



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

**Σύνθεση γεννητριών ρεύματος ηλεκτροστατικών
εκφορτίσεων με παθητικά στοιχεία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Θ. Παλαιολόγου

Καθηγητής : Ιωάννης ΑΘ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων : Παύλος Σ. Κατσιβέλης



Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

166

Σύνθεση γεννητριών ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με παθητικά στοιχεία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Θ. Παλαιολόγου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων : Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Ιουλίου 2011.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

Τρύφων Γ. Κουσιουρής
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Copyright © Γιώργος Παλαιολόγου
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.

"Υπάρχει αρκετό φως για αυτούς που επιθυμούν να δουν και αρκετό σκοτάδι
γι' αυτούς που έχουν την αντίθετη επιθυμία"

B.Pascal

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----------|
| Περιεχόμενα..... | i |
| Περίληψη | iv |
| Πρόλογος..... | vi |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Περί Ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας | 1 |
| 1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)..... | 3 |
| 1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο..... | 3 |
| 1.2.2 Ηλεκτροστατική Φόρτιση εξ επαγωγής..... | 6 |
| 1.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και μέτρα προστασίας | 7 |
| 1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό..... | 7 |
| 1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού | 8 |
| 1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση..... | 9 |
| 1.4.1 Γενικά..... | 9 |
| 1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model..... | 11 |
| Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 12 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 12 |
| 2.2 Προσομοιώσεις | 13 |
| 2.3 Μετρήσεις..... | 21 |
| 2.4 Κυκλωματικά μοντέλα | 25 |
| 2.4.1 Κυκλωματικό μοντέλο που προτείνεται από το Πρότυπο .25 | |
| 2.4.2 Κυκλωματικά μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρία | 26 |
| Κεφάλαιο 3: Μετρήσεις-Αποτελέσματα | 35 |
| 3.1 Εισαγωγή | 35 |
| 3.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων | 35 |
| 3.2.1 Γεννήτρια φόρτισης GLASSMAN HIGH VOLTAGE MJ20P700..... | 36 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.2.2. | Σύστημα ελέγχου-μέτρησης τάσης φόρτισης | 37 |
| 3.2.3 | Διάταξη φόρτισης-εκφόρτισης..... | 39 |
| 3.2.4 | Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης | 41 |
| 3.2.5 | Ομοαξονικό καλώδιο υψηλής συχνότητας | 42 |
| 3.2.6 | Παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi | 43 |
| 3.2.7 | Κλωβός Faraday | 44 |
| 3.3 | Μετρήσεις..... | 45 |
| 3.3.1 | Εισαγωγή..... | 45 |
| 3.3.2 | Συνδεσμολογία-διαδικασία μετρήσεων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος..... | 46 |
| Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη προσεγγιστικής μεθόδου | | 52 |
| 4.1 | Εισαγωγή..... | 52 |
| 4.2 | Η μέθοδος Prony-Προσέγγιση κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων..... | 53 |
| 4.3 | Ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων (βασισμένων στη μέθοδο Prony)..... | 56 |
| 4.3.1 | A' Προσεγγιστική Μέθοδος..... | 56 |
| 4.3.2 | B' Προσεγγιστική Μέθοδος..... | 61 |
| Κεφάλαιο 5: Κυκλωματική Μοντελοποίηση..... | | 64 |
| 5.1 | Εισαγωγή-B' Προσεγγιστική Μέθοδος..... | 64 |
| 5.2 | Εύρεση εξίσωσης με τη B' Προσεγγιστική Μέθοδο..... | 67 |
| 5.3 | Κυκλωματικά Μοντέλα-Υλοποίηση..... | 71 |
| 5.4 | Σύγκριση παραγόμενων κυματομορφών απ' το κύκλωμα με αυτές από τα πειραματικά δεδομένα..... | 82 |
| Κεφάλαιο 6: Η Επόμενη Μέρα..... | | 84 |

| | |
|--|-----------|
| Παράρτημα : | 86 |
| Π.1: Κώδικας Matlab για την εύρεση των παραμέτρων της προσεγγιστικής εξίσωσης μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$ | 86 |
| Π.2: Κώδικας Matlab για την εύρεση της μέσης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης | 89 |
| Π.3: Κώδικας Matlab για τη σύνθεση παθητικού RLC δικτυώματος, που αντιστοιχεί σε δοσμένη συνάρτηση μεταφοράς, για βηματική είσοδο $V_{in}=V_{charge} \cdot u(t)$ | 90 |
| Βιβλιογραφία : | 94 |

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή μίας γεννήτριας ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιώντας μόνο παθητικά στοιχεία. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης έγινε αξιοποίηση μετρήσεων του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων σε πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Παρουσιάστηκε η προσεγγιστική μέθοδος (βασισμένη στη μέθοδο Prony) με τη χρήση της οποίας ανακτήθηκε η συνάρτηση μεταφοράς του προς κατασκευή κυκλώματος από τις καμπύλες εκφόρτισης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το κύκλωμα αυτό βασιζόμενο στην αλυσωτή σύνδεση δίθυρων δικτύων κιγκλιδωτής μορφής (lattice) που αποτελούνταν, όπως προαναφέρθηκε, μόνο από παθητικά στοιχεία. Οι αποκρίσεις του κυκλώματος που προέκυψαν με τη βοήθεια του Matlab-Simulink αξιολογήθηκαν με βάση τα πειραματικά μας δεδομένα για τρία επίπεδα τάσης φόρτισης 1kV, 2kV και 4kV και τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερος ικανοποιητικά.

Λέξεις κλειδιά

Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, παθητικά στοιχεία, σύνθεση δικτύων, κιγκλιδωτή μορφή, Matlab-Simulink

Abstract

Aim of this diploma thesis is to study and design a passive circuit in order to produce the Electrostatic Discharge Current waveform. In this study, series of measurements of real ESD events, that had been carried out previously in the High Voltage Laboratory, were utilized. The approximation method (based on Prony method) was presented, by the use of which, the transfer function of the circuit under construction was retrieved with real ESD current waveform reference. Furthermore, this circuit was built based on the chain connection of passive two-ports with lattice topology. The responses of the circuit, that occurred with Matlab-Simulink simulations, were evaluated with experimental data reference for three levels of charging voltage 1kV, 2kV and 4kV and the results were more than satisfactory.

Key words

Electrostatic discharge current, passive elements, circuit synthesis, lattice topology, Matlab-Simulink

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Παλαιολόγου Γεώργιου για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδου για τη σύνθεση του παθητικού κυκλώματος γεννήτριας ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το σκοπό αυτό, έγινε επεξεργασία των μετρήσεων (πραγματικά περιστατικά ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου) που λήφθηκαν ήδη από προηγούμενη εργασία με τη χρήση κώδικα, σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, και εξήχθησαν οι μέσες καμπύλες εκφόρτισης (μέσος όρος 75 ατόμων). Οι καμπύλες αυτές αξιοποιήθηκαν κατάλληλα από νέο κώδικα, ο οποίος υλοποιεί προσεγγιστική αριθμητική μέθοδο και έχει σαν στόχο την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς του προς κατασκευή κυκλώματος. Με βάση αυτή τη συνάρτηση μεταφοράς γίνεται η σύνθεση του δικτύου, με χρήση μόνο παθητικών στοιχείων, για τρία επίπεδα τάσης φόρτισης : 1kV , 2kV και 4kV. Τέλος, γίνεται προσομοίωση των κατασκευασθέντων κυκλωμάτων στο Simulink, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της και προτείνονται επεκτάσεις-βελτιώσεις για μελλοντικές εργασίες.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο και συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί, που θα μας επιτρέψουν να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο που θα εξετάσουμε. Επίσης αναφερόμαστε στους τρόπους με τους οποίους δημιουργείται η ηλεκτροστατική φόρτιση και στα μέτρα προστασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, σχετικά με το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Δίνεται έμφαση στα πιο σύγχρονα πειράματα που σχετίζονται με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπινου σώματος αλλά και σε διάφορα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη, καθώς και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που

χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Δίνονται επίσης οι μέσες καμπύλες εκφόρτισης, που προέκυψαν με τη βοήθεια κώδικα στο Matlab, και οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για την κατασκευή του κυκλώματος.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία βρίσκεται η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος, που παράγει την απαιτούμενη κυματομορφή ρεύματος. Παρουσιάζεται η προσεγγιστική αριθμητική μέθοδος.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία σύνθεσης του κυκλώματος, που παράγει την απαιτούμενη κυματομορφή ρεύματος. Επίσης αξιολογήθηκαν οι παραγόμενες καμπύλες ρεύματος από τα σχεδιασθέντα κυκλώματα με αναφορά τις εκφορτίσεις από πραγματικά φορτισμένα ανθρώπινα σώματα (πειραματικά δεδομένα).

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** σύμφωνα με την κατεύθυνση έρευνας που ανακύπτει μέσα από την παρούσα εργασία, αναφέρεται το επόμενο βήμα από αυτήν που είναι η βελτίωση της μετρητικής διαδικασίας ώστε να έχουμε ακριβέστερες μετρήσεις-αναφορές για τις αριθμητικές μας μεθόδους, η σύνθεση μίας συγκεκριμένης μορφής κυκλώματος ώστε με αλλαγή των τιμών των στοιχείων του να επιτυγχάνεται η παραγωγή του ρεύματος εκφόρτισης υπό διάφορες τάσεις φόρτισης και η διεξαγωγή έγκυρων μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ανθρωπίνων εκφορτίσεων, ώστε να προσομοιωθεί το μοντέλο της γεννήτριας στις τρεις διαστάσεις.

Θα ήθελα εδώ να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τους κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο και Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, καθηγητές του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για τις άριστες συνθήκες που υπάρχουν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Τον κ. Τρύφωνα Γ. Κουσιουρή καθηγητή του Τομέα Σημάτων, Ελέγχου & Ρομποτικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη και συνεχή βοήθειά του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και για την αμέριστη συμπαράστασή του όλους αυτούς τους μήνες. Η οξυδέρκεια και οι γνώσεις του υπήρξαν καταλυτικές σε κρίσιμα σημεία της εργασίας αυτής και κυρίως σε θέματα τα οποία πραγματεύεται το 5^ο κεφάλαιο.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που ήταν πάντα κοντά στην παρούσα εργασία, έδωσε λύσεις σε κρίσιμα σημεία και με ενθάρρυνε να συνεχίσω.

Τον κ. Χ. Ηλία για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την κα Ν. Χ. Ηλία υπεύθυνη του συστήματος ποιότητας του εργαστηρίου για την εργαστηριακή της βοήθεια και τις συμβουλές της.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παύλο Σ. Κατσιβέλη, Υποψήφιο Διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη άψογη συνεργασία, τη βοήθεια, την υπομονή και τον πολύ χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την παρουσία του θα ήταν αδύνατη η παραγματοποίηση της τελευταίας.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για την υποστήριξη, και τον τρόπο με τον οποίο ήταν δίπλα μου όλα τα προηγούμενα χρόνια.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.1 Περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό την εξέταση της δυνατότητας αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι τα επόμενα χρόνια θα αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας. Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξη τους.

Σύμφωνα με το IEEE [1]: *Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα* (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 σε οτιδήποτε το/την περιβάλλει.

Είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

Ατρωσία (Immunity level) σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της/του με την παρουσία μίας ηλεκτρικής διαταραχής.

Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility) είναι η αδυναμία μίας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της

ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level) είναι η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μία διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Στάθμη Ατρωσίας (Immunity level) είναι η μέγιστη στάθμη μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

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

Περιθώριο Ατρωσίας (Immunity Margin) είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin) είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.

Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης.

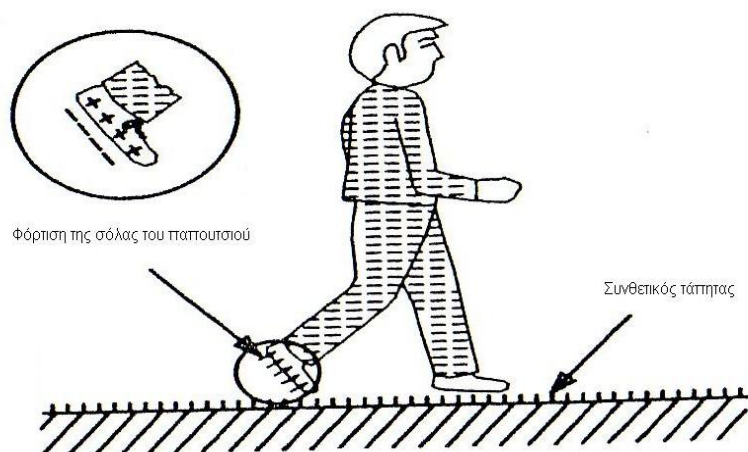
Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μία αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών. Συνεπώς, η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος συμβαίνει όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό) συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [1, 2]. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η φόρτιση εξ επαγωγής.

1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια γίνεται φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με αποθηκευμένες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.



Σχήμα 1.1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση των υλικών. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβοηλεκτρική σειρά του Πίνακα 1.1 που ακολουθεί όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά

| ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ | |
|--|---|
| ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΘΕΤΙΚΑ | ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΑ |
| Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάilon Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο Ατσάλι | Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξειδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης |

Η σχετική θέση του υλικού στην τριβοηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δυο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μπορούν να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση.

Η φόρτιση εξ επαφής είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου. Άλλοι τρόποι, όπως μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona είναι επίσης δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η απότομη μεταφορά αυτού του φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο όταν πρόκειται για αντίθετα φορτισμένα σώματα και όταν αυτά βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση λέγεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης.

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

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και κυρίως από την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά πιο ήπιες μορφής. Αντίθετα όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλος χρόνος ανόδου). Επιβλαβείς τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν και σε περίπτωση 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι:

- Εκρήξεις σε δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους.
- Ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.
- Βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών φαίνονται στον Πίνακα 1.3. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)

| ΕΝΕΡΓΕΙΑ | ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ | | |
|---------------------------------------|-----------------|-----|-----|
| | 10% | 40% | 55% |
| Περπατώντας πάνω σε χαλί | 35 | 15 | 7,5 |
| Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου | 12 | 5 | 3 |
| Κινήσεις ενός εργαζομένου στο γραφείο | 6 | 0,8 | 0,4 |

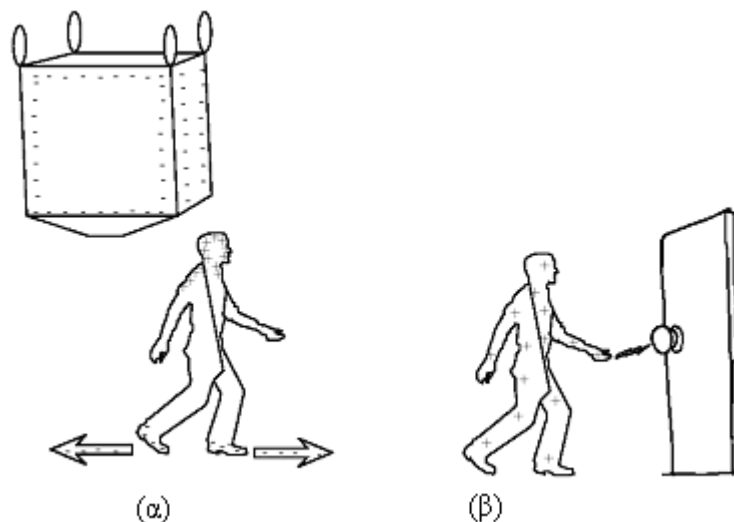
Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [3], [4] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στοχαστικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

Η ηλεκτροστατική φόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία 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 παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος.

1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να γίνει και εξ επαγωγής. Συγκεκριμένα όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται δίπλα σε ένα φορτισμένο σώμα) τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγωγίμης σύνδεσης. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό ακολουθεί το Σχήμα 1.2 στο οποίο φαίνεται ένας άνθρωπος (πολύ καλός αγωγός) δίπλα σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία περιέχει ένα μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Τα αρνητικά με τα θετικά φορτία διαχωρίζονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου. Τελικά το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται θετικά αντίθετα από το γειτνιάζον αντικείμενο. Επομένως όταν ο άνθρωπος πλησιάσει με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2β.



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

1.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και μέτρα προστασίας

1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως έχει προαναφερθεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους [2]. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να λάβουν χώρα:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματά τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν [2]. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού. Άρα για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου, είναι επιβεβλημένη η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγωγίμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [6] με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [7] ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των 10 MΩ και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

Η προστασία των συσκευών από τις ηλεκτροστατικές φορτίσεις όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί μπορεί να γίνει με την λήψη των ακόλουθων μέτρων:

- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή δευτερευόντων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

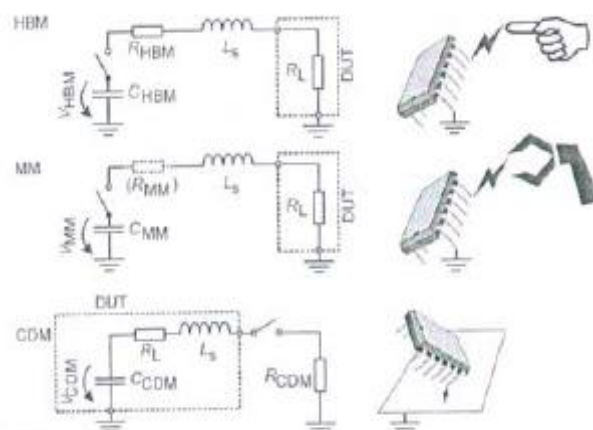
Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Για αυτό προκειμένου

να είναι αποτελεσματικές πρέπει τα πλαίσια 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 πλαίσιο. Το μέγιστο δυναμικό το οποίο μπορεί να αναπτύξει ένα ανθρώπινο σώμα είναι 25 kV. Εάν ένα άτομο πλησιάσει κάποιο μέρος του σώματός του, το οποίο συννηθέστερα είναι το δάκτυλό του, πλησιέστερα από 1 cm, μακριά από το κύκλωμα, τότε δεν θα συμβεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εφόσον η διάσπαση του αέρα γίνεται στα 30 kV. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας κυκλωμάτων από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η τοποθέτησή τους σε ένα αγωγίμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματά του.

1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.4.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να μπορέσουν να εκτιμήσουν την επίδραση που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2, 6, 8]. 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). Στο σχήμα 1.3 φαίνονται απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [6]

Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από της δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα. Θεωρώντας R_{ESD} τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης R_L της υπό εξέταση συσκευής (Device Under Test- DUT), C_{ESD} την χωρητικότητα ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_{ESD} και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

$$L_S \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0 \quad (1.1)$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t), \quad \alpha > \omega_0 \quad (1.2)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t), \quad \alpha < \omega_0 \quad (1.3)$$

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

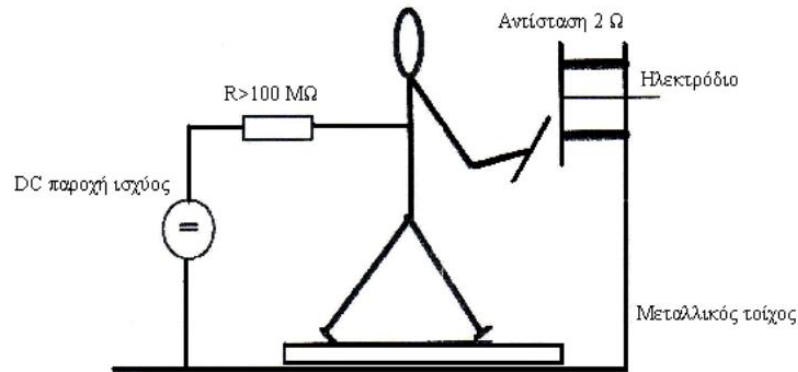
Παραδείγματα για τις τυπικές παραμέτρους και των τριών μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [6]

| 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 | 500 nH | 750 nH | 750 nH |
| R_L | 10Ω | | |
| I_{ESD} | 2,6 A | 2,8 A | 10,4 A |
| $t_{rise}(10\%/90\%)$ | ≈ 7 ns | ≈ 11 ns | ≈ 0,3 ns |
| a | $1,5 \times 10^8 s^{-1}$ | $0,1 \times 10^8 s^{-1}$ | $10 \times 10^8 s^{-1}$ |
| ω_0 | $0,5 \times 10^8 s^{-1}$ | $0,8 \times 10^8 s^{-1}$ | $30 \times 10^8 s^{-1}$ |

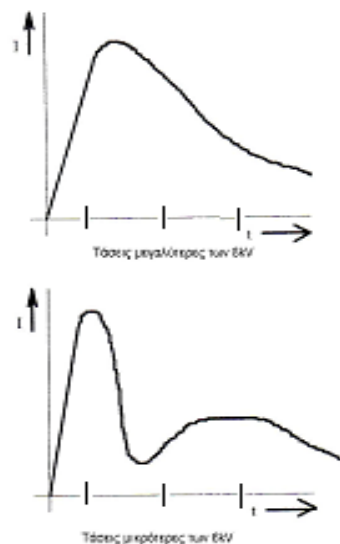
1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model

Από πολλές μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικούς ανθρώπους [9] είναι ξεκάθαρο ότι δημιουργήθηκαν πολλές διαφορετικές αποδεκτές κυματομορφές. Ο χρόνος ανόδου αυτών των κυματομορφών κυμαίνεται μεταξύ 100 ps έως 30 ns. Οι άνθρωποι νοιώθουν μια εκφόρτιση, μόνον όταν η τάση είναι περίπου 3 kV ή μεγαλύτερη.



Σχήμα 1.4: Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρωπίνου σώματος

Μια ανάλυση των αποτελεσμάτων από μετρήσεις που έχουν παρθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν κάποιες τιμές για την διαστασιολόγηση των μερών του κυκλώματος. Η αντίσταση της επιδερμίδας R είναι περίπου 150Ω έως 1000Ω (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ), η ανθρώπινη χωρητικότητα βρίσκεται περίπου από 50 pF έως 250 pF , ενώ βρέθηκαν τάσεις πάνω από 15 kV υπολογισμένες με το καθιερωμένο μέγεθος και τη χωρητικότητα του ανθρώπου. Η κυματομορφή της εκφόρτισης βρέθηκε να είναι πολύ διαφορετική από άνθρωπο σε άνθρωπο και επίσης από μέτρηση σε μέτρηση.



Σχήμα 1.5: Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, 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 [10]. Οι παράμετροι έχουν να κάνουν με την κυματομορφή του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και είναι [10]:

- I_p : Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης.
- I_{30} : Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 30 nsec 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 nsec μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή $I_p * 10\%$.

- t_f : 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 $I_p * 90\%$.

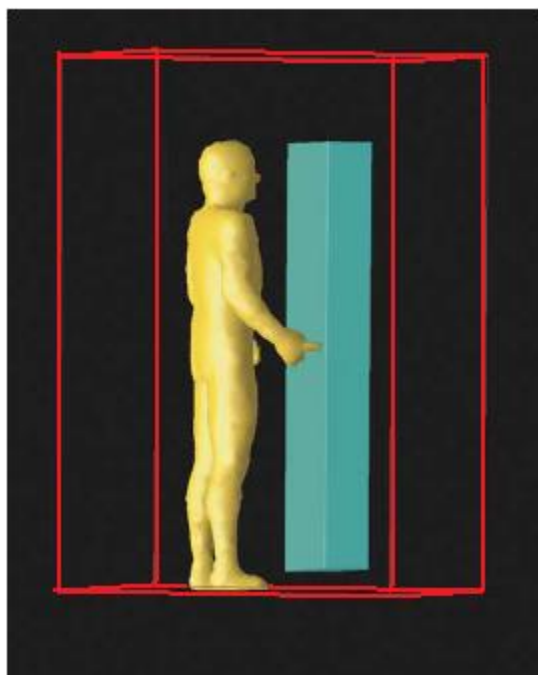
Επιπλέον, παρουσιάζονται μετρήσεις και άλλων παραμέτρων που έχουν σχέση με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, πλην των τεσσάρων βασικών, καθώς επίσης και ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Η παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποίησαν 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 (βλ. και κεφ.3).

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 [11] 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.

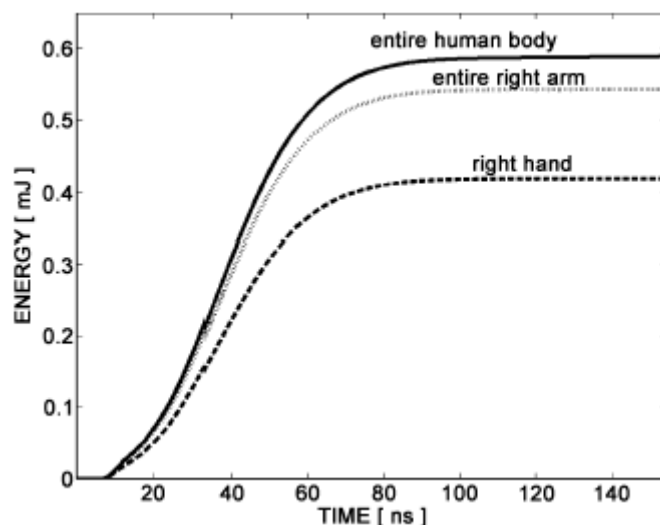


Σχήμα 2.1: Σενάριο που αντιπροσωπεύει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση μεταξύ ενός απομονωμένου μεταλλικού αντικειμένου (γαλαζοπράσινο) και του ανθρώπινου σώματος ισταμένου επί του εδάφους. Η κόκκινη γραμμή παρουσιάζει την τοποθέτηση των υπολογιστικών ορίων. Το άτομο στέκεται κατά μήκος του z-άξονα και δείχνει προς την y-κατεύθυνση [11]

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.

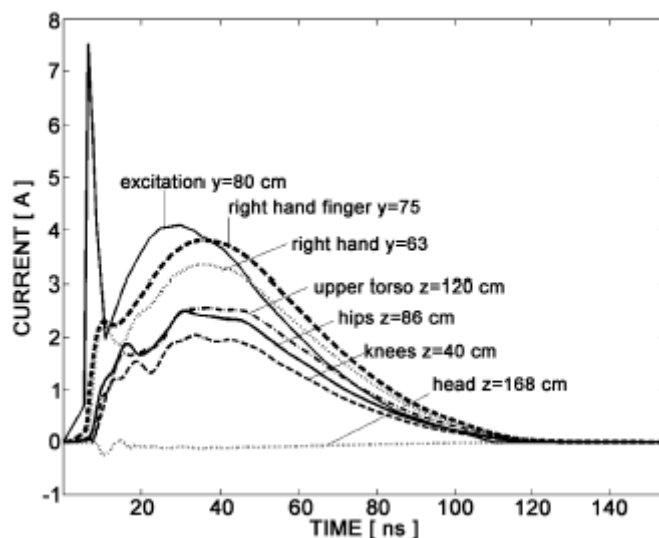
Ένας κατάλληλα τροποποιημένος κώδικας FDTD χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η έγχυση ρεύματος στα αγωγίμα αντικείμενα και να λάβει τη κατανομή του στη μόνιμη κατάσταση. Οι υπολογισμοί των συγγραφέων έδειξαν ότι, η χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος περιορίζει το φασματικό περιεχόμενο της ηλεκτροστατικής 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 ανθρωπίνου σώματος.



