρικών χαρακτηριστικών στις παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης: τα χαρακτηριστικά των μαθηματικών προσεγγίσεων (πόλοι - μηδενικά) μπορούν να συσχετισθούν με τα ως άνω σωματομετρικά χαρακτηριστικά των εκφορτιζομένων ανθρώπων.

Π.1 Σχόλιο για τον υπολογισμό του ρεύματος

Κυκλωματικά, η μετρητική διάταξη μας φαίνεται στο Σχήμα Π.1.



Σχήμα Π.1: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης [37]

$$I_{ESD} = \frac{C \cdot V_{out}}{Z_0} \quad (\pi.1)$$

$$C = C_{CT} \cdot C_A \quad (\pi.2)$$

$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_B + Z_0}{R_L} \quad (\pi.3)$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις, I_{ESD} είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης, V_{out} η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση εξαιτίας του ρεύματος I_0 , C είναι ένας συντελεστής μετατροπής, ενώ C_{CT} και C_A είναι οι συντελεστές μετατροπής του ομοαξονικού προσαρμοστή και του καλωδίου με εξασθένηση, αντίστοιχα. Η αντίσταση φόρτισης R_L είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού ηλεκτροδίου (δίσκου) και του εξωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και λαμβάνεται ίση με 2 Ω. Η R_b είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και λαμβάνεται ίση με 50 Ω. Από την εξίσωση (π.3) υπολογίζεται η τιμή του C_{CT} ίση προς 50.

Δεδομένου ότι, $C_A=10$ και $Z_0=50$ Ω, προκύπτει ότι, 1 V στον παλμογράφο αντιστοιχεί σε ρεύμα εκφόρτισης 10 A.

Π.2 Κώδικας Matlab, για την επεξεργασία των δεδομένων από πραγματικές εκφορτίσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου

Π.2.1 Ο παρακάτω κώδικας επεξεργάζεται το πλήθος των αρχείων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανά άνθρωπο, και δημιουργεί αρχεία ρεύματος εκφόρτισης, για κάθε άνθρωπο που εκφορτίσθηκε.

```
close all;
% clear all;
clc;
str00=['*****
*****'];
disp(str00);
% Function ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI returns an array of
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(1)=I maximum
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(2)=Rise Time
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(3)=I 10
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(4)=I 30
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(5)=0
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(6)=Typical zero
% ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI(7)=index of Typical zero

%=====INITIALISATIONS=====
=====

%----- SELECT THE FILES YOU WANT TO LOAD-----
-----
STRING_WHOLE_NAME='C1AAT_177_84_22_39_1000_00005';
%--Put the last file name of tests concerning the person

%--under spesific voltage you want to process e.g.

%--C1A8K_174_74_22_39_2000_00005

STRING_NAME=STRING_WHOLE_NAME(1:length(String_Whole_Name)-1);
%--This is the first part of the path. NO index!

%-----SELECT NUMBER OF FILES MINUS ONE!!!-----
-----
PERSON_TESTS_VOLTAGE_min1=str2num(String_Whole_Name(length(String_Whole_
Name))); %--This is the index!

%--- Negative value of variable CURVE_TO_IGNORE, means NO CURVE IS
IGNORED,
%--- Positive value means, THIS CURVE IS IGNORED!
%--- WARNING! THIS MUST BE SET FOR EVERY RUN!!!!!!!!!! ---
-----
CURVE_TO_IGNORE=[-1];
```

```

disp(STRING_NAME);
disp('**** Did you set the "CURVE_TO_IGNORE" parameter right? ****
'); disp(CURVE_TO_IGNORE );
disp('*****
');

i=0;
j=1;
skip_i=0;
ALL_DATA=[];
FLAG=0;
SKIP_FLAG=0;
RISE_TIME_FLAG=0;
=====
=====

while i<=PERSON_TESTS_VOLTAGE_min1

    % --- If desired, CERTAIN TEST CURVES can be left aside -----
    -----
        for j=1:length(CURVE_TO_IGNORE)
            if (CURVE_TO_IGNORE(j)-1)==i
                i=i+1;
                SKIP_FLAG=1;
                FLAG=1;
            end
        end
    end

    % -----
    -----

    if SKIP_FLAG==1 && i>PERSON_TESTS_VOLTAGE_min1
        break;
    elseif (SKIP_FLAG==1 && i<=PERSON_TESTS_VOLTAGE_min1) ||
(SKIP_FLAG==0)

string1='C:\Users\PAVLOS\Desktop\REAL_ESD_EXPERIMENTS_04_2010\';
    string2=STRING_NAME;
    string3=int2str(i);
    string4='.dat';
    str=[string1 string2 string3 string4];
    TEMP_DATA=load (str, 'v1');
    ALL_DATA=[ALL_DATA TEMP_DATA];
    SKIP_FLAG=0;

    i=i+1;
end
end

%----- INITIALISATION -----
-----

ROWS=size(ALL_DATA,1);
COLUMNS=size(ALL_DATA,2);
TESTS=COLUMNS/2;
FACTOR=10;
TIME_FACTOR=1e+9;
STEP=(ALL_DATA(3,1)-ALL_DATA(2,1))*TIME_FACTOR;
min_time_average=-20; % nsec
max_time_average=120; % nsec
ALL_PARAMETERS=[];

```

```

sprintf(' Ipeak, RISE TIME, I 60 , I 30 , I 10 ,
Typical zero, Index of typical zero');

%----- TIME SHIFT, PARAMETER CALCULATION -----
%-----
%(SINCE "i" is one less than the actual index,
% i=i+1 command from the previous block has left it right, so "k" can
run
% from 1 to i)
for k=1:2:COLUMNS
    % Here the parameters of every run are calculated and put in the big
    % matrix ALL_DATA. Time shift here too.
    ALL_DATA(:,k)=ALL_DATA(:,k)*TIME_FACTOR;
    ALL_DATA(:,k+1)=ALL_DATA(:,k+1)*FACTOR;

    parameters=ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI([ALL_DATA(:,k)
ALL_DATA(:,k+1)]);
    %--Rise time check! If Tr>2 then the second peak MAY BE bigger than
the first!-----
    if parameters(2)>2
        RISE_TIME_FLAG=1;
    end
    %-----
-----

    ALL_PARAMETERS=[ALL_PARAMETERS parameters'];

    %--- THE VALUE "10%*I max" OF ALL THE CURVES ARE PUT TOGETHER-----
-----!
    %--- (parameters(8) is "TIME 10 %")
    ALL_DATA(:,k)=ALL_DATA(:,k)-(parameters(8));

    %-- If you want to print the parameters while running, Ctrl+T the
following-----
    %    sprintf('%10.6f,',parameters)

    % Find the smaller time at which all curves have values
    if min(ALL_DATA(:,k))>min_time_average
        min_time_average=min(ALL_DATA(:,k));
    end

    % Find the biggest time at which all curves have values
    if max(ALL_DATA(:,k))<max_time_average
        max_time_average=max(ALL_DATA(:,k));
    end

end
%-----Mikro ftiaksimo tou xronou arxis-----
-----
min_time_average=min_time_average+20*STEP;

```

```

%----- MEAN DATASET CALCULATION -----
%-----
i=1;
for tab=min_time_average:STEP:max_time_average
    % Find the TIME element (i,COLUMNS+1) of mean curve -----
    AVERAGE(i,1)=tab;
    % Find the CURRENT element (i,COLUMNS+2) of mean curve -----
    SUM=0;
    for m=1:2:COLUMNS
        SUM=SUM+Y_VALUE(tab,ALL_DATA(:,m),ALL_DATA(:,m+1));
    end
    AVERAGE(i,2)=SUM/TESTS;
    i=i+1;
end

parameters_average=ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI([AVERAGE(:,1)
AVERAGE(:,2)]);

%-- If you want to print the parameters while running, Ctrl+T the
following-----
%    sprintf('*****PARAMETROI
AVERAGE*****')
%    sprintf('%10.6f,',parameters_average)

%----- PLOT of datasets -----
%-----

for i=1:2:COLUMNS

    plot(ALL_DATA(:,i),ALL_DATA(:,i+1), '-.r','Color', [rand/2+0.5 rand
rand]);hold on;
end
xlabel ('time (ns)');
ylabel ('I (A)');
plot(AVERAGE(:,1),AVERAGE(:,2), '-.k', 'LineWidth',1.7);
grid;
axis auto;

%----- SELECT THE APPROPRIATE LEGEND -----
%-----
LegendString=[];
for i=1:(COLUMNS+2)/2
    LegendString=[LegendString; int2str(i) '^o'];
end
legend(LegendString);
%----- SELECT TITLE-----
%-----

if FLAG==0;
    title([string2 ' * Curve number ' int2str((COLUMNS+2)/2) ' is
the AVERAGE curve *']);
elseif FLAG==1;
    title([string2 ' * Curve number ' int2str((COLUMNS+2)/2)
' is the AVERAGE curve * ' * Curve(s) (originally) numbered: '
int2str(CURVE_TO_IGNORE) ' was/were ignored! **' ]);
end

%----- SAVE FIGURE -----
%-----
saveas(gcf,[string2 '.tiff'])
saveas(gcf,[string2 '.fig'])

