



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

**ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΕΩΝ:
ΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Π. ΦΩΤΗ

Επιβλέπων: Καθηγητής Ι.Α. Σταθόπουλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΕΩΝ:
ΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ**


ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ


ΓΕΩΡΓΙΟΥ Π. ΦΩΤΗ

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος (επιβλέπων)
Στέφανος Ν. Μανιάς
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής


Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Οκτωβρίου 2006.



Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.




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



Χρήστος Ν. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ελευθερία Χ. Πυργιώτη
Λέκτορας
Πανεπιστημίου Πατρών





.....
Γεώργιος Π. Φώτης

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Π. Φώτης, 2006
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.

Στους γονείς μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή εστιάζει κυρίως στη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, στην εύρεση μιας εξίσωσης, η οποία θα μπορεί να περιγράψει επακριβώς την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, όπως αυτή ορίζεται στο Πρότυπο, καθώς και στην κατασκευή κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που θα παράγει την εν λόγω κυματομορφή ρεύματος.

Απεδείχθη ότι, στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, θα μπορούσε, πιθανότατα, να αποφευχθεί ο αυστηρός ορισμός των διαστάσεων της μεταλλικής επιφάνειας, “τουλάχιστον 1,5 m x 1,5 m” και η περί αυτών αιτίαση να γίνει “τουλάχιστον 1 m x 1 m”. Επίσης, από τα πειράματα, που διεξήχθησαν, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας ή επί μονωτικού υποστρώματος αποδεικνύεται ότι, η ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, στις διάφορες ως προς αυτή κατευθύνσεις, και, κατά συνέπεια, διαφορετικές επαγόμενες τάσεις. Ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχει η γεννήτρια ως προς το δοκίμιο, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα στον ελεγχόμενο ηλεκτροτεχνικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό: ειδικά, όταν η έκβαση των δοκιμών είναι σε οριακό σημείο.

Προσομοιώσεις, που έγιναν με χρήση του προγράμματος PSpice, απέδειξαν ότι, η κυματομορφή του ρεύματος, που παράγεται από την προτεινόμενη από το Πρότυπο γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, είναι διαφορετική από αυτή, που ορίζει το ίδιο Πρότυπο. Εξαιτίας αυτού, κάποιος, που κάνει κυκλωματικές προσομοιώσεις μέσω υπολογιστή και χρησιμοποιεί το κύκλωμα του Προτύπου, εισάγει σφάλμα στα ηλεκτρικά μεγέθη του κυκλώματος, που θέλει να επιλύσει. Προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα, αναπτύχθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος βελτιστοποιεί τις τιμές των παραμέτρων διαφόρων εξισώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και μπορούν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τελικά, αποδείχθηκε ότι, η εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι της μορφής εκείνης, που είχε χρησιμοποιήσει ο Heidler για το κεραυνικό ρεύμα.

Τα πειραματικά δεδομένα για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου δεν κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν στο σύνολό τους, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού χρόνου, που απαιτείται. Γι’ αυτό χρησιμοποιήθηκαν διάφορες συναρτήσεις δειγματοληψίας, για τις οποίες υπήρξαν, αντίστοιχα, διάφορα αποτελέσματα από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου. Τελικά, αποδείχθηκε ότι, όσο περισσότερα σημεία επιλέγουμε στα πρώτα ns του ρεύματος εκφόρτισης, τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή της βέλτιστης εξίσωσης στα πειραματικά δεδομένα. Όμως, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου διαφέρουν, επίσης, ανάλογα με τη συνάρτηση ελαχιστοποίησης, που κάθε φορά επιλέγεται, αφού ο γενετικός αλγόριθμος έχει καλύτερη σύγκλιση προς τα πειραματικά αποτελέσματα, όταν ως συνάρτηση ελαχιστοποίησης επιλέγεται το απόλυτο, και όχι το σχετικό σφάλμα.

Έγινε εφαρμογή της κατάλληλα τροποποιημένης μεθόδου Prony, από τη Σύνθεση Δικτύων ώστε να υπολογιστεί η συνάρτηση μεταφοράς κυκλώματος που παράγει ρεύμα μορφής ίδιας με αυτό που περιγράφεται στην εξίσωση του Heidler. Κατόπιν, η συνάρτηση αυτή υλοποιήθηκε κυκλωματικά στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice, οπότε και βρέθηκε ότι το σχεδιασθέν κύκλωμα δίνει ρεύμα εκφόρτισης πολύ κοντά σε αυτό της εξίσωσης του Heidler.

Διερευνήθηκε το ενδεχόμενο η ηλεκτροστατική εκφόρτιση να επηρεάζει την ανθρώπινη υγεία, και, συγκεκριμένα, να προκαλέσει την ημικυκλική λιποατροφία, συνεπεία της οποίας οι ασθενείς εμφανίζουν στο πάνω μέρος των μηρών τους ζώνες, στις οποίες δεν υπάρχει λιπώδης ιστός.

Λέξεις Κλειδιά

Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση, Πρότυπο IEC 61000-4-2, Ομοαξονικός Προσαρμοστής Μέτρησης, Ρεύμα Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης, Γειωμένη Μεταλλική Επιφάνεια, Μονωτικό Υπόστρωμα, Διακρίβωση Γεννητριών Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων, Εξίσωση Ρεύματος του Heidler, Επαναληψιμότητα Γεννητριών, Πρόγραμμα PSpice, Μέθοδος Prony, Γενετικός Αλγόριθμος, Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο, Αισθητήρες Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου, Ημικυκλική Λιποατροφία

SUMMARY

The aim of this PhD thesis is to measure the electromagnetic field radiating by electrostatic discharge (ESD) generators, to find an equation that can describe accurately the ESD current, as it is defined by the Standard and to find a circuit of the ESD generator that will actually produce the discharge current as it is defined by this equation.

Experiments proved that in the next revision of the Standard, probably the strict restriction of the metallic plate with dimensions “at least 1.5 m x 1.5 m” could be avoided and be “at least 1m x 1m”. Also, from the experiments that have been conducted with the Pellegrini target either on the center of a grounded metal plate or on an insulating material, it is proved that each ESD generator produces a different electromagnetic field along various directions and consequently it produces different induced voltages. This remark is extremely serious, because depending on the orientation of the ESD generator we may have different results on the EUT that each time is tested. For example an EUT may pass the ESD test with one orientation of the ESD generator and fail with another orientation.

There is an aberration between the waveform of the ESD current defined by the Standard and the waveform that derives by the simulations. In this way someone that makes computer simulations and uses the circuit of the ESD generator defined by the Standard inserts an error in the calculated voltages and currents. In the present Standard concerning the ESD tests there is a lack of an analytical mathematical equation that could describe the ESD current. Also, in this PhD thesis in order to solve this problem a genetic algorithm has been developed, which optimized the values of the parameters of various equations that there are in the bibliography and can describe the ESD current. Finally, it was found that the equation, which can accurately describe the ESD current is the one proposed by Heidler for the lightning current.

For the application of the genetic algorithm we need experimental data (measured discharge current), which is used as its input. The problem that there is that we do not have to use the whole of these data due to the fact that is time consuming. For this reason there were various sampling functions, that were used and for which there were different results from the application of the genetic algorithm. Finally, it was concluded that the more the chosen points of the discharge current the better the fit of the optimum equation on the experimental data. Also, the results of the genetic algorithm differ depending on the function that each time is minimized. It was found that the genetic algorithm has better fit on the experimental data when the function that is minimized is the absolute and not the relative error.

The modified Prony’s method from the Synthesis of Circuits was applied in order the transfer function to be found. Being more specific the Prony’s method, which was modified calculated the transfer function of the circuit that produces the discharge current as it is defined by the Heidler’s equation. The circuit that was designed gave excellent simulation output results in Pspice. The simulated discharge current is very close to the one defined by Heidler’s equation.

It was investigated the correlation that ESD could have with the lipoatrophia semicircularis disease. Lipoatrophia semicircularis consists clinically of a semicircular zone of atrophy of the subcutaneous fatty tissue located mostly on the legs. Skin and underlying muscles remains intact.

Key Words

Electrostatic Discharge, IEC Standard IEC 61000-4-2, Pellegrini Target, Electrostatic Discharge Current, Grounded Metal Plane, Insulating Material, Verification of Electrostatic Discharge, Generators, Heidler’s Current Equation, Reproducibility, Pspice Program, Prony’s Method, Genetic Algorithm, Electromagnetic Field, Electromagnetic Field Sensors, Lipoatrophia Semicircularis

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα -----	1
Πρόλογος-----	6
1. Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση -----	12
1.1 Εισαγωγή -----	12
1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση -----	13
1.2.1 Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο -----	14
1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής -----	16
1.2.3 Φορτία προερχόμενα από ηλεκτροστατικές φορτίσεις-----	17
1.3 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Διεθνή Πρότυπα -----	18
1.4 Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης-----	20
1.5 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις-----	24
1.6 Ηλεκτρικό τόξο στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρος-----	29
1.7 Σχεδίαση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων -----	33
1.8 Προσομοίωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης -----	35
1.9 Επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτρονικές διατάξεις-----	37
1.10 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση και η συσχέτισή της με την ασθένεια της ημικυκλικής λιποατροφίας (lipotrophia semicircularis)-----	38
1.11 Αντικείμενο και σκοπός της διατριβής -----	42
2. Κεφάλαιο 2: Μετρητικές διατάξεις-----	44
2.1 Σκοπός και βασικές αρχές της εργασίας-----	44
2.2 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης-----	45
2.3 Μέτρηση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης -----	47
2.4 Ανασύνθεση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης-----	48
2.4.1 Χρήση κυκλώματος στην DC ανάλυση -----	49
2.4.2 Χρήση δίθυρων -----	50
2.5 Πειραματικές διατάξεις μέτρησης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου -----	51
2.5.1 Ο ομοαξονικός προσαρμοστής επί μονωτικού υποστρώματος -----	51

2.5.2	Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης επί οριζόντιας γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας-----	53
3.	Κεφάλαιο 3: Πειραματικά αποτελέσματα -----	57
3.1	Εισαγωγή -----	57
3.2.	Μέτρηση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης -----	57
3.3	Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τον ομοαξονικό προσαρμοστή επί μονωτικού υλικού -----	61
3.3.1.	Παράγωγος μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου -----	61
3.3.2.	Μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου -----	62
3.3.2.1	Αποτελέσματα των πειραμάτων -----	62
3.3.2.2	Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου για όλες τις τάσεις φόρτισης -----	67
3.3.2.3	Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις -----	69
3.3.3	Μέτρηση έντασης ηλεκτρικού πεδίου -----	70
3.3.3.1	Αποτελέσματα των πειραμάτων -----	70
3.3.3.2	Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για όλες τις τάσεις φόρτισης -----	73
3.3.3.3	Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις -----	75
3.4.	Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τον ομοαξονικό προσαρμοστή στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας -----	76
3.4.1.	Διεξαγωγή των πειραμάτων -----	76
3.4.2.	Μέτρηση έντασης μαγνητικού πεδίου -----	77
3.4.2.1	Αποτελέσματα των πειραμάτων -----	77
3.4.2.2	Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου ανά τάση φόρτισης -----	80
3.4.2.3	Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου ανά κατεύθυνση -----	83
3.4.2.4	Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις -----	85
3.4.3.	Μέτρηση έντασης ηλεκτρικού πεδίου -----	88
3.4.3.1	Αποτελέσματα των πειραμάτων -----	88
3.4.3.2	Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου	

ανά τάση φόρτισης-----	90
3.4.3.3 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανά κατεύθυνση-----	94
3.4.3.4 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις-----	96
3.5 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα της διεθνούς βιβλιογραφίας -----	98
3.6 Προτάσεις για την επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου-----	101
Κεφάλαιο 4: Υπολογιστική προσέγγιση -----	106
4.1 Εισαγωγή στην υπολογιστική προσέγγιση-----	106
4.2 Προσομοιώσεις στο PSpice-----	107
4.2.1 Το κύκλωμα της γεννήτριας όπως ορίζεται στο Πρότυπο --	107
4.2.2 Μια καλύτερη κυκλωματική προσέγγιση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων-----	108
4.2.2.1 Υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος-----	108
4.2.2.2 Μοντέλα γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για αριθμητική ανάλυση -----	110
4.2.2.3 Επίδραση του καλωδίου γείωσης στην κυματομορφή του ρεύματος -----	113
4.2.2.4 Σύγκριση των δύο κυκλωμάτων της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων-----	114
4.2.2.5 Δοκιμές και συγκρίσεις του κυκλώματος του μοντέλου 1 για διαφορετικά δοκίμια-----	116
4.2.3 Συμπεράσματα -----	117
4.3 Προσδιορισμός παραμέτρων της εξίσωσης του ρεύματος εκφόρτισης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων -----	118
4.3.1 Εξισώσεις του ρεύματος εκφόρτισης -----	119
4.3.2 Ο Γενετικός Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε-----	120
4.3.3 Απόδειξη αποτελεσματικότητας του γενετικού αλγορίθμου -	123
4.3.4 Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου σε πειραματικά δεδομένα-----	127
4.3.5 Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου -----	128
4.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την	

ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας -----	134
4.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια εξίσωση και την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας αλλά για διαφορετική διάρκειά της (30ns, 50ns, 90ns) -----	139
4.3.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια εξίσωση ελαχιστοποιώντας το απόλυτο σφάλμα -----	142
4.4. Σχεδίαση κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων από την εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης -----	148
4.4.1 Μέθοδος Prony - Προσέγγιση κρουστικής απόκρισης σε πεπερασμένο αριθμό ισαπεχόντων σημείων-----	148
4.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου Prony στη βέλτιστη εξίσωση -----	149
4.4.2.1 Εισαγωγή -----	149
4.4.2.2 Εφαρμογή της μεθόδου Prony -----	150
4.4.2.3 Τροποποίηση της μεθόδου Prony -----	154
4.4.3 Το κύκλωμα -----	159
4.4.3.1 G(s) υπό μορφή γινομένου συναρτήσεων μεταφοράς --	159
4.4.3.2 Υλοποίηση των βαθμίδων του κυκλώματος -----	161
4.5. Συμπεράσματα της υπολογιστικής προσέγγισης-----	167
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα -----	171
5.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής -----	171
5.2 Συμβολή – Πρωτοτυπία της διατριβής -----	172
5.3 Επέκταση της διατριβής -----	178
Παράρτημα I: Πειραματικές διατάξεις -----	180
Π.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων -----	180
Π.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 -----	180
Π.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 -----	181
Π.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης -----	184
Π.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας -----	184
Π.4 Εξασθενητής -----	185
Π.5 Παλμογράφος -----	185
Π.6 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού	

υποστρώματος-----	186
Π.7 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης H του μαγνητικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος-----	188
Π.8 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας -----	190
Π.9 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης H του μαγνητικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας -----	192
Π.10 Τροφοδοτικό-----	194
Π.11 Θωρακισμένος θάλαμος-----	195
Βιβλιογραφία-----	196

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διεξήχθη στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τα έτη 2002 έως 2006, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ι.Α. Σταθόπουλου και ασχολείται με το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η διατριβή πραγματεύεται, αρχικά, τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που δημιουργείται κατά την ενεργοποίηση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, και εντοπίζει διαφορές που υπάρχουν σε αυτό τόσο από γεννήτρια σε γεννήτρια, όσο και, για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με τον προσανατολισμό της ως προς τη θέση μέτρησης. Μετά τη διαπίστωση της απόκλισης μεταξύ της κυματομορφής, που δίνει το κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως η γεννήτρια αυτή ορίζεται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2, και της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, που ορίζει το ίδιο Πρότυπο, παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης μιας εξίσωσης, ικανής να περιγράψει επακριβώς την κυματομορφή αυτή. Τέλος, με τη βοήθεια της βέλτιστης αυτής εξίσωσης και της απαιτούμενης θεωρίας από τη Σύνθεση Δικτύων, προτείνεται το κύκλωμα, που δίνει ρεύμα εκφόρτισης με κυματομορφή ίδια με αυτή που ορίζει το Πρότυπο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς της ηλεκτροστατικής φόρτισης, στα υπάρχοντα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς επίσης και ανάλυση του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εστιάζεται στα ακόλουθα: α) Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, β) Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, γ) Ηλεκτρικό τόξο στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρος, δ) Σχεδίαση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ε) Προσομοίωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, στ) Επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτρονικές διατάξεις και ζ) Συσχέτιση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με την πάθηση της ημικυκλικής λιποατροφίας (lipoatrophia semicircularis).

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι πειραματικές διατάξεις, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Οι διατάξεις μπορούν να διακριθούν σε 3 κατηγορίες: α) Διατάξεις μέτρησης του ρεύματος εκφόρτισης, β) Διατάξεις μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι τοποθετημένος στο κέντρο μονωτικού υποστρώματος και γ) Διατάξεις μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι τοποθετημένος στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας. Οι δύο διατάξεις, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διαφέρουν, όχι μόνο ως προς το υλικό, πάνω στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, αλλά και ως προς τους αισθητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση που ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης τοποθετήθηκε σε μονωτικό υπόστρωμα, οι αισθητήρες ήταν της Rohde-Schwarz, ενώ, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας, οι αισθητήρες ήταν του καθηγητή David Pommerenke.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις διάφορες πειραματικές διατάξεις, όπως αυτές περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Διαπιστώνεται ότι η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης διαφέρει, ανάλογα με το υλικό και τις διαστάσεις του, πάνω στο οποίο βρίσκεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Επίσης, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το παραγόμενο πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αφού διαπιστώνεται ότι, όχι μόνο κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αλλά ότι το πεδίο διαφέρει και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την κατεύθυνση, ως προς την οποία γίνεται η μέτρηση. Το διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές επαγόμενες τάσεις. Κατά συνέπεια, και ιδιαίτερα σε οριακές περιπτώσεις, ένα δοκίμιο με τη μια γεννήτρια μπορεί να περνά επιτυχώς τη δοκιμή, ενώ με μια άλλη να αποτυγχάνει, έστω και αν και οι δύο γεννήτριες έχουν την ίδια τάση φόρτισης και παράγουν ρεύμα εκφόρτισης, που είναι εντός των ορίων, που ορίζει το Πρότυπο για τη δεδομένη τάση φόρτισης. Ανάλογα αποτελέσματα, φυσικά, μπορεί να έχουμε και για την ίδια γεννήτρια, για διαφορετικούς προσανατολισμούς της ως προς το δοκίμιο, οπότε πάλι οι επαγόμενες τάσεις είναι διαφορετικές και, επομένως, τα αποτελέσματα πάνω στο δοκίμιο μπορούν να είναι διαφορετικά. Κατόπιν, στο ίδιο κεφάλαιο, γίνονται συγκρίσεις με μετρήσεις

άλλων ερευνητών, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιήσει ίδιους αισθητήρες, αλλά σε διαφορετικές πειραματικές διατάξεις. Τέλος, γίνονται προτάσεις βελτίωσης για την επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου και τι θα πρέπει αυτή να περιλαμβάνει. Συγκεκριμένα, προτείνεται: α) μείωση των διαστάσεων της μεταλλικής επιφάνειας, που χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και β) οι κατασκευαστές των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων να λάβουν υπ' όψη τους το διαφορετικό πεδίο, που παράγεται από κάθε μία διαφορετικού τύπου γεννήτρια, αλλά, και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την προσανατολισμό της ως προς το δοκίμιο. Επομένως, θα πρέπει να κατασκευάζουν τις γεννήτριες με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται ομοιομορφία στο παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ενδεχομένως, θα μπορούσε η επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να περιλαμβάνει τη διάταξη εκείνη με την οποία θα γίνεται τόσο η διακρίβωση των γεννητριών ως προς το ρεύμα, όσο και ως προς το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, με καθορισμό τιμών των παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν (π.χ. E_{max} , H_{max}).

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται προσομοιώσεις, με χρήση του προγράμματος Pspice, του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτή προδιαγράφεται από το υπάρχον Πρότυπο, και διαπιστώνεται απόκλιση μεταξύ της κυματομορφής που δίνει το κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτή η γεννήτρια ορίζεται από το Πρότυπο, και της κυματομορφής που ορίζει το ίδιο Πρότυπο. Προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της ασυμφωνίας, που υπάρχει στο Πρότυπο, αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος σε γλώσσα Matlab, ο οποίος υπολογίζει τη βέλτιστη τιμή παραμέτρων σε εξίσώσεις, οι οποίες μπορούν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Με τον τρόπο αυτό βρέθηκε ποια είναι η καλύτερη εξίσωση (εξίσωση Heidler), η οποία μπορεί να περιγράψει το ρεύμα από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, καθώς και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της. Τέλος, και για τη βέλτιστη εξίσωση, που βρέθηκε, και χρησιμοποιώντας μεθοδολογία από τη Σύνθεση Δικτύων, προτείνεται ένα κύκλωμα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που παράγει την καθοριζόμενη από το Πρότυπο κυματομορφή, αναιρώντας την υπάρχουσα, στη σημερινή μορφή του Προτύπου, προαναφερθείσα ασυμφωνία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής και στη συμβολή της στην έρευνα του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και στην αναμενόμενη και επερχόμενη αναθεώρηση του σχετικού Προτύπου, για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Στο τέλος της διατριβής παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία, καθώς και παράρτημα, στο οποίο γίνεται εκτενής περιγραφή του πειραματικού εξοπλισμού, που χρησιμοποιήθηκε στα, περιγραφέντα στο δεύτερο κεφάλαιο, πειράματα.

Σ' αυτό το σημείο οφείλω να ευχαριστήσω από βάθους καρδιάς τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ι. Α. Σταθόπουλο. Νιώθω υπόχρεος, όχι μόνο επειδή με εμπιστεύτηκε και μου ανέθεσε την παρούσα διατριβή, αλλά και επειδή αποτέλεσε πολύτιμο αρωγό και συμπαραστάτη όλα αυτά τα χρόνια. Η πολύχρονη ερευνητική εμπειρία του, ο διεισδυτικός του νους, καθώς και οι εύστοχες παρατηρήσεις του και σχόλια αποτέλεσαν σημαντικότερη βοήθεια για να έρθει σε πέρας η παρούσα διατριβή.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω επίσης προς τον Καθηγητή κ. Σ. Ν. Μανιά και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Φ. Β. Τοπαλή, για τη διαρκή τους υποστήριξη και την αποδοχή συμμετοχής τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή. Ευχαριστώ ιδιαίτερα, επίσης, τους Καθηγητές κκ. Π. Δ. Μπούρκα, Χ. Ν. Καψάλη, Κ. Γ. Καραγιαννόπουλο και την Λέκτορα Υψηλών Τάσεων κα. Ε. Χ. Πυργιώτη του Πανεπιστημίου Πατρών για την αποδοχή συμμετοχής τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Δεν πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή Τρύφωνα Γ. Κουσιουρή για την βοήθειά του στην σύνθεση του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, χρησιμοποιώντας την μέθοδο Prony από τη Σύνθεση Δικτύων.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Διδάκτορα κ. Ι. Φ. Γκόνο, ο οποίος με την καθοδήγησή του και την πολύχρονη εργαστηριακή του εμπειρία στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, είναι πολύτιμος αρωγός στο μέχρι τώρα έργο μου. Το εύρος των γνώσεών του και οι εύστοχες παρατηρήσεις του έχουν συμβάλει τα μέγιστα στην άρτια παρουσίαση της παρούσας εργασίας.

Στο σημείο αυτό δεν θα πρέπει να ξεχάσω να αναφερθώ στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική στήριξη σαν υπότροφός του, κατά τα δύο τελευταία χρόνια των σπουδών μου.

Θα ήταν παράλειψή μου να μην αναφερθώ στον D. Pommerenke Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Missouri-Rolla των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής για τα εύστοχα σχόλια και παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής του παρόντος πονήματος. Η τακτικότατη επικοινωνία, την οποία είχα για απορίες και ερωτήματα, ήταν εξαιρετικά σημαντική, αφού με ενθάρρυνε να συνεχίσω την έρευνά μου με θέρμη. Τον ευχαριστώ από βάθους καρδιάς για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δανείζοντάς μου αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δικής του κατασκευής. Η πολύχρονη εμπειρία του και το βαθύτατα ανήσυχο πνεύμα του με βοήθησαν εξαιρετικά στην εμπάθυνση του αντικειμένου της διατριβής.

Επίσης, θερμότερες ευχαριστίες οφείλω και στον μηχανικό της εταιρείας Schaffner, Dr J. Stoka, ειδικό σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, με τον οποίο είχα τακτικότατη επικοινωνία όλα αυτά τα χρόνια πάνω στη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Η βοήθειά του σε απορίες και ερωτήματα πάνω στις πειραματικές διατάξεις, που χρησιμοποίησα ήταν σημαντικές για την διεκπεραίωση του παρόντος πονήματος.

Ευχαριστώ επίσης τους μηχανικούς-ερευνητές G. Decat και P. Van Tichelen του ερευνητικού κέντρου Vito στο Βέλγιο, οι οποίοι με είχαν προσκαλέσει στο κέντρο τους για να μελετήσουμε από κοινού τις ενδεχόμενες επιδράσεις, που έχει το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πάνω σε εργαζομένους της βελγικής τράπεζας KBC, οι οποίοι είχαν εμφανίσει την ασθένεια της ημικυκλικής λιποατροφίας (lipotrophia semicircularis).

Θα ήταν παράλειψή μου να μην αναφερθώ και στα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και συγκεκριμένα στον κ. Χ. Ηλία για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, την κα Ν. Χ. Ηλία υπεύθυνη του συστήματος ποιότητας του εργαστηρίου για την εργαστηριακή της βοήθεια και τις συμβουλές της, καθώς και την κα Χ. Σιγάλα για τη γραμματειακή υποστήριξη που μου παρείχε.

Δεν πρέπει επίσης να ξεχάσω να ευχαριστήσω στο σημείο αυτό όλους τους φίλους και συνεργάτες μου, ο καθένας από τους οποίους συνέβαλε με τον τρόπο του στην προσπάθεια, που κατέβαλα όλα αυτά τα χρόνια για να έρθει σε πέρας το παρόν πόνημα και θα ήταν μεγάλη παράλειψή μου να μην αναφέρω τα ονόματά τους: Παύλος Κατσιβέλης, Γεράσιμος Θεοδωράτος, Κωνσταντίνος Πιπής, Φανή Ασημακοπούλου, Χρήστος Χριστοδούλου, Μανόλης Ποταμιανάκης, Θανάσης Παναγόπουλος, Λάμπρος Οικονόμου, Δημήτρης Ηρακλέους, Ιωάννης Ζαφειρόπουλος, Βασιλική Κονταργύρη, Ανδρέας Ραπανάκης, Λεονάρδος Στεφάνου, Δημήτρης Κουλοφούτος, και Γεωργία Ασημακοπούλου.

Τέλος, αισθάνομαι το χρέος να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που πιστεύει όλα αυτά τα χρόνια στις δυνατότητές μου, χωρίς τη βοήθεια και τη συναισθηματική στήριξη της οποίας η εκπόνηση της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη.

Κεφάλαιο 1

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή σε κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων, περίπου πριν από ένα αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και προκάλεσε 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 ανάπτυξή τους. Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχουν θεσπισθεί οδηγίες σχετικά με τους κανόνες, που πρέπει να πληρούν οι διάφορες ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές ως προς την ηλεκτρομαγνητική τους συμβατότητα [1, 2].

Μέσα σε ένα σύστημα όλες οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συνιστώσες πρέπει να συνυπάρχουν αρμονικά. Την ίδια ώρα το ίδιο σύστημα θα πρέπει να μην είναι πηγή ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής πάνω από κάποια καθορισμένα όρια (προδιαγραφές στάθμης εξόδων). Το κρίσιμο σημείο είναι ότι πολλές από αυτές τις καθορισμένες στάθμες επιβάλλονται από τη διεθνή νομοθεσία [3] και τέτοιες κανονιστικές απαιτήσεις αναμένεται να αυξηθούν στο μέλλον, με την πιθανότητα επιβολής σοβαρών ποινών σε περιπτώσεις παράβασης.

Είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα [4]:

Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Είναι η ικανότητα μιας διάταξης, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε υπάρχει εντός αυτού.

Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility): Είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.

Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

Ατρωσία (Immunity): Είναι η ικανότητα μιας διάταξης, συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του με την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.

Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin): Είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ως προς μια στάθμη διαταραχής αναφοράς.

Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference): Είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μια μεταβολή αυτού καθεαυτού του μέσου διάδοσης.

Αγόμενη εκπομπή (Conducted Emission): Είναι διαταραχές οι οποίες διαδίδονται κατά μήκος ενός μεταλλικού αγωγού, ο οποίος μπορεί να είναι μια γραμμή μεταφοράς ισχύος, μια τηλεπικοινωνιακή γραμμή ή ένας τυχαίος αγωγός όπως ένα κομμάτι από μέταλλο.

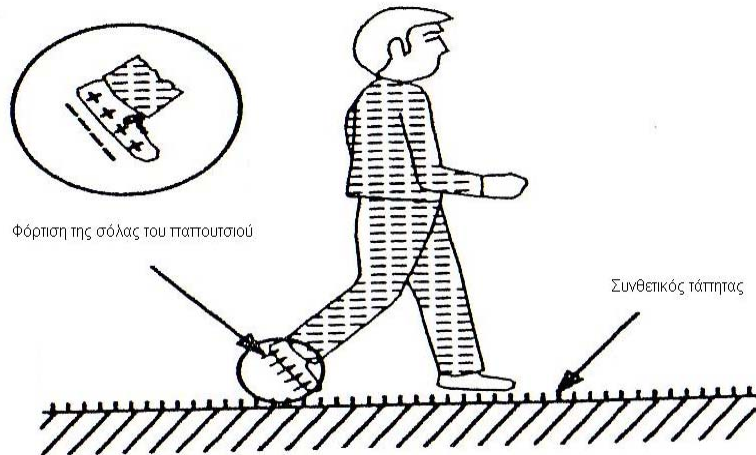
Ακτινοβολούμενη εκπομπή (Radiated Emission): Επιθυμητή ή ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, υπό τη μορφή ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, η οποία διαδίδεται στο χώρο.

1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση

Η δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού είναι γνωστή από το 600 π.Χ., όταν ο Θαλής ο Μιλήσιος παρατήρησε ότι εάν τριφτεί ένα κομμάτι ήλεκτρο (κεχριμπάρι) αυτό μπορεί να έλκει μικρά κομμάτια χαρτιού. Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος, γνωστός σαν τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, 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 [5-8]. Ο δεύτερος μηχανισμός γνωστός ως φόρτιση εξ επαγωγής [5], λαμβάνει χώρα όταν ένα υλικό είναι εκτεθειμένο σε ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, όπως για παράδειγμα όταν είναι δίπλα σε ένα υψηλό ηλεκτρικό φορτίο. Το αποτέλεσμα είναι το υλικό αυτό να αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

1.2.1 Το 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 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 αποθηκευόμενες 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 προβλήματα σε 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 [5]

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού [5]. 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). Η σχετική θέση του υλικού στην τριβοηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. 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.

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

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά [5]

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

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης [5]

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 ακόμα και σε 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

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.

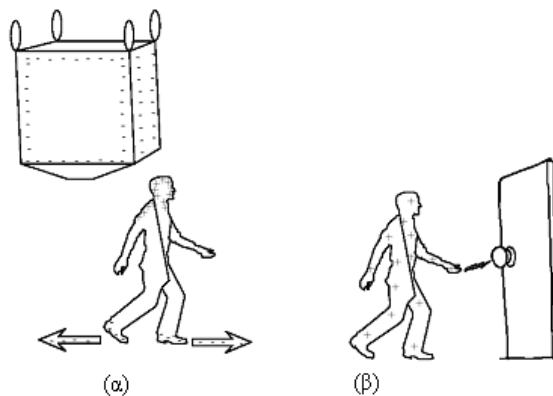
	Σχετική υγρασία		
	10%	40%	55%
	Ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)		
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο	12	5	3
Κινήσεις εργαζομένου σε γραφείο	6	0,8	0,4

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV) συναρτήσει της υγρασίας [5]

1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβηηλεκτρικό φαινόμενο, αλλά μπορεί να γίνει εξ επαγωγής [5]. 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, είτε μακριά από το φορτισμένο σώμα. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο 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 μια πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής [5]

Εκτός από το τριβηλεκτρικό φαινόμενο και την φόρτιση εξ επαγωγής υπάρχουν και άλλες δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων όπως δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

1.2.3 Φορτία προερχόμενα από ηλεκτροστατικές φορτίσεις

Η χωρητικότητα του ανθρωπίνου σώματος είναι παράγοντας που δημιουργεί την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Σε εργασία των Fujiwara και Takanori [9] υπολογίζεται η χωρητικότητα του ανθρωπίνου σώματος μέσω της μεθόδου φόρτισης επιφανείας (surface charge method). Θεωρείται ότι το ανθρώπινο σώμα αποτελείται από πολυέδρα. Μετρήσεις που διεξήχθησαν επιβεβαίωσαν την ακρίβεια της μεθόδου. Σε άλλη εργασία [10] προτείνεται ένα δισδιάστατο ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο με το οποίο μέσω αναλυτικών εξισώσεων υπολογίζεται το δυναμικό του ανθρωπίνου σώματος, το οποίο φορτίζεται εξαιτίας του τριβηλεκτρικού φαινομένου πάνω σε ένα δάπεδο. Η προσέγγιση αυτή γίνεται με χρήση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που διέπουν το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύει την εγκυρότητά του.

Σε μια άλλη εργασία [11] ο Greason αναλύει τη διαδικασία της φόρτισης και της εκφόρτισης για τα μοντέλα του ανθρωπίνου σώματος και της φορτισμένης συσκευής, τα οποία περιγράφουν το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η ανάλυση την οποία διεξάγει στηρίζεται στις εξισώσεις του Maxwell και το μοντέλο των σφαιρών. Υπολογίζει με αναλυτικές εξισώσεις το δυναμικό και την ενέργεια του ανθρωπίνου σώματος σαν συναρτήσεις του φορτίου του ηλεκτροδίου εκφόρτισης και της χωρητικότητας.

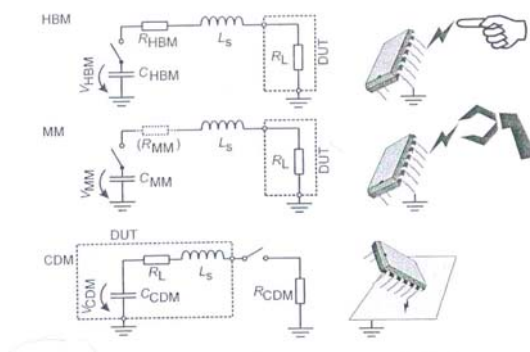
Ο Fujiwara [12] περιγράφει νέους τρόπους μέτρησης του στατικού ηλεκτρισμού για προστασία από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Παρουσιάζει μια δισδιάστατη μετρητική μέθοδο για την απεικόνιση των κατανομών φορτίου. Η αρχή βασίζεται στην απεικόνιση της κατανομής του δυναμικού, η χρησιμότητα της οποίας φάνηκε σε πραγματικό φορτισμένο σώμα. Επίσης, βρέθηκε το δυναμικό, που αναπτύσσει ο άνθρωπος περπατώντας πάνω σε ένα δάπεδο, μέσα από αναλυτικές εξισώσεις στο πεδίο της συχνότητας.

1.3 Μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Διεθνή Πρότυπα

Η απότομη μεταφορά του φορτίου, που αναπτύσσεται, είτε λόγω του τριβηλεκτρικού φαινομένου, είτε λόγω της εξ επαγωγής φόρτισης σε αντίθετα φορτισμένα σώματα, από το ένα σώμα στο άλλο και όταν αυτά βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση λέγεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να εκτιμηθεί η επίδραση, που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [5, 6, 13, 14, 15]. 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). Το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος προσομοιώνει την εκφόρτιση που λαμβάνει χώρα από ένα άτομο πάνω σε μια γαλβανικά γειωμένη συσκευή. Το μοντέλο της μηχανής αναπαριστά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου σε μια συσκευή και είναι παρόμοιο με αυτό του μοντέλου ανθρωπίνου σώματος, εκτός από το ότι τα ηλεκτρικά στοιχεία, που χαρακτηρίζουν το ανθρώπινο σώμα αντικαθίστανται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός αγείωτου μεταλλικού αντικειμένου. Τέλος, το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής είναι διαφορετικό από αυτό των δύο προηγούμενων μοντέλων, επειδή προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση από μια συσκευή και όχι προς μια συσκευή.

Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών φαίνονται στο σχήμα 1.3. Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν ως δευτέρας τάξης διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα.



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [13]

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 εξέτασης συσκευής, C_{ESD} την χωρητικότητα της συσκευής, η οποία αρχικά είναι φορτισμένη σε τάση V_{ESD} και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης, η διαφορική εξίσωση 2^{ης} 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:

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

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

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.

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
V_{ESD}	4000 V	200 V	500 V
$R_{HBM}/R_{MM}/R_{CDM}$	1,5 kΩ	5 Ω	10 Ω
C_{ESD}	100 pF	200 pF	10 pF
L_S	5000 nH	750 nH	750 nH
R_L	10 Ω	10 Ω	10 Ω
I_{ESD}	2,6 A	2,8 A	10,4 A
$t_{rise}(10\%/90\%)$	≈ 7 ns	≈ 11 ns	≈ 0,3 ns
α	$1,5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$0,1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$10 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
ω_0	$0,5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$0,8 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	$30 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$

Πίνακας 1.4: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα διάφορα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [13]

Λόγω της σοβαρότητας των επιπτώσεων, που έχει η ηλεκτροστατική εκφόρτιση πάνω σε ηλεκτρονικές και ηλεκτροτεχνικές διατάξεις, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) θέσπισε Πρότυπα για τη διεξαγωγή δοκιμών σε υπό εξέταση εξοπλισμό. Το αρχικό Πρότυπο που δημιουργήθηκε για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ήταν το IEC 801-2 [16], το οποίο αναθεωρήθηκε και έφτασε στην τελική του μορφή ως IEC 61000-4-2 [17] και στην Ευρωπαϊκή του έκδοση ως EN 61000-4-2 [18], ενώ στην Ελληνική έκδοσή του ως ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [19]. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο πρότυπο EN 61000-4-2

βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 περιγράφει τη μέθοδο και τις διαδικασίες, που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό, σε εξοπλισμό πληροφορικής, φωτιστικά και σε όργανα μέτρησης. Το Πρότυπο ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά η διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Το αντίστοιχο Αμερικανικό Πρότυπο κατά ANSI [20] είναι ανάλογο με το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17] για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παρ' όλο που έγιναν προσπάθειες να εναρμονιστούν αυτά τα δύο Πρότυπα, οι τεχνικές διαφορές τους ήταν τέτοιες, ώστε αυτό να μην είναι εφικτό. Το Πρότυπο ANSI περιέχει πληροφορίες και οδηγίες όπως: προσομοιώσεις ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε έπιπλα, στατιστικό προσδιορισμό του αριθμού των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ανά σημείο δοκιμής και λύσεις με διαστήματα εμπιστοσύνης.

1.4 Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Το προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις ρεύμα έχει μελετηθεί εκτενέστατα από πληθώρα ερευνητών. Μια εις βάθος μελέτη έχει γίνει από τους Pommerenke και Aidam [21], οι οποίοι ασχολούνται με τη σύγκριση ρευμάτων από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις του ανθρωπίνου σώματος, των παραγώγων τους και των μεταβατικών πεδίων που προκαλούν, με τα αντίστοιχα που παράγουν γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ευρέως χρησιμοποιούμενες στο εμπόριο. Παράλληλα, προτείνουν βελτιώσεις για το τότε ισχύον Πρότυπο [16]. Υποδεικνύουν τι ακριβώς πρέπει να αλλάξει, ώστε τα παραγόμενα ρεύματα από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων να είναι κοντά σε αυτά που πράγματι παράγονται από το ανθρώπινο σώμα.

Για το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχουν καθορισθεί τα όρια μέσα στα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τέσσερις παράμετροι, όπως ορίζει το Πρότυπο [17], αλλά απουσιάζει μια αναλυτική εξίσωση, η οποία θα το περιγράφει. Προς αυτή την κατεύθυνση έχει κινηθεί ο Pommerenke [22], όπου προτείνει μια τέτοια παραμετρική εξίσωση για το ρεύμα εκφόρτισης με τιμές για τις παραμέτρους που έχει, υιοθετώντας την εξίσωση που προτείνει ο Heidler [23] για το κεραυνικό ρεύμα. Μια άλλη παρόμοια εξίσωση αναφέρεται στην εργασία των Berghe και Zutter [24], στην

οποία μελετάται η επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ομοαξονικά καλώδια, τα οποία συνδέουν δύο συστήματα. Τέλος, συγκρίσεις για διάφορες εξισώσεις, που μπορούν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αναφέρονται σε πρόσφατες εργασίες [25-27]. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος λαμβάνοντας σαν είσοδό του πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βελτιστοποιεί τις παραμέτρους υποψήφιων εξισώσεων για το ρεύμα. Από συγκρίσεις μεταξύ αυτών των εξισώσεων γίνεται εμφανές ποια είναι η καταλληλότερη εξίσωση.

Οι μετρήσεις, οι οποίες γίνονται για τη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διέπονται από αβεβαιότητα. Σε πρόσφατη δημοσίευση [28] εκτιμάται η αβεβαιότητα στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, δηλαδή η αβεβαιότητα των τεσσάρων βασικών παραμέτρων που ορίζει το Πρότυπο (I_{max} , I_{30} , I_{60} , t_r). Γίνεται εκτίμηση όλων των αβεβαιοτήτων των επιμέρους τμημάτων της μετρητικής διάταξης, ώστε να υπολογισθεί η συνολική αβεβαιότητα για επίπεδο εμπιστοσύνης 95,5% βάσει του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων. Τελικά, διαπιστώνεται ότι η αβεβαιότητα στην κυματομορφή του ρεύματος (I_{max} , I_{30} , I_{60}) προέρχεται από την τάση ανάγνωσης στον μετρητικό εξοπλισμό, τη διαφορά που υπάρχει μεταξύ των μετρούμενων και των πραγματικών τιμών, καθώς και από την έλλειψη ακρίβειας του χρόνου δέλτα του παλμογράφου. Αντίθετα, η αβεβαιότητα στο χρόνο ανόδου (t_r) προέρχεται κυρίως από τη μετρητική διάταξη.

Σε εργασία των Hilty, Ryser και Hermann [29] μελετάται η αβεβαιότητα, που υπεισέρχεται στη μέτρηση των τεσσάρων βασικών παραμέτρων, που ορίζει το Πρότυπο [17] κατά τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για να το πετύχουν αυτό έστειλαν για διακρίβωση την ίδια γεννήτρια σε 8 διαφορετικά Ευρωπαϊκά Εργαστήρια, που διεξάγουν τέτοιου είδους δοκιμές. Τα συγκριτικά αποτελέσματα απέδειξαν ότι οι τιμές των αβεβαιοτήτων διέφεραν από εργαστήριο σε εργαστήριο, γεγονός που είχε να κάνει με την επαναληψιμότητα των μετρήσεων της ηλεκτροστατικής γεννήτριας, αλλά και τη μετρητική διάταξη. Επίσης, προτείνεται ότι για τη διακρίβωση το μετρητικό σύστημα θα πρέπει να έχει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 1 GHz.

Ο D. Pommerenke [30] προσπαθεί να δώσει εξηγήσεις σε θέματα που άπτονται της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αλλά συχνά παρερμηνεύονται. Εξηγεί ποιοι παράγοντες και σε ποιο βαθμό επηρεάζουν την αβεβαιότητα των μετρήσεων στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Στην εργασία [31] διερευνάται μέχρι ποιο βαθμό

εμπιστοσύνης η διακρίβωση στις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων συμφωνεί με το υπάρχον Πρότυπο. Τέλος, ο J. Sroka σε εργασίες του [32-36] απέδειξε την επίδραση που έχουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων οι ομοαξονικοί προσαρμοστές μέτρησης της Schaffner, ενώ έχει γίνει επίσης σύγκριση με τον ομοαξονικό προσαρμοστή κατασκευής του D. Pommerenke.

Ο M. Masugi [37] μέτρησε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17] για δύο ταχύτητες εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων: υψηλή και χαμηλή. Η ανάλυσή του βασίστηκε στην ανάλυση με χρήση wavelets με την οποία κατόρθωσε να απομονώσει τις υψηλές συχνότητες στις κυματομορφές του ρεύματος, κάνοντας ουσιαστικά εξομάλυνση. Τα μεγέθη τα οποία εξέτασε ήταν: το μέγιστο πλάτος του ρεύματος I_{max} , το χρόνο ανόδου t_r και τη σχετική ενέργεια, που περικλείει το ρεύμα. Τελικά, κατέληξε ότι οι γρήγορες εκφορτίσεις οδηγούν σε αύξηση του I_{max} και της σχετικής ενέργειας. Τέλος, χρησιμοποιώντας ελκυστές από τη θεωρία του Χάους για τα μετρούμενα ρεύματα εκφόρτισης, συμπεραίνεται ότι οι γρήγορες εκφορτίσεις μειώνουν την ευστάθεια των κυματομορφών του ρεύματος.

Ο ίδιος συγγραφέας σε άλλη εργασία του [38] κατηγοριοποιεί τις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, οι οποίες προκαλούνται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, χρησιμοποιώντας αυτό-οργανούμενα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αναπαριστούν δεδομένα υψηλών διαστάσεων, σε μια δισδιάστατη απεικόνιση με απλές γεωμετρικές σχέσεις. Βασιζόμενος στα μετρούμενα μεγέθη εξέτασε διάφορες ιδιότητες των κυματομορφών ρεύματος από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκφορτίσεις αέρα που συμβαίνουν με υψηλή ταχύτητα αυξάνουν το μέγιστο πλάτος, τη σχετική ενέργεια και την εντροπία των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, καθώς και ότι η θέση του επιπέδου των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από κάθε ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να αναπαρασταθεί σε δισδιάστατο χώρο.

Σε εργασία των Barth, Richner, Henry και Kelly [39], στην οποία γίνεται χρήση του μοντέλου του ανθρωπίνου σώματος, μελετάται η επίδραση της υγρασίας και του ηλεκτρικού πεδίου στο φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και ιδιαίτερα στο χρόνο ανόδου και το μέγιστο ρεύμα. Συγκεκριμένα το ξηρό περιβάλλον και η ακτινοβολία UV επιδρά στην αύξηση του μέγιστου ρεύματος και σε ταχύτερους χρόνους ανόδου. Μετρήσεις πραγματικών εκφορτίσεων ανθρωπίνων σωμάτων έδειξαν ότι στην κυματομορφή του ρεύματος υπάρχει στη μέγιστη κορυφή μια

αυξομείωση και ότι ο ρυθμός εξασθένησης του φαινομένου είναι πολύ γρήγορος σε αντίθεση με το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος, που προτείνουν τα Πρότυπα. Επίσης, μετρήσεις στο ρεύμα εκφόρτισης από πραγματικά φορτισμένες μηχανές έδειξαν γρήγορους χρόνους ανόδου με επίπεδη κορυφή.

Σε εργασία των Salmela, Paasi, Kalliohaka και Fast [40] συγκρίνεται η συμπεριφορά τριών διαφορετικών τύπων αισθητήρων για ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Ο ένας είναι ένας θωρακισμένος σφαιρικός αισθητήρας, ο δεύτερος ένας μη θωρακισμένος σφαιρικός αισθητήρας με το ρεύμα εκφόρτισης να συγκεντρώνεται στο άκρο ενός ομοαξονικού καλωδίου και ο τρίτος ένας αισθητήρας τύπου βελόνας. Μετρήθηκαν εκφορτίσεις από διαφορετικές πηγές παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, οι οποίες είχαν διαφορετική ειδική αντίσταση στην επιφάνειά τους, όπως φορτισμένες μονωτικές επιφάνειες, ηλεκτροστατικά υλικά και μεταλλικές επιφάνειες. Τα πειράματα απέδειξαν ότι δεν υπάρχει ένας και μόνο τύπος αισθητήρα, που να είναι ιδανικός για τη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για όλα τα υλικά, γιατί υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ευαισθησία του κάθε αισθητήρα, στη φόρτιση και στο μέγιστο του ρεύματος εκφόρτισης. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι όσο αυξανόταν η ειδική αντίσταση της επιφανείας, τόσο μειωνόταν η έναυση του φαινομένου της εκφόρτισης.

Σε πειραματική μελέτη [41] των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, οι οποίες προήλθαν από τέσσερα διαφορετικά υλικά (ύφασμα από πολυπροπυλένιο, μαλακή επιφάνεια από πολυπροπυλένιο, μαλακή επιφάνεια από πολυαιθυλένιο και μαλακή επιφάνεια από νάιλον), μετρήθηκαν για διάφορες τιμές δυναμικού στις επιφάνειες των υλικών, το μέγιστο του ρεύματος εκφόρτισης, η μεταφορά του φορτίου και η απόσταση από την επιφάνεια όπου γίνεται η εκφόρτιση, η οποία δεν είναι γειωμένη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι αρνητικές εκφορτίσεις έδιναν μεγαλύτερο μέγιστο ρεύμα και μεγαλύτερο μεταφερόμενο φορτίο απ' ό,τι οι θετικές εκφορτίσεις για την ίδια τάση φόρτισης της επιφανείας. Η απόσταση στην οποία συνέβαινε η εκφόρτιση αυξανόταν με την αύξηση του δυναμικού της υπό εξέταση επιφανείας. Ωστόσο, το μέγιστο ρεύμα και οι τιμές φόρτισης ήταν σχετικά σταθερές ως προς το δυναμικό της επιφανείας.

1.5 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

Οι Wilson και Ma [42] ήταν οι πρώτοι που έδωσαν ιδιαίτερη βαρύτητα στη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Διατύπωσαν τις αναλυτικές εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιώντας το μοντέλο του ηλεκτρικού δίπολου, ενώ παράλληλα μέτρησαν το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση 1,5 m από το σημείο που συνέβαινε η ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Η σύγκριση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε πολύ καλή σύγκλιση.

Ο D. Pommerenke σε εκτενέστατη εργασία του [43] μέτρησε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρα και επαφής για αποστάσεις από 0,1 έως 1 m. Διαπίστωσε ότι το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται έντονα από τον παράγοντα $1/R$, με R την απόσταση από το σημείο που λαμβάνει χώρα η εκφόρτιση, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται για ένα χρονικό διάστημα και μετά αυξάνεται. Συνεχίζοντας ανάλογα πειράματα [21] ασχολήθηκε με τη σύγκριση των μεταβατικών πεδίων, που προκαλούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τα αντίστοιχα, που παράγουν γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ευρέως χρησιμοποιούμενες στο εμπόριο.

Σε εργασία των Pommerenke και Frei [44] μετράται το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, όταν η μεταλλική επιφάνεια είναι οριζόντια ή κατακόρυφη και για διάφορες τοπολογίες του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, σύμφωνα με το Πρότυπο [17]. Αποδεικνύεται ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, όταν η μεταλλική επιφάνεια είναι στην κατακόρυφη διάταξη είναι μεγαλύτερο από αυτό στην οριζόντια, ενώ αποδείχτηκε επίσης ότι το καλώδιο γείωσης παίζει σημαντικό ρόλο. Όσο πιο κοντά στο δοκίμιο γίνεται η μέτρηση τόσο πιο ισχυρά είναι τα πεδία που παράγονται. Η εργασία των Pommerenke, Vandoren και Wang [45] δίνει μια εις βάθος φυσική ερμηνεία του φαινομένου αυτού για τις δύο διαφορετικές διατάξεις της μεταλλικής επιφάνειας, κάνοντας χρήση της θεωρίας των γραμμών μεταφοράς και της κυματικής θεωρίας. Σε άλλη εργασία οι Frei και Pommerenke [46] αναλύουν την ανάπτυξη ενός καταγραφικού συστήματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, το οποίο ανιχνεύει αυτόματα τις εκφορτίσεις αυτές από τα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία τους, γιατί για το σχεδιασμό εξοπλισμού έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα πρέπει η συχνότητα και η ένταση των παλμών να

είναι γνωστές. Συγκεκριμένα, έχοντας σαν εισόδους το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, τις μέγιστες τιμές των παραγώγων τους, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως τη θερμοκρασία και την υγρασία εκτιμάται η κατεύθυνση της εκφόρτισης.

Ο D. Pommerenke σε εργασία του [30] εξηγεί πώς φθίνει το μαγνητικό πεδίο συναρτήσει της απόστασης. Συγκεκριμένα, αναφέρει ότι για αποστάσεις πολύ κοντινές ή πολύ μακρινές από το σημείο εκφόρτισης το μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογο του παράγοντα $1/R$, ενώ για ενδιάμεσες αποστάσεις ανάλογο του παράγοντα $1/R^2$, με R την απόσταση από το σημείο εκφόρτισης.

Σε άλλες εργασίες [47-49] έγιναν προσομοιώσεις του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, οι οποίες συγκρίνονται με μετρηθέντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο αλγόριθμος της προσομοίωσης χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο του χρόνου, λαμβάνοντας υπ' όψιν το μη γραμμικό μοντέλο του ηλεκτρικού τόξου.