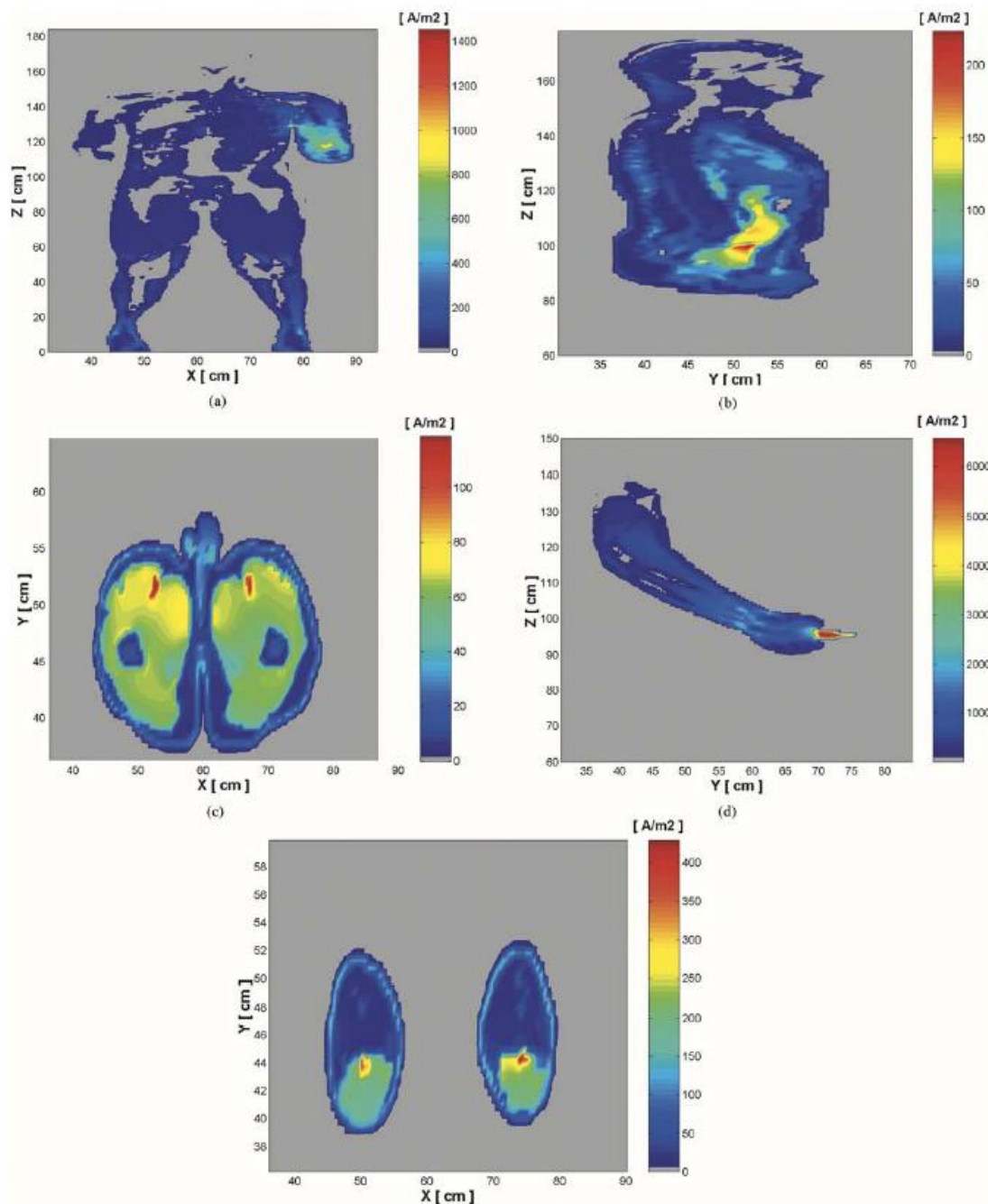
Σχήμα 2.2: Μεταφερόμενη ενέργεια σε μέρη του ανθρωπίνου σώματος [11]

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



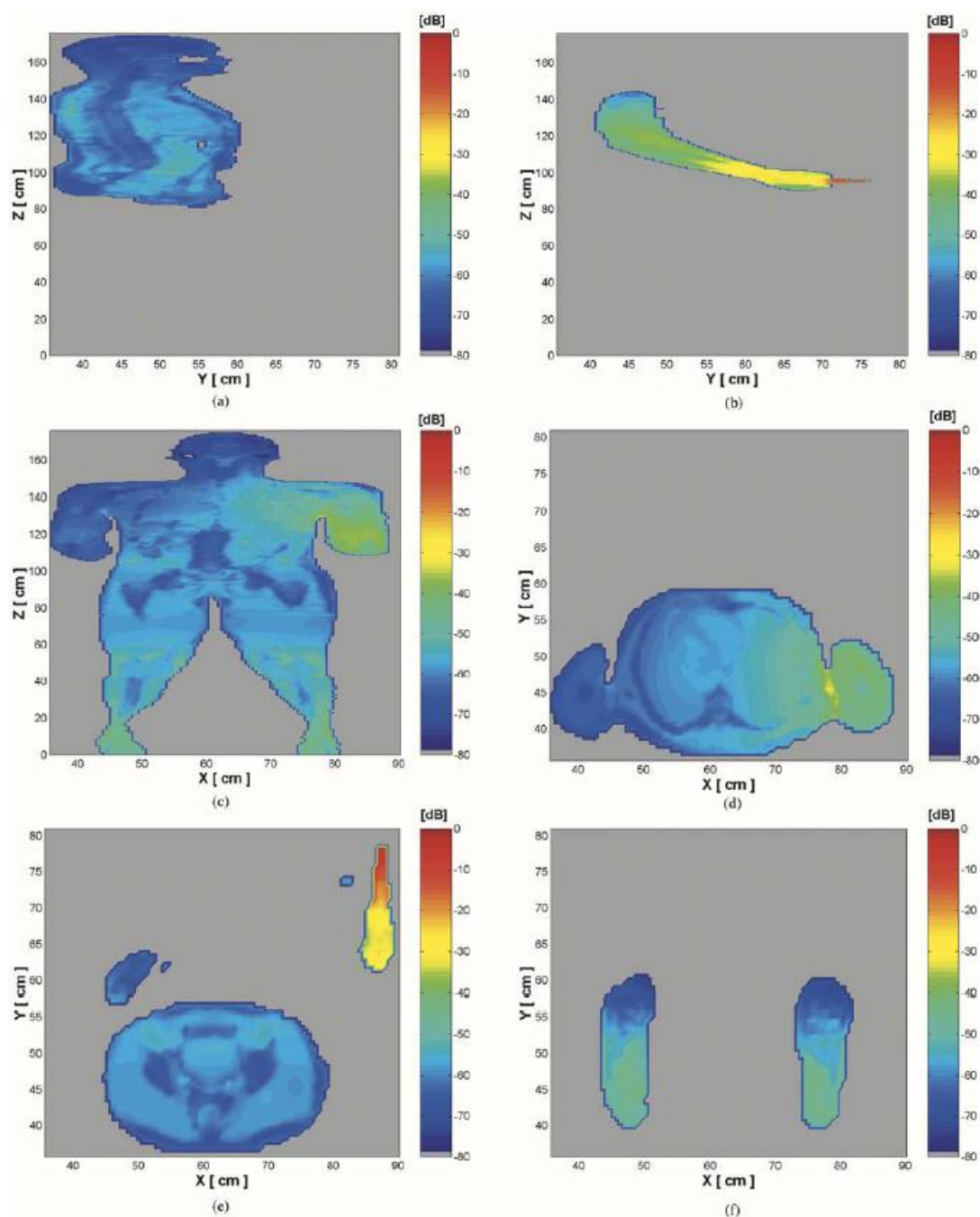
Σχήμα 2.3: Ρεύμα σε διάφορα μέρη του ανθρωπίνου σώματος κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, παρουσιάζεται επίσης και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (excitation) [11]

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 $t=33,9\text{ ns}$ [11]

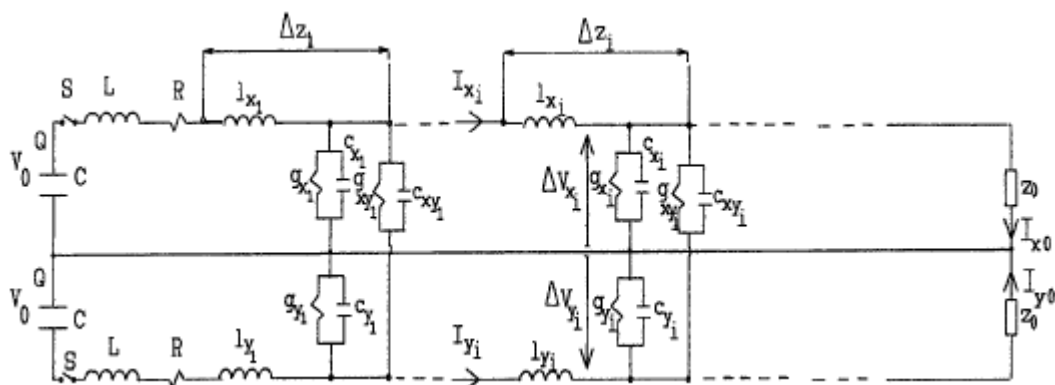
Στο Σχήμα 2.5 μπορούμε να δούμε τη χωρική κατανομή της απορροφούμενης ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα, σε διάφορες τομές, στο τέλος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



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 $x=61,02$ cm (b) μέσα από το δεξί χέρι $x=86,2$ cm (c) μέσα από το κέντρο του σώματος $y=46,44$ cm (d) μέσα από τους ώμους $z=130,14$ cm (e) μέσα από τον κορμό $z=95,58$ (f) μέσα από τα πόδια $z=1,62$ cm [11]

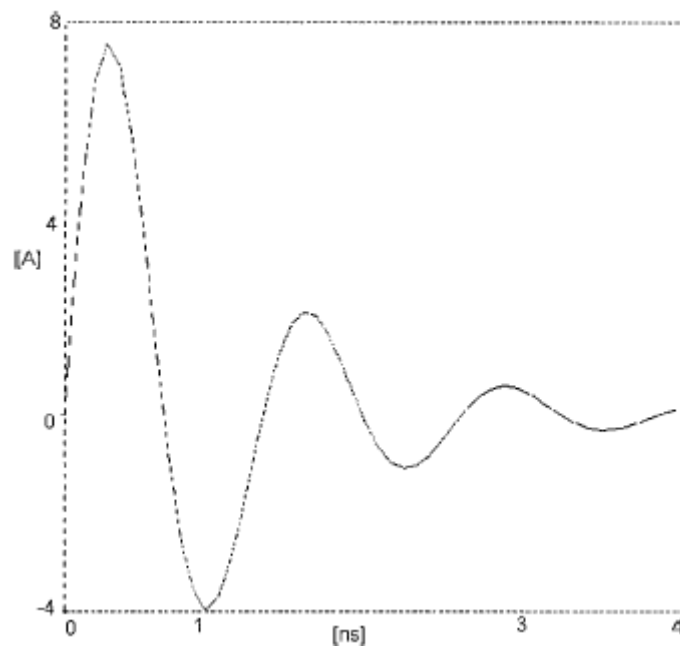
Άρθρο της **Concettina Buccella** [12] προτείνει ένα ηλεκτρικό ανάλογο με το οποίο προσομοιώνει τις εξισώσεις του Maxwell σε διαφορική μορφή αναλύει το πρόβλημα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πάνω σε σύνθετα υλικά. Το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από αγωγιμότητες, αυτεπαγωγές, και χωρητικότητες, των 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 [12]

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 [12]

Οι **Zhiyong Yuan**, **Tun Li**, **Jinliang He**, **Shuiming Chen**, **Weiyuan Chen** και **Rong Zeng** αναφέρουν [13] ότι, οι περισσότερες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχουν κατασκευαστεί για να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές που αναφέρονται στο Πρότυπο EN 61000-4-2 [10], 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 nsec αφότου το ρεύμα έχει υπερβεί το 10% του I_{max} (I_{30}) και η τιμή του ρεύματος 60 nsec 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 [10], δεν ορίζεται ακόμα η μαθηματική περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος. 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 [10] για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Επίσης, ένας σύνθετος μαθηματικός τύπος χρησιμοποιείται, συχνά, για την περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, αλλά δεν είναι κατάλληλος, επειδή η χρονική παράγωγος του δεν ανταποκρίνεται στη φυσική πραγματικότητα: όπως αναφέρουν οι ίδιοι ερευνητές και στο άρθρο τους [14] η τιμή της παραγώγου του ρεύματος για $t=0$ δεν είναι μηδέν.

Στο ίδιο άρθρο τους [14] αναφέρουν, επίσης, ότι, αν και οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγονται από διάφορους κατασκευαστές συμμορφώνονται με το Πρότυπο [10], 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.

Στην πραγματικότητα, η κυματομορφή του ρεύματος συνεισφέρει λίγο στη διαταραχή που προκαλείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, καθώς σε πολλές περιπτώσεις, η μεταβατική παρεμβολή των πεδίων είναι η κυρίαρχη διαταραχή. Συνεχίζοντας, πάντα στο ίδιο άρθρο, αναφέρουν ότι, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες μαθηματικές περιγραφές, σύμφωνα με το Πρότυπο [10] 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).

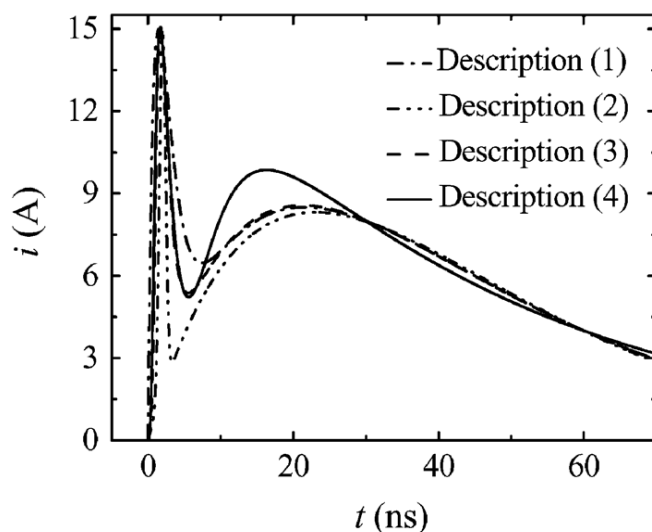
$$i(t) = 498(e^{-t/1.4} - e^{-t/1.3}) + 148.5(e^{-t/23.37} - e^{-t/20}) \quad (2.1)$$

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

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

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

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



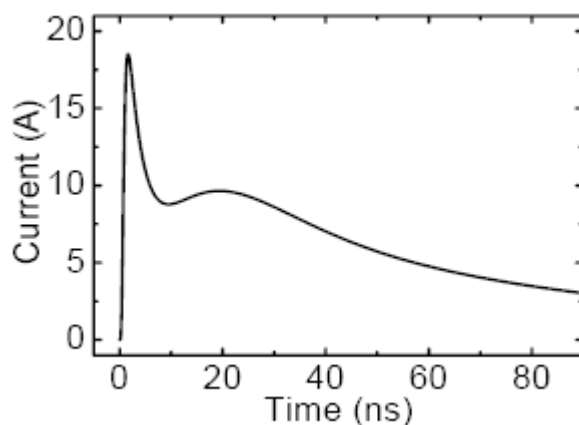
Σχήμα 2.8: Κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για τις μαθηματικές περιγραφές 2.1 - 2.4 [14]

Επιπλέον, οι ίδιοι στο άρθρο τους [13] 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 [13]

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

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται σε αυτήν την παράγραφο επιλεγμένη βιβλιογραφία, των πιο σύγχρονων πειραμάτων που σχετίζονται με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπινου σώματος.

Οι **Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka** [15], 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 $50\ \Omega$ 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. Παρατήρησαν 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:

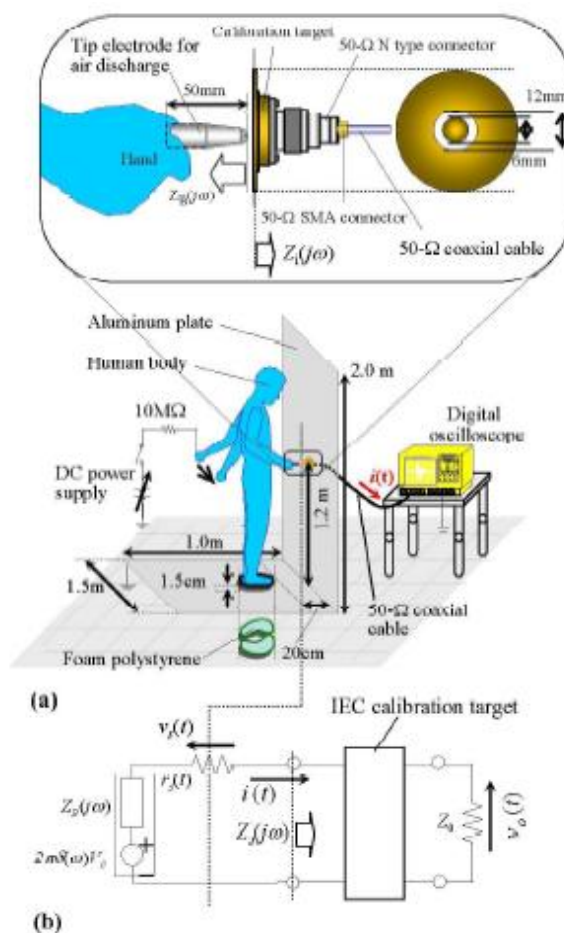
$$E_s = \frac{V_c}{V_c - V_0} \times E_0, \quad (2.6)$$

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 [10], 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 10 kV. Στη συνέχεια με ένα ψηφιακό παλμογράφο 12 GHz μέτρησαν 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 [10] σε ένα πρότυπο στόχο, και έδειξαν την εξάρτηση του πεδίου από την τάση, για ένα μεγάλο εύρος της. Επίσης, διεπίστωσαν ότι η μεγάλη ταχύτητα

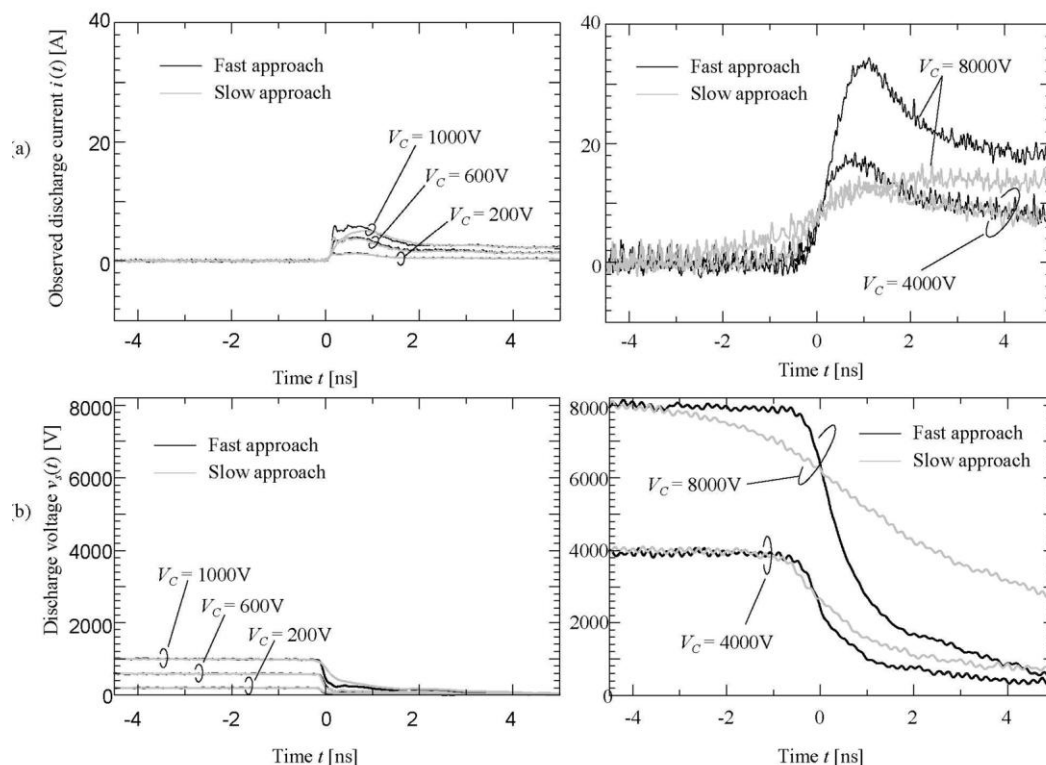
προσέγγισης, του μεταλλικού στοιχείου στο μετρητικό στοιχείο, δίνει ρεύμα εκφόρτισης μεγαλύτερης τιμής και βραχύτερο χρόνο ανόδου, για τάσεις άνω των 1000 V. Επίσης παρατήρησαν ότι, η ταχύτητα προσέγγισης δεν επηρεάζει τα ρεύματα εκφόρτισης για τάσεις κάτω από 1000 V. Σύμφωνα με τις μετρήσεις τους στην 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 2.10 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 2.10 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.



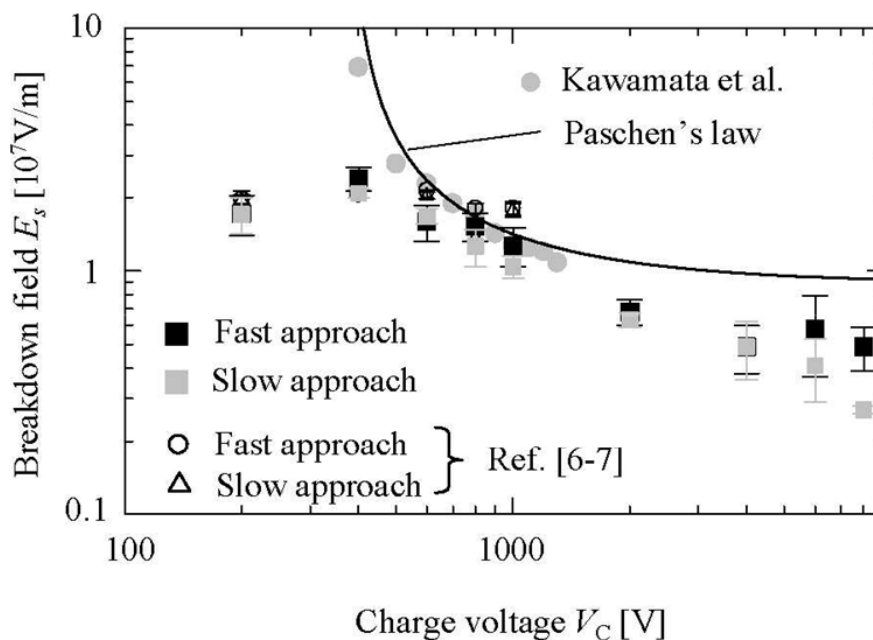
Σχήμα 2.10: Μετρητική διάταξη για (a) το ρεύμα εκφόρτισης και (b) το υπολογιστικό του μοντέλο [15]

Στο Σχήμα 2.11 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 2.11: (a) Καταγεγραμμένες κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης και (b) εξαγόμενες κυματομορφές των τάσεων εκφόρτισης [15]

Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η εξάρτηση του πεδίου από την τάση φόρτισης. Οι γκρι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις που πραγματοποίησε ο **Kawamata** [16], ενώ η συνεχής γραμμή έχει υπολογισθεί με βάση το νόμο του Paschen.



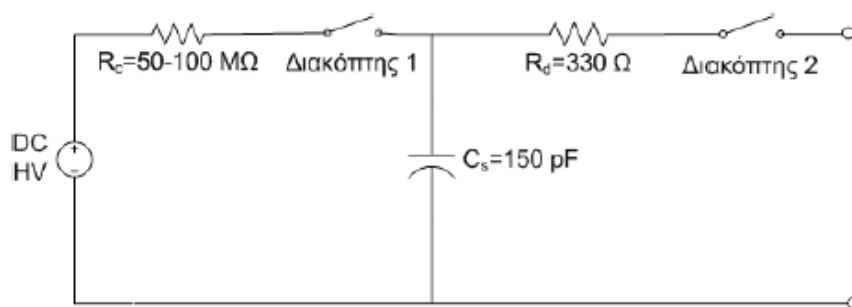
Σχήμα 2.12: Εξάρτηση του πεδίου κατάρρευσης E_s από την τάση φόρτισης [16]

Οι **Fuliwara και Taka** σε άλλο άρθρο τους [17] προσπαθούν να διευκρινίσουν την αρχική διαδικασία εκφόρτισης (ή, εναλλακτικά, τη διαδικασία σπινθήρα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων). Η διαπίστωσή τους είναι ότι, 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. Πραγματοποίησαν το πείραμά τους 5 φορές για τις τάσεις 200 V και 2000 V και βρήκαν, 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

2.4 Κυκλωματικά μοντέλα

2.4.1 Κυκλωματικό μοντέλο που προτείνεται από το Πρότυπο

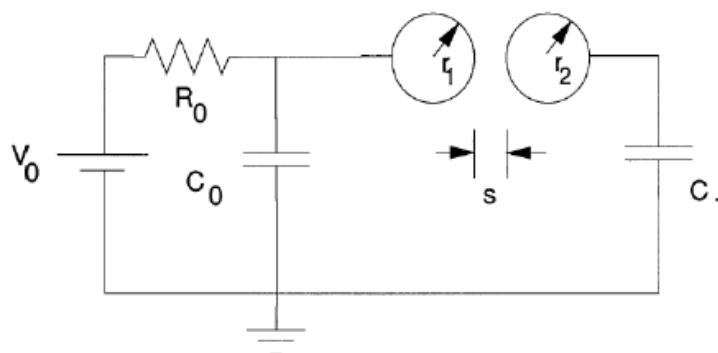
Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο [10] βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της: σύμφωνα με το [10], αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c ($50 \div 100$ M Ω), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s (150 pF \pm 10%) και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος (330 $\Omega \pm 10\%$). Προσομοιώνεται, εδώ, η περίπτωση εκφόρτισης ανθρώπου σε μεταλλικό αντικείμενο, μέσω μιας μεταλλικής ράβδου, την οποία αυτός κρατά στο χέρι του. Συνεπώς, όταν λάβει χώρα μία εκφόρτιση το τόξο θα προσπέσει στο μέταλλο και όχι στο δέρμα. Γι' αυτό το λόγο όταν ένας άνθρωπος κρατάει ένα κομμάτι μετάλλου, το δέρμα επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα εκφόρτισης. 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 330 Ω , ενώ η τιμή της χωρητικότητας C_s είναι αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος.