```

```

%-----The vectors "parametroi_x"-----
%-----contain the elements [Ip rise_time amplitude_30ns
amplitude_60ns amplitude_10ns T_0 FLAG]-----
ALL_PARAMETERS=ALL_PARAMETERS';
ROWS_PARAMETERS=size(ALL_PARAMETERS,1);
COLUMNS_PARAMETERS=size(ALL_PARAMETERS,2);

for i=1:COLUMNS_PARAMETERS-2
    AVERAGE_VALUES=mean(ALL_PARAMETERS(1:ROWS_PARAMETERS,i));
    STD_DEVIATION=std(ALL_PARAMETERS(1:ROWS_PARAMETERS,i));
    UNCERTAINTY_TYPE_A=STD_DEVIATION/sqrt(ROWS_PARAMETERS);
    RELATIVE_UNCERTAINTY_TYPE_A=UNCERTAINTY_TYPE_A/AVERAGE_VALUES;

    ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+1,i)=AVERAGE_VALUES;
    ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+2,i)=STD_DEVIATION;
    ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+3,i)=UNCERTAINTY_TYPE_A;
    ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+4,i)=RELATIVE_UNCERTAINTY_TYPE_A;

end

%===== At this point the program warns us. If the rise
time is too big, probably the second =====
%=====peak i s greater. However, it is not very safe.
Control by eyeball needed.=====
if RISE_TIME_FLAG==1
    disp('***CHECK FOR SECOND PEAK BEING BIGGER THAN THE FIRST!***');
end
%===== EYEBALL
CHECK=====
=
GREATER_PEAK=input('PLEASE ENTER WHICH LOCAL PEAK IS GREATER. FIRST AT
ALL CURVES (1) OR OTHER AT ONE CURVE (0)? >');
while (GREATER_PEAK~=0)&&(GREATER_PEAK~=1)
    GREATER_PEAK=input('***WRONG CHOICE - CHOOSE AGAIN - 1 or 0 ***');
end

ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+5,:)=GREATER_PEAK;

for d=1:length(CURVE_TO_IGNORE)
    ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+6,d)=CURVE_TO_IGNORE(d);
end

save([string2 '_PARAMETERS.txt'], 'ALL_PARAMETERS', '-ASCII')
save([string2 '_AVRG_CURVE_PARAM.txt'], 'parameters_average', '-ASCII')

disp(ALL_PARAMETERS(1:ROWS_PARAMETERS,:));

disp('-----
');disp('Average');disp('Std_Dev');disp('UNCERT_A');disp('Rel_UNCERT_A')
;disp('-----');disp('GREATER PEAK. 1: THE FIRST 0: OTHER');disp('-----
');disp('CURVE_TO_IGNORE line');disp('-----
');

disp(ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+1:ROWS_PARAMETERS+6,:));

```



```

%          | *GREATER_PEAK          GREATER_PEAK
GREATER_PEAK    GREATER_PEAK    GREATER_PEAK
GREATER_PEAK    GREATER_PEAK    GREATER_PEAK |
% -----|-----
-----|-----
%          | **CURVE_TO_IGNORE(1)  CURVE_TO_IGNORE(2)
CURVE_TO_IGNORE(3)  CURVE_TO_IGNORE(4)  CURVE_TO_IGNORE(5)
CURVE_TO_IGNORE(6)  ..          ..          |
%          ---
---
%
% * i) If the first peak is the greater peak then
ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+5,:) = [ones]
% ii) if some other local peak is the greater than the first then
ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+5,:) = [zeros]
% At case ii), the RISE TIME has no natural meaning!
% ** If no curves are ignored, then
ALL_PARAMETERS(ROWS_PARAMETERS+6,:) = [-1 zeros];

% 2.
%
% In the file
"C:\Users\PAVLOS\Desktop\REAL_ESD_EXPERIMENTS_04_2010\C1xxx_xxx_xx_xx_xx
_xx00_0000_AVRG_CURVE_PARAM"
% A matrix of the following form is saved:
%
% Imax          Tr          I 30          I 60          I 10
ZERO          ZERO index      T I 10%

```

Π.2.2 Ο παρακάτω κώδικας επεξεργάζεται το πλήθος αρχείων ρεύματος, όλων των ανθρώπων, για τις διάφορες τάσεις, στις οποίες φορτίστηκαν, και εξάγει τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του. Δημιουργούνται, επίσης, γραφήματα ενδεικτικά της συσχέτισης των μεγεθών αυτών με την τάση φόρτισης.

```

close all;
clear all;
clc;
disp('*****
*****');

%----- INITIALIZATION -----
-
N=309;
N_start=24;

cd
C:\Users\PAVLOS\Desktop\REAL_ESD_EXPERIMENTS_04_2010\PARAMETERS_FOLDER
files = dir('*.txt');
for i=1:length(files)
eval(['load ' files(i).name ' -ascii']);
end
% files =
% 317x1 struct array with fields:
% name
% date
% bytes

```



```

%      isdir
%      datenum
% -----
% files(i).name: is the string of characters containing the names
% of the files
TEMP_NAME_START=files(1).name(1:18);
i=1; % is the index of the recording
k=1; % is the index of the person
j=1; % is the index of the voltage level
m=1; % is the index of the name string
counter=0; % is the number of underscores in the name string

while i<=N

    TEMPORARY=load (files(i).name, 'v1');
    SIZES=size(TEMPORARY); % SIZES=n x m

    if TEMP_NAME_START==files(i).name(1:18)

%----Charging voltage finder-----
for m=1:length(files(i).name)
    if files(i).name(m)=='_'
        counter=counter+1;
        if counter==5
            INDEX=m;
        end
    end
end
end
%-----
counter=0;

%----HEIGHT finder-----
for m=1:length(files(i).name)
    if files(i).name(m)=='_'
        counter=counter+1;
        if counter==1
            INDEX_H=m;
        end
    end
end
end
%-----
counter=0;

%----WEIGHT finder-----
for m=1:length(files(i).name)
    if files(i).name(m)=='_'
        counter=counter+1;
        if counter==2
            INDEX_W=m;
        end
    end
end
end
%-----
counter=0;

```

```

%---TEMPERATURE finder-----
for m=1:length(files(i).name)
    if files(i).name(m)=='_'
        counter=counter+1;
        if counter==3
            INDEX_T=m;
        end
    end
end
end
%-----
counter=0;

%---HUMIDITY finder-----
for m=1:length(files(i).name)
    if files(i).name(m)=='_'
        counter=counter+1;
        if counter==4
            INDEX_Hum=m;
        end
    end
end
end
%-----
counter=0;

%--Abscissa values-----
-----
CHARGE_VOLTAGE(k,j)=str2num(files(i).name((INDEX+1):(INDEX+4)));

HEIGHT(k)=str2num(files(i).name((INDEX_H+1):(INDEX_W-1)));
WEIGHT(k)=str2num(files(i).name((INDEX_W+1):(INDEX_T-1)));
TEMPERATURE(k)=str2num(files(i).name((INDEX_T+1):(INDEX_Hum-
1)));
HUMIDITY(k)=str2num(files(i).name((INDEX_Hum+1):(INDEX_Hum+2)));

BMI=WEIGHT./((HEIGHT/100).^2);

%--Ordinate values-----
-----
%-- PEAK CURRENT -----
AVR_MAX_CURRENT(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-5), 1); % ((SIZES(1)-
5),1) is the
% position of
the Imax
% average in
the matrix
MAX_MAX_CURRENT(k,j)=max(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 1));
%-- REL_UNCERTAINTY_A Peak current ---
REL_UNCERTAINTY_A_PEAK_CURRENT(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-2), 1);

%-- RISE TIME -----
AVR_RISE_TIME(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-5), 2);
MAX_RISE_TIME(k,j)=max(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 2));
MIN_RISE_TIME(k,j)=min(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 2));
%-- REL_UNCERTAINTY_A RISE TIME ---
REL_UNCERTAINTY_A_Tr(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-2), 2);