Πρόσφατες δημοσιεύσεις της ερευνητικής ομάδας του D. Pommerenke [50, 51] ασχολούνται με το τι θα πρέπει να περιλαμβάνει η επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι οι τέσσερις παράμετροι που ορίζει το Πρότυπο δεν αρκούν για την κατασκευή των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για αυτό το λόγο προτείνουν πως στην επόμενη αναθεώρησή του, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το παραγόμενο μεταβατικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τις γεννήτριες αυτές. Παρουσιάζοντας μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, του μέγιστου ρεύματός τους και του χρόνου ανόδου για εκφορτίσεις αέρα (5 kV, 850 μm μήκος τόξου) προτείνουν τα όρια για την παράγωγο του ρεύματος εκφόρτισης, για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και για τις επαγόμενες τάσεις, όπως αυτά θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου.

Σε εργασία των Kang, Fujiwara και Lee [52] γίνεται θεωρητική ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσω αναλυτικών εξισώσεων, που προκύπτουν από την ανάλυση με δίπολο. Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν αποδεικνύουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο δεν φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση, λόγω της διαφοράς φάσης μεταξύ του διαδιδόμενου και του ανακλώμενου κύματος.

Οι Tomita και Tabata [53] μέτρησαν το ηλεκτρικό πεδίο, που παράγεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με χρήση αισθητήρα, η λειτουργία του οποίου

βασίζεται στο φαινόμενο Rockels από τη Φυσική Κυματική. Παρουσιάζεται η εξάρτηση του ηλεκτροστατικού πεδίου από το ύψος, την τάση φόρτισης και τη χωρητικότητα του σώματος, που προκαλεί την εκφόρτιση, όταν η εκφόρτιση γίνεται 15 cm από τον αισθητήρα.

Οι Leuchtmann και Sroka [54, 55] ασχολούνται με την προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης προκειμένου να υπολογισθεί το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι τοποθετημένος στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας, όπως ορίζεται από τη διαδικασία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων από το υπάρχον Πρότυπο. Η σύγκριση που έγινε με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα έδειξε πολύ καλή συμφωνία για το μαγνητικό πεδίο, αλλά όχι τόσο καλή σύγκλιση για το ηλεκτρικό πεδίο. Μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες από δύο διαφορετικούς κατασκευαστές κατάλληλοι για το ταχύ μεταβατικό φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν οι συγγραφείς είναι ότι η μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι αρκετά μεγάλη πρόκληση και τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τη μετρητική διάταξη (παλμογράφος και αισθητήρες), που χρησιμοποιούνται.

Στη διδακτορική του διατριβή ο Bendjamine [56] εξετάζει τα χαρακτηριστικά της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βασισμένος στο ρεύμα, την οπτική ακτινοβολία και το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Σε δημοσίευσή του [57] μετρά ταυτόχρονα την ορατή ακτινοβολία, το μαγνητικό πεδίο και το ρεύμα εκφόρτισης, που παράγεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Η ιδέα αυτή είχε ήδη εφαρμοσθεί στην έρευνα για το κεραυνικό ρεύμα [58]. Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι κατά τα πρώτα ns το οπτικό σήμα είναι παρόμοιο με το ρεύμα εκφόρτισης, ενώ αντιθέτως στην ουρά οι δύο κυματομορφές παρουσιάζουν διαφορές, καθώς ενώ το ρεύμα εκφόρτισης έχει σχεδόν μηδενισθεί το οπτικό σήμα έχει αρκετά μεγάλη τιμή. Το μέγιστο ρεύμα σχετίζεται γραμμικά με το μέγιστο του οπτικού σήματος με συντελεστή συσχέτισης 0,9. Το πλεονέκτημα που παρέχει η μέτρηση του οπτικού σήματος είναι ότι η μέτρησή του γίνεται απευθείας χωρίς την παρεμβολή άλλων μετρητικών διατάξεων. Ο ίδιος συγγραφέας [59] παρουσιάζει μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου πολύ κοντά σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (0,1-0,6 cm). Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα θεωρητικά από το μοντέλο του δίπολου. Η μεταξύ τους σύγκριση δείχνει ότι το μετρούμενο πεδίο είναι υψηλότερο σε σχέση με το υπολογισθέν και αυτό εξαιτίας της επίδρασης του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας.

Τέλος, σε άλλη του εργασία [60] παρουσιάζονται μετρήσεις του ρεύματος και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις 1-3 cm μακριά από το σημείο εκφόρτισης. Διαπιστώθηκε ότι το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από την ένταση και την κυματομορφή του ρεύματος, ενώ το μέγιστο του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται, καθώς η απόσταση από το σημείο εκφόρτισης αυξάνεται.

Άλλοι ερευνητές [61] εκτίμησαν το ρεύμα εκφόρτισης μέσω του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, βάσει των εξισώσεων των Wilson και Ma [42]. Η εκτίμηση του ρεύματος γίνεται, είτε μέσω μέτρησης μόνο του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο, είτε με μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο σημεία. Η σύγκριση μεταξύ του ρεύματος, που μετρήθηκε και αυτού που υπολογίστηκε, έδειξε ότι η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ακριβής.

Σε εργασία των Cerri, Coacci, Fenucci και Primiani [62] αποδεικνύεται ότι οι ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες για τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση ταχέων μεταβατικών φαινομένων, όπως είναι η ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Αυτό επιτυγχάνεται μετά από μια κατάλληλη διαδικασία, η οποία στηρίζεται στη γνώση της συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα. Το προτεινόμενο μοντέλο επιβεβαιώνεται από αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Σε άλλη εργασία των Cerri et al. [63] παρουσιάζεται μια ακριβής ανάλυση των αποτελεσμάτων, που έχει η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα αναπαριστώντας τη μεταλλική θωράκιση διαφόρων συσκευών. Οι εκφορτίσεις γίνονται, είτε απευθείας στο μεταλλικό πλαίσιο, είτε αυτές οδηγούνται μέσα στο περίβλημα μέσω μιας γραμμής μεταφοράς. Το μοντέλο, που αναλύεται χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διαταραχής πάνω σε μια γραμμή μεταφοράς «θύμα» για διάφορες μορφές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Τα αποτελέσματα τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και της συχνότητας επιβεβαιώνονται από πειραματικά αποτελέσματα.

Στην εργασία των Cerri, Primiani και Righetti [64] παρουσιάζεται μια αναλυτική και πειραματική μελέτη της σύζευξης της ροής του ρεύματος, μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας ενός μεταλλικού ορθογώνιου κελύφους με σχισμές και της εσωτερικής του επιφάνειας. Το ηλεκτρικό πεδίο για τις δύο επιφάνειες έχει υπολογισθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου συγκρίθηκαν με αυτά από μετρήσεις και αποδείχθηκε καλή μεταξύ τους σύγκλιση. Σε άλλη ανάλογη εργασία τους [65] ερευνάται θεωρητικά και πειραματικά η

ηλεκτροστατική εκφόρτιση, όταν αυτή έμμεσα επηρεάζει ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η διερεύνηση γίνεται για τρεις τυπικές κατασκευές: ομοαξονικό καλώδιο, πολυστρωματικό PCB και μεταλλική θωράκιση. Η θεωρητική προσέγγιση γίνεται βάσει της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Η σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία.

Άλλοι ερευνητές [66] ασχολήθηκαν θεωρητικά και πειραματικά με τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, το οποίο εκπέμπεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, όταν οι διατάξεις στις οποίες γίνεται η εκφόρτιση είναι τέτοιες, ώστε ο χρόνος διάδοσης του ρεύματος σε αυτές να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης (π.χ. ένα καλώδιο). Γι' αυτό το λόγο θεωρούν την κατανομή του ρεύματος μη ομογενή και γι' αυτό η θεωρητική ανάλυση που κάνουν δεν στηρίζεται στο μοντέλο του δίπολου, αλλά σε κατάλληλη αριθμητική μέθοδο και συγκεκριμένα σε ολοκληρωτική εξίσωση του τροποποιημένου ηλεκτρικού πεδίου. Οι κεραιές που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις μοντελοποιήθηκαν με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξαν μεταξύ τους πολύ καλή συμφωνία.

Ο Fujiwara σε εργασία του [67] υπολογίζει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται από την ανάπτυξη σπινθήρα μεταξύ μεταλλικών σφαιρών με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (μέθοδος πηγών τάσης) με την τάση του σπινθήρα σαν πηγή έντασης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που αναφέρονται σε άλλη εργασία του [68] (όπου εκεί χρησιμοποιήθηκαν πηγές ρεύματος) έδειξε ότι η ανάλυση του ηλεκτροστατικού πεδίου είναι πιο ακριβής.

Οι Ishigami και Iwasaki [69] μέτρησαν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε μικρά διάκενα της τάξης των 0,1 mm, όπου σημειώνονται ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις για τάσεις 1-2 kV. Παρατηρείται ότι όταν το μήκος του διακένου είναι 0,1 mm ο χρόνος ανόδου είναι 0,3 ns και το αρχικό στατικό φορτίο 5,6 nC. Επίσης, υπολογίζεται το αρχικό φορτίο χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους. Η πρώτη μέσω μετρήσεων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, ενώ η δεύτερη μέσω μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου σε δύο διαφορετικές αποστάσεις.

Σε εργασία των Gianneti, Macucci και Tellini [70] διαπιστώνεται ότι τελικά ο ρόλος του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου, κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο εκπεμπόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι αμελητέο σε σχέση με το υπόλοιπο κύκλωμα, που υπάρχει κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Συγκεκριμένα αποδεικνύουν με κατάλληλη πειραματική διάταξη και με μετρήσεις του ηλεκτρικού

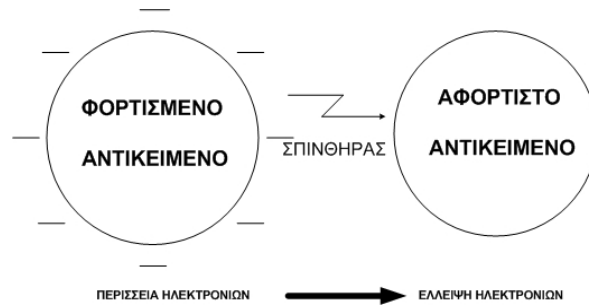
πεδίου ότι αυτό, που έχει μεγαλύτερη συμμετοχή στο ηλεκτρικό πεδίο είναι η χωρητικότητα του εκφορτιζόμενου σώματος παρά το δημιουργούμενο ηλεκτρικό τόξο.

Τα τελευταία χρόνια αρκετή βαρύτητα έχει δοθεί στις επιπτώσεις που ενδεχομένως να έχουν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Οι Dawson, Stuchly και Kavet [71] εξετάζουν το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ως προς τις επιπτώσεις, που μπορεί να έχει στην ανθρώπινη υγεία. Συγκεκριμένα εφαρμόζοντας μια αριθμητική μέθοδο υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου στους ανθρώπινους ιστούς [72] διαπιστώνουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο στους ανθρώπινους ιστούς προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι μεγαλύτερο από αυτό των γραμμών μεταφοράς. Η μελέτη γίνεται για συγκεκριμένου ενδιαφέροντος ιστούς και περιοχές του ανθρώπινου σώματος. Βέβαια, τονίζεται ότι το φαινόμενο δεν είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό δεδομένου ότι το φαινόμενο διαρκεί μόλις ελάχιστα ns.

Σε άλλη εργασία των Okoniewska, Stuchly και Okoniewski [73] υπολογίζεται το ηλεκτρικό πεδίο και η απορροφητικότητα διαφόρων οργάνων και ιστών βάσει ενός αριθμητικού μοντέλου, το οποίο θεωρεί έναν μέσο άνθρωπο να προκαλεί ηλεκτροστατική εκφόρτιση με την άκρη του δακτύλου του. Οι υπολογισμοί απέδειξαν ότι μόνο για αποστάσεις πολύ κοντινές στο δάκτυλο οι συχνότητες του παραγόμενου πεδίου μπορεί να φτάσουν το 1 GHz. Γενικά η κατανεμημένη χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος ως προς το έδαφος συμπεριφέρεται σαν βαθυπερατό φίλτρο. Γενικά η απορρόφηση ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα είναι πολύ χαμηλότερη από τα όρια που ορίζει το IEEE [74].

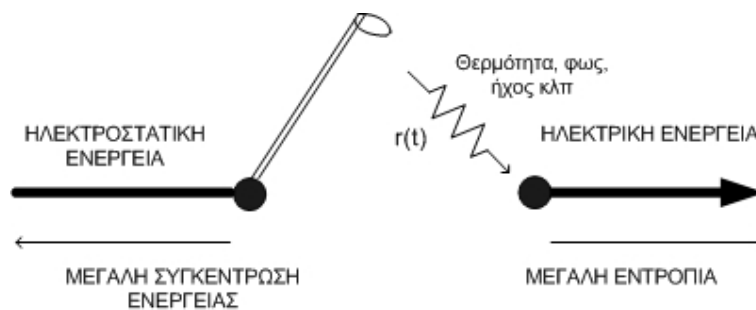
1.6 Ηλεκτρικό τόξο στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρος

Ο M. Honda σε σχετική του εργασία [75] ασχολήθηκε με την κατεύθυνση που έχει η ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Στο σχήμα 1.4, που ακολουθεί φαίνεται η εκφόρτιση ενός φορτισμένου αντικειμένου με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο πάνω σε ένα άλλο που είναι αφόρτιστο. Ξεσπάει σπινθήρας μεταξύ των δύο αντικειμένων και η κίνηση του φορτίου γίνεται από το φορτισμένο προς το αφόρτιστο αντικείμενο. Το όλο φαινόμενο βασίζεται στη φυσική των θερμοδυναμικών συστημάτων. Έτσι, σε συνθήκες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης υπό τάση μικρότερη των 3 kV το διάκενο αέρα συμπεριφέρεται σαν δίοδος, δηλαδή το ρεύμα εκφόρτισης ορίζεται ως η αντίθετη φορά της κίνησης των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 1.4: Η φορά της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [75]

Η ηλεκτροστατική ενέργεια $W_0 = \frac{C \cdot V^2}{2}$ η οποία αποθηκεύεται σε ένα μεταλλικό αντικείμενο κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης μετασχηματίζεται σε φως, ήχο, ενέργεια ιονισμού, σε ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, αλλά κυρίως σε θερμική ενέργεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5.



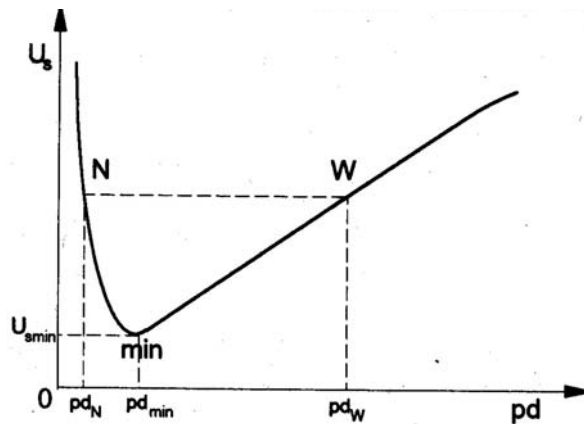
Σχήμα 1.5: Ο σπινθήρας εκφόρτισης ως μετατροπέας της ενέργειας [75]

Η θερμική ενέργεια διαχέεται στην ατμόσφαιρα και οφείλεται στην ύπαρξη της αντίστασης $r(t)$ στο διάκενο αέρα σε κατάσταση πλάσματος. Κάθε μορφή ενέργειας χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή μετατροπής της αρχικής ηλεκτροστατικής ενέργειας. Έτσι, η θερμική ενέργεια έχει ένα συντελεστή μετατροπής n_h 95%, που εκφράζει ότι η θερμική ενέργεια είναι το 95% της αρχικής ηλεκτροστατικής ενέργειας. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η ηλεκτροστατική εκφόρτιση συμβαίνει σε υψηλή τάση (>3 kV) ηλεκτρόνια συγκρούονται με διάφορα μόρια αερίων όπως υδρατμοί ή CO₂ γεγονός που αυξάνει το συντελεστή μετατροπής.

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να γίνει είτε εξ επαφής είτε εξ αποστάσεως (δηλαδή να υπάρξει διάσπαση του ατμοσφαιρικού αέρα). Υπάρχει όμως και ένας ενδιάμεσος τρόπος κατά τον οποίο η διάσπαση γίνεται με κίνηση του φορτισμένου σώματος (στα πειράματα η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων) προς το στόχο με ταχύτητες από 0,1 έως 1 m/sec. Συνεπώς το διάκενο του αέρα (g) δεν είναι

σταθερό με το χρόνο και μειώνεται στο 0 με την τελική επαφή. Αυτή η αλλαγή του διακένου με το χρόνο διαφέρει από τη φυσική των εκφορτίσεων στην κατάσταση πλάσματος.

Η τάση διάσπασης του διακένου U_s εξαρτάται από το νόμο του Paschen. Ο νόμος του Paschen [76] συνδέει την ελάχιστη τάση διάσπασης U_s με την πίεση p και το μήκος του διακένου d . Δηλαδή μεταβολή στην πίεση ή στο διάκενο επηρεάζει την τάση διάσπασης, γιατί μεταβάλλει το γινόμενο pd , κάτι που ισχύει και για τον ατμοσφαιρικό αέρα, στον οποίο λαμβάνει χώρα η ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Γενικά ισχύει: $U_s=f(p \cdot d)$. Η σχέση μεταξύ της τάσης U_s και του γινομένου pd φαίνεται στο σχήμα 1.6 και λέγεται καμπύλη του Paschen. Είναι προφανές ότι για κάθε τάση μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή της καμπύλης του Paschen υφίστανται δύο τιμές του pd . Για τον ατμοσφαιρικό αέρα ισχύει $U_{smin}=330$ V και $p \cdot d_{min}=0,57$ mmHg·cm.



Σχήμα 1.6: Η καμπύλη του Paschen [76]

Σύμφωνα με τους Kang, Fujiwara και Wang [77] η αντίσταση του ηλεκτρικού τόξου στις εκφορτίσεις αέρα περιγράφεται από δύο σχέσεις. Η πρώτη είναι των Rompre-Weizel [78] και η δεύτερη του Toepfer [79]. Στην εργασία αυτή οι συγγραφείς χρησιμοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα των Wilson και Ma [42] υπολογίζουν μέσω αυτών των δύο σχέσεων το ρεύμα εκφόρτισης και το ηλεκτρικό πεδίο, όπου και διαπιστώνεται ότι δεν αποκλίνουν πολύ από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ανάλογη εργασία [80] έχει σαν δεδομένο πως η ηλεκτροστατική εκφόρτιση δεν είναι πάντα ανάλογη της τάσης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και επίσης ότι μερικές φορές μικρότερες τάσεις σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις προκαλούν σοβαρότερα

προβλήματα σε ηλεκτρονικές συσκευές. Ενδεχομένως κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία και κατ' επέκταση σε διαφορετικές επαγόμενες τάσεις ή με τις προστασίες, που έχουν οι εν λόγω ηλεκτρονικές συσκευές. Προκειμένου λοιπόν ο συγγραφέας να εξετάσει θεωρητικά αυτό το παράξενο φαινόμενο, προτείνει μια αναλυτική μέθοδο για τη μοντελοποίηση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το μοντέλο της πηγής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι αυτό της αντίστασης του τόξου, που παρουσιάστηκε από τους Rompe και Weizel [78]. Επίσης, γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των Wilson και Ma [42] για σφαιρική διατομή ηλεκτροδίων σε απόσταση 0,20-1,40 mm.

O D. Pommerenke [51] διαπίστωσε ότι οι ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές εξαρτώνται κυρίως από το μήκος του ηλεκτρικού τόξου και όχι τόσο από την τάση. Με χρήση πειραματικής διάταξης κατέληξε ότι το μήκος του ηλεκτρικού τόξου επηρεάζεται από την τάση εκφόρτισης, την ταχύτητα προσέγγισης του φορτισμένου αντικειμένου προς το σημείο εκφόρτισης και το χρόνο ουράς του ρεύματος.

Έχουν υπάρξει αρκετές εργασίες σχετικά με τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις για μικρές τάσεις φόρτισης. Οι Kawamata, Minegishi και Haga [81] διερεύνησαν πολύ μικρή διάρκεια του φαινομένου της εκφόρτισης σε μικρά διάκενα και για χαμηλή τάση εκφόρτισης (< 2 kV) τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και της συχνότητας. Στην εργασία αυτή [82] η μετρητική διάταξη που προτείνουν έχει βελτιωθεί και το εύρος ζώνης από 4,5 GHz έχει αυξηθεί στα 6 GHz. Ο χρόνος ανόδου ήταν κάτω από 90 ns για τάση εκφόρτισης κάτω από 600 V.

Στην εργασία των Bonisch, Pommerenke και Kalkner [83] παρουσιάζονται οι διαφορετικοί μηχανισμοί ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίοι είναι πιθανοί για τάσεις κάτω από 2 kV, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων, όπως το μήκος του διακένου, η τάση διάσπασης, το υλικό των ηλεκτροδίων και η πίεση του αερίου. Παρουσιάστηκε ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης σαν συνάρτηση αυτών των παραμέτρων. Από τις μετρήσεις φαίνεται ότι για τάσεις διάσπασης 600-700 V οι χρόνοι ανόδου είναι πολύ μικροί και της τάξης των 40 ns. Για τάσεις μεταξύ 700-2000 V οι χρόνοι ανόδου αυξάνουν με τη μέγιστη τιμή τους στα 800 V. Επίσης, οι συγγραφείς της [84] ασχολούνται με τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σε μικρά διάκενα, όπου δύο διαδικασίες λαμβάνουν χώρα, μια επιφανειακή διεργασία και το φαινόμενο της χιονοστιβάδας. Αναπτύσσονται δύο μοντέλα ένα φαινομενολογικό, στο οποίο λαμβάνεται υπ' όψιν ο νόμος του Toepfer για τη μοντελοποίηση του

φαινομένου της χιονοστιβάδας και ένα φυσικό, στο οποίο λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν τα φαινόμενα ιονισμού εντός των αερίων. Και τα δύο μοντέλα λαμβάνουν υπ' όψιν τους τα δύο φαινόμενα που συμβαίνουν στα μικρά διάκενα, ενώ και στα δύο υπάρχει συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό που έχει καλύτερη σύγκλιση είναι το φαινομενολογικό μοντέλο. Οι δύο προηγούμενες εργασίες, που περιγράφηκαν είναι ουσιαστικά η διδακτορική διατριβή του Bonisch [85].

Σε άλλη εργασία [86] παρουσιάζονται μετρήσεις ταχέων μεταβατικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων για εκφορτίσεις που λαμβάνουν χώρα σε μικρά διάκενα (0,1 mm) και για χαμηλές τάσεις (± 800 V). Έγινε εκτίμηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσω του ρεύματος εκφόρτισης, το οποίο συγκρίθηκε με το μετρούμενο. Η απόκλιση ήταν εξαιρετικά μεγάλη, γεγονός που έδειξε ότι εκτίμηση του πεδίου από το ρεύμα για τέτοια διάκενα και τέτοιες τάσεις δεν είναι εφικτή.

Ο Honda [87] εξετάζει από δύο διαφορετικές πλευρές την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Αρχικά εξετάζει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε χαμηλή τάση (3 kV ή και χαμηλότερα). Παρατηρείται ότι για τέτοιες τάσεις το διάκενο συμπεριφέρεται στιγμιαία σαν διακόπτης και επίσης σαν δίοδος. Επίσης, μετράται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε διάκενα, όπου και παρατηρείται ότι το πεδίο εξαρτάται από τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μεταλλικού αντικειμένου, που εκφορτίζεται. Τέλος, διαπιστώνεται ότι η διαφορά της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για υψηλές και χαμηλές τάσεις έγκειται στο γεγονός ότι κάθε φορά η ενέργεια μετασχηματίζεται με διαφορετικό τρόπο.

Ο Greason [88] υπολογίζει μέσω πειραματικής διάταξης την αντίσταση του ηλεκτρικού τόξου, που δημιουργείται στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρα. Στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιεί μετρά το ρεύμα εκφόρτισης, καθώς και την οπτική ακτινοβολία, που παράγεται ανάμεσα σε ένα διάκενο δύο μεταλλικών σφαιρών. Κατόπιν, με κυκλωματική επίλυση της διάταξης, που χρησιμοποιεί υπολογίζει την αντίσταση και την επαγωγή του ηλεκτρικού τόξου για διάφορα διάκενα.

1.7 Σχεδίαση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Το υπάρχον Πρότυπο [17] πρόκειται στο άμεσο μέλλον να αναθεωρηθεί. Βασικό μέλημα της ομάδας εργασίας πρέπει να είναι το να συμπεριλάβει στην επόμενη αναθεωρημένη του έκδοση νέες παραμέτρους στην κυματομορφή του ρεύματος, καθώς και όρια για το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ο Fujiwara, Tanaka

και Yamanaka [89] προτείνουν ένα τροποποιημένο κύκλωμα για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Όπως ορίζει το Πρότυπο [17] το ρεύμα εκφόρτισης έχει δύο κορυφές. Τα δύο αυτά διαφορετικά τοπικά μέγιστα, που αποτελούν και διαφορετικά μεταβατικά φαινόμενα, προσομοιώνονται με δύο διαφορετικά κυκλώματα. Συγκεκριμένα, με χρήση του μετασχηματισμού Laplace και με υπέρθεση των δύο αυτών κυκλωμάτων παράγεται η κυματομορφή του ρεύματος, που ορίζει το Πρότυπο. Επίσης, στην ίδια εργασία γίνεται επαλήθευση του κυκλωματικού μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα, όπου η πειραματική διάταξη, αντί για ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης (Pellegrini target) περιλαμβάνει SMA σύνδεσμο των 50 Ω. Η σύγκριση αυτή απέδειξε ότι το μοντέλο επιβεβαιώνεται σε πολύ καλό βαθμό.

Ο Miwota [90] παρουσιάζει τις αποκλίσεις, που εμφανίζονται στο ρεύμα εκφόρτισης προερχόμενο από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όταν διάφορες συνθήκες αλλάζουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αυτό το επιτυγχάνει μέσω προσομοιώσεων του προγράμματος Spice, όπου σε προτεινόμενα ηλεκτρονικά κυκλώματα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων αλλάζει κάποια στοιχεία στο κύκλωμα της γεννήτριας. Διαπιστώνεται ότι σημαντικό ρόλο στην παράμετρο I_{60} της κυματομορφής του ρεύματος παίζει η τιμή του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας και προτείνει μια σχετικά εύκολη διαδικασία στο σχεδιασμό γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

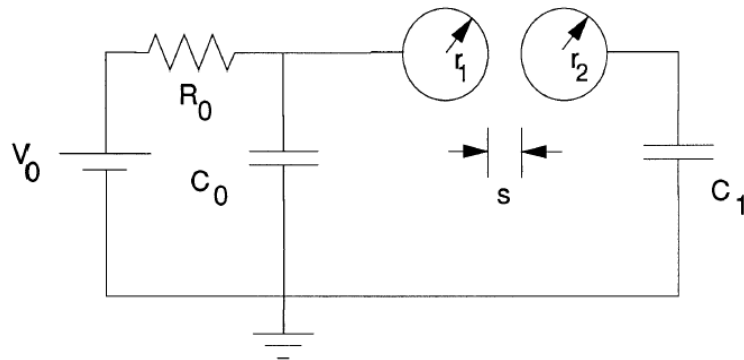
Σε εργασίες του Pommerenke [22, 91] το ρεύμα και τα μεταβατικά πεδία από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις επαφής προσομοιώνονται αριθμητικά μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Αρχικά υπολογίζεται το στατικό πεδίο και κατόπιν αλλάζει η αγωγιμότητα της επαφής του ρελέ, το οποίο προκαλεί τη διαδικασία της εκφόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα από τις προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της επίδρασης των διαφόρων σχεδιαστικών επιλογών στη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, πάνω στο ρεύμα εκφόρτισης και τα παραγόμενα πεδία. Τα δεδομένα από τις προσομοιώσεις συγκρίνονται με το μετρούμενο πεδίο και το μετρούμενο ρεύμα, απ' όπου αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη πεδίων και ρευμάτων από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Επιπλέον, είναι εξαιρετικά χρήσιμο στην πρόβλεψη ρεύματος και πεδίου για διάφορες σχεδιαστικές αλλαγές στη γεννήτρια.

Δημοσίευση της ερευνητικής ομάδας του Pommerenke [50] ασχολείται με το τι θα πρέπει να περιλαμβάνει η επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου [17]. Οι συγγραφείς

αναφέρουν ότι οι τέσσερις παράμετροι, που ορίζει το Πρότυπο δεν αρκούν για την κατασκευή των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για αυτό το λόγο προτείνουν πως στην επόμενη αναθεώρησή του θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν το παραγόμενο μεταβατικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τις γεννήτριες αυτές. Παρουσιάζοντας μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, του μέγιστου ρεύματός τους και του χρόνου ανόδου για εκφορτίσεις αέρα (5 kV, 850 μm μήκος τόξου) προτείνουν τα όρια για την παράγωγο του ρεύματος εκφόρτισης, για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και για τις επαγόμενες τάσεις, όπως αυτά θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου.

1.8 Προσομοίωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Πολλοί ερευνητές έχουν κατά καιρούς προσπαθήσει να προσομοιώσουν το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης προκειμένου να κατανοήσουν καλύτερα το φαινόμενο. Ο Greason [92] 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 RC κύκλωμα τροφοδοτούν δύο μεταλλικές σφαίρες με διάκενο ανάμεσά τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7. 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 της τάξης 1-100 cm/sec.



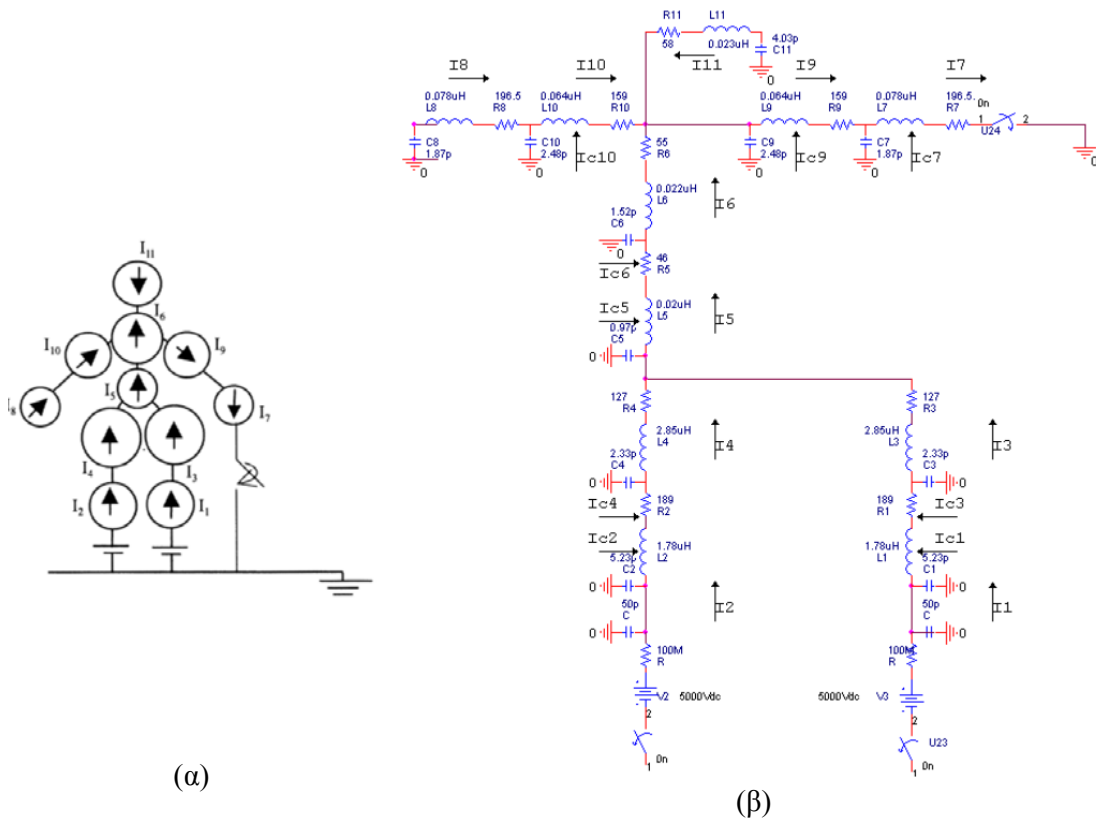
Σχήμα 1.7: Κύκλωμα προσομοίωσης της ταχύτητας προσέγγισης ενός ηλεκτροδίου [92]

Οι Amoruso, Helali και Lattarulo [14, 93] αναπαριστούν το ανθρώπινο σώμα σε 11 βασικά μέρη, τα οποία αντιστοιχούνται με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά τους ανάλογα, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.5. Το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο προτείνεται και το οποίο αναπαριστά το ανθρώπινο σώμα είναι ένα RLC κύκλωμα. 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 1.8.

Στοιχείο	Χωρητικότητα(ρF)	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

Πίνακας 1.5: Ηλεκτρικές παράμετροι ανθρωπίνου σώματος [14, 93]



Σχήμα 1.8: α) Τα 11 βασικά μέρη του ανθρωπίνου σώματος, β) Κυκλωματική αναπαράσταση του ανθρωπίνου σώματος στο Pspice [14, 93]

Οι Giannetti και Tellini [94] 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 σχεδιασμένα 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 χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων.

1.9 Επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτρονικές διατάξεις

Το κύριο πρόβλημα, που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η καταστροφή ηλεκτρολογικών ή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχουν και οι επαγόμενες τάσεις, που προκαλούνται από τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, λόγω των παραγόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και αυτό, γιατί επιδρούν προσθετικά στα ήδη υπάρχοντα δυναμικά προερχόμενα από το ρεύμα ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Σε πρόσφατη έρευνα του καθηγητή Pommerenke [95, 96] αποδεικνύεται ότι οι επαγόμενες τάσεις σε ένα μικρό βρόχο συσχετίζονται με το επίπεδο αποτυχίας που παρατηρείται σε ένα τεστ ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε συσκευές οι οποίες περιλαμβάνουν CMOS συστήματα, σε αντίθεση με το χρόνο ανόδου και την παράγωγο του ρεύματος, που δεν συσχετίζονται ικανοποιητικά. Συγκρίνοντας τις ηλεκτρικές παραμέτρους γεννητριών, που είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με το υπάρχον Πρότυπο και γεννητριών, που έχουν τροποποιηθεί ως προς το ρεύμα και το πεδίο που παράγουν, όταν οι γεννήτριες αυτές δοκιμάζονται πάνω σε ηλεκτρονικά CMOS, προτείνεται ότι η επαγόμενη τάση από ηλεκτροστατική εκφόρτιση θα πρέπει να συμπεριληφθεί σαν παράμετρος στην επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου.

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε αεροσκάφη και δορυφόρους, καθιστά αναγκαίο τον έλεγχο τους ως προς την ηλεκτρομαγνητική τους συμβατότητα. Η εργασία των Bandinelli, Bessi, Chiti και Giorgi [97] εξετάζει την επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πάνω σε διάφορα συστήματα, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση της προσομοίωσης με αντίστοιχες μετρήσεις έδειξε πολύ καλή συμφωνία.

Σε εργασία των Rudack, Pendley και Levit [98] παρουσιάζεται μια μέθοδος για την ποσοτικοποίηση της έντασης και του ρυθμού των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών των προερχομένων από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν ήταν η εύρεση της μέγιστης τάσης του μεταβατικού αυτού φαινομένου. Η τεχνική μέτρησης εφαρμόστηκε με παρουσία ή όχι ιονισμού για τη

μέτρηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών σε μικροεπεξεργαστές. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι οι παρεμβολές, οι οποίες καταγράφηκαν ήταν 30 φορές μεγαλύτερες χωρίς την παρουσία ιονιστών.

Σε εργασία των Diaz, Kang και Dunvury [99] εξετάζεται η θερμική καταστροφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η οποία προέρχεται από ηλεκτρικές υπερεντάσεις και ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν έναν μη γραμμικό θερμικό προσομοιωτή για τη μελέτη των θερμικών καταπονήσεων πάνω σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το μοντέλο κρίνεται ικανοποιητικό δεδομένου ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκλίνουν ικανοποιητικά με αυτά των πειραματικών.

Ο Paasi σε εργασία του [100] αναγνωρίζοντας τον κίνδυνο, που διατρέχουν οι ηλεκτρονικές συσκευές, ιδιαίτερα κατά τη φάση της κατασκευής τους από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις κάνει μια ανασκόπηση στα υπάρχοντα μοντέλα και Πρότυπα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Συγκρίνοντας αποτελέσματα και από άλλους ερευνητές προτείνει ότι τα μέχρι τώρα όρια, που ορίζονται για τις δοκιμές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων πρέπει να συμπληρωθούν με όρια για μεγέθη όπως η ενέργεια και το φορτίο.

Για περισσότερα από 20 χρόνια η ευαισθησία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων έχει οδηγήσει στη δημιουργία κυκλωμάτων για προστασία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Η σχεδίαση τέτοιων κυκλωμάτων προστασίας είναι ολοένα και πιο επιτακτική δεδομένου ότι οι διαστάσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συνεχώς ελαττώνονται. Ο Beebe στη διδακτορική του διατριβή [101] αναπτύσσει μια μεθοδολογία σχεδίασης τρανζίστορ προστασίας, έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Η μεθοδολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης όταν δοθούν οι παράμετροι του υπό προστασία κυκλώματος. Το μοντέλο που χρησιμοποιεί είναι το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος. Προς την ίδια κατεύθυνση είναι και η διδακτορική διατριβή του Esmark [102] και του Kwang-Hoon Oh [103].

1.10 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση και η συσχέτισή της με την ασθένεια της ημικυκλικής λιποατροφίας (lipoatrophia semicircularis)

Η ιατρική βιβλιογραφία περιγράφει την ημικυκλική λιποατροφία (Lipoatrophia Semicircularis) σαν μια σπάνια, ιδιοπαθή κατάσταση, η οποία κλινικά αποτελείται

από μια ημικυκλική ατροφική ζώνη ως προς τον λιπώδη ιστό, η οποία είναι τοποθετημένη κυρίως στο εμπρός μέρος των μηρών. Ουσιαστικά δηλαδή εμφανίζεται στο εμπρός μέρος των μηρών μια ημικυκλική ζώνη από την οποία έχει εξαφανισθεί το λίπος. Τονίζεται ότι οι μύες και το δέρμα, που υπάρχει κάτω από την ατροφική ζώνη είναι ανέπαφα, όπως φαίνεται στην σχήμα 1.9. Για πρώτη φορά η πάθηση αυτή αναφέρθηκε το 1974 από τους Gschwandtner και Münzberger [104-105]. Αυτή η δυσλειτουργία εντοπίζεται κυρίως σε εργαζομένους γραφείων. Μέχρι στιγμής το αίτιο που προκαλεί αυτή την πάθηση είναι άγνωστο.



Σχήμα 1.9: Ημικυκλικές λιποατροφικές ζώνες στο εμπρός μέρος των μηρών [106]

Την πάθηση αυτή την εμφάνισαν οι εργαζόμενοι της τράπεζας KBC στο Βέλγιο [106]. Την άνοιξη του 1995 οι 1100 εργαζόμενοι της τράπεζας KBC στις Βρυξέλες μετακόμισαν στα νέα γραφεία τους. Το νέο κτίριο ήταν εξοπλισμένο με νέα καλώδια δεδομένων, νέα έπιπλα και νέα τηλέφωνα, ενώ ο περισσότερος εξοπλισμός σε υπολογιστές ήταν ο ίδιος με πριν. Τον Ιούνιο του 1995, σε ορισμένες γυναίκες διαγνώστηκε ημικυκλική λιποατροφία για πρώτη φορά. Έξι μήνες αργότερα ακόμα 135 άτομα ανέπτυξαν την ίδια ασθένεια, ενώ μέχρι το 2003 υπήρχαν καταγεγραμμένες 900 περιπτώσεις. Η πάθηση αυτή εμφανιζόταν κυρίως σε άτομα, που έκαναν χρήση υπολογιστή. Η ημικυκλική ατροφική ζώνη εμφανιζόταν στο μηρό σε ύψος 72 cm, με πλάτος 2 cm και βάθος περίπου 1-5 mm. Όταν τα άτομα, που ανέπτυσαν την ασθένεια αυτή άλλαζαν θέση εργασίας μέσα στην εταιρεία τα συμπτώματα αυτά εξαφανίζονταν μέσα σε μερικούς μήνες. Στο 95% των εργαζομένων, που συνταξιοδοτήθηκαν τα συμπτώματα εξαφανίστηκαν ένα περίπου χρόνο μετά.

Όλα αυτά τα χρόνια, που η ασθένεια είναι γνωστή, έχουν γίνει διάφορες υποθέσεις για τα αίτια, που την προκαλούν, όπως μικροτραύματα που δημιουργούνται από πιέσεις των ποδιών στα έπιπλα του γραφείου ή από τα στενά ρούχα, που φοράνε οι εργαζόμενοι, από τη θέση που κρατούν οι εργαζόμενοι κατά την εργασία τους, από

την ποιότητα του αέρα που υπάρχει μέσα στο εργασιακό περιβάλλον ή από το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον μέσα στον εργασιακό χώρο. Τίποτε από αυτά όμως δεν απέδειξε τη σχέση, που έχουν με την εν λόγω ασθένεια.

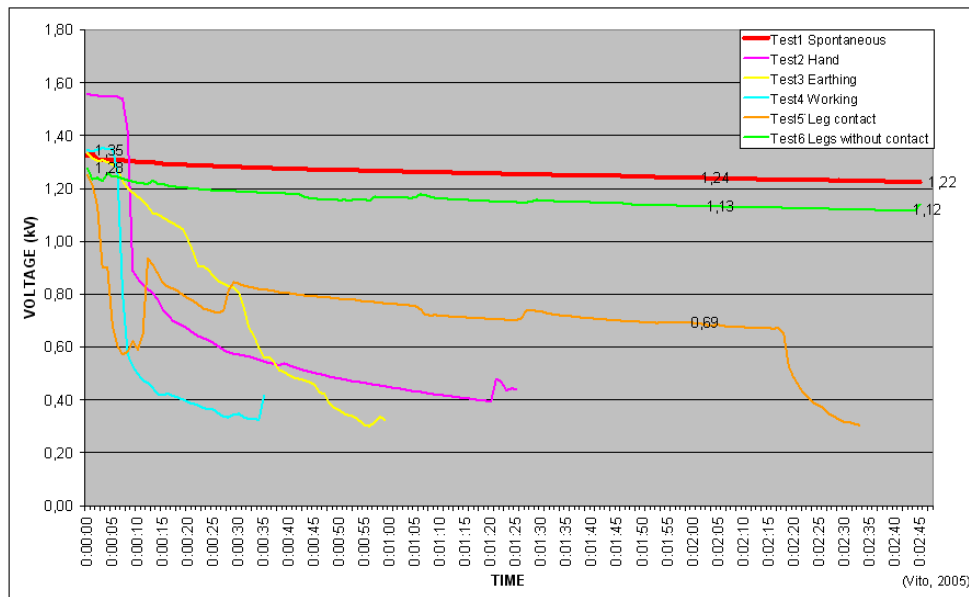
Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε εργασιακό χώρο γραφείου είναι μια πιθανή αιτία για την εμφάνιση της ασθένειας αυτής. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής ο γράφων εκλήθη από το ερευνητικό κέντρο Vito στο Βέλγιο για να συμμετάσχει σε πειράματα, ώστε να διερευνηθεί η σχέση, που υπάρχει μεταξύ της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και της ασθένειας αυτής [107]. Στα πειράματα, τα οποία έγιναν εξολοκλήρου στο ερευνητικό κέντρο δοκιμάστηκαν τέσσερα σετ γραφείων με τις καρέκλες τους. Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε αισθητήρες μέτρησης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, της Hameg, μοντέλα HZ530-E και HZ530-M αντίστοιχα, παλμογράφο TDS-3052 της Tektronix, γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων μοντέλο transient-1000 της EMC-Partner, καθώς επίσης και αισθητήρα μέτρησης της τάσης φόρτισης επιφάνειας, μοντέλο JCI 140F.

Αρχικά οι μετρήσεις οι οποίες έγιναν με τους αισθητήρες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου απέδειξαν ότι οι τιμές του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ήταν εξαιρετικά μικρές και επιπλέον η πολύ μικρή διάρκεια του φαινομένου δεν μπορεί να προκαλεί τέτοια βλάβη στον λιπώδη ιστό. Αυτό όμως που μελετήθηκε εκτενέστερα ήταν το πώς ελαττώνεται η τάση φόρτισης, που ανέπτυσαν οι πάνω επιφάνειες των γραφείων, όταν αυτές εκφορτίζονταν μέσω ανθρώπινων μελών. Στο σχήμα 1.10 φαίνεται πώς μειώνεται η τάση φόρτισης των επιφανειών των γραφείων για τις ακόλουθες συνθήκες:

- Test 1: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας χωρίς την παρεμβολή γειωμένου σώματος ή ανθρώπινου μέλους.
- Test 2: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας με παρεμβολή ενός χεριού στην πάνω επιφάνεια του τραπεζιού.
- Test 3: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας ακουμπώντας μια γειωμένη ακίδα.
- Test 4: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας σε κανονικές συνθήκες εργασίας (χέρια στο πάνω μέρος του γραφείου και πόδια χωρίς να ακουμπούν στο γραφείο).
- Test 5: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας ακουμπώντας το μηρό.

- Test 6: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας χωρίς επαφή και με τους μηρούς κάτω από το γραφείο.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που η εκφόρτιση γίνεται χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιο αντικείμενο, ο χρόνος εκφόρτισης είναι μεγάλος (test 1 και 6). Η πιο απότομη μείωση γίνεται στην περίπτωση των κανονικών συνθηκών εργασίας (test 4) και στις εκφορτίσεις μέσω χεριού (test 2) ή μέσω γειωμένου μεταλλικής ακίδας (test 3). Τέλος, στην περίπτωση της μείωσης της τάσης φόρτισης επιφάνειας ακουμπώντας το μηρό, η μείωση είναι πιο ομαλή και σε μεγαλύτερο χρόνο.



Σχήμα 1.10: Μείωση της τάσης φόρτισης επιφάνειας για διάφορες συνθήκες

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η περίπτωση εκφόρτισης του γραφείου μέσω του μηρού είναι στο ενδιάμεσο ως προς το πόσο απότομα μειώνεται η τάση φόρτισης επιφάνειας. Η υπόθεση όμως ότι ενδέχεται να υπάρχει σχέση μεταξύ της εκφόρτισης του γραφείου μέσω του μηρού δεν αποκλείει την εμφάνιση της ασθένειας, λόγω των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Αυτό που χρειάζεται να γίνει για να επιβεβαιωθεί η υπόθεση συσχέτισης της ημικυκλικής λιποατροφίας με το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι να γίνουν μετρήσεις του ρεύματος εκφόρτισης. Αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να γίνει με αισθητήρες μέτρησης ρεύματος (πηνία Rogowski με χρόνο ανόδου μικρότερο του 1 ns). Η αρχή λειτουργίας των πηνίων Rogowski στηρίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής και αποτελούνται από ένα βρόχο στα άκρα του οποίου μετράται τάση η οποία μετατρέπεται σε ρεύμα ανάλογα με τα κατασκευαστικά στοιχεία του πηνίου. Το πρόβλημα χρήσης των πηνίων Rogowski στο συγκεκριμένο

πρόβλημα είναι ότι χρειαζόμαστε πηνία των οποίων ο χρόνος ανόδου να είναι μικρότερος από 1 ns και επιπλέον να έχουν αρκετά μεγάλη διατομή. Δυστυχώς από τα μέχρι τώρα διαθέσιμα στην αγορά αν και μερικά έχουν χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns, ωστόσο η διατομή τους είναι εξαιρετικά μικρή (της τάξης των μερικών εκατοστών), γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

1.11 Αντικείμενο και σκοπός της διατριβής

Σκοπός της παρούσας διατριβής, όπως προέκυψε από τα κενά που υπάρχουν στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, είναι η μελέτη του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η οποία άπτεται του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, τόσο σαν αγόμενη, όσο και σαν ακτινοβολούμενη διαταραχή. Ειδικότερα μελετάται το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (ακτινοβολούμενη διαταραχή) από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, καθώς και η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης (αγόμενη διαταραχή).

Από την υπάρχουσα εργαστηριακή εμπειρία έχει διαπιστωθεί ότι ένα δοκίμιο, το οποίο εξετάζεται σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, μπορεί να περάσει τη δοκιμή με μια γεννήτρια και να αποτύχει με μια άλλη. Το γεγονός αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα σε οριακές περιπτώσεις αν περνά ή όχι το δοκίμιο τη δοκιμή. Το ερώτημα, που τίθεται είναι ποια είναι αυτή η αιτία, η οποία προκαλεί αυτή τη διαφορά ανάμεσα στις δύο γεννήτριες και όταν η τάση φόρτισης των γεννητριών είναι ίδια; Σωστά θα συμπεράινε κάποιος ότι για να υπάρχει διαφορετικό αποτέλεσμα μεταξύ των γεννητριών θα πρέπει να υπάρχει διαφορετικό ρεύμα εκφόρτισης κάθε φορά πάνω στο δοκίμιο. Πώς όμως είναι αυτό δυνατόν όταν το ρεύμα εκφόρτισης, που δίνει κάθε γεννήτρια είναι εντός των ορίων, που ορίζει το Πρότυπο; Η απάντηση είναι πως κάθε γεννήτρια δίνει για το ίδιο ρεύμα εκφόρτισης, διαφορετικές επαγόμενες τάσεις, λόγω του διαφορετικού πεδίου, που η καθεμιά παράγει. Για το λόγο αυτό στη διατριβή χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες πειραματικές διατάξεις για τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, κατά τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν τοποθετημένος στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας ή σε μονωτικό υπόστρωμα. Τελικά, όπως αποδεικνύεται στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε σχέση με μια άλλη στο γύρω από αυτή χώρο, καθώς επίσης υπάρχει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την κατεύθυνση ως προς την οποία γίνεται η μέτρηση.

Αυτές οι διαφορές στο παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο οδηγούν στη δημιουργία διαφορετικών επαγόμενων τάσεων, που σαν τελικό αποτέλεσμα είναι να έχουμε τα αντιφατικά αποτελέσματα για το ίδιο δοκίμιο με διαφορετικές γεννήτριες.

Όσον αφορά το ρεύμα από ηλεκτροστατική εκφόρτιση διαπιστώθηκε ότι υπάρχει απόκλιση της κυματομορφής, που ορίζει το υπάρχον Πρότυπο [17] και της κυματομορφής, που δίνει το κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως και αυτή ορίζεται στο ίδιο Πρότυπο. Το γεγονός αυτό δημιουργεί αφενός ασυμφωνία με το Πρότυπο, αλλά και προβλήματα σε κάποιον που χρησιμοποιεί το κύκλωμα αυτό σε κυκλωματικές προσομοιώσεις, καθώς εισάγει σφάλματα στα υπολογιζόμενα ηλεκτρικά μεγέθη, όπως τάσεις και ρεύματα. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί εύκολα με το να ευρεθεί μια αναλυτική μαθηματική εξίσωση, η οποία να περιγράφει με ακρίβεια το ρεύμα από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση αυτή σε κυκλωματικές προσομοιώσεις τα όποια σφάλματα υπάρχουν θα ελαχιστοποιηθούν.

Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί μια μαθηματική εξίσωση, η οποία θα μπορεί να περιγράψει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος έχοντας σαν είσοδό του ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως μετράται κατά τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, βελτιστοποιεί τις παραμέτρους εξισώσεων, οι οποίες δύνανται να περιγράψουν το ρεύμα. Τελικά, κατόπιν συγκρίσεων αποδεικνύεται ποια είναι η εξίσωση, η οποία έχει την καλύτερη προσαρμογή πάνω στα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ παρουσιάζονται και οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης αυτής για τις οποίες έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα. Η εξίσωση αυτή θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στην επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, ώστε αφενός να μην υπάρχει η υπάρχουσα απόκλιση και επιπλέον να αποτελέσει μια ακόμα παράμετρο, η οποία θα πρέπει να ελέγχεται κατά τη διακρίβωση των γεννητριών, ώστε να εξασφαλισθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και να περιορισθεί η αβεβαιότητα. Επιπλέον στην παρούσα διατριβή γίνεται ένα ακόμα βήμα. Αφού έχει βρεθεί η βέλτιστη εξίσωση, που μπορεί να περιγράψει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ακολουθείται η αντίστροφη πορεία. Δηλαδή, έχοντας σαν δεδομένο την εξίσωση και κάνοντας εφαρμογή της μεθόδου Prony από τη Σύνθεση Δικτύων βρίσκεται και προτείνεται το κύκλωμα εκείνο, που δίνει σαν έξοδό του τη δεδομένη κυματομορφή. Το κύκλωμα αυτό μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί σε κυκλωματικές προσομοιώσεις αίροντας την προαναφερθείσα ασυμφωνία που υπάρχει στο υπάρχον Πρότυπο.