Σχήμα 2.13: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [10]

2.4.2 Κυκλωματικά μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρία

Ο **Greason** [18] 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 2.14. Το κύκλωμα αυτό προσομοιώνει την προσέγγιση δύο φορτισμένων σωμάτων. Ο έλεγχος των R , C , V_0 του κυκλώματος δίνει την ευκαιρία να μπορούν να μελετηθούν ταχύτητες προσέγγισης των δύο φορτισμένων σωμάτων, της τάξεως 1-100 cm/sec.



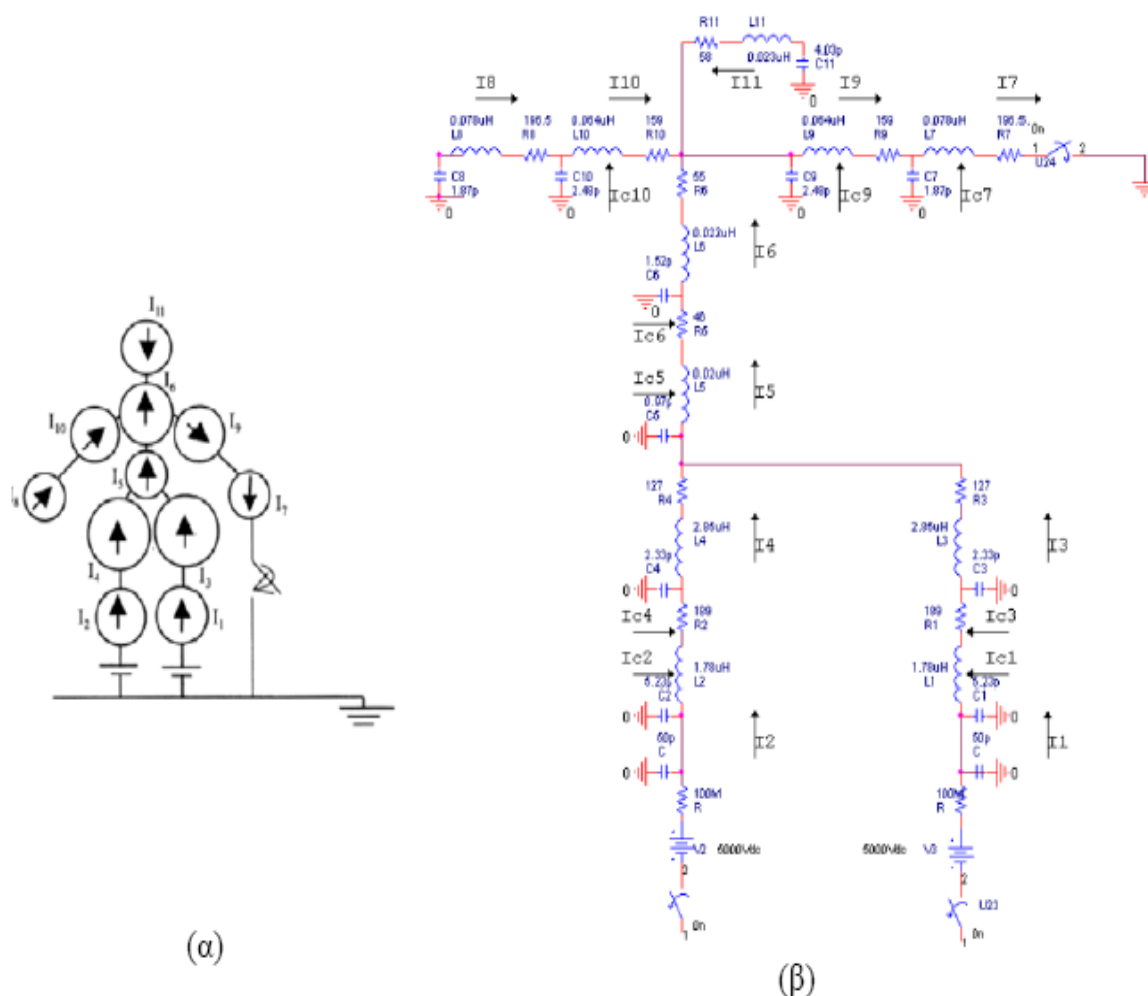
Σχήμα 2.14: Κύκλωμα προσομοίωσης της ταχύτητας προσέγγισης ενός ηλεκτροδίου [18]

Οι **Amoruso, Helali και Lattarulo** [19] “διαμελίζουν”, 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 2.1. 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 ανθρωπίνου σώματος και πώς αυτά υλοποιούνται στο Pspice φαίνονται στο Σχήμα 2.15.

Πίνακας 2.1: Ηλεκτρικές παράμετροι των βασικών μερών του ανθρωπίνου σώματος [19]

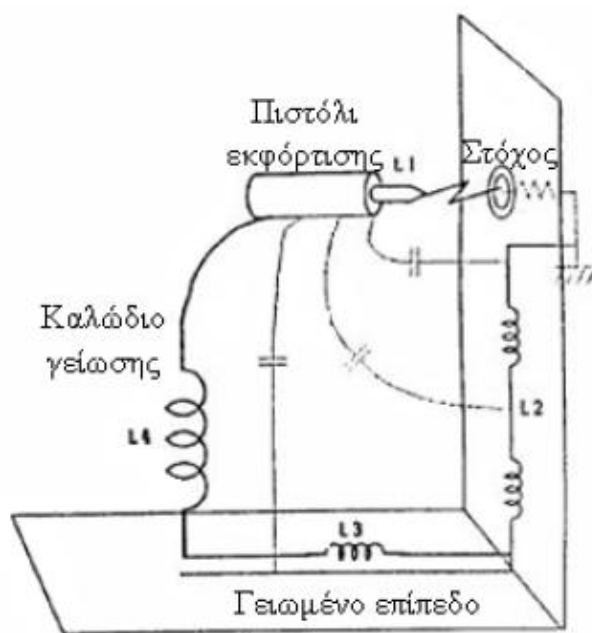
| Στοιχείο | Χωρητικότητα (pF) | Επαγωγή (μH) | Αντίσταση (Ω) |
|---------------|-------------------|--------------|---------------|
| Κνήμη | 5.23 | 1.78 | 189 |
| Μηρός | 2.33 | 2.85 | 127 |
| Κοιλιακή χώρα | 0.97 | 0.02 | 46 |
| Στήθος | 1.52 | 0.022 | 55 |
| Πήχης | 1.87 | 0.078 | 196.5 |
| Βραχίονας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



Σχήμα 2.15: α) Τα 11 βασικά μέρη του ανθρωπίνου σώματος, β) Κυκλωματική αναπαράσταση του ανθρωπίνου σώματος στο Pspice [19]

Οι **Giannetti και Tellini** [20] 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 προτεινόμενου 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.

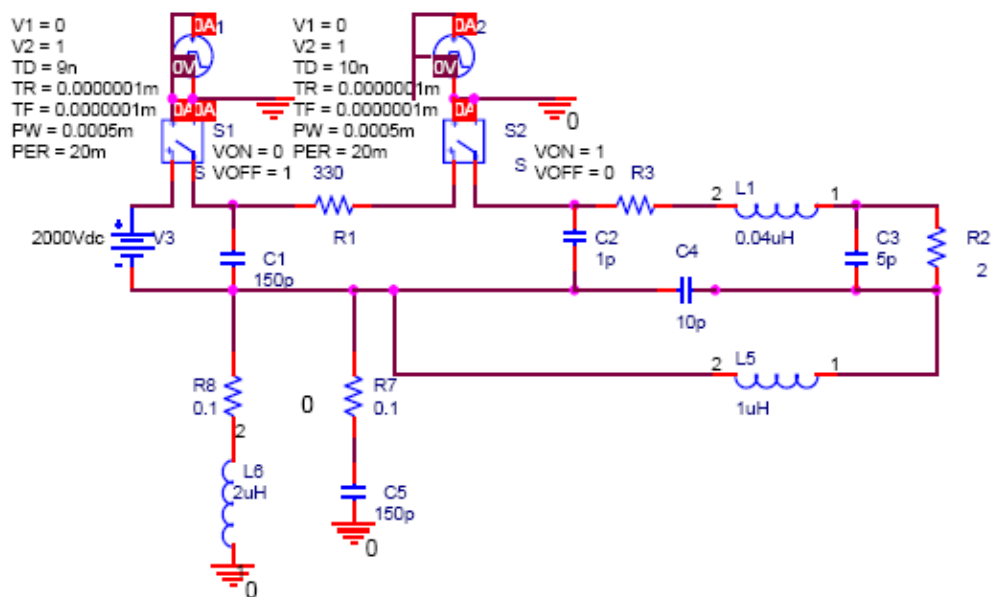
Ένα κυκλωματικό μοντέλο έχει προτείνει επίσης ο **Nobuo Murota** [21]. Στο Σχήμα 2.16 φαίνονται μοντελοποιημένα ηλεκτρικά μεγέθη που είναι παρόντα στη διάταξη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για την κατασκευή μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψη αυτά τα παράσιτα στοιχεία, γεγονός που καθιστά περίπλοκη την κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



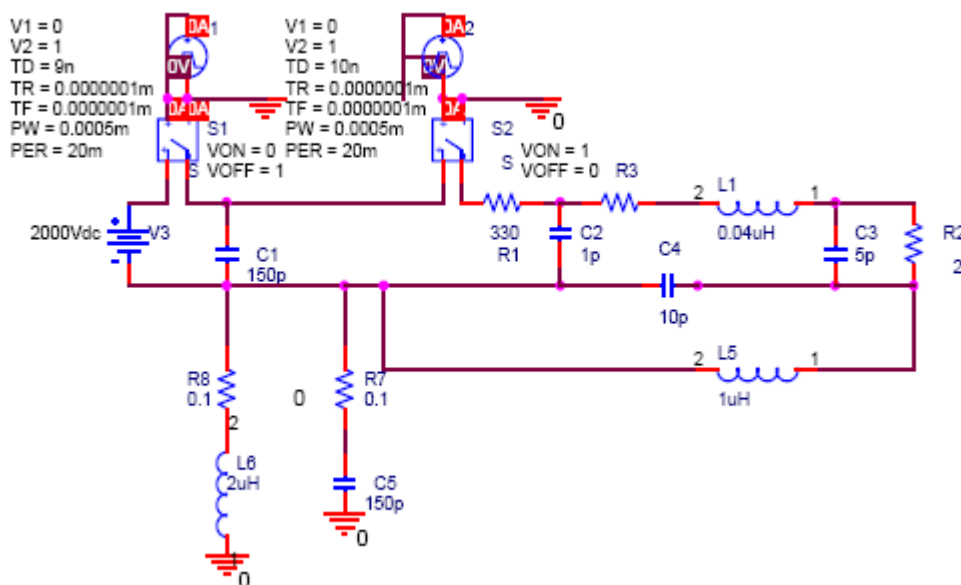
Σχήμα 2.16: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας μιας δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. [21]

Στο Σχήμα 2.17 φαίνεται ένα πρώτο κυκλωματικό μοντέλο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο προτάθηκε από τον **Nobuo Murota** [21]. 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 2.17, στο Σχήμα, δε, 2.18, φαίνεται μία παραλλαγή του αυτού.

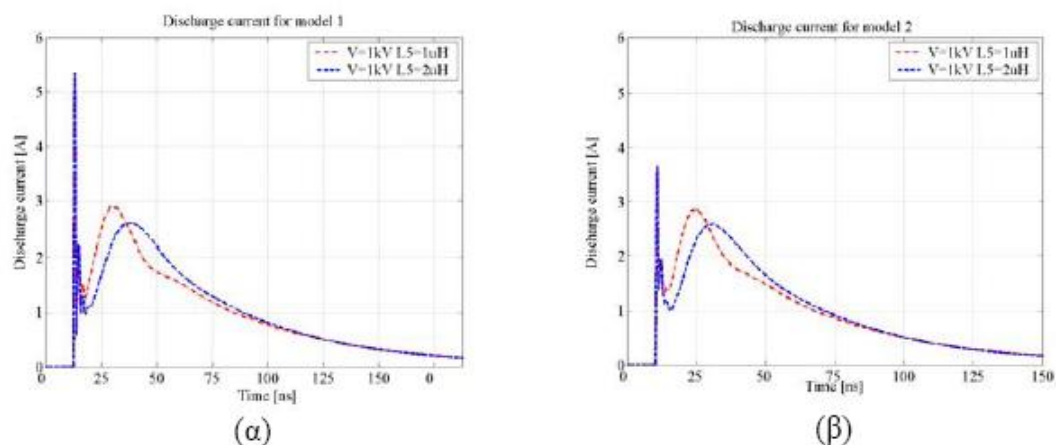


Σχήμα 2.17: Κυκλωματικό μοντέλο 1 [21]



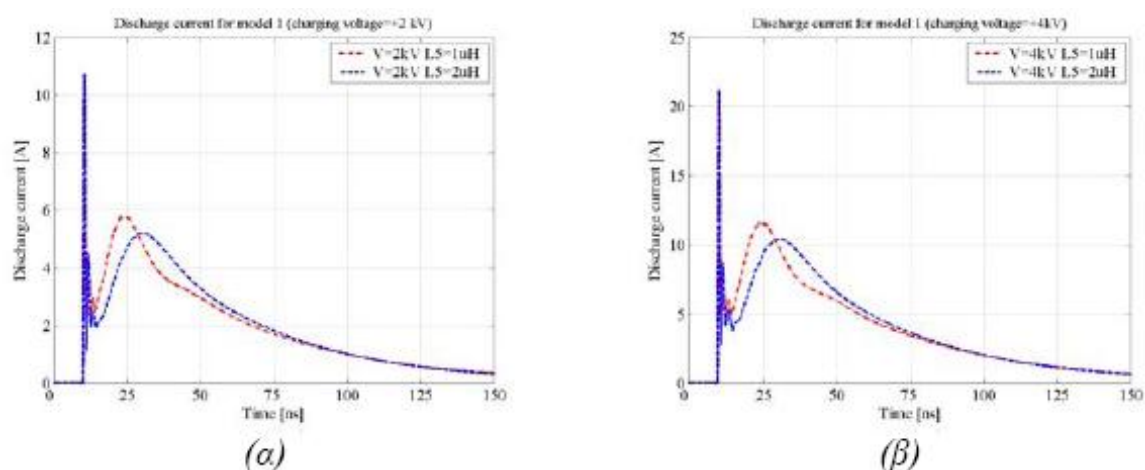
Σχήμα 2.18: Κυκλωματικό μοντέλο 2 [21]

Οι αποκρίσεις των δύο παραλλαγών του κυκλωματικού μοντέλου, για τάση φόρτισης +2 kV και +4 kV, έτσι όπως τις υπολόγισε ο **Γ. Π. Φώτης** στη διδακτορική του διατριβή [22], φαίνονται στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.19: Αποκρίσεις κυκλωματικών μοντέλων: α) Μοντέλο 1 και β) Μοντέλο 2 [22]

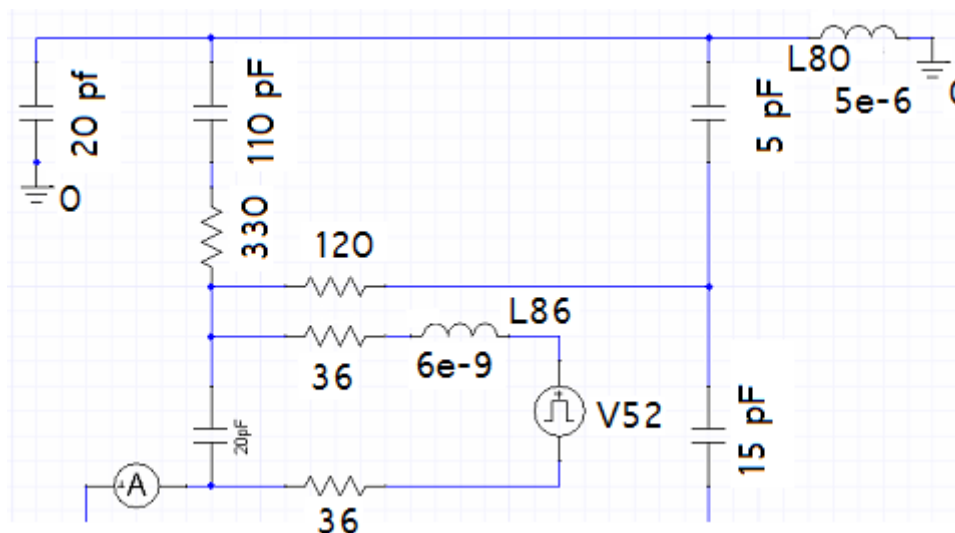
Με τη βοήθεια του προγράμματος Pspice, υλοποιήθηκαν από τον **Γ. Π. Φώτη** [22] τα δύο αυτά κυκλώματα και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τιμές τάσεων φόρτισης +2 kV και +4 kV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20.



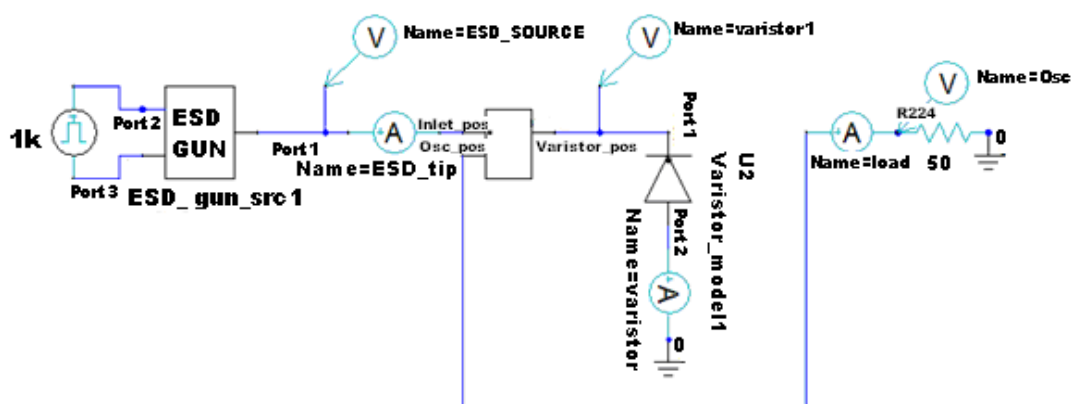
Σχήμα 2.20: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1 για τάση φόρτισης: α) +2kV και β) +4 kV [22]

Στο [22], όπου γίνεται εκτενέστερη ανάλυση και σχολιασμός, εκτίθενται συγκρίσεις του κυκλώματος αυτού και του παραγομένου ρεύματος με το αντίστοιχο κύκλωμα του Προτύπου [10], εν τέλει, δε, το [22] αποφαίνεται 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 [23] 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 συμπεριλαμβάνουν ένα βαρίστορ ως προστασία έναντι στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το ισοδύναμο κύκλωμα για την γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.21 ενώ το ολικό κύκλωμα, που περιέχει τη γεννήτρια και το δοκίμιο υπό έλεγχο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις απεικονίζεται στο Σχήμα 2.22.



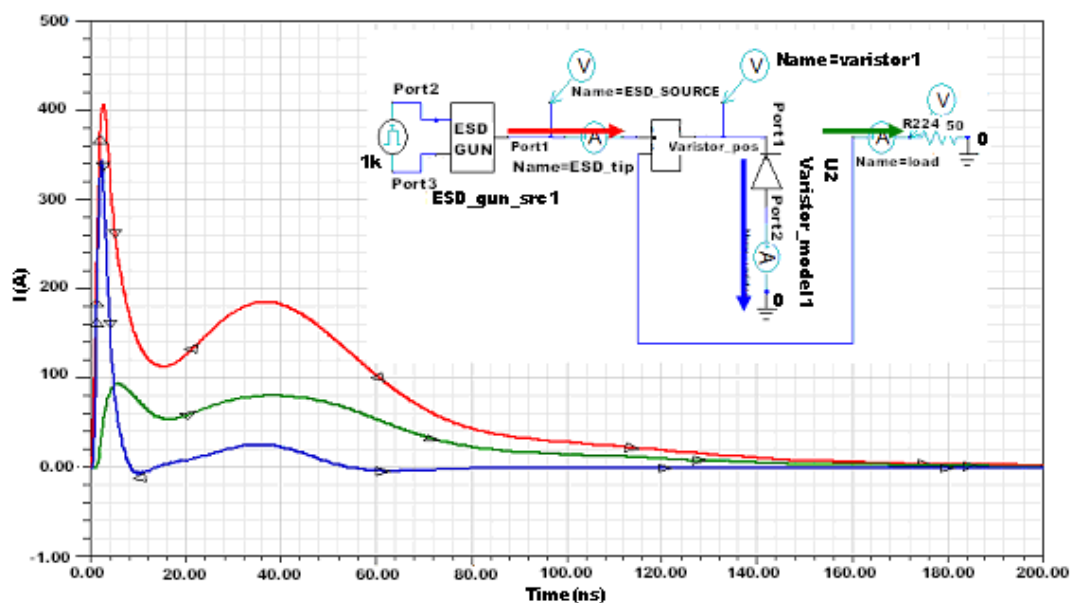
Σχήμα 2.21: Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης



Σχήμα 2.22: 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.

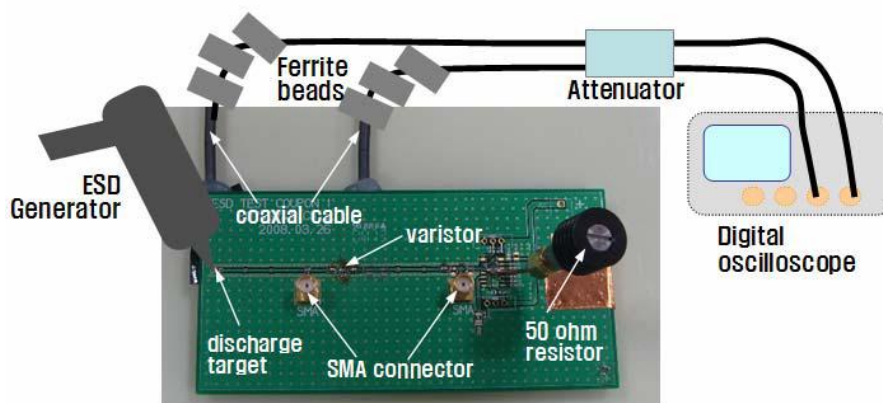
Στην προσομοίωση που φαίνεται στο Σχήμα 2.23, η τάση ρυθμίστηκε στο 1 kV και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που εγχύθηκε στην πλακέτα είναι περίπου 4 A (κόκκινη γραμμή). Επίσης φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσον αφορά το ρεύμα προς γη που περνάει από το βαρίστορ.



Σχήμα 2.23: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την καμπύλη του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βαρίστορ.

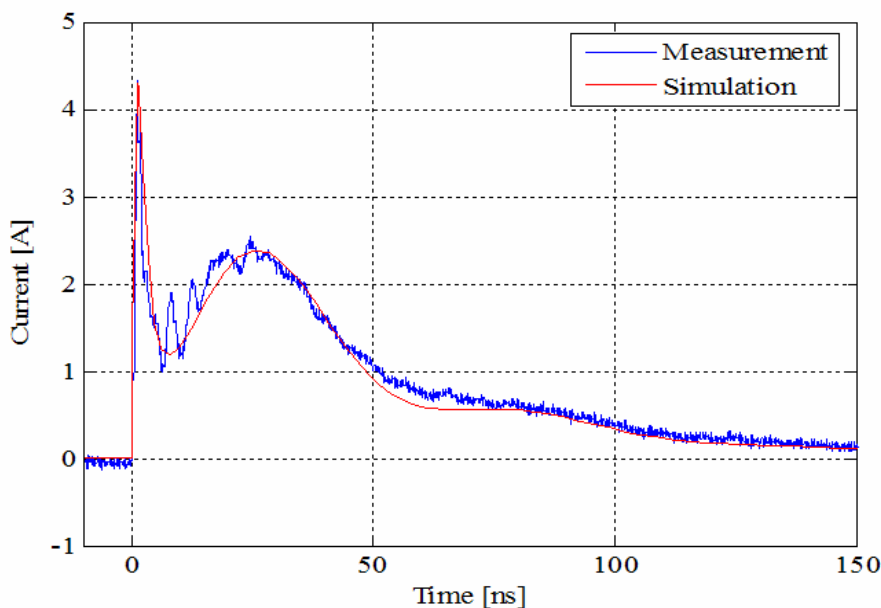
Οι συγγραφείς κατέγραψαν το ρεύμα που απάγει το βαρίστορ και βρήκαν την κορυφή του ίση με 3.4 A (μπλε γραμμή).

Το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που εγχύεται 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 2.24, την οποία οι συγγραφείς ονομάζουν τεστ πλακέτας με βαρίστορ.



Σχήμα 2.24: Τέστ πλακέτας

Το Σχήμα 2.25 δείχνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η κόκκινη γραμμή είναι η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, συγκρινόμενη με το αποτέλεσμα της μέτρησης (μπλε γραμμή)

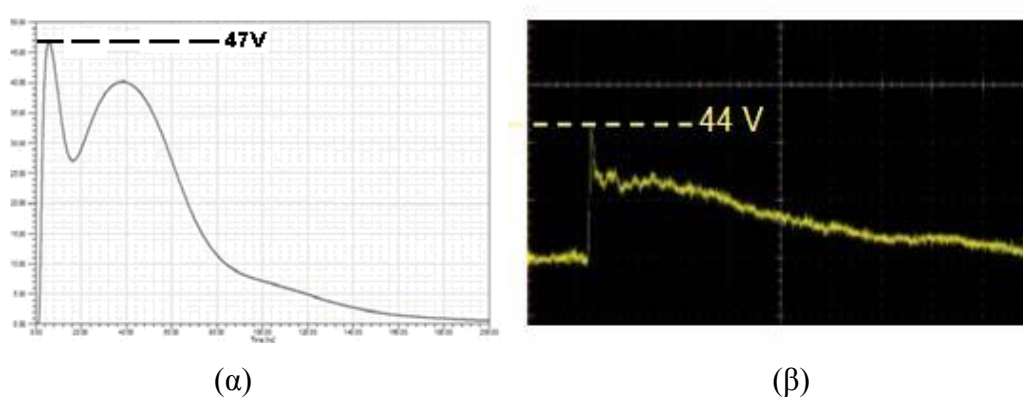


Σχήμα 2.25: Σύγκριση προσομοίωσης και μέτρησης για τη κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Σημειώνεται όμως ότι σε αυτήν τους την εργασία, οι τιμές των στοιχείων στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.21, τροποποιούνταν από τους συγγραφείς, βασιζόμενοι στο αποτέλεσμα της σύγκρισης της προσομοίωσης, για το εγχυόμενο ρεύμα, με τη μέτρηση αυτού σε πολλές δοκιμές, ώστε να συμπίπτουν καλύτερα οι δύο

καμπύλες. Στο Σχήμα 2.25 φαίνεται ότι η πρώτη και η δεύτερη κορυφή (peak) συμπίπτουν αρκετά καλά.