```

```

%-- I 30 -----
AVR_CURRENT_30(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-5), 3);
MAX_CURRENT_30(k,j)=max(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 3));
MIN_CURRENT_30(k,j)=min(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 3));
%-- REL_UNCERTAINTY_A I 30 ---
REL_UNCERTAINTY_A_I30(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-2), 3);

%-- I 60 -----
AVR_CURRENT_60(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-5), 4);
MAX_CURRENT_60(k,j)=max(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 4));
MIN_CURRENT_60(k,j)=min(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 4));
%-- REL_UNCERTAINTY_A I 60 ---
REL_UNCERTAINTY_A_I60(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-2), 4);

%-- I 10 -----
AVR_CURRENT_10(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-5), 5);
MAX_CURRENT_10(k,j)=max(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 5));
MIN_CURRENT_10(k,j)=min(TEMPORARY(1:(SIZES(1)-6), 5));
%-- REL_UNCERTAINTY_A I 10 ---
REL_UNCERTAINTY_A_I10(k,j)=TEMPORARY((SIZES(1)-2), 5);

        j=j+1;
        i=i+1;
else
        k=k+1;
        j=1;
        TEMP_NAME_START=files(i).name(1:18);
end
end

n1=1;
n2=1;
n3=1;
n4=1;
n5=1;

for i=1:length(AVR_MAX_CURRENT)
    for j=1:min(size(AVR_MAX_CURRENT))
        if CHARGE_VOLTAGE(i,j)==500
            ATTRIBUTES(1).HEIGHT(n1)=HEIGHT(i);
            ATTRIBUTES(1).WEIGHT(n1)=WEIGHT(i);
            ATTRIBUTES(1).TEMPERATURE(n1)=TEMPERATURE(i);
            ATTRIBUTES(1).HUMIDITY(n1)=HUMIDITY(i);
            ATTRIBUTES(1).BMI(n1)=BMI(i);
            ATTRIBUTES(1).AvrMaxCURRENT(n1)=AVR_MAX_CURRENT(i,j);
            ATTRIBUTES(1).AVR_CURRENT_30(n1)=AVR_CURRENT_30(i,j);
            ATTRIBUTES(1).AVR_CURRENT_60(n1)=AVR_CURRENT_60(i,j);
            ATTRIBUTES(1).AVR_CURRENT_10(n1)=AVR_CURRENT_10(i,j);
            ATTRIBUTES(1).AVR_RISE_TIME(n1)=AVR_RISE_TIME(i,j);
            n1=n1+1;

elseif CHARGE_VOLTAGE(i,j)==1000
            ATTRIBUTES(2).HEIGHT(n2)=HEIGHT(i);
            ATTRIBUTES(2).WEIGHT(n2)=WEIGHT(i);
            ATTRIBUTES(2).TEMPERATURE(n2)=TEMPERATURE(i);
            ATTRIBUTES(2).HUMIDITY(n2)=HUMIDITY(i);
            ATTRIBUTES(2).BMI(n2)=BMI(i);
            ATTRIBUTES(2).AvrMaxCURRENT(n2)=AVR_MAX_CURRENT(i,j);
            ATTRIBUTES(2).AVR_CURRENT_30(n2)=AVR_CURRENT_30(i,j);
            ATTRIBUTES(2).AVR_CURRENT_60(n2)=AVR_CURRENT_60(i,j);

```

```

ATTRIBUTES(2).AVR_CURRENT_10(n2)=AVR_CURRENT_10(i,j);
ATTRIBUTES(2).AVR_RISE_TIME(n2)=AVR_RISE_TIME(i,j);
n2=n2+1;

elseif CHARGE_VOLTAGE(i,j)==2000
ATTRIBUTES(3).HEIGHT(n3)=HEIGHT(i);
ATTRIBUTES(3).WEIGHT(n3)=WEIGHT(i);
ATTRIBUTES(3).TEMPERATURE(n3)=TEMPERATURE(i);
ATTRIBUTES(3).HUMIDITY(n3)=HUMIDITY(i);
ATTRIBUTES(3).BMI(n3)=BMI(i);
ATTRIBUTES(3).AvrMaxCURRENT(n3)=AVR_MAX_CURRENT(i,j);
ATTRIBUTES(3).AVR_CURRENT_30(n3)=AVR_CURRENT_30(i,j);
ATTRIBUTES(3).AVR_CURRENT_60(n3)=AVR_CURRENT_60(i,j);
ATTRIBUTES(3).AVR_CURRENT_10(n3)=AVR_CURRENT_10(i,j);
ATTRIBUTES(3).AVR_RISE_TIME(n3)=AVR_RISE_TIME(i,j);
n3=n3+1;

elseif CHARGE_VOLTAGE(i,j)==4000
ATTRIBUTES(4).HEIGHT(n4)=HEIGHT(i);
ATTRIBUTES(4).WEIGHT(n4)=WEIGHT(i);
ATTRIBUTES(4).TEMPERATURE(n4)=TEMPERATURE(i);
ATTRIBUTES(4).HUMIDITY(n4)=HUMIDITY(i);
ATTRIBUTES(4).BMI(n4)=BMI(i);
ATTRIBUTES(4).AvrMaxCURRENT(n4)=AVR_MAX_CURRENT(i,j);
ATTRIBUTES(4).AVR_CURRENT_30(n4)=AVR_CURRENT_30(i,j);
ATTRIBUTES(4).AVR_CURRENT_60(n4)=AVR_CURRENT_60(i,j);
ATTRIBUTES(4).AVR_CURRENT_10(n4)=AVR_CURRENT_10(i,j);
ATTRIBUTES(4).AVR_RISE_TIME(n4)=AVR_RISE_TIME(i,j);
n4=n4+1;

elseif CHARGE_VOLTAGE(i,j)==8000
ATTRIBUTES(5).HEIGHT(n5)=HEIGHT(i);
ATTRIBUTES(5).WEIGHT(n5)=WEIGHT(i);
ATTRIBUTES(5).TEMPERATURE(n5)=TEMPERATURE(i);
ATTRIBUTES(5).HUMIDITY(n5)=HUMIDITY(i);
ATTRIBUTES(5).BMI(n5)=BMI(i);
ATTRIBUTES(5).AvrMaxCURRENT(n5)=AVR_MAX_CURRENT(i,j);
ATTRIBUTES(5).AVR_CURRENT_30(n5)=AVR_CURRENT_30(i,j);
ATTRIBUTES(5).AVR_CURRENT_60(n5)=AVR_CURRENT_60(i,j);
ATTRIBUTES(5).AVR_CURRENT_10(n5)=AVR_CURRENT_10(i,j);
ATTRIBUTES(5).AVR_RISE_TIME(n5)=AVR_RISE_TIME(i,j);
n5=n5+1;
end
end
end
voltage=[500 1000 2000 4000 8000];

% ===== FIGURES =====
figure(1) %--- AVERAGE MAX CURRENT -----
-----
TEMP_Y=0;
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
AVR_MAX_CURRENT(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5 rand
rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end

%-----
ROW_COLUMN=size(AVR_MAX_CURRENT);