Κεφάλαιο 2

ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

2.1 Σκοπός και βασικές αρχές της εργασίας

Εκτός των άλλων σκοπός της εργασίας είναι και η διερεύνηση του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, καθώς και η εύρεση μιας εξίσωσης η οποία θα περιγράφει ικανοποιητικά την κυματομορφή του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός απαιτείται η κατάλληλη πειραματική διάταξη, μέσω της οποίας θα μετράται και θα καταγράφεται, τόσο το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όσο και το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Η ανάγκη μέτρησης του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου οφείλεται στο γεγονός ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, που παράγει η καθεμιά γεννήτρια ως προς μια άλλη ή το πεδίο, που παράγει η ίδια γεννήτρια, ανάλογα με τον προσανατολισμό της είναι διαφορετικό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορετικές επαγόμενες τάσεις στον υπό εξέταση εξοπλισμό (δοκίμιο). Συνεπώς, χρησιμοποιώντας διαφορετικές ηλεκτροστατικές γεννήτριες είναι δυνατόν με μια γεννήτρια το δοκίμιο να περνά τη δοκιμή και με μια άλλη να αποτυγχάνει. Διαφορετικά αποτελέσματα μπορεί να έχουμε και με την ίδια γεννήτρια, δηλαδή με έναν προσανατολισμό A να περνά το δοκίμιο τη δοκιμή, ενώ με έναν άλλο προσανατολισμό B να αποτυγχάνει.

Για τη μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές πειραματικές διατάξεις. Στην πρώτη διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε [108-111] ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν προσαρμοσμένος εντός μονωτικού υλικού από PVC, υλικό το οποίο κατόπιν τοποθετήθηκε πάνω σε ξύλινη επιφάνεια. Η τοποθέτηση του ομοαξονικού προσαρμοστή επί μονωτικού υποστρώματος έγινε προκειμένου να γίνει καλύτερη διερεύνηση του πεδίου σε συνθήκες παραπλήσιες της πραγματικότητας. Στη δεύτερη διάταξη [112-114] ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στερεωμένος στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m, όπως ορίζει το Πρότυπο για τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

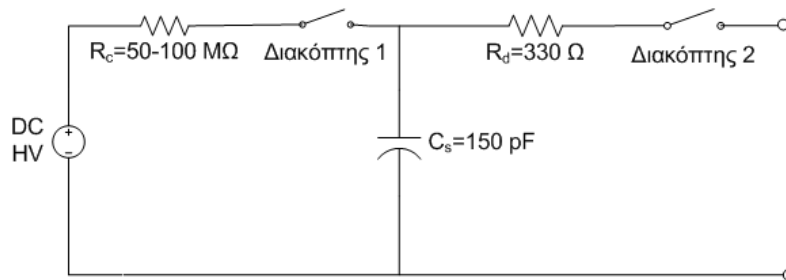
Σε κάθε περίπτωση πρέπει να τονισθεί ότι η μέτρηση του ρεύματος εκφόρτισης γινόταν ταυτόχρονα με τη μέτρηση του μαγνητικού ή του ηλεκτρικού πεδίου. Σε κάθε διάταξη μετρήθηκε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, που παράγει η κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις και για διάφορες τάσεις φόρτισης των γεννητριών (θετικές ή αρνητικές). Δεδομένου ότι η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης επηρεάζεται από τη θέση του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας και συγκεκριμένα η παράμετρος I_{60} (δηλαδή το ρεύμα στα 60 ns) καταβλήθηκε προσπάθεια το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης να μην μεταβάλλεται, ώστε να εξασφαλισθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, αλλά και να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα στις μετρήσεις. Τονίζεται ότι σε κάθε σημείο και για τις δύο πειραματικές διατάξεις ελήφθησαν έξι μετρήσεις για το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο, από τις οποίες υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, έτσι ώστε να μειωθούν, αν όχι να εξαλειφθούν, οι τυχαίες επιδράσεις.

2.2 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

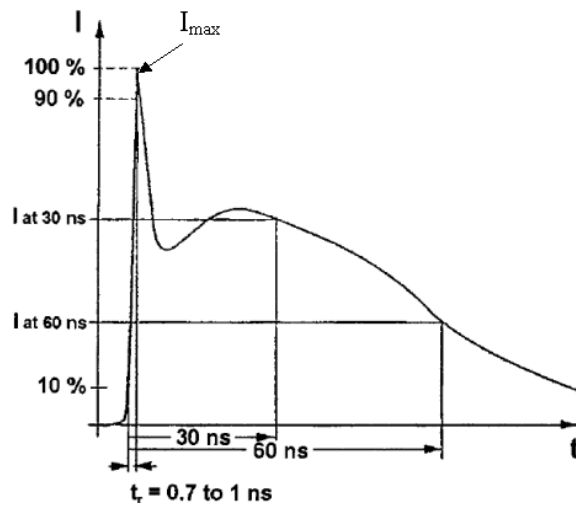
Το Διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17] ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία η δοκιμή του Προτύπου αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά.

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model) [5]. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Σύμφωνα με το Πρότυπο, αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c (50-100 MΩ), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s (150 pF \pm 10%) και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος (330 Ω \pm 10%). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο αναφοράς της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι η εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου. Γι' αυτό το λόγο όταν ένας άνθρωπος κρατάει ένα κομμάτι μετάλλου, το δέρμα επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα εκφόρτισης. Συνεπώς, όταν λάβει χώρα μία εκφόρτιση το τόξο θα προσπέσει στο μέταλλο και όχι στο δέρμα. Προφανώς R_d είναι η συνολική αντίσταση της επιδερμίδας και όχι μόνο της περιοχής κοντά στο σημείο της εκφόρτισης. Η τιμή της χωρητικότητας C_s είναι

αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρώπινου σώματος, ενώ επιλέχθηκε η τιμή των 330Ω για την R_d .



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17]



Σχήμα 2.2: Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17]

Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του σχήματος 2.2, μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος. Κατά την επαλήθευση των γεννητριών σύμφωνα με το υπάρχον Πρότυπο [17] πρέπει να ελέγχονται τα όρια τεσσάρων βασικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος. Αυτές είναι:

Μέγιστο ρεύμα (I_{max}): Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή).

Χρόνος ανόδου (t_r): Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns.

Ρεύμα στα 30 ns (I_{30}): Η τιμή του ρεύματος 30 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Ρεύμα στα 60 ns (I_{60}): Η τιμή του ρεύματος 60 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την επαλήθευση των ηλεκτροστατικών γεννητριών, η οποία γίνεται μόνο για εκφορτίσεις επαφής, όπως αυτός ορίζεται από το υπάρχον Πρότυπο είναι:

- Ανηχωικός θάλαμος
- Παλμογράφος με εύρος τουλάχιστον 1 GHz
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target)
- Ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχα σήματα
- Εξασθενητής
- Μεταλλική επιφάνεια διαστάσεων τουλάχιστον 1,5 m x 1,5 m

Οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα εκφόρτισης δίνονται στον πίνακα 2.1, που ακολουθεί.

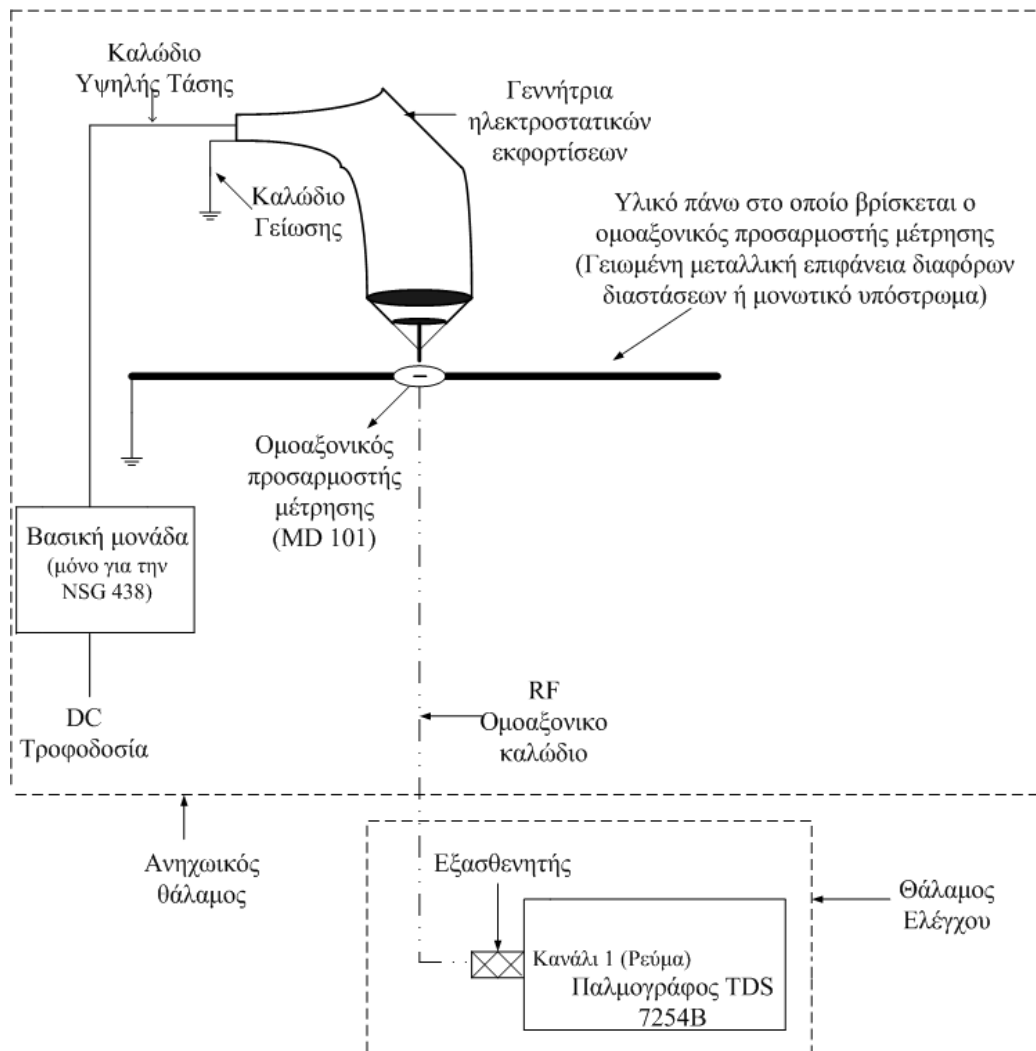
Επίπεδο	Ενδεικνύομενη τάση (kV)	Κορυφή ρεύματος $\pm 10\%$ (A)	Χρόνος ανόδου t_r (ns)	Ρεύμα ($\pm 30\%$) στα 30ns (A)	Ρεύμα ($\pm 30\%$) στα 60ns (A)
1	2	7,5	0,7 έως 1	4	2
2	4	15	0,7 έως 1	8	4
3	6	22,5	0,7 έως 1	12	6
4	8	30	0,7 έως 1	16	8

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [19]

2.3 Μέτρηση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Για τη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιήθηκε η διάταξη, που φαίνεται στο σχήμα 2.3 [109, 115-116]. Στη διάταξη αυτή υπήρξαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με το πού ήταν τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Στην πρώτη περίπτωση ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν τοποθετημένος στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m, όπως ορίζει και το υπάρχον Πρότυπο [17], ενώ στη δεύτερη ήταν στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1 m x 1 m. Στην τρίτη περίπτωση ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν στο κέντρο κατακόρυφης μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 36 cm x 36 cm, ενώ στην τέταρτη

εντός μονωτικού υποστρώματος από PVC, το οποίο βρισκόταν πάνω σε ξύλινη επιφάνεια διαστάσεων 60 cm x 80 cm. Οι τέσσερις διαφορετικές αυτές πειραματικές διατάξεις χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εξετασθεί πώς επηρεάζεται η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετηθεί σε διαφορετικών διαστάσεων και προέλευσης υλικά. Αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού, που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει στο Παράρτημα.



Σχήμα 2.3: Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος ή στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο

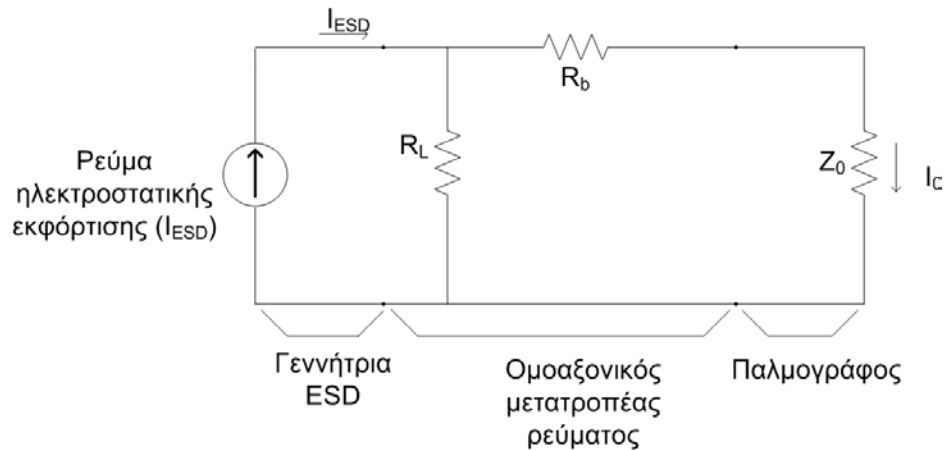
2.4 Ανασύνθεση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Στον παλμογράφο, αυτό που μετράται είναι η τάση και όχι το ρεύμα, προκειμένου να υπολογιστούν οι τέσσερις παράμετροι του, οπότε είναι αναγκαία η ανακατασκευή του ρεύματος μέσω της τάσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος

είναι με χρήση κυκλώματος στην DC ανάλυση, ενώ ο δεύτερος με χρήση δίθυρων.

2.4.1 Χρήση κυκλώματος στην DC ανάλυση

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης [28, 109, 115] στην dc ανάλυση, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2.4 και περιλαμβάνει την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον ομοαξονικό προσαρμοστή και τον παλμογράφο.



Σχήμα 2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση [28]

Το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ESD} = \frac{C \cdot V_{out}}{Z_0} \quad (2.1)$$

$$C = C_{CT} \cdot C_A \quad (2.2)$$

$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L} \quad (2.3)$$

όπου I_{ESD} είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης, V_{out} η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση εξαιτίας του ρεύματος I_0 , C είναι ένας συντελεστής μετατροπής, ενώ C_{CT} και C_A είναι οι συντελεστές μετατροπής του ομοαξονικού προσαρμοστή και του εξασθενητή αντίστοιχα. Οι τιμές των R_L και R_b μπορούν να βρεθούν μετρώντας την dc αντίσταση του ομοαξονικού προσαρμοστή. Η αντίσταση φόρτισης R_L είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού ηλεκτροδίου (δίσκου) και του εξωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και είναι ίση με $2,018 \pm 0,036 \Omega$. Η R_b είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και ισούται με $48,964 \pm 0,079 \Omega$. Για τον υπολογισμό

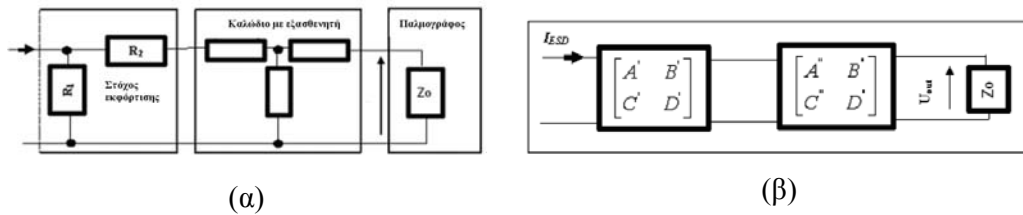
αυτών των δύο τιμών (R_L και R_b) γίνονται 20 μετρήσεις και εξάγεται ο μέσος όρος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα της μέτρησης. Από την (2.3) υπολογίζεται η τιμή του C_{CT} όπου $C_{CT}=50,0406 \approx 50$.

Δεδομένου ότι $C_A=10$ και $Z_0=50 \Omega$, προκύπτει ότι 1 V στον παλμογράφο αντιστοιχεί σε ρεύμα εκφόρτισης 10 A, αφού:

$$(2.1) \Rightarrow I_{ESD} = 10,0081 \cdot V_{out} \quad (2.4)$$

2.4.2 Χρήση δίθυρων

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της έντασης του ρεύματος, βασίζεται στη θεωρία δικτύων και συγκεκριμένα αφορά τα δίθυρα [117]. Στο σχήμα 2.5.α παρουσιάζεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο της μετρητικής διάταξης συμπεριλαμβανομένου και του καλωδίου με τον εξασθενητή, ενώ στο σχήμα 2.5.β παρουσιάζεται η μοντελοποίησή της με χρήση δίθυρων.



Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης και ισοδύναμο κύκλωμα της με χρήση δίθυρων [117].

Για τον πίνακα του στόχου ισχύει:

$$P_{target} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_2 \cdot \Omega \\ \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{\Omega} & 1 + \frac{R_2}{R_1} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ενώ για τον πίνακα του καλωδίου

$$P_{cable} = \begin{bmatrix} A'' & B'' \\ C'' & D'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+d^2}{2 \cdot d} & \frac{25}{d} \cdot (1-d^2) \cdot \Omega \\ \frac{1-d^2}{100 \cdot d} \cdot \frac{1}{\Omega} & \frac{1+d^2}{2 \cdot d} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

όπου το d είναι η εξασθένιση σε δεκαδική κλίμακα, $d = \frac{1}{10^{\frac{A}{20}}}$. Για τον εξασθενητή

των 20dB που χρησιμοποιήθηκε προκύπτει ότι $d=0,1$.

Για να βρεθεί ο συνολικός πίνακας του κυκλώματος αρκεί να πολλαπλασιασθούν οι πίνακες των (2.5) και (2.6). Αντικαθιστώντας τις τιμές $R_1=2,018 \Omega$, $R_2=48,964 \Omega$ και $d = 0,1$ προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = P_{target} \cdot P_{cable} \approx \begin{bmatrix} 9,8974 & 494,7682 \\ 5,0034 & 250,2174 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Χρησιμοποιώντας την (2.7) βρίσκεται το ρεύμα της εκφόρτισης:

$$I_{ESD} = \left(C + \frac{D}{50 \Omega} \right) \cdot V_{out} \Rightarrow I_{ESD} = 10,0077 \cdot V_{out} \quad (2.8)$$

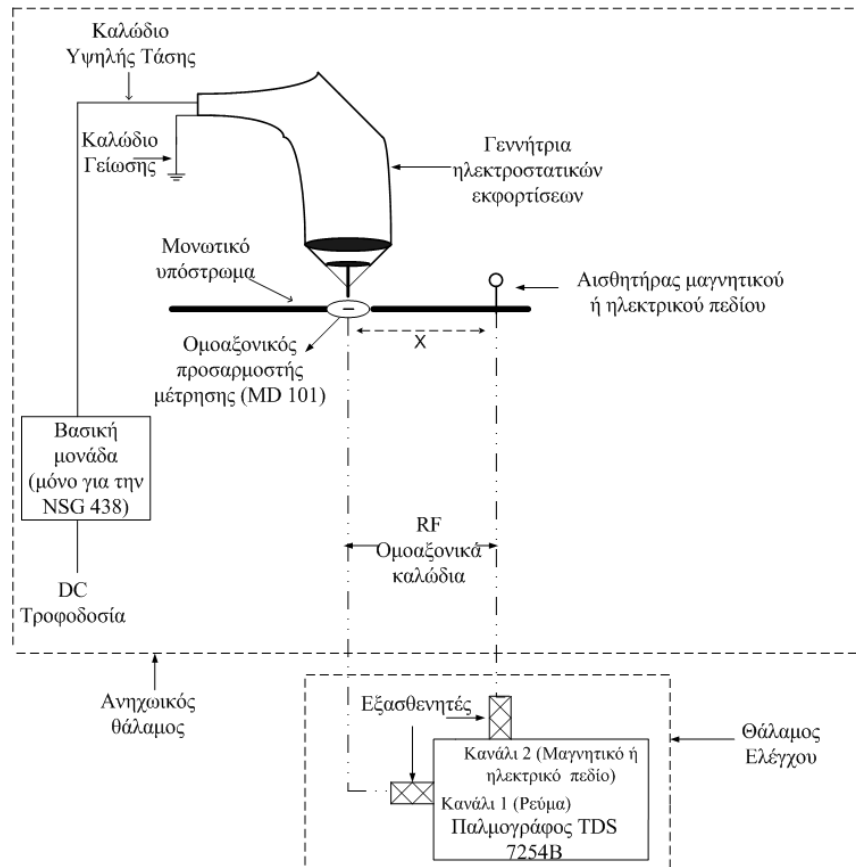
Απλή σύγκριση της (2.4) με την (2.8) καταδεικνύει ότι, οι δύο τρόποι ανασύνθεσης του ρεύματος δίνουν αποτελέσματα που διαφέρουν κατά 0,004%. Επομένως, μπορεί να λεχθεί ότι οι δύο τρόποι είναι ισοδύναμοι. Η διαφορά που προκύπτει αποδίδεται στο ότι στον δεύτερο τρόπο υπολογισμού λήφθηκε υπ' όψιν και το καλώδιο, που χρησιμοποιείται για την μεταφορά του σήματος. Για αυτό το λόγο, ο δεύτερος τρόπος είναι και ο ακριβέστερος για τον υπολογισμό του ρεύματος εκφόρτισης.

2.5. Πειραματικές διατάξεις μέτρησης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

2.5.1. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος

Στο σχήμα 2.6 [108-111] παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος, καθώς και του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου, που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν προσαρμοσμένος σε μονωτικό υπόστρωμα από PVC.

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TDS 7254B, ο οποίος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από dc έως 2,5 GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες της εταιρείας Schaffner τη NSG-433 και τη NSG-438. Η έκχυση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης γινόταν πάνω στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης (Pellegrini target) [118] που ουσιαστικά είναι ένας μετατροπέας ρεύματος. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 101 της Schaffner. Προκειμένου να μετρηθεί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης καθώς και τα παραγόμενα πεδία και να ληφθούν οι κυματομορφές τους θα πρέπει να εξασθενήσουν τα αντίστοιχα σήματα και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ο εξασθενητής της Tektronix (011-0059-03).

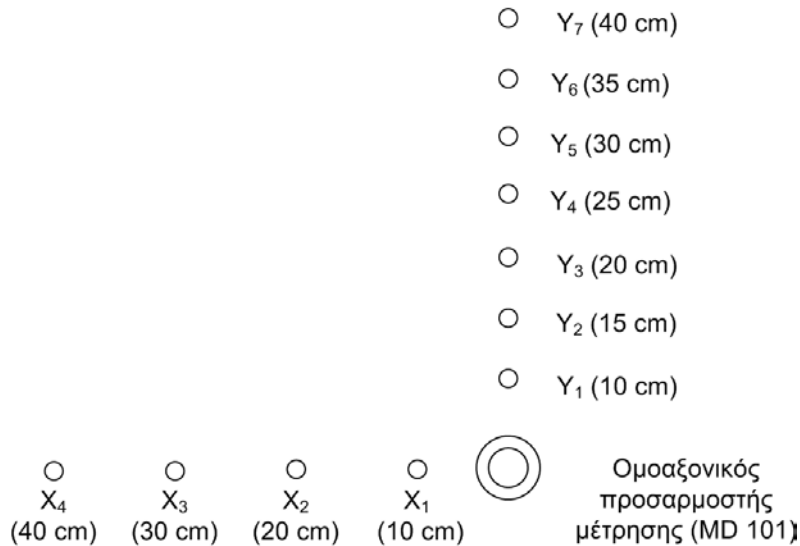


Σχήμα 2.6: Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν επί μονωτικού υποστρώματος

Για τις ανάγκες μέτρησης του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας HZ-11 της εταιρείας Rohde-Schwarz και συγκεκριμένα το μοντέλο 902 (loop probe) διαμέτρου 3 cm [119], ενώ για τις ανάγκες μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας HZ-11 της εταιρείας Rohde-Schwarz και συγκεκριμένα το μοντέλο 904 (ball probe) [119] διαμέτρου 3,6 cm. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παρουσία των αισθητήρων της Rohde-Schwarz για τη μέτρηση του εγγύς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επηρεάζει ελάχιστα τη μέτρηση, λόγω της ύπαρξης παράσιτης χωρητικότητας και αυτεπαγωγής μεταξύ του αισθητήρα μαζί με το ομοαξονικό καλώδιο, με το οποίο είναι συνδεδεμένος και του υπό μέτρηση κυκλώματος. Ο αισθητήρας γίνεται μέρος του κυκλώματος, αλλά στις διεξαχθείσες μετρήσεις αυτό το πρόβλημα είναι ελάχιστο. Άλλωστε σε αντίστοιχες εργασίες [57-60] στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι αισθητήρες έχει δειχθεί ότι η επίδραση, που υπάρχει μπορεί να αγνοηθεί. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διαδοχικές αποστάσεις προς δυο κατευθύνσεις, οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το

σημείο εκφόρτισης. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες για τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.

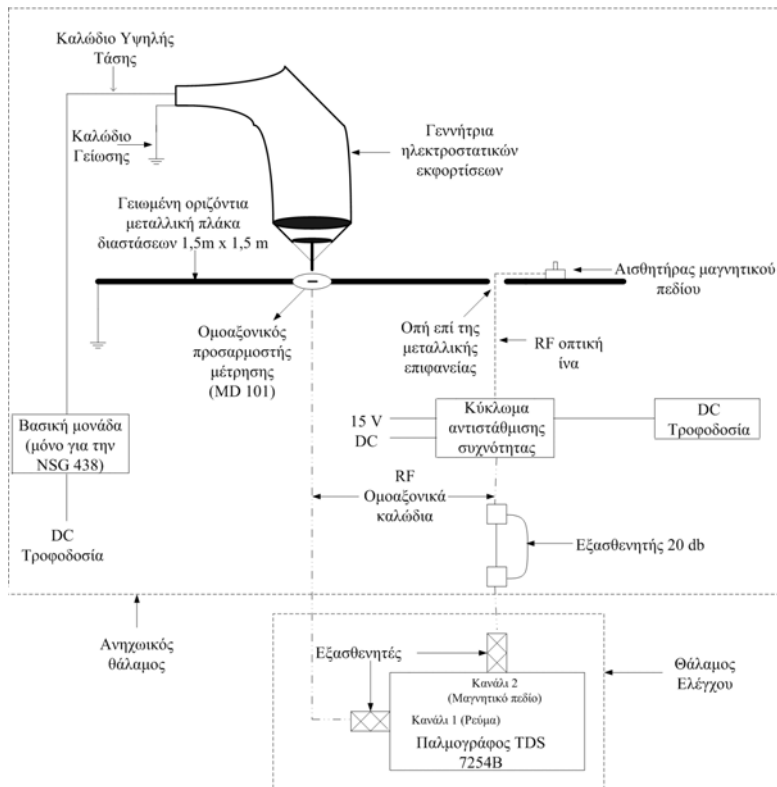
Προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχικό θάλαμο της Lindgren-Rayproof Series 81, ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τουλάχιστον έως 1 GHz. Τονίζεται ότι αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού, που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει στο Παράρτημα.



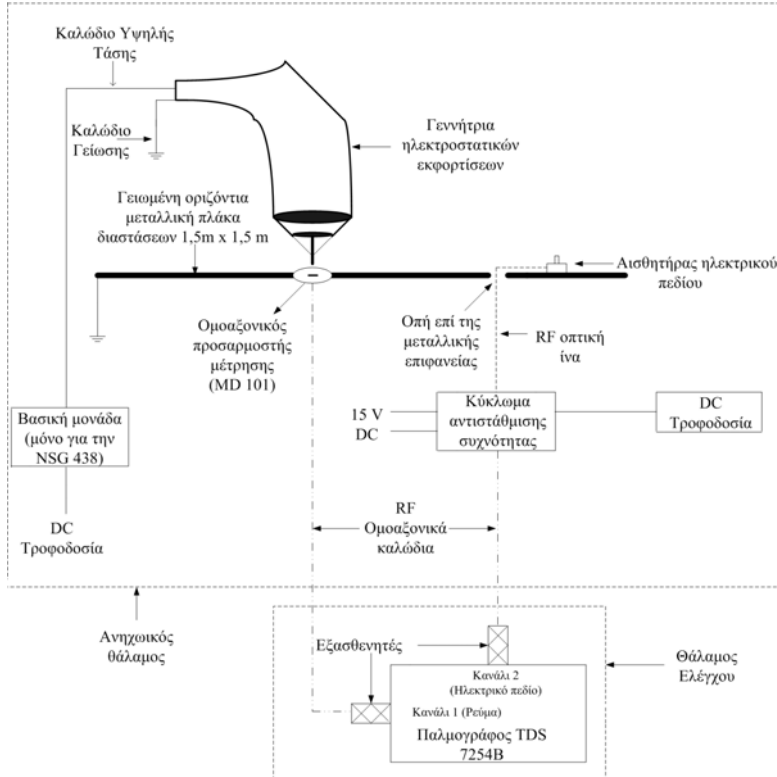
Σχήμα 2.7: Θέσεις αισθητήρων για τη μέτρηση του μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν επί μονωτικού υποστρώματος

2.5.2. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας

Στα σχήματα 2.8 και 2.9 [112-114] παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις, που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του ρεύματος, καθώς και του παραγόμενου μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα, που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση δύο διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m.



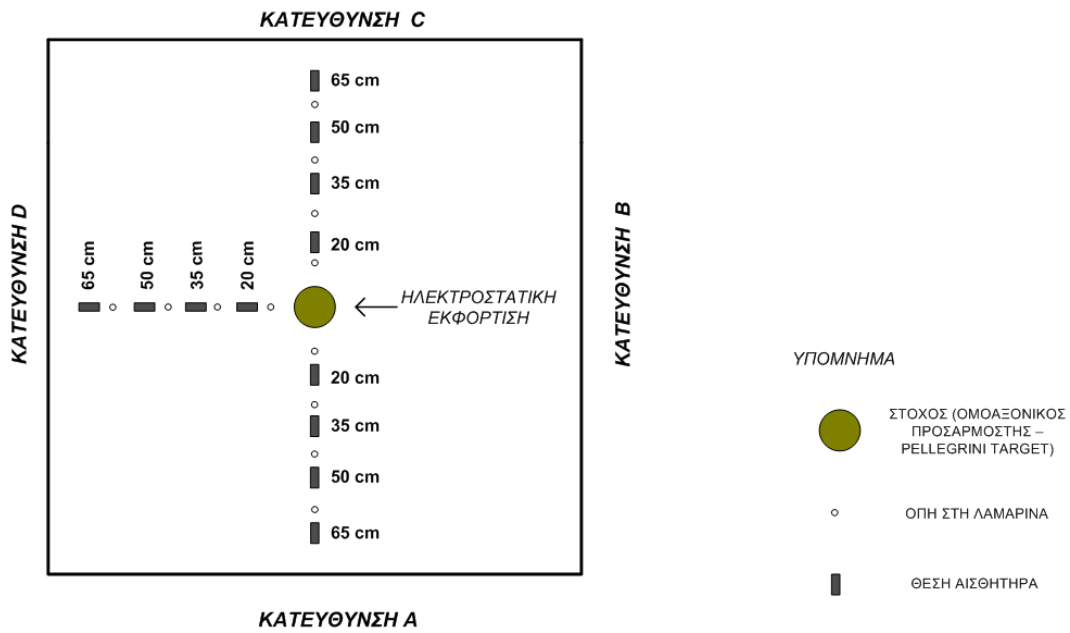
Σχήμα 2.8: Διάταξη μέτρησης μαγνητικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m



Σχήμα 2.9: Διάταξη μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m

Για την παραγωγή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων χρησιμοποιήθηκαν οι γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 της Schaffner. Η έκχυση του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση γινόταν πάνω στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης MD 101 της Schaffner και βρισκόταν στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m, η οποία ήταν τοποθετημένη σε απόσταση 70 cm από το έδαφος και ήταν γειωμένη σε κοινό σημείο με τη γείωση της γεννήτριας. Το ρεύμα από τον ομοαξονικό προσαρμοστή ρεύματος μεταφερόταν στο κανάλι 1 του παλμογράφου, μέσω ομοαξονικού καλωδίου και αφού το αντίστοιχο σήμα εξασθενήσει μέσω εξασθενητή της Tektronix (011-0059-03). Οι αισθητήρες του μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου ήταν κατασκευής του καθηγητή Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του Πανεπιστημίου του Missouri-Rolla, David Pommerenke και έχουν χρησιμοποιηθεί από τον ίδιο για ανάλογους ερευνητικούς σκοπούς τα αποτελέσματα των οποίων έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικά περιοδικά [22, 50, 95]. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διαδοχικές αποστάσεις (20 cm, 35 cm, 50 cm και 65 cm) προς τρεις κατευθύνσεις (A, C και D), οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η τοπολογία της πειραματικής διάταξης. Δεν έγιναν μετρήσεις ως προς τέταρτη κατεύθυνση (B) διότι οι παρεμβολές του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (περνούσε ακριβώς πάνω από το probe και σε απόσταση λίγων εκατοστών) προκαλούσαν σοβαρές αλλοιώσεις. Οι αισθητήρες αυτοί για να λειτουργήσουν χρειάζονται τροφοδοτικό, που στην προκειμένη περίπτωση ήταν το GP4303D της LG. Το σήμα του πεδίου οδηγείται στο κανάλι 2 του παλμογράφου, αφού πρώτα εξασθενήσει κατά 20dB.

Όπως και στην προηγούμενη διάταξη με τον ομοαξονικό προσαρμοστή επί μονωτικού υποστρώματος, έτσι και εδώ, προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων, το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχικό θάλαμο της Lindgren-Rayproof Series 81, ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τουλάχιστον έως 1 GHz. Αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού, που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει στο Παράρτημα.



Σχήμα 2.10: Θέσεις αισθητήρων για τη μέτρηση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν, χρησιμοποιώντας τις πειραματικές διατάξεις όπως αυτές περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και πώς αυτό επηρεάζεται από το υλικό πάνω στο οποίο βρίσκεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης και τις διαστάσεις του. Κατόπιν, παρουσιάζονται μετρήσεις για το παραγόμενο μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μονωτικού υποστρώματος πάνω σε ξύλινη επιφάνεια, αλλά και στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία αποτελούν προτάσεις για την επικείμενη αναθεώρηση του Προτύπου [17]. Παράλληλα, γίνονται προτάσεις για την επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου σχετικά με το τι θα πρέπει να τροποποιηθεί, κατά την επαλήθευση των γεννητριών, τόσο ως προς τη μέτρηση του ρεύματος εκφόρτισης, όσο και ως προς τη μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

3.2 Μέτρηση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Για τη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης η διάταξη ήταν αυτή που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.3 του 2^{ου} κεφαλαίου με διαφορετικό κάθε φορά υλικό, πάνω στο οποίο είχε τοποθετηθεί ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Στην πρώτη περίπτωση ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target) ήταν τοποθετημένος στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m, στη δεύτερη στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1 m x 1 m, στην τρίτη σε μεταλλική επιφάνεια διαστάσεων 36 cm x 36 cm, επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχωικού θαλάμου (κατακόρυφη διάταξη), ενώ στην τέταρτη επί μονωτικού υποστρώματος [109, 113]. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν η NSG-438, ενώ η τάση φόρτισης ήταν τα ± 2 kV και ± 4 kV. Τονίζεται ότι προκειμένου να εξασφαλισθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και

να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα, σε κάθε πειραματική διάταξη και για κάθε τάση φόρτισης, έχουν ληφθεί δέκα μετρήσεις για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από τις οποίες υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση.

Στα σχήματα 3.1 και 3.2 φαίνονται οι κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για τις τέσσερις διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, ενώ στους πίνακες 3.1.α - 3.1.δ υπάρχουν οι μέσες τιμές των 4 βασικών παραμέτρων (t_r , I_{max} , I_{30} και I_{60}) αυτών των μετρήσεων και οι τυπικές αποκλίσεις τους. Τα σκιασμένα κελιά των πινάκων δηλώνουν ότι η αντίστοιχη παράμετρος είναι εκτός των ορίων, που ορίζονται από το Πρότυπο [17], όπως αυτά εμφανίζονται στον πίνακα 2.1 του 2^{ου} κεφαλαίου.

	t_r	σ_{t_r}	I_{max}	$\sigma_{I_{max}}$	I_{30}	$\sigma_{I_{30}}$	I_{60}	$\sigma_{I_{60}}$
Περίπτωση 1 (μεταλλική επιφάνεια 1,5m x 1,5m)	0,73	0,014	6,96	0,312	3,25	0,184	2,48	0,263
Περίπτωση 2 (μεταλλική επιφάνεια 1m x 1m)	0,71	0,032	7,09	0,325	3,30	0,136	2,59	0,221
Περίπτωση 3 (μεταλλική επιφάνεια 36cm x 36cm, επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχωικού θαλάμου)	1,19	0,028	7,16	0,402	2,54	0,152	2,61	0,107
Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	0,68	0,024	5,13	0,221	2,80	0,378	2,65	0,121

Πίνακας 3.1.α: Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης +2 kV (εκφορτίσεις επαφής)

	t_r	σ_{t_r}	I_{max}	$\sigma_{I_{max}}$	I_{30}	$\sigma_{I_{30}}$	I_{60}	$\sigma_{I_{60}}$
Περίπτωση 1 (μεταλλική επιφάνεια 1,5m x 1,5m)	0,71	0,014	-7,55	0,326	-3,56	0,189	-2,55	0,296
Περίπτωση 2 (μεταλλική επιφάνεια 1m x 1m)	0,70	0,037	-7,30	0,385	-3,25	0,114	-2,59	0,341
Περίπτωση 3 (μεταλλική επιφάνεια 36cm x 36cm, επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχωικού θαλάμου)	1,20	0,026	-7,06	0,329	-2,68	0,169	-2,85	0,202
Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	1,89	0,081	-3,01	0,274	-2,90	0,296	-2,90	0,105

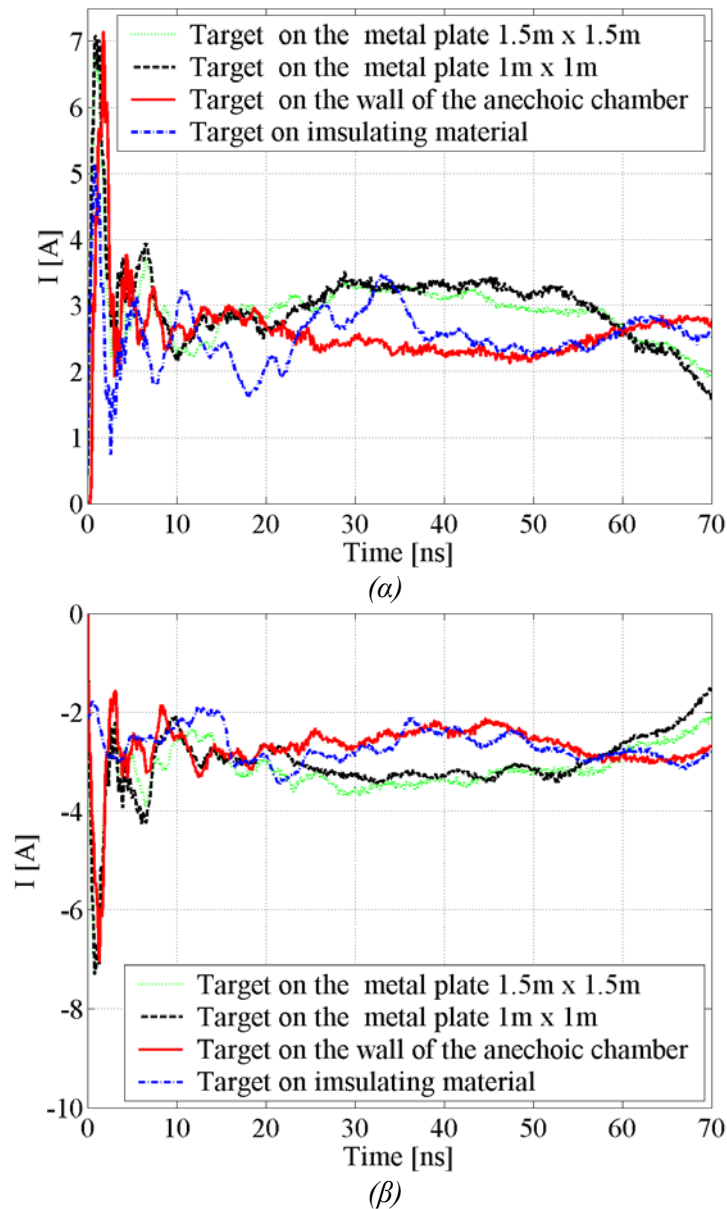
Πίνακας 3.1.β: Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης -2 kV (εκφορτίσεις επαφής)

	t_r	σ_{t_r}	I_{max}	$\sigma_{I_{max}}$	I_{30}	$\sigma_{I_{30}}$	I_{60}	$\sigma_{I_{60}}$
Περίπτωση 1 (μεταλλική επιφάνεια 1,5m x 1,5m)	0,72	0,017	14,61	0,341	6,75	0,192	5,06	0,276
Περίπτωση 2 (μεταλλική επιφάνεια 1m x 1m)	0,71	0,026	14,68	0,423	6,65	0,156	4,99	0,226
Περίπτωση 3 (μεταλλική επιφάνεια 36cm x 36cm, επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχωικού θαλάμου)	1,17	0,021	14,83	0,442	5,13	0,144	5,56	0,115
Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	0,68	0,023	9,97	0,221	5,92	0,402	5,75	0,158

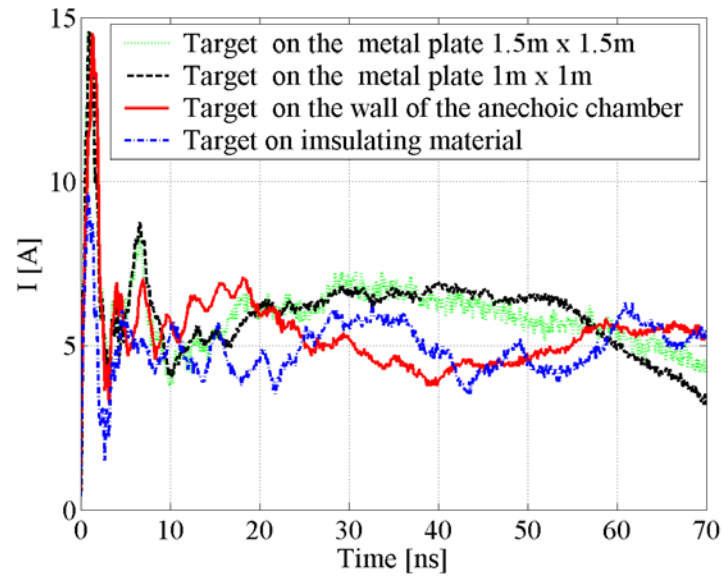
Πίνακας 3.1.γ: Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης +4 kV (εκφορτίσεις επαφής)

	t_r	σ_{t_r}	I_{max}	$\sigma_{I_{max}}$	I_{30}	$\sigma_{I_{30}}$	I_{60}	$\sigma_{I_{60}}$
Περίπτωση 1 (μεταλλική επιφάνεια 1,5m x 1,5m)	0,71	0,016	-14,70	0,372	-7,15	0,221	-5,01	0,248
Περίπτωση 2 (μεταλλική επιφάνεια 1m x 1m)	0,73	0,041	-14,95	0,305	-6,72	0,149	-5,07	0,379
Περίπτωση 3 (μεταλλική επιφάνεια 36cm x 36cm, επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχοϊκού θαλάμου)	1,17	0,023	-14,71	0,371	-4,56	0,353	-5,86	0,252
Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	0,68	0,071	-9,92	0,301	-6,31	0,082	-5,32	0,125

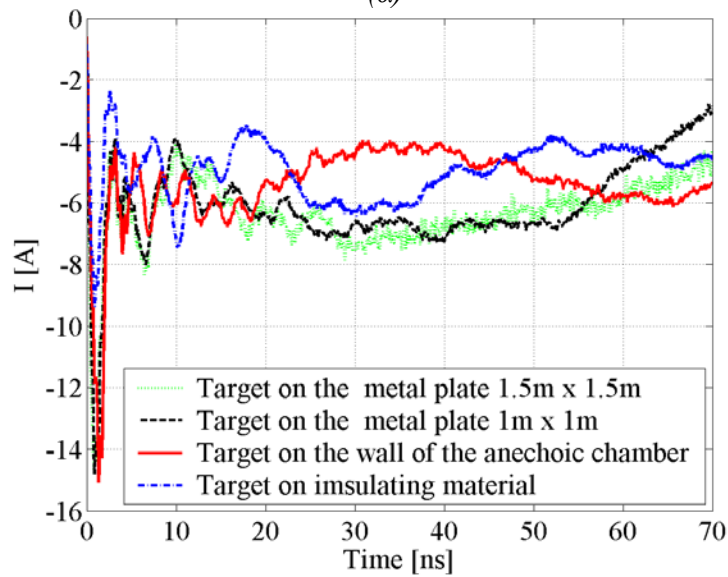
Πίνακας 3.1.δ: Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης -4 kV (εκφορτίσεις επαφής)



Σχήμα 3.1: Σύγκριση του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή μέτρησης για τάση φόρτισης: α) +2 kV και β) -2 kV



(α)



(β)

Σχήμα 3.2: Σύγκριση του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή μέτρησης για τάση φόρτισης: α) +4 kV και β) -4 kV

Στις εκφορτίσεις αέρος το μήκος του παραγόμενου ηλεκτρικού τόξου έχει διαφορετικό μήκος κάθε φορά, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την ταχύτητα προσέγγισης της γεννήτριας. Για αυτό άλλωστε η επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων γίνεται σύμφωνα με το υπάρχον Πρότυπο μόνο για εκφορτίσεις επαφής. Για τις εκφορτίσεις επαφής στα ± 2 kV και τα ± 4 kV συμπεραίνεται ότι όσο πιο αγωγίμη είναι η μεταλλική επιφάνεια (μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής), όπου ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος, τόσο μικρότερος ο χρόνος ανόδου, παρ' όλο που στις περιπτώσεις 1 και 2 είναι περίπου ο

ίδιος. Φαίνεται επίσης ότι για τις τρεις γειωμένες μεταλλικές επιφάνειες οι τιμές του I_{max} είναι παρόμοιες, αλλά όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι πάνω σε μονωτικό υλικό το I_{max} είναι πολύ μικρότερο.

Όσον αφορά τα ρεύματα I_{30} και I_{60} υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των τεσσάρων διαφορετικών περιπτώσεων. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [29], το ρεύμα I_{60} είναι πολύ ευαίσθητο ανάλογα με τη θέση του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας, κάτι που εξηγεί την παρόμοια τιμή του για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Στο πείραμα που περιγράφηκε καταβλήθηκε προσπάθεια, ώστε το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης του πιστολιού να μην μεταβάλλεται. Επίσης, πρέπει να τονισθεί ότι στην περίπτωση της κατακόρυφης μεταλλικής επιφάνειας εξασφαλίζεται καλύτερη επαναληψιμότητα στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης και ιδιαίτερα όσον αφορά την παράμετρο I_{60} επειδή το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας διατηρείται σταθερό λόγω της βαρύτητας.

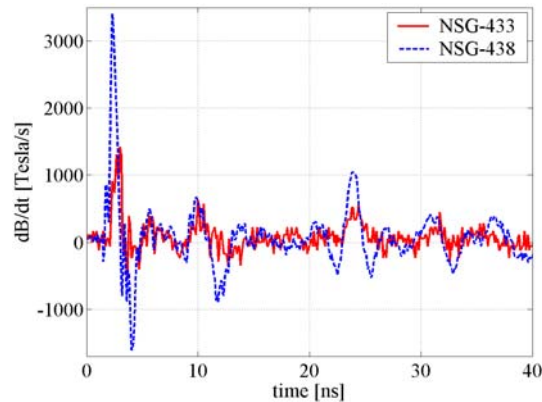
Επίσης, από σύγκριση του πίνακα 3.1 και του πίνακα 2.1 είναι εμφανές ότι, στις περιπτώσεις 1 και 2, όπου ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες με διαστάσεις 1,5 m x 1,5 m και 1 m x 1 m αντίστοιχα, οι τιμές και των τεσσάρων παραμέτρων είναι στα όρια που ορίζει το Πρότυπο. Συνεπώς, το Πρότυπο θα μπορούσε να είναι πιο ελαστικό ως προς τις διαστάσεις της μεταλλικής επιφάνειας πάνω στην οποία πρέπει να στερεωθεί ο ομοαξονικός προσαρμοστής, και να μην ορίζει αυστηρά διαστάσεις 1,5 m x 1,5 m. Αυτό θα παρείχε ουσιαστική διευκόλυνση στα Εργαστήρια που ασχολούνται με την εν λόγω δοκιμή, αφού ο σχετικά μεγάλος χώρος, που απαιτείται για τη διάταξη θα ελαττωνόταν.

3.3 Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος

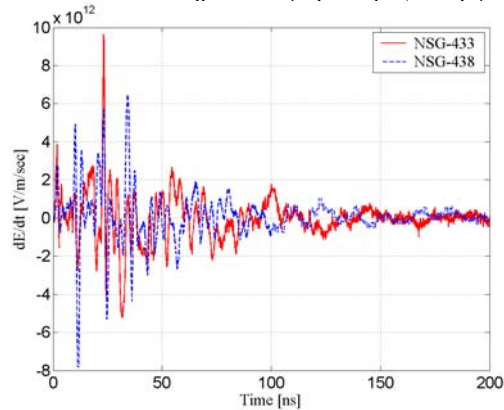
3.3.1 Παράγωγος μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο οι αισθητήρες, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν επί μονωτικού υποστρώματος, μετρούσαν την παράγωγο του μαγνητικού ή του ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα. Η πειραματική

διάταξη περιγράφηκε στο σχήμα 2.6 του προηγούμενου κεφαλαίου. Κάποιες τυπικές κυματομορφές της παραγώγου του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου [108, 118] για τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων φαίνονται στα σχήματα 3.3 και 3.4 που ακολουθούν. Είναι φανερό ότι κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετική παράγωγο του μαγνητικού ή του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία ελαττώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Συνεπώς, κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, γεγονός που θα δειχθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 3.3: Παράγωγος μαγνητικού πεδίου διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων 30 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +4 kV)



Σχήμα 3.4: Παράγωγος ηλεκτρικού πεδίου διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων 30 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +2 kV)

3.3.2 Μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου

3.3.2.1 Αποτελέσματα των πειραμάτων

Ολοκληρώνοντας το σήμα της παραγώγου του μαγνητικού πεδίου (dB/dt) προκύπτει η μαγνητική επαγωγή (B). Κάνοντας χρήση της σχέσης (3.1) εύκολα προκύπτει η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) [119]:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (3.1)$$

όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Tesla·m/A.

Τονίζεται ότι σε κάθε σημείο έχουν ληφθεί έξι μετρήσεις για το μαγνητικό πεδίο από τις οποίες υπολογίσθηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Στους πίνακες 3.2 και 3.3, που ακολουθούν φαίνεται η μέση μέγιστη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες για τάσεις φόρτισης τα ± 2 kV και ± 4 kV.