Τέλος το Σχήμα 2.26 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 2.26: Σύγκριση κυματομορφής τάσης (α) προσομοίωση (β) μέτρηση

Κεφάλαιο 3

Μετρήσεις-Αποτελέσματα

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 τη διεξαγωγή των πειραμάτων μας, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται, υπήρχε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ή τον προμηθευτήκαμε ειδικά για τα συγκεκριμένα πειράματα, και είναι ο ακόλουθος:

1. Γεννήτρια φόρτισης
2. Σύστημα ελέγχου-μέτρησης τάσης φόρτισης
3. Διάταξη φόρτισης-εκφόρτισης
4. Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης
5. Ομοαξονικό καλώδιο υψηλής συχνότητας

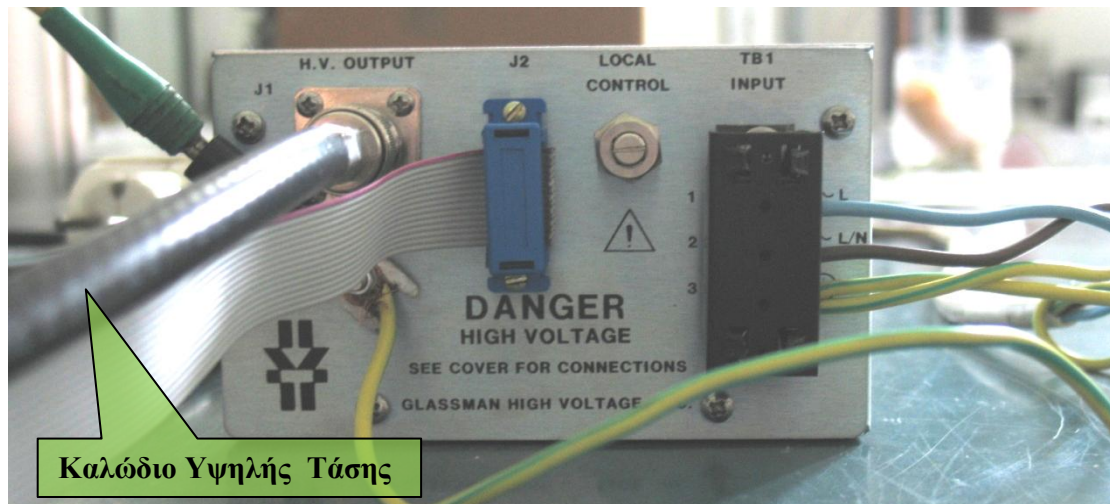
6. Παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi
7. Κλωβός Faraday

3.2.1 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 συνεχή, σταθερής ρύθμισης με τιμές από 0 έως 20kVdc. Η ρύθμιση γίνεται από μεταβλητή αντίσταση (ποτενσιόμετρο) που μπορεί να περιστραφεί μέχρι 10 φορές με ακρίβεια 0.05%. Η τιμή της τάσης έχει ακρίβεια ίση με το 0.5% της επιβαλλόμενης + 0.2% της ονομαστικής τιμής. Η επαναληψιμότητα είναι μικρότερη του 0.1% της ονομαστικής. 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% στο κενό φορτίο. Για την καταγραφή της τάσης παρέχεται σήμα από 0 έως 10 V DC για τάση ανάμεσα στα 0V και την ονομαστική. Ακρίβεια ανάγνωσης για την τάση είναι ίση με 0.5% + 0.2% της ονομαστικής τιμής. Όσον αφορά τον 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 στην συσκευή.

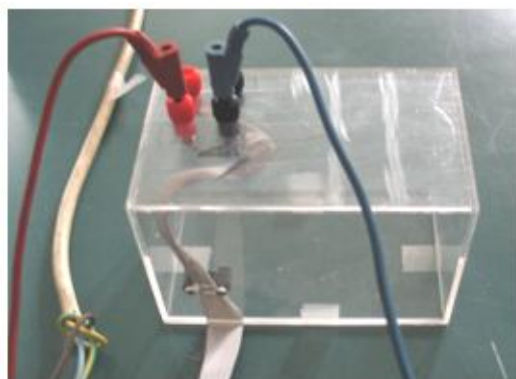
Για να γίνει η λήψη της υψηλής τάσης από την γεννήτρια χρησιμοποιείται εξωτερικό αποσπώμενο καλώδιο υψηλής τάσης μήκους περίπου 2.5 μέτρων. Επίσης παρέχεται RG8U θωράκιση υψηλής τάσης για το εν λόγω ομοαξονικό καλώδιο. Η γεννήτρια φαίνεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί.



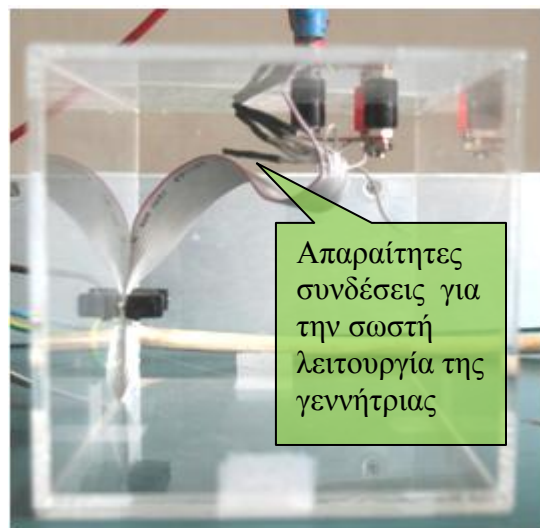
Σχήμα 3.1: Γεννήτρια φόρτισης άνθρωπου MJ20P700

3.2.2 Σύστημα ελέγχου-μέτρησης τάσης φόρτισης

Στο εργαστήριο για την 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 στην χαμηλή τάση, λίγο πιο μακριά από την γεννήτρια. Έτσι κατασκευάστηκε ένα κουτί Plexiglass, Σχήμα 3.2, στο οποίο και οδηγήθηκαν οι ακροδέκτες από την συσκευή εξόδου της γεννήτριας και έγιναν οι κατάλληλες συνδέσεις.



a

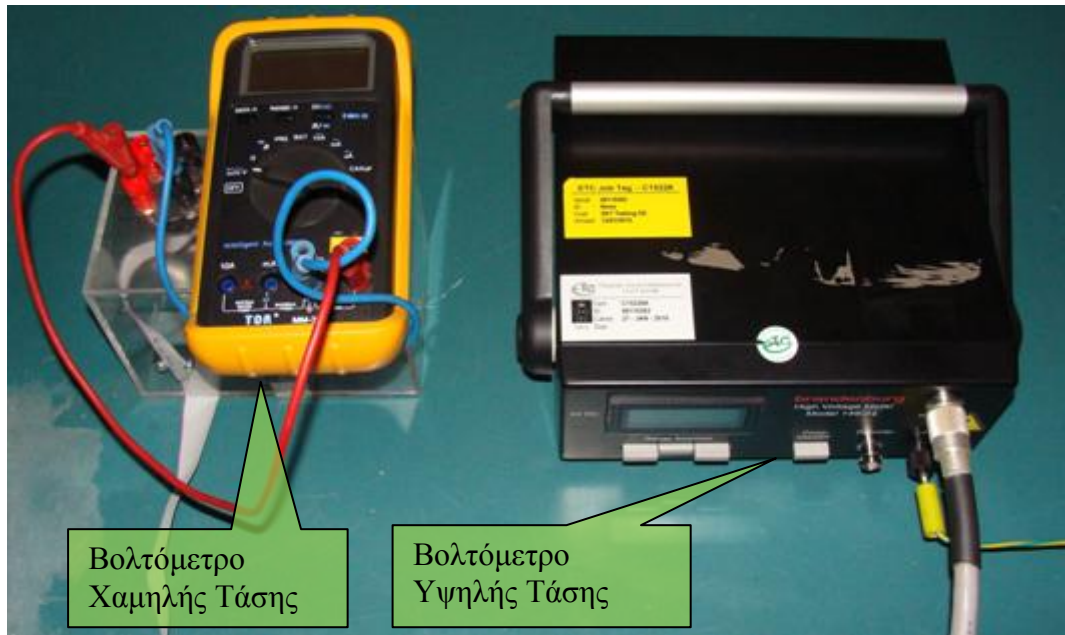


b

Σχήμα 3.2: Κουτί plexiglass

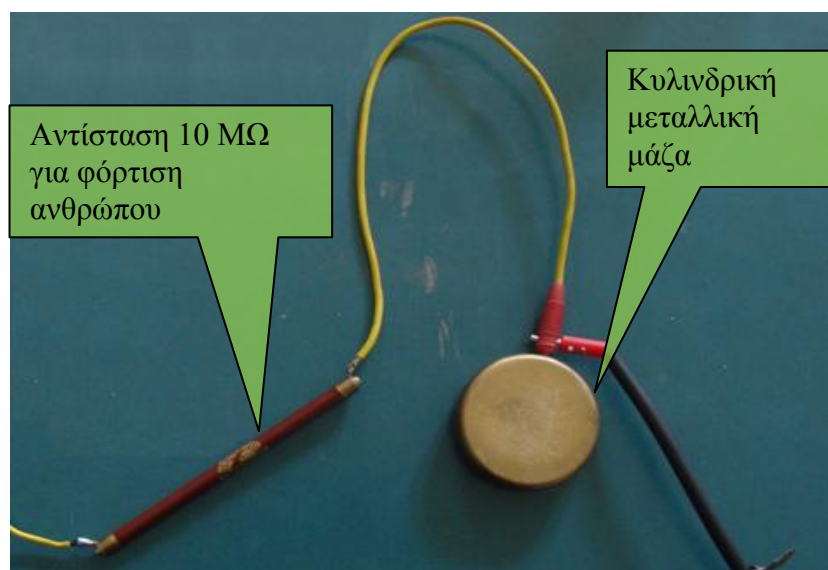
Η καταγραφή της τάσης φόρτισης του ανθρώπου, που λάμβανε μέρος στο πείραμα, γινόταν με δύο τρόπους. Μέσω ενός βολτομέτρου χαμηλής τάσης το οποίο μετρά το σήμα $0 \div 10$ Vdc που παρέχεται από τη γεννήτρια υψηλής συνεχούς τάσης (ανάλογο

με την τιμή της τάσης εξόδου $0 \div 20$ kVdc της γεννήτριας) και άμεσα με ένα βολτόμετρο υψηλής τάσης. Η συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



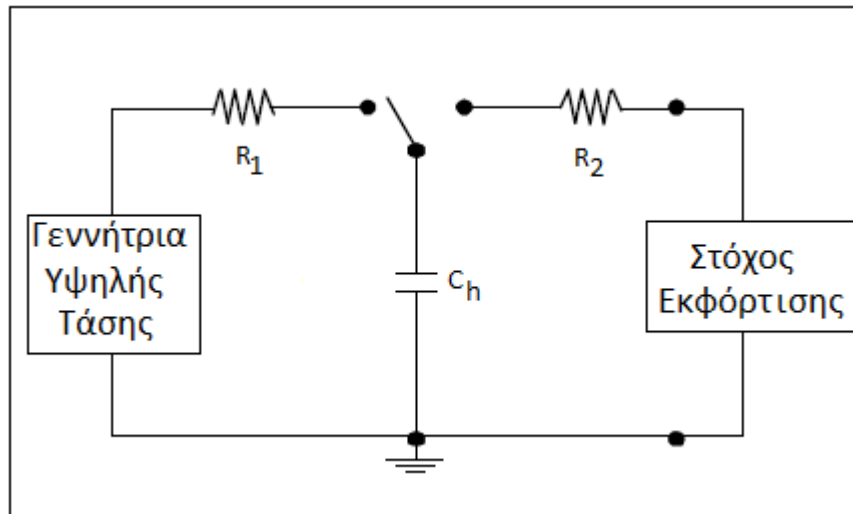
Σχήμα 3.3: Βολτόμετρο Χαμηλής και Υψηλής τάσης

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 άνθρωπου, Σχήμα 3.4. 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 3.4: Αντίσταση φόρτισης και κυλινδρική μεταλλική μάζα

Το μοντέλο του κυκλώματος ανθρώπου-αντίστασης-γεννήτριας είναι το ακόλουθο με βάση το Πρότυπο [24] (Σχήμα 3.5 - απλοποιημένο κύκλωμα):



Σχήμα 3.5: Απλοποιημένο κύκλωμα ανθρώπου-αντίστασης-γεννήτριας

Όπου,

C_h : ανθρώπινη χωρητικότητα

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

R_2 : αντίσταση ανθρώπινου σώματος

3.2.3 Διάταξη φόρτισης-εκφόρτισης

Για την φόρτιση και την εκφόρτιση του φορτισμένου ανθρώπου που συμμετείχε στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική ράβδος για την προσέγγιση του στόχου εκφόρτισης (Σχήμα 3.6). Η ράβδος αυτή είχε την μία της πλευρά διαμορφωμένη έτσι ώστε να είναι αιχμηρή και να σχηματίζει γωνία περίπου 40 μοίρες ώστε να ακολουθούνται οι οδηγίες του Προτύπου [24], και την άλλη πλευρά στρογγυλεμένη και πάλι βάσει του Προτύπου [24], ώστε να είναι δυνατό να γίνουν σειρές πειραμάτων και με τους δύο τρόπους εκφόρτισης και να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.



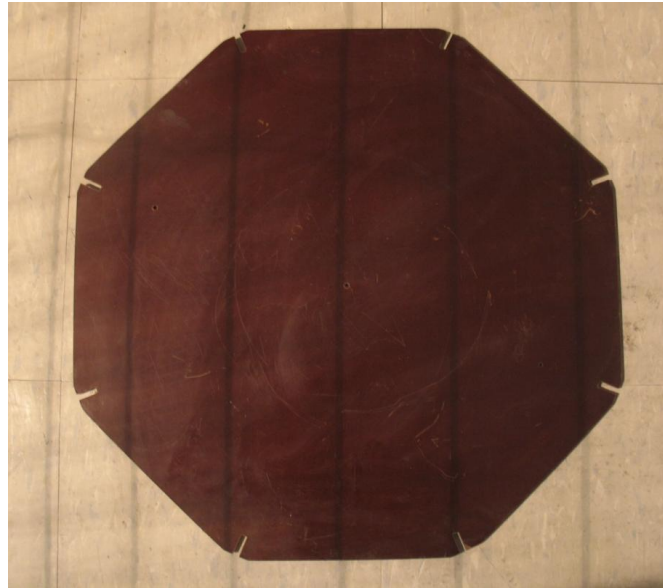
Σχήμα 3.6: Ράβδος εκφόρτισης

Μετά το πέρας της διαδικασίας εκφόρτισης του ανθρώπου και για να αποβληθούν πλήρως τα φορτία από το σώμα του αυτός ακουμπούσε σε μία γειωμένη μεταλλική επιφάνεια (Σχήμα 3.7).

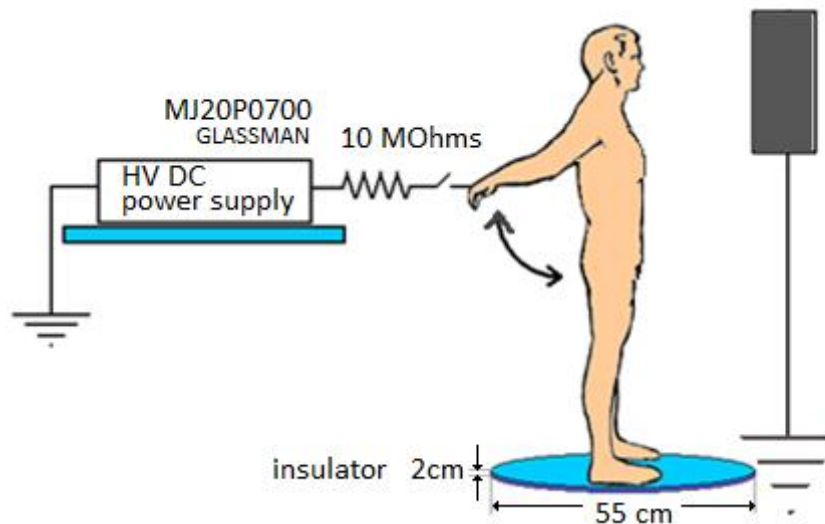


Σχήμα 3.7: Γειωμένη μεταλλική επιφάνεια.

Κατά την διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του ανθρώπου αυτός πατάει πάντα πάνω σε μονωτικό υλικό κυλινδρικής μορφής διαμέτρου 55cm και ύψους 2cm (Σχήμα 3.8). Η ύπαρξη του μονωτικού κρίνεται απαραίτητη για να μην έρχεται ο εκφορτιζόμενος σε άμεση επαφή με την γη. Επίσης έχει υπολογιστεί [25] ότι το πάχος του μονωτικού αυτού επηρεάζει σε κάποιο βαθμό την συνολική χωρητικότητα του ανθρώπου που φορτίζεται και εκφορτίζεται. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται σχέδιο όπου αναπαριστάται η διαδικασία φόρτισης του ανθρώπινου σώματος που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.

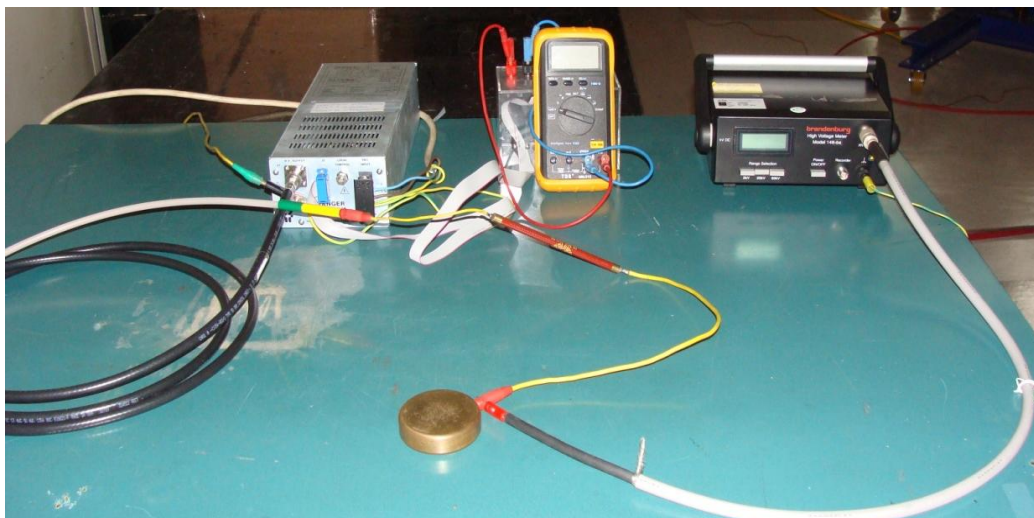


Σχήμα 3.8: Επιδαπέδιο μονωτικό (βακελίτης)



Σχήμα 3.9: Διάταξη για τη φόρτιση του ανθρώπινου σώματος

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση των ανθρώπων που συμμετείχαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10:



Σχήμα 3.10: Διάταξη φόρτισης: Γεννήτρια DC, βολτόμετρα και ακροδέκτης Υψηλής Τάσης.

3.2.4 Ομοαξονικός προσαρμοστής 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 ο MD 103 της TESEQ ο οποίος διαθέτει μεγάλο εύρος ζώνης και ενσωματωμένη εξασθένηση.

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται ο εν λόγω ομοαξονικός προσαρμοστής και στο Σχήμα 3.12 ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη μετρητική διάταξη.



Σχήμα 3.11: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 103



Σχήμα 3.12: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 103 τοποθετημένος στη διάταξη

3.2.5 Ομοαξονικό καλώδιο 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 το ομοαξονικό καλώδιο που θα χρησιμοποιηθεί να είναι κατάλληλο για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας.

Το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου SUCOFLEX 106, το οποίο έχει καλή απόκριση συχνότητας και ενσωματωμένη εξασθένηση.

3.2.6 Παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi



Σχήμα 3.13: Ο παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi

Ο παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi, που φαίνεται στο Σχήμα 3.13 είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της LeCroy και λειτουργεί στα 16 GHz.

Τον παλμογράφο αυτό μπορέσαμε να δανειστούμε για περιορισμένο χρονικό διάστημα, και μέσω αυτού έγινε η καταγραφή κυματομορφών ρεύματος πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από ανθρώπινα σώματα όπως αναλύεται στην §3.3.2.

Θεωρείται ένας από τους καλύτερους στον κόσμο με πολύ μεγάλο εύρος στη συχνότητα (16 GHz), και πολύ μικρό Rise Time. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του που αφορούν την ευκολία χειρισμού του, την αποθήκευση και μεταφορά δεδομένων, φαίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: 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 | ±1% |
| Σύζευξη εισόδου | DC, GND |
| Αντίσταση εισόδου | 50 Ω ± 2% |
| Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω | 2 mV/div έως 1 V/div |
| Κάθετη ανάλυση | 8 bit |
| Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω | ±2 V _{max} @≤100mV/div, 5.5V _{rms} @>100mV/div |
| Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας | 40 GS/sec |

Σημείωση για την 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 ο ακόλουθος.

$$RiseTime_{real} = \sqrt{RiseTime_{measured}^2 - RiseTime_{scope}^2} \quad (3.1)$$

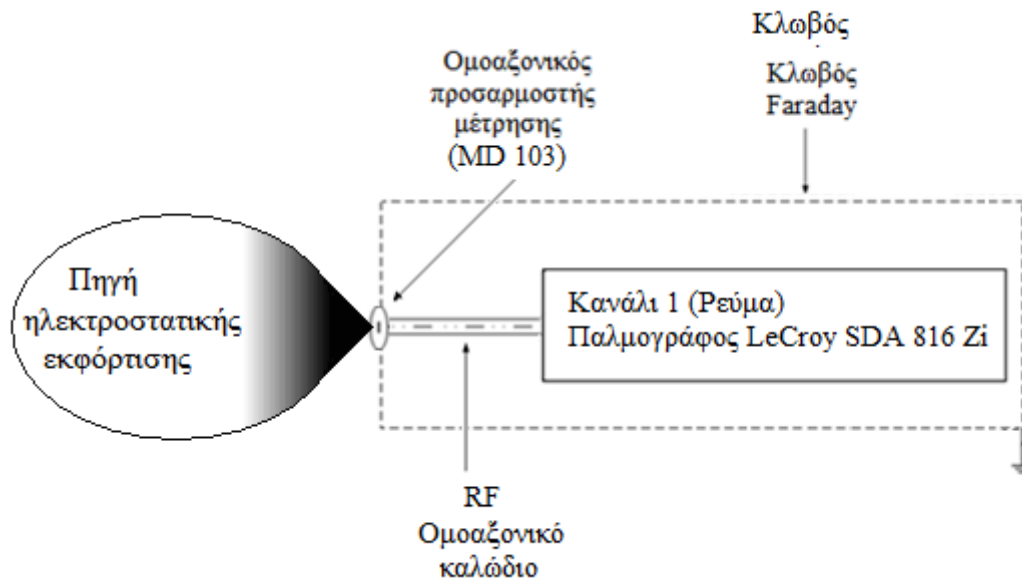
Σχόλιο για τον υπολογισμό του ρεύματος

- [1] Ο τρόπος υπολογισμού της έντασης του ρεύματος σε A, μέσω της ένδειξης τάσης του παλμογράφου, γίνεται δεκαπλασιάζοντας την τιμή της τάσης αυτής (σε V), όπως δείχνεται στο [22].

3.2.7 Κλωβός Faraday

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης αναρτήθηκε σε πλευρικό τοίχωμα κλωβού Faraday. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αναπαραγωγιμότητα των εκφορτίσεων πάνω στο στόχο, δεδομένου του ακλόνητου της βάσης στήριξης, ενώ, το μετρητικό σύστημα, μένει ανεπηρέστο από το εκπεμπόμενο από τη γεννήτρια πεδίο, αφού το πλευρικό τοίχωμα λειτουργεί όπως η κατακόρυφη μεταλλική επιφάνεια που προβλέπεται στο Πρότυπο [24]

Η διάταξη που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο φαίνεται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

3.3 Μετρήσεις

3.3.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας στόχευσαν βασικά στην ενδελεχή μελέτη του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που παράγεται όταν φορτισμένο υπό ορισμένη τάση ανθρώπινο σώμα, εκφορτιστεί πάνω σε γειωμένη συσκευή.

Στην παρούσα προσπάθεια έγινε επαναληπτικά η καταγραφή κυματομορφών ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε πολύ μεγάλο πλήθος ανθρώπινων σωμάτων και για διάφορες τάσεις φόρτισης, με σκοπό την ανάκτηση μιας, όσο το δυνατόν, πιο έγκυρης τέτοιας κυματομορφής όπως αναφέρεται πιο αναλυτικά στην §3.3.2. Η αξιοπιστία των συμπερασμάτων σχετικών με τις κυματομορφές αυτές αναβαθμίζεται όταν στηρίζεται σε μια μεγάλη σειρά από πειράματα, και, υπό αυτή την αρχή, εξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα στην παρούσα διπλωματική.

Στην παράγραφο 3.3.2 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 μετρήσεις έγιναν με τον παλμογράφο SDA 816 Zi της LeCroy (§3.2.6). Στην §3.3.2 εκτίθενται επίσης τα γραφήματα των εν λόγω κυματομορφών. Στόχος των μετρήσεων είναι να ληφθούν οι μέσες καμπύλες εκφόρτισης (βλ. §3.3.2) και από αυτές να ανακτηθούν, μέσω του κώδικα σε Matlab που παρατείνεται στο παράρτημα Π.1, οι συντελεστές των συναρτήσεων μεταφοράς των κυκλωμάτων υπό κατασκευή, διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

3.3.2 Συνδεσμολογία – διαδικασία μετρήσεων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος για την λήψη των μετρήσεων, πρέπει να τονιστεί ότι δεν περιγράφεται στο Πρότυπο [24]. 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 θα εκφορτιστεί 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).