```

```

i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(AVR_MAX_CURRENT(:,i));
end
MEAN_CURVE= sum(AVR_MAX_CURRENT)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*-k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;

% templ=MEAN_CURVE_PLOT(AVR_MAX_CURRENT);
% plot(voltages,templ, '*-k', 'LineWidth',3)
axis auto;
string='AVERAGE__OF_PEAK_CURRENTS_Vs_CHARGING_VOLTAGE';
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('CURRENT (A)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(2) %--- UNCERTAINTY AVERAGE MAX CURRENT -----
%-----
for i=1:k
NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
REL_UNCERTAINTY_A_PEAK_CURRENT(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color',
[rand/2+0.5 rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(REL_UNCERTAINTY_A_PEAK_CURRENT);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(REL_UNCERTAINTY_A_PEAK_CURRENT(:,i));
end
MEAN_CURVE=
sum(REL_UNCERTAINTY_A_PEAK_CURRENT)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*-k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='UNCERTAINTY__OF_PEAK_CURRENT_Vs_CHARGING_VOLTAGE';
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('(%)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(3) %--- MAX MAX CURRENT -----
%-----
for i=1:k
NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
MAX_MAX_CURRENT(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5 rand
rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(MAX_MAX_CURRENT);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(MAX_MAX_CURRENT(:,i));

```

```

end
MEAN_CURVE= sum(MAX_MAX_CURRENT)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*--k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='MAXIMUM__OF_PEAK_CURRENTS_Vs_CHARGING_VOLTAGE'
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('CURRENT (A)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(4) %--- RISE TIME -----
%-----
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
AVR_RISE_TIME(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5 rand
rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(AVR_RISE_TIME);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(AVR_RISE_TIME(:,i));
end
MEAN_CURVE= sum(AVR_RISE_TIME)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*--k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='AVERAGE__OF_RISE_TIME_Vs_CHARGING_VOLTAGE'
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('RISE TIME (nsec)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(5) %--- UNCERTAINTY AVERAGE RISE TIME -----
%-----
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
REL_UNCERTAINTY_A_Tr(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5
rand rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(REL_UNCERTAINTY_A_Tr);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(REL_UNCERTAINTY_A_Tr(:,i));
end
MEAN_CURVE= sum(REL_UNCERTAINTY_A_Tr)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*--k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='UNCERTAINTY__OF_RISE_TIME_Vs_CHARGING_VOLTAGE';
title(string);

```

```

xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('(%)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(6) %--- AVR I_30 -----
-----
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
AVR_CURRENT_30(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5 rand
rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(AVR_CURRENT_30);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(AVR_CURRENT_30(:,i));
end
MEAN_CURVE= sum(AVR_CURRENT_30)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*-k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='AVERAGE__OF_I_30_CURRENTS_Vs_CHARGING_VOLTAGE'
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('CURRENT (A)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(7) %--- UNCERTAINTY AVERAGE CURRENT I 30 -----
-----
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
REL_UNCERTAINTY_A_I30(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5
rand rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(REL_UNCERTAINTY_A_I30);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(REL_UNCERTAINTY_A_I30(:,i));
end
MEAN_CURVE= sum(REL_UNCERTAINTY_A_I30)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*-k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='UNCERTAINTY__OF_CURRENT_I_30_Vs_CHARGING_VOLTAGE';
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('(%)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(8) %--- AVR I_60 -----
-----
for i=1:k

```

```

        NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
        plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
AVR_CURRENT_60(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5 rand
rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
    end
    %-----
    ROW_COLUMN=size(AVR_CURRENT_60);
    i=1;
    for i=1:ROW_COLUMN(2)
        length_of_columns(i)=nnz(AVR_CURRENT_60(:,i));
    end
    MEAN_CURVE= sum(AVR_CURRENT_60)./length_of_columns;
    plot(voltages,MEAN_CURVE,'*--k', 'LineWidth',3.5)
    %-----
    grid;
    axis auto;
    string='AVERAGE__of_I_60_CURRENTS_Vs_CHARGING_VOLTAGE'
    title(string);
    xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
    ylabel ('CURRENT (A)');
    saveas(gcf,[string '.fig'])
    saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(9) %--- UNCERTAINTY AVERAGE CURRENT I 60 -----
-----
    for i=1:k
        NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
        plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
REL_UNCERTAINTY_A_I60(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5
rand rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
    end
    %-----
    ROW_COLUMN=size(REL_UNCERTAINTY_A_I60);
    %-----
    i=1; j=1;
    for i=1:ROW_COLUMN(1)
        for j=1:ROW_COLUMN(2)
            if isnan(REL_UNCERTAINTY_A_I60(i,j))
                REL_UNCERTAINTY_A_I60(i,j)=0;
            end
        end
    end
    end
    %-----

    i=1;
    for i=1:ROW_COLUMN(2)
        length_of_columns(i)=nnz(REL_UNCERTAINTY_A_I60(:,i));
    end
    MEAN_CURVE= sum(REL_UNCERTAINTY_A_I60)./length_of_columns;
    plot(voltages,MEAN_CURVE,'*--k', 'LineWidth',3.5)
    %-----
    grid;
    axis auto;
    string='UNCERTAINTY__OF_CURRENT_I_60_Vs_CHARGING_VOLTAGE';
    title(string);
    xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
    ylabel ('(%)');
    saveas(gcf,[string '.fig'])
    saveas(gcf,[string '.tiff'])

```



```

figure(10) %--- AVR I_10 -----
-----
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
AVR_CURRENT_10(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5 rand
rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(AVR_CURRENT_10);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(AVR_CURRENT_10(:,i));
end
MEAN_CURVE= sum(AVR_CURRENT_10)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE,'*-k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='AVERAGE__OF_I_10_CURRENTS_Vs_CHARGING_VOLTAGE'
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('CURRENT (A)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])

figure(11) %--- UNCERTAINTY AVERAGE CURRENT I 10 -----
-----
for i=1:k
    NOT_ZERO_LENGTH=nnz(CHARGE_VOLTAGE(i,:));
    plot(CHARGE_VOLTAGE(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),
REL_UNCERTAINTY_A_I10(i,1:NOT_ZERO_LENGTH),'*r', 'Color', [rand/2+0.5
rand rand], 'LineWidth',1.7); hold on;
end
%-----
ROW_COLUMN=size(REL_UNCERTAINTY_A_I10);
i=1;
for i=1:ROW_COLUMN(2)
length_of_columns(i)=nnz(REL_UNCERTAINTY_A_I10(:,i));
end
MEAN_CURVE_60= sum(REL_UNCERTAINTY_A_I10)./length_of_columns;
plot(voltages,MEAN_CURVE_60,'*-k', 'LineWidth',3.5)
%-----
grid;
axis auto;
string='UNCERTAINTY__OF_CURRENT_I_10_Vs_CHARGING_VOLTAGE';
title(string);
xlabel ('CHARGING VOLTAGE (VOLTS)');
ylabel ('(%)');
saveas(gcf,[string '.fig'])
saveas(gcf,[string '.tiff'])
voltages=[500 1000 2000 4000 8000];

for i=1:length(voltages)
    %--- Plot AVERAGE MAXIMUM CURRENT Vs all attributes -----
    -----
    figure(voltages(i)+1)

```

```

        subplot(3,2,1),plot(ATTRIBUTES(i).HEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AvrMaxCURRENT, '*b');grid;
        title(['AVR MAXIMUM CURRENT Vs HEIGHT Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HEIGHT (cm)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,2),plot(ATTRIBUTES(i).WEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AvrMaxCURRENT, '*b');grid;
        title(['AVR MAXIMUM CURRENT Vs WEIGHT Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('WEIGHT (kg)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,3),plot(ATTRIBUTES(i).TEMPERATURE,
ATTRIBUTES(i).AvrMaxCURRENT, '*b');grid;
        title(['AVR MAXIMUM CURRENT Vs TEMPERATURE Under
Charging Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('TEMPERATURE
(C^o)'); ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,4),plot(ATTRIBUTES(i).HUMIDITY,
ATTRIBUTES(i).AvrMaxCURRENT, '*b');grid;
        title(['AVR MAXIMUM CURRENT Vs HUMIDITY Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HUMIDITY (%)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,5),plot(ATTRIBUTES(i).BMI,
ATTRIBUTES(i).AvrMaxCURRENT, '*b');grid;
        title(['AVR MAXIMUM CURRENT Vs BMI Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('BMI (kg/m^2)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        saveas(gcf,[int2str(voltages(i)+1) '.fig'])