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
X_1	4,16	0,068	4,01	0,179	-5,03	0,084	-3,56	0,155
X_2	1,98	0,032	1,73	0,080	-1,95	0,032	-1,48	0,069
X_3	1,31	0,022	1,08	0,023	-0,93	0,015	-1,01	0,022
X_4	1,15	0,019	0,77	0,016	-1,04	0,017	-0,96	0,194
Y_1	3,89	0,064	3,47	0,163	-3,57	0,058	-3,86	0,184
Y_2	2,14	0,035	1,98	0,042	-2,34	0,039	-2,20	0,046
Y_3	1,46	0,024	1,35	0,100	-1,59	0,026	-1,43	0,345
Y_4	1,13	0,018	1,02	0,021	-1,10	0,018	-1,15	0,024
Y_5	0,89	0,029	0,89	0,211	-0,86	0,030	-0,87	0,189
Y_6	0,71	0,039	0,65	0,014	-0,72	0,039	-0,71	0,015
Y_7	0,60	0,016	0,54	0,012	-0,71	0,015	-0,63	0,013

Πίνακας 3.2: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος (τάσεις φόρτισης ± 2 kV)

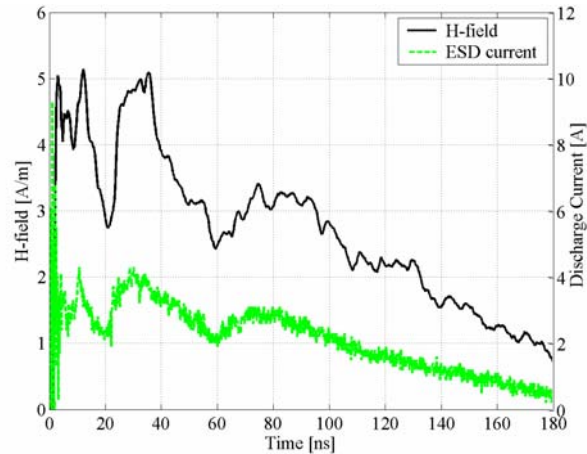
	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
X_1	4,99	0,056	5,01	0,131	-4,65	0,102	-4,89	0,036
X_2	2,49	0,031	2,13	0,063	-2,36	0,109	-2,07	0,097
X_3	1,65	0,028	1,36	0,041	-1,61	0,049	-1,24	0,091
X_4	1,42	0,013	0,95	0,039	-1,34	0,082	-0,97	0,073
Y_1	5,06	0,071	4,30	0,072	-4,98	0,091	-4,26	0,193
Y_2	2,59	0,041	2,49	0,091	-2,40	0,089	-2,42	0,079
Y_3	1,81	0,021	1,67	0,102	-1,63	0,091	-1,69	0,084
Y_4	1,44	0,019	1,29	0,036	-1,41	0,036	-1,23	0,073
Y_5	1,07	0,023	1,12	0,079	-1,06	0,049	-1,07	0,093
Y_6	0,85	0,031	0,82	0,083	-0,81	0,053	-0,81	0,016
Y_7	0,73	0,018	0,68	0,013	-0,69	0,071	-0,71	0,023

Πίνακας 3.3: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος (τάσεις φόρτισης ± 4 kV)

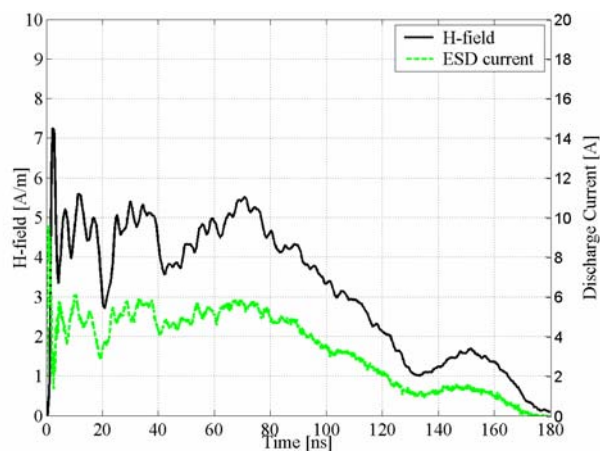
Συγκρίνοντας σε κοινά γραφήματα το ρεύμα εκφόρτισης με την ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται προκύπτει ότι αυτά τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα, όπως άλλωστε φαίνεται από τα σχήματα 3.5 και 3.6 που ακολουθούν. Άλλωστε, αυτό είναι αναμενόμενο αφού το ρεύμα (I) και το μαγνητικό πεδίο (H) συνδέονται μεταξύ τους σαν ανάλογα μεγέθη σύμφωνα με το νόμο του Ampere [119]:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (3.2)$$

όπου I το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, H η ένταση του μαγνητικού πεδίου και R η απόσταση από το σημείο εκφόρτισης.

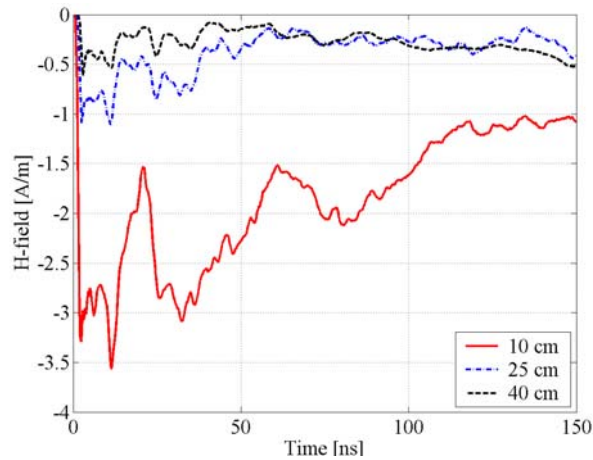


Σχήμα 3.5: Ρεύμα και ένταση μαγνητικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-433 σε απόσταση 10 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +4 kV).



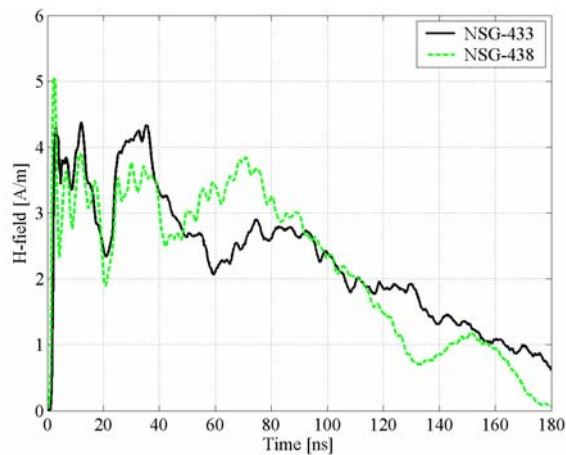
Σχήμα 3.6: Ρεύμα και ένταση μαγνητικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-438 σε απόσταση 10 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +4 kV)

Όπως είναι αναμενόμενο από τη σχέση (3.2) το μαγνητικό πεδίο φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Αυτό άλλωστε φαίνεται και από το σχήμα 3.7 στο οποίο φαίνεται πώς ελαττώνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου για διαφορετικές αποστάσεις. Είναι φανερό ότι οι κυματομορφές και για τις τρεις αποστάσεις είναι ανάλογες μεταξύ τους.

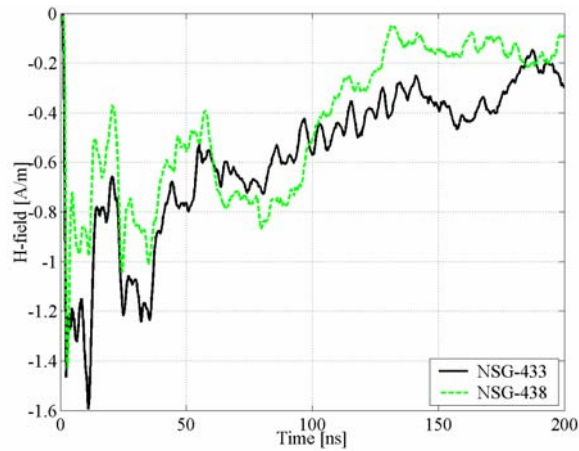


Σχήμα 3.7: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου της NSG-433 για διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης (Y-άξονας, τάση φόρτισης -2 kV)

Τα πειράματα που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. απέδειξαν ότι αν και το ρεύμα που παράγει κάθε μια από τις γεννήτριες είναι εντός των ορίων που ορίζει το υπάρχον Πρότυπο [17], ωστόσο το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από την καθεμία είναι διαφορετικό για την ίδια απόσταση από το σημείο εκφόρτισης και για την ίδια τάση φόρτισης της γεννήτριας. Αυτό φαίνεται από τα σχήματα 3.8 και 3.9 που ακολουθούν.

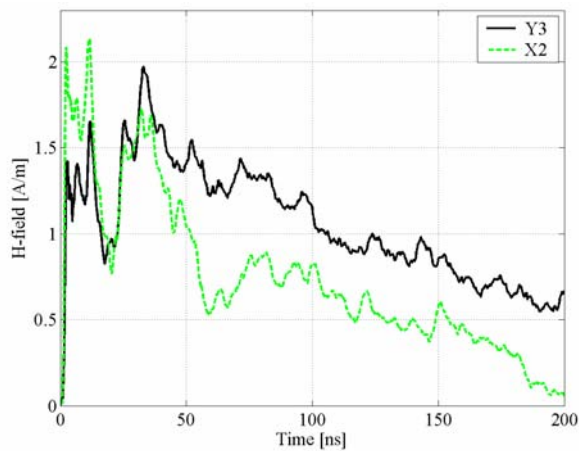


Σχήμα 3.8: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες και για απόσταση 10 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης $+4\text{ kV}$)

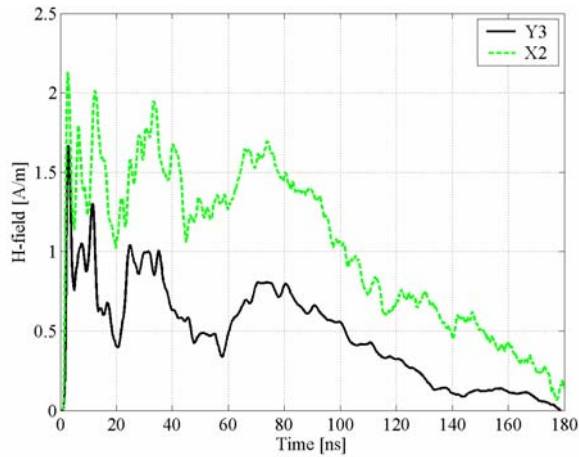


Σχήμα 3.9: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες και για απόσταση 20 cm (Y άξονας) από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -2 kV)

Οι συγκρίσεις, που έγιναν από τα αποτελέσματα, τα οποία ελήφθησαν, απέδειξαν ότι υπάρχει διαφορετικό μαγνητικό πεδίο όχι μόνο μεταξύ των γεννητριών, αλλά επίσης και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία γίνεται η μέτρηση. Αυτό φαίνεται από τα σχήματα 3.10 και 3.11 που ακολουθούν.



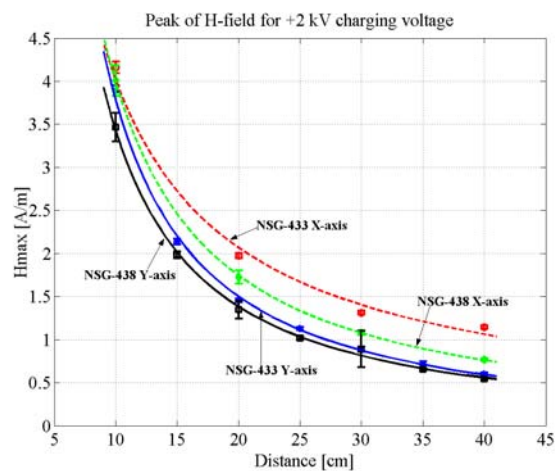
Σχήμα 3.10: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-433 και για απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης $+2$ kV).



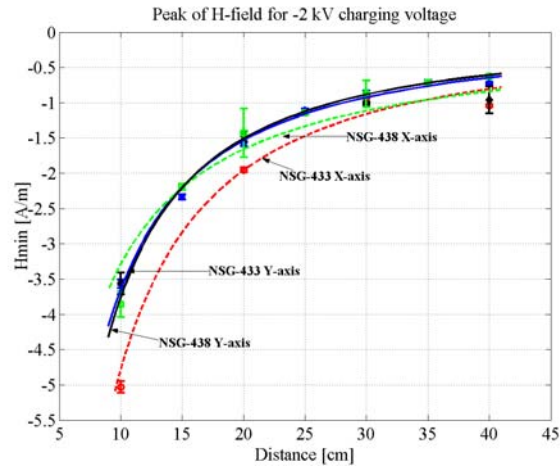
Σχήμα 3.11: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-438 και για απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +4 kV)

3.3.2.2 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου για όλες τις τάσεις φόρτισης

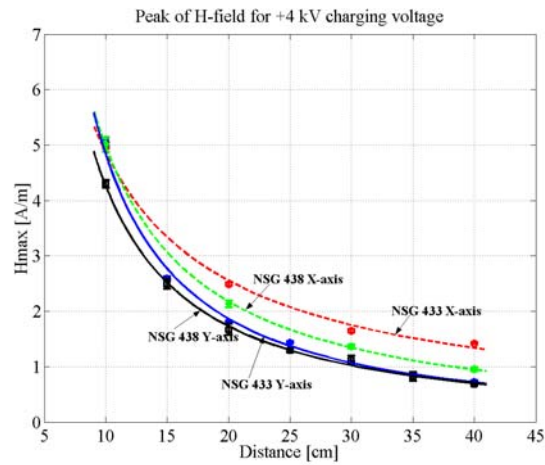
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση ± 2 kV και ± 4 kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όσον αφορά την απόλυτη τιμή του, μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από το σημείο εκφόρτισης.



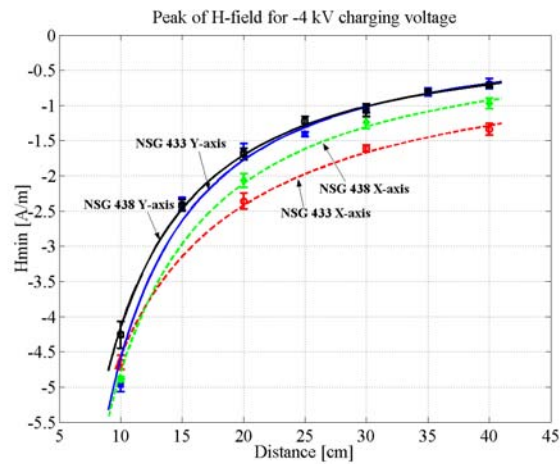
Σχήμα 3.12: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +2 kV)



Σχήμα 3.13: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -2 kV)



Σχήμα 3.14: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης $+4\text{ kV}$)



Σχήμα 3.15: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -4 kV).

3.3.2.3 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Όπως προκύπτει από τα γραφήματα 3.12-3.15, η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 είναι ισχυρότερη κατ' απόλυτη τιμή από την αντίστοιχη της NSG-438 σε όλες τις τάσεις φόρτισης και για τις δύο κατευθύνσεις. Επίσης το μαγνητικό πεδίο στον άξονα X είναι υψηλότερο από το μαγνητικό πεδίο στον άξονα Y . Συγκεκριμένα ισχύει ότι:

$$H_{\max}^{X-axis,433} > H_{\max}^{X-axis,438} > H_{\max}^{Y-axis,433} > H_{\max}^{Y-axis,438} \quad (3.3)$$

Προφανώς τα πεδία δεν είναι συμμετρικά για αντίθετες τάσεις φόρτισης. Κάτι τέτοιο ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι για αρνητικές τάσεις φόρτισης τα αντίστοιχα ρεύματα εκφόρτισης είναι εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο, αλλά δεν είναι κατά απόλυτη τιμή ίδια για τα αντίστοιχα ρεύματα όταν η τάση φόρτισης είναι θετική.

Στο σχήμα 3.7 έγινε σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης και συγκεκριμένα κατά την κατεύθυνση του άξονα Y σε αποστάσεις 10, 25 και 40 cm. Παρατηρούμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης, η ένταση του μαγνητικού πεδίου ελαττώνεται. Βέβαια η συμπεριφορά της κυματομορφής του πεδίου παραμένει η ίδια. Είναι εμφανές ότι το πλάτος της έντασης του μαγνητικού πεδίου μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Επίσης το πεδίο φθίνει σύμφωνα με τον παράγοντα $\frac{1}{R}$, που είναι

λογικό σύμφωνα με το νόμο του Ampere σύμφωνα με την εξίσωση (3.2).

Όμως και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία μετράμε, το μαγνητικό πεδίο που παράγει είναι διαφορετικό. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η γεννήτρια έχει εσωτερικό κύκλωμα, το οποίο ανάλογα με τον προσανατολισμό του δίνει διαφορετικά αποτελέσματα ως προς το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο.

Το διαφορετικό μαγνητικό πεδίο, που παράγει η κάθε γεννήτρια, έχει σαν αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις σε γειτνιάζοντα σημεία να είναι επίσης διαφορετικές. Αυτό έχει ως συνέπεια ένα δοκίμιο (EUT) το οποίο εξετάζεται από τη μια γεννήτρια να περνάει τη δοκιμή σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17], ενώ με την άλλη να αποτυγχάνει. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει την αναγκαιότητα μελέτης του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου [17] να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια στα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων.

3.3.3 Μέτρηση έντασης ηλεκτρικού πεδίου

3.3.3.1 Αποτελέσματα των πειραμάτων

Ολοκληρώνοντας το σήμα της παραγωγού του ηλεκτρικού πεδίου (dE/dt) προκύπτει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E). Τονίζεται ότι σε κάθε σημείο έχουν ληφθεί έξι μετρήσεις για το ηλεκτρικό πεδίο από τις οποίες υπολογίσθηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Στους πίνακες 3.4 και 3.5, που ακολουθούν φαίνεται η μέση μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μονωτικού υποστρώματος για τάσεις φόρτισης τα ± 2 kV και ± 4 kV.

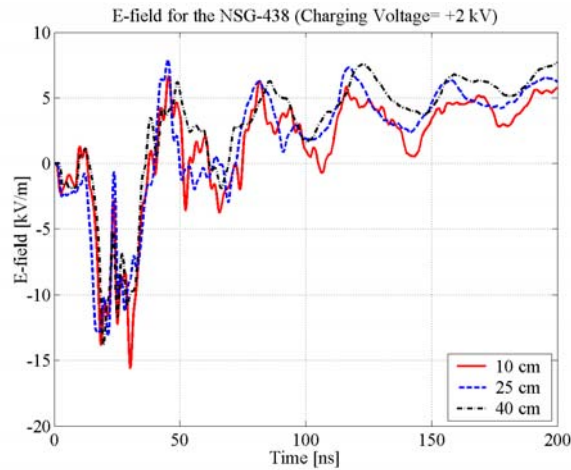
	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
X_1	-20,49	0,412	-15,67	0,313	19,40	0,412	14,54	0,345
X_2	-19,53	0,316	-14,81	0,143	18,29	0,298	13,67	0,123
X_3	-18,28	0,412	-13,87	0,168	15,88	0,355	13,40	0,162
X_4	-16,41	0,79	-11,91	0,291	14,56	0,695	10,59	0,255
Y_1	-20,37	1,118	-15,61	0,912	20,07	1,171	14,42	0,944
Y_2	-19,88	1,144	-15,10	0,183	19,92	1,279	14,38	0,176
Y_3	-19,34	0,514	-14,85	0,427	17,21	0,451	14,32	0,436
Y_4	-19,16	0,605	-14,16	0,137	17,00	0,546	14,07	0,159
Y_5	-18,50	0,481	-14,50	0,278	16,79	0,445	13,91	0,304
Y_6	-18,22	0,314	-14,22	0,201	16,41	0,282	13,53	0,222
Y_7	-17,53	0,336	-13,83	0,270	15,88	0,303	13,49	0,311

Πίνακας 3.4: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μονωτικού υποστρώματος (τάσεις φόρτισης ± 2 kV)

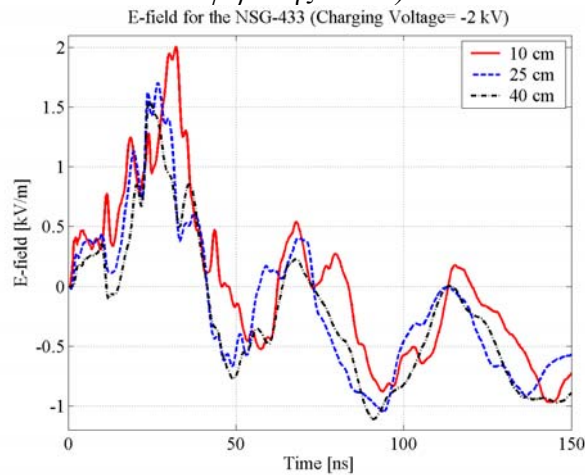
	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
X_1	-28,71	0,397	-22,09	0,304	27,35	0,395	21,65	0,376
X_2	-27,34	0,305	-21,70	0,221	25,61	0,327	20,93	0,401
X_3	-27,01	0,416	-19,14	0,134	21,91	0,377	18,73	0,136
X_4	-25,11	0,631	-16,44	0,294	19,95	0,565	16,49	0,121
Y_1	-32,80	1,071	-21,54	0,299	27,90	0,636	20,93	0,279
Y_2	-28,43	0,703	-21,13	0,301	27,46	1,036	20,39	0,203
Y_3	-27,70	0,621	-20,49	0,424	24,78	1,071	20,03	0,304
Y_4	-26,93	0,371	-21,10	0,321	24,09	0,731	20,85	0,291
Y_5	-26,01	0,218	-20,59	0,239	23,23	0,431	20,17	0,367
Y_6	-25,14	0,315	-19,61	0,306	22,63	0,805	19,07	0,221
Y_7	-24,72	0,323	-19,09	0,291	21,79	0,306	18,39	0,306

Πίνακας 3.5: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μονωτικού υποστρώματος (τάσεις φόρτισης ± 4 kV)

Όσον αφορά το ηλεκτρικό πεδίο και αυτό φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Αυτό άλλωστε φαίνεται και από τα σχήματα 3.16 και 3.17 στα οποία φαίνεται πώς ελαττώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για διαφορετικές αποστάσεις. Είναι φανερό ότι οι κυματομορφές και για τις τρεις αποστάσεις είναι ανάλογες μεταξύ τους. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος της τάξης των 10 ns περίπου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει μια βύθιση για θετική τάση φόρτισης της γεννήτριας, ενώ αντίθετα παρουσιάζει ανύψωση για αρνητικές τάσεις φόρτισης.

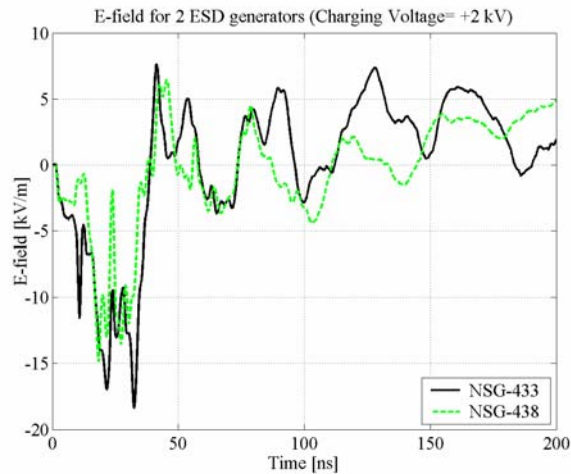


Σχήμα 3.16: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-438 για τρεις διαφορετικές αποστάσεις στον Y-άξονα από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +2 kV)

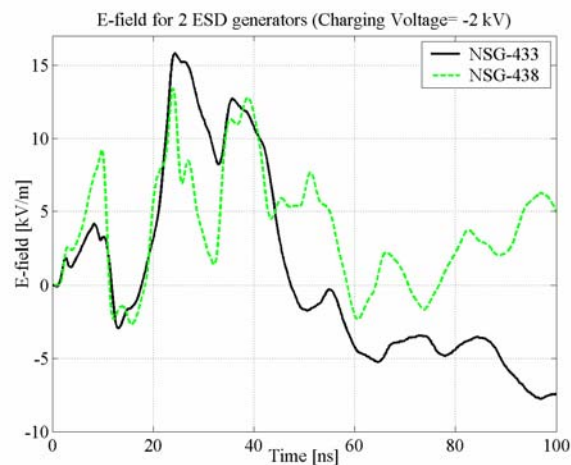


Σχήμα 3.17: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-433 για τρεις διαφορετικές αποστάσεις στον Y-άξονα από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -2 kV)

Στα σχήματα 3.18 και 3.19 παρουσιάζονται συγκρίσεις για το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο των δυο γεννητριών σε διάφορες αποστάσεις και διαφορετικές κατευθύνσεις για τάση φόρτισης +2 kV.

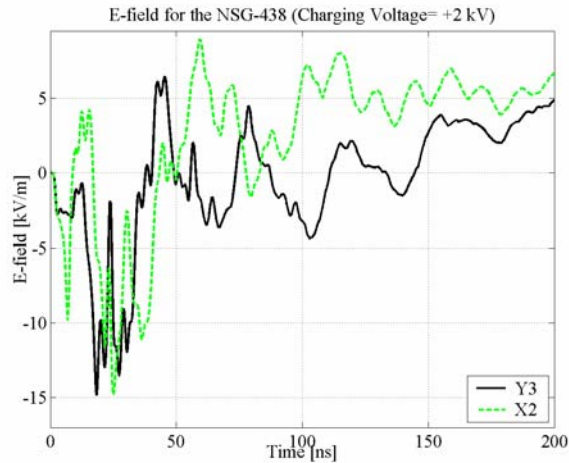


Σχήμα 3.18: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες και για απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +2 kV)

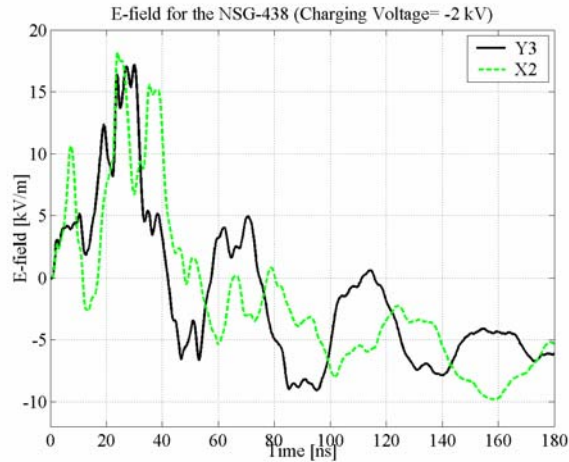


Σχήμα 3.19: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες και για απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -2 kV)

Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων, που ελήφθησαν, απέδειξαν ότι όπως στο μαγνητικό έτσι και στο ηλεκτρικό πεδίο υπάρχουν διαφορές όχι μόνο μεταξύ των γεννητριών, αλλά επίσης και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία γίνεται η μέτρηση. Αυτό φαίνεται από τα σχήματα 3.20 και 3.21 που ακολουθούν.



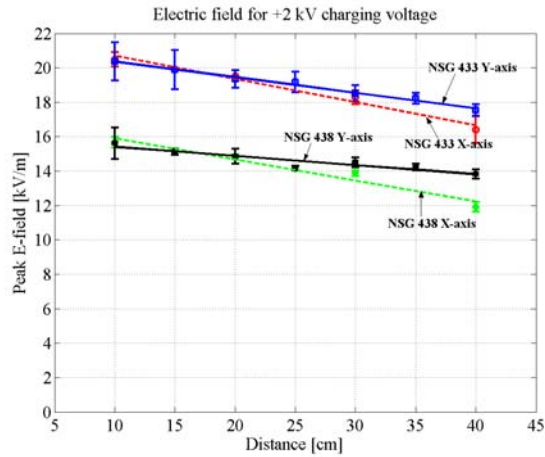
Σχήμα 3.20: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-438 και για απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +2 kV)



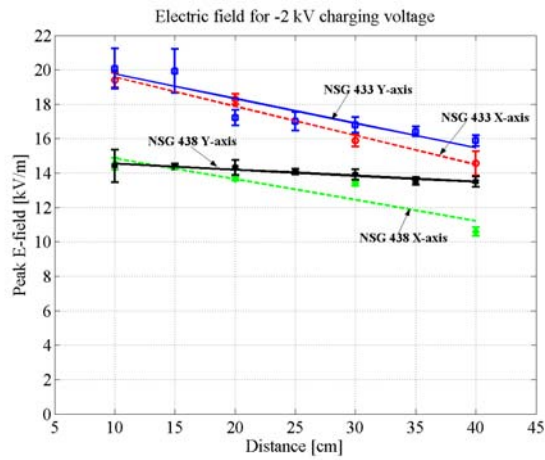
Σχήμα 3.21: Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-433 και για απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -2 kV)

3.3.3.2 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για όλες τις τάσεις φόρτισης

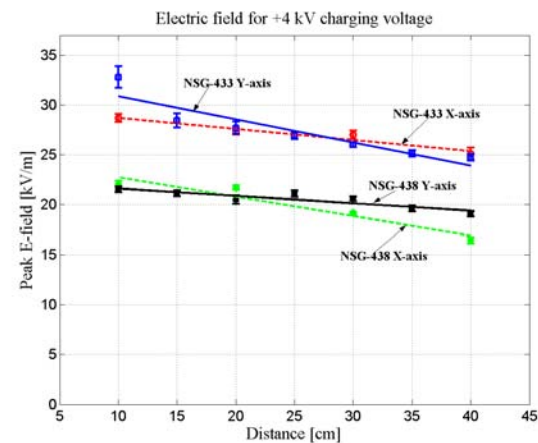
Στα σχήματα 3.22-3.25 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση ± 2 kV και ± 4 kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όσον αφορά την απόλυτη τιμή του μειώνεται ανάλογα με την απόσταση από το σημείο εκφόρτισης.



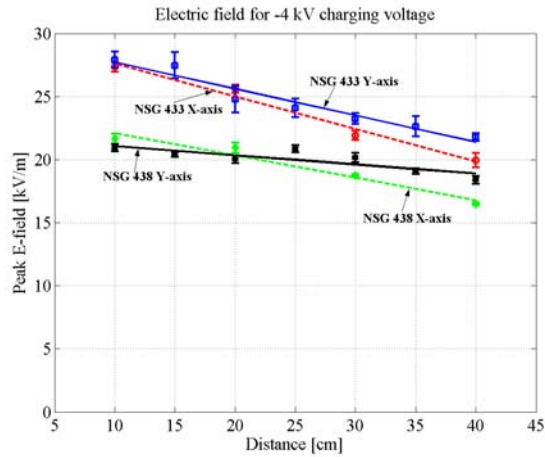
Σχήμα 3.22: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +2 kV)



Σχήμα 3.23: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -2 kV)



Σχήμα 3.24: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης +4 kV)



Σχήμα 3.25: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης (τάση φόρτισης -4 kV)

3.3.3.3 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετά την παρέλευση ενός μικρού χρονικού διαστήματος της τάξης των 10 ns περίπου, παρουσιάζει ένα απότομο βύθισμα στην περίπτωση των εκφορτίσεων θετικής πολικότητας, ενώ αντίθετα στην περίπτωση των εκφορτίσεων αρνητικής πολικότητας το βύθισμα αυτό αντικαθίσταται από μια απότομη κορυφή. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι το απότομο βύθισμα (αν πρόκειται για θετικές εκφορτίσεις) ή η απότομη κορυφή (αν πρόκειται για αρνητικές εκφορτίσεις), που παρουσιάζεται στα πρώτα ns ακολουθεί αντίθετης μορφής πολικότητα από την πολικότητα της εκφόρτισης. Στη συνέχεια η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται λαμβάνοντας θετικές και αρνητικές τιμές.

Όπως προκύπτει από τα γραφήματα για τάσεις φόρτισης τα ± 2 kV ισχύει ότι:

$$E_{\max}^{Y\text{-axis},433} > E_{\max}^{X\text{-axis},433} > E_{\max}^{Y\text{-axis},438} > E_{\max}^{X\text{-axis},438} \quad (3.4)$$

Για τάση φόρτισης +4 kV και για αποστάσεις μεταξύ 10 cm και 30 cm ισχύει:

$$E_{\max}^{Y\text{-axis},433} > E_{\max}^{X\text{-axis},433} > E_{\max}^{X\text{-axis},438} > E_{\max}^{Y\text{-axis},438} \quad (3.5)$$

ενώ για αποστάσεις μεταξύ 30 cm και 40 cm ισχύει:

$$E_{\max}^{X\text{-axis},433} > E_{\max}^{Y\text{-axis},433} > E_{\max}^{Y\text{-axis},438} > E_{\max}^{X\text{-axis},438} \quad (3.6)$$

Για τάση φόρτισης -4 kV και για αποστάσεις μεταξύ 10 cm και 20 cm ισχύει:

$$E_{\max}^{Y\text{-axis},433} > E_{\max}^{X\text{-axis},433} > E_{\max}^{X\text{-axis},438} > E_{\max}^{Y\text{-axis},438} \quad (3.7)$$

Για τάση φόρτισης -4 kV και για αποστάσεις μεταξύ 20 cm και 40 cm ισχύει:

$$E_{\max}^{Y\text{-axis},433} > E_{\max}^{X\text{-axis},433} > E_{\max}^{Y\text{-axis},438} > E_{\max}^{X\text{-axis},438} \quad (3.8)$$

Στα σχήματα 3.22-3.25 απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση ± 2 kV και ± 4 kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται γραμμικά, καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Επίσης, οι απόλυτες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της γεννήτριας NSG-433 είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες της NSG-438, τόσο για θετικές, όσο και για αρνητικές τάσεις φόρτισης και στους δύο άξονες παρατήρησης. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο, αντίθετα με το μαγνητικό πεδίο όπως παρουσιάστηκε προηγούμενα, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στον άξονα Y και μικρότερες στον άξονα X . Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η γεννήτρια έχει εσωτερικό κύκλωμα, το οποίο ανάλογα με τον προσανατολισμό του δίνει διαφορετικά αποτελέσματα ως προς το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Το διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο που παράγει η κάθε γεννήτρια έχει σαν αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις σε γειτνιάζοντα σημεία να είναι επίσης διαφορετικές. Αυτό συνεπάγεται ένα δοκίμιο, το οποίο εξετάζεται από τη μια γεννήτρια, να περνάει τη δοκιμή σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17], ενώ με την άλλη να αποτυγχάνει. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει την αναγκαιότητα μελέτης του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις διάφορες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια στα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων.

3.4 Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας

3.4.1 Διεξαγωγή των πειραμάτων

Όπως προαναφέρθηκε στην §2.5.2 οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m, ήταν του καθηγητή D. Pommerenke. Οι αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια πειράματα [22, 50, 95] και είναι κατασκευασμένοι έτσι, ώστε να μετρούν απευθείας την ένταση του μαγνητικού ή του ηλεκτρικού πεδίου (πρβλ

Παράρτημα Ι). Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή με τον εξοπλισμό που προαναφέρθηκε, αφορούν τόσο μετρήσεις μαγνητικού [111-112] όσο και ηλεκτρικού πεδίου [110]. Συνεπώς, η διαδικασία που είχε ακολουθηθεί με τους αισθητήρες της Rohde & Schwarz δεν εφαρμόζεται σε αυτά. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η διαφορά που υπάρχει σε σχέση με την πειραματική διαδικασία, που ακολουθήθηκε στην §3.3, είναι ότι έγιναν μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε τρεις κατευθύνσεις και όχι σε δύο. Τέλος, τονίζεται ότι σε κάθε σημείο έχουν ληφθεί έξι μετρήσεις για το ηλεκτρικό πεδίο από τις οποίες υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση.

3.4.2 Μέτρηση έντασης μαγνητικού πεδίου

3.4.2.1 Αποτελέσματα των πειραμάτων

Στους πίνακες 3.6 και 3.7, που ακολουθούν φαίνεται η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m για τάσεις φόρτισης τα ± 2 kV και ± 4 kV.

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
20 cm	2,99	0,062	2,61	0,093	2,95	0,043	2,85	0,199
35 cm	2,05	0,112	1,79	0,045	1,78	0,058	1,75	0,073
50 cm	1,89	0,160	1,32	0,015	1,65	0,124	1,21	0,055
65 cm	1,33	0,045	1,02	0,069	1,51	0,033	0,79	0,075

Πίνακας 3.6.α: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση A (dirA) για τις δύο γεννήτριες όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας 1,5 m x 1,5 m (τάσεις φόρτισης ± 2 kV)

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
20 cm	2,85	0,069	2,91	0,074	2,83	0,059	2,93	0,128
35 cm	1,62	0,052	1,82	0,048	1,57	0,175	1,80	0,098
50 cm	1,09	0,024	1,37	0,036	0,95	0,043	1,28	0,043
65 cm	0,98	0,047	1,06	0,045	0,80	0,062	0,99	0,077

Πίνακας 3.6.β: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση C (dirC) για τις δύο γεννήτριες όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας 1,5 m x 1,5 m (τάσεις φόρτισης ± 2 kV)

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
20 cm	2,81	0,079	2,76	0,072	2,78	0,078	2,97	0,083
35 cm	1,62	0,094	2,11	0,077	1,63	0,082	1,86	0,114
50 cm	1,39	0,045	1,63	0,183	1,24	0,065	1,47	0,073
65 cm	1,02	0,045	1,24	0,071	1,14	0,024	1,04	0,102

Πίνακας 3.6.γ: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση D ($dirD$) για τις δύο γεννήτριες όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ (τάσεις φόρτισης $\pm 2\text{ kV}$)

	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
20 cm	3,68	0,068	3,32	0,068	3,65	0,091	3,31	0,034
35 cm	2,96	0,129	2,83	0,046	2,89	0,081	3,10	0,058
50 cm	2,80	0,303	2,31	0,066	2,83	0,607	2,27	0,087
65 cm	2,55	0,105	1,90	0,037	2,80	0,085	1,49	0,134

Πίνακας 3.7.α: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες κατά την κατεύθυνση A ($dirA$) όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ (τάσεις φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$)

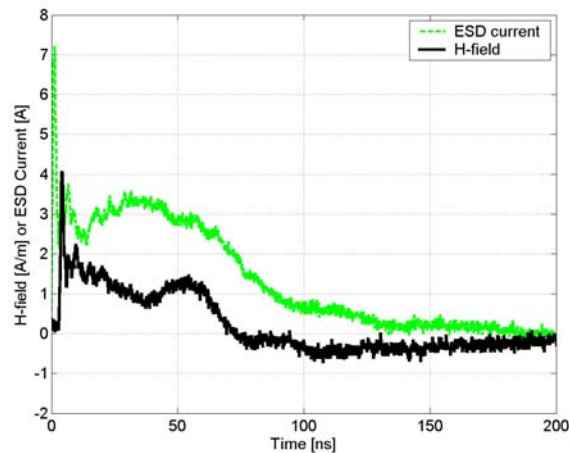
	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
20 cm	3,56	0,107	3,44	0,069	3,61	0,066	3,36	0,033
35 cm	2,79	0,067	2,89	0,131	2,82	0,067	3,01	0,054
50 cm	1,88	0,039	2,35	0,093	1,98	0,077	2,26	0,038
65 cm	1,68	0,046	1,88	0,036	1,52	0,021	1,72	0,162

Πίνακας 3.7.β: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες κατά την κατεύθυνση C ($dirC$) όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ (τάσεις φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$)

	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$	H_{max} (A/m)	$\sigma_{H_{max}}$
20 cm	3,41	0,091	3,34	0,043	3,28	0,069	3,29	0,049
35 cm	3,08	0,445	3,05	0,069	2,82	0,073	3,03	0,027
50 cm	2,57	0,124	2,67	0,065	2,55	0,053	2,64	0,126
65 cm	2,00	0,015	2,11	0,083	2,10	0,050	1,83	0,082

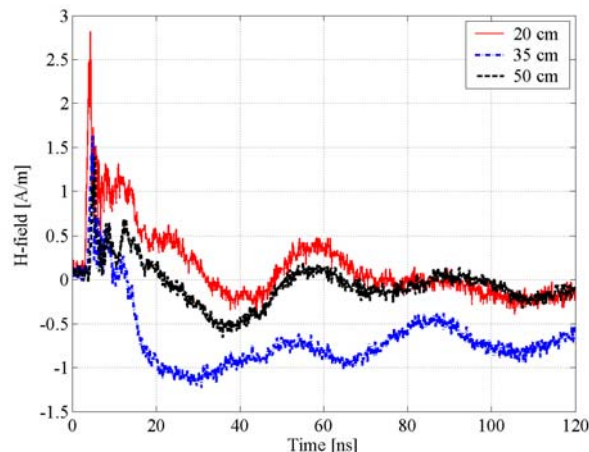
Πίνακας 3.7.γ: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους για τις δύο γεννήτριες κατά την κατεύθυνση D ($dirD$) όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ (τάσεις φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$)

Συγκρίνοντας σε κοινά γραφήματα το ρεύμα εκφόρτισης με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, που παράγεται προκύπτει ότι αυτά τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα, όπως άλλωστε φαίνεται από το σχήμα 3.26 που ακολουθεί. Αυτό είναι αναμενόμενο άλλωστε, αφού το ρεύμα (I) και το μαγνητικό πεδίο (H) συνδέονται μεταξύ τους σαν ανάλογα μεγέθη σύμφωνα με το νόμο του Ampere, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως σύμφωνα με τη σχέση (3.2).

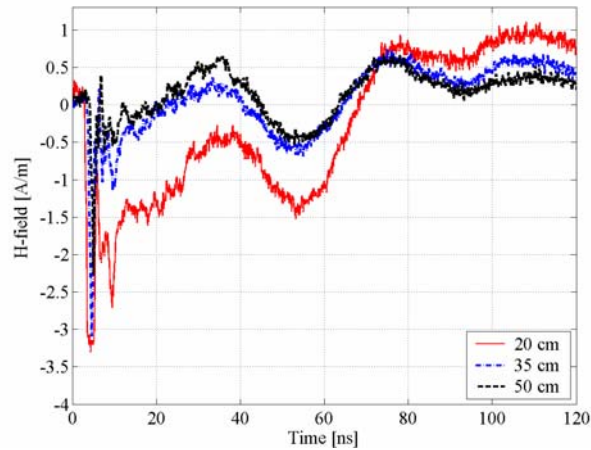


Σχήμα 3.26: Ρεύμα και ένταση μαγνητικού πεδίου για τη γεννήτρια NSG-438 σε απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης στην κατεύθυνση A (τάση φόρτισης +2 kV)

Όπως είναι αναμενόμενο από τη σχέση (3.2) το μαγνητικό πεδίο φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Αυτό άλλωστε φαίνεται και από τα σχήματα 3.27 και 3.28, στα οποία φαίνεται πώς ελαττώνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου για διαφορετικές αποστάσεις.



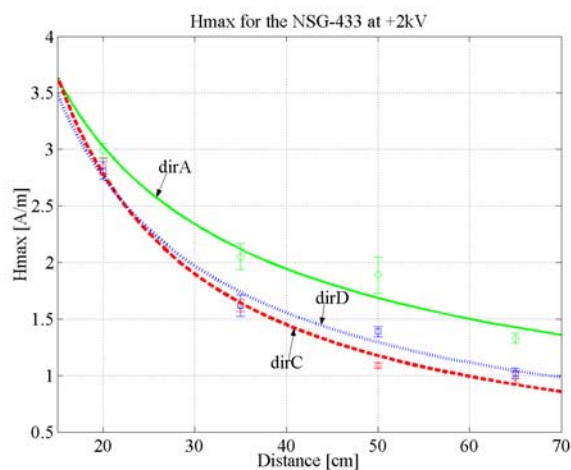
Σχήμα 3.27: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) συναρτήσει του χρόνου στα σημεία D1, D2 και D3 (Κατεύθυνση D απόσταση 20 cm, 35 cm και 50 cm αντίστοιχα) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV



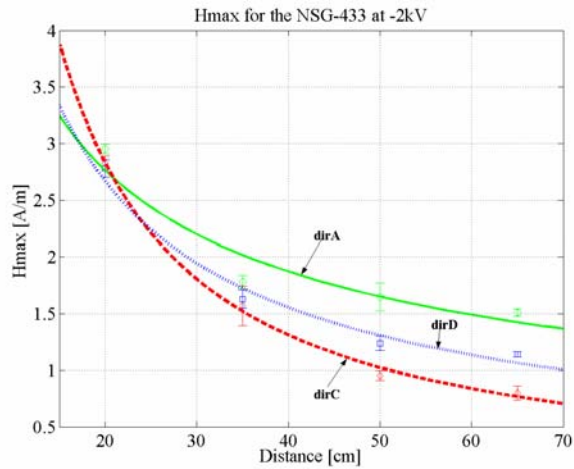
Σχήμα 3.28: Η ένταση H του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στα σημεία $A1$, $A2$ και $A3$ (Κατεύθυνση A απόσταση 20 cm, 35 cm και 50 cm αντίστοιχα) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV

3.4.2.2 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου ανά τάση φόρτισης

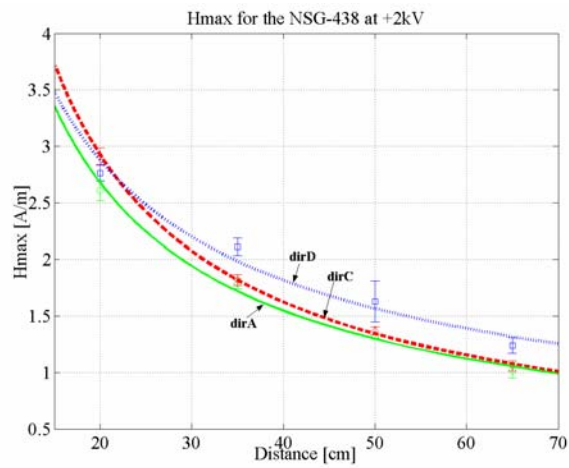
Στα σχήματα 3.29 έως 3.36 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική τους απόκλιση συναρτήσει της απόστασης, ανά κατεύθυνση για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις ± 2 kV και ± 4 kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου όσον αφορά την απόλυτη τιμή του μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης.



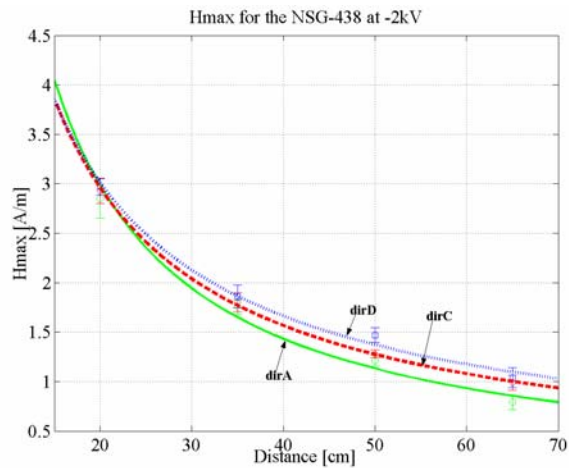
Σχήμα 3.29: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση $+2$ kV



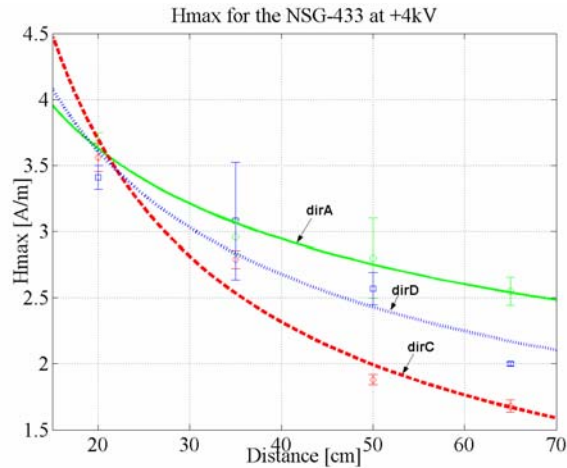
Σχήμα 3.30: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV



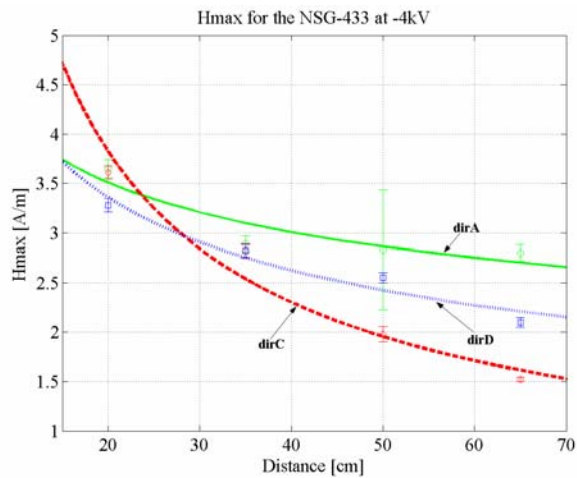
Σχήμα 3.31: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση $+2\text{ kV}$



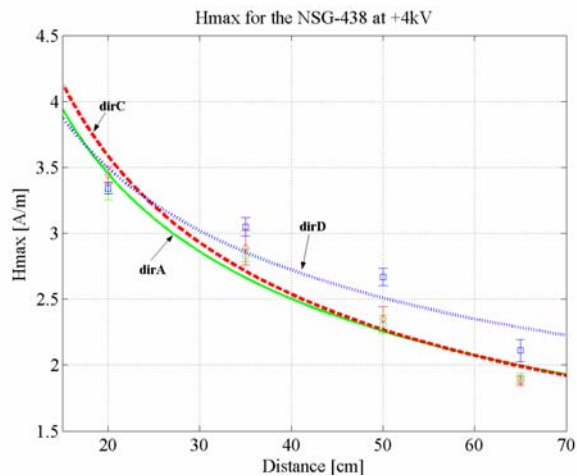
Σχήμα 3.32: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV



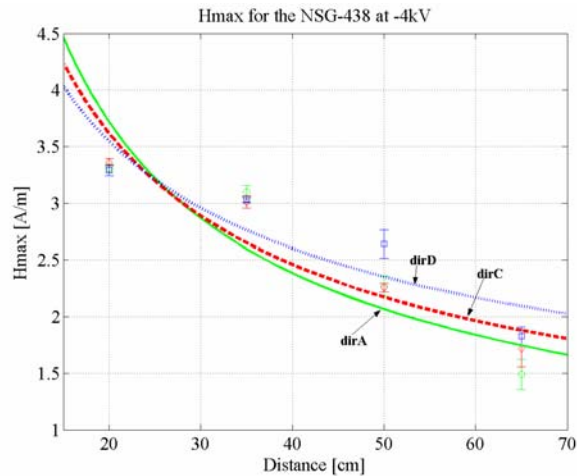
Σχήμα 3.33: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4 kV



Σχήμα 3.34: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -4 kV



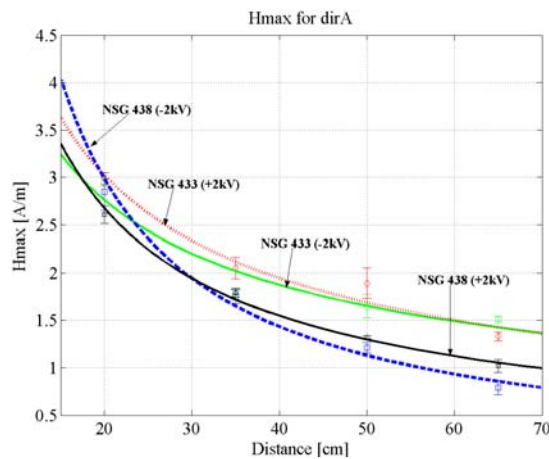
Σχήμα 3.35: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4 kV



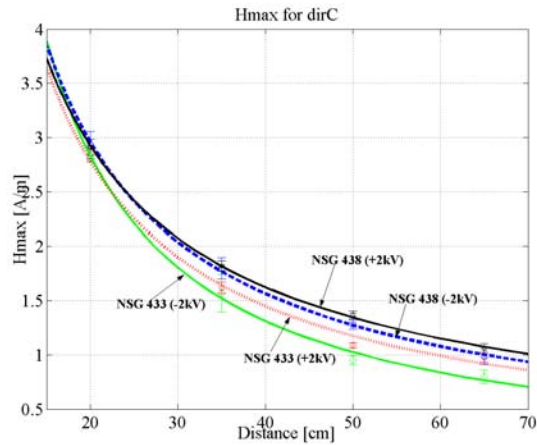
Σχήμα 3.36: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV

3.4.2.3 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου ανά κατεύθυνση

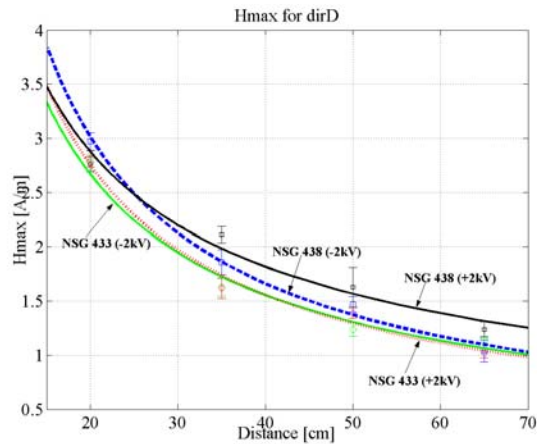
Στα σχήματα 3.37 έως 3.42 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά για εκφορτίσεις επαφής, υπό τάσεις $\pm 2\text{ kV}$ και $\pm 4\text{ kV}$ με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.