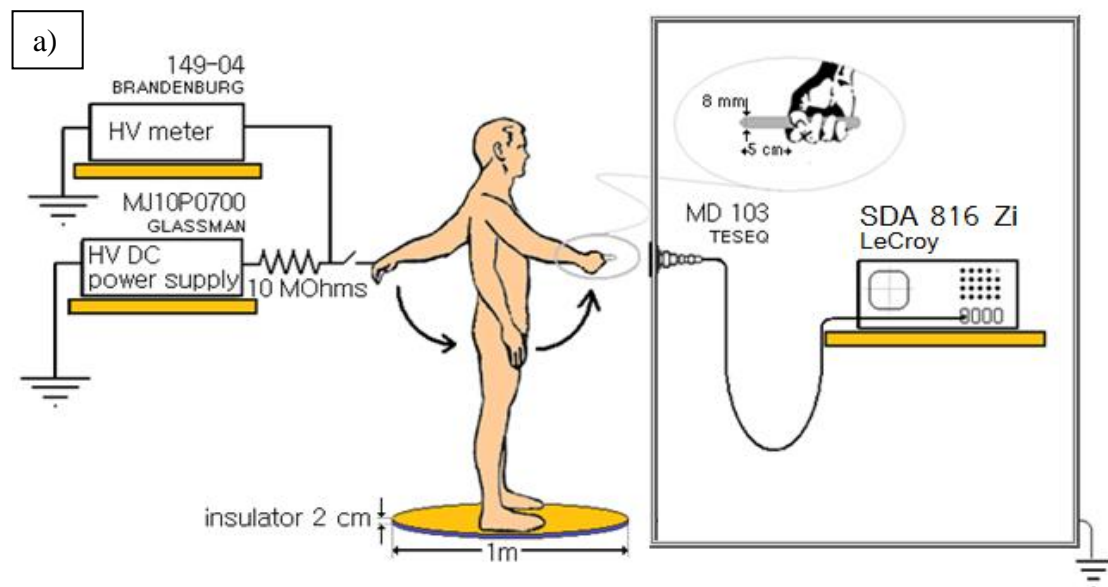
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει ως εξής. Αρχικά το τροφοδοτικό υψηλής συνεχούς τάσης του εργαστηρίου τροφοδοτούνταν με εναλλασσόμενη τάση 230 V/ 50 Hz μέσω του δικτύου της Δ.Ε.Η.. Στην συνέχεια γινόταν η προσαρμογή της τάσης εξόδου του τροφοδοτικού με την βοήθεια ενσωματωμένης μεταβλητής αντίστασης (ποτενσιόμετρο) στην επιθυμητή τιμή της συνεχόμενης 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 στην 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 MΩ (για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του υποκειμένου) (βλ. §3.2.2 και Σχήμα 3.4), 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 αρκεί να είναι της τάξης του 1 sec. Ωστόσο, κατά την διεξαγωγή του πειράματος η φόρτιση γινόταν για χρόνο κοντά στα 3 sec. Η μέτρηση του χρόνου φόρτισης γινόταν με την βοήθεια χρονομέτρου με ακρίβεια μέτρησης δεκάτων δευτερολέπτου. Το υποκείμενο φόρτισης από την στιγμή που άρχιζε να μετράει ο χρόνος ερχόταν σε επαφή με την μεταλλική κυλινδρική επιφάνεια μέσω την ράβδου φόρτισης-εκφόρτισης. Μετά το πέρας 3 sec 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. Ο ελάχιστος χρόνος δειγματοληψίας εξαρτάται από τις δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου παλμογράφου (maximum δυνατή δειγματοληψία). Τα δείγματα αυτά αποθηκεύονταν από τον παρατηρητή για περαιτέρω επεξεργασία στην 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 την διαδικασία εκφόρτισης, και το πείραμα επαναλαμβάνονταν εκ νέου.

Συνοπτικά, τα προηγούμενα φαίνονται στο Σχήμα 3.15.



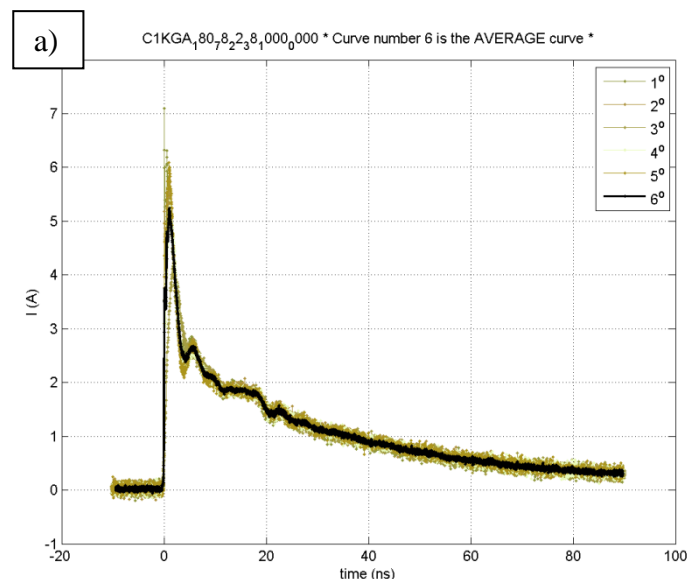
Σχήμα 3.15: Διάταξη φόρτισης-Εκφόρτισης

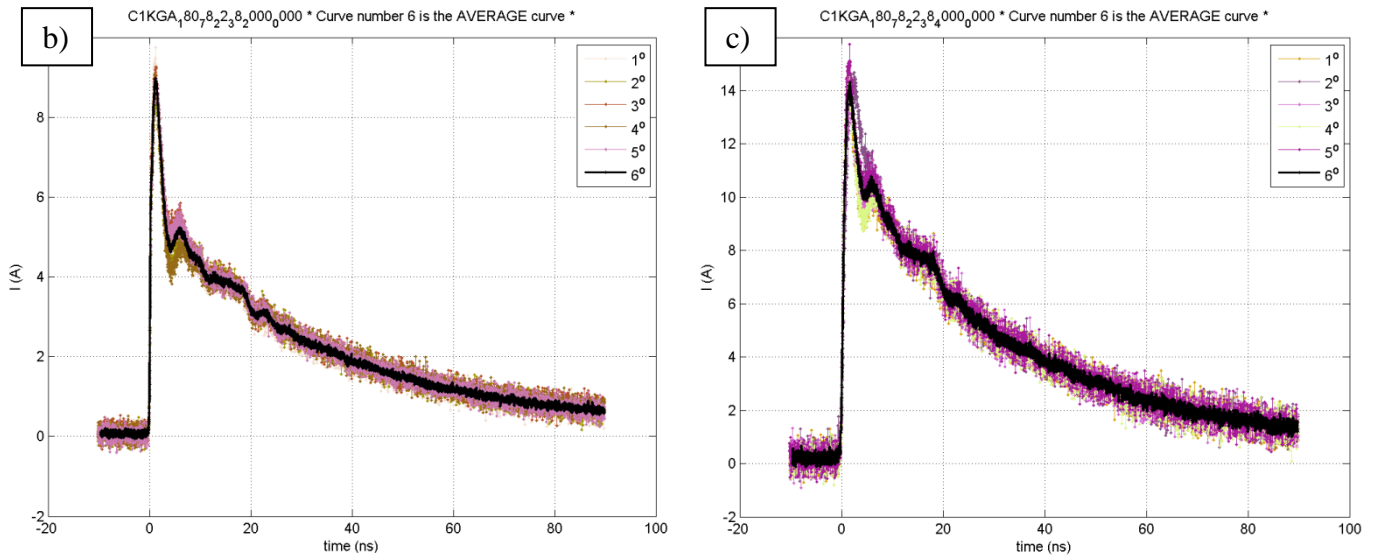
Συνολικά εβδομήντα πέντε (75) άτομα έλαβαν μέρος στο πείραμά μας.

Η συνδεσμολογία και διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αυτή που περιγράφηκε στην §3.3.2, και οι τάσεις φόρτισης ήταν 1 kV, 2 kV, 4 kV. Ελήφθησαν σε ορισμένες περιπτώσεις κάποιες μετρήσεις για τάση φόρτισης 8 kV.

Στα άτομα δόθηκε κωδικός και μετρήθηκε για κάθε πείραμα το ύψος, το βάρος 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 προγραμματιστικού πακέτου Matlab, δημιουργήθηκε κώδικας ήδη από προηγούμενη εργασία [26] ο οποίος με αυτόματο τρόπο επεξεργάστηκε τον μεγάλο, αυτό, όγκο της πληροφορίας και μας έδωσε τιμές μεγεθών και γραφήματα που συσχετίζουν μεγέθη μεταξύ τους.

Το σύνολο των αρχείων των μετρήσεων είναι διαθέσιμο στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Ενδεικτικά παρατείθενται κάτωθι, στο Σχήμα 3.16, οι μετρήσεις για ένα ανθρώπινο σώμα φορτισμένο στα τέσσερα αυτά επίπεδα τάσης.

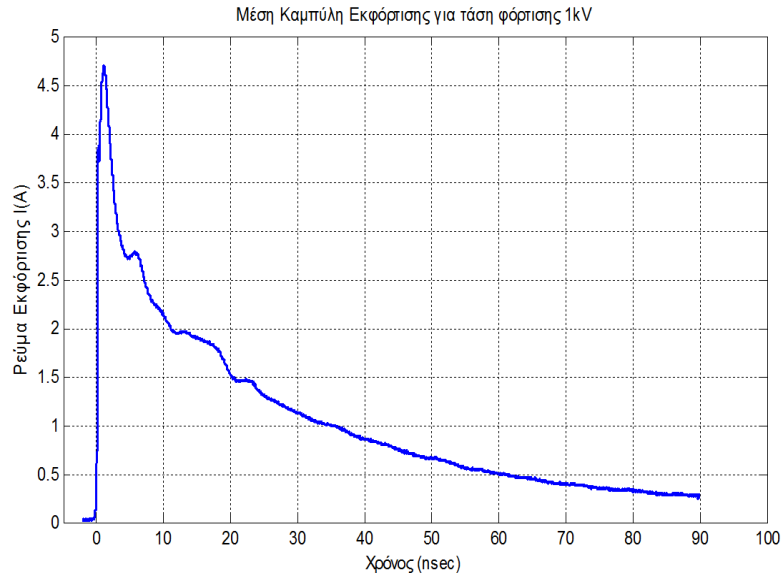




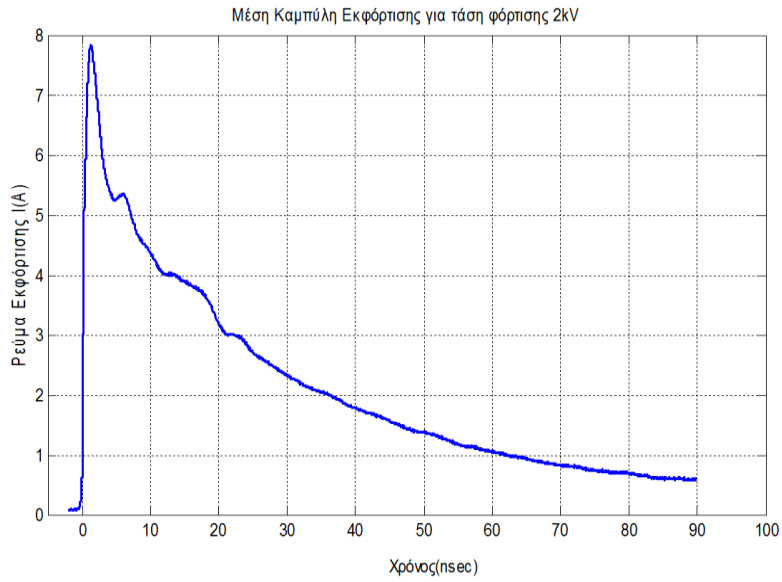
Σχήμα 3.16: Καταγεγραμμένες από τον παλμογράφο κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ανθρώπινου σώματος υπό τάση φόρτισης, a) 1000 V, b) 2000 V και c) 4000 V

Τονίζεται ότι κάθε άτομο υποβλήθηκε για κάθε ένα από τα τρία επίπεδα τάσης σε περίπου πέντε μετρητικές επαναλήψεις. Από τις μετρήσεις αυτές πήραμε την μέση καμπύλη για κάθε άτομο και από αυτές προέκυψαν οι τελικές μέσες καμπύλες για τα τρία επίπεδα τάσης. Οι καμπύλες αυτές που έγιναν με τη βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab και συγκεκριμένα με τον κώδικα του παραρτήματος Π.2 παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.17.

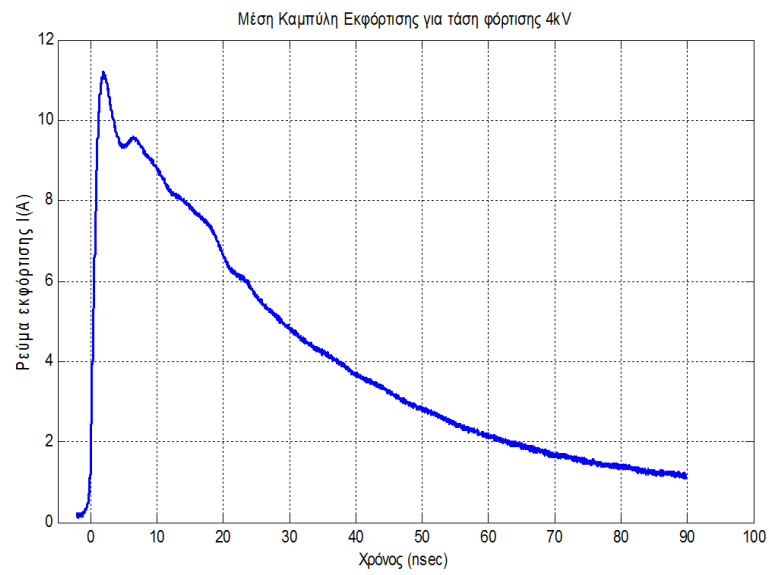
a)



b)



c)



Σχήμα 3.17: Μέσες Καμπύλες Εκφόρτισης για τα επίπεδα τάσης a) 1 kV, b) 2kV και c) 4kV

Κεφάλαιο 4

Ανάπτυξη Προσεγγιστικής Μεθόδου

4.1 Εισαγωγή

Η προβληματική που έχει αναπτυχθεί γύρω από το ζήτημα της σχεδίασης και κατασκευής ενός μοντέλου παραγωγής περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [13, 14, 27 - 31], μπορεί να αντιμετωπισθεί με πολλούς τρόπους. Όπως γίνεται κατανοητό από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (βλ.κεφ.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 [22], εκπέμπεται από το ανθρώπινο σώμα κατά τη διαδικασία της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Άρα, αγνοείται εκούσια εκ των προτέρων η παράμετρος “ηλεκτρομαγνητικό πεδίο” κατά το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στην παρούσα εργασία το ζήτημα ήταν η βελτίωση των τιμών των παραμέτρων της μαθηματικής έκφρασης που περιέχεται στο πρότυπο [24], ώστε αυτή να περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα.

Η απόκτηση 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 εξεύρεση τέτοιων μαθηματικών περιγραφών είναι μια μέθοδος προσέγγισης που παράγει συναρτήσεις της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$. Η μέθοδος στηρίχτηκε αρχικά στην μέθοδο Prony [32] η οποία παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.2, την οποία όμως αναθεώρησε ριζικά διατηρώντας την πλέον μόνο ως αρχική αναφορά, και έτσι αναπτύχθηκε ένα καινούριο εργαλείο προσέγγισης που θα παρουσιαστεί αναλυτικά στην παράγραφο 4.3.

Ας παρατηρηθεί ότι στο παρόν κεφάλαιο κρίνεται σκόπιμο να δοθεί ο θεωρητικός ιστός των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν και όχι τα τελικά αποτελέσματα των εφαρμογών τους, τα οποία θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 5, αφού πρώτα έγινε και η αναλυτική παρουσίαση των μετρήσεων πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινου σώματος (βλ.κεφ.3), οι οποίες αποτελούν τη βάση για μεγάλο μέρος των εφαρμογών αυτών.

4.2 Η 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 fitting μαθηματικής έκφρασης της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$ σε ένα σύνολο σημείων που λαμβάνονται με ίση απόσταση 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:

$$g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(s_i t) \quad (4.1)$$

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

$$g_d(kt) = g(kT), \quad k = 0, 1, \dots, 2n-1 \quad (4.2)$$

Για τον προσδιορισμό των A_i, s_i , της εξίσωσης (4.1) τίθεται:

$$z_i = \exp(s_i T) \quad (4.3)$$

και σχηματίζεται το πολυώνυμο:

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^n (z - z_i) = \sum_{m=0}^n b_m z^m \quad (4.4)$$

$$\text{με } b_0 = 1 \quad (4.5)$$

Από τις σχέσεις (4.1) και (4.4) προκύπτει:

$$\sum_{m=0}^n g[(m+k)T] b_m = \sum_{m=0}^n \sum_{i=1}^n b_m A_i z_i^{m+i} = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{m=0}^n b_m z_i^{m+i} = 0 \quad (4.6)$$

για $k=0,1,\dots,n-1$. Η σχέση (4.6) σε μητρική μορφή, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.4) και (4.5), γράφεται:

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT) \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ g(nT-T) & g(nT) & \cdot & \cdot & \cdot & g(2nT-2T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g(nT) \\ g(nT+T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(2nT-T) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Από τη σχέση (4.7) προκύπτουν οι συντελεστές b_i και από την εύρεση των λύσεων του πολωνύμου $\psi(z)$ οι ρίζες z_i . Οι συντελεστές A_i προκύπτουν από την μητρική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdot & \cdot & \cdot & z_n \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(nT-T) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Εφ' όσον είναι γνωστά τα z_i , τα s_i προκύπτουν από τη σχέση (4.3) ως εξής:

$$s_i = \frac{\text{Ln}(z_i)}{T} \quad (4.9)$$

Η τάξη n της παρεμβολής, και συνεπώς η διάσταση του τετραγωνικού πίνακα της (4.7), καθορίζεται όπως περιγράφεται ακολούθως. Έστω ο πίνακας P της εξίσωσης (4.10)

$$P = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ g(NT-T) & g(NT) & \cdot & \cdot & g(2NT-2T) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Ο πίνακας P της (4.10) 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 $t=0, T, 2T, \dots, (2n-1)T$.

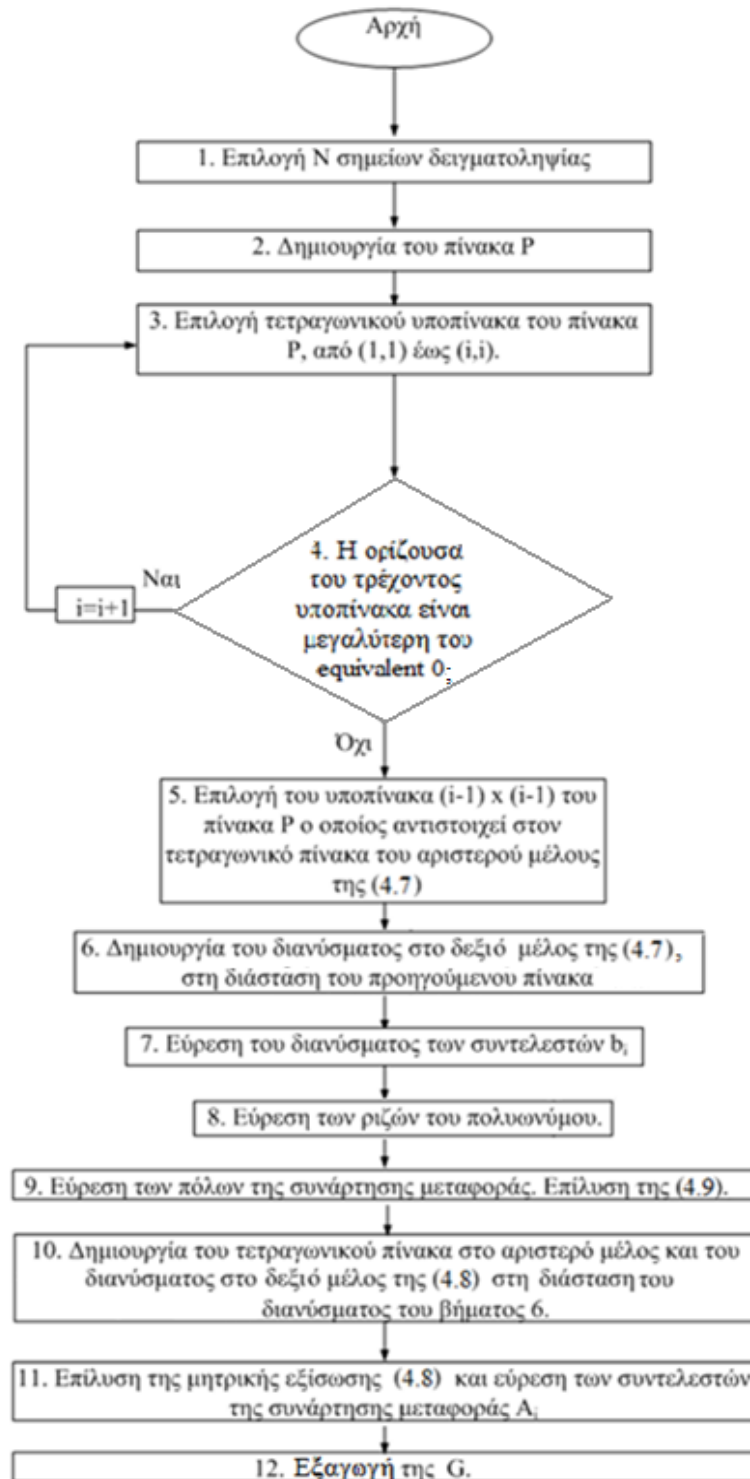
Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται ο υποπίνακας είναι ο ακόλουθος: σαρώνεται η τετραγωνική μήτρα P και βρίσκεται η τιμή της ορίζουσας του κάθε τετραγωνικού υποπίνακα, αρχίζοντας από πάνω αριστερά. Όταν η ορίζουσα πάρει τιμή ίση ή μικρότερη του επιλεγμένου equivalent zero, η σάρωση σταματά και επιλέγεται ο πίνακας που έχει γίνει αποδεκτός ως αυτήν την στιγμή. Με τον προηγούμενο τρόπο και κριτήριο τη μη μηδενική ορίζουσα, ο πίνακας που έχει σχηματιστεί αποτελείται από γραμμικά ανεξάρτητα διανύσματα. Ο πίνακας που επιλέχθηκε είναι ο τετραγωνικός πίνακας που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (4.7). Επιλύεται, τώρα, η εξίσωση (4.7) για την εύρεση των b_i που είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Το μήκος του διανύσματος των b_i είναι ίσο με το βαθμό του πίνακα που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (4.7).

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 [$N_\delta=2(N-1)+1$], 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 αξιοσημείωτου σφάλματος.

Αντίστοιχο πρόβλημα έχουμε και στην εξίσωση (4.8): 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 (4.7) και όχι άλλες, καθώς η τιμή αυτή έχει προεπιλεχθεί, όπως δείχθηκε στην παραπάνω μέθοδο.

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, υπολογιστεί 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 (4.8). 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 4.3.

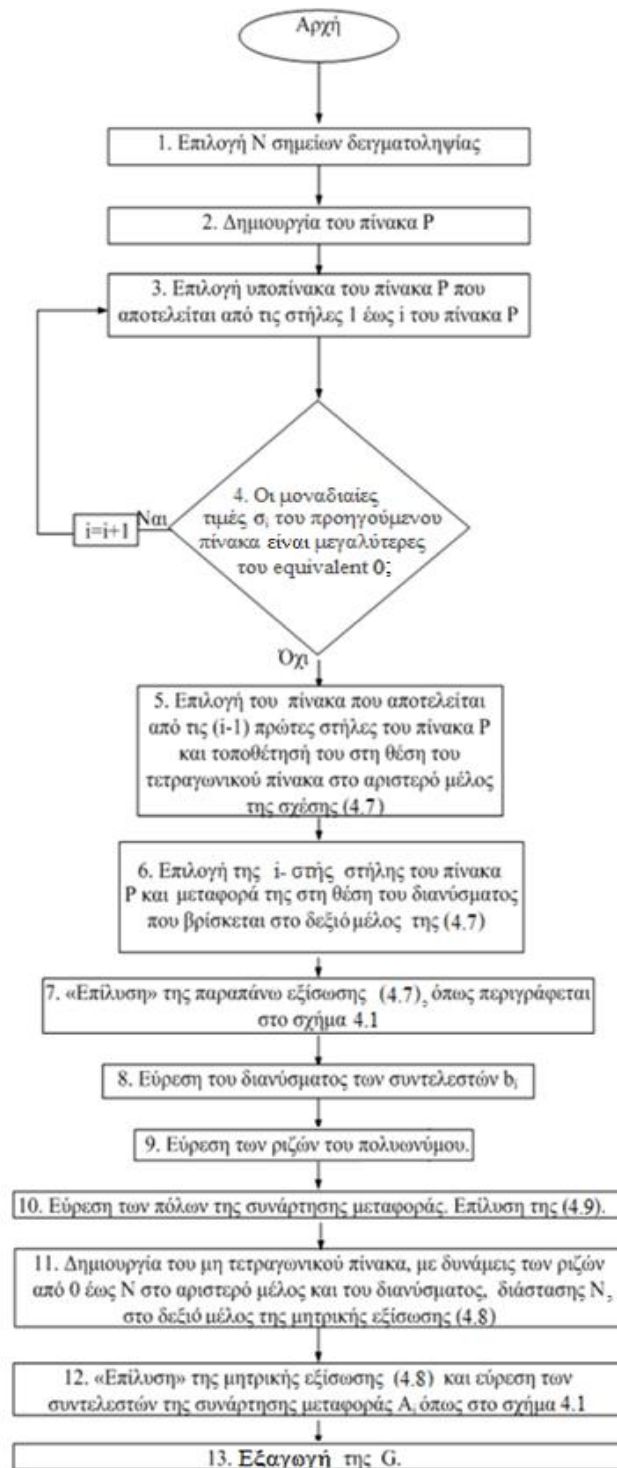


Σχήμα 4.3: Ο αλγόριθμος της μεθόδου Prony

4.3 Ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων (βασισμένων στη μέθοδο Prony)

4.3.1 Α' προσεγγιστική μέθοδος

Στο Σχήμα 4.4 δίνεται το διάγραμμα ροής μιας βελτιωμένης προσεγγιστικής μεθόδου που, παρόλο που στηρίζεται στη μέθοδο Prony, παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στην προσέγγιση εξεζητημένων κυματομορφών, όπως είναι οι stiff equations, δηλαδή εξισώσεις με απομακρυσμένες φυσικές συχνότητες. Τέτοιες είναι και οι κυματομορφές, με τις οποίες ασχολείται, η παρούσα εργασία.