```

```

%--- Plot AVERAGE CURRENT I 30 Vs all attributes -----

```

```

-----
figure(voltages(i)+2)
subplot(3,2,1),plot(ATTRIBUTES(i).HEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_30, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 30 Vs HEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HEIGHT (cm)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,2),plot(ATTRIBUTES(i).WEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_30, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 30 Vs WEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('WEIGHT (kg)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,3),plot(ATTRIBUTES(i).TEMPERATURE,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_30, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 30 Vs TEMPERATURE Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('TEMPERATURE (C^o)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,4),plot(ATTRIBUTES(i).HUMIDITY,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_30, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 30 Vs HUMIDITY Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HUMIDITY (%)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,5),plot(ATTRIBUTES(i).BMI,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_30, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 30 Vs BMI Under Charging Voltage: '
int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('BMI (kg/m^2)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        saveas(gcf,[int2str(voltages(i)+2) '.fig'])

```

```

%--- Plot AVERAGE CURRENT I 60 Vs all attributes -----

```

```

-----
figure(voltages(i)+3)

```

```

        subplot(3,2,1),plot(ATTRIBUTES(i).HEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_60, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 60 Vs HEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HEIGHT (cm)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,2),plot(ATTRIBUTES(i).WEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_60, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 60 Vs WEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('WEIGHT (kg)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,3),plot(ATTRIBUTES(i).TEMPERATURE,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_60, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 60 Vs TEMPERATURE Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('TEMPERATURE (C^o)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,4),plot(ATTRIBUTES(i).HUMIDITY,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_60, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 60 Vs HUMIDITY Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HUMIDITY (%)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,5),plot(ATTRIBUTES(i).BMI,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_60, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 60 Vs BMI Under Charging Voltage: '
int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('BMI (kg/m^2)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        saveas(gcf,[int2str(voltages(i)+3) '.fig'])

%--- Plot AVERAGE CURRENT I 10 Vs all attributes -----
-----
figure(voltages(i)+4)
subplot(3,2,1),plot(ATTRIBUTES(i).HEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_10, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 10 Vs HEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HEIGHT (cm)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,2),plot(ATTRIBUTES(i).WEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_10, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 10 Vs WEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('WEIGHT (kg)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,3),plot(ATTRIBUTES(i).TEMPERATURE,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_10, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 10 Vs TEMPERATURE Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('TEMPERATURE (C^o)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,4),plot(ATTRIBUTES(i).HUMIDITY,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_10, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 10 Vs HUMIDITY Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('HUMIDITY (%)');
ylabel ('CURRENT(A)');
        subplot(3,2,5),plot(ATTRIBUTES(i).BMI,
ATTRIBUTES(i).AVR_CURRENT_10, '*b');grid;
        title(['AVR CURRENT 10 Vs BMI Under Charging Voltage: '
int2str(voltages(i)) ' V' ]); xlabel ('BMI (kg/m^2)'); ylabel
('CURRENT(A)');
        saveas(gcf,[int2str(voltages(i)+4) '.fig'])

%--- Plot AVERAGE RISE TIME Vs all attributes -----
-----
figure(voltages(i)+5)

```

```

        subplot(3,2,1),plot(ATTRIBUTES(i).HEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_RISE_TIME, '*b');grid;
        title(['AVR RISE TIME Vs HEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V ']); xlabel ('HEIGHT (cm)'); ylabel ('RISE
TIME (nsec)');
        subplot(3,2,2),plot(ATTRIBUTES(i).WEIGHT,
ATTRIBUTES(i).AVR_RISE_TIME, '*b');grid;
        title(['AVR RISE TIME Vs WEIGHT Under Charging Voltage:
' int2str(voltages(i)) ' V ']); xlabel ('WEIGHT (kg)'); ylabel ('RISE
TIME (nsec)');
        subplot(3,2,3),plot(ATTRIBUTES(i).TEMPERATURE,
ATTRIBUTES(i).AVR_RISE_TIME, '*b');grid;
        title(['AVR RISE TIME Vs TEMPERATURE Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V ']); xlabel ('TEMPERATURE (C^o)');
ylabel ('RISE TIME (nsec)');
        subplot(3,2,4),plot(ATTRIBUTES(i).HUMIDITY,
ATTRIBUTES(i).AVR_RISE_TIME, '*b');grid;
        title(['AVR RISE TIME Vs HUMIDITY Under Charging
Voltage: ' int2str(voltages(i)) ' V ']); xlabel ('HUMIDITY (%)');
ylabel ('RISE TIME (nsec)');
        subplot(3,2,5),plot(ATTRIBUTES(i).BMI,
ATTRIBUTES(i).AVR_RISE_TIME, '*b');grid;
        title(['AVR RISE TIME Vs BMI Under Charging Voltage: '
int2str(voltages(i)) ' V ']); xlabel ('BMI (kg/m^2)'); ylabel ('RISE
TIME (nsec)');
        saveas(gcf,[int2str(voltages(i)+5) '.fig'])
end

```

Π.2.3 Οι συναρτήσεις *ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI* και *Y_VALUE* που καλούνται στους παραπάνω κώδικες (βλ. παραρτήματα Π.2.1 και Π.2.3) είναι οι εξής:

ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI

```

% bazei arxi twn aksonwn
%
function ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI=NAME_START(file);

%t<->I10%, time30ns, time60ns-----
-----

amplitude=file(:,2);
timens=file(:,1);
%Ip to megisto reuma-----
-----
Ip=max(amplitude);
%Ipdiv10 = 10%Ip-----
-----
Ipdiv10=Ip/10;
%Ip09 = 90%Ip-----
-----
Ip09=Ip*0.9;

%briskw to tmax pou antistixei sto t<->Imax-----
-----

```

```

r=1;
while (amplitude(r)<Ip)
    r = r+1;
end
kmax=r;

%briskw to PIO DEKSIO t10 pou antistixei sto t<->I10%, gia tin
akribeia to amesws mikrotero----
k=kmax;
while (amplitude(k)>Ipdiv10)
    k = k-1;
end

if k==0;
    k10minus=k+1;
    k10plus=k+2;
else
    k10minus=k;
    k10plus=k+1;
end

%twra kanw grammiki paremboli gia na brw ton xrono t pou antistixei
sto I10%
%i eytheia orizetai apta simeia (timens(k10minus) , amplitude
(k10minus))
%kai (timens(k10plus) , amplitude (k10plus)) , kai to simeio pou me
%endiaferei einai ( time10amp , Ipdiv10 ) sto opoio psaxnw to
time10amp ara exw:

    klisi1=(amplitude(k10plus) - amplitude(k10minus)) / (timens(k10plus)
- timens(k10minus));
    time10amp=timens(k10minus) + ( Ipdiv10-amplitude(k10minus))/klisi1;

%Euresi toy Tr (xronos anodou)=xronos apo to 10% sto 90 % toy IMAX=Ip --
-----
%Prwta prepei na brw to t<->I90% me ton idio tropo pou brika to t<->I10%
k=kmax;
while (amplitude(k)>Ip09)
    k = k-1;
end
k90minus=k;
k90plus=k+1;

%twra kanw grammiki paremboli gia na brw ton xrono t pou antistixei
sto I90%
%i eytheia orizetai apta simeia (timens(k90minus) , amplitude
(k90minus))
% kai (timens(k90plus) , amplitude (k90plus)) , kai to simeio pou me
% endiaferei einai ( time90amp , Ip09 ) sto opoio psaxnw to time90amp
ara exw:

    klisi4=(amplitude(k90plus) - amplitude(k90minus)) / (timens(k90plus)
- timens(k90minus));
    time90amp=timens(k90minus) + ( Ip09 - amplitude(k90minus))/klisi4;