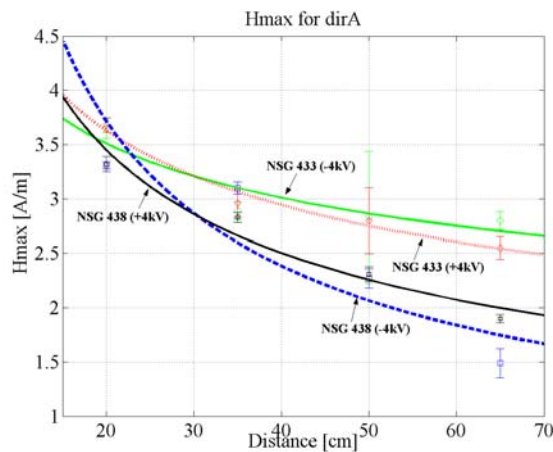
Σχήμα 3.37: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τοπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση A και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις $+2\text{ kV}$ και -2 kV



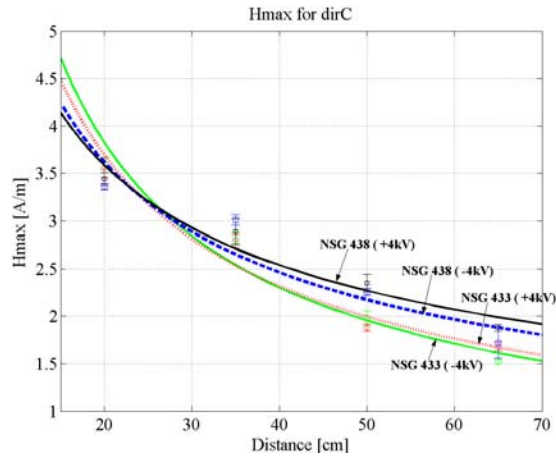
Σχήμα 3.38: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση C και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +2 kV και -2 kV



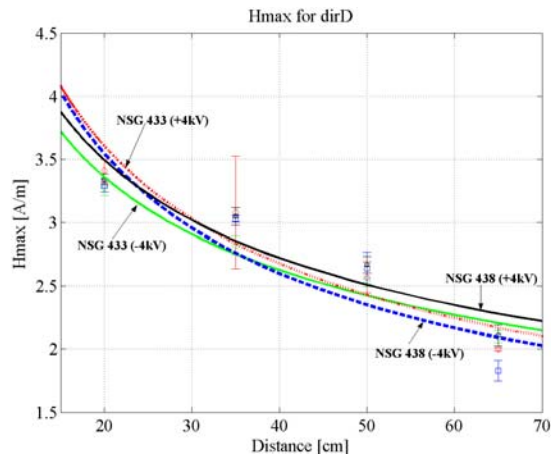
Σχήμα 3.39: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση D και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +2 kV και -2 kV



Σχήμα 3.40: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση A και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +4 kV και -4 kV



Σχήμα 3.41: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση C και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +4 kV και -4 kV



Σχήμα 3.42: Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση D και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +4 kV και -4 kV

3.4.2.4 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε μια σειρά μετρήσεων του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι τοποθετημένος στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής πλάκας. Ανάλογα πειράματα και με τους ίδιους αισθητήρες έχουν γίνει από τον Rommerenke [22, 50, 95], αλλά είναι η πρώτη φορά, που δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο πεδίο που παράγει η κάθε γεννήτρια ανάλογα με την κατεύθυνσή της. Από τα κοινά γραφήματα H και I παρατηρούμε πως η ένταση του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με το ρεύμα. Αυτό είναι απόλυτα φυσικό καθώς ισχύει ο νόμος του Ampere σύμφωνα με τη σχέση (3.2), που σημαίνει πως το πεδίο είναι ανάλογο του ρεύματος. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζεται με χρονική υστέρηση σε σχέση με αυτή του ρεύματος της τάξης των

μερικών ns. Αυτό δικαιολογείται από το χρόνο που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να ταξιδέψει μέχρι τον αισθητήρα, καθώς και στην καθυστέρηση απόκρισης του αισθητήρα.

Η κυματομορφή του μαγνητικού πεδίου αλλοιώνεται σε μακρινές αποστάσεις και αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο αισθητήρας είναι κατασκευασμένος για μετρήσεις στο εγγύς πεδίο. Γι' αυτό άλλωστε οι μετρήσεις έγιναν για αποστάσεις μέχρι τα 65 cm.

Από τα συγκριτικά γραφήματα των σχημάτων 3.29-3.36 παρατηρείται ότι το μαγνητικό πεδίο, που παράγει κάθε γεννήτρια είναι διαφορετικό για τις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις τάσεις φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και για τις τέσσερις τάσεις φόρτισης των γεννητριών (± 2 kV, ± 4 kV) ισχύει πως το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στην κατεύθυνση A είναι ισχυρότερο από το αντίστοιχο της κατεύθυνσης D, το οποίο με τη σειρά του είναι ισχυρότερο από αυτό της κατεύθυνσης C. Δηλαδή ισχύει:

$$H_{\max}^{dirA} > H_{\max}^{dirD} > H_{\max}^{dirC} \quad (3.9)$$

Για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 ισχύει ότι το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στην κατεύθυνση D είναι ισχυρότερο από το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο στην κατεύθυνση C και το οποίο με τη σειρά του είναι ισχυρότερο από το αντίστοιχο της κατεύθυνσης A και για τις τέσσερις τάσεις φόρτισης των γεννητριών (± 2 kV, ± 4 kV). Δηλαδή ισχύει:

$$H_{\max}^{dirD} > H_{\max}^{dirC} > H_{\max}^{dirA} \quad (3.10)$$

Από τα συγκριτικά γραφήματα των σχημάτων 3.37-3.42 προκύπτει πως κάθε μία από τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγει διαφορετικό μαγνητικό πεδίο. Για την κατεύθυνση A ισχύει ότι η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 παράγει ισχυρότερο πεδίο σε σχέση με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 όσον αφορά τη μέγιστη τιμή της έντασης αυτού. Για τις κατευθύνσεις C και D παρατηρείται το αντίστροφο, δηλαδή από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 παράγεται ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο σε σχέση με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 όσον αφορά τη μέγιστη τιμή της έντασης (H) του μαγνητικού πεδίου. Οι διαφορές αυτές ενδεχομένως να οφείλονται στα διαφορετικά ρελέ που έχει η κάθε γεννήτρια. Το ρελέ της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 λειτουργεί έως τα 30 kV και έχει μόνο μία επαφή με δύο πολικότητες, ενώ το ρελέ της γεννήτριας

ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 λειτουργεί στα 18 kV και είναι μικρότερο από αυτό της NSG-438. Από αυτό και μόνο το γεγονός η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στις δύο γεννήτριες είναι διαφορετική. Επιπλέον παρατηρείται πως για ίδια, κατά απόλυτη τιμή (+2 kV με -2 kV ή +4 kV με -4 kV), τάση φόρτισης και για την ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ενώ το ρεύμα εκφόρτισης είναι ίδιο, το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο είναι διαφορετικό. Ενδεχομένως αυτό το γεγονός να οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Συνεπώς, υπάρχουν διαφορετικά μαγνητικά πεδία όχι μόνο από γεννήτρια σε γεννήτρια, αλλά και για την ίδια γεννήτρια ανάλογα με τον προσανατολισμό της. Αυτό σημαίνει πως το εσωτερικό κύκλωμα κάθε γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι κατασκευασμένο κατά τέτοιο τρόπο (τοπολογία ηλεκτρικού κυκλώματος), ώστε το πεδίο που παράγεται σε κάθε κατεύθυνση να είναι διαφορετικό. Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι το εκπεμπόμενο μαγνητικό πεδίο [50] οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι τα εσωτερικά ρεύματα του κυκλώματος της γεννήτριας, ενώ ο δεύτερος το πεδίο που παράγεται από το ρεύμα εκφόρτισης. Κατά συνέπεια, διαφορές στο εσωτερικό κύκλωμα οδηγούν στο να εκπέμπει κάθε γεννήτρια διαφορετικό μαγνητικό πεδίο, ενώ η ασυμμετρία, που υπάρχει στο εκπεμπόμενο πεδίο από κάθε γεννήτρια οδηγεί στο να υπάρχει διαφορετικό πεδίο σε κάθε κατεύθυνση. Αυτές οι διαφορές στο εκπεμπόμενο πεδίο δημιουργούν πρόβλημα στον υπό δοκιμή εξοπλισμό, ο οποίος εξετάζεται από την εκάστοτε γεννήτρια, γιατί ανάλογα με τον προσανατολισμό της ίδιας γεννήτριας ή ανάλογα το μοντέλο της γεννήτριας μπορεί να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα. Είναι δυνατόν λοιπόν ο υπό δοκιμή εξοπλισμός άλλοτε να περνά επιτυχώς τη δοκιμή και άλλοτε να αποτυγχάνει, λόγω των διαφορετικών επαγόμενων τάσεων που κάθε φορά δημιουργούνται.

Παρατηρείται, λοιπόν, από τα παραπάνω πως το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17] δεν είναι επαρκές για τα όσα ορίζει για την κατασκευή των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Πέρα από τις τέσσερις παραμέτρους που ορίζει το Πρότυπο (t_r , I_{max} , I_{30} και I_{60}) πρέπει να ορισθούν παράμετροι για το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, καθώς και για τις επαγόμενες τάσεις που προκαλούν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια στα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων. Μάλιστα θα πρέπει να ληφθεί υπ'

όπιν πως κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων προκαλεί διαφορετικό μαγνητικό πεδίο ανάλογα με τον προσανατολισμό της.

Τέλος, χρειάζεται να διευκρινισθεί η επιλογή της αποκλειστικής μελέτης εκφορτίσεων επαφής. Όταν έχουμε εκφορτίσεις αέρος το ρεύμα που παράγεται δεν είναι της ίδιας μορφής κάθε φορά. Αυτό συμβαίνει γιατί στις εκφορτίσεις αέρα το μήκος του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου είναι διαφορετικό και ποικίλει ανάλογα με την υγρασία, την ταχύτητα προσέγγισης του πιστολιού στο στόχο και την κατεύθυνση της ακίδας. Το γεγονός αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση των εκφορτίσεων επαφής, όπου υπάρχει επαναληψιμότητα των εκφορτίσεων αυτών.

3.4.3 Μέτρηση έντασης ηλεκτρικού πεδίου

3.4.3.1 Αποτελέσματα των πειραμάτων

Στους πίνακες 3.8 και 3.9, που ακολουθούν φαίνεται η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για τις δύο γεννήτριες, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m για τάσεις φόρτισης τα ± 2 kV και ± 4 kV.

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
20 cm	8.72	0.985	5.19	0.228	9.76	0.750	5.98	0.267
35 cm	4.1	0.088	3.32	0.092	4.09	0.196	3.49	0.334
50 cm	2.67	0.094	2.40	0.162	2.63	0.100	2.64	0.125
65 cm	2.32	0.091	2.19	0.164	2.19	0.116	1.90	0.115

Πίνακας 3.8.α: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση A ($dirA$) για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μεταλλικής επιφάνειας 1,5 m x 1,5 m (τάση φόρτισης ± 2 kV)

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
20 cm	6.50	0.464	5.12	0.321	6.52	0.227	5.84	0.115
35 cm	3.49	0.054	3.31	0.204	3.33	0.085	3.34	0.134
50 cm	2.89	0.071	2.39	0.056	2.67	0.067	2.30	0.119
65 cm	2.60	0.110	1.98	0.040	2.50	0.043	1.92	0.156

Πίνακας 3.8.β: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση C ($dirC$) για τις δύο γεννήτριες όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι επί μεταλλικής επιφάνειας 1,5 m x 1,5 m (τάση φόρτισης ± 2 kV)

	Τάση φόρτισης +2 kV				Τάση φόρτισης -2 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
20 cm	6.61	0.250	5.67	0.134	7.45	0.517	5.89	0.468
35 cm	4.04	0.273	4.17	0.170	4.03	0.174	3.91	0.127
50 cm	3.69	0.183	3.07	0.084	3.16	0.366	2.94	0.390
65 cm	3.54	0.048	2.74	0.153	3.41	0.279	2.56	0.157

Πίνακας 3.8.γ: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση D ($dirD$) για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ (τάση φόρτισης $\pm 2\text{ kV}$)

	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
20 cm	12,38	0,334	11,60	0,289	18,08	1,12	12,38	0,410
35 cm	7,28	0,340	7,12	0,428	8,31	0,84	7,28	0,239
50 cm	5,12	0,223	4,80	0,314	5,17	0,13	5,12	0,171
65 cm	4,61	0,090	3,54	0,288	4,12	0,05	4,61	0,169

Πίνακας 3.9.α: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση A ($dirA$) για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}^2$ (τάση φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$)

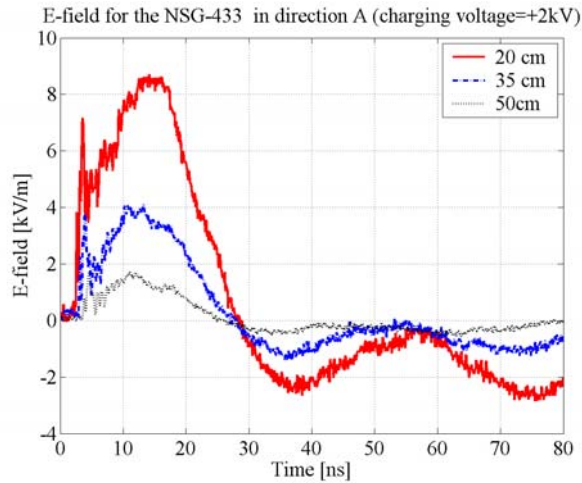
	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
20 cm	10,99	0,464	9,61	0,321	13,06	0,227	12,07	0,115
35 cm	6,56	0,054	6,34	0,204	6,17	0,085	6,71	0,134
50 cm	5,36	0,071	4,73	0,056	5,07	0,067	4,57	0,119
65 cm	5,21	0,110	3,87	0,040	4,77	0,043	3,70	0,156

Πίνακας 3.9.β: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση C ($dirC$) για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}^2$ (τάση φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$)

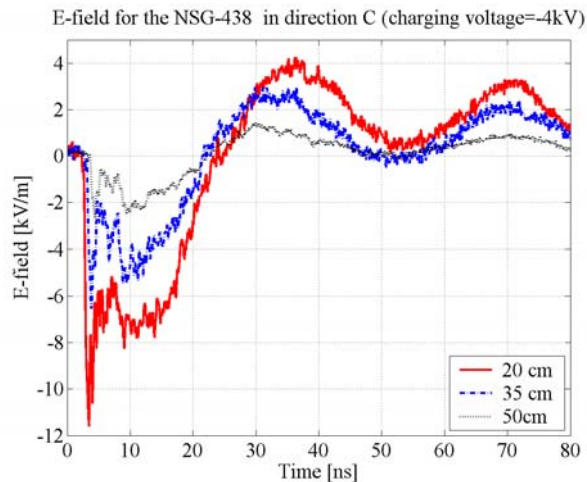
	Τάση φόρτισης +4 kV				Τάση φόρτισης -4 kV			
	NSG-433		NSG-438		NSG-433		NSG-438	
	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$	E_{max} (kV/m)	$\sigma_{E_{max}}$
20 cm	11,04	0,280	10,67	0,353	12,87	0,634	12,12	0,368
35 cm	7,45	0,076	7,64	0,217	7,63	0,141	8,21	0,210
50 cm	6,65	0,106	5,42	0,129	6,17	0,086	5,45	0,225
65 cm	6,19	0,192	4,62	0,073	7,41	0,127	4,60	0,106

Πίνακας 3.9.γ: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατά απόλυτη τιμή και η τυπική απόκλισή τους κατά την κατεύθυνση D ($dirD$) για τις δύο γεννήτριες με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μεταλλικής επιφάνειας $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}^2$ (τάση φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$)

Όπως και το μαγνητικό πεδίο έτσι και το ηλεκτρικό πεδίο, φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης. Αυτό άλλωστε φαίνεται και από τα σχήματα 3.43 και 3.44, στα οποία φαίνεται πώς ελαττώνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για διαφορετικές αποστάσεις. Είναι φανερό ότι οι κυματομορφές και για τις τρεις αποστάσεις είναι ανάλογες μεταξύ τους.



Σχήμα 3.43: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) συναρτήσει του χρόνου για αποστάσεις 20 cm, 35 cm και 50 cm (Κατεύθυνση A) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV

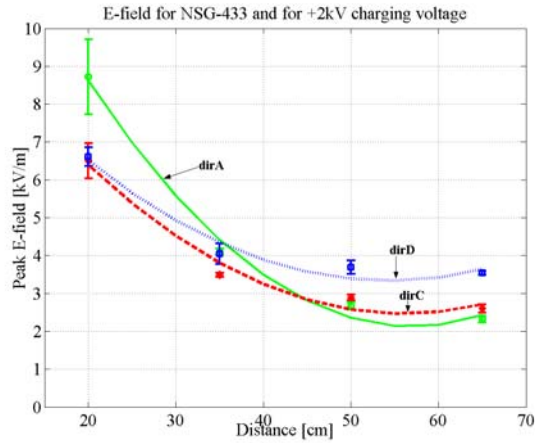


Σχήμα 3.44: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) συναρτήσει του χρόνου για αποστάσεις 20 cm, 35 cm και 50 cm (Κατεύθυνση C) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV

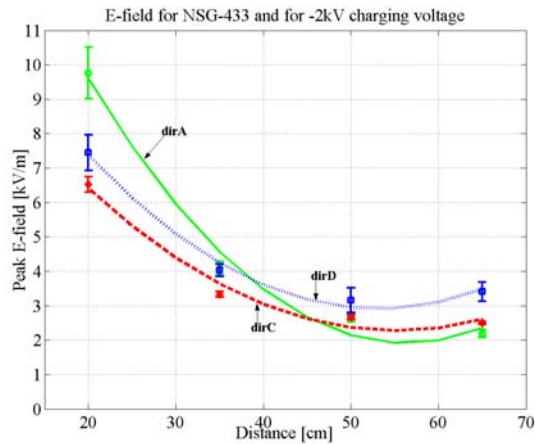
3.4.3.2 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανά τάση φόρτισης

Στην σχήματα 3.45 έως 3.52 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης συγκρίνοντας

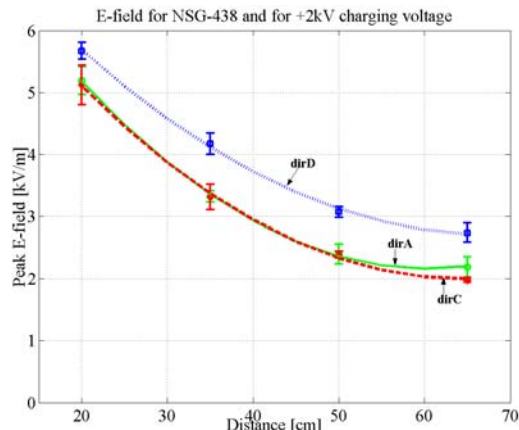
τη μέση μέγιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που μετράμε σε κάθε κατεύθυνση για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις ± 2 kV και ± 4 kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί, το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όσον αφορά την απόλυτη τιμή του μειώνεται, όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης.



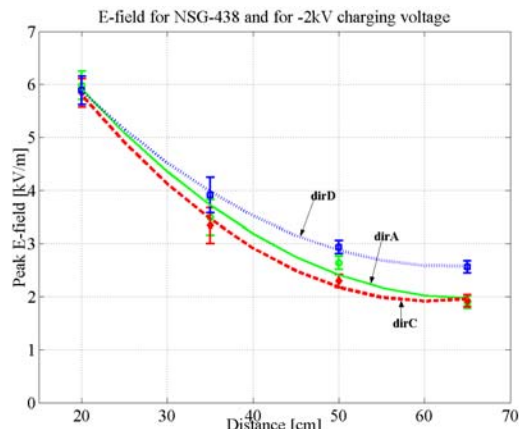
Σχήμα 3.45: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τοπική απόκλιση τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV



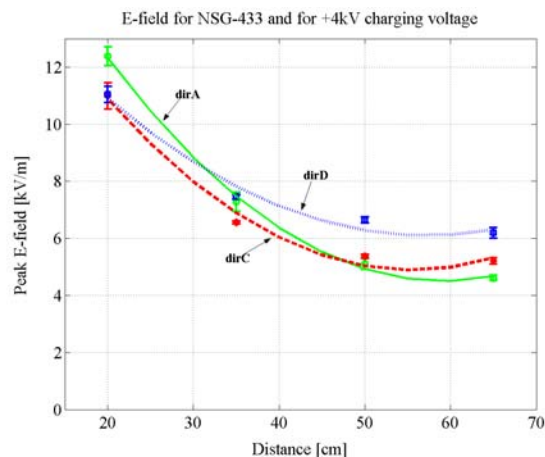
Σχήμα 3.46: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τοπική απόκλιση τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV



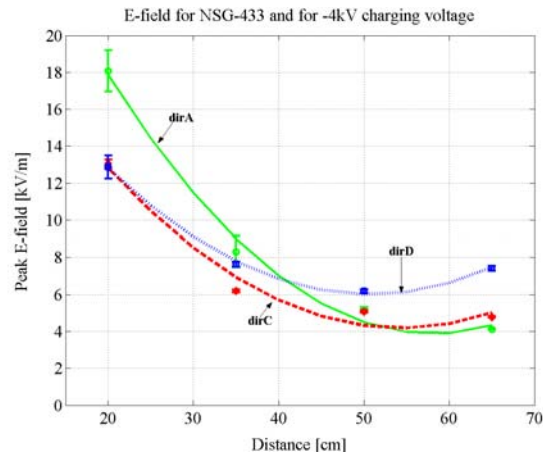
Σχήμα 3.47: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV



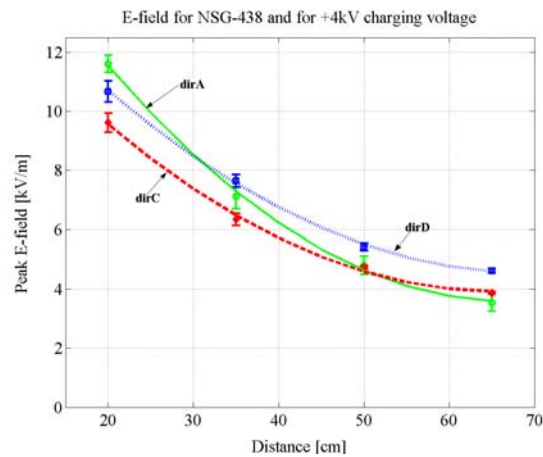
Σχήμα 3.48 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV



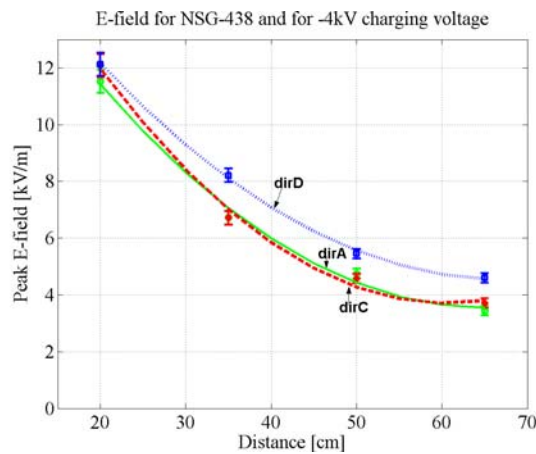
Σχήμα 3.49: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4 kV



Σχήμα 3.50: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -4 kV



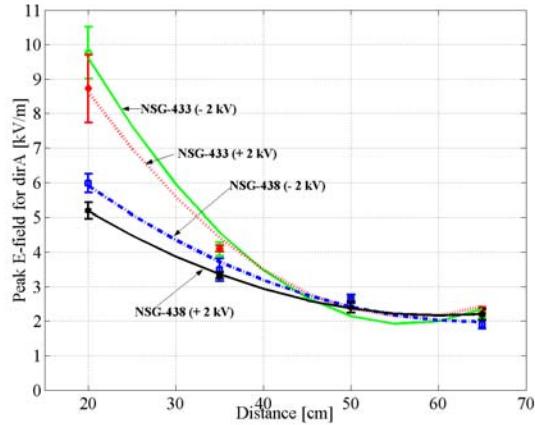
Σχήμα 3.51: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση $+4\text{ kV}$



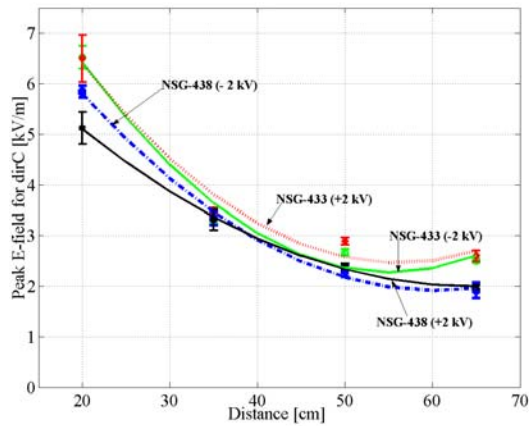
Σχήμα 3.52: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV

3.4.3.3 Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανά κατεύθυνση

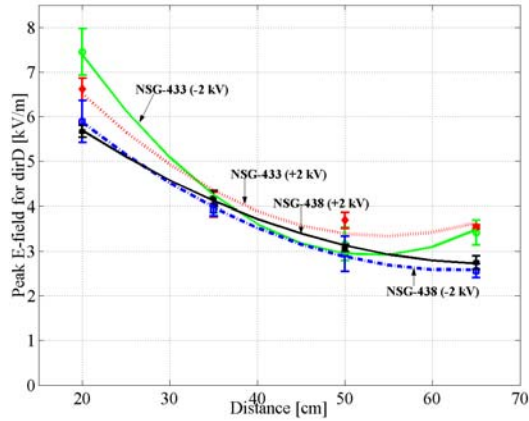
Στα σχήματα 3.53-3.58 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης και για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις ± 2 kV και ± 4 kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.



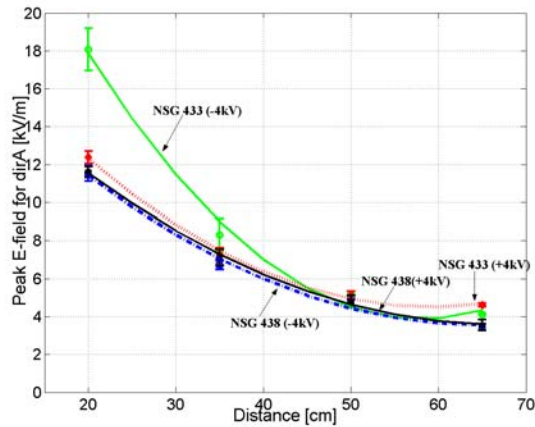
Σχήμα 3.53: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση A και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +2 kV και -2 kV



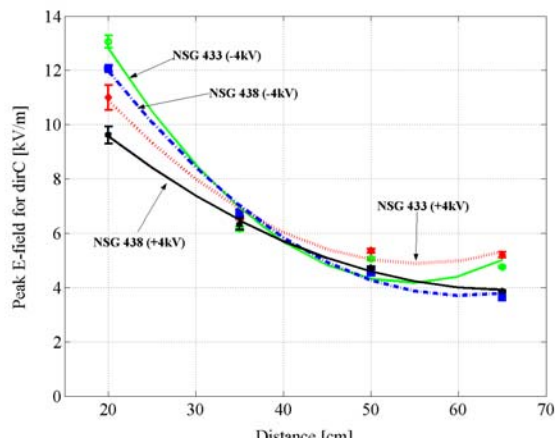
Σχήμα 3.54: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση C και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +2 kV και -2 kV



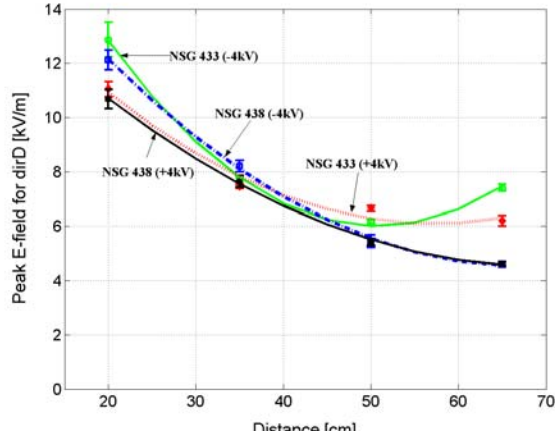
Σχήμα 3.55: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση D και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +2 kV και -2 kV



Σχήμα 3.56: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση A και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +4 kV και -4 kV



Σχήμα 3.57: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση C και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις +4 kV και -4 kV



Σχήμα 3.58: Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στην κατεύθυνση D και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις $+4\text{ kV}$ και -4 kV

3.4.3.4 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.9 και τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το ηλεκτρικό πεδίο παρουσιάζει τη μέγιστη ισχύ του για τα πρώτα 30 ns και για τις δυο πολικότητες. Επίσης παρατηρείται ότι το ηλεκτρικό πεδίο ξεκινάει με μια ευθεία γραμμή για τα πρώτα 3 ns. Ο χρόνος αυτός είναι ο χρόνος, που χρειάζεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να ταξιδέψει μέχρι τον αισθητήρα, καθώς και ο χρόνος λόγω καθυστέρησης της απόκρισης του αισθητήρα.

Οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και για τις δυο γεννήτριες NSG-433 και NSG-438, αλλά και για τις τρεις κατευθύνσεις παρουσιάστηκαν στα σχήματα 3.45-3.52. Αρχικά παρατηρήθηκε ότι το πλάτος της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ελαττώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο εκφόρτισης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την υπέρθεση στο οδεύον κύμα, του κύματος που ανακλάται στην αρχή της μεταλλικής επιφάνειας. Το γεγονός αυτό συμφωνεί πλήρως με τη μελέτη του καθηγητή David Pommerenke σχετικά με τις συγκρίσεις του ηλεκτρικού πεδίου για μεταλλική πλακά τοποθετημένη οριζόντια, αλλά και κάθετα [28].

Επίσης παρατηρείται ότι και στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες σχεδόν τις αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης, η γεννήτρια NSG-433 παράγει μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο από τη γεννήτρια NSG-438 και για τις δυο πολικότητες. Αυτό εξηγείται από τη διαφορετική κατασκευή των δυο γεννητριών και προφανώς από τα διαφορετικά ρελέ, που η καθεμία διαθέτει. Συμπερασματικά, το παραγόμενο

ηλεκτρικό πεδίο είναι διαφορετικό για τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για το ηλεκτρικό πεδίο, που παράγεται από τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, παρατηρήθηκε ότι για την ίδια οριζόντια γειωμένη επιφάνεια, για την ίδια τάση φόρτισης και για την ίδια απόσταση, αλλά για διαφορετική κατεύθυνση, το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο ήταν διαφορετικό. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε τρεις κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους (κατεύθυνση A, κατεύθυνση C, κατεύθυνση D). Από τις γραφικές παραστάσεις της §3.4.3.2 γίνεται προφανές ότι για την γεννήτρια NSG-438 και για πολικότητες ± 2 kV η κατεύθυνση, στην οποία η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη ταξινομείται ως εξής:

$$E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirA} > E_{\max}^{dirC} \quad (3.11)$$

Για πολικότητες +4 kV η κατεύθυνση, στην οποία η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη ταξινομείται ως εξής:

$$\begin{aligned} E_{\max}^{dirA} > E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirC} & \quad 20cm \leq d \leq 35cm \\ E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirA} > E_{\max}^{dirC} & \quad 35cm \leq d \leq 50cm \\ E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirC} > E_{\max}^{dirA} & \quad 50cm \leq d \leq 65cm \end{aligned} \quad (3.12)$$

Ενώ για πολικότητες -4 kV η κατεύθυνση, στην οποία η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη ταξινομείται ως εξής:

$$E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirC} > E_{\max}^{dirA} \quad (3.13)$$

Ομοίως για τη γεννήτρια NSG-433 και για πολικότητες ± 2 kV και ± 4 kV η ταξινόμηση έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} E_{\max}^{dirA} > E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirC} & \quad 20cm \leq d \leq 35cm \\ E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirA} > E_{\max}^{dirC} & \quad 35cm \leq d \leq 50cm \\ E_{\max}^{dirD} > E_{\max}^{dirC} > E_{\max}^{dirA} & \quad 50cm \leq d \leq 65cm \end{aligned} \quad (3.14)$$

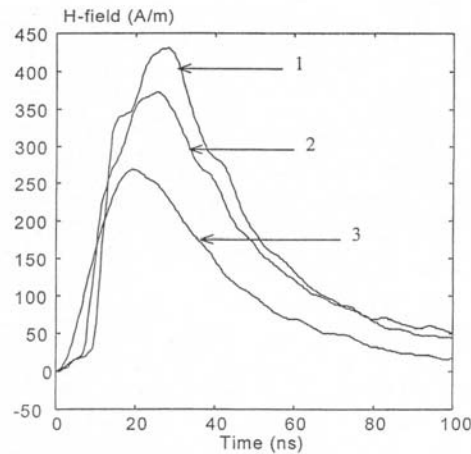
Μια πιθανή αιτία για τα διαφορετικά παραγόμενα ηλεκτρικά πεδία σε διαφορετικές κατευθύνσεις μπορεί να είναι η κατασκευή του κυκλώματος, το οποίο παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό είναι κάτι στο οποίο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, επειδή ο προσανατολισμός της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι πιθανόν να επηρεάζει τα αποτελέσματα στον εκάστοτε έλεγχο ενός δοκιμίου (EUT). Παρατηρείται επίσης ότι ακόμα και για την ίδια γεννήτρια, αλλά σε διαφορετική τάση φόρτισης, τα αποτελέσματα ως προς την κατεύθυνση είναι διαφορετικά όπως προκύπτει από τις σχέσεις (3.11)-(3.14). Για παράδειγμα αν

διεξάγουμε έναν έλεγχο με τη γεννήτρια NSG-438 και το ελεγχόμενο δοκίμιο τοποθετηθεί στην κατεύθυνση C μπορεί να περάσει τον έλεγχο και να αποτύχει το ίδιο δοκίμιο αν τοποθετηθεί στην κατεύθυνση D , επειδή στην κατεύθυνση αυτή η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι μεγαλύτερη.

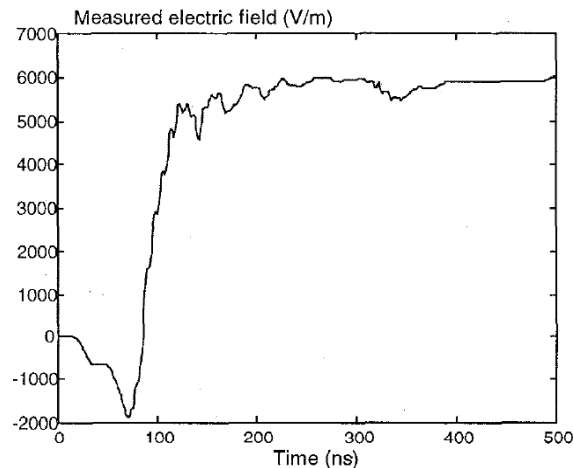
3.5 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα της διεθνούς βιβλιογραφίας

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να γίνει μια σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Πρέπει να τονισθεί ότι η μελέτη του παραγόμενου πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι ιδιαίτερα δύσκολο ζήτημα, λόγω του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που απαιτεί χρήση αισθητήρων ειδικής κατασκευής. Γι' αυτό το λόγο έχουν υπάρξει διαφορετικά αποτελέσματα τόσο ως προς τη μορφή του παραγόμενου μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου, όσο και ως προς τις τιμές, που κάθε φορά μετρώνται.

Στην §3.3 παρουσιάστηκαν μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με χρήση αισθητήρων της Rohde-Schwarz και όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν επί μονωτικού υποστρώματος. Οι ίδιοι τύπου αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από τον Bendjamine σε διαφορετική τύπου διάταξη εν συγκρίσει με αυτή που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή. Ο Bendjamine προσπάθησε να εξετάσει τα χαρακτηριστικά της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βασιζόμενος στο ρεύμα, την οπτική ακτινοβολία και το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο [56, 57, 59, 60]. Στη διάταξη, που χρησιμοποίησε μετρούσε το παραγόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρος σε μικρά διάκενα. Παραδείγματα των κυματομορφών που προέκυψαν από τις μετρήσεις που διεξήγαγε παρουσιάζονται στα σχήματα 3.59 και 3.60, που ακολουθούν. Παρατηρούμε ότι οι κυματομορφές του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου είναι παρόμοιες με τις κυματομορφές, που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 3.5-3.11 και 3.16-3.21. Μεταξύ τους συγκρίσεις δεν θα ήταν σωστό να γίνουν διότι αφενός έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικού τύπου γεννήτριες και εξοπλισμός για τη διεξαγωγή του πειράματος και αφετέρου οι εκφορτίσεις τις οποίες μελέτησε ο Bendjamine ήταν εκφορτίσεις αέρος και όχι επαφής, τις οποίες πραγματεύεται η παρούσα διατριβή.



Σχήμα 3.59: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται για μήκος διακένου 2 mm και τάση φόρτισης 10 kV για αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης : (1) 10 mm, (2) 20 mm και (3) 30 mm [56]



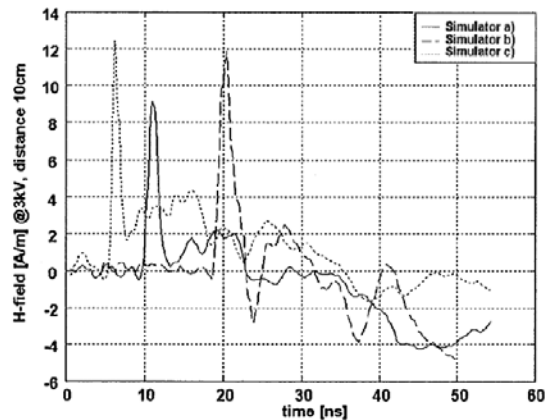
Σχήμα 3.60: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται σε απόσταση 3 cm από το σημείο εκφόρτισης για τάση φόρτισης τα 10 kV [60]

Στην §3.4 οι αισθητήρες μέτρησης, που χρησιμοποιήθηκαν, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας, ήταν του D. Pommerenke, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί από τον ίδιο για τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Στα σχήματα 3.61-3.62, που ακολουθούν παρουσιάζονται μετρήσεις του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου με τους αισθητήρες αυτούς και όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,6 m x 0,8 m [44]. Οι αισθητήρες μέτρησης, τόσο του μαγνητικού, όσο και του ηλεκτρικού πεδίου ήταν τοποθετημένοι σε απόσταση 10 cm από το σημείο της εκφόρτισης, ενώ έγιναν μετρήσεις του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

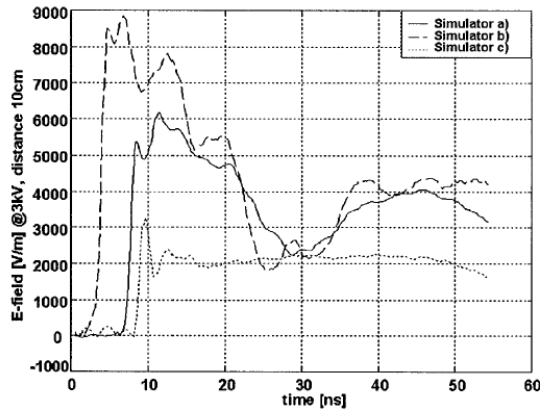
για τρεις διαφορετικές γεννήτριες κατασκευασμένες σύμφωνα με το ισχύον Πρότυπο [17] για τάσεις φόρτισης τα 3 kV.

Από τα σχήματα 3.61 και 3.62 παρατηρούμε ότι οι κυματομορφές του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα, έχουν παρόμοια μορφή με τις κυματομορφές, που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 3.26-3.28 και 3.43-3.44 αντίστοιχα. Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να σημειωθεί ότι συγκρίσεις μεταξύ των μέγιστων τιμών των μετρήσεων του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου, που έχουν διεξαχθεί στην παρούσα διατριβή με τις μετρήσεις των σχημάτων δεν θα ήταν σωστό να γίνουν αφενός γιατί οι γεννήτριες, που έχουν χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετικές και αφετέρου, επειδή ο εξοπλισμός, που έχει χρησιμοποιηθεί είναι διαφορετικός. Άλλωστε σύμφωνα με τους Sroka και Leuchtmann [54] τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαφέρουν ανάλογα με το μετρητικό σύστημα, που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

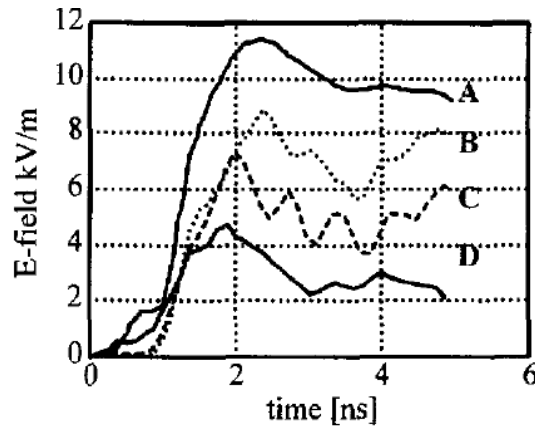
Στην περίπτωση της εργασίας [44] υπάρχει επίσης μια ουσιαστική διαφορά ως προς τις διαστάσεις της μεταλλικής επιφάνειας, που είναι διαφορετικές από τις διαστάσεις 1,5 m x 1,5 m, που ορίζει το Πρότυπο [17]. Γεγονός όμως είναι ότι τα μετρούμενα μεγέθη είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Άλλωστε από το σχήμα 3.63 [21] μπορούμε να δούμε τις αρκετά μεγάλες διαφορές, που παρουσιάζουν οι διαφορετικές κατασκευής γεννήτριες στο ηλεκτρικό πεδίο, που παράγουν, γεγονός, που καταδεικνύει ότι είναι αναμενόμενο να υπάρχουν διαφορές στις συγκρίσεις, που γίνονται στην παρούσα παράγραφο.



Σχήμα 3.61: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγουν τρεις διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε απόσταση 10 cm από το σημείο εκφόρτισης για τάση φόρτισης τα + 3 kV [44]



Σχήμα 3.62: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγουν τρεις διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε απόσταση 10 cm από το σημείο εκφόρτισης για τάση φόρτισης τα + 3 kV [44]



Σχήμα 3.63: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγουν τέσσερις διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε απόσταση 10 cm από το σημείο εκφόρτισης για τάση φόρτισης τα + 5 kV [21]

3.6 Προτάσεις για την επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει μια σύνοψη συμπερασμάτων από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο. Κατ' αρχάς και όσον αφορά το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κατά την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παρατηρήθηκε ότι η κυματομορφή του διέφερε ανάλογα με τη φύση και τις διαστάσεις του υλικού πάνω στο οποίο ήταν τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Θα μπορούσε να προταθεί στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου οι διαστάσεις της μεταλλικής πλάκας να μην είναι αυστηρά 1,5 m x 1,5 m, αλλά να είναι πιο ελαστικές και σαφέστατα μικρότερες, γεγονός που θα διευκολύνει τα Εργαστήρια που ασχολούνται με τις εν

λόγω δοκιμές σε πρακτικό επίπεδο. Επίσης, στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου θα μπορούσε να προταθεί κατά τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων η διάταξη της μεταλλικής επιφάνειας να είναι κατακόρυφη και όχι οριζόντια. Με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλιζόταν η καλύτερη επαναληψιμότητα των μετρήσεων δεδομένου ότι το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης θα ήταν σταθερό, λόγω της βαρύτητας. Με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλιζόταν η μικρότερη αβεβαιότητα για την παράμετρο I_{60} , η οποία επηρεάζεται από τη θέση του καλωδίου γείωσης.

Τα πειράματα, που διεξήχθησαν για τη μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος επί μονωτικού υλικού και όχι σε γειωμένη μεταλλική πλάκα προσομοιώνουν καλύτερα το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Στις εκφορτίσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στην καθημερινή μας ζωή δεν υπάρχει γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, αλλά συμβαίνουν συνήθως επί μονωτικού υλικού, όπως για παράδειγμα είναι η εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος πάνω σε μια ηλεκτρονική συσκευή, η οποία βρίσκεται σε ένα ξύλινο γραφείο. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε ότι κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και επιπλέον κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στις διάφορες ως προς αυτή κατεύθυνσεις.

Σχετικά με τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που προέρχεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις θα μπορούσε να λεχθεί ότι είναι αρκετά μεγάλη πρόκληση, δεδομένου ότι οι εκφορτίσεις αυτές αποτελούν ένα ταχύτατο μεταβατικό φαινόμενο, συνολικής διάρκειας μερικών εκατοντάδων ns [54]. Μάλιστα, μέχρι στιγμής δεν έχουν καθορισθεί επακριβώς εκείνοι οι αισθητήρες, με τους οποίους θα γίνεται η μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Από τις μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παρατέθηκαν προηγουμένως για διαφορετικές διατάξεις, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν επί μονωτικού υποστρώματος ή στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας, συμπεραίνεται ότι οι τιμές, αλλά και οι κυματομορφές των παραγόμενων πεδίων διαφέρουν ανάλογα με τις πειραματικές διατάξεις και τους αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται. Για τις δύο διαφορετικές διατάξεις, που παρουσιάστηκαν μπορούμε να πούμε ότι οι τιμές του μαγνητικού πεδίου με τους αισθητήρες της Rohde-Schwarz είναι διπλάσιες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν με χρήση των αισθητήρων του Pommerenke.

Ανάλογο συμπέρασμα προκύπτει για τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου, όπου προκύπτει ότι οι τιμές με χρήση των αισθητήρων της Rohde & Schwarz είναι τριπλάσιες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν με χρήση των αισθητήρων του Pommerenke. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στη διαφορετική κατασκευή των δύο τύπων αισθητήρων (της Rohde-Schwarz και του Pommerenke), αλλά και στη διαφορετική διάταξη που χρησιμοποιήθηκαν. Οι αισθητήρες της Rohde-Schwarz χρησιμοποιήθηκαν με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος, ενώ οι αισθητήρες του Pommerenke όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας. Συνεπώς, είναι λογικό να διαφέρουν οι τιμές των μετρούμενων πεδίων.

Όπως δείχθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα, τόσο όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής βρίσκεται επί μονωτικού υποστρώματος, όσο και όταν βρίσκεται στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι διαφορετικό. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι κάθε γεννήτρια έχει διαφορετικό κύκλωμα, το οποίο, ανάλογα με τη θωράκιση, που έχει η συσκευή παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο.

Επίσης, διαφορές υπάρχουν και στην ίδια γεννήτρια ανάλογα με τον προσανατολισμό της, εφ' όσον ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία μετράμε, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι διαφορετικό. Το γεγονός αυτό επηρεάζει διαφορετικά το εκάστοτε δοκίμιο, ανάλογα με τη θέση της γεννήτριας ως προς το δοκίμιο δεδομένου ότι οι επαγόμενες τάσεις είναι διαφορετικές σε κάθε περίπτωση. Το γεγονός ότι υπάρχει ασυμμετρία στην κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γύρω από την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων οφείλεται: α) Στην ασυμμετρία που έχουν τα ρελέ υψηλής τάσης στο εσωτερικό των γεννητριών και β) Στη θέση που έχει το καλώδιο γείωσης της γεννήτριας. Όπως έχει αναφερθεί, η θέση του καλωδίου γείωσης, επηρεάζει το ρεύμα στα 60 ns (I_{60}) και κατ' επέκταση και το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τονίζεται ότι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, το καλώδιο γείωσης ήταν στην ίδια θέση, οπότε οι μετρήσεις του παραγόμενου πεδίου ήταν επαναλήψιμες, κάτι που δεν συμβαίνει όταν οι γεννήτριες αυτές χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή ηλεκτρικών ή ηλεκτρονικών συσκευών.

Το διαφορετικό μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο, που παράγεται από διαφορετικές γεννήτριες ή από την ίδια γεννήτρια ανάλογα με τον προσανατολισμό της, έχει σαν αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις σε γειτιάζοντα σημεία να είναι επίσης

διαφορετικές. Αυτό συνεπάγεται ένα δοκίμιο, το οποίο εξετάζεται από τη μια γεννήτρια να περνάει το τεστ σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17], ενώ με την άλλη να αποτυγχάνει. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει την αναγκαιότητα μελέτης του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις διάφορες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια, εντός των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων.

Στην επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου θα μπορούσε να συμπεριληφθεί η παράμετρος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παράγεται από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Συγκεκριμένα θα πρέπει να ορισθεί η διάταξη, η οποία θα χρησιμοποιείται για την μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η καταλληλότερη, κατά την άποψη του συγγραφέα, είναι αυτή που θα περιλαμβάνει μεταλλική επιφάνεια διαστάσεων τουλάχιστον 1 m x 1 m και αισθητήρες μέτρησης παρόμοιους με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και ήταν κατασκευής του D. Pommerenke. Η διάταξη θα είναι όπως περιγράφηκε στα σχήματα του 2^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διατριβής. Παράλληλα θα μπορούσε να οριστούν όρια για κάποιες παραμέτρους των μεγεθών του πεδίου κατά την επαλήθευσή του, όπως η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου, E_{max} και H_{max} αντίστοιχα, ο χρόνος ανόδου του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου και ενδεχομένως, τιμές της μεταβολής (παράγωγος) του πεδίου. Επίσης, η μέτρηση του πεδίου κατά την επαλήθευση των γεννητριών θα πρέπει να γίνεται περί τις 360°, γεγονός βέβαια αρκετά δύσκολο από απόψεως υλοποίησης για τα ανά την υφήλιο εργαστήρια. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί η αβεβαιότητα κατά την επαλήθευση των γεννητριών, ενώ οι δοκιμές πάνω σε πραγματικά δοκίμια θα είναι πιο αξιόπιστες, δεδομένου ότι θα έχει εξασφαλισθεί σε βαθμό μεγαλύτερο, από ότι τώρα, η επαναληψιμότητά τους.

Το Πρότυπο [17] θα μπορούσε στην επόμενη αναθεωρημένη του έκδοση να ορίζει το πώς θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να είναι ομοιόμορφο γύρω από τη γεννήτρια. Στην περίπτωση, που κάτι τέτοιο δεν είναι χρονικά ακόμη εφικτό θα μπορούσαν οι κατασκευαστές γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων προκειμένου να κάνουν πιο εύρηστα τα προϊόντα τους, να αναγράφουν πάνω στις γεννήτριες την κατεύθυνση, στην οποία η γεννήτρια παράγει την μεγαλύτερη ένταση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, ώστε αυτό να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τη

χρήση τους. Κατά τη δοκιμή εξοπλισμού και ιδιαίτερα σε οριακές καταστάσεις όπου ένα προϊόν είναι οριακά να περάσει ή να κοπεί το Πρότυπο θα πρέπει να ορίζει ότι οι δοκιμές θα πρέπει να γίνονται κατά την κατεύθυνση εκείνη, που παράγει το μεγαλύτερο πεδίο. Με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλισθεί η καλύτερη αξιοπιστία των δοκιμών.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου [17] στοχεύει στη μείωση της αβεβαιότητας των δοκιμών, που γίνονται. Πρέπει να τονισθεί ότι η αβεβαιότητα των δοκιμών σαφέστατα θα μειωθεί αν υιοθετηθούν όρια και μεγέθη για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά δεν πρόκειται να μηδενισθεί. Πάντα θα υπάρχουν αίτια ακόμα και αν η επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι μηδενική, όπως για παράδειγμα το διαφορετικό μήκος του ηλεκτρικού τόξου σε δοκιμές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων αέρος ή η διαφορετική θέση του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

4.1 Εισαγωγή στην υπολογιστική προσέγγιση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται προσομοιώσεις για το κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτή προδιαγράφεται από το υπάρχον Πρότυπο [17]. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφόρων ειδών φορτία (υπό εξέταση δοκίμια), καθώς επίσης, παρουσιάζονται κυκλωματικές προσομοιώσεις υποψήφιων κυκλωμάτων για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και πώς αυτό αλλάζει ανάλογα με την τροποποίηση διαφόρων στοιχείων της πειραματικής διάταξης, που χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση των γεννητριών. Ταυτόχρονα, εξετάζεται η απόκριση, που δίνει κάθε υποψήφιο κύκλωμα, ενώ παράλληλα μελετάται και το ρεύμα, που παράγεται από τη γεννήτρια σε διαφόρων ειδών δοκίμια. Στις κυκλωματικές αυτές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PSpice.

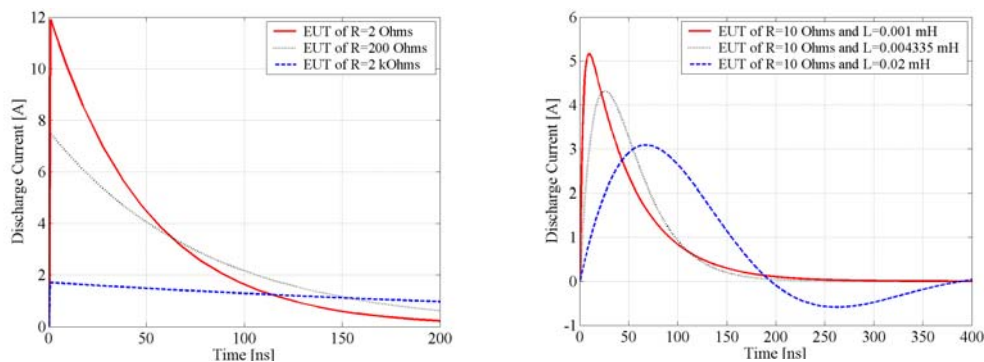
Όπως θα παρουσιασθεί στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου υπάρχει απόκλιση μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος, που δίνει το κύκλωμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και της κυματομορφής, όπως αυτά ορίζονται στο Πρότυπο. Συνεπώς, κάποιος, ο οποίος χρησιμοποιεί το κύκλωμα όπως το ορίζει το Πρότυπο σε προσομοιώσεις, εισάγει σφάλματα, τα οποία οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Προκειμένου λοιπόν να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) σε γλώσσα Matlab, ο οποίος υπολογίζει τη βέλτιστη τιμή παραμέτρων σε εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Με τον τρόπο αυτό βρέθηκε ποια είναι η καλύτερη εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της. Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλωματικές προσομοιώσεις, αντί για του κυκλώματος της γεννήτριας όπως αυτή ορίζεται στο Πρότυπο [17] ελαχιστοποιώντας τα εισαγόμενα σφάλματα. Τέλος, έχοντας βρει τη βέλτιστη εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και

χρησιμοποιώντας μεθοδολογία από τη Σύνθεση Δικτύων, προτείνεται ένα κύκλωμα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που παράγει την καθοριζόμενη από το Πρότυπο κυματομορφή, αναιρώντας την υπάρχουσα στη σημερινή μορφή του Προτύπου προαναφερθείσα ασυμφωνία.