Σχήμα 4.4: Ο αλγόριθμος της A' προσεγγιστικής μεθόδου

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 προηγούμενης μεθόδου, είμαστε αναγκασμένοι να αγνοήσουμε μεγάλο κομμάτι της πληροφορίας. Για παράδειγμα, για την επίλυση της (4.7) 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.

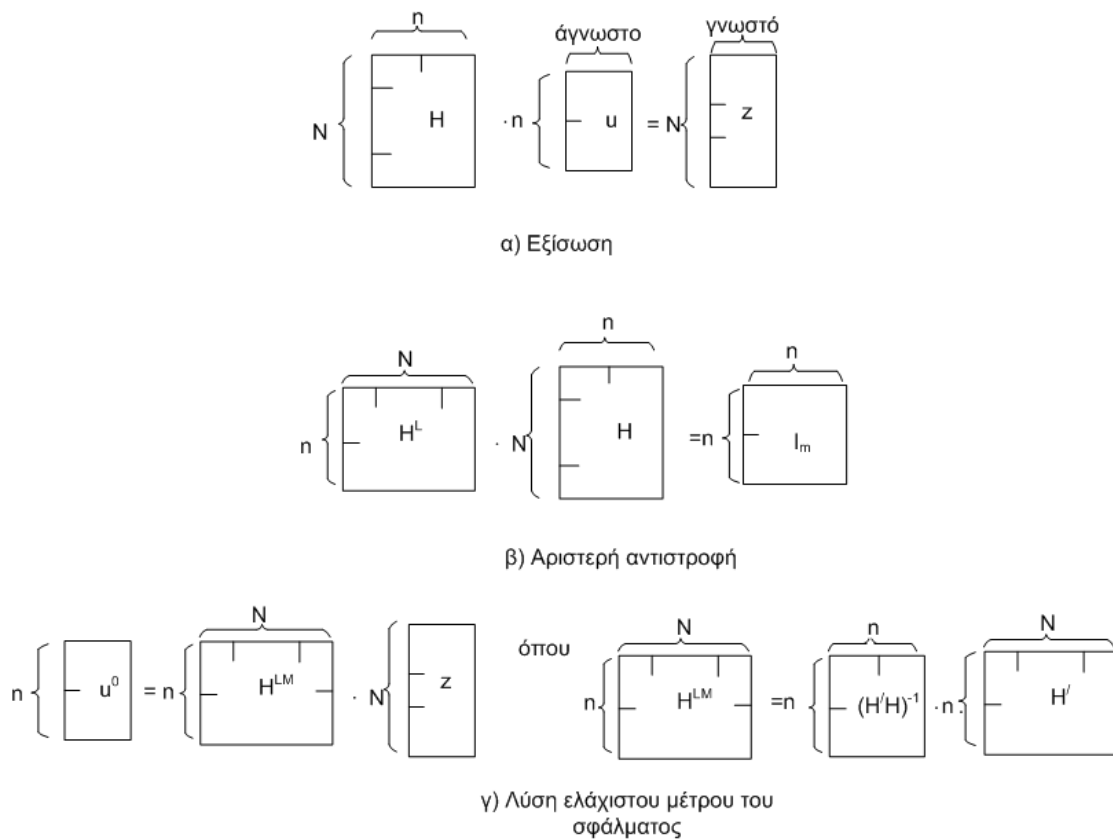
Στην τροποποίηση αυτή γίνεται προσπάθεια για βελτίωση των παραπάνω. Η επίλυση της (4.7) για την εύρεση των συντελεστών του χαρακτηριστικού πολυωνύμου γίνεται ως εξής: η σάρωση στήλη-στήλη του πίνακα P δημιουργεί στο τέλος έναν μη τετραγωνικό πίνακα (πίνακα με περισσότερες γραμμές από στήλες) που αποτελείται από στήλες – διανύσματα γραμμικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι, στην τροποποίηση της μεθόδου, χρησιμοποιούμε ως κριτήριο εξάρτησης των “έως τώρα επιλεγθεισών στηλών” τις ιδιάζουσες τιμές (singular values) του αντίστοιχου πίνακα που σχηματίζεται από αυτές τις στήλες. Οι singular values 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 $0 < \min(\sigma_i) < \text{equivalent zero}$, τότε ο πίνακας αποτελείται από διανύσματα μεταξύ τους εξαρτημένα. 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 (4.7) και παίζει το ρόλο του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (4.7). 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, υπόψη 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 περίπου όλος ο αριθμός των δειγμάτων.

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης με την $(n+1)$ -οστή στήλη στο δεξιό μέλος δίνει το διάνυσμα που περιέχει τα b_i : ας σημειωθεί ότι κάθε μεταφορά άλλου διανύσματος-στήλης $(n+i)$ στο δεξιό μέλος δίνει ένα διάνυσμα-λύση που υποδεικνύει με 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 περισσότερες εξισώσεις από αγνώστους, με τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.5.

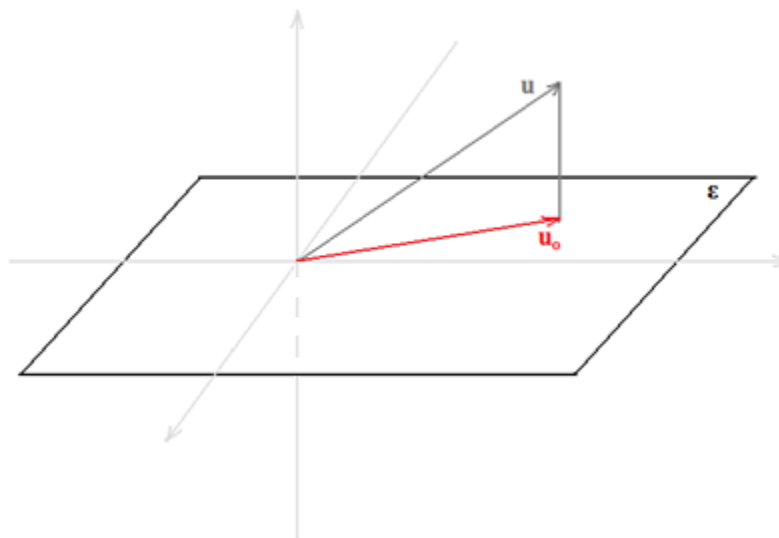


Σχήμα 4.5: Επίλυση συστήματος εξισώσεων με αριθμό εξισώσεων μικρότερο από τον αριθμό των αγνώστων μεταβλητών

Καθώς τα διανύσματα που έχουμε, τώρα, στον πίνακα είναι γραμμικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους, σύμφωνα με την πιο πάνω διαδικασία, καμία από τις εξισώσεις του συστήματος δεν απλοποιείται και, έτσι, το διάνυσμα των λύσεων έχει, όντως, λιγότερες συντεταγμένες από την διάσταση N , του πίνακα H , που φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Επομένως, το διάνυσμα - “λύση” είναι στην πραγματικότητα ένα διάνυσμα που

αν πολλαπλασιαστεί με τη μήτρα H (Σχήμα 4.5.α) δίνει ένα διάνυσμα που, προσεγγίζει το z , ώστε το σφάλμα που έχουμε να έχει το ελάχιστο ευκλείδειο μέτρο.

Ένα ανάλογο στις τρεις διαστάσεις - για να γίνει κατανοητή η διαδικασία - θα ήταν να προσπαθήσουμε να δώσουμε μια λύση σε τρισδιάστατο πρόβλημα, με δυνατές λύσεις καθηλωμένες σε επίπεδο ε . Συνεπώς, η λύση που επιλέγουμε σ' αυτήν την περίπτωση είναι αυτή η οποία πολλαπλασιασμένη με τη μήτρα H από αριστερά (Σχήμα 4.5.α) δίνει την προβολή του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (Σχήμα 4.5.α) στο επίπεδο ε , και άρα αυτή είναι η λύση ελαχίστου μέτρου του σφάλματος. Εδώ η λύση αυτή είναι η u_o (Σχήμα 4.5.γ), η οποία προκύπτει από τον από αριστερά πολλαπλασιασμό της εξίσωσης του Σχήματος 4.1.α με την H^{LM} (η οποία ορίζεται στο Σχήμα 4.5.γ). Τότε αυτή μετατρέπεται στην εξίσωση του Σχήματος 4.5.γ και δίνεται η “λύση” u_o . Μια γραφική αναπαράσταση αυτής της διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 4.6

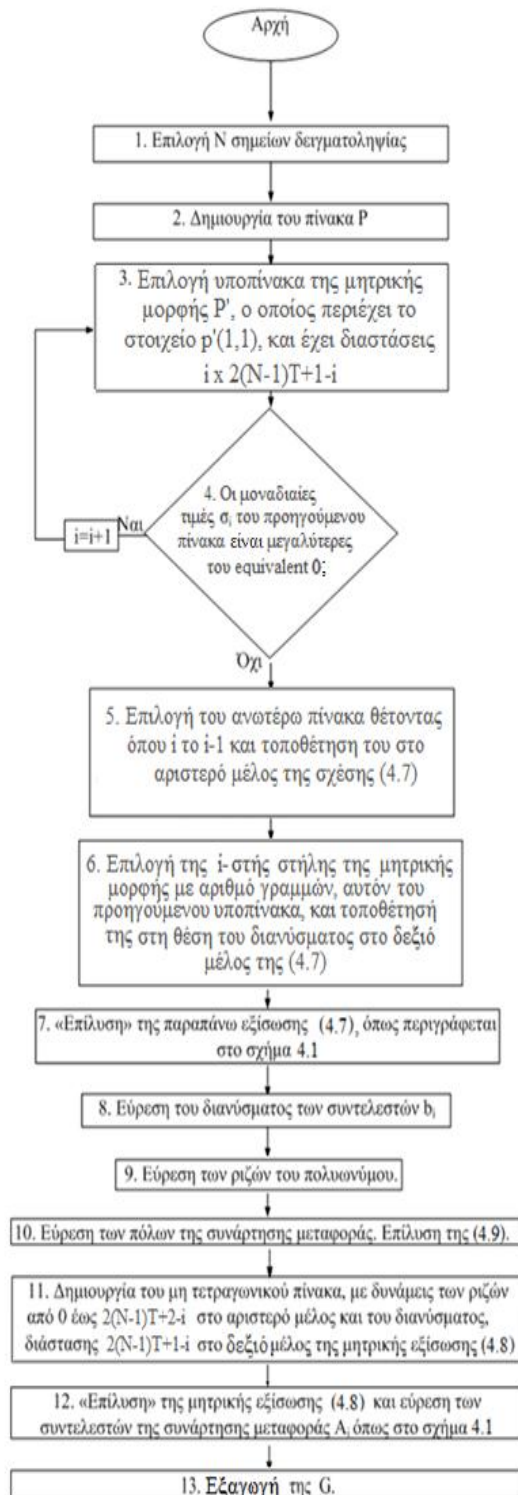


Σχήμα 4.6: Βέλτιστη προσέγγιση του διανύσματος u με διάνυσμα u_o του επιπέδου ε

Ομοίως επιλύεται και η εξίσωση (4.8). Οι δυνάμεις στις οποίες υψώνονται οι ρίζες φτάνουν μέχρι το πλήθος των σημείων παρεμβολής. Άρα δημιουργείται, και εδώ, ένας μη τετραγωνικός πίνακας στο αριστερό μέλος και ένα σύστημα που είναι της μορφής του Σχήματος 4.5.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 (4.1).

4.3.2 Β' προσεγγιστική μέθοδος

Στο Σχήμα 4.7 δίνεται το διάγραμμα ροής της δεύτερης βελτιωμένης προσεγγιστικής μεθόδου. Η δεύτερη προσεγγιστική μέθοδος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από την Α' προσεγγιστική μέθοδο.



Σχήμα 4.7: Ο αλγόριθμος της Β' προσεγγιστικής μεθόδου

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 (4.11).

$$P' = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g(NT-T) & g(NT) & \cdot & \cdot & g(2NT-2T) \\ g(NT) & \cdot & \cdot & \cdot & x \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & g(2NT-2T) & x & \cdot & \cdot \\ g(2NT-2T) & x & x & \cdot & x \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Για τον σχηματισμό πίνακα σε αντιστοιχία με τον πίνακα H της A' προσεγγιστικής μεθόδου, ακολουθείται η διαδικασία που φαίνεται στο Σχήμα 4.8.

$$P' = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g(NT-T) & g(NT) & \cdot & \cdot & g(2NT-2T) \\ g(NT) & \cdot & \cdot & \cdot & x \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & g(2NT-2T) & x & \cdot & \cdot \\ g(2NT-2T) & x & x & \cdot & x \end{bmatrix}$$

Σχήμα 4.8: Επιλογή του μη-τετραγωνικού πίνακα της B' προσεγγιστικής μεθόδου

Η επιλογή υποπίνακα - στη θέση του πίνακα H - από τη μητρική μορφή P' με τη διαδικασία «μία γραμμή λιγότερη και μία στήλη περισσότερη κάθε φορά» (Σχήμα 4.3), όσο έχουμε διανύσματα γραμμικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Το κριτήριο για τον τερματισμό της σάρωσης και την επιλογή του υποπίνακα είναι πάλι να ισχύει για τις ιδιάζουσες τιμές (singular values) του, η συνθήκη $0 < \min(\sigma_i) < \text{equivalent zero}$. Με όμοιο τρόπο προς την A' προσεγγιστική μέθοδο σχηματίζεται το διάνυσμα του δεξιού μέλους της (4.7).

Με επιλεγμένο τον πίνακα H , η επίλυση της (4.8) γίνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως στην A' προσεγγιστική μέθοδο, αφού οι διαστάσεις είναι ήδη επιλεγμένες, ίδιες με εκείνες του πίνακα H .

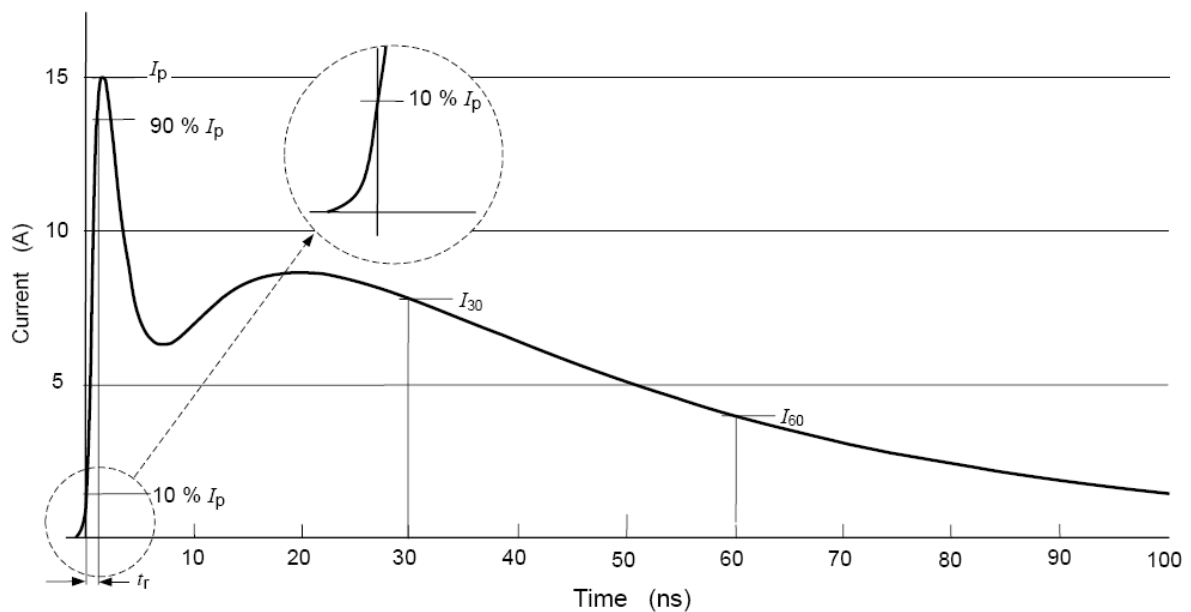
Κεφάλαιο 5

Κυκλωματική Μοντελοποίηση

5.1 Εισαγωγή-Β' Προσεγγιστική Μέθοδος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία βάσει της οποίας θα γίνει ο σχεδιασμός του κυκλώματος το οποίο παράγει κυματομορφή ρεύματος όπως αυτή που περιγράφεται στην σχέση (5.1).

Η απαιτούμενη κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο [24] για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_4}\right) \quad (5.1)$$

όπου:

$$k_1 = \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}\right) \quad (5.2)$$

$$k_2 = \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_4} \cdot \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}\right) \quad (5.3)$$

και

$$\tau_1=1,3$$

$$\tau_2=2$$

$$\tau_3=12$$

$$\tau_4=37,8$$

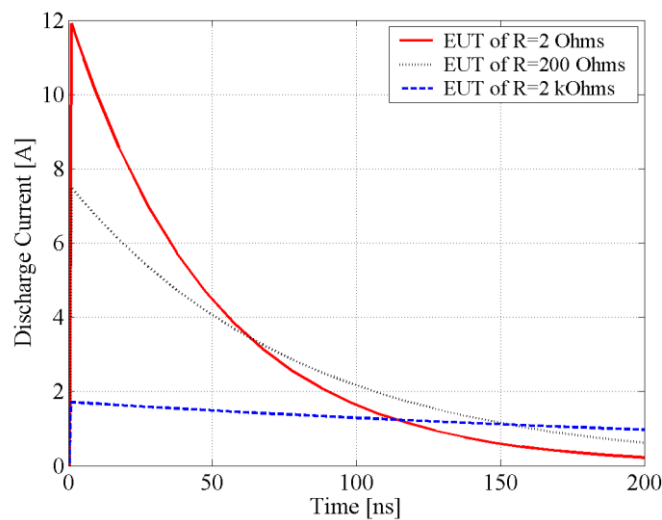
$$i_1=17,5$$

$$i_2=9$$

$$n=1,8$$

Σύμφωνα με την παραπάνω θεωρητική εξίσωση, η οποία παράγει την αντίστοιχη κυματομορφή γίνεται και ο έλεγχος της κυματομορφής που λαμβάνεται από τις πειραματικές μετρήσεις (βλ. Κεφ.4). Στο επερχόμενο αναθεωρημένο Πρότυπο θα υπάρχει και η απαίτηση τα πειραματικά δεδομένα να κυμαίνονται ανάμεσα σε αυτές, για χρόνο από 2 έως 60 ns.

Το πρόβλημα που υπάρχει είναι το εξής. Παρόλο που η παραπάνω κυματομορφή είναι η απαιτούμενη έξοδος, το κύκλωμα της γεννήτριας που περιγράφεται στο υπάρχον Πρότυπο [24] δίνει ως έξοδο την κυματομορφή του σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2: Έξοδος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων όπως αυτή περιγράφεται από το υπάρχον Πρότυπο [24] για διάφορα δοκίμια.

Η ανάγκη συνεπώς, που παρουσιάζεται εδώ είναι η εύρεση και κατασκευή του κυκλώματος, το οποίο παράγει την επιθυμητή έξοδο που είναι η βέλτιστη εξίσωση (σχέση (5.1)) και αντιστοιχεί στο γράφημα του σχήματος 5.1. Στο κεφάλαιο 4 (§4.3.2) περιγράφηκε η

B' Προσεγγιστική Μέθοδος, η οποία από την εξίσωση της εξόδου ανακτά την συνάρτηση μεταφοράς και ακολούθως υλοποιείται το ζητούμενο κύκλωμα.

Για την εφαρμογή της B' Προσεγγιστικής μεθόδου αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab, το οποίο έχοντας σαν είσοδό του την εξίσωση (5.1), η οποία θεωρείται ως η κρουστική απόκριση του κυκλώματος, για τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων, παράγει σαν έξοδό του τις παραμέτρους A_i και s_i της εξίσωσης (5.4). Δηλαδή βρίσκουμε την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος.

Με μετασχηματισμό Laplace της $g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(s_i t)$ (4.1) λαμβάνουμε τη συνάρτηση

μεταφοράς του ζητούμενου κυκλώματος, όταν γνωρίζουμε την κρουστική του απόκριση:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n A_i \frac{1}{s - s_i} \quad (5.4)$$

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη προσεγγιστική μέθοδος γιατί λαμβάνει υπ' όψιν της "όλη την πληροφορία" από την αρχή, βλ. Σχήμα 4.8, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους που λαμβάνουν λιγότερη. Ακόμη πρέπει να πούμε ότι η δειγματοληψία μας ήταν τέτοια ώστε να "πιάνουμε" κυρίως την αρχή του φαινομένου, δηλαδή από το πρώτο μέχρι και το δεύτερο peak, εφόσον σε αυτή την εργασία είναι η περιοχή με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

5.2 Εύρεση εξίσωσης με την B' Προσεγγιστική Μέθοδο

Για την υλοποίηση της B' προσεγγιστικής μεθόδου αναπτύχθηκε κώδικας σε περιβάλλον Matlab, όπως φαίνεται στο παράρτημα Π.1. Για την προσέγγιση της κρουστικής απόκρισης δικτύου το οποίο παράγει την αντίστοιχη καμπύλη ρεύματος, για κάθε τάσης φόρτισης που λάβαμε υπόψη στην εφαρμογή μας, προέκυψαν οι ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους A_i και s_i . Για την αποφυγή μεταχείρισης αριθμών που εμφανίζουν μεγάλες δυνάμεις του δέκα, πράγμα που θα δυσχέραινε τους υπολογισμούς αλλά θα υποβάθμιζε και την ακρίβεια, οι παρακάτω υπολογισμοί έχουν γίνει λαμβάνοντας ως μονάδα του χρόνου το 1 nsec.

Πίνακας 5.1: Συντελεστές και εκθέτες των εκφράσεων κρουστικής απόκρισης δικτύων, με έξοδο την καμπύλη ρεύματος ESD.

| Τάση φόρτισης | A_i | s_i |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| 1000 V | 3.7664 | -0.0431 |
| | $-1.8861 \pm 0.4149i$ | $-0.5793 \pm 1.2349i$ |
| 2000 V | 6.5216 | -0.0327 |
| | $-3.2620 \pm 3.9196i$ | $-0.6153 \pm 1.3084i$ |
| 4000 V | 10.9876 | -0.0259 |
| | $0.1900 \pm 1.3199i$ | $-0.4273 \pm 1.0628i$ |
| | -4.8003 | -1.1776 |

Σημειώνεται ότι, στο κύκλωμα που θα πραγματοποιήσουμε, θα εφαρμόσουμε βηματική είσοδο, και δεδομένου ότι,

$$Y(s) = G(s) * L\{V_{charge} * u(t)\}, \quad (5.5)$$

όπου $Y(s)$, θεωρούμε την έξοδο του δικτύου προς κατασκευή, $G(s)$ τη συνάρτηση μεταφοράς, και $L\{V_{charge} * u(t)\}$ το μετασχηματισμό Laplace της βηματικής εισόδου, με V_{charge} την τάση φόρτισης $V_{charge} = \{1000 \text{ V}, 2000 \text{ V}, 4000 \text{ V}\}$. Τότε θα είναι,

$$Y(s) = \frac{V_{charge}}{s} G(s) \quad (5.6)$$

\Leftrightarrow

$$G(s) = \frac{s}{V_{charge}} Y(s) \quad (5.7)$$

Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προέκυψαν έτσι, για κάθε τάση φόρτισης, φαίνονται στις εξισώσεις (5.8) έως (5.10).

$$G_{1000}(s) = \frac{s}{1000} \cdot \frac{-0.005859s^2 + 3.041s + 6.957}{s^3 + 1.202s^2 + 1.910s + 0.080} \quad (5.8)$$

$$G_{2000}(s) = \frac{s}{2000} \cdot \frac{-0.0023184s^2 - 6.459s + 13.170}{s^3 + 1.263s^2 + 2.131s + 0.068} \quad (5.9)$$

$$G_{4000}(s) = \frac{s}{4000} \cdot \frac{6.567s^3 + 21.530s^2 + 22.650s + 16.910}{s^4 + 2.058s^3 + 2.371s^2 + 1.605s + 0.040} \quad (5.10)$$

Αν γράψουμε τις παραπάνω σχέσεις, στην (πιο εύχρηστη) παραγοντοποιημένη μορφή, θα έχουμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{1000}(s) = \frac{s}{1000} \cdot \frac{-0.005859(s - 521.239)(s + 2.278)}{(s + 0.043)(s^2 + 1.159s + 1.861)} \\ \text{ή διώχνοντας το “-”, θεωρώντας ανεστραμμένη} \\ \text{πολικότητα στην τάση εισόδου,} \\ G_{1000}(s) = \frac{s}{1000} \cdot \frac{0.005859(s - 521.239)(s + 2.278)}{(s + 0.043)(s^2 + 1.159s + 1.861)} \end{array} \right. \quad (5.11)$$

$$\text{και έστω } K_{1000} = \frac{0.005859}{1000} \quad (5.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{2000}(s) = \frac{s}{2000} \cdot \frac{-0.0023184(s - 2.037)(s + 2787.915)}{(s + 0.032)(s^2 + 1.231s + 2.090)} \\ \text{ή διώχνοντας το “-”, θεωρώντας ανεστραμμένη} \\ \text{πολικότητα στην τάση εισόδου,} \\ G_{2000}(s) = \frac{s}{2000} \cdot \frac{0.0023184(s - 2.037)(s + 2787.915)}{(s + 0.032)(s^2 + 1.231s + 2.090)} \end{array} \right. \quad (5.13)$$

$$\text{και έστω } K_{2000} = \frac{0.0023184}{2000} \quad (5.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{4000}(s) = \frac{s}{4000} \cdot \frac{6.567(s + 2.254)(s^2 + 1.024s + 1.142)}{(s + 1.178)(s + 0.026)(s^2 + 0.855s + 1.312)} \end{array} \right. \quad (5.15)$$

$$\text{έστω } K_{4000} = \frac{6.567}{4000} \quad (5.16)$$

Η αλλιώς,

$$G_{1000}(s) = g_{1000}^I(s) \cdot g_{1000}^{II}(s), \quad (5.17)$$

$$\text{Όπου } g_{1000}^I(s) = k_{1000}^I \cdot \frac{s - 512.239}{s + 0.043}, \text{ και} \quad (5.18)$$

$$g_{1000}^{II}(s) = k_{1000}^{II} \cdot \frac{s^2 + 2.278 \cdot s}{s^2 + 1.159 \cdot s + 1.861}, \text{ και} \quad (5.19)$$

$$k_{1000}^I \cdot k_{1000}^{II} = K_{1000} \quad (5.20)$$

$$G_{2000}(s) = g_{2000}^I(s) \cdot g_{2000}^{II}(s), \quad (5.21)$$

$$\text{Όπου } g_{2000}^I(s) = k_{2000}^I \cdot \frac{s - 2.037}{s + 0.03269}, \text{ και} \quad (5.22)$$

$$g_{2000}^{II}(s) = k_{2000}^{II} \cdot \frac{s^2 + 2787.915 \cdot s}{s^2 + 1.231 \cdot s + 2.090}, \text{ και} \quad (5.23)$$

$$k_{2000}^I \cdot k_{2000}^{II} = K_{2000} \quad (5.24)$$

$$G_{4000}(s) = g_{4000}^I(s) \cdot g_{4000}^{II}(s) \cdot g_{4000}^{III}(s), \quad (5.25)$$