```

```

%-----
% O xronos anodou einai:
    rise_time= time90amp - time10amp;

% I10, I30, I60

    time10ns= time10amp + 10;
    time30ns= time10amp + 30;
    time60ns= time10amp + 60;

% Eyresi toy I_10ns-----
-----
    i=1;
    while (timens(i)<time10ns)
        i=i+1;
    end
    i_10nsplus=i;
    i_10nsminus=i-1;
    klisi10=(amplitude(i_10nsplus) - amplitude(i_10nsminus)) /
(timens(i_10nsplus) - timens(i_10nsminus));
    amplitude_10ns= klisi10 * (time10ns-timens(i_10nsminus))+
amplitude(i_10nsminus);

% Eyresi toy I_30ns-----
-----
    i=1;
    while (timens(i)<time30ns)
        i=i+1;
    end
    i_30nsplus=i;
    i_30nsminus=i-1;
    klisi2=(amplitude(i_30nsplus) - amplitude(i_30nsminus)) /
(timens(i_30nsplus) - timens(i_30nsminus));
    amplitude_30ns= klisi2 * (time30ns-timens(i_30nsminus))+
amplitude(i_30nsminus);

% Eyresi toy I_60ns-----
-----
    i=1;
    while (timens(i)<time60ns)
        i=i+1;
    end
    i_60nsplus=i;
    i_60nsminus=i-1;
    klisi3=(amplitude(i_60nsplus) - amplitude(i_60nsminus)) /
(timens(i_60nsplus) - timens(i_60nsminus));
    amplitude_60ns= klisi3 * (time60ns-timens(i_60nsminus))+
amplitude(i_60nsminus);

%-----
% %ONOMASTIKI ARXH.
%
    ratio=(Ip09-Ipdiv10)/(time90amp-time10amp);
    T_0=time90amp-Ip09/ratio;

    i=1;
    while timens(i)<T_0

```

```

        k=i;
        i=i+1;
    end

FLAG=k;

%-----
PARAMETROI=[Ip rise_time amplitude_30ns amplitude_60ns amplitude_10ns
T_0 FLAG time10amp];

ONOMASTIKI_ARXH_KAI_PARAMETROI=PARAMETROI;

```

Y VALUE

```

%Ayti i sinartisi vriskei tin "TETAGMENI" mias "TETMIMENIS" se ena
sinolo
%timwn otan ayti i tetmimeni den iparxei sto sinolo tw n X. Diladi kanei
%gramiki paremboli.

```

```

function Y_VALUE=Y_VALUE(X_value, X_SET, Y_SET);
i=1;
FLAG=0;
while i<length(X_SET)
    if X_SET(i)<X_value;
        i=i+1;
    elseif X_SET(i)==X_value;
        FLAG=1;
        break;
    else
        break;
    end
end
if FLAG==1;
    TEMP=X_SET(i);

elseif FLAG==0;
    kplus=i;
    kminus=i-1;
    klisi=(Y_SET(kplus) - Y_SET(kminus)) / (X_SET(kplus) -
X_SET(kminus));
    TEMP=(X_value-X_SET(kminus))*klisi + Y_SET(kminus);
end

Y_VALUE=TEMP;

```

Π.3 Κώδικας υπολογισμού κρουστικής απόκρισης της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$

Εδώ παρουσιάζεται ο κώδικας, σε περιβάλλον Matlab, με τον οποίο εξάγουμε την προσέγγιση κρουστικής απόκρισης, για ένα κύκλωμα, το οποίο παράγει την καμπύλη ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, εισαγόμενη υπό τη μορφή πίνακα ζευγών τιμών στη μεταβλητή WAVESHAPE.

Οι μεταβλητές *eqzero* και *simeia* πρέπει να λαμβάνουν, κάθε φορά, νέες τιμές, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής:

```
clear all;
clc;

load WAVESHape;
TIME_ = WAVESHape (:,1);
CURRENT = WAVESHape (:,2);

DT=clock;
str = datestr(DT,31);
% 0.08 80
disp('*****
*****');
eqzero=0.08;
jj=1;

%Orismos vhmatos
simeia=80;
sampling_density=floor(length(CURRENT)/simeia);
bima=(TIME_(length(TIME_))-TIME_(1))/simeia; % METRAME SE NANOSECOND!

for i=1:simeia

    CURRENT_SAMPLE(i)=CURRENT(floor(i*sampling_density));
end

%Edw lamvanoume ta shmeia ths 8ewrhtikhhs synarthshs gia na
kataskevasoume
%ton M = CURRENT

M=zeros(simeia,simeia/2 );

for i=1:(length(CURRENT_SAMPLE))
    M(i,1)=CURRENT_SAMPLE(i);
end

for k=1:(simeia+1)
    for i=1:simeia
        for j=2:(simeia/2)
            if (i+j)==k
                M(i,j)=CURRENT_SAMPLE(k-1);
            end
        end
    end
end

%Epilogi pinaka P
loop=2; %den exei nohma na paroume mono thn stili 1
```



```

flag=0;

while (loop<=(simeia/2))&(flag==0)
    for i=1:(simeia+1-loop)
        for j=1:loop
            P(i,j)=M(i,j);
        end
    end

    %Check singvalues
    pinakas=P'*P;
    singval=eig(pinakas);

    if singval(1)>eqzero %oi idiotimes exoun afxousa seira
        loop=loop+1;
        flag=0;
        P;
    else
        flag=1;
    end

    lines=i; %edo kratame tin diastasi tou P gia na mporesoume meta na
    vroume ton pinaka Z (P*U=Z)
    rows=j;
end

%dimiourgia telikou sistimatos (P*U=Z)
clear P;
for i=1:lines
    for j=1:rows-1
        P(i,j)=M(i,j);
    end
end

for i=1:(lines)
    Z(i,1)=-M(i,rows); % to "-" mpike gia thn teliki exisosi
end
%=====
=
%ypologismos ton synteleston bi
inv_P=inv(P'*P);
vector_b=inv_P*P'*Z;

%to vector_b einai oi syntelestes tou xarakteristikou poliwnimou
%se afxousa seira
vector_temp=[vector_b ; 1];

%to dianisma pou antistoixei sto xarakteristiko poliwnimo 8a einai:
poli=flipud(vector_temp);

%oi rizes tou xarakteristikou polionimou einai:
vector_z=roots(poli);

%opote ta si einai:
vector_s=log(vector_z)/bima;

%=====
=
%ypologismos Ai

```

```

for k=1:simeia %<----Dimiourgia tou pinaka matA1
    for m=1:rows-1
        matA1(k,m)=vector_z(m)^(k-1);
    end
end

%Ypologizontai ta Ai
inv_matA1=inv(matA1'*matA1);
vector_A=inv_matA1*matA1'*CURRENT_SAMPLE';
disp('Ta A_i tis kabilis einai:');
disp(vector_A);
disp('Ta S_i tis kabilis einai:');
disp(vector_s);

%
%=====
==
%Ypologismos & anaparastasi sfalmatos
error1=real(matA1*vector_A)' - CURRENT_SAMPLE;
plot(error1, 'b')
title('Sfalma proseggisis');
zoom on
disp('To megisto sfalma ttis kabilis,gia xrono=89.8 ns kai ');
disp(simeia)
disp('epilegmena simeia, einai:');
disp(max(error1));
%=====
=

%Ektyposi apotelesmaton se arxeia
fh1 = fopen('A1_A.txt','w');
fh2 = fopen('A1_s.txt','w');
fh3 = fopen('A1_R.txt','w');
LVa=length(vector_A);
LVs=length(vector_s);
for i=1:LVa
    fprintf(fh1,'%16.8f %16.8f\n',real(vector_A(i)),imag(vector_A(i)));
end
for i=1:LVs
    fprintf(fh2,'%16.8f %16.8f\n',real(vector_s(i)),imag(vector_s(i)));
end
if LVa==LVs
    R1=LVa;
end
fprintf(fh3,'%16.1f ',R1);
fclose(fh1);
fclose(fh2);
fclose(fh3);
fh4 = fopen('bimal.txt','w');
fprintf(fh4,'%16.16f \n',bima);
% fprintf(fh4,'%16.8f \n',bima);
fclose(fh4);

close all;
clear all;
clc;
format long;
TIME_SHIFT=1.3;