4.2 Προσομοιώσεις στο PSpice

4.2.1 Το κύκλωμα της γεννήτριας όπως ορίζεται στο Πρότυπο

Όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε στην §2.2 η κυματομορφή, που ορίζει το ισχύον Πρότυπο για τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αποτελείται από δύο τμήματα: Ένα πρώτο μέγιστο, που ονομάζεται “αρχικό μέγιστο”, προκαλούμενο από την εκφόρτιση του χεριού, όπου υπάρχει ένα μέγιστο ρεύμα, και ένα δεύτερο μέγιστο, που προκαλείται από την εκφόρτιση του σώματος. Προσομοιώσεις, που έγιναν με χρήση του προγράμματος PSpice απέδειξαν ότι η κυματομορφή του ρεύματος, που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.1 του δευτέρου κεφαλαίου για δεδομένα δοκίμια είναι διαφορετική από αυτή, που ορίζει το Πρότυπο. Στο σχήμα 4.1, που ακολουθεί φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης πάνω στα υπό εξέταση δοκίμια για ωμικά ή ωμικά-επαγωγικά φορτία όταν η τάση φόρτισης είναι +2 kV [120].



Σχήμα 4.1: Κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης +2 kV όταν το δοκίμιο είναι: α) Ωμικό και β) Ωμικό-επαγωγικό

Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα οι προσομοιώσεις με τη βοήθεια υπολογιστή, που χρησιμοποιούν ως γεννήτρια το κύκλωμα, που ορίστηκε στο Πρότυπο [17], να εισάγουν σφάλματα στις υπολογιζόμενες τάσεις και ρεύματα. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση αυτού του σφάλματος. Προς επίτευξη αυτού του στόχου υπάρχουν δύο τρόποι. Ο πρώτος περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση μιας πηγής ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, στην οποία η παραγόμενη κυματομορφή

του ρεύματος είναι συνάρτηση ενός πλήθους παραμέτρων, ενώ ο δεύτερος είναι η δημιουργία ενός νέου κυκλώματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιλέχθηκε αρχικά ο πρώτος τρόπος για το σκοπό του οποίου αναπτύχθηκε κατάλληλος γενετικός αλγόριθμος. Αναλυτικά αυτός παρουσιάζεται στην §4.3.2 του παρόντος κεφαλαίου. Κατόπιν αφού βρέθηκε η βέλτιστη εξίσωση από αυτή βρέθηκε το βέλτιστο κύκλωμα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο §4.4 του παρόντος κεφαλαίου.

4.2.2 Μια καλύτερη κυκλωματική προσέγγιση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

4.2.2.1 Υπολογισμός των στοιχείων του κυκλώματος

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα κυκλώματα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων [90]. Η τιμή της επαγωγής του καλωδίου γείωσης επηρεάζει κυρίως την απόκριση του κυκλώματος. Για καλώδιο μήκους l και επιτρεπτότητας μ , με πλάτος w και πυκνότητα t προτείνεται ο ακόλουθος τύπος για την επαγωγή L_r [90]:

$$L_r = 0,002 \left[\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + 0.25049 + \frac{w+t}{3l} + \frac{\mu T(x)}{4} \right] \quad (4.1)$$

όπου $T(x)$ είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από τη συχνότητα και στην περίπτωση των υψηλών συχνοτήτων είναι $T(x)=0$.

Κατά τη σχεδίαση ενός κυκλώματος υψηλών συχνοτήτων υπάρχει δυσκολία στον απευθείας υπολογισμό της επαγωγής της γραμμής λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής της φόρτισης στη γραμμή. Στην πράξη, η τιμή της επαγωγής του καλωδίου δεν επηρεάζεται από το είδος της διατομής του καλωδίου [90]. Έτσι, μελετάται ένα καλώδιο κυκλικής διατομής. Θεωρώντας έναν ευθύγραμμο αγωγό μήκους l με κυκλική διατομή ακτίνας a , η αυτεπαγωγή L_s δίνεται από το άθροισμα της εσωτερικής επαγωγής L_{si} του αγωγού και της εξωτερικής επαγωγής L_{se} :

$$L_s = L_{si} + L_{se} \quad (4.2)$$

$$L_{si} = \frac{\mu_0 l}{8\pi} \quad (4.3)$$

$$L_{se} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{1 + \sqrt{a^2 + l^2}}{a} - \sqrt{a^2 + l^2} + a \right) \quad (4.4)$$

Η εξίσωση (4.4) δίνει μόνο τη συμβολή του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον αγωγό και δεν λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση άλλων αγωγών. Η δοκιμή για τον έλεγχο της ατρωσίας ενός εξοπλισμού σε ρεύματα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης γίνεται μέσα σε ανηχικό θάλαμο και ο εξοπλισμός τοποθετείται πάνω σε αγώγιμη πλάκα. Εφόσον το ρεύμα ρέει πάνω στο αγώγιμο δάπεδο εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου του καλωδίου γείωσης, η αλληλεπαγωγή δεν μπορεί να αμεληθεί. Αν υποθεθεί ότι η απόσταση μεταξύ του δαπέδου και του κέντρου του αγωγού είναι h με $h \ll l$, η επαγωγή L_{sm} του καλωδίου γείωσης είναι:

$$L_{sm} = L_{smi} + L_{sme} \quad (4.5)$$

$$L_{smi} = \frac{\mu_0 l}{8\pi} \quad (4.6)$$

$$L_{sme} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2h - a}{a} \quad (4.7)$$

Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού είναι μηδενικό και οι επαγωγές L_{si} και L_{smi} των εξισώσεων (4.3) και (4.6) μπορούν να αγνοηθούν.

Στην εξίσωση (4.5) γίνεται η υπόθεση ότι το καλώδιο γείωσης είναι τοποθετημένο πάνω από την αγώγιμη επιφάνεια. Τότε δημιουργείται μία γραμμή μεταφοράς, που έχει ως δρόμο επιστροφής το έδαφος. Παρόλο που το καλώδιο γείωσης έχει μονωτικό περίβλημα, που είναι κάποιο διηλεκτρικό, το στρώμα αυτό είναι λεπτό και δεν επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά του συνολικού συστήματος [90]. Συνεπώς, το διηλεκτρικό υλικό μπορεί να αγνοηθεί. Τότε η γραμμή μεταφοράς ικανοποιεί τις (4.5) και (4.7). Η χαρακτηριστική αντίσταση Z_m δίνεται από τον τύπο:

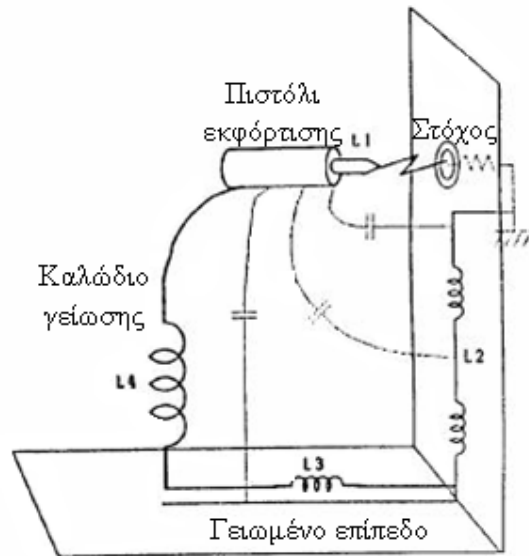
$$Z_m = 59.952 \ln \left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right) \quad (4.8)$$

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως και η χωρητικότητα C_m προς τη γη μπορούν να αναπαρασταθούν με μία μεταλλική σφαίρα ακτίνας a . Αν η απόσταση του κέντρου της σφαίρας από το δάπεδο είναι h , η χωρητικότητα μπορεί να υπολογισθεί θεωρώντας το είδωλό της. Η έκφραση που προκύπτει είναι μία σειρά από την οποία αγνοώντας τους όρους μεγαλύτερης τάξεως προκύπτει ο ακόλουθος προσεγγιστικός τύπος:

$$C_m = \frac{8\pi\epsilon_0 ah}{2h - a} \quad (4.9)$$

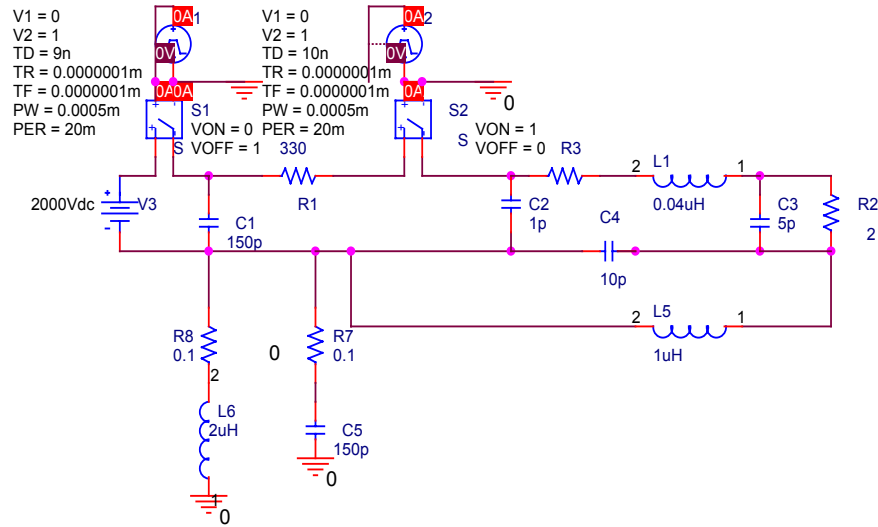
4.2.2.2 Μοντέλα γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για αριθμητική ανάλυση

Η κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος περιπλέκεται, λόγω των παράσιτων στοιχείων στον πειραματικό χώρο. Για την ύπαρξη κατανεμημένων χωρητικότητας, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα, γίνεται αναφορά στο Πρότυπο [17], αλλά δεν φαίνονται στο κύκλωμα. Εάν δεν υπάρχει η κατανεμημένη χωρητικότητα, δεν παράγεται το αρχικό μέγιστο. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.2, η κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος περιπλέκεται, λόγω των παράσιτων στοιχείων στον πειραματικό χώρο.



Σχήμα 4.2: Στοιχεία περιβάλλοντος δοκιμής [90]

Κατ' αρχάς, καθορίζονται οι τιμές των σταθερών του κυκλώματος. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το πρώτο κυκλωματικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για την ανάλυση. Οι σταθερές του κυκλώματος ερμηνεύονται ως εξής: οι R_1 , R_2 και C_1 καθορίζονται από το Πρότυπο. Για τον προσδιορισμό των υπόλοιπων κυκλωματικών στοιχείων θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και τα παράσιτα στοιχεία.



Σχήμα 4.3: Κυκλωματικό μοντέλο 1

Η τιμή της επαγωγής θα πρέπει να καθορισθεί ανεξάρτητα, αφού δεν υπάρχουν περιορισμοί. Το μήκος του ηλεκτροδίου του πιστολιού εκφόρτισης έχει καθοριστεί να είναι 50 mm και η ακτίνα 6 mm. Τότε, η εξίσωση (4.4) εφαρμόζεται με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο μέσα στο αγωγό. Αντικαθιστώντας $l=50$ mm και $a=6$ mm προκύπτει $L_1=0,0193$ μH . Στην πράξη το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης και η αντίσταση εκφόρτισης συνδέονται με κοινό καλώδιο. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και την επαγωγή του καλωδίου, η τιμή της L_1 λαμβάνεται ίση με 0,04 μH . Η επαγωγή της επιφάνειας του αγωγίμου στόχου L_2 είναι επαρκώς μικρή και μπορεί να αγνοηθεί συγκρινόμενη με την επαγωγή του καλωδίου γείωσης, εφόσον αυτό έχει μήκος 1 m και η επιφάνεια είναι επαρκώς μεγάλη.

Υποθέτουμε ότι το καλώδιο γείωσης έχει διάμετρο 10 mm. Αντικαθιστώντας στην (4.8) $a=5$ mm και $h=6,84$ mm προκύπτει $Z_m=50$ Ω . Αφαιρώντας την ακτίνα a του αγωγού το καλώδιο γείωσης βρίσκεται πάνω από την αγωγίμη επιφάνεια κατά 1,84mm. Αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί σε γραμμή μεταφοράς με αντίσταση 50 Ω , σύμφωνης με την πραγματική κατάσταση, αν λάβουμε υπ' όψιν και τη μονωτική επιφάνεια. Όταν το καλώδιο είναι πιο κοντά, αλλά εξακολουθεί να θεωρείται γραμμή μεταφοράς 50 Ω , η αυτεπαγωγή μειώνεται λιγότερο ή περισσότερο αναλόγως με το κενό που υπάρχει μεταξύ τους. Μέσα στον αγωγό γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Εφαρμόζοντας την (4.7) και αντικαθιστώντας $h=6,84$ mm, $l=1$ m προκύπτει ότι η L_3 της αγωγίμης πλάκας ισούται με 0,11 μH .

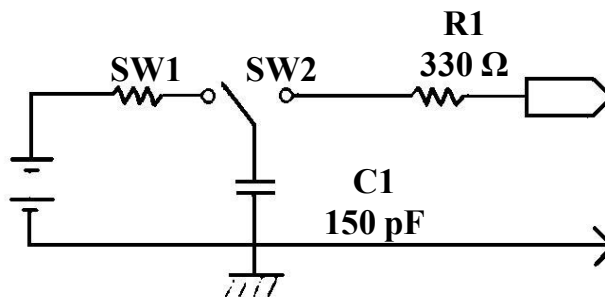
Η εξίσωση (4.7) δεν ισχύει για τον υπολογισμό της L_4 εφόσον το καλώδιο γείωσης βρίσκεται μακρύτερα από 30 cm από τη μεταλλική πλάκα στην πλευρά του στόχου.

Εφαρμόζοντας την (4.4) και αντικαθιστώντας $l=1$ m προκύπτει $L_4=0,861$ μH . Οι επαγωγές L_3 και L_4 διαφέρουν κατά ένα συντελεστή μεγαλύτερο του 8, παρόλο που έχουν τα ίδια μήκη. Αυτό συμβαίνει διότι οι αποστάσεις από τη μεταλλική πλάκα είναι διαφορετικές. Η R_2 είναι η αντίσταση του στόχου. Η επαγωγή L_5 του καλωδίου γείωσης ισούται με το άθροισμα των L_2 , L_3 και L_4 , οπότε προκύπτει $L_5=1$ μH .

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του καλωδίου με τη γη εφαρμόζεται η εξίσωση (4.9). Για $a=3$ cm και $h=20$ cm από το δάπεδο προκύπτει ότι $C_m=3,6$ pF. Στην πράξη το πιστόλι το κρατά άνθρωπος που έχει χωρητικότητα $C_5=150$ pF. Κατά συνέπεια δεν αρκεί η αντικατάσταση της χωρητικότητας του στόχου μόνο από την C_m . Έτσι λοιπόν τίθεται $C_4=10$ pF, συμπεριλαμβανομένης και της χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος.

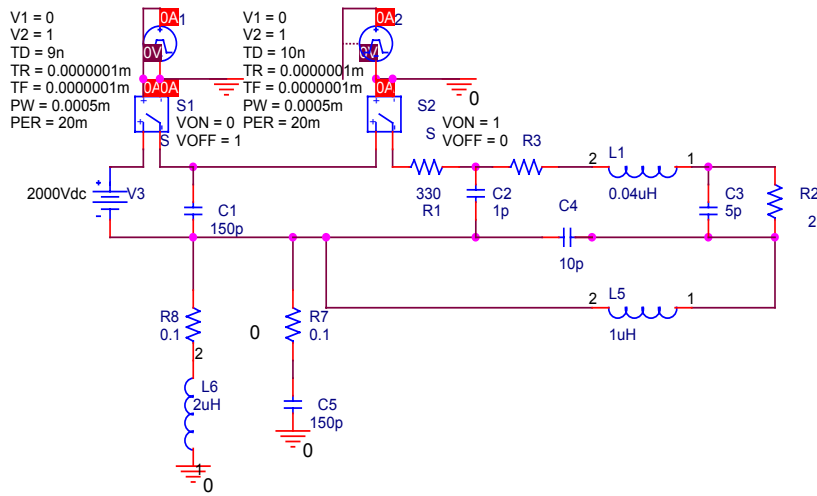
Η τάση V_3 είναι η τροφοδοσία για τη φόρτιση του πυκνωτή C_1 . Ο διακόπτης SW_1 είναι ο διακόπτης για τη φόρτιση που είναι κλειστός για τα πρώτα 9 ns και μετά ανοίγει, ενώ ο διακόπτης SW_2 είναι ο διακόπτης εκφόρτισης, που είναι ανοικτός για τα πρώτα 10 ns και μετά κλείνει. Ο πυκνωτής C_2 αντιπροσωπεύει την παράσιτη χωρητικότητα γύρω από την αντίσταση R_1 , η οποία αντιστοιχεί στην επιφανειακή αντίσταση. Ο πυκνωτής C_3 προσομοιώνει την παράσιτη χωρητικότητα γύρω από αισθητήρα του ρεύματος εκφόρτισης. Η L_6 είναι η επαγωγή του εξωτερικού του καλωδίου γείωσης που συνδέει την τροφοδοσία με το πιστόλι. Τέλος, οι R_7 και R_8 είναι μη πραγματικές αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για την αποτροπή ταλαντώσεων.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.1 ο διακόπτης φόρτισης και ο διακόπτης εκφόρτισης είναι συνδεδεμένοι ξεχωριστά. Θα πρέπει να γίνεται σωστός χειρισμός τους έτσι ώστε να μην είναι και οι δύο ανοικτοί ή κλειστοί ταυτόχρονα. Για να ξεπερασθεί αυτό το πρόβλημα προχωρούμε σε ανασχεδίαση του διακόπτη όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Κυκλωματικό διάγραμμα πραγματικού κυκλώματος φόρτισης

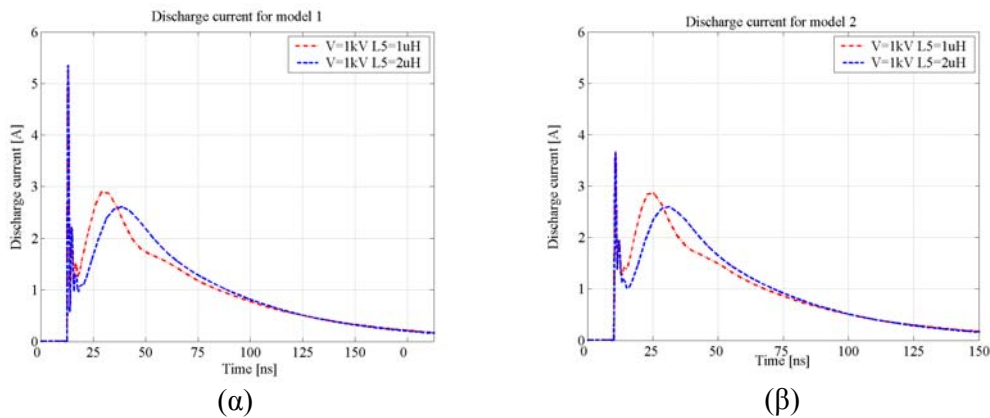
Στο σχήμα 4.5, που μοντελοποιείται το κύκλωμα του σχήματος 4.4, ο διακόπτης SW₂ έχει μεταφερθεί αριστερά του πυκνωτή C₂ και της αντίστασης R₁. Οι σταθερές του κυκλώματος παραμένουν ίδιες.



Σχήμα 4.5: Κυκλωματικό μοντέλο 2

4.2.2.3 Επίδραση του καλωδίου γείωσης στην κυματομορφή του ρεύματος

Η επαγωγή του καλωδίου γείωσης εξαρτάται από τη σχετική θέση του καλωδίου γείωσης ως προς τη γειωμένη πλάκα. Το καλώδιο γείωσης είναι παράλληλο προς την γειωμένη πλάκα και υπολογίστηκε $L_5=1 \mu\text{H}$. Όταν το καλώδιο γείωσης είναι απομακρυσμένο από τη γειωμένη πλάκα ή δεν υπάρχει γειωμένη πλάκα κατά τη δοκιμή τότε $L_3=L_4$ και συνεπώς $L_5=2 \mu\text{H}$. Στο σχήμα 4.6 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για $L_5=1 \mu\text{H}$ και $L_5=2 \mu\text{H}$, για τάσεις φόρτισης +1 kV και για τα δύο κυκλωματικά μοντέλα.



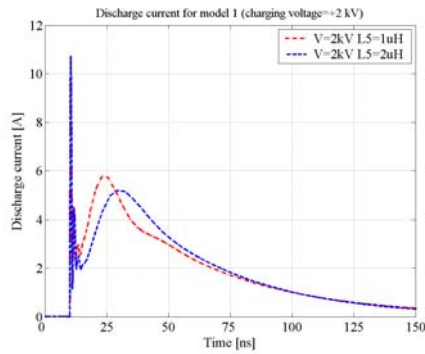
Σχήμα 4.6: Αποκρίσεις κυκλωματικών μοντέλων: α) Μοντέλο 1 και β) Μοντέλο 2

Από τα σχήματα 4.6.α και 4.6.β παρατηρούμε σε καθένα από αυτά ότι η θέση του καλωδίου γείωσης στις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων επηρεάζει την κυματομορφή του ρεύματος. Αν το καλώδιο γείωσης είναι απομακρυσμένο από τη μεταλλική πλάκα ($L_5=1 \mu\text{H}$), τότε το δεύτερο μέγιστο συμβαίνει γρηγορότερα σε σχέση με όταν το καλώδιο γείωσης ήταν παράλληλο προς τη γειωμένη πλάκα (οπότε $L_5=2 \mu\text{H}$). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η θέση του καλωδίου γείωσης επηρεάζει κατά πολύ την παράμετρο I_{60} , η οποία υπολογίζεται κατά τη διακρίβωση των γεννητριών. Γι' αυτό άλλωστε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων καταβλήθηκε προσπάθεια, ώστε το καλώδιο γείωσης να είναι όσο το δυνατόν πιο ανοικτό, χωρίς να καμπυλώνεται, ώστε οι μετρήσεις να είναι επαναλήψιμες.

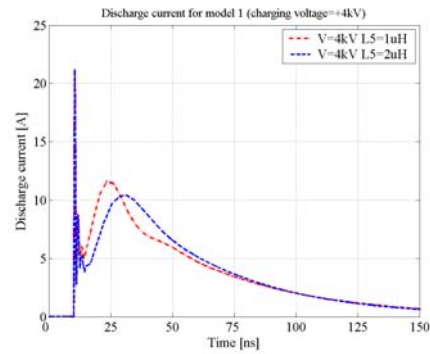
Συγκρίνοντας τα σχήματα 4.6.α και 4.6.β παρατηρούμε ότι η αλλαγή στο μηχανισμό του διακόπτη επηρέασε το I_{max} και μάλιστα η τιμή του μειώθηκε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παράσιτη χωρητικότητα C_2 άλλαξε από πηγή σε φορτίο, λόγω της μετατόπισης του διακόπτη εκφόρτισης. Γι' αυτόν τον λόγο είναι σημαντικό να καθορίζονται οι συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η δοκιμή ώστε να ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η τιμή της C_2 να παραμένει σταθερή. Επίσης παρατηρείται ότι η τιμή του I_{max} , που προκύπτει από το κύκλωμα του σχήματος 4.3 είναι πολύ μεγάλη. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με την αύξηση της επαγωγής L_1 που επηρεάζεται από το μήκος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης.

4.2.2.4 Σύγκριση των δύο κυκλωμάτων της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Με τη βοήθεια του προγράμματος PSpice υλοποιήθηκαν τα δύο κυκλώματα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τιμές τάσεων φόρτισης +2 kV και +4 kV, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.7 και 4.8. Βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι δυνατός ο έλεγχος της ικανοποίησης των κριτηρίων των προδιαγραφών από τις παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπως αυτές καταγράφονται στον πίνακα 2.1.



(α)



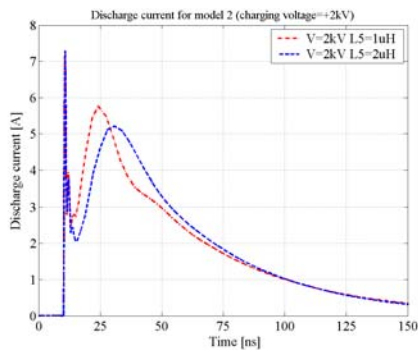
(β)

Σχήμα 4.7: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1 για τάση φόρτισης: α) +2kV και β) +4 kV

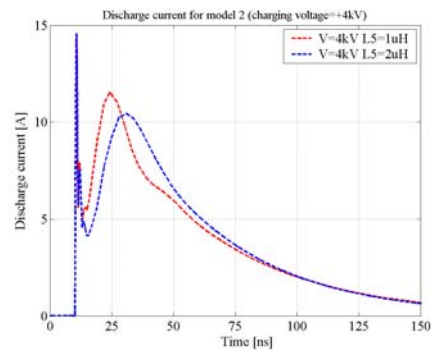
Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα 4.1 και συγκρίνοντάς τες με τα όρια του πίνακα 2.1 συμπεραίνουμε ότι δεν ικανοποιούνται τα όρια των προδιαγραφών.

Τάση [kV]	L_5 [μH]	I_{max} [A]	t_r [ns]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
2	1	10,7169	0,2606	3,4905	1,9091
	2	10,7119	0,2649	4,3440	2,0509
4	1	21,2085	0,2345	6,9480	3,8191
	2	21,1081	0,2372	8,7048	4,1010

Πίνακας 4.1: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 1



(α)



(β)

Σχήμα 4.8: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 2 για τάση φόρτισης: α) +2kV και β) +4 kV

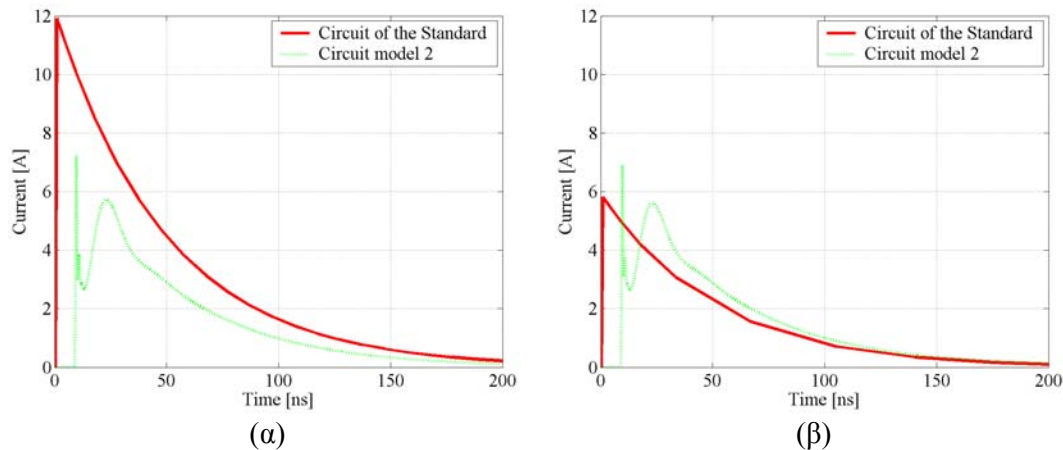
Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα 4.2 παρατηρούμε ότι ικανοποιούνται οι προδιαγραφές και συνεπώς το κύκλωμα του σχήματος 4.4 δίνει ικανοποιητικές κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Τάση [kV]	L_5 [μH]	I_{max} [A]	t_r [ns]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
2	1	7,2450	0,3793	3,4806	1,9065
	2	7,2815	0,3956	4,3675	2,0486
4	1	14,4900	0,3793	6,9613	3,8131
	2	14,5630	0,3921	8,7342	4,0968

Πίνακας 4.2: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 2

4.2.2.5 Δοκιμές και συγκρίσεις του κυκλώματος του μοντέλου 1 για διαφορετικά δοκίμια

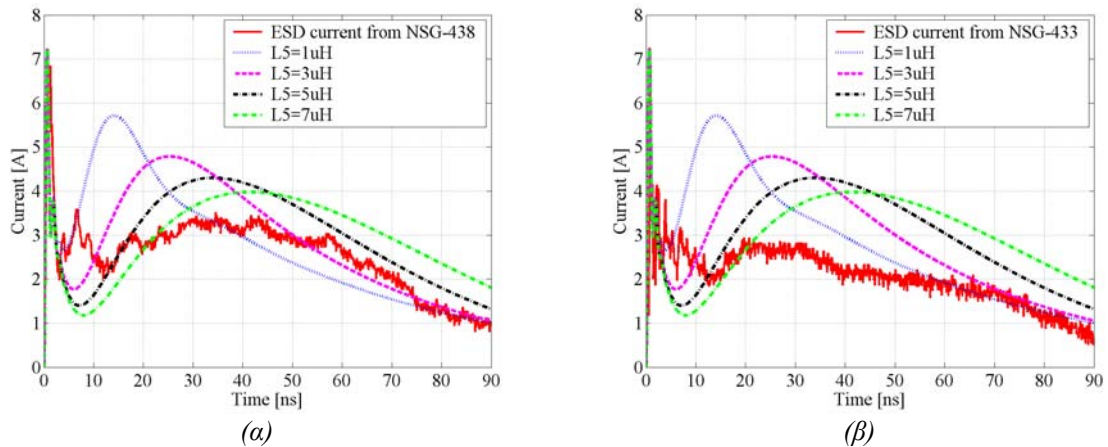
Για το κύκλωμα του σχήματος 4.5, που προσομοιώνει τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, και για τιμή $L_5=1$ μH και τάση φόρτισης +2 kV, αντικαταστάθηκε ο στόχος των 2 Ω με ωμικό δοκίμιο μεγαλύτερης τιμής αντίστασης ίσης προς 10 Ω , προκειμένου οι κυματομορφές του ρεύματος επί αυτών των δοκιμίων να αντιπαραβληθούν με τις αντίστοιχες, που παίρνουμε από το κύκλωμα, που προτείνει το υπάρχον Πρότυπο [17] και όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.1 της παρούσας διατριβής. Οι συγκρίσεις αυτές φαίνονται στο σχήμα 4.9, που ακολουθεί. Μπορούμε να παρατηρήσουμε την απόκλιση, που υπάρχει μεταξύ της κυματομορφής, που προκύπτει για το κύκλωμα της γεννήτριας, που ορίζει το υπάρχον Πρότυπο και αυτής, που προκύπτει για το κύκλωμα του μοντέλου 2. Παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις ότι όσο αυξάνεται η τιμή του ωμικού δοκιμίου η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης μειώνεται και για τα δύο κυκλωματικά μοντέλα. Επίσης, φαίνεται ότι για την ίδια τάση φόρτισης των +2 kV και για την περίπτωση των 2 Ω η ενέργεια του ρεύματος για το κύκλωμα που προτείνει το υπάρχον Πρότυπο είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενέργεια του παλμού του κυκλώματος 2.



Σχήμα 4.9: Σύγκριση των κυματομορφών του ρεύματος για το κύκλωμα που προτείνει το υπάρχον Πρότυπο και το μοντέλο 2 για ωμικό δοκίμιο: α) 2 Ω και β) 10 Ω

Στο σχήμα 4.10, που ακολουθεί, γίνεται σύγκριση της κυματομορφής του ρεύματος για διάφορες τιμές της παραμέτρου L_5 του κυκλωματικού μοντέλου 2 και ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο έχει μετρηθεί εργαστηριακά για τάση φόρτισης των δύο γεννητριών (NSG-433 και NSG-438) τα +2 kV και οι οποίες είναι εντός των ορίων, όπως αυτά ορίζονται για τις τέσσερις παραμέτρους του ρεύματος

και παρουσιάστηκαν στην §2.2. Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου L_5 η τιμή του δεύτερου μεγίστου της κυματομορφής ελαττώνεται και παράλληλα μετατοπίζεται χρονικά σε μεγαλύτερους χρόνους. Συγκρινόμενες οι τέσσερις αυτές καμπύλες με τις πειραματικές καμπύλες του ρεύματος εκφόρτισης, παρατηρείται ότι η προσέγγιση του μεγίστου ρεύματος είναι απόλυτα ικανοποιητική, ενώ κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται για το δεύτερο μέγιστο και κατ' επέκταση για την προσέγγιση της παραμέτρου I_{60} . Καμιά από τις τέσσερις δεν την προσεγγίζει ικανοποιητικά παρ' ότι η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης είναι εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο [17]. Παρατηρούμε επίσης ότι για τα δύο πειραματικά ρεύματα από τις δύο γεννήτριες υπάρχουν διαφορές γεγονός, που προέρχεται από την ανοχή που δείχνουν τα όρια για τις τέσσερις παραμέτρους (I_{max} , t_r , I_{30} , I_{60}), όπου στην περίπτωση των I_{30} και I_{60} φτάνει το $\pm 30\%$.



Σχήμα 4.10: Σύγκριση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης όπως μετρήθηκε πειραματικά και της κυματομορφής που δίνει το μοντέλο 2 για διάφορες τιμές της παραμέτρου L_5 : α) Για τη γεννήτρια NSG-433 και β) Για τη γεννήτρια NSG-438

4.2.3 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα πιο σημαντικά συμπεράσματα, που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με χρήση του προγράμματος Pspice. Κατ' αρχάς αποδείχθηκε ότι το υπάρχον κύκλωμα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτό ορίζεται από το υπάρχον Πρότυπο [17] και έχει παρουσιαστεί στο σχήμα 2.1, δεν παράγει την κυματομορφή του ρεύματος, που ορίζει το ίδιο Πρότυπο. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε λάθη στις υπολογιζόμενες τάσεις και ρεύματα στην περίπτωση, που κάποιος θα προσπαθήσει να κάνει κυκλωματικές προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας το κύκλωμα αυτό. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό θα πρέπει είτε να βρεθεί μια εξίσωση, η οποία να μπορεί να

περιγράψει επακριβώς την κυματομορφή του ρεύματος, που παράγεται κατά τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, είτε να προταθεί καινούργιο κύκλωμα. Στην παρούσα διατριβή ακολουθήθηκαν και οι δύο αυτοί τρόποι. Προκειμένου να βρεθεί μια εξίσωση που θα μπορεί να περιγράψει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος βελτιστοποιεί τις παραμέτρους υποψηφίων εξισώσεων. Κατόπιν κάνοντας χρήση της εξίσωσης αυτής οδηγήσαμε στην κατασκευή του κυκλώματος, που δίνει τη ζητούμενη κυματομορφή του ρεύματος.

Από τις προσομοιώσεις για τα δύο διαφορετικά κυκλωματικά μοντέλα των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την μοντελοποίηση του διακόπτη στις γεννήτριες, αφού αλλαγή στη σχεδίασή του σύμφωνα με το σχήμα 4.3 μειώνει την τιμή του I_{max} . Επίσης, κυκλωματικές προσομοιώσεις για τα δύο μοντέλα των γεννητριών απέδειξε ότι η θέση του καλωδίου γείωσης επηρεάζει κατά πολύ την παράμετρο I_{60} , η οποία υπολογίζεται κατά τη διακρίβωση των γεννητριών. Πρέπει να τονιστεί ότι η παράμετρος I_{60} επηρεάζεται από τους ίδιους λόγους και πειραματικά, δηλαδή από τη θέση και το σχήμα του καλωδίου γείωσης, όπως άλλωστε αναφέρθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

4.3 Προσδιορισμός παραμέτρων της εξίσωσης του ρεύματος εκφόρτισης γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων.

Όπως διαπιστώθηκε στην παράγραφο 4.2.1 του παρόντος κεφαλαίου η κυματομορφή, που ορίζει το Πρότυπο για το ρεύμα από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι διαφορετικό από αυτό που δίνει η προσομοίωση του κυκλώματος της γεννήτριας. Αυτό σημαίνει ότι σε τυχόν προσομοιώσεις στις οποίες γίνεται χρήση του κυκλώματος αυτού υπεισέρχεται σφάλμα, το οποίο οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα θα πρέπει ή να προταθεί ένα καινούργιο κύκλωμα, πιθανώς μέσω μιας τεχνικής βελτιστοποίησης των ηλεκτρικών στοιχείων του κυκλώματος, το οποίο θα δίνει την κυματομορφή, που ορίζει το Πρότυπο ή να βρεθεί μια αναλυτική εξίσωση, η οποία θα περιγράφει με σαφήνεια την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης.

4.3.1 Εξισώσεις του ρεύματος εκφόρτισης

Μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα πρέπει να εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το Πρότυπο καθορίζει τις τιμές των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην §2.2. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση [121], που δεν αντιστοιχεί στο ρεύμα εκφόρτισης, αλλά θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση στην εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, είναι η εξίσωση του κεραυνικού ρεύματος που δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$i(t) = i_0 \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right) \quad (4.10)$$

Η διπλοεκθετική συνάρτηση έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε μια προσπάθεια να περιγραφεί το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ευρέως χρησιμοποιούμενες στο εμπόριο [65]:

$$i(t) = i_1 \cdot e^{-\frac{t}{t_1}} - i_2 \cdot e^{-\frac{t}{t_2}} \quad (4.11)$$

Μια άλλη εξίσωση, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για την περιγραφή του ρεύματος του προερχόμενου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι η ακόλουθη συνάρτηση [24]:

$$i(t) = A \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2} - B \cdot t \cdot e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2} \quad (4.12)$$

Η κυματομορφή που δίνει η εξίσωση (4.12) μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα δύο κανονικών κατανομών στο πεδίο του χρόνου, μίας στενής και μίας ευρείας. Η εξίσωση (4.12) είναι πιο κοντά σε αυτή εφόσον οι παράγοντες $A \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2}$ και $B \cdot t \cdot e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2}$ αντιπροσωπεύουν μια στενή και μια πιο ευρεία κανονική κατανομή αντίστοιχα.

Μια άλλη εξίσωση, η οποία είχε προταθεί από τον Heidler για το κεραυνικό ρεύμα [23] και κατόπιν υιοθετήθηκε και από τον Pommerenke [22] για το ρεύμα από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_4}} \quad (4.13)$$

$$\text{όπου } k_1 = e^{-\frac{\tau_1 \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}}{\tau_2}} \quad (4.14)$$

$$\text{και } k_2 = e^{-\frac{\tau_3 \left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}}{\tau_4}} \quad (4.15)$$

i_1, i_2 είναι τα ρεύματα σε Amperes, $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ είναι χρονικές σταθερές σε ns και το n καθορίζει πόσες φορές μπορεί να παραγωγισθεί προς το χρόνο.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να εξηγηθεί ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν οι παραπάνω τέσσερις εξισώσεις (4.10-4.13). Είναι γνωστό ότι οι εξισώσεις 4.10 και 4.11 δεν ανταποκρίνονται στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, όπως αυτή προδιαγράφεται στο Πρότυπο και παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.2. Παρ' όλα αυτά οι δύο αυτές εξισώσεις χρησιμοποιούνται αφενός για λόγους πληρότητας και για σύγκρισή τους με τις άλλες δύο εξισώσεις. Δεδομένου ότι οι εξισώσεις 4.14 και 4.15 έχουν παρθεί από τη θεωρία για το κεραυνικό ρεύμα θα ήταν παράλειψη να μη γίνει μια σύγκριση και για τις εξισώσεις, που ήδη υπάρχουν για το κεραυνικό ρεύμα. Επίσης, η ενέργεια την οποία περικλείουν οι εξισώσεις 4.10 και 4.11 είναι ίδια με την ενέργεια των άλλων δύο εξισώσεων εφ' όσον έχουν περίπου την ίδια ενέργεια δεδομένου ότι έχουν σχεδόν την ίδια χρονική διάρκεια. Τέλος, οι κυματομορφές των εξισώσεων 4.10 και 4.11 έχουν την ίδια κυματομορφή με αυτή του ρεύματος εκφόρτισης, που παράγεται από το κύκλωμα του υπάρχοντος Προτύπου (σχήμα 4.1). Επομένως, θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο για κάποιον, που κάνει κυκλωματικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το υπάρχον κύκλωμα να γνωρίζει την εξίσωση της κυματομορφής αυτής.

Σκοπός του γενετικού αλγορίθμου, που αναπτύχθηκε ήταν οι άγνωστες παράμετροι των τεσσάρων αυτών εξισώσεων να βελτιστοποιηθούν, ώστε να περιγράψουν αναλυτικά το μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

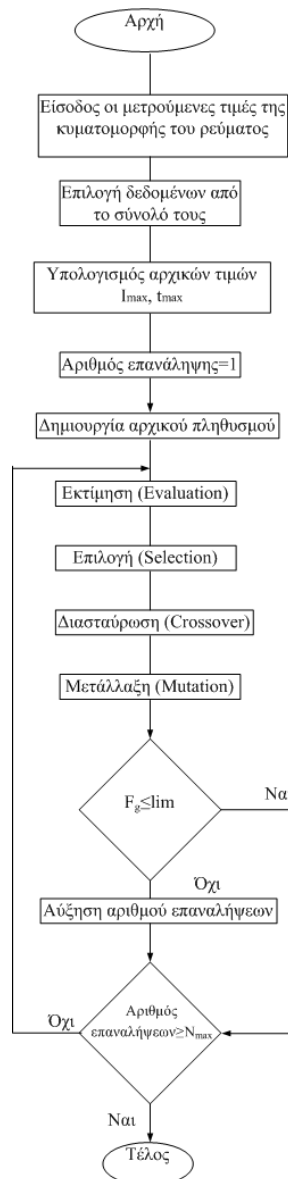
4.3.2 Ο Γενετικός Αλγόριθμος που αναπτύχθηκε

Ένας απλός γενετικός αλγόριθμος βασίζεται στις διαδικασίες της αναπαραγωγής, της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation) για την επίτευξη του ολικού ή μερικώς-ολικού βέλτιστου [122, 123]. Για να ξεκινήσει η έρευνα, ο

γενετικός αλγόριθμος απαιτεί ένα αρχικό σύνολο σημείων P_s , που ονομάζονται πληθυσμός, κατ' αναλογία με τα βιολογικά συστήματα. Μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιουργεί τον αρχικό πληθυσμό. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν είναι κρίσιμος, καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών. Όμως, αν υπάρχει γνώση για το σύστημα, η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό. Το αρχικό σύνολο μετατρέπεται σε δυαδικό σύστημα και θεωρείται ως χρωμοσώματα, δηλαδή ακολουθίες από 0 και 1. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία $P_s/2$ ζευγών από αυτά τα μέλη του πληθυσμού, που θα θεωρούνται ως γονείς για την αναπαραγωγή. Οι γονείς αναπαράγονται και ανταλλάσσουν N_p τμήματα του γενετικού τους υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διασταύρωση. Η διασταύρωση χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δύο νέων παιδιών από δύο υπάρχοντες γονείς, που λαμβάνονται από τον τρέχοντα πληθυσμό. Μετά τη διασταύρωση υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα μετάλλαξης, P_m . Η μετάλλαξη είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο επιλέγεται με τυχαίο τρόπο κάποια από τις θέσεις του χρωμοσώματος και το περιεχόμενό του μεταλλάσσεται (δηλαδή αν περιέχει '0' γίνεται '1' ή το '1' γίνεται '0'). Η μετάλλαξη είναι απαραίτητη, καθώς αν και η αναπαραγωγή και η διασταύρωση αναζητούν και αναμειγνύουν αποδοτικά τους συνυπάρχοντες απογόνους, υπάρχει περίπτωση να εγκλωβιστεί η λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο της συνάρτησης. Η μετάλλαξη περιστασιακά μπορεί να προκαλέσει απώλεια μερικού εν δυνάμει χρήσιμου γενετικού υλικού, συνολικά όμως βοηθάει στην καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση. Υποθέτουμε ότι κάθε ζεύγος γονιών δίνει N_c παιδιά. Μετά την αναπαραγωγή το πλήθος των γονέων έχει εμπλουτιστεί με τα 'παιδιά'. Έτσι αυξάνεται ο αρχικός πληθυσμός αφού προστίθενται νέα μέλη. Οι γονείς πάντα θεωρούνται μέρος τους θεωρούμενου πληθυσμού (ευγονισμός), για να μην χάνεται η προηγούμενη πληροφορία. Ο νέος πληθυσμός αποτελείται τώρα από $P_s + N_c \cdot P_s/2$ μέλη. Ακολουθώς εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής. Σύμφωνα με αυτήν τη διαδικασία μόνο P_s μέλη επιβιώνουν από τα $P_s + N_c \cdot P_s/2$. Αυτά τα P_s μέλη επιλέγονται ως εκείνα που έχουν τις χαμηλότερες τιμές F_g , εφόσον επιλύεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Το F_g αντιπροσωπεύει το σφάλμα μεταξύ των αρχικών δεδομένων και των βελτιστοποιημένων δεδομένων. Με τις παραπάνω δημιουργείται η επόμενη γενιά με έναν νέο πληθυσμό.

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

Ο γενετικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του Matlab. Ο ίδιος γενετικός αλγόριθμος παράγει εξαιρετικά αποτελέσματα σε αρκετά προβλήματα βελτιστοποίησης [124]. Έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής εδάφους [125], την παραγοντοποίηση πολυδιάστατων πολωνύμων [126] και για τον υπολογισμό των παραμέτρων δημιουργούμενου τόξου σε ακάθαρτων μονωτήρων [127]. Η λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου, που έχει αναπτυχθεί, περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροής του Γενετικού Αλγορίθμου

4.3.3 Απόδειξη της αποτελεσματικότητας του γενετικού αλγορίθμου

Το σημαντικότερο βήμα για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου είναι η επιβεβαίωση της αποτελεσματικής λειτουργίας του. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.10)-(4.15) παρήχθησαν δεδομένα, τα οποία θεωρούμε σαν δεδομένα ελέγχου, αποτελούμενα από 30 ζεύγη τιμών - δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα ήταν η είσοδος του γενετικού αλγορίθμου, ώστε να υπολογισθούν οι παράμετροι για τις 4 εξισώσεις. Για κάθε εξίσωση αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε Matlab που παρήγαγε το γράφημα της εξίσωσης και επιπλέον έσωζε τα δεδομένα (ρεύμα και χρόνος) σε αρχεία txt. Οι θεωρητικές τιμές παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη των πινάκων 4.3-4.6. Στο

σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα 30 χρονικά σημεία. Η επιλογή αυτών των σημείων είναι κοινή και για τις 4 γραφικές παραστάσεις και έχουν επιλεγθεί για χρόνους 0,1, 0,3, 0,5, 1, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 7, 7,5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 27, 30, 35, 45, 60, 70 ns.

Ο γενετικός αλγόριθμος έχει εφαρμοστεί σε έναν τυχαία παραγόμενο πληθυσμό P_s χρωμοσωμάτων ($P_s=20-100$). Κάθε παράμετρος διαιρείται σε έναν 20bit δυαδικό αριθμό. Κάθε χρωμόσωμα έχει m μεταβλητές ($m=3$ ή 4 ή 6 ή 7 για τις εξισώσεις (4.10), (4.11), (4.12), (4.13) αντίστοιχα, έτσι 60 ή 80 ή 120 ή 140 bits απαιτούνται για κάθε χρωμόσωμα. Κάθε ζεύγος γονέων που διασταυρώνεται παράγει $N_c=4$ παιδιά. Η διασταύρωση ξεκινά καθώς κάθε χρωμόσωμα από κάθε γονέα διαιρείται σε $N_p=6$ τμήματα, το ζεύγος των γονέων ανταλλάσσει γενετικό υλικό. Μετά τη διασταύρωση υπάρχει 5-20% πιθανότητα μετάλλαξης. Η διαδικασία τερματίζεται όταν $N_{max}=100$ γενιές.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων κάθε εξίσωσης επιλέχθηκε η ελαχιστοποίηση της συναρτήσεως F_{g1} (σχετικό σφάλμα):

$$F_{g1} = \sum_{i=1}^N \frac{|I_i^m - I_i^c|}{I_i^m} \quad (4.16)$$

ή της συνάρτησης F_{g2} (απόλυτο σφάλμα):

$$F_{g2} = \sum_{i=1}^N |I_i^m - I_i^c| \quad (4.17)$$

όπου I_i^m είναι η i -οστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης.

Σε αυτήν την παράγραφο το I_i^m είναι η τιμή του ρεύματος που προέκυψε από τις τιμές ελέγχου των παραμέτρων των (4.10)-(4.15), που βρίσκονται στη δεύτερη στήλη των πινάκων 4.3-4.6. Το I_i^c είναι η υπολογιζόμενη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης για τις άγνωστες παραμέτρους των (4.10)-(4.15). Ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει τις άγνωστες παραμέτρους των τεσσάρων αυτών εξισώσεων οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στην τρίτη στήλη των πινάκων 4.3-4.6.

	Τιμή ελέγχου	Γενετικός Αλγόριθμος
$i_0 [A]$	15	14,98
$t_1 [ns]$	50	49,79
$t_2 [ns]$	5	4,98
F_{g1}	-	0,1380

Πίνακας 4.3: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων για την εξίσωση (4.10)

	Τιμή ελέγχου	Γενετικός Αλγόριθμος
$i_1 [A]$	15	14,39
$i_2 [A]$	12	11,39
$t_1 [ns]$	65	69,53
$t_2 [ns]$	10	9,61
F_{gl}	-	0,0989

Πίνακας 4.4: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων για την εξίσωση (4.11)

	Τιμή ελέγχου	Γενετικός Αλγόριθμος
$A [A]$	13	13,07
$B [A]$	0,4	0,40
$t_1 [ns]$	5	5,00
$t_2 [ns]$	10	7,81
$\sigma_1 [ns]$	1,414	1,399
$\sigma_2 [ns]$	35,35	36,799
F_{gl}	-	0,5047

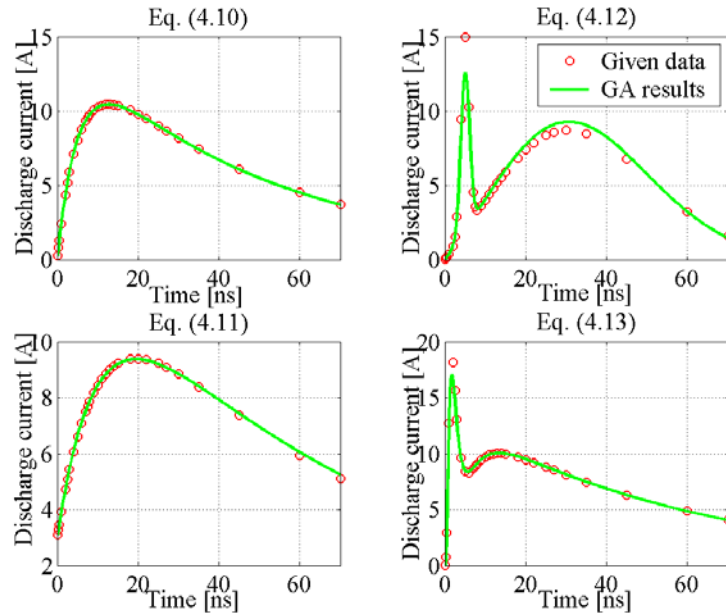
Πίνακας 4.5: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων για την εξίσωση (4.12)

	Τιμή ελέγχου	Γενετικός Αλγόριθμος
$i_1 [A]$	21,9	19,69
$i_2 [A]$	10	10,00
$t_1 [ns]$	1,3	1,32
$t_2 [ns]$	1,7	1,79
$t_3 [ns]$	6	6,05
$t_4 [ns]$	58	56,85
n	3	2,93
F_{gl}	-	0,5628

Πίνακας 4.6: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων για την εξίσωση (4.13)

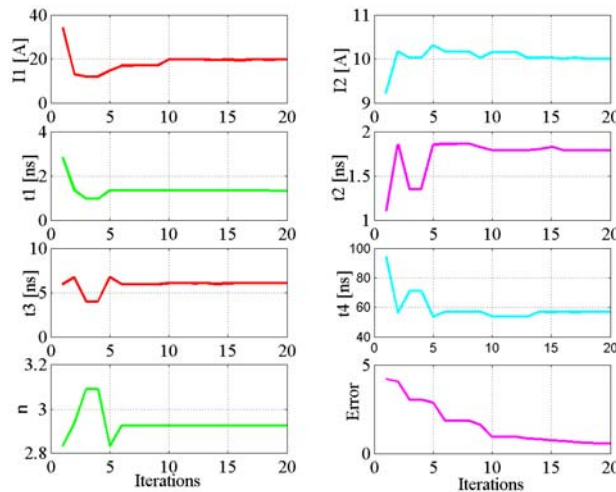
Στο σχήμα 4.12 φαίνονται σε κοινό γράφημα το ρεύμα εκφόρτισης με δεδομένες τιμές παραμέτρων των πινάκων 4.3-4.6 και το ρεύμα εκφόρτισης για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων μετά τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου για τις εξισώσεις (4.10)-(4.15). Είναι προφανές ότι ο γενετικός αλγόριθμος είναι αρκετά αποδοτικός δεδομένου ότι οι δύο γραφικές είναι σχεδόν ταυτόσημες.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου, που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.12, αποδεικνύουν ότι ο γενετικός αλγόριθμος δίνει ακριβή αποτελέσματα και οι βελτιστοποιημένες τιμές των αγνώστων παραμέτρων της εξίσωσης είναι πολύ κοντά στις τιμές ελέγχου.