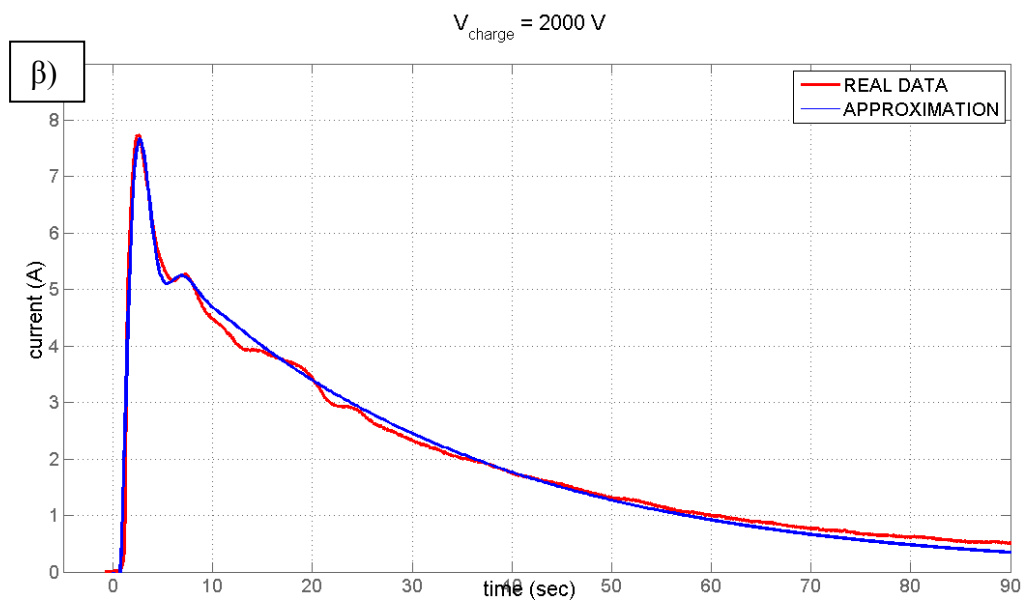
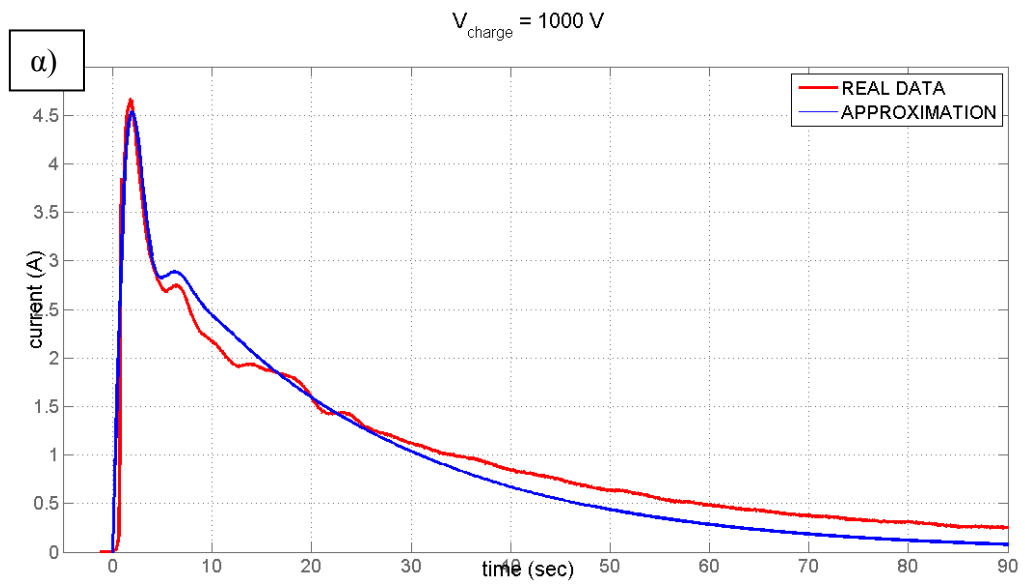
$$\text{Όπου } g_{4000}^I(s) = k_{4000}^I \cdot \frac{s + 2.254}{s + 1.178}, \text{ και}$$

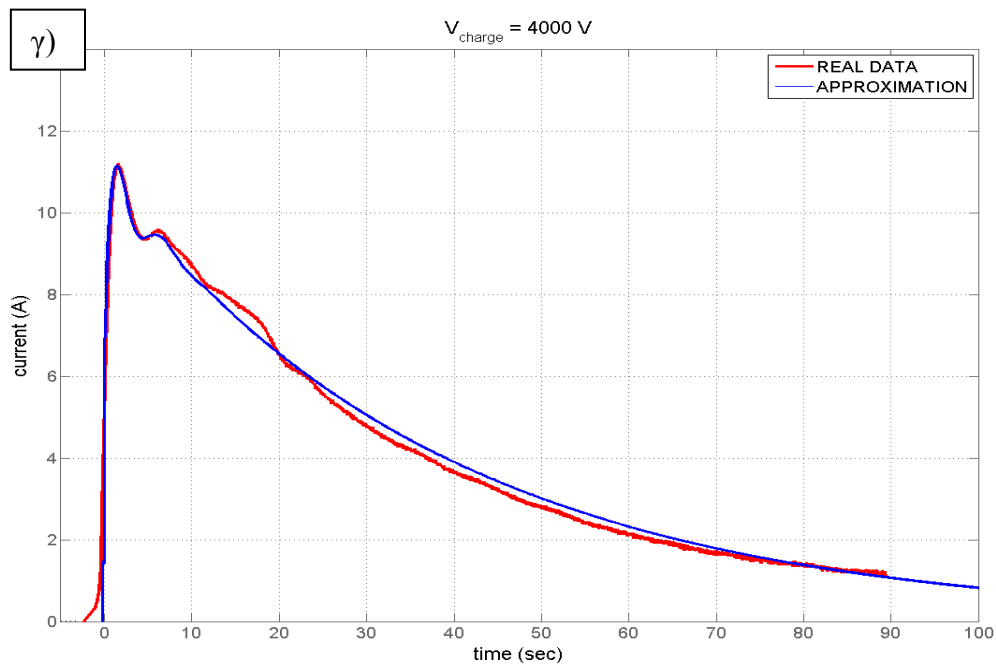
$$g_{4000}^{II}(s) = k_{4000}^{II} \cdot \frac{s}{s + 0.026}, \text{ και} \quad (5.26)$$

$$g_{4000}^{III}(s) = k_{4000}^{III} \cdot \frac{s^2 + 1.024 \cdot s + 1.142}{s^2 + 0.855 \cdot s + 1.312}, \text{ και} \quad (5.27)$$

$$k_{4000}^I \cdot k_{4000}^{II} \cdot k_{4000}^{III} = K_{4000} \quad (5.28)$$

Έγινε προσπάθεια να κρατηθεί η τάξη της προσέγγισης μικρή την ίδια στιγμή που θα προσεγγίζει με ικανοποιητικό τρόπο τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι αν είχε εκλεγεί μια πιο αυστηρή προσέγγιση (μικρότερο equivalent zero – βλ. Π.1), θα είχαν εξαχθεί περισσότερα A_i και s_i . Σε αυτήν την περίπτωση θα είχαμε μεγάλες και δύσχρηστες εκφράσεις για την κρουστική απόκριση που θα υπονόμευαν τις προσπάθειες κυκλωματικής υλοποίησης που εκτίθενται στην παράγραφο §5.3. Οι ανωτέρω προσεγγίσεις είναι πολύ καλά προσαρμοσμένες στα πειραματικά δεδομένα, και αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



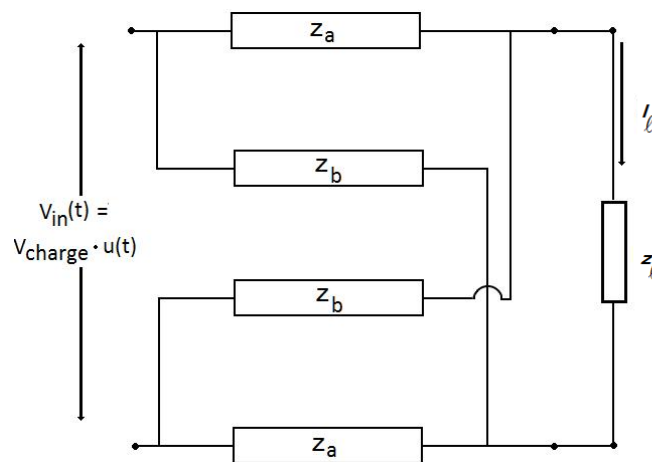


Σχήμα 5.3: Τα πειραματικά μας δεδομένα σε κοινό γράφημα με τις προσεγγίσεις που προέκυψαν από την προσεγγιστική μέθοδο. Οι καμπύλες ρεύματος αντιστοιχούν σε τάση φόρτισης
 α) 1000 V, β) 2000 V, και γ) 4000 V

5.3 Κυκλωματικά μοντέλα – Υλοποίηση

Οι συναρτήσεις μεταφοράς $G_i(s) |_{i=\{1000\text{ V}, 2000\text{ V}, 4000\text{ V}\}}$ των εξισώσεων (5.17), (5.21) και (5.25) θα μοντελοποιηθούν σαν αλυσωτή σύνδεση των κυκλωμάτων (βαθμίδων) με συναρτήσεις μεταφοράς τις εξισώσεις $g_i^j |_{i=\{1000\text{ V}, 2000\text{ V}, 4000\text{ V}\}, j=\{I, II, III \text{ (για } i=4000\text{ V)}\}}$.

Η μορφή που έχουν οι τελευταίες εύκολα παραπέμπει στην υλοποίησή τους. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κάθε βαθμίδας είναι αυτή του συμμετρικού κικλιδωτού δικτύου (lattice) που φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 5.4 : Το συμμετρικό κικλιδωτό δίκτυο (lattice)

Κάθε βαθμίδα λοιπόν θα αντιστοιχεί σε ένα δίθυρο κύκλωμα με κέρδος τάσης

$$K_v = \frac{z_{21} \cdot z_\ell}{\Delta_z + z_{11} \cdot z_\ell} \quad (5.29)$$

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 πρότυπο EN 61000-4-2 [24] και ίσο με $z_\ell = 2 \Omega$.

Για τις παραμέτρους της μήτρας συνθέτων αντιστάσεων για τη συνδεσμολογία lattice ισχύουν ακόμη τα εξής:

$$z_{11} = \frac{Z_a + Z_b}{2} = z_{22} \quad (5.30)$$

$$z_{12} = \frac{Z_b - Z_a}{2} = z_{21} \quad (5.31)$$

όπου Z_a και Z_b και οι αντιστάσεις του συμμετρικού lattice που φαίνονται στο Σχήμα 5.4, καθώς επίσης και ότι

$$Z_a \cdot Z_b = z_\ell^2 \quad (5.32)$$

Η σχέση (5.32) εξασφαλίζει ότι κάθε βαθμίδα της αλυσωτής σύνδεσης θα “βλέπει” αντίσταση εισόδου $z_{in} = z_\ell$

και συνεπώς οι συναρτήσεις μεταφοράς των επιμέρους βαθμίδων μπορούν να πολλαπλασιαστούν.

Για $z_\ell = 2 \Omega$, αντικαθιστώντας τις (5.30) και (5.31) στην (5.29) και χρησιμοποιώντας την (5.32) προκύπτει ότι

$$K_v = \frac{z_{21} \cdot z_\ell}{\Delta_z + z_{11} \cdot z_\ell} = \frac{2 - Z_a}{2 + Z_a} \quad (5.34)$$

$$\text{Αν θέσουμε στην τελευταία } K_v = g \quad (5.35)$$

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

$$Z_a = 2 \cdot \frac{1 - g}{1 + g} = 2 \cdot \frac{\text{den} - \text{num}}{\text{den} + \text{num}} \quad (5.36)$$

όπου με num , den συμβολίζουμε τον αριθμητή και τον παρονομαστή αντίστοιχα κάθε βαθμίδας με συνάρτηση μεταφοράς g .

$$\text{Συνεπώς από την (5.32) έχουμε ότι } Z_b = \frac{4}{Z_a} = 2 \cdot \frac{1 + g}{1 - g} = 2 \cdot \frac{\text{den} + \text{num}}{\text{den} - \text{num}} \quad (5.37)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι οι σταθερές k_i^j , $i = \{1000, 2000, 4000\}$ και $j = \{I, II, III\}$ που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω είναι απαραίτητο να ικανοποιούν κάποιες προϋποθέσεις – περιορισμούς ώστε να είναι υπαρκτή και πραγματοποιήσιμη η υλοποίηση με συνδεσμολογία lattice δικτύου.

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 :

- . Είναι πραγματικές για s πραγματικό
- . $\text{Re}\{Z(s)\} \geq 0$ όταν $\text{Re}\{s\} \geq 0$

Παράδειγμα I

Για παράδειγμα στα 1000V, η πρώτη βαθμίδα έχει συνάρτηση μεταφοράς

$$g_{1000}^I(s) = k_{1000}^I \cdot \frac{s-a}{s+b} \text{ με } a = 512.239 \text{ και } b = 0.043 \quad (5.38)$$

$$\text{και άρα από την σχέση (5.36) } Z_a = 2 \cdot \frac{1-g}{1+g} = 2 \cdot \frac{\text{den} - \text{num}}{\text{den} + \text{num}}$$

προκύπτει ότι

$$Z_a^I = 2 \cdot \frac{s \cdot (1 - k_{1000}^I) + b + k_{1000}^I \cdot a}{s \cdot (1 + k_{1000}^I) + b - k_{1000}^I \cdot a} \quad (5.40)$$

Έτσι, οι περιορισμοί που προκύπτουν για να είναι **p.r.f.** η Z_a^I είναι

$$1 - k_{1000}^I \geq 0, \quad b - k_{1000}^I \cdot a \geq 0 \quad (5.41)$$

$$\Rightarrow k_{1000}^I \leq \frac{b}{a} \Rightarrow k_{1000}^I \leq 0.000082659$$

Εμείς επιλέξαμε $k_{1000}^I = 8 \cdot 10^{-5}$.

Η τιμή του k_{1000}^{II} της σχέσης (5.19) για την Z_a^{II} της δεύτερης βαθμίδας λοιπόν, εκλέγεται τόση ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη $k_{1000}^I \cdot k_{1000}^{II} = K_{1000}$ (5.20), 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 πολώνυμο $p = \text{nom}(Z_a^j) + \text{den}(Z_a^j)$ είναι Hurwitz, δηλαδή οι ρίζες του είναι όλες τοποθετημένες στο αριστερό ημιεπίπεδο. (5.42)

γ. $\text{Re}\{Z(j\omega)\} \geq 0$ για κάθε ω .

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 $p(s) = 4 \cdot s + 0.1724$ 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 :

- Δεν έχουν πόλους ή μηδενικά επάνω στον φανταστικό άξονα
- Έχουν πεπερασμένες πραγματικές θετικές τιμές στα σημεία $s = 0$ και $s = \infty$
- Σε ένα πεπερασμένο αριθμό συχνοτήτων ω_i ισχύουν $\text{Re}\{Z_{a,b}(j\omega_i)\} = 0$

Στην περίπτωση που δεν είναι **minimum function** η συνάρτηση Z , μπορούμε να «αφαιρέσουμε» ένα πραγματικό μέρος ώστε να την καταστήσουμε minimum function. Μια τέτοια διαδικασία παρουσιάζεται στον κώδικα μας στο παράρτημα Π.3.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται 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 υπολογίστηκαν όπως παρουσιάστηκε αμέσως προηγουμένως.

Πίνακας 5.2 : 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

$$g_i^j(s) = k_i^j \cdot \frac{s-a}{s+b} \quad (5.43)$$

όπως είδαμε και παραπάνω καταλήγουν στην μορφή

$$Z_a = 2 \cdot \frac{s \cdot (1 - k_i^j) + b + k_i^j \cdot a}{s \cdot (1 + k_i^j) + b - k_i^j \cdot a} \quad (5.44)$$

ή ισοδύναμα στην μορφή $Z_a = \frac{s \cdot m + n}{s \cdot m' + n'} = \frac{s \cdot m}{s \cdot m' + n'} + \frac{n}{s \cdot m' + n'} = \frac{s}{\frac{1}{L} + \frac{1}{R} \cdot s} + \frac{1}{C \cdot s + \frac{1}{R}}$

(5.45)

εκ των οποίων ο πρώτος όρος είναι ο παράλληλος συνδυασμός RL και ο δεύτερος είναι ο παράλληλος συνδυασμός RC.

Αντίστοιχα, οι βαθμίδες με συνάρτηση της μορφής

$$g_i^j(s) = k_i^j \cdot \frac{a \cdot s^2 + b \cdot s + c}{d \cdot s^2 + e \cdot s + f} \quad (5.46)$$

με βάση την σχέση (5.36)

$$Z_a = 2 \cdot \frac{1-g}{1+g} = 2 \cdot \frac{den - num}{den + num}$$

καταλήγουν στην γενική μορφή για τη σύνθετη αντίσταση

$$Z_a(s) = 2 \cdot k_i \cdot \frac{(d - k_i^j \cdot a) \cdot s^2 + (e - k_i^j \cdot b) \cdot s + (f - c)}{(d + k_i^j \cdot a) \cdot s^2 + (e + k_i^j \cdot b) \cdot s + (f + c)} \quad (5.47)$$

Η πραγματοποίηση των ελάχιστων αυτών θετικών συναρτήσεων της (5.47) γίνεται με τη μέθοδο Bott-Duffin. Πριν όμως παρουσιαστεί η μέθοδος σύνθεσης αυτή, απαιτείται η γνώση του ακόλουθου θεωρήματος που οφείλεται στον Richards.

Θεώρημα Richards

Εάν η $Z(s)$ είναι θετική πραγματική, η συνάρτηση

$$R(s) = \frac{k \cdot Z(s) - s \cdot Z(k)}{k \cdot Z(k) - s \cdot Z(s)} \quad (5.48)$$

είναι θετική πραγματική για θετικές τιμές του k και η τάξη της δεν είναι μεγαλύτερη από την τάξη της $Z(s)$. Από την σχέση (5.48) η $Z(s)$ μπορεί να γραφεί

$$\begin{aligned}
 Z(s) &= \frac{k \cdot Z(k) \cdot R(s) + Z(k) \cdot s}{k + s \cdot R(s)} = \frac{k \cdot Z(k) \cdot R(s)}{k + s \cdot R(s)} + \frac{Z(k) \cdot s}{k + R(s)} = \frac{1}{\frac{1}{Z(k) \cdot R(s)} + \frac{s}{k \cdot Z(k)}} + \frac{1}{\frac{k}{Z(k) \cdot s} + \frac{R(s)}{Z(k)}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{Z(k) \cdot R(s)} + \frac{s}{k \cdot Z(k)}} + \frac{1}{\frac{k}{Z(k) \cdot s} + \frac{R(s)}{Z(k)}} \quad (5.49)
 \end{aligned}$$

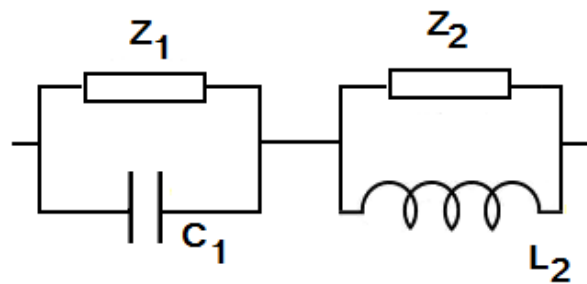
Η σχέση (5.49) αντιστοιχεί σε ένα δίκτυο της μορφής του Σχήματος 5.5 με:

$$Z_1(s) = Z(k)R(s) \quad (5.50)$$

$$Z_2(s) = Z(k)/R(s) \quad (5.51)$$

$$C_1 = 1/[kZ(k)] \quad (5.52)$$

$$L_2 = Z(k)/k \quad (5.53)$$



Σχήμα 5.5 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 $Z\{j\omega_1\} = jX$, στην οποία το X μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Εξετάζονται οι δύο περιπτώσεις χωριστά.

α. περίπτωση θετικού X

Από τη εξίσωση (5.49) λαμβάνεται

$$Z\{j\omega_1\} = jX = \frac{1}{\frac{1}{Z_1(j\omega_1)} + j\omega_1 \cdot C_1} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega_1 \cdot L_2} + \frac{1}{Z_2 \cdot (j\omega_2)}} \quad (5.54)$$

Μια δυνατή λύση της σχέσεως (5.54) είναι όταν

$$\frac{1}{Z_1(j\omega_1)} = \infty \quad (5.55)$$

και

$$\frac{1}{Z_2(j\omega_1)} = 0 \quad (5.56)$$

Από τις σχέσεις (5.50), (5.51) προκύπτει ότι η $R(s)$ πρέπει να έχει ένα μηδενικό στο σημείο $s=j\omega_1$. Αυτό απαιτεί

$$kZ(j\omega_1) - j\omega_1 Z(k) = 0 \quad (5.57)$$

$$\text{Από την σχέση (5.57) λαμβάνεται } Z(j\omega_1)/(j\omega_1) = X/\omega_1 = L_2 = Z(k)/k \quad (5.58)$$

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 υπολογιστούν. 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 την χρησιμοποίηση των αναπτύξεων:

$$\frac{1}{Z_1(s)} = \frac{k_1 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{1}{Z_3(s)} \quad (5.59)$$

και

$$Z_2(s) = \frac{k_2 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + Z_4(s) \quad (5.60)$$

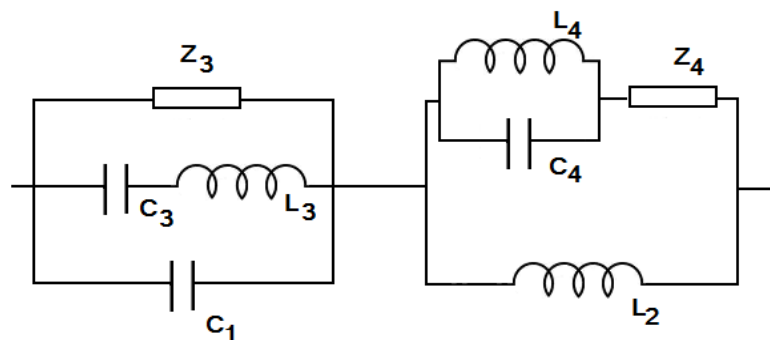
Οι μετακινήσεις αυτές των πόλων αφήνουν τις $Z_3(s)$, $Z_4(s)$ θετικές πραγματικές. Οι τιμές των k_1 και k_2 καθορίζουν τις τιμές των εν σειρά συνδεδεμένων στοιχείων L_4 , C_4 όπως στο σχήμα 5.6. Θα είναι:

$$C_3 = k_1 / \omega_1^2 \quad (5.61)$$

$$L_3 = 1/k_1 \quad (5.62)$$

$$C_4 = 1/k_2 \quad (5.63)$$

$$L_4 = k_2 / \omega_1^2 \quad (5.64)$$



Σχήμα 5.6: 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 (5.59) και (5.60) προκύπτει ότι οι $Z_3(s)$ και $Z_4(s)$ έχουν δύο μηδενικά και δύο πόλους

λιγότερους από την $Z(s)$. 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 (5.49) 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 (5.50) και (5.51) προκύπτει ότι η $R(s)$ πρέπει να έχει ένα πόλο στο $s = j\omega_1$, οπότε:

$$k Z(k) - j\omega_1 Z(j\omega_1) = 0 \quad (5.65)$$

$$k Z(k) = -\omega_1 X \quad (5.66)$$

Συνεπώς το $k Z(k)$ είναι πραγματικό και θετικό. Από την σχέση (5.53) προκύπτει

$$C_1 = -1 / (\omega_1 X) \quad (5.67)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (5.66), για την πραγματική θετική τιμή του k , λαμβάνεται :

$$L_2 = Z(k) / k \quad (5.68)$$

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 $s = j\omega_1$ λαμβάνονται

$$Z_1(s) = \frac{k_1 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + Z_3(s) \quad (5.69)$$

$$\frac{1}{Z_2(s)} = \frac{k_2 \cdot s}{s^2 + \omega_1^2} + \frac{1}{Z_4(s)} \quad (5.70)$$

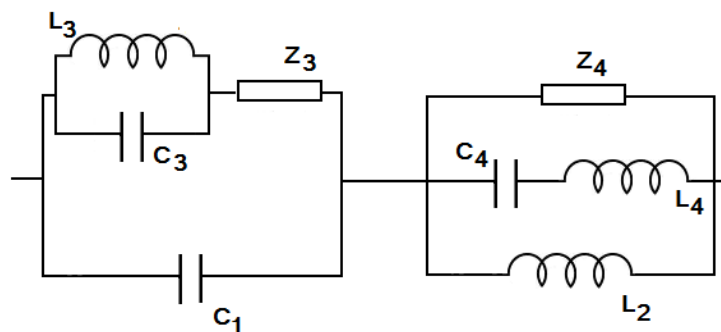
όπου οι $Z_3(s)$ και $Z_4(s)$ είναι θετικές πραγματικές συναρτήσεις. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται το αντίστοιχο του σχήματος 5.6 για την περίπτωση $X < 0$ όπου

$$C_3 = 1 / k_1 \quad (5.71)$$

$$L_3 = k_1 / \omega_1^2 \quad (5.72)$$

$$C_4 = k_2 / \omega_1^2 \quad (5.73)$$

$$L_4 = 1 / k_1 \quad (5.74)$$



Σχήμα 5.7: 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 $g_{1000}''(s)$ (σχ.5.19) η οποία ξαναγράφεται εδώ για λόγους αναγνωσιμότητας και είναι η εξής:

$$g_{1000}''(s) = k_{1000}'' \cdot \frac{s^2 + 2.278 \cdot s}{s^2 + 1.159 \cdot s + 1.861}$$

με $k_{1000}'' = 0.146475 < 0.508779$

που επιτάσσει ο περιορισμός που δόθηκε στον πίνακα 5.2. Έτσι, η εξίσωση της $Z_a(s)$ που προκύπτει από την $g_{1000}''(s)$ είναι η

$$Z_{a''_{1000}}(s) = \frac{0.8535 \cdot s^2 + 0.8250 \cdot s + 1.8605}{1.1465 \cdot s^2 + 1.4923 \cdot s + 1.8605} \quad (5.75)$$

η οποία είναι **p.r.f** αλλά δεν είναι ελάχιστη (minimum). Για τον 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 $\text{Re}\{Z_a(j\omega_I)\} = 0$ για κάποια φυσική συχνότητα ω_I . Με βάση τον κώδικα του παραρτήματος Π.3, υπολογίζεται η τιμή αυτή της Z_{min} που πρέπει να αφαιρεθεί και ευρίσκονται οι τιμές των στοιχείων που περιγράφονται στη μέθοδο Bott-Duffin, δηλαδή τις τιμές των:

$$C_1 = -1/(\omega_I \cdot X), \quad L_2 = Z(k)/k, \quad C_3 = 1/k_1, \quad L_3 = k_1/\omega_I^2, \quad C_4 = k_2/\omega_I^2, \quad L_4 = 1/k_1.$$

αλλά και τις σύνθετες αντιστάσεις Z_3 και Z_4 του Σχήματος 5.7.