```

```

%Emfanisi imerominias kai grafikou pou simatodotoun tin enarksi tou
%programmatos
DT=clock;
str = datestr(DT,31);
disp(str);
Time_beggin_plot=0;
string0=['*****
*****'];

disp (string0);
Tarxi=0;
Ttelos=100;

load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\1000\time_current_cool_1000;
TIME_=time_current_cool_1000(:,1);
CURRENT=time_current_cool_1000(:,2);
plot(TIME_-TIME_SHIFT, CURRENT, 'g', 'Linewidth', 2); hold on;
grid;

string1=['Ta Ai, tis kabilis einai:'];
disp (string1);
load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\1000\A1_A.txt;
N1=length(A1_A);
for i=1:N1
ToA1_A(i)=A1_A(i,1)+A1_A(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA1_A');

string2=['Ta Si, tis kabilis einai:'];
disp (string2);
load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\1000\A1_s.txt;
N2=length(A1_s);
for i=1:N2
ToA1_s(i)=A1_s(i,1)+A1_s(i,2)*(-1)^.5;
end
disp(ToA1_s');

%*****

load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\1000\A1_R.txt;
% load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\A2_R.txt;
load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\1000\bima1.txt;
% load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOIHTES\DIPLOMATIKES\GIWRGOS_
PALAIO\bima2.txt;
%*****

% teliko_bima=min([bima1,bima2]);

```

```

teliko_bima=bimal;

fh =
fopen('C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOITHTES\DIPLOMATIKES\G
IWRGOS_PALAIIO\1000\Ola','w');
t=Tarxi;
%-Time_begg_in_shift;
i=1;
while (t<Ttelos)
IGd1(i)=Func_G(ToA1_A,ToA1_s, A1_R, t);
% IGd2(i)=Func_G(ToA2_A,ToA2_s, A2_R, t);
IGd(i)=IGd1(i) ; %+IGd2(i);
tim(i)=t;
fprintf(fh,'%16.8f %16.8f\n',t, IGd(i));
t=t+teliko_bima;
i=i+1;
end
hold on;
% plot(tim-Time_begg_in_plot,IGd,'r:', 'Linewidth', 2)
zoom on
G=[];
for i=1:length(ToA1_A)
temp(i) =tf([ToA1_A(i)],[1 -ToA1_s(i)]);
end

Gee=temp(1)+temp(2)+temp(3); %+temp(4)+temp(5)+temp(6);
[n,m]=tfdata(Gee, 'v')
n1=real(n)
m1=real(m)
GeeR=(tf(n1,m1))
impulse(GeeR)
zoom on

fclose(fh);
%Ektypwsh grafikhs apo simulink
% for i=1:391
% It(i)=revma(1,1,i);
% plottime(i)=xronos(i);
% end
% plot(plottime,It,'k-.')
zoom on
ylabel('current (A)');
xlabel('time (sec)');
% legend('REAL DATA','APPROXIMATION Method - Imagines
Ignored','APPROXIMATION Method' );
legend('REAL DATA','APPROXIMATION Method' );
title('V_c_h_a_r_g_e = 1000 V');
grid;
axis([-5 90 -1 5])

%-----Sfalma modif2-Heidler-----
----
t=Tarxi;
i=1;
while (t<Ttelos)
APPROXIMATION(i)=IGd(i);
t=t+teliko_bima;
i=i+1;
end

```



```

elseif length(nz)<length(dz)
    flag=0;
end

if flag==1
    for i=1:(MAX1-MIN1)
        dz=[0 dz];
    end
elseif flag==0
    for i=(MAX1-MIN1)
        nz=[0 nz];
    end
else
    ;
end

POLY1=nz+dz;
ROOTS1=roots(POLY1);
for i=1:length(ROOTS1)
    if ROOTS1(i)>0
        COUNT1=COUNT1+1;
        disp('There is a positive root - NOT HURWITZ')
    end
end

%=====          ZA  -> Z_MIN  ->X  =====
w0 = fminsearch(@(w)REAL_ZA(w,nz,dz),1);
% w0=1.53051;
Z_MIN=REAL_ZA(w0,nz,dz)
nzt=nz-dz*Z_MIN;
dzt=dz;
ZaTonos=tf(nzt,dzt)
s=sym('s');
ZaT=(nzt(1)*s^2+nzt(2)*s+nzt(3))/(dzt(1)*s^2+dzt(2)*s+dzt(3));
s=j*w0;
X=imag(eval(ZaT))

%=====          CASE OF X<0  =====
C=-1/(w0*X);
nzt=[nzt 0];

MAX2=max(length(nzt),length(dzt));
MIN2=min(length(nzt),length(dzt));
if length(nzt)>length(dzt)
    flag2=1;
elseif length(nzt)<length(dzt)
    flag2=0;
end

if flag2==1
    for i=1:(MAX2-MIN2)
        dzt=[0 dzt];
    end
elseif length(nz)<length(dz)
    for i=1:(MAX2-MIN2)
        nzt=[0 nzt];
    end
else
    ;
end

POLY2=[nzt+dzt*(w0*X)];

```

```

K_LIST=roots(POLY2);

for i=1:length(K_LIST)
    if isreal(K_LIST(i))
        k_bd=K_LIST(i);
    end
end

k=sym('k');

Zk=(nzt(1)*k^2+nzt(2)*k+nzt(3))/(dzt(2)*k^2+dzt(3)*k+dzt(4));

k=k_bd;
Zkvalue=eval(Zk)
L=(Zkvalue/k_bd);

disp('=====');
C
L
w0

%===== CASE OF X<0 =====
%===== No such case occurred =====
%=====

S_function=tf([1 0],[1]);
nR=k_bd*ZaTonos-S_function*Zkvalue;
[nR1, dR1]=tfdata(nR, 'v');

dR=k_bd*Zkvalue-S_function*ZaTonos;
[nR2, dR2]=tfdata(dR, 'v');

RS=tf(nR1, nR2);
[zR, pR, kR]=zpkdata(RS, 'v');

Z_MIN
RSzpk=zpk(RS)
[zR, pR, kR]=zpkdata(RSzpk, 'v')

aR=1;
bR=-(zR(1)+zR(2));
cR=zR(1)*zR(2);
dR=1;
eR=0;
fR=pR(1)*pR(2);

kZ1=Zkvalue*kR;
kZ2=Zkvalue/kR;

ZAC1=1/(kZ1*bR)

```

```

ZAL1=(bR/cR)*kZ1
ZAR1=kZ1

ZAR2=kZ2
ZAL2=kZ2/bR
ZAC2=(1/kZ2)*(bR/fR)
%===== ZB -> Z_MIN2 ->X =====
w0b = fminsearch(@(w)REAL_Z(w,nz,dz),1);
Z_MINB= REAL_Z(w0b,nz,dz); % SEE HEREUNDER FUNCTION REAL_Z;
nzB=dz;
dzB=nz;

nztB=nzB-dzB*Z_MINB;
dztB=dzB;

ZbTonos=tf(nztB,dztB)
s=sym('s');
YbTonos=1/ZbTonos;
[YBTN, YBTD]=tfdata(YbTonos, 'v');
ay=YBTN(1);
by=YBTN(2);
dy=YBTN(3);
ey=YBTD(1);
fy=YBTD(2);

% Dieresi

YB1=ay/ey;
nomYB2=[(by-(ay*fy)/ey) dy];
denYB2=[ey fy 0];
[r,p,k]=residue(nomYB2, denYB2);

trf=tf([r(1)], [1 -p(1)]);
trfPOS=trf+(ay/ey);
[rpos,ppos,kpos]=tfdata(trfPOS, 'v');

ZBC=rpos(1)/ppos(2)
ZBRc=1/rpos(1)

ZBL= 1/rpos(2)
ZBRl=ppos(2)/rpos(2)

ZBLsketo= 1/r(2)

```

Η συνάρτηση `REAL_Z`, που αναφέρεται ανωτέρω, είναι αυτή που φαίνεται αμέσως στη συνέχεια και λαμβάνει ως ορίσματα τη μεταβλητή w (συχνότητα) και τα πολυώνυμα n και d , που αντιστοιχούν στον αριθμητή και στον παρονομαστή της ρητής έκφρασης της σύνθετης αντίστασης, αντίστοιχα.

```

function REAL_Z=REAL_Z(w, n, d)
s=j*w;
MM=(n(1)*s^2+n(2)*s+n(3));
NN=(d(1)*s^2+d(2)*s+d(3));
REAL_Z=real(MM/NN)

```


BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 1992.
- [2] European Standard EN 61000-4-2:1995: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”.
- [3] Warren Boxleitner, “Electrostatic Discharge and Electronic Equipment”, IEEE Press, New York, 1989.
- [4] Osamu Fujiwara, “New Approaches for Measurement of Static Electricity toward Preventing ESD”, IEICE Transactions on Communications, Vol. E75-B, No 3, pp. 131-140, 1992.
- [5] Osamu Fujiwara, Koichiro Nakazawa, Hiroaki Takeshita, “An analysis of charged floor potential using electromagnetic field theory”, Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 81, No. 9, pp. 28-35, 1998.
- [6] Theodore Dangelmayer, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [7] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01:2001: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα”.
- [8] European Standard EN 61000-4-2:2009: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test - Basic Emc Publication”.