Σχήμα 4.12: Σύγκριση μεταξύ των βελτιστοποιημένων και των δεδομένων τιμών για το ρεύμα εκφόρτισης για τις εξισώσεις (4.10)-(4.13)

Μετά από μερικές επαναλήψεις οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων συγκλίνουν σε μία οριακή τιμή που βρίσκεται πολύ κοντά στις αληθινές. Στο σχήμα 4.13 φαίνονται οι τιμές των 7 παραμέτρων της (4.13), όταν αυτή χρησιμοποιείται σαν συνάρτηση επαναλήψεων. Το σφάλμα (F_{gl}) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13. Παρατηρούμε ότι για τις περισσότερες τιμές των παραμέτρων ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει μετά από λίγες μόνο επαναλήψεις.



Σχήμα 4.13: Οι βέλτιστες τιμές για τις 7 παραμέτρους της εξίσωσης (4.13)

4.3.4 Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου σε πειραματικά δεδομένα

Όπως είναι προφανές από τα προηγούμενα, ο γενετικός αλγόριθμος είναι αρκετά αποτελεσματικός εφόσον οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίζει έχουν πολύ μικρό σφάλμα σε σχέση με τις πραγματικές τιμές, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά πειραματικά δεδομένα, που συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας τη διάταξη, που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 στο σχήμα 2.3. Δίνοντας ως δεδομένα εισόδου το ρεύμα εκφόρτισης μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει και βελτιστοποιεί τις παραμέτρους των εξισώσεων (4.10)-(4.13) [25-27, 128]. Οι εξισώσεις (4.10) και (4.11) έχουν τρεις και τέσσερις άγνωστες παραμέτρους αντίστοιχα. Η εξίσωση (4.12) έχει 6 άγνωστες παραμέτρους, όπως και η εξίσωση (4.13), θεωρώντας το n σταθερό και ίσο με 3. Από το σφάλμα F_{gl} κάθε εξίσωσης προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την καλύτερη και ακριβέστερη εξίσωση.

Θα πρέπει να γίνει μια προσεκτική επιλογή των δεδομένων που αποθηκεύτηκαν στον παλμογράφο, έτσι ώστε να ληφθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα σε αποδεκτό χρόνο. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η χρήση του γενετικού αλγορίθμου δεν απαιτεί τη χρησιμοποίηση όλων των μετρήσεων. Αυτό θα ήταν όχι μόνο μια χρονοβόρα διαδικασία, αλλά και δεν θα έδινε πιο ακριβείς λύσεις απ' ό,τι αν χρησιμοποιούνταν κατάλληλα επιλεγμένες τιμές των μετρήσεων και εφαρμοζόταν μεγαλύτερος αριθμός γονέων και επαναλήψεων. Για να είναι πιο αποτελεσματικός ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία για την επιλογή των τιμών. Ο συνολικός αριθμός των μετρούμενων τιμών, που φτάνει τα 2250, δεν χρησιμοποιείται. Αντί αυτού χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι δειγματοληψίας, όπως φαίνεται και στους πίνακες 4.7 και 4.8 που ακολουθούν. Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις δειγματοληψίας, όταν ο αριθμός των μετρηθέντων σημείων είναι 2250, ενώ στον πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις δειγματοληψίας, όταν ο αριθμός των μετρηθέντων σημείων είναι 1000 και μάλιστα και για τις τέσσερις συναρτήσεις αυτές ο αριθμός των επιλεγμένων σημείων είναι και 143. Η διαφορά που υπάρχει στον διαφορετικό αριθμό σημείων από 2250 σε 1000 στους πίνακες 4.7 και 4.8, αντίστοιχα οφείλεται στο διαφορετικό ρυθμό δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε στον παλμογράφο για την καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων. Στον πίνακα 4.7 ο αριθμός των επιλεγμένων σημείων διαφέρει για κάθε συνάρτηση δειγματοληψίας και έχει γίνει για τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (30 ns, 50 ns και 90 ns), με σκοπό να εξετασθεί πώς

τροποποιούνται τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για διαφορετικές χρονικές περιόδους της ίδιας μετρηθείσας κυματομορφής ρεύματος.

Όνομα συνάρτησης δειγματοληψίας	Εξίσωση συνάρτησης δειγματοληψίας	Αριθμός επιλεγμένων σημείων για 30 ns	Αριθμός επιλεγμένων σημείων για 50 ns	Αριθμός επιλεγμένων σημείων για 90 ns
exp4	$4(1+\text{round}(\exp(j/N)))^*$	95	144	222
exp6	$6(1+\text{round}(\exp(j/N)))^*$	64	96	148
exp8	$8(1+\text{round}(\exp(j/N)))^*$	48	73	111
Idata10	Σταθερή τιμή ίση με 10	76	126	225
Idata15	Σταθερή τιμή ίση με 15	51	85	150
Idata20	Σταθερή τιμή ίση με 20	39	64	113
exp4N	0-2ns: όλα τα σημεία 2-90ns: τα σημεία από exp4	139	188	266
Idata20N	0-2ns: όλα τα σημεία 2-90ns: τα σημεία από Idata20	87	112	161

Πίνακας 4.7: Επιλογή των σημείων του ρεύματος εκφόρτισης

*j είναι το j-οστό σημείο από τα 2250 σημεία του ρεύματος εκφόρτισης

Όνομα συνάρτησης δειγματοληψίας	Εξίσωση συνάρτησης δειγματοληψίας	Αριθμός επιλεγμένων σημείων για 100 ns
Idata7	Σταθερή τιμή ίση με 7	143
IdataV	Σταθερή τιμή ίση με 1 για 0-4ns Σταθερή τιμή ίση με 2 για 4-7ns Σταθερή τιμή ίση με 4 για 7-17ns Σταθερή τιμή ίση με 13 για 17-100ns	143
Log2	$2(1+\text{round}(\log_{10}(j)))$	143
exp3N	0-5ns: Όλα τα σημεία (51 σημεία) 5-100ns: βήμα= $3(1+\text{round}(\exp(j/N)))$ (92 σημεία)	143

Πίνακας 4.8: Επιλογή των σημείων του ρεύματος εκφόρτισης

*j είναι το j-οστό σημείο από τα 1000 σημεία του ρεύματος εκφόρτισης

4.3.5 Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου

Στους πίνακες 4.9-4.24, που ακολουθούν, παρατίθενται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων και τα σφάλματα των τεσσάρων εξισώσεων για διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας και διαφορετικές χρονικές περιόδους των συναρτήσεων δειγματοληψίας (30 ns, 50 ns, 90 ns), όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.10.

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	2,93	3,05	3,05	3,04	3,04	3,18	3,28	4,41
t_1 [ns]	433,59	190,62	162,50	168,75	161,71	175,80	159,38	42,65
t_2 [ns]	0,07	0,04	0,00	0,06	1,57	0,63	0,20	0,25
F_{gl}	12,66	9,81	7,89	6,54	8,45	6,74	29,87	20,74

Πίνακας 4.9: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 30 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	4,37	4,60	3,65	3,18	3,29	4,13	4,37	4,95
I_2 [A]	2,19	2,85	3,12	2,42	2,80	3,64	2,19	4,52
t_1 [ns]	103,71	103,63	106,05	104,87	97,50	102,11	103,71	35,25
t_2 [ns]	17,49	17,18	5,00	0,16	0,00	9,62	17,49	0,35
F_{gl}	14,81	11,31	7,98	12,26	7,64	7,00	14,81	20,84

Πίνακας 4.10: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 30 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A [A]	2,39	1,86	2,35	1,88	2,42	2,25	2,50	5,32
B [A]	0,17	0,17	0,14	0,14	0,19	0,16	0,16	0,18
t_1 [ns]	5,47	5,18	6,17	5,17	4,99	5,00	2,24	1,46
t_2 [ns]	13,44	3,27	7,21	1,48	3,49	12,91	0,10	3,16
σ_1 [ns]	4,23	5,47	5,02	10,00	3,75	5,42	8,18	1,25
σ_2 [ns]	21,17	39,20	56,08	60,32	32,30	26,70	50,21	37,52
F_{gl}	11,83	6,95	6,29	10,65	6,24	5,28	34,53	19,49

Πίνακας 4.11: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 30 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	3,75	3,28	3,49	4,00	3,56	4,03	5,22	5,37
I_2 [A]	3,05	4,16	3,72	4,22	3,57	4,32	3,49	3,09
t_1 [ns]	0,17	0,28	0,08	0,00	0,42	0,14	0,29	0,30
t_2 [ns]	14,89	17,68	18,46	16,07	17,90	12,80	9,10	8,42
t_3 [ns]	23,72	39,84	42,77	40,18	32,11	39,17	24,12	20,39
t_4 [ns]	69,94	23,05	16,36	25,10	56,26	19,30	50,01	58,75
F_{gl}	9,94	6,46	5,37	4,64	5,90	4,74	21,64	15,57

Πίνακας 4.12: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 30 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	5,43	4,39	5,63	4,22	4,39	4,49	3,24	3,61
t_1 [ns]	87,50	137,51	84,12	146,88	131,53	137,52	287,97	233,48
t_2 [ns]	13,96	12,02	14,79	10,44	11,72	12,50	0,19	0,17
F_{gl}	23,70	15,50	12,25	9,47	13,06	10,02	35,72	24,39

Πίνακας 4.13: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 50 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	13,82	6,03	6,83	5,63	16,04	5,13	5,87	4,47
I_2 [A]	11,75	4,14	5,23	4,37	14,12	4,61	3,56	4,38
t_1 [ns]	77,19	103,75	87,82	91,18	68,99	102,59	99,64	97,44
t_2 [ns]	47,98	28,13	27,19	18,75	45,59	15,17	28,11	0,25
F_{gl}	16,56	12,25	9,77	15,22	10,54	8,15	41,52	25,72

Πίνακας 4.14: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 50 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A [A]	1,83	2,21	2,54	1,87	2,19	2,00	2,54	6,90
B [A]	0,15	0,15	0,17	0,16	0,13	0,16	0,14	0,31
t_1 [ns]	5,25	5,47	5,33	5,82	4,94	5,25	3,15	1,11
t_2 [ns]	0,02	10,66	3,11	9,38	12,31	4,67	3,19	0,12
σ_1 [ns]	6,73	5,17	4,06	5,49	6,88	5,63	8,15	0,78
σ_2 [ns]	51,57	37,49	40,30	36,99	40,18	41,28	51,86	31,19
F_{gl}	13,22	9,36	8,32	13,95	8,19	6,90	38,16	27,41

Πίνακας 4.15: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 50 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	3,77	3,23	3,07	3,27	3,76	4,12	4,92	5,14
I_2 [A]	3,40	2,81	2,97	2,66	3,88	3,16	3,16	3,17
t_1 [ns]	0,26	0,49	0,76	0,19	0,03	0,12	0,24	0,27
t_2 [ns]	13,76	20,14	17,73	24,61	17,95	13,75	9,40	10,65
t_3 [ns]	26,53	24,74	24,09	26,36	38,70	25,02	19,87	22,59
t_4 [ns]	50,23	89,85	79,98	78,59	27,09	66,12	106,56	88,83
F_{gl}	11,44	7,70	6,54	5,10	6,75	5,57	22,79	17,15

Πίνακας 4.16: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 50 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	34,85	34,95	34,74	34,85	30,78	34,93	3,64	4,35
t_1 [ns]	31,95	31,96	31,95	31,96	32,04	30,72	103,13	74,61
t_2 [ns]	24,74	24,74	24,71	24,74	23,91	23,75	0,19	0,25
F_{gl}	36,93	24,80	18,66	14,88	23,79	17,59	61,75	37,55

Πίνακας 4.17: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	8,28	9,88	9,71	8,78	10,08	11,43	6,10	4,69
I_2 [A]	7,19	9,37	9,22	8,12	9,53	10,94	3,75	4,27
t_1 [ns]	51,04	55,31	45,31	56,07	54,53	40,26	69,37	85,05
t_2 [ns]	18,64	18,68	18,28	16,90	18,75	18,40	18,43	0,32
F_{gl}	36,69	24,12	17,83	35,98	23,71	17,04	63,75	37,64

Πίνακας 4.18: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A [A]	2,03	2,54	2,50	1,97	2,09	2,54	2,82	6,87
B [A]	0,15	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13	0,11	0,16
t_1 [ns]	4,33	4,98	6,14	5,44	7,32	6,14	3,27	1,09
t_2 [ns]	0,77	7,88	1,95	9,56	6,35	6,65	14,85	1,53
σ_1 [ns]	7,52	4,97	4,83	8,76	3,87	4,84	8,70	0,78
σ_2 [ns]	53,12	50,10	52,80	50,01	51,24	51,45	46,75	51,56
F_{gl}	18,99	16,51	10,26	20,35	17,57	10,46	46,84	23,57

Πίνακας 4.19: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	3,57	3,93	2,80	3,47	3,15	3,45	4,69	4,69
I_2 [A]	3,63	3,98	4,41	3,69	3,75	3,69	3,81	4,34
t_1 [ns]	0,23	0,14	1,49	0,27	0,78	0,80	0,23	0,19
t_2 [ns]	17,64	15,59	17,42	18,72	18,28	16,07	11,24	12,83
t_3 [ns]	34,37	37,06	44,65	37,18	35,88	35,74	30,47	39,70
t_4 [ns]	33,10	29,87	25,38	30,65	31,24	31,23	35,94	27,46
F_{gl}	19,00	12,78	11,44	8,35	13,06	10,85	32,35	22,41

Πίνακας 4.20: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	46,99	28,67	34,84	35,75	33,23	33,90	8,44	9,18
t_1 [ns]	37,17	39,55	37,60	36,64	38,01	37,30	87,50	78,22
t_2 [ns]	22,53	20,70	22,02	21,68	21,71	21,39	0,20	0,24
F_{gl}	31,86	21,12	16,00	31,93	21,12	15,80	59,50	36,71

Πίνακας 4.21: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	20,43	18,22	16,40	25,76	17,53	19,61	7,55	9,77
I_2 [A]	19,37	17,50	15,71	25,08	16,84	18,91	6,87	9,07
t_1 [ns]	56,46	58,05	63,32	41,38	50,22	55,31	109,35	73,36
t_2 [ns]	19,23	17,49	16,99	20,35	17,50	17,48	0,20	0,28
F_{gl}	31,11	20,49	15,65	31,16	21,52	15,64	58,34	36,47

Πίνακας 4.22: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A [A]	3,26	3,75	5,57	5,96	5,00	5,09	6,25	11,20
B [A]	0,20	0,25	0,32	0,29	0,29	0,23	0,29	0,31
t_1 [ns]	6,25	3,13	5,67	4,99	6,25	5,93	3,13	1,28
t_2 [ns]	12,55	3,13	0,00	0,43	0,13	9,41	0,34	2,99
σ_1 [ns]	22,42	17,50	4,01	4,77	4,53	4,25	6,25	0,95
σ_2 [ns]	51,57	55,35	53,92	54,92	54,68	51,58	54,58	51,56
F_{gl}	23,11	16,95	13,43	24,13	15,02	12,67	50,68	28,85

Πίνακας 4.23: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	7,16	7,05	7,25	5,62	6,91	6,03	9,21	10,76
I_2 [A]	7,13	6,80	6,61	7,81	7,30	6,39	7,74	9,67
t_1 [ns]	0,31	0,24	0,20	0,34	0,38	1,13	0,19	0,19
t_2 [ns]	14,99	16,93	15,58	29,98	18,73	33,28	11,88	11,41
t_3 [ns]	28,71	28,11	24,97	48,12	34,37	43,38	29,70	43,65
t_4 [ns]	41,41	42,35	48,55	24,99	34,08	29,13	37,85	25,00
F_{gl}	21,87	13,71	11,46	22,29	14,39	11,51	33,94	23,62

Πίνακας 4.24: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

Η σύγκριση των πινάκων 4.9-4.24, που προηγήθηκαν μπορεί να βοηθήσει στο να γίνει η εκτίμηση του ποια από τις τέσσερις υποψήφιες εξισώσεις είναι η καλύτερη. Το κριτήριο, που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα παράγραφο είναι το ποια εξίσωση και για ποια συνάρτηση δειγματοληψίας παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα (F_{gl}). Το σφάλμα (F_{gl}) όπως παρουσιάζεται στους πίνακες 4.9-4.24 εκφράζει το σφάλμα (απόκλιση), που υπάρχει μεταξύ των μετρούμενων σημείων, όπως αυτά καταγράφονται στον παλμογράφο και τα οποία χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον γενετικό αλγόριθμο (όπως φαίνονται στους πίνακες 4.7 και 4.8) και των σημείων, που δίνει σαν έξοδο ο γενετικός αλγόριθμος. Από τη σύγκριση αυτή συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η εξίσωση, που παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα (F_{gl}) ως προς το μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι η εξίσωση (4.13). Η εξίσωση (4.12) ακολουθεί με το αμέσως μεγαλύτερο σφάλμα (F_{gl}), ενώ τέλος είναι οι εξισώσεις (4.10) και (4.11) με ανάλογη συμπεριφορά ως προς τα σφάλματα (F_{gl}) που δίνουν. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί οι εξισώσεις (4.12) και (4.13) έχουν δύο μέγιστα στις κυματομορφές τους σε αντίθεση με τις εξισώσεις (4.10) και (4.11), οι οποίες έχουν ένα και μόνο μέγιστο.

Επίσης, από τους ίδιους πίνακες μπορεί να ειπωθεί ότι γενικά και για τις τέσσερις εξισώσεις το μικρότερο σφάλμα παρατηρείται για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata (Idata10, Idata15 και Idata20) και ακολουθούν οι εκθετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας exp (exp4, exp6 και exp8). Το μεγαλύτερο σφάλμα (F_{gl}) και για την ίδια κάθε φορά εξίσωση παρατηρείται για τις συναρτήσεις exp4N και Idata20N, με την Idata20N να παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την exp4N. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι εκτιμώντας την καλύτερη συνάρτηση δειγματοληψίας έχοντας σαν κριτήριο το σφάλμα (F_{gl}) ότι έχοντας επιλέξει τα σημεία ισοκαταναμημένα, όπως άλλωστε γίνεται με τις συναρτήσεις Idata έχουμε μικρότερο σφάλμα (F_{gl}) από το να χρησιμοποιήσουμε εκθετική δειγματοληψία. Αυτό όμως ισχύει έχοντας σαν κριτήριο το σφάλμα, γιατί όπως θα δούμε στη συνέχεια από τα συγκριτικά γραφήματα μπορεί να έχουμε καλύτερη προσαρμογή της καμπύλης πάνω στα πειραματικά δεδομένα για μια συνάρτηση που ενδεχομένως να έχει μεγαλύτερο σφάλμα (F_{gl}) σε σχέση με μια άλλη.

Επίσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος δειγματοληψίας για όλες τις συναρτήσεις, τόσο αυξάνεται και το σφάλμα, γεγονός, που εξηγείται από το γεγονός ότι το σφάλμα (F_{gl}) υπολογίζεται από τον αριθμό των σημείων της κάθε συνάρτησης δειγματοληψίας. Άρα, όσο αυξάνεται η διάρκεια δειγματοληψίας και

κατά συνέπεια και ο αριθμός των σημείων, τόσο αυξάνεται και το σφάλμα. Όμως όπως θα δούμε στη συνέχεια σε συγκριτικά γραφήματα, όσο μειώνεται ο χρόνος δειγματοληψίας αυτό, που επιτυγχάνουμε είναι να έχουμε καλύτερη προσαρμογή των καμπυλών τα πρώτα ns και να έχουμε μεγάλη απόκλιση στην ουρά της κυματομορφής.

Στους πίνακες 4.25-4.28, που ακολουθούν, παρατίθενται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων και τα σφάλματά των τεσσάρων εξισώσεων για διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας, όπως παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.10.

	Idata7	IdataV	Log2	exp3N
i_0 [A]	25,27	6,85	23,06	7,03
t_1 [ns]	38,93	92,82	40,31	91,80
t_2 [ns]	18,04	0,12	17,45	0,12
F_{gl}	16,96	28,36	21,48	28,24

Πίνακας 4.25: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 100 ns (τάση φόρτισης +2kV)

	Idata7	IdataV	Log2	exp3N
i_1 [A]	20,92	6,80	19,27	21,17
i_2 [A]	19,92	5,80	16,78	15,93
t_1 [ns]	52,97	103,53	54,95	53,97
t_2 [ns]	17,50	0,13	18,13	21,71
F_{gl}	15,66	27,44	19,00	27,21

Πίνακας 4.26: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 100 ns (τάση φόρτισης +2kV)

	Idata7	IdataV	Log2	exp3N
A [A]	3,74	5,22	4,07	4,95
B [A]	0,28	0,31	0,27	0,27
t_1 [ns]	5,59	3,89	5,67	5,18
t_2 [ns]	0,012	0,005	3,13	1,62
σ_1 [ns]	9,98	8,43	10,00	9,78
σ_2 [ns]	54,90	52,50	52,97	54,72
F_{gl}	22,68	29,63	24,38	28,87

Πίνακας 4.27: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 100 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

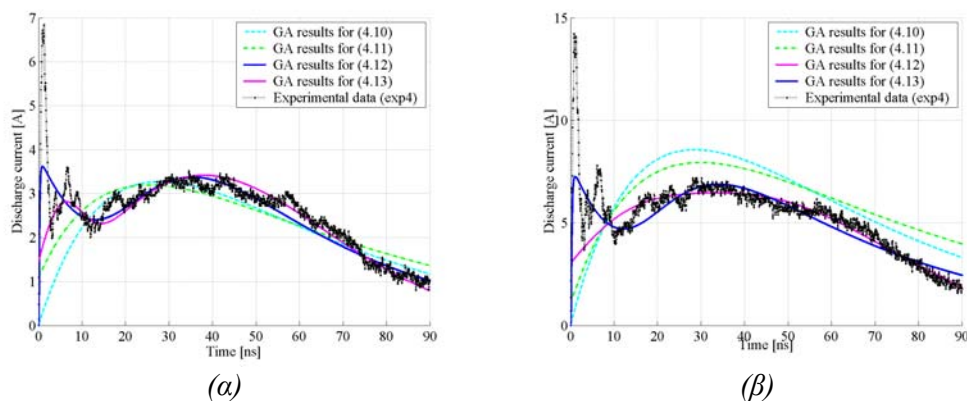
	Idata7	IdataV	Log2	exp3N
i_1 [A]	10,36	12,89	12,28	17,46
i_2 [A]	7,42	6,41	7,41	7,81
t_1 [ns]	3,00	2,98	0,32	0,75
t_2 [ns]	3,00	0,29	3,00	0,82
t_3 [ns]	14,96	1,78	13,12	3,43
t_4 [ns]	51,65	89,06	53,12	68,70
n	3	3	3	3
F_{gl}	14,45	23,56	17,71	22,91

Πίνακας 4.28: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 100 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

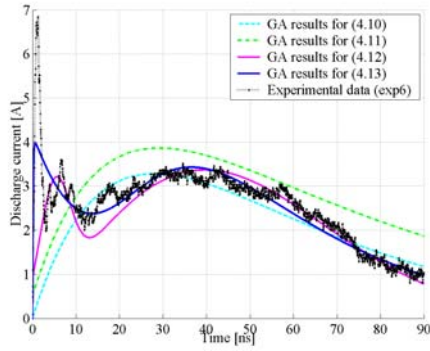
Συγκρίνοντας το σφάλμα (F_{gl}) για κάθε εξίσωση και για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας από τους πίνακες 4.25-4.28 συμπεραίνεται ότι η καλύτερη εξίσωση είναι η (4.13) και ακολουθεί η (4.11) με τη (4.10). Η εξίσωση (4.12) παρουσιάζει το μεγαλύτερο σφάλμα σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες εξισώσεις, κάτι που δεν συνέβαινε στις προηγούμενες περιπτώσεις όπως αυτές παρουσιάστηκαν στους πίνακες 4.9-4.24. Η εξήγηση για αυτό είναι ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας και επιπλέον στους πίνακες 4.25-4.28 οι συναρτήσεις δειγματοληψίας έχουν ακριβώς τον ίδιο αριθμό σημείων κάτι, που δεν συνέβαινε προηγουμένως. Παρ' όλα αυτά η εξίσωση που παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά είναι σε όλες τις περιπτώσεις η (4.13). Επίσης, είναι φανερό ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας, που παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα και για την ίδια εξίσωση είναι η I_{data7} , ενώ το μέγιστο παρατηρείται για την I_{dataV} . Αυτό συμβαίνει διότι στην I_{data7} τα σημεία είναι ισοκαταμεμημένα τα πρώτα 100 ns της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και γι' αυτό τα περισσότερα σημεία είναι μετά το t_{max} .

4.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας

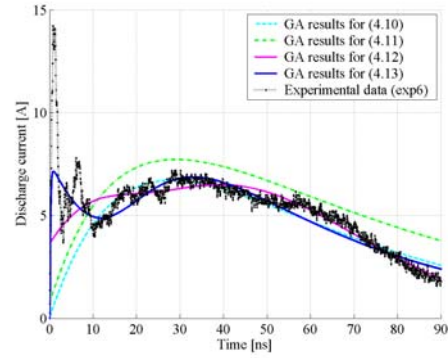
Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.3.5 για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας, αλλά για διαφορετικές εξισώσεις του ρεύματος. Στα σχήματα 4.14-4.20 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για τάσεις φόρτισης +2 kV και +4 kV, όταν η διάρκεια των συναρτήσεων δειγματοληψίας είναι 90 ns.



Σχήμα 4.14: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp4$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90 ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

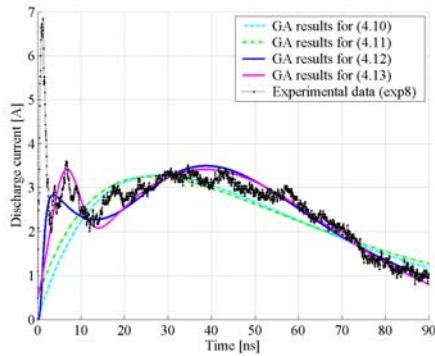


(α)

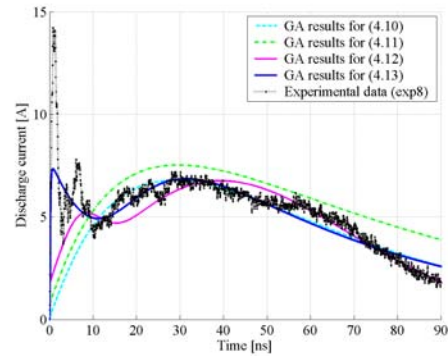


(β)

Σχήμα 4.15: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp6$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90 ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

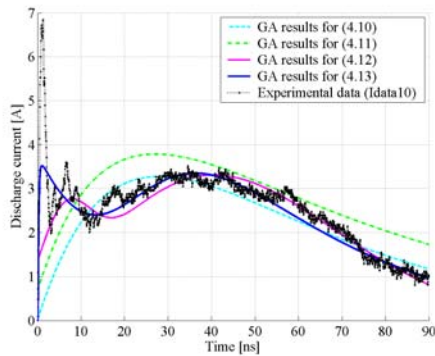


(α)

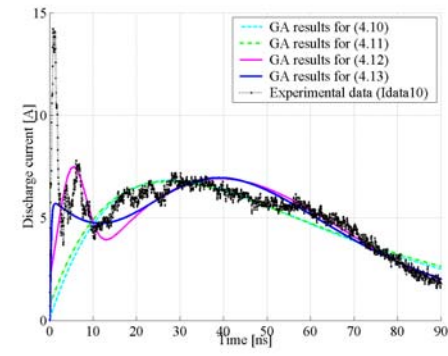


(β)

Σχήμα 4.16: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp8$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90 ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

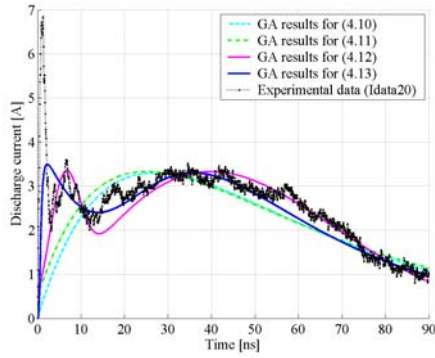


(α)

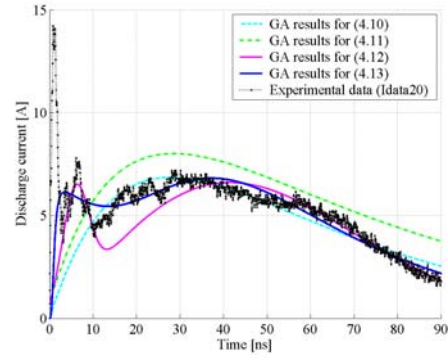


(β)

Σχήμα 4.17: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $ldata10$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

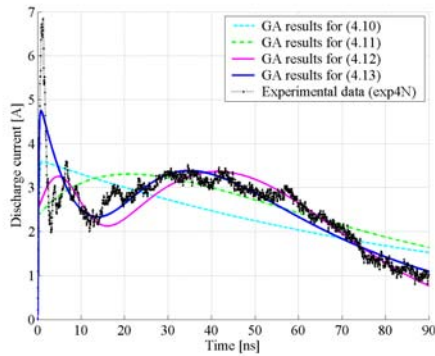


(α)

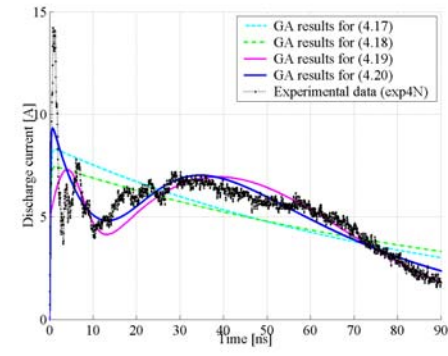


(β)

Σχήμα 4.18: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας I_{data20} για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90 ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

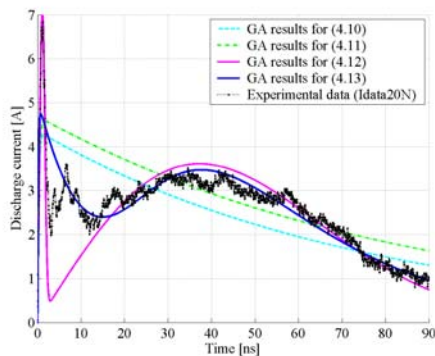


(α)

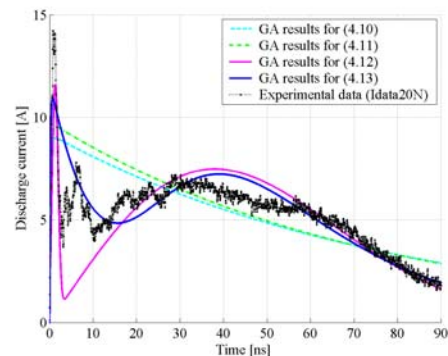


(β)

Σχήμα 4.19: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp4N$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90 ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV



(α)



(β)

Σχήμα 4.20: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $I_{data20N}$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90 ns όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

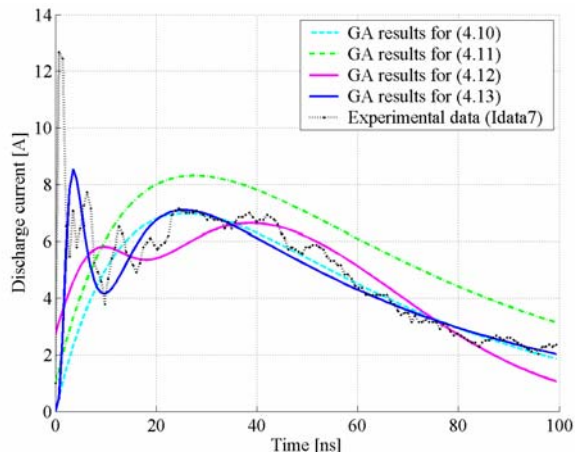
Από τα σχήματα 4.14-4.20 προκύπτει ότι η εξίσωση (4.13) παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας. Προσεγγίζει το

I_{max} καθώς και την ουρά της κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ως προς την τιμή του I_{max} , την καλύτερη προσέγγιση την επιτυγχάνει η Idata20N και η exp4N, εφόσον περιέχουν όλα τα σημεία για το διάστημα 0-2 ns.

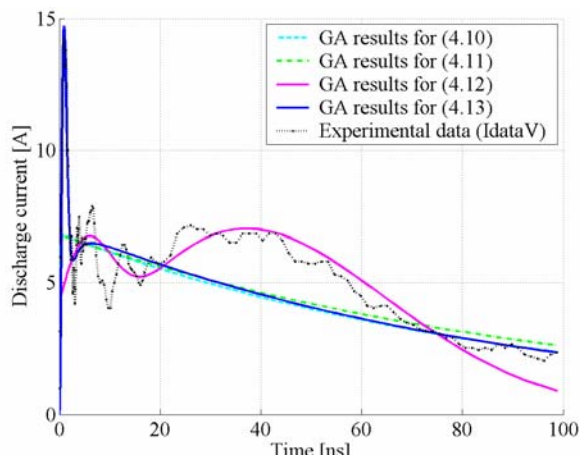
Εποπτικά την αμέσως καλύτερη συμπεριφορά την παρουσιάζει η εξίσωση (4.12), αλλά σαφέστατα υστερεί σε σχέση με την εξίσωση (4.13), αφού σε όλες τις περιπτώσεις (εκτός των Idata20N και exp4N) δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά το πρώτο μέγιστο, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτυγχάνει να προσεγγίσει το δεύτερο μέγιστο. Οι εξισώσεις (4.10) και (4.11) μπορεί να αδυνατούν να προσεγγίσουν το πρώτο μέγιστο της κυματομορφής του ρεύματος, αλλά προσεγγίζουν ικανοποιητικά την ουρά της κυματομορφής. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις αυτές προσεγγίζουν το ρεύμα, που προκύπτει από τις κυκλωματικές προσομοιώσεις του υπάρχοντος Προτύπου, όπως άλλωστε παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.1 του παρόντος κεφαλαίου. Όπως προαναφέρθηκε οι εξισώσεις (4.10) και (4.11) περικλείουν την ίδια ενέργεια την οποία περικλείουν οι άλλες δύο εξισώσεις εφ' όσον καλύπτουν την ίδια ενέργεια, δεδομένου ότι έχουν παρόμοια μορφή και περίπου την ίδια χρονική διάρκεια.

Προσπαθώντας εποπτικά να κατατάξουμε ποια συνάρτηση δειγματοληψίας έχει την καλύτερη συμπεριφορά στα αποτελέσματα που δίνει ο γενετικός αλγόριθμος για την εξίσωση (4.13), η οποία παρουσιάζει και την καλύτερη συμπεριφορά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτή είναι η exp4N και κατόπιν η Idata20N. Όχι μόνο επιτυγχάνεται καλή προσέγγιση της κυματομορφής στα πρώτα ns, αλλά επιπλέον και καλή προσέγγιση στην ουρά της.

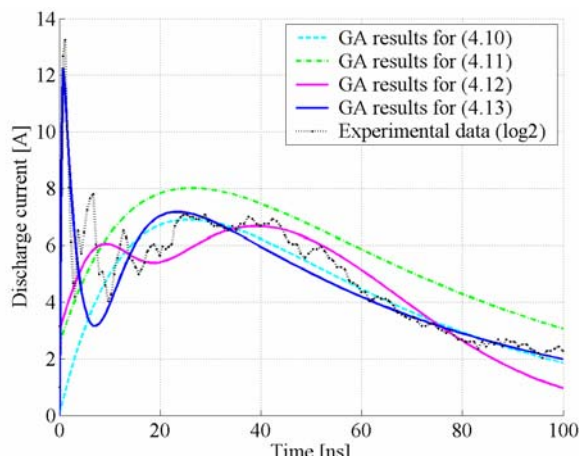
Στα σχήματα 4.21-4.24 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγόριθμου για τάσεις φόρτισης +2 kV και +4 kV, όταν η διάρκεια των συναρτήσεων δειγματοληψίας είναι 100 ns, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.8. Τονίζεται ότι σε αντίθεση με τις προηγούμενες συναρτήσεις δειγματοληψίας, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στα σχήματα 4.21-4.24 οι συναρτήσεις αυτές έχουν ακριβώς τον ίδιο αριθμό σημείων.



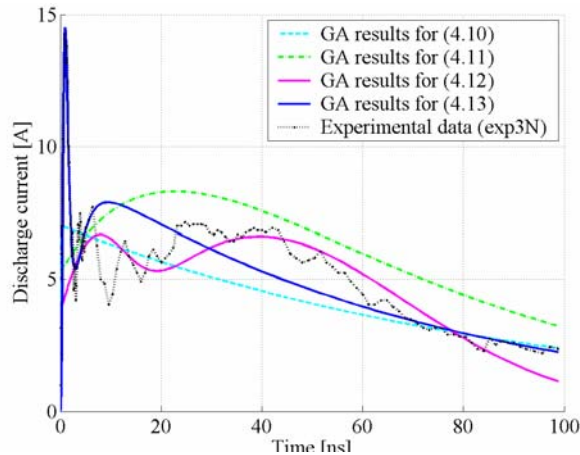
Σχήμα 4.21: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας I_{data7} για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90ns όταν η τάση φόρτισης είναι +2 kV



Σχήμα 4.22: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας I_{dataV} για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90ns όταν η τάση φόρτισης είναι +2 kV



Σχήμα 4.23: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας \log_2 για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια 90ns όταν η τάση φόρτισης είναι +2 kV



Σχήμα 4.24: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp3N$ για τις (4.10)-(4.13) με διάρκεια $90ns$ όταν η τάση φόρτισης είναι α) $+2 kV$ και β) $+4 kV$

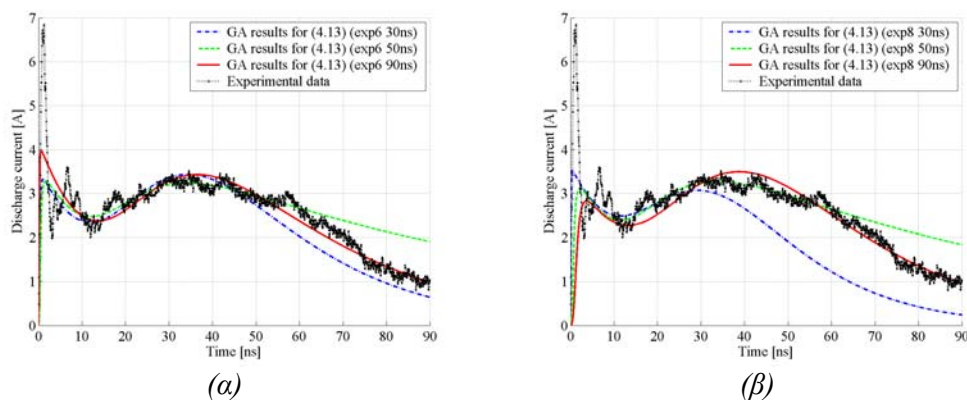
Συγκρίνοντας τις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 4.21-4.24 προκύπτει ότι για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας η εξίσωση, που έχει την καλύτερη προσαρμογή πάνω στα πειραματικά δεδομένα είναι η (4.13). Η δεύτερη πιο κατάλληλη εξίσωση είναι η (4.11), η οποία δεν μπορεί να προσεγγίσει το πρώτο μέγιστο του ρεύματος, αλλά όμως παρουσιάζει καλύτερη προσέγγιση της ουράς του ρεύματος. Όπως και στα σχήματα 4.14-4.20, έτσι κι εδώ παρατηρείται ότι όταν χρησιμοποιούνται συναρτήσεις δειγματοληψίας, οι οποίες περιλαμβάνουν όλα τα μετρούμενα σημεία στα πρώτα ns (I_{dataV} , $exp3N$), τότε υπάρχει καλύτερη προσέγγιση της κυματομορφής του ρεύματος στα πρώτα ns (t_r και I_{max}), χάνοντας στην ουρά της κυματομορφής. Η συνάρτηση δειγματοληψίας, η οποία παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά σε όλη τη χρονική διάρκεια του μετρούμενου ρεύματος είναι η $log2$. Συνεπώς τα αποτελέσματα της συνάρτησης δειγματοληψίας $log2$ σε συνδυασμό με την εξίσωση (4.13) είναι αυτά που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στην επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει και την εξίσωση, που θα περιγράφει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

4.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια εξίσωση και την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας αλλά για διαφορετική διάρκειά της (30 ns, 50 ns, 90 ns)

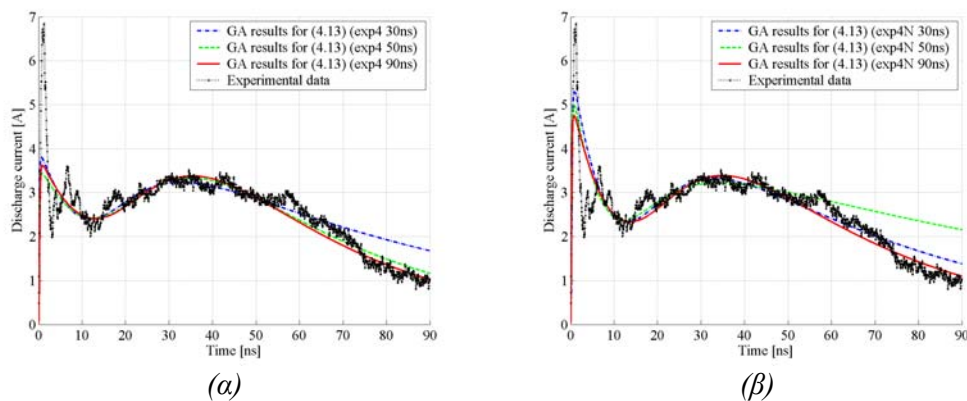
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για τάση φόρτισης $+2 kV$, για την εξίσωση (4.13) και την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας, αλλά για διαφορετική διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας

(30 ns, 50 ns, 90 ns). Ο λόγος που επιλέχθηκε η εξίσωση (4.13) είναι ότι η εξίσωση αυτή έχει, όπως δείχθηκε, τη βέλτιστη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα και απλά θα δειχθεί ποια είναι η επίδραση, που έχει πάνω στην εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου η χρησιμοποίηση της ίδιας συνάρτησης δειγματοληψίας, αλλά με διαφορετική διάρκεια.

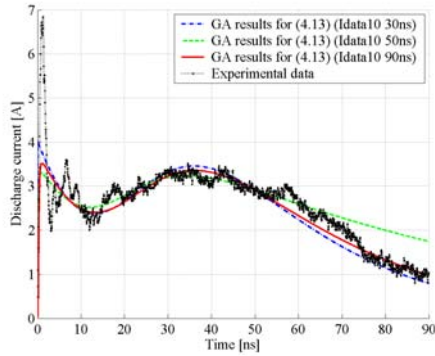
Στα σχήματα 4.25-4.28 παρατηρούμε ο γενετικός αλγόριθμος και για τις τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζει στον ίδιο περίπου βαθμό το αρχικό μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σειρά αυξανόμενης ακρίβειας από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 30 ns, 50 ns και 90 ns.



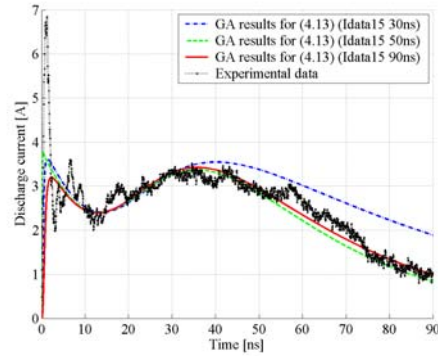
Σχήμα 4.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και γενετικού αλγορίθμου για την (4.13) για χρόνους δειγματοληψίας 30 ns, 50 ns, 90 ns για τη συνάρτηση δειγματοληψίας: α) exp6 και β) exp8



Σχήμα 4.26: Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και γενετικού αλγορίθμου για την (4.13) για χρόνους δειγματοληψίας 30 ns, 50 ns, 90 ns για τη συνάρτηση δειγματοληψίας: α) exp4 και β) exp4N

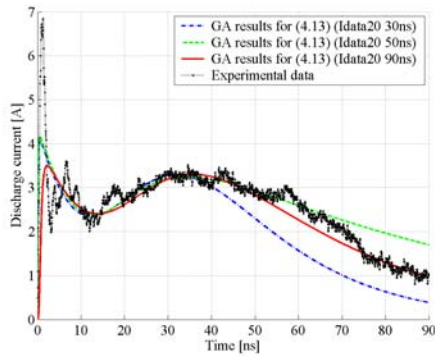


(α)

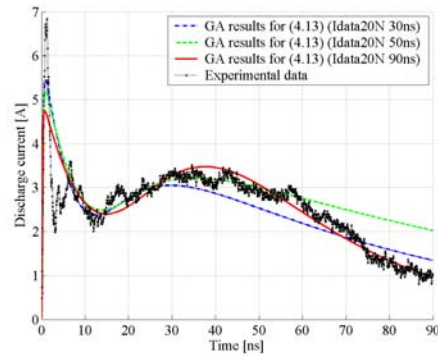


(β)

Σχήμα 4.27: Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και γενετικού αλγορίθμου για την (4.13) για χρόνους δειγματοληψίας 30 ns, 50 ns, 90 ns για τη συνάρτηση δειγματοληψίας: α! Idata10 και β) Idata15



(α)



(β)

Σχήμα 4.28: Σύγκριση αποτελεσμάτων πειράματος και γενετικού αλγορίθμου για την (4.13) για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50 ns, 90 ns για τη συνάρτηση δειγματοληψίας: α! Idata20 και β) Idata20N

Στα σχήματα 4.25-4.28 παρατηρούμε ότι για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας η εξίσωση (4.13) προσεγγίζει καλύτερα το πρώτο μέγιστο της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 30 ns. Η εξίσωση (4.13) προσεγγίζει ικανοποιητικά την ουρά του ρεύματος για τη διάρκεια 90 ns σε σχέση με τις άλλες χρονικές διάρκειες (30 ns και 60 ns). Συνεπώς, προκύπτει ότι η εξίσωση (4.13) είναι η καλύτερη από τις τέσσερις εξισώσεις και προσεγγίζει ικανοποιητικά το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτό μετρήθηκε πειραματικά.

Το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα συγκριτικά γραφήματα είναι ότι για μεγαλύτερη διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας έχουμε καλύτερη προσέγγιση της ουράς αλλά χειρότερη προσέγγιση του I_{max} . Το αντίθετο ισχύει όταν μειώνεται η διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας.

4.3.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια εξίσωση ελαχιστοποιώντας το απόλυτο σφάλμα

Στους πίνακες 4.29-4.36, που ακολουθούν, παρατίθενται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων και τα σφάλματά των τεσσάρων εξισώσεων για διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.10. Η διαφορά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παράγραφο 4.3.6 έγκειται στο γεγονός ότι εδώ η συνάρτηση που ελαχιστοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος είναι το απόλυτο σφάλμα F_{g2} , που δίνεται από τη σχέση (4.17) και όχι το σχετικό όπως εμφανίζεται στην εξίσωση (4.16).

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	32,22	31,56	32,40	19,88	39,95	26,80	4,22	4,84
t_1 [ns]	35,17	35,25	35,34	37,89	34,67	34,57	98,92	82,03
t_2 [ns]	26,67	26,61	26,86	24,10	27,73	24,67	0,23	0,27
F_{g2}	100,50	65,21	50,34	91,05	61,74	46,20	182,99	114,70

Πίνακας 4.29: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	5,98	6,03	9,35	7,54	7,03	9,26	4,28	5,19
I_2 [A]	3,59	4,14	7,89	5,69	5,63	8,10	4,69	5,61
t_1 [ns]	70,83	71,73	49,18	58,00	60,49	49,22	100,68	70,66
t_2 [ns]	19,95	18,50	19,92	20,00	17,65	19,68	0,24	0,27
F_{g2}	89,59	58,25	45,65	82,74	58,79	43,58	184,69	114,62

Πίνακας 4.30: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A [A]	2,50	2,42	2,16	2,72	2,43	2,31	5,03	4,91
B [A]	0,14	0,16	0,11	0,11	0,10	0,14	0,16	0,15
t_1 [ns]	3,81	3,09	5,78	6,26	4,02	5,06	0,33	0,20
t_2 [ns]	3,24	1,54	17,32	6,47	13,28	3,13	2,24	1,56
σ_1 [ns]	7,48	6,98	9,94	2,48	10,00	5,93	6,95	7,75
σ_2 [ns]	51,89	49,98	44,00	56,50	50,39	52,09	49,99	52,73
F_{g2}	54,94	40,88	34,36	107,41	42,27	29,04	134,34	95,77

Πίνακας 4.31: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	4,67	4,10	3,72	3,75	3,28	5,54	5,67	5,83
I_2 [A]	4,31	4,22	3,87	3,40	3,75	3,86	3,20	4,75
t_1 [ns]	0,28	0,06	0,04	0,05	0,22	0,04	0,28	0,41
t_2 [ns]	11,23	15,34	19,92	19,99	19,84	10,62	10,35	9,60
t_3 [ns]	36,33	39,68	40,36	34,75	37,83	30,96	23,67	41,89
t_4 [ns]	29,19	28,14	29,19	36,14	30,80	36,38	62,52	24,94
F_{g2}	55,33	32,52	24,66	47,79	31,15	26,35	102,64	68,39

Πίνακας 4.32: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +2 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	39,39	29,56	29,54	35,47	36,31	23,63	8,73	10,62
t_1 [ns]	37,21	40,35	40,59	38,28	37,88	43,59	99,02	74,77
t_2 [ns]	23,19	21,44	21,53	22,62	22,66	19,53	0,21	0,25
F_{g2}	184,17	123,48	90,31	170,49	111,25	84,29	356,36	224,53

Πίνακας 4.33: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.10) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	13,59	12,36	16,89	15,00	21,57	17,58	8,80	10,41
I_2 [A]	10,00	8,91	14,53	11,57	19,76	15,06	10,63	15,31
t_1 [ns]	67,12	70,4	54,79	60,27	45,61	53,59	99,22	75,15
t_2 [ns]	19,95	17,50	19,30	19,60	19,90	19,99	0,17	0,16
F_{g2}	159,90	107,22	81,46	157,30	106,61	79,09	356,08	229,96

Πίνακας 4.34: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.11) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A [A]	3,65	5,02	5,32	11,38	5,12	5,02	11,66	9,61
B [A]	0,25	0,22	0,28	0,29	0,27	0,24	0,23	0,31
t_1 [ns]	0,02	1,68	2,52	0,56	2,97	5,31	1,15	1,28
t_2 [ns]	3,07	6,20	5,46	0,85	3,90	13,27	6,54	0,40
σ_1 [ns]	21,51	19,26	7,51	8,69	8,59	9,98	1,57	2,94
σ_2 [ns]	55,31	57,13	49,97	54,02	52,73	47,62	54,27	53,86
F_{g2}	124,86	92,48	79,00	167,86	84,87	75,78	318,02	209,57

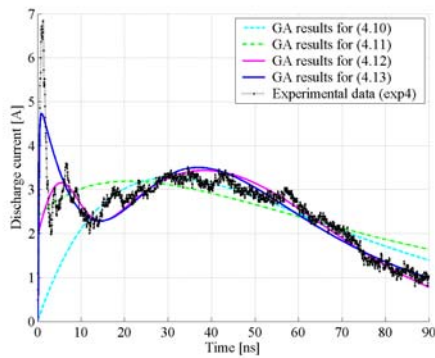
Πίνακας 4.35: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.12) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1 [A]	8,43	8,54	8,44	7,76	7,02	8,36	11,71	12,07
I_2 [A]	7,03	6,57	7,22	6,96	6,15	7,02	7,98	7,23
t_1 [ns]	0,24	0,01	0,42	0,18	0,15	0,28	0,33	0,35
t_2 [ns]	11,56	18,12	8,86	19,37	20,65	18,75	8,14	7,26
t_3 [ns]	23,47	30,18	20,99	34,31	27,34	37,56	26,94	22,02
t_4 [ns]	50,27	42,97	50,39	37,28	50,80	35,40	37,43	50,20
F_{g2}	107,33	70,97	56,15	108,22	69,77	58,93	202,30	131,15

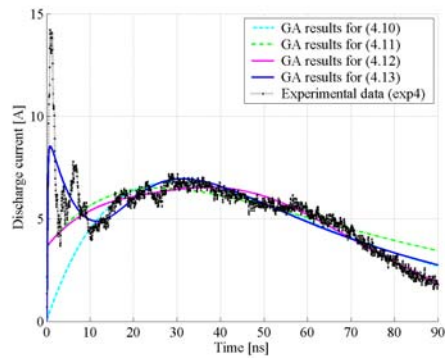
Πίνακας 4.36: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (4.13) χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα για διάρκεια ρεύματος εκφόρτισης 90 ns (τάση φόρτισης +4 kV)

Στα σχήματα 4.29-4.36 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για τάσεις φόρτισης +2 kV και +4 kV, όταν η διάρκεια των συναρτήσεων δειγματοληψίας είναι 90 ns και η συνάρτηση που ελαχιστοποιείται είναι η (4.17), δηλαδή το σφάλμα F_{g2} . Συγκρίνοντας τα γραφήματα στα σχήματα 4.30-4.37 με τα αντίστοιχα 4.14-4.21, παρατηρείται ότι ο γενετικός αλγόριθμος δίνει καλύτερα αποτελέσματα όταν η συνάρτηση ελαχιστοποίησης είναι η (4.17) και όχι η (4.16).