Σημειώνουμε εδώ ότι χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι (5.65) έως (5.74) για την περίπτωση αρνητικού X καθώς έτσι προέκυψε αυτό (από τον ίδιο κώδικα του παραρτήματος Π.3). Αρνητικό μάλιστα X προέκυψε και για όλες τις περιπτώσεις που χρειάστηκε να εφαρμόσουμε την μέθοδο Bott-Duffin.

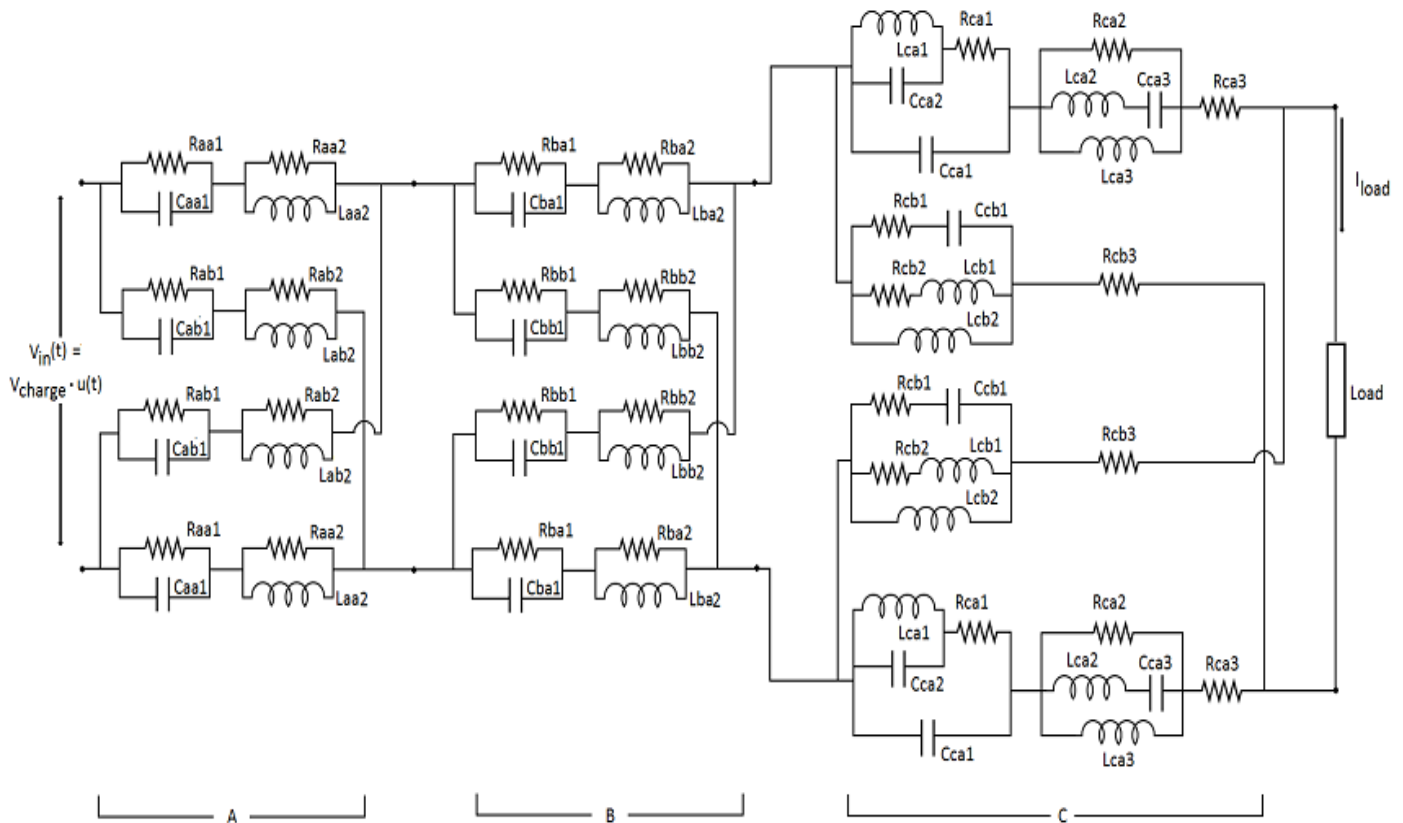
Με ανάλογο τρόπο υλοποιούμε και την σύνθετη αντίσταση $Z_b(s)$.

Συνοψίζοντας λοιπόν, εφαρμόζοντας, όπου χρειάστηκε, είτε τον παράλληλο συνδυασμό 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 την μέθοδο 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 το τελικό μας κύκλωμα για

τα επίπεδα τάσης 1 kV, 2 kV και 4 kV.

Το κύκλωμα



Σχήμα 5.8 : Το τελικό κύκλωμα με την αλυσωτή σύνδεση των κικλιδωτών 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 5.3 έως 5.5. Ας σημειωθεί ότι για τάσεις φόρτισης 1000, και 2000 V δεν υπάρχει η βαθμίδα A, του Σχήματος 5.8, συνεπώς δεν περιέχονται αντίστοιχες τιμές στοιχείων στους πίνακες.

Μετά και την μετατροπή των τιμών των στοιχείων για μονάδα χρόνου το 1 sec, αυτές είναι οι εξής:

Πίνακας 5.3: 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 5.4: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος παραγωγής της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης 2000 V.

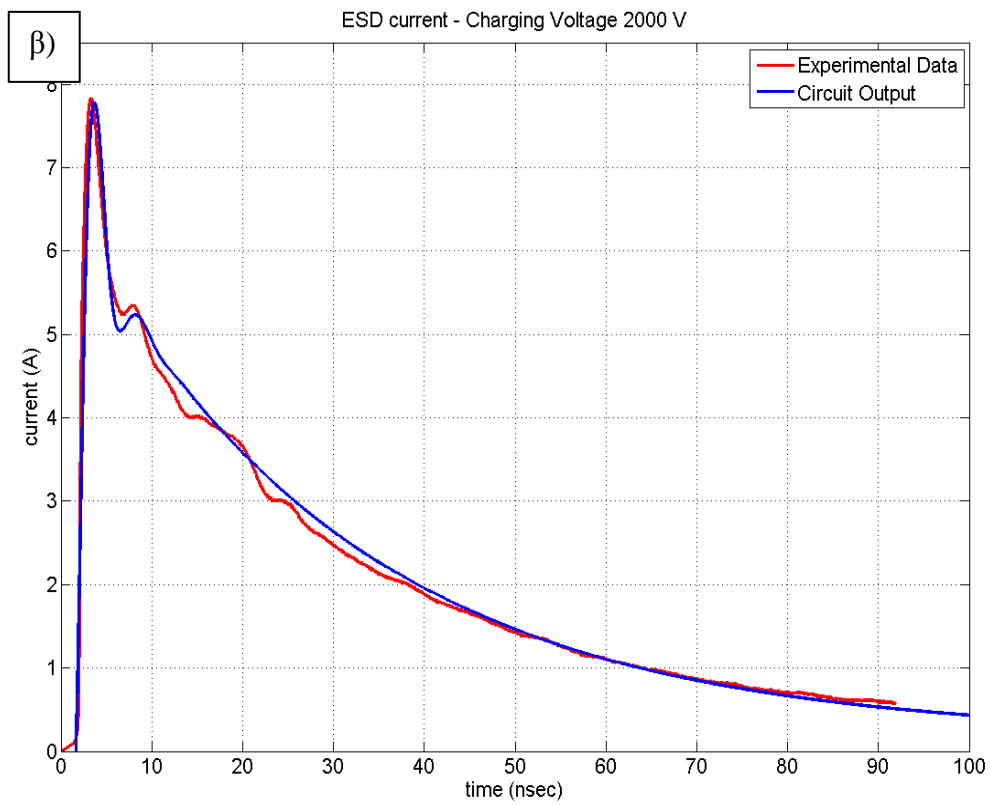
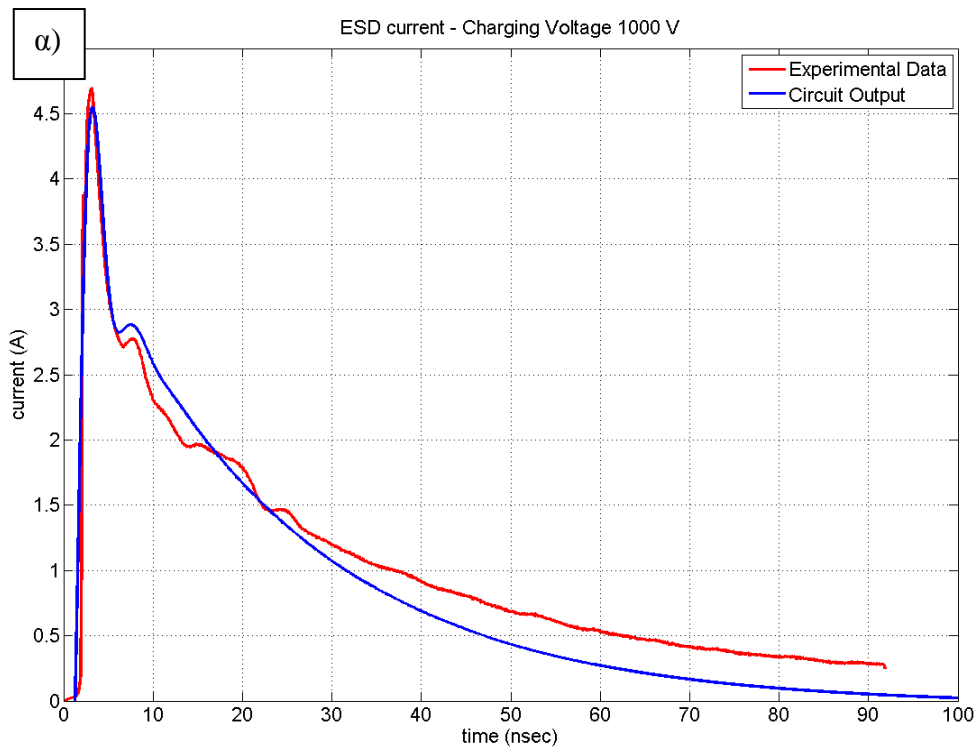
| 2000 V | | Z_a | | | Z_b | | |
|--------|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| A | R_a (Ω) | | | | | | |
| | L_a (H) | | | | | | |
| | C_a (F) | | | | | | |
| 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) | $1.927 \cdot 10^{-6}$ | $4.484 \cdot 10^{-10}$ | $6.860 \cdot 10^{-10}$ | $4.482 \cdot 10^{-10}$ | | |

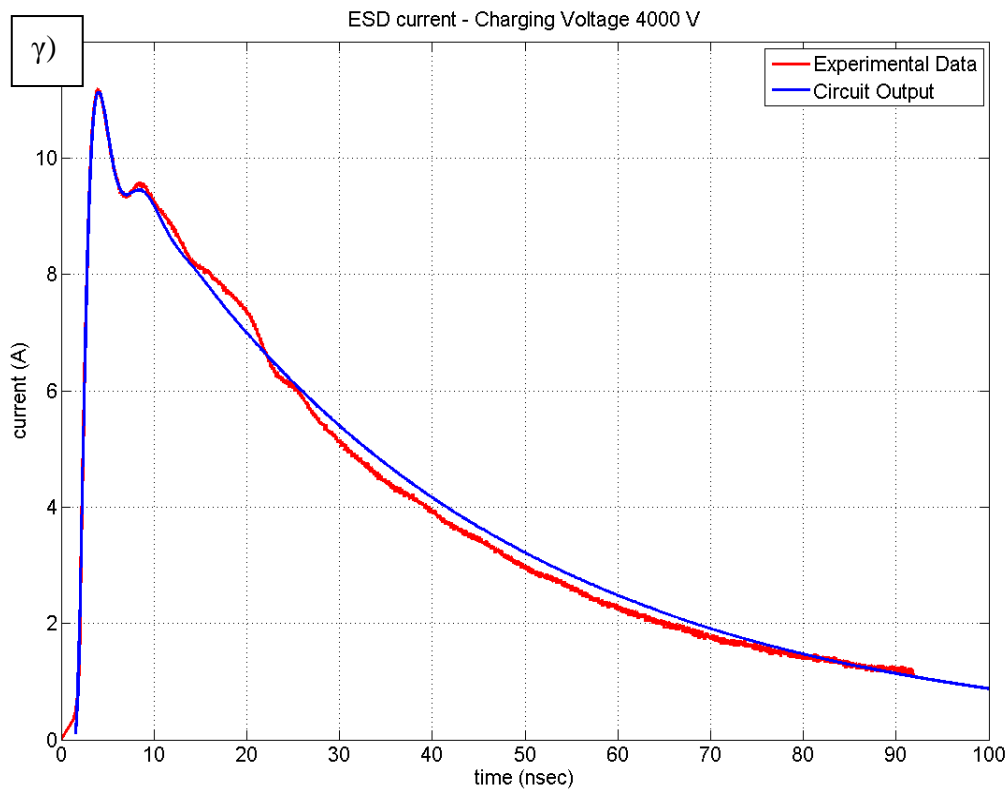
Πίνακας 5.5: Τιμές των στοιχείων του κυκλώματος παραγωγής της καμπύλης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης 4000 V.

| 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) | $3.937 \cdot 10^{-8}$ | $1.296 \cdot 10^{-8}$ | $1.124 \cdot 10^{-8}$ | $1.197 \cdot 10^{-8}$ | | |

5.4 Σύγκριση παραγόμενων κυματομορφών απ' το κύκλωμα με αυτές από τα πειραματικά δεδομένα.

Στην παράγραφο 3.5.2 παρουσιάστηκαν οι μέσες κυματομορφές που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα για τα τρία επίπεδα τάσης. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται σε κοινά γραφήματα τα αποτελέσματα (κυματομορφές) του κυκλώματος της παραγράφου 5.3 και των πειραματικών δεδομένων για τα τρία επίπεδα τάσης:





Σχήμα 5.9 : Οι παραγόμενες καμπύλες ρεύματος από τα σχεδιασθέντα κυκλώματα, για τάσεις φόρτισης α) 1000 V, β) 2000 V και γ) 4000 V

Στο Σχήμα 5.9 βλέπουμε τις εξόδους των κυκλωμάτων που παρουσιάστηκαν μόλις παραπάνω σε κοινά γραφήματα με τις εκφορτίσεις από φορτισμένα ανθρώπινα σώματα υπό αντίστοιχη τάση. Στην παρούσα εργασία έγινε **προσπάθεια ώστε κυκλώματα μικρής τάξης να προσεγγίσουν με επιτυχία τις καμπύλες των πειραματικών δεδομένων.**

Είναι δηλαδή επιλογή να σχεδιαστούν **κυκλώματα τέτοια που να «στοχεύουν» το πρώτο και δεύτερο τοπικό μέγιστο**, παρότι τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν ενδιαφέρουσα συμπεριφορά και πέρα από αυτές τις περιοχές. Βασικά πάντως είναι αυτά τα δύο που καθορίζουν τη συμπεριφορά της καμπύλης και ήταν ο βασικός μας στόχος.

Για συστήματα μικρής τάξης όπως αυτά που κατασκευάσαμε, η μέθοδος που προτείνεται αποδεικνύεται ιδιαίτερος αποδοτική, και προσαρμόζεται πολύ καλά στα πειραματικά δεδομένα. Πρέπει να σημειώσουμε ακόμη πως οι έξοδοι των κυκλωμάτων ταυτίζονται με τις μαθηματικές προσεγγίσεις στα πειραματικά μας δεδομένα.

Κεφάλαιο 6

Η επόμενη μέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση των μετρήσεων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ως αναφορά για τη σχεδίαση αντίστοιχων κυκλωμάτων παραγωγής ρεύματος. Οι μετρήσεις μας ελήφθησαν με ένα πολύ «γρήγορο» παλμογράφο, με εύρος ζώνης 16GHz και Rise Time (10%-90%) 29 ps (real time). Αυτή η τιμή, όπως επισημάνθηκε και στη παρούσα εργασία, είναι κοντά στο χρόνο ανόδου που παρουσίαζε το σήμα μας, κυρίως σε χαμηλές τάσεις φόρτισης (500 ή 100 Volt). Συνεπώς η μέτρησή μας σε αυτή την περιοχή τιμών έχει το χαρακτήρα «κάτω ορίου» και όχι πραγματικής μέτρησης, όταν οι τιμές που μετρώνται είναι περίπου 29 nsec ή μικρότερες.

Στην εργασία μας τονίστηκε αυτό το έλλειμα, που πάντως δεν απαξιώνει την αξία των μετρήσεών μας, καθώς ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας από τους καλύτερους παγκοσμίως.

Σε επόμενη εργασία θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε για τις τιμές χρόνου ανόδου που είναι πολύ κοντά στις προδιαγραφές του παλμογράφου να γίνει μαθηματική ανάλυση ώστε να εξαχθεί το πραγματικό σήμα, με τα χαρακτηριστικά του. Σε κάθε περίπτωση όμως αυτή η διαδικασία θα επισύρει σφάλμα το οποίο μάλιστα θα αυξάνεται όσο το πραγματικό σήμα έχει χρόνο ανόδου πολύ μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτόν του παλμογράφου.

Η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος είναι η χρήση ενός παλμογράφου ακόμα μεγαλύτερου εύρους συχνότητας (πάνω από 25 GHz), ο οποίος θα μπορεί με ασφάλεια να μετρήσει χρόνους μερικών nsec.

Στη σχεδίαση των κυκλωμάτων μας έχουμε στην ουσία δύο βαθμίδες από όμοια κυκλώματα για την προσομοίωση του ρεύματος σε τάσεις φόρτισης 1000 και 2000

Volt, ενώ τρεις αντίστοιχες βαθμίδες για τάση φόρτισης 4000 Volt. Ένα προχώρημα της κυκλωματικής σχεδίασης θα ήταν, να εφαρμοστεί μέθοδος σχεδίασης που να καταλήγει σε μία κοινή μορφή για όλα τα κυκλώματα, που να απαιτείται απλώς η αλλαγή των τιμών των στοιχείων για να αντιστοιχούν στις διαφορετικές τάσεις. Αυτό θα διευκόλυνε πολύ την προσομοίωση καθώς και τις προσπάθειες υλοποίησης με πραγματικά στοιχεία.

Σε μελλοντική δουλειά θα έπρεπε 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 για τη σχεδίαση και προσομοίωση γεννητριών ηλεκτροστατικής φόρτισης, νέας γενιάς. Τέτοιων που να προσομοιώνουν όντως το φυσικό φαινόμενο με μεγαλύτερη συνέπεια. Σε μία τέτοια περίπτωση, κυκλώματα όπως αυτά που προτάθηκαν στην παρούσα εργασία θα μπορούσαν να προσομοιωθούν στο χώρο ώστε να βρεθεί η στερεά μορφή εκείνη που να προσεγγίζει το ρεύμα και το πεδίο των πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου-γειωμένου μετάλλου.

Παράρτημα

Π.1 Κώδικας Matlab για την εύρεση των παραμέτρων της προσεγγιστικής εξίσωσης μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$

Ο κώδικας λαμβάνει ως είσοδο ένα αρχείο ζευγών τιμών χρόνου-ρεύματος, και δίνει ως έξοδο τα A_i και s_i της μορφής $\sum A_i e^{-s_i t}$. Ο κώδικας που φαίνεται παρακάτω αφορά πραγματικό ρεύμα ηλεκροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου φορτισμένο σε τάση 1000 V. Για τη συγκεκριμένη προσέγγιση τίθενται:

$$\text{eqzero}=0.08, \quad (\pi.1)$$

$$\text{και} \quad \text{simeia}=80 \quad (\pi.2)$$

```
clear all;
clc;

load
C:\Users\PAVLOS\Desktop\PAVLOS_KATSIVELIS\FOITHTES\DIPLOMATIKES\GIWRG
OS_PALAIIO\1000\time_current_cool_1000;
TIME_=time_current_cool_1000(:,1);
CURRENT=time_current_cool_1000(:,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 synarthshhs 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 xaraktiristikou poliwnimou
%se afxousa seira
vector_temp=[vector_b ; 1];

%to dianisma pou antistoixei sto xaraktiristiko poliwnimo 8a einai:
poli=flipud(vector_temp);

%oi rizes tou xaraktiristikou 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 proseggis');
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('bima1.txt', 'w');
fprintf(fh4, '%16.16f \n', bima);
% fprintf(fh4, '%16.8f \n', bima);
fclose(fh4);
```

Για την προσέγγιση του ρεύματος εκφόρτισης φορτισμένου ανθρώπου υπό τάση 2000 τίθενται:

$$eqzero=0.19 \quad (\pi.3)$$

και

$$simeia=121 \quad (\pi.4)$$

Για την προσέγγιση του ρεύματος εκφόρτισης φορτισμένου ανθρώπου υπό τάση 4000 τίθενται:

$$eqzero=0.48 \quad (\pi.5)$$

και

$$simeia=74 \quad (\pi.6)$$

Π.2 Κώδικας Matlab για την εύρεση της μέσης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης

```
close all;
% clear all;
clc;
disp('*****
*****');

cd
C:\Users\PAVLOS\Desktop\REAL_ESD_EXPERIMENTS_04_2010\MEASUREMENTS_PRO
CESS
files = dir('*.txt');
TIME_COLUMN(1)=-2;
interval=0.01;
i=1;
TEMP_COLUMN=[];
SUM_COLUMN=[];

while TIME_COLUMN(i)<90
i=i+1;
TIME_COLUMN(i)=TIME_COLUMN(i-1)+interval;
end

sizes=size(TIME_COLUMN);
SUM_COLUMN=zeros(1,sizes(2));
```

```

for i=1:length (NAMES_LIST);
TEMP_DATA=load ([char(NAMES_LIST(i)) '.txt'], 'v1');

    for j=1:length(TIME_COLUMN)
        TEMP_COLUMN(j)=Y_VALUE(TIME_COLUMN(j),
TEMP_DATA(:,1),TEMP_DATA(:,2));
    end
    SUM_COLUMN=SUM_COLUMN+TEMP_COLUMN;

end

CURRENT_COLUMN=SUM_COLUMN/(length (NAMES_LIST));

plot(TIME_COLUMN, CURRENT_COLUMN); grid;

TOTAL_AVERAGE= [TIME_COLUMN' CURRENT_COLUMN'];

```

Π.3 Κώδικας Matlab για τη σύνθεση παθητικού RLC δικτύωματος, που αντιστοιχεί σε δοσμένη συνάρτηση μεταφοράς, για βηματική είσοδο $V_{in}=V_{charge} \cdot u(t)$.

```

clear all;
close all;
format long;

flag=-1;
flag2=-1;
iflag=-1;
COUNT1=0;
LOAD=1;

ag=1;
bg=1.023640541095606;
cg=1.141903361577540;
dg=1;
eg=0.85461676;
fg=1.312235984457836;

K=0.065673;

%===== G2 =====
G2=tf(K*[ag bg cg],[dg eg fg]);
[n,d]=tfdata(G2,'v');
nz=(d-n);
dz=d+n;

%===== ZA =====
Za=tf(nz,dz);
MAX1=max(length(nz),length(dz));
MIN1=min(length(nz),length(dz));
if length(nz)>length(dz)

```

```

        flag=1;
    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
    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
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
    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_ZA(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 παραπάνω είναι αυτή που φαίνεται στο παρακάτω κομμάτι κώδικα 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.

```

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)

```

Βιβλιογραφία

- [1] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [2] Theodore Dangelmayer, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [3] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2001.
- [4] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα”,2001.
- [5] Paul Cartwright, “Electrostatic Hazards in the aerosol industry”, διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp>.
- [6] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.
- [7] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpapr/sfowler/esd97/esd97.htm>.
- [8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, “Dielectric characteristics of materials- Electrostatic Discharge”, November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>.
- [9] Martin Lutz, “The determination of the immunity to electrostatic discharge ‘ESD’ with transient 1000 generator”, EMC Partner, Seminar 1999.
- [10] 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”.

- [11] 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.
- [12] Concettina Buccella “Circuit network analog for ESD current strikes composite structures”, IEEE transactions on magnetic, vol. 38 (1), No. 2, pp. 809-812, 2002.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Greason W.D., “Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge”, Journal of electrostatics, vol. 44, issues 3-4, 1998.
- [19] Amoruso V., Helali M., Lattarulo F., “An improved model of man for ESD applications”, EOS/ESD Symposium, pp. 335 – 343, USA, 1999.

- [20] Giannetti R., Tellini B. “Equivalent network modeling to simulate electrical discharges”, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 971 – 976, 2000.
- [21] 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.
- [22] Γ.Π.Φώτης “Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων: Το παραγόμενο ρεύμα και πεδίο”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.
- [23] 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”, Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, Seoul, Korea, December, 2008
- [24] EN 61000-4-2:2009: “Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part4 - 2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test”, 2009.
- [25] 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.
- [26] Ανδρέας Σολωμού, “Μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούνιος 2011.
- [27] 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.
- [28] 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.

- [29] P.Wilson, M.T.Ma “Fields Radiated by Electrostatic Discharges”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Volume 33, Issue 1, pp. 10-18, 1991.
- [30] Michael Mardiguian “Comments on fields radiated by electrostatic discharges”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 34, No. 1, p. 62, 1992.
- [31] David Pommerenke και Martin Aidam “ESD: Waveform calculation, field and current of human and simulator ESD” Journal of Electrostatics 38, pp 33-51 (1996).
- [32] Τρύφων Κουσιουρής, “Θεωρία Συνθέσεως Δικτύων”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1989.