- [9] James R. Hutsman, “Triboelectric Charge: Its ESD ability and a measurement method for its propensity on packaging materials”, αρχείο pdf διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.static-planet.com/pdfs/new_triboelec_char_ESD.pdf.
- [10] Niels Johassen, “Explosions and ESD”, αρχείο διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: www.ce-mag.com/archive/1999/novdec/mrstatic.html.
- [11] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.
- [12] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems”, αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpapr/sfowler/esd97/esd97.htm>.
- [13] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, “Dielectric characteristics of materials - Electrostatic Discharge”, 2002, αρχείο διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>.
- [14] R. Rompe and W. Weizel, “Ueber das Toeplershe Funkengesetz”, Z. Physik, vol.122, pp.636-639, 1944.
- [15] E. Okoniewska, M. A. Stuchly, M. Okoniewski “Interactions of Electrostatic Discharge With the Human Body”, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol. 52 (2), No. 8, pp. 2030-2039, 2004.
- [16] Concettina Buccella “Circuit network analog for ESD current strikes composite structures”, IEEE transactions on magnetic, vol. 38 (1), No. 2, pp. 809-812, 2002.
- [17] Zhiyong Yuan, Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen, Rong Zeng “Simulation and measurement of the transient field of indirect ESD”, 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 634 - 637, Singapore, 2006.
- [18] Zhiyong Yuan, Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen, Rong Zeng “New Mathematical Descriptions of ESD Current Waveform Based on the Polynomial of Pulse

- Function”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 48, No. 3, pp. 589-591, 2006.
- [19] Huang Jiu-sheng, Liu Fang, Deng Qi-bin, Liu Pei-zhu “An ultra wide band test system to test the transient electric fields and magnetic fields generated by electrostatic discharge (ESD)”, 5th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory Proceedings, pp. 626 - 629, Beijing, 2000.
- [20] Jesus L. Muiioz, Jonah Tan, Carlito Adriano, Erwin Roldan, Jack Sadie “Detecting ESD events using a loop antenna”, Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, pp. 60 – 64, USA, 2000.
- [21] Jiusheng Huang, Liu Suling, Wang Xiqin, Zhou Feng, Wang, Langfeng, Gaoyougan “Intrinsic characterization of human metal ESD current, electromagnetic field and displacement current”, 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics Proceedings, pp. 518-520, 2006.
- [22] Zhang Xijun, Ruan Xiaofen, Liu Shanghe, Wei Ming “Study on the effects or relay switch of ESD simulator to ESD immunity test”, Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics Proceedings, pp. 229 – 232, China, 2003.
- [23] P.Wilson, M.T.Ma “Fields Radiated by Electrostatic Discharges”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Volume 33, Issue 1, pp. 10-18, 1991.
- [24] Michael Mardiguian “Comments on fields radiated by electrostatic discharges”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 34, No. 1, p. 62, 1992.
- [25] David Pommerenke και Martin Aidam “*ESD: Waveform calculation, field and current of human and simulator ESD*” Journal of Electrostatics 38, pp 33-51 (1996).
- [26] Ramachandran Chundru, David Pommerenke, Kai Wang, Tom Van Doren, Fellow, IEEE, Federico Pio Centola, and Jiu Sheng Huang ‘‘*Characterization of human Metal ESD Reference Discharge Event and Correlation of Generator Parameters to Failure Level*’’

- IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 46, No.4, November 2004 pp. 498-504.
- [27] David Pommerenke ‘*Transient Fields of ESD*’ Electrical Overstress-electrostatic Discharge Symposium Proceedings 94, pp.149-159.
- [28] Jon Barth “Measurements of real ESD threats that have been ignored too long”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Volume 8, Issue 4, pp. 61- 63, 2005.
- [29] Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka “Dependence of breakdown fields on charge voltages for human ESD”, Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 148-151, Singapore, 2008.
- [30] Ken Kawamata, Shigeki Minegishi, Akira Haga “Measurement of frequency spectra of transient voltage due to micro gap discharge”, IEIC (Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) Technical Report, Vol. 104, No. 499, pp. 41-45, 2004.
- [31] Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka “Verification of spark resistance formula”, Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 152-155, Singapore, 2008.
- [32] M. Toepler: “Zur Kenntnis der Gesetze der Gleit-funkenbildung”, Annalen der Physik, vol. 326, Issue 12, pp.193-222 , 1906.
- [33] Greason W.D., “Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge”, Journal of electrostatics, vol. 44, issues 3-4, 1998.
- [34] Amoruso V., Helali M., Lattarulo F., “An improved model of man for ESD applications”, EOS/ESD Symposium, pp. 335 – 343, USA, 1999.
- [35] Giannetti R., Tellini B., “Equivalent network modeling to simulate electrical discharges”, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 971 – 976, 2000.

- [36] Nobuo Murota “Determination of characteristics of the discharge current by the human charge model ESD Simulator”, 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, pp. 486 – 489, China, 1997.
- [37] Γ.Π.Φώτης “Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων: Το παραγόμενο ρεύμα και πεδίο”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.
- [38] D. Pommerenke, B.S. Seol, J.S. Lee, J.D. Lim, H. Lee, H. Park, A. Nandy “A circuit model for ESD performance analysis of printed circuit boards”, Proc. of the Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, Seoul, Korea, December, 2008
- [39] MD 103 ESD target set, user manual. Διαθέσιμο στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνίου.
- [40] Dragonfly[®]2 Technical Reference Manual, Διαθέσιμο στη διεύθυνση: www.ptgrey.com/products/dragonfly2
- [41] Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor 55-200mm f/4-5.6G ED Διαθέσιμο στη διεύθυνση: imaging.nikon.com/products/imaging/lineup/lens/zoom/telephotzoom/af-s_dx_vr_zoom55-200mmf_4-56g_if
- [42] Ανδρέας Σολωμού, “Μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούνιος 2011.
- [43] Raúl Montaña, Marley Becerra, Vernon Cooray, Mahbubur Rahman, Prasanna Liyanage, “Resistance of Spark Channels”, IEEE transactions on plasma science, Vol. 34, No. 5, 2006, pp. 1610-1619
- [44] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων.
- [45] Άρθρο του Δρ. Α. Λευκόπουλου, Διευθυντή τομέα διακρίβωσης & διευθυντή εργαστηρίου θερμοκρασίας της C3T, «Αβεβαιότητα μετρήσεων».
- [46] UKAS M3003: “The expression of Uncertainty and Confidence in Measurement”, 2007
- [47] Γιώργος Ψαρρός, “Ποιότητα μετρήσεων πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Μάιος 2010.

- [48] Norman Balabanian, "Network Synthesis", Prentice-Hall inc., Englewood Cliffs, N.J., 1958
- [49] Φανή Ασημακοπούλου, "Βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εξίσωσης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων", Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Μάρτιος 2006.
- [50] G.P. Fotis, I.F. Gonos, I.A Stathopoulos, "Determination of the Discharge Current Equation Parameters of ESD using Genetic Algorithms", IEE, Electronics Letters, Vol. 42, Issue 14, pp. 797-799, 2006.
- [51] G.P. Fotis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, F.H. Assimakopoulou, "Applying genetic algorithms for the determination of the parameters of the electrostatic discharge current equation", Institute of Physics Publishing, Measurement, Science and Technology, Vol. 17, pp. 2819-2827, 2006.
- [52] G.P. Fotis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, F.H. Assimakopoulou, "Parameter Determination of Heidler's Equation for the ESD Current", Proc. of the 15th Int. Symp. on High-Voltage Engineering, ISH, Ljubljana, Slovenia, paper T2-208, 2007