Εποπτικά υπάρχει καλύτερη προσέγγιση του πρώτου μεγίστου στα πρώτα ns, ενώ για τα υπόλοιπα ns η προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι περίπου η ίδια.

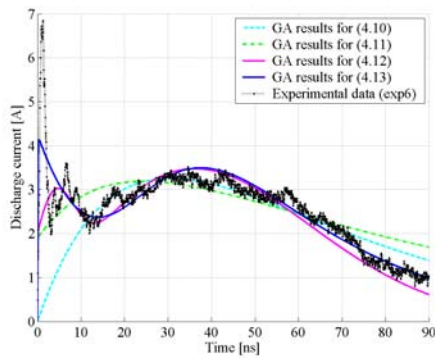


(α)

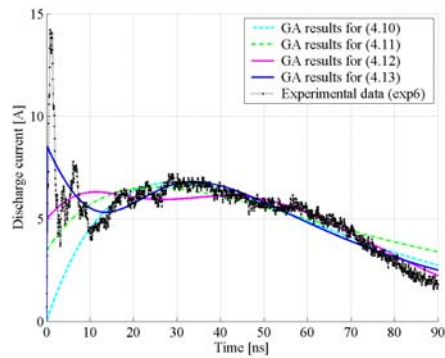


(β)

Σχήμα 4.29: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

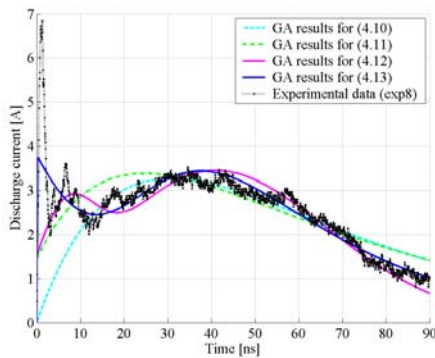


(α)

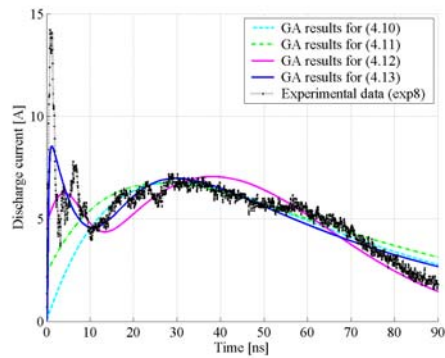


(β)

Σχήμα 4.30: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

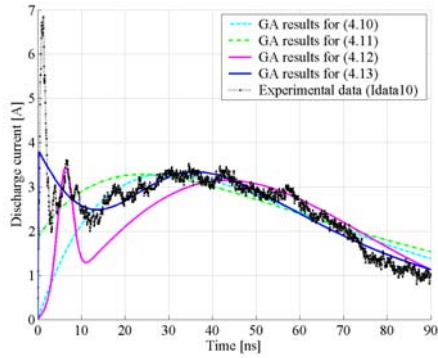


(α)

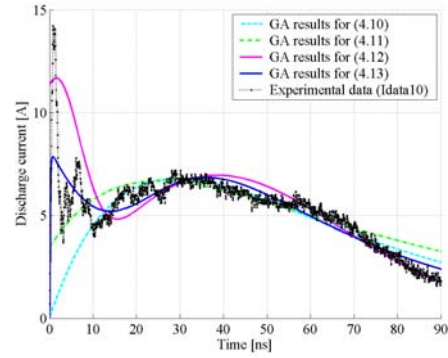


(β)

Σχήμα 4.31: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) +2 kV και β) +4 kV

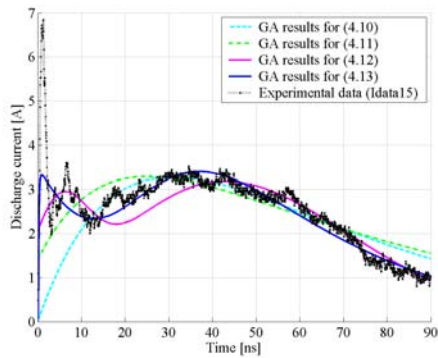


(α)

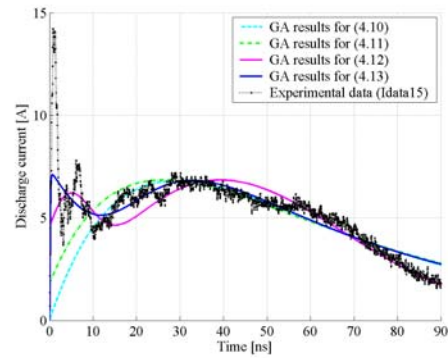


(β)

Σχήμα 4.32: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας I_{data10} για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) $+2\text{ kV}$ και β) $+4\text{ kV}$

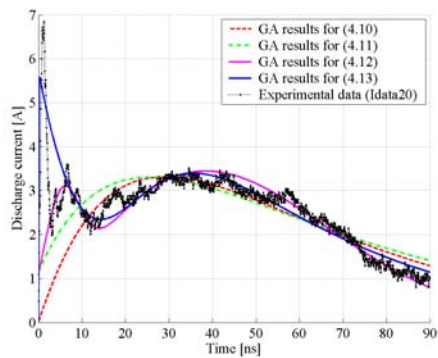


(α)

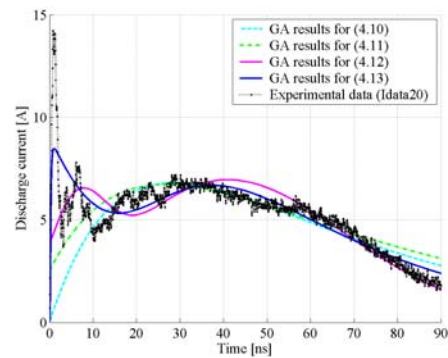


(β)

Σχήμα 4.33: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας I_{data15} για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) $+2\text{ kV}$ και β) $+4\text{ kV}$

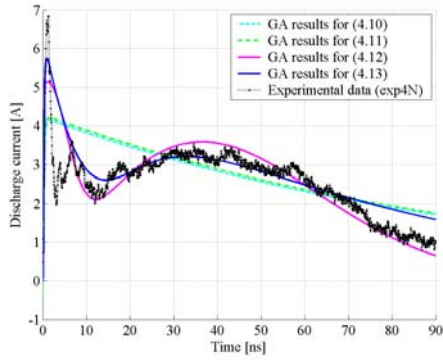


(α)

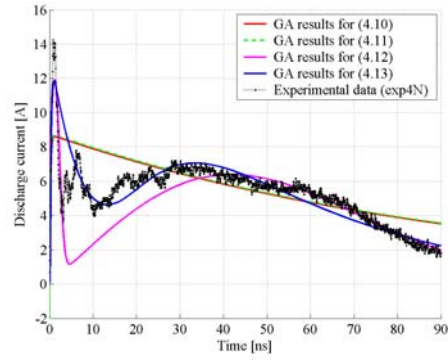


(β)

Σχήμα 4.34: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας I_{data20} για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) $+2\text{ kV}$ και β) $+4\text{ kV}$

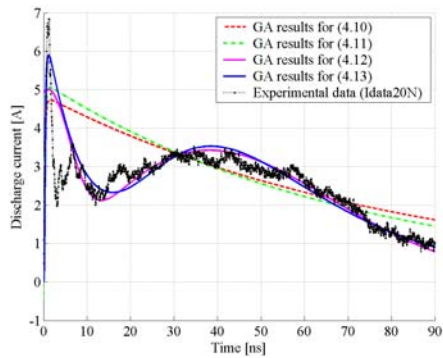


(α)

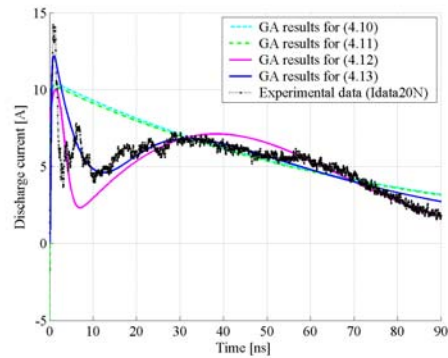


(β)

Σχήμα 4.35: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp4N$ για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) $+2\text{ kV}$ και β) $+4\text{ kV}$



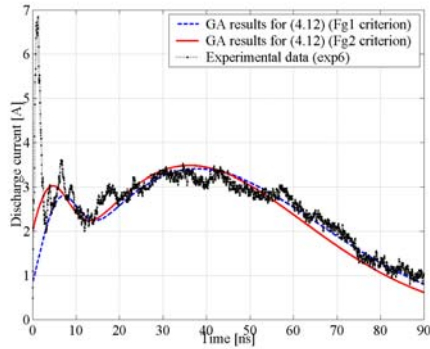
(α)



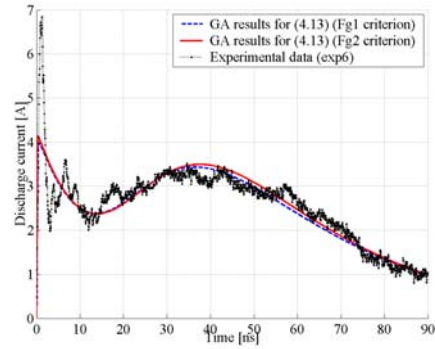
(β)

Σχήμα 4.36: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου με κριτήριο το απόλυτο σφάλμα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $Idata20N$ για τις (4.10)-(4.13) όταν η τάση φόρτισης είναι α) $+2\text{ kV}$ και β) $+4\text{ kV}$

Στα σχήματα 4.37-4.39 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου ανάλογα με τη συνάρτηση που επιλέγεται να ελαχιστοποιηθεί (F_{g1} ή F_{g2}) για τις εξισώσεις (4.12) και (4.13), όταν η διάρκεια των συναρτήσεων δειγματοληψίας είναι 90 ns. Είναι εμφανές ότι όταν επιλέγεται να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση F_{g2} τα αποτελέσματα είναι εμφανώς καλύτερα ειδικά στα πρώτα ns, αφού επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση του πρώτου μεγίστου. Παρατηρείται επίσης ότι η εξίσωση (4.13) έχει καλύτερη σύγκλιση στα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με την (4.12).

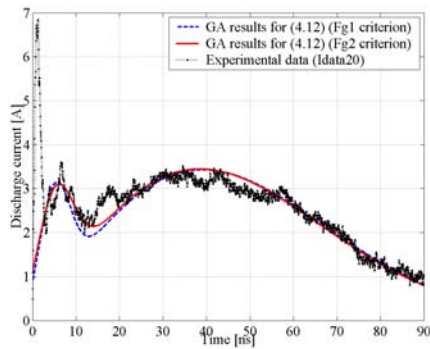


(α)

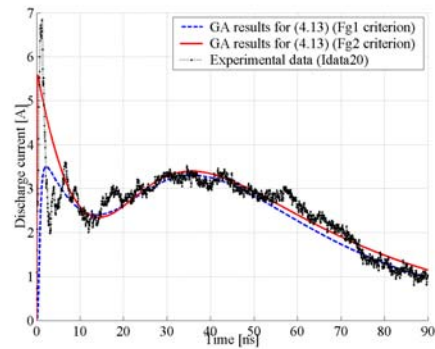


(β)

Σχήμα 4.37: Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετική συνάρτηση ελαχιστοποίησης (F_{g1} ή F_{g2}) με τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $exp6$ για: α) την εξίσωση (4.12) και β) την εξίσωση (4.13)

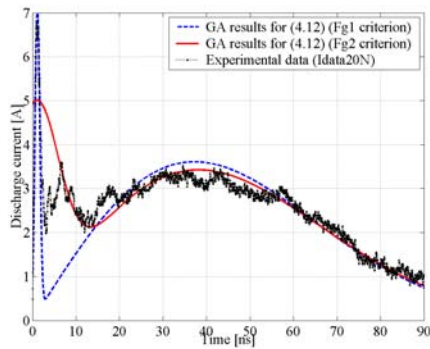


(α)

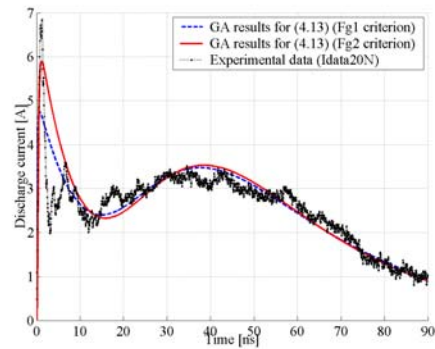


(β)

Σχήμα 4.38: Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετική συνάρτηση ελαχιστοποίησης (F_{g1} ή F_{g2}) με τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $Idata20$ για: α) την εξίσωση (4.12) και β) την εξίσωση (4.13)



(α)



(β)

Σχήμα 4.39: Σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετική συνάρτηση ελαχιστοποίησης (F_{g1} ή F_{g2}) με τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συνάρτηση δειγματοληψίας $Idata20N$ για: α) την εξίσωση (4.12) και β) την εξίσωση (4.13)

Όπως φάνηκε στην παράγραφο αυτή ο γενετικός αλγόριθμος δίνει καλύτερα αποτελέσματα όταν η συνάρτηση ελαχιστοποίησης είναι η (4.17) και όχι η (4.16). Δηλαδή ελαχιστοποιώντας το απόλυτο και όχι το σχετικό σφάλμα τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου συγκλίνουν καλύτερα στα πειραματικά. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν η ελαχιστοποίηση γίνεται με το σχετικό σφάλμα όλα τα σημεία “πρακτικά” έχουν την ίδια βαρύτητα. Όταν όμως χρησιμοποιούμε το απόλυτο σφάλμα είναι σαν να έχουμε ζητούμενο τη σύγκλιση στα σημεία που έχουν μέγιστο στη συνάρτηση (διότι εκεί υπήρχε το μέγιστο σφάλμα).

4.4 Σχεδίαση κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων από την εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης

Εδώ παρουσιάζεται μεθοδολογία βάσει της οποίας γίνεται σχεδιασμός του κυκλώματος, το οποίο θα παράγει κυματομορφή ρεύματος όπως αυτή περιγράφεται στην εξίσωση (4.13).

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

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η μέθοδος [129] η οποία θα εφαρμοστεί στη συνέχεια στη βέλτιστη εξίσωση (4.13). 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:

$$g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(s_i t) \quad (4.18)$$

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

$$g_d(kt) = g(kT) \quad (4.19)$$

για $k=0, 1, \dots, 2n-1$

Για τον προσδιορισμό των A_i, s_i , όπως στη σχέση (4.18) τίθεται:

$$z_i = \exp(s_i T) \quad (4.20)$$

και σχηματίζεται το πολυώνυμο:

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^n (z - z_i) = \sum_{m=0}^n b_m s^m \quad (4.21)$$

$$\text{με } b_0 = 1 \quad (4.22)$$

Από τις σχέσεις (4.18) και (4.21) προκύπτει:

$$\sum_{m=0}^n g[(m+k)T]b_m = \sum_{m=0}^n \sum_{i=1}^n b_m A_i z_i^{m+i} = \sum_{i=1}^n A_i \sum_{m=0}^n b_m z_i^{m+i} = 0 \quad (4.23)$$

για $k=0,1,\dots,n-1$. Η σχέση (4.23) σε μητρική μορφή γράφεται λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.21) και (4.22):

$$\begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(nT) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g(nT-T) & g(nT) & \cdot & \cdot & \cdot & g(2nT-2T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n-1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g(nT) \\ g(nT+T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(2nT-T) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Από τη σχέση (4.24) προκύπτουν οι συντελεστές b_i και από την εύρεση των ριζών του πολυωνύμου $\psi(z)$ οι ρίζες z_i . Οι συντελεστές A_i προκύπτουν από την μητρική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdot & \cdot & \cdot & z_n \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ z_1^{n-1} & z_2^{n-1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_n^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(0) \\ g(T) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g(nT-T) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Εφ' όσον είναι γνωστά τα z_i , τα s_i προκύπτουν από τη σχέση (4.20) ως εξής:

$$s_i = \frac{\text{Ln}(z_i)}{T} \quad (4.26)$$

4.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου Prony στη βέλτιστη εξίσωση

4.4.2.1 Εισαγωγή

Για την εφαρμογή της μεθόδου Prony αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab, το οποίο έχοντας σαν είσοδό του την εξίσωση (4.13), η οποία θεωρείται ως η κρουστική απόκριση του κυκλώματος, για τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων, έχει σαν έξοδό του τις παραμέτρους A_i και s_i της εξίσωσης (4.18). Δηλαδή βρίσκουμε την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος. Οι συντελεστές της εξίσωσης (4.13) έχουν επιλεγεί ως ακολούθως: $\tau_1=1,3$, $\tau_2=2$, $\tau_3=12$, $\tau_4=37,8$, $i_1=17,5$, $i_2=9$, $n=1,8$. Είναι προφανές όμως ότι η μέθοδος μπορεί να δουλέψει για οποιεσδήποτε τιμές παραμέτρων.

Με μετασχηματισμό Laplace της (4.18) λαμβάνουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του ζητούμενου κυκλώματος, όταν γνωρίζουμε την κρουστική του απόκριση:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n A_i \frac{1}{s-s_i} \quad (4.27)$$

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στο σημείο αυτό, διότι στην συγκεκριμένη περίπτωση θα εφαρμόσουμε την αρχή της υπέρθεσης στην εξίσωση (4.13), καθώς θα “διαχωρίσουμε” την έξοδο στους δύο προσθετέους από τους οποίους αποτελείται και θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο σε καθέναν από αυτούς για την εύρεση των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς. Αυτές μπορούν στο τέλος της διαδικασίας να αθροιστούν για να βρεθεί η συνολική συνάρτηση μεταφοράς και έπειτα να βρεθεί το κύκλωμα από αυτήν. Εναλλακτικά μπορεί να βρεθούν δύο ξεχωριστά κυκλώματα για την κάθε μία από τις επιμέρους συναρτήσεις μεταφοράς, και έπειτα αυτά να συνδεθούν παράλληλα, σε κοινή είσοδο. Η παραπάνω πρακτική εφαρμόζεται, καθώς η εφαρμογή της μεθόδου, σε ολόκληρη την εξίσωση έδωσε εντελώς ανακριβή αποτελέσματα και δεν φάνηκε να προσεγγίζει καθόλου καλά την εξίσωση. Ο λόγος είναι ότι έχουμε να κάνουμε με μία εξίσωση που αποτελείται από δύο προσθετέους καθέναν από τους οποίους εμφανίζεται σαν μία γραφική παράσταση με ένα μέγιστο. Όμως αυτές είναι απομακρυσμένες και η πρώτη είναι πολύ πιο οξεία και υψηλότερη σε σχέση με την δεύτερη (stiff equations). Καθώς η μέθοδος Prony, για τη δημιουργία συστήματος n-τάξης χρησιμοποιεί 2n βήματα, και μόνον αυτά λαμβάνονται υπόψη κατά τη μέθοδο, παρατηρείται ότι με μικρό βήμα παραλείπεται η δεύτερη καμπύλη, ενώ με μεγάλο βήμα δεν εντοπίζεται η πρώτη.

4.4.2.2 Εφαρμογή της μεθόδου Prony

Σε πρώτη φάση δίνεται ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση της $G(s)$, από την κρουστική απόκριση του κυκλώματος. Είναι ακριβώς η μέθοδος Prony όπως εφαρμόζεται σε κάθε έναν από τους δύο προσθετέους της εξίσωσης (4.13) και αναλυτικά εμφανίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.40. Το εξαγόμενο της κάθε εφαρμογής είναι η εκάστοτε συνάρτηση μεταφοράς ($G_i, i=1,2$). Επιλέγοντας ένα αριθμό δειγμάτων $N_\delta=2(N-1)+1$ δημιουργείται ο πίνακας P:

$$P = \begin{bmatrix} g(0) & g(T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(NT-T) \\ g(T) & g(2T) & \cdot & \cdot & \cdot & g(NT) \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ g(NT-T) & g(NT) & \cdot & \cdot & \cdot & g(2NT-2T) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Ο πίνακας P της (4.28) 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:

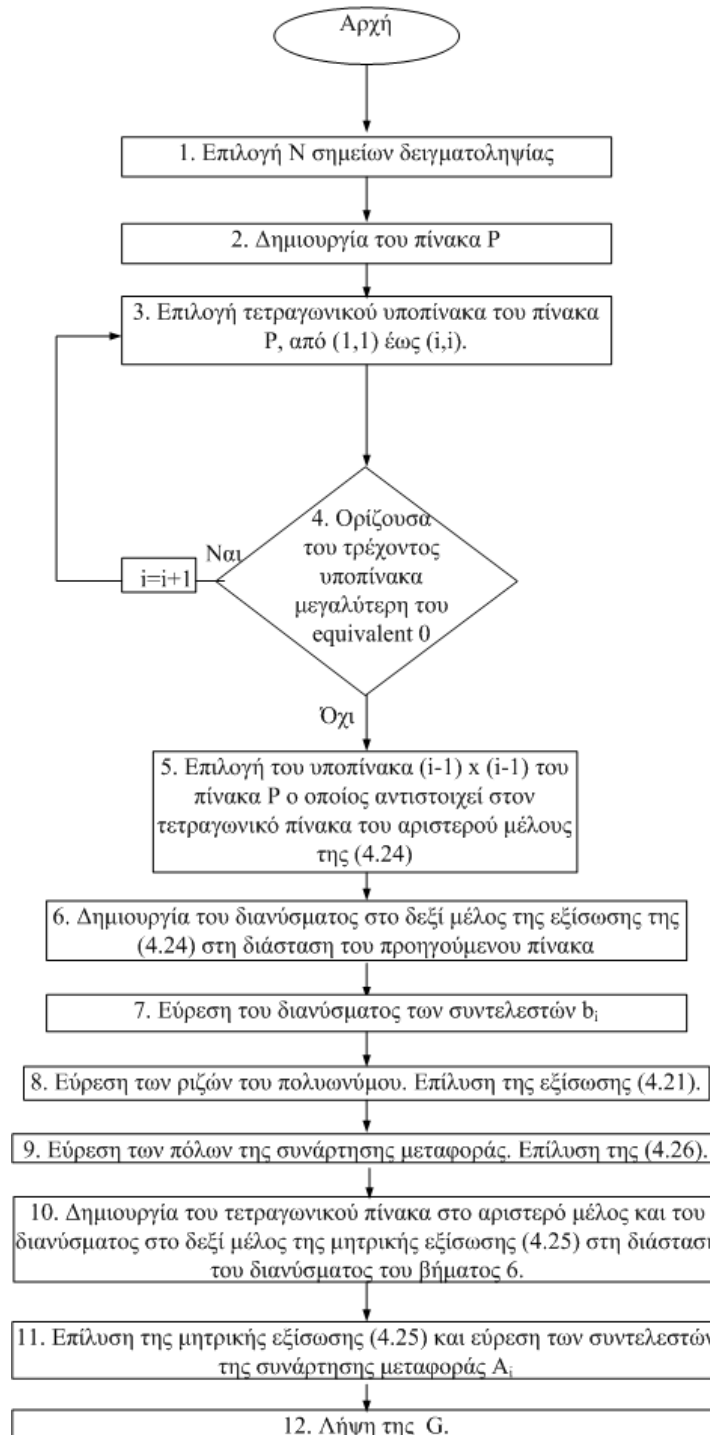
Σαρώνεται η τετραγωνική μήτρα P και βρίσκεται η τιμή της ορίζουσας του κάθε τετραγωνικού υποπίνακα, αρχίζοντας από πάνω και αριστερά. Όταν η ορίζουσα πάρει τιμή ίση ή μικρότερη του επιλεγμένου equivalent zero, η σάρωση σταματά και επιλέγεται ο πίνακας που έχει γίνει αποδεκτός ως αυτήν την στιγμή. Με τον προηγούμενο τρόπο και κριτήριο την 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 (4.24). Επιλύεται τώρα η εξίσωση (4.24) 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 (4.24).

Εδώ γίνεται φανερό πως έτσι, οι τιμές της συνάρτησης που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο μπορεί να είναι -και όντως έτσι συμβαίνει- πολύ λιγότερες από αυτές που αρχικά έχουν ληφθεί από τη δειγματοληψία. Αυτό δείχνει πως η πληροφορία πάνω στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος είναι πολύ λιγότερη από αυτήν που έχουμε αρχικά. Ο αριθμός των σημείων ($N_s=2(N-1)+1$) που θα επιλεγούν εδώ είναι φανερό πως δεν επηρεάζει καθόλου το αποτέλεσμα της μεθόδου, όσο αυτός είναι μεγαλύτερος της τάξης του υποπίνακα που θα επιλεγεί. Έτσι έχουμε με αυτόν τον τρόπο εισαγωγή αξιοσημείωτου σφάλματος και όταν δοκιμάζουμε την δημιουργία γραφήματος $i(t)=g(t)$, με $g(t)$ αυτήν που προκύπτει από την σχέση (4.18) έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 4.41.

Αντίστοιχα έχουμε περαιτέρω πρόβλημα και στην εξίσωση (4.25). Εδώ λαμβάνονται οι δυνάμεις των λύσεων του χαρακτηριστικού πολυωνύμου, μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στην διάσταση (n) του πίνακα, που βρίσκεται στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (4.24) και όχι άλλες, καθώς η τιμή αυτή έχει προεπιλεγθεί, 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 (4.25). 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.



Σχήμα 4.40: Ο αλγόριθμος της μεθόδου Prony

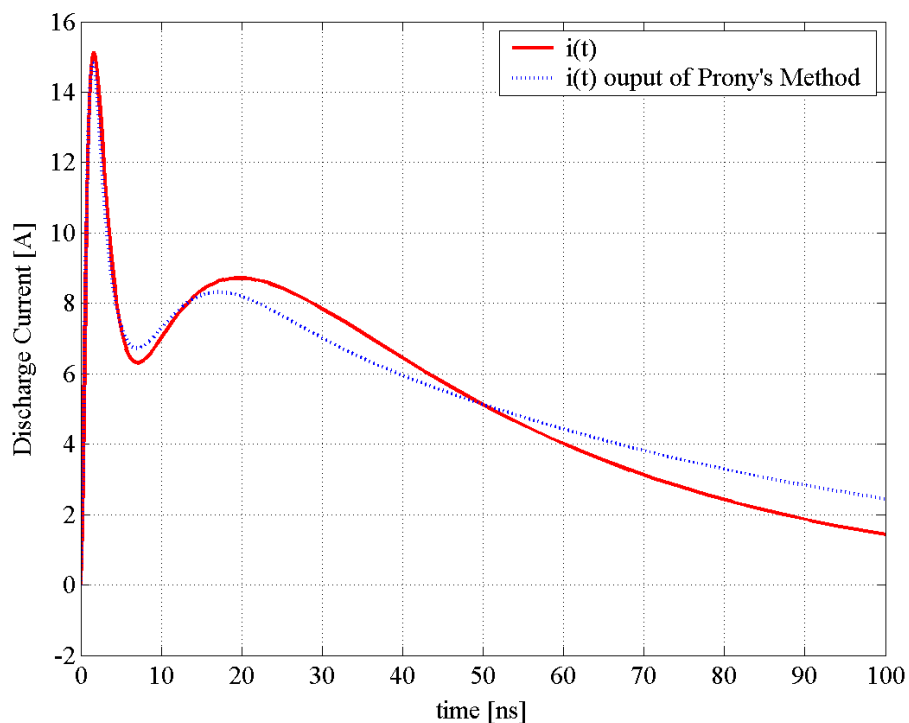
Με την εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς, και την θεώρηση κρουστικής εισόδου στο κύκλωμα έχουμε:

$$Y(s)=G(s)*\mathcal{L}\{\delta(t)\} \Leftrightarrow Y(s)=G(s) \quad (4.29)$$

Άρα σε αυτήν την περίπτωση η συνάρτηση μεταφοράς ταυτίζεται με το μετασχηματισμό Laplace της εξόδου, και άρα έχει νόημα η γραφική παράσταση της

$$g(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(s_i t) = y(t), \text{ με την οποία προσπαθούμε να προσεγγίσουμε την}$$

θεωρητική εξίσωση. Με την $g(t)$ όπως προέκυψε από την παραπάνω μέθοδο, δηλαδή με τις τιμές των A_i και s_i που έδωσε αυτή, προκύπτει το σχήμα 4.41.



Σχήμα 4.41: Η θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την (5.1) σε κοινό γράφημα με την καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου Prony

Η προσέγγιση δεν φαίνεται να είναι πολύ μακριά από την πραγματικότητα, ειδικά αν λάβουμε υπόψη το μεγάλο θόρυβο που χαρακτηρίζει τις πειραματικές μετρήσεις. Παρόλα αυτά σε ορισμένα σημεία, εμφανίζεται αξιοσημείωτο σχετικό σφάλμα, και αυτό συνιστά μια αδυναμία της μεθόδου.

4.4.2.3. Τροποποίηση της μεθόδου Prony

Στο σχήμα 4.43 δίνεται ο τροποποιημένος αλγόριθμος Prony, τον οποίο εφαρμόσαμε εκ νέου στους δύο προσθετούς της θεωρητικής εξίσωσης (4.13).

Στην προηγούμενη εφαρμογή της μεθόδου διαπιστώθηκε σειρά μειονεκτημάτων τα οποία και καταγράφηκαν. Το μειονέκτημα που διαπερνά όλα τα προβλήματα, που παρουσιάζονται παραπάνω είναι ότι για την εφαρμογή της μεθόδου πριν, είμαστε αναγκασμένοι να αγνοήσουμε μεγάλο κομμάτι της πληροφορίας. Για παράδειγμα για την επίλυση της (4.24) 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 εξίσωσης (4.13) που δίνει το $i(t)$, που αντιστοιχούν σε χρόνους οι οποίοι υπερβαίνουν τις διαστάσεις της υπομήτρας.

Στην τροποποίηση αυτή γίνεται προσπάθεια για βελτίωση των παραπάνω. Η επίλυση της (4.24) για την εύρεση των συντελεστών του χαρακτηριστικού πολυωνύμου γίνεται ως εξής:

Η σάρωση στήλη-στήλη του πίνακα P δημιουργεί στο τέλος της έναν μη τετραγωνικό πίνακα (πίνακα με περισσότερες γραμμές από στήλες) που αποτελείται από στήλες – διανύσματα γραμμικά ανεξάρτητα. Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι στην τροποποίηση της μεθόδου χρησιμοποιούμε ως κριτήριο εξάρτησης των “έως τώρα επιλεγθεισών στηλών” τις singular values του αντίστοιχου πίνακα που σχηματίζεται από αυτές τις στήλες. Οι singular values πίνακα M ορίζονται ως $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$, όπου λ_i η i -οστή ιδιοτιμή του πίνακα $M^T M$. Το κριτήριο εξάρτησης είναι το εξής: Όταν $0 < \min(\sigma_i) \ll \text{equivalent zero}$, τότε ο πίνακας αποτελείται από διανύσματα μεταξύ τους εξαρτημένα. Έτσι επιλέγονται οι πρώτες n “ανεξάρτητες” στήλες.

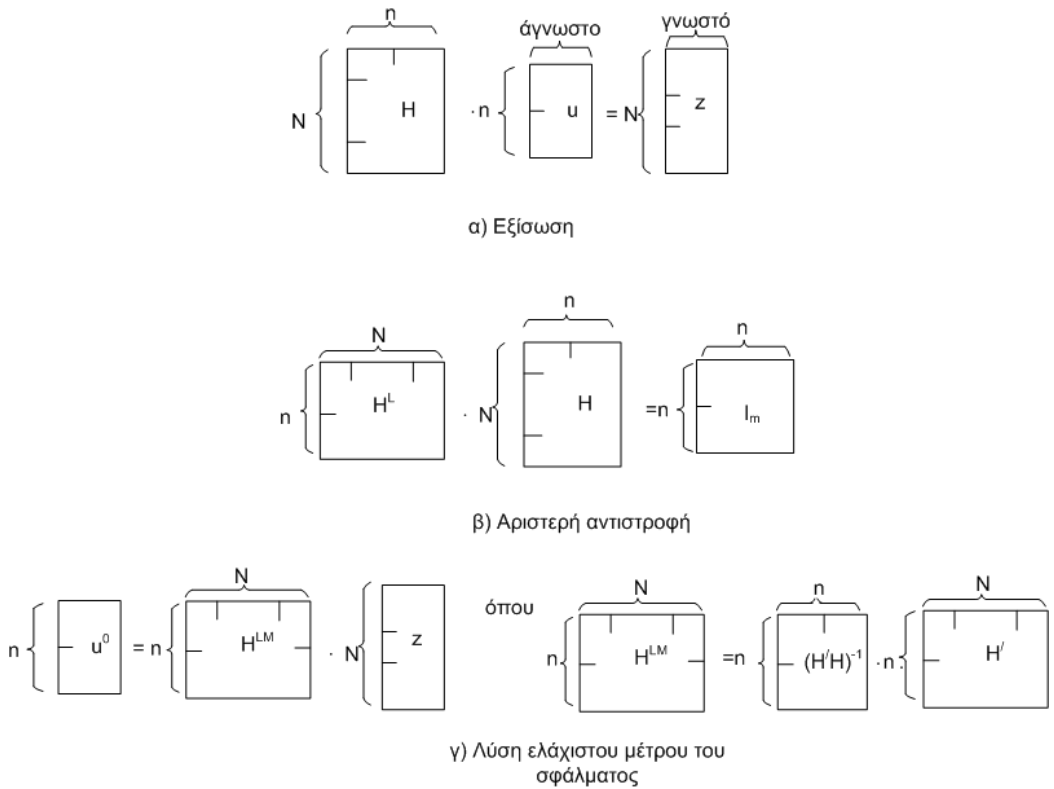
Κατά συνέπεια των ανωτέρω οι επόμενες στήλες του πίνακα είναι γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η αμέσως επόμενη από τις ανεξάρτητες στήλες μεταφέρεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (4.24) και παίζει το ρόλο του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (4.24).

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 τα b_i -συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Στην επίλυση λαμβάνονται τώρα υπόψη τιμές του ρεύματος $i(t)$ για t μέχρι $(N-1) \cdot T$, ήδη από την πρώτη στήλη. Αξίζει να σημειωθεί ότι με τη μέθοδο αυτή, για προσέγγιση

μικρής τάξης, όπως στην περίπτωση μας, χρησιμοποιείται περίπου το μισό των δειγμάτων.

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης με την $(n+1)$ -οστή στήλη στο δεξί μέλος δίνει το διάνυσμα που περιέχει τα b_i ως σημειωθεί ότι κάθε μεταφορά άλλου διανύσματος-στήλης $(n+i)$ στο δεξί 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 πολωνύμου.

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 4.42.



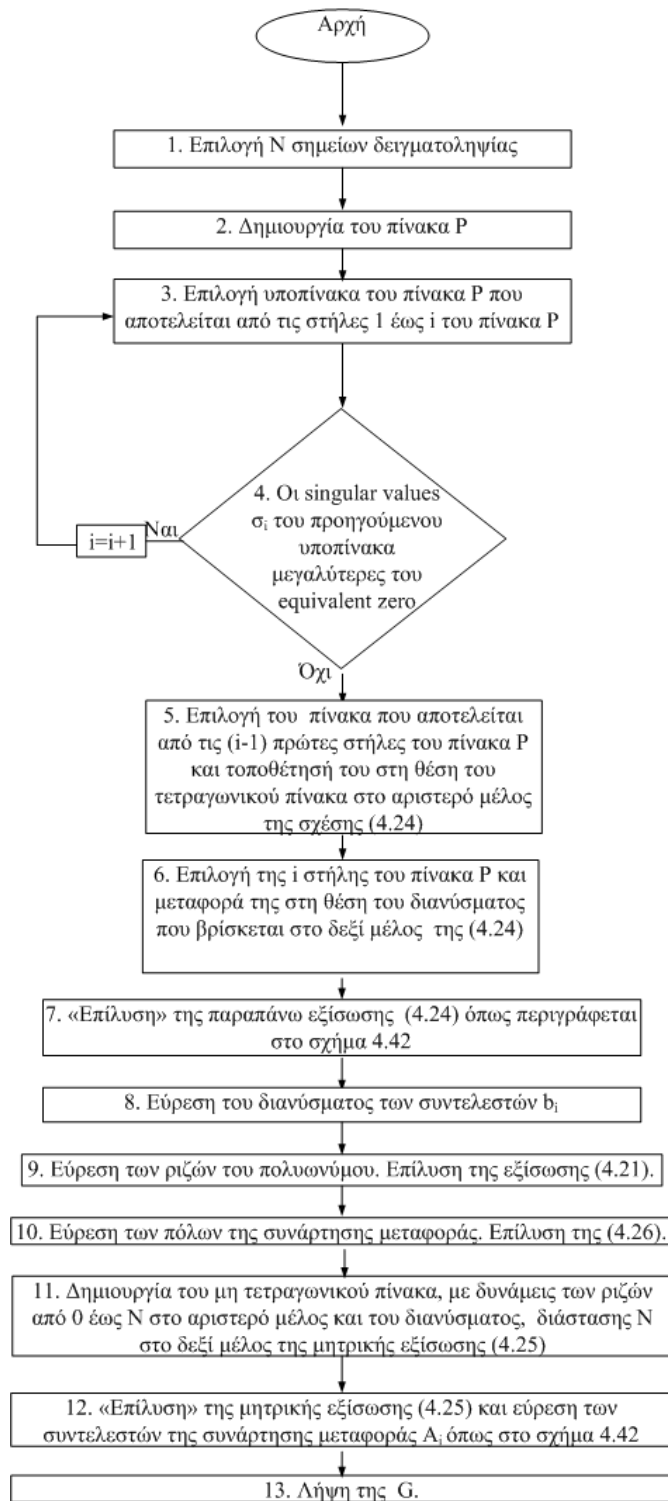
Σχήμα 4.42: Επίλυση συστήματος εξισώσεων με αριθμό εξισώσεων μικρότερο από τον αριθμό των αγνώστων μεταβλητών

Καθώς τα διανύσματα που έχουμε τώρα στον πίνακα είναι γραμμικώς ανεξάρτητα σύμφωνα με την πιο πριν διαδικασία, καμία από τις εξισώσεις του συστήματος δεν απλοποιείται και έτσι το διάνυσμα των λύσεων μου έχει όντως λιγότερες

συντεταγμένες από την διάσταση N , του πίνακα H που φαίνεται στο σχήμα 4.42. Άρα το διάνυσμα - “λύση” είναι στην πραγματικότητα ένα διάνυσμα που αν πολλαπλασιαστεί με τη μήτρα H (σχήμα 4.42.α) δίνει ένα διάνυσμα που προσεγγίζει το z , ώστε το σφάλμα που θα έχουμε να έχει την ελάχιστη ευκλείδεια νόρμα.

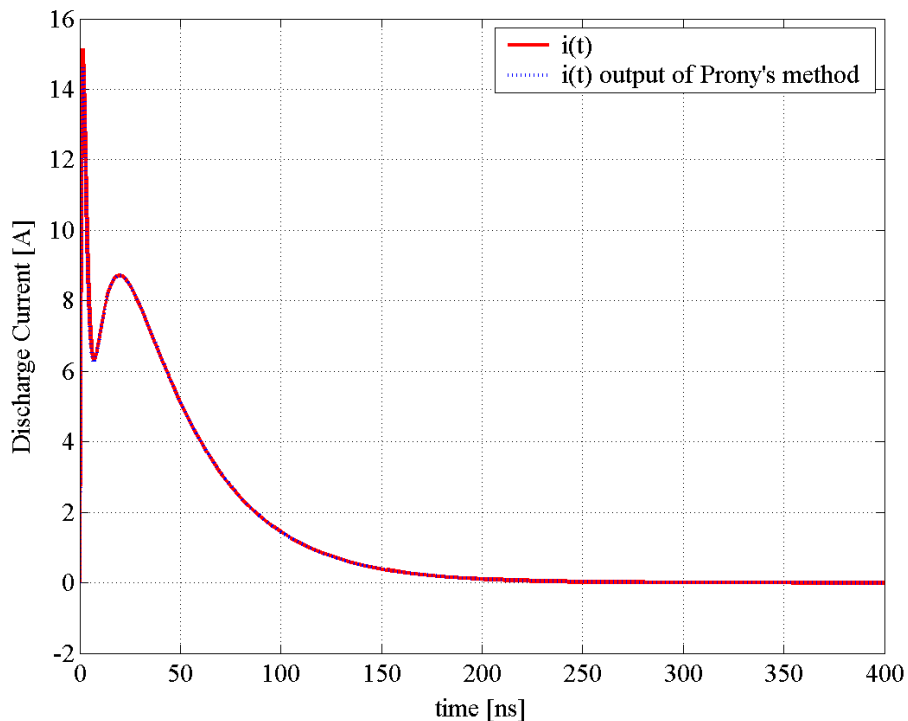
Ένα ανάλογο στο χώρο - για να γίνει κατανοητή η διαδικασία - θα ήταν να προσπαθούσαμε να δώσουμε μια λύση σε τρισδιάστατο πρόβλημα, με δυνατές λύσεις καθλωμένες σε επίπεδο ϵ . Συνεπώς, η λύση που επιλέγουμε σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτή η οποία πολλαπλασιασμένη με την μήτρα H από αριστερά (σχήμα 4.42.α) δίνει την προβολή του διανύσματος που βρίσκεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης (σχήμα 4.42.α) στο επίπεδο ϵ , και άρα η λύση ελαχίστου μέτρου του σφάλματος. Εδώ η λύση αυτή είναι η u_0 (σχήμα 4.42.γ) η οποία προκύπτει από τον από αριστερά πολλαπλασιασμό της εξίσωσης του σχήματος 4.42.α με την H^{LM} (η οποία ορίζεται στο σχήμα 4.42.γ). Τότε αυτή μετατρέπεται στην εξίσωση του σχήματος 4.42.γ και δίνεται η “λύση” u_0 .

Ομοίως επιλύεται και η εξίσωση (4.25). 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 4.42.α. Από εδώ συνεχίζει η ίδια διαδικασία για την εύρεση του διανύσματος που περιέχει τα A_i , τα οποία είναι οι συντελεστές της κρουστικής απόκρισης της σχέσης (4.18).



Σχήμα 4.43: Ο αλγόριθμος της τροποποιημένης μεθόδου Prony

Όμοια με πριν θα γίνει συγκριτική γραφική παράσταση της $g(t)$ ($g(t)=y(t)$, για είσοδο $\delta(t)$), και της θεωρητικής καμπύλης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.44.



Σχήμα 4.44: Η θεωρητική καμπύλη που προκύπτει από την (4.13) σε κοινό γράφημα με την καμπύλη που προκύπτει από την εφαρμογή της τροποποιημένης μεθόδου Prony

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 4.44 έχουμε μια πολύ σημαντική βελτίωση της προσέγγισής μας. Το απόλυτο σφάλμα μειώνεται πάρα πολύ. Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα είναι $5,9 \cdot 10^{-3}$ A.

Τα πλεονεκτήματα της τροποποίησης μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

α) Στην τετραγωνική μήτρα της σχέσης (4.24), η αλλαγή του τρόπου να διατρέχουμε τον πίνακα, αφού εδώ παίρνουμε στήλη-στήλη, δίνει καλύτερη εικόνα της εξόδου στην μέθοδο, αφού από το πρώτο διάνυσμα ήδη φθάνουμε μέχρι την τιμή $i((N-1)T)$.

β) Στη σχέση (4.25) αντίθετα με τον αρχικό έλεγχο που κάναμε στην πρώτη εφαρμογή της μεθόδου Prony, εδώ παίρνουμε όλες τις δυνάμεις κάθε ρίζας, δηλαδή τόσες όσες το πλήθος των σημείων παρεμβολής, και όχι μόνο τόσες δυνάμεις όσοι είναι οι συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Υπό αυτήν την έννοια, και με την απαίτηση τα A_i να “ικανοποιούν” όλες τις εξισώσεις της (4.25), λαμβάνουμε το διάνυσμα της λύσης των A_i .

γ) Η συνάρτηση μεταφοράς που ορίζεται στην σχέση (4.18), με τα A_i και s_i όπως αυτά εξάγονται μετά την τροποποίηση της μεθόδου, είναι κατά πολύ πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα και το σφάλμα μειώνεται σε ασήμαντες τιμές.

4.4.3 Το κύκλωμα

4.4.3.1 $G(s)$ υπό μορφή γινομένου συναρτήσεων μεταφοράς

Στην παράγραφο 4.9.β βρέθηκε η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος το οποίο για είσοδο $u(t)=\delta(t)$, δηλαδή την κρουστική συνάρτηση, δίνει έξοδο την $y(t)=i(t)$ όπως αυτή δίνεται στην εξίσωση (4.13).

Στο κύκλωμα που θα πραγματοποιήσουμε θα εφαρμόσουμε βηματική είσοδο, και δεδομένου ότι,

$$Y(s)=\mathcal{L}\{U(s)\} * G(s) \text{ τότε } Y(s)=\frac{1}{s} G(s)$$

Οπότε θα έχουμε για $G(s)$ ότι $G(s)=s * Y(s)$

όπου για $Y(s)$, θα ληφθεί η εξίσωση που εντοπίστηκε με την τροποποιημένη μέθοδο Prony αμέσως προηγούμενα, αφού αυτή δίνει την καλύτερη προσέγγιση. Η κρουστική απόκριση, δηλαδή, του συστήματος ή η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος όπως αυτή βρίσκεται όταν είναι γνωστή η έξοδος (σχέση (4.13)), για είσοδο την συνάρτηση Dirac.

Από το πρόγραμμα σε Matlab, το οποίο υλοποιεί αυτόν τον αλγόριθμο, λαμβάνουμε, για την συνάρτηση μεταφοράς , που βρέθηκε από την προσέγγιση της κρουστικής

$$\text{απόκρισης } G_1(s) = \sum_{i=1}^{n_1} A_i \frac{1}{s - s_i}$$

$$A_1=48.4096$$

$$s_1=-0.0488 * 10^{10}$$

$$A_2=-63.2844$$

$$s_2=-0.1335 * 10^{10}$$

$$A_3=7.3888 - 2.2784i$$

$$s_3=(-0.3403 + 0.1789i) * 10^{10}$$

$$A_4=7.3888 + 2.2784i$$

$$s_4=(-0.3403 - 0.1789i) * 10^{10}$$

$$A_5=0.0972$$

$$s_5= -2.006 * 10^{10}$$

$$\text{Και για την } G_2(s) = \sum_{i=1}^{n_2} A_i \frac{1}{s - s_i}$$

$$A_1=19.5428$$

$$s_1=-0.2607 * 10^8$$

$$A_2=-12.15363$$

$$s_2=-0.837 * 10^8$$

$$A_3=-22.8566$$

$$s_3=-1.788 * 10^8$$

$$A_4= 15.4674$$

$$s_4=-3.1183 * 10^8$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε την $G(s)$:

$G(s) = G_1(s) + G_2(s)$ όπου:

$$G_1(s) = \frac{48.3895}{s + 0.04879 \cdot 10^{10}} - \frac{63.2844}{s + 0.13352 \cdot 10^{10}} + \frac{7.3867 - 2.2784i}{s + (0.3403 + 1.7892i) \cdot 10^{10}} + \frac{7.3888 + 2.2784i}{s + (0.3403 - 0.1789i) \cdot 10^{10}} + \frac{0.0972}{s + 2.006 \cdot 10^{10}} \quad (4.30)$$

και

$$G_2(s) = \frac{19.95428}{s + 0.02607 \cdot 10^{10}} - \frac{12.1536}{s + 0.837 \cdot 10^{10}} - \frac{22.8566}{s + 1.788 \cdot 10^{10}} + \frac{15.4674}{s + 3.1183 \cdot 10^{10}} \quad (4.31)$$

Εδώ όμως με τη χρησιμοποίηση βηματικής εισόδου θα έχουμε από τη σχέση (4.26),

$G(s) = G_1(s) + G_2(s)$ με

$$G_1(s) = s \cdot \left\{ \frac{48.3895}{s + 0.04879 \cdot 10^{10}} - \frac{63.2844}{s + 0.13352 \cdot 10^{10}} + \frac{7.3867 - 2.2784i}{s + (0.3403 + 1.7892i) \cdot 10^{10}} + \frac{7.3888 + 2.2784i}{s + (0.3403 - 0.1789i) \cdot 10^{10}} + \frac{0.0972}{s + 2.006 \cdot 10^{10}} \right\} \quad (4.32)$$

και

$$G_2(s) = s \cdot \left\{ \frac{19.95428}{s + 0.02607 \cdot 10^{10}} - \frac{12.1536}{s + 0.837 \cdot 10^{10}} - \frac{22.8566}{s + 1.788 \cdot 10^{10}} + \frac{15.4674}{s + 3.1183 \cdot 10^{10}} \right\} \quad (4.33)$$

Χρησιμοποιώντας το Mathematica η $G(s)$ γράφεται σαν γινόμενο κλασμάτων στη μορφή:

$$G(s) = \frac{s}{s + 2.607 \cdot 10^7} \cdot \frac{s - 5.65 \cdot 10^{11}}{s + 0.2006 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{s + 1.1304 \cdot 10^8}{s + 8.37 \cdot 10^7} \cdot \frac{s + 3.4975 \cdot 10^8}{s + 1.788 \cdot 10^8} \cdot \frac{s + 6.4021 \cdot 10^9}{s + 3.1183 \cdot 10^8} \cdot \frac{s + 1.3686 \cdot 10^{10}}{s + 4.88 \cdot 10^8} \cdot \frac{s + 2.6621 \cdot 10^{11}}{s + 1.335 \cdot 10^9} \cdot \frac{s^2 + 15.191 \cdot 10^7 \cdot s + 0.032833 \cdot 10^{18}}{s^2 + 6.806 \cdot 10^9 s + 14.7809 \cdot 10^{18}} \quad (4.34)$$

Δηλαδή έχει γραφτεί σαν γινόμενο των

$$g_1(s) = \frac{s}{s + 2.607 \cdot 10^7} \quad (4.35)$$

$$g_2(s) = \frac{s - 5.65 \cdot 10^{11}}{s + 0.2006 \cdot 10^{11}} \quad (4.36)$$

$$g_3(s) = \frac{s + 1.1304 \cdot 10^8}{s + 8.37 \cdot 10^7} \quad (4.37)$$

$$g_4(s) = \frac{s + 3.4975 \cdot 10^8}{s + 1.788 \cdot 10^8} \quad (4.38)$$

$$g_5(s) = \frac{s + 6.4021 \cdot 10^9}{s + 3.1183 \cdot 10^8} \quad (4.39)$$

$$g_6(s) = \frac{s + 1.3686 \cdot 10^{10}}{s + 4.88 \cdot 10^8} \quad (4.40)$$

$$g_7(s) = \frac{s + 2.6621 \cdot 10^{11}}{s + 1.335 \cdot 10^9} \quad (4.41)$$

$$g_8(s) = \frac{s^2 + 15.191 \cdot 10^7 \cdot s + 0.032833 \cdot 10^{18}}{s^2 + 6.806 \cdot 10^9 s + 14.7809 \cdot 10^{18}} \quad (4.42)$$

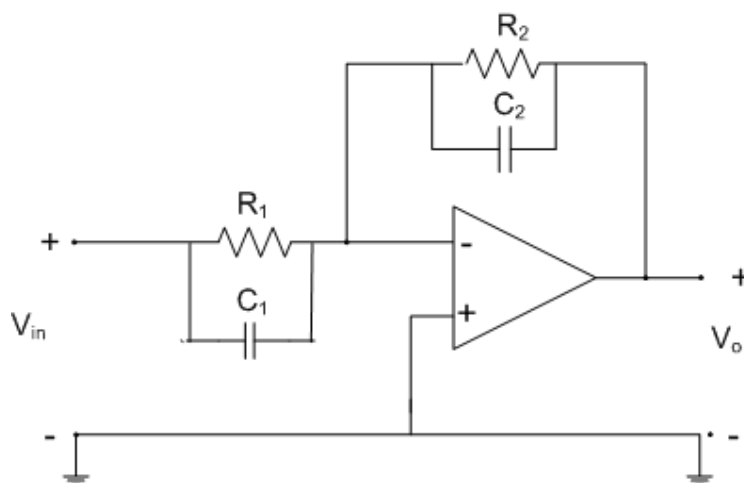
4.4.3.2 Υλοποίηση των βαθμίδων του κυκλώματος

Η $G(s)$ θα μοντελοποιηθεί σαν αλυσωτή σύνδεση των κυκλωμάτων που συνιστούν οι συναρτήσεις μεταφοράς $g_1(s)$ έως $g_8(s)$ [130, 131]. Η μορφή που έχουν οι $g_1(s)$ έως $g_7(s)$ εύκολα παραπέμπει στην υλοποίηση τους. Ένα κύκλωμα όπως το παρακάτω (σχήμα 4.45), θα έχει για συνάρτηση μεταφοράς την:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1}, \quad (4.43)$$

όπου $Z_1 = \frac{R_i \frac{1}{sC_i}}{R_i + \frac{1}{sC_i}} = \frac{R_i}{R_i sC_i + 1} = \frac{1}{s + \frac{1}{R_i C_i}} = \frac{1}{C_i(s + \frac{1}{R_i C_i})}$, άρα η συνάρτηση μεταφοράς

$$\text{γίνεται } \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{C_1(s + \frac{1}{R_1 C_1})}{C_2(s + \frac{1}{R_2 C_2})}. \quad (4.44)$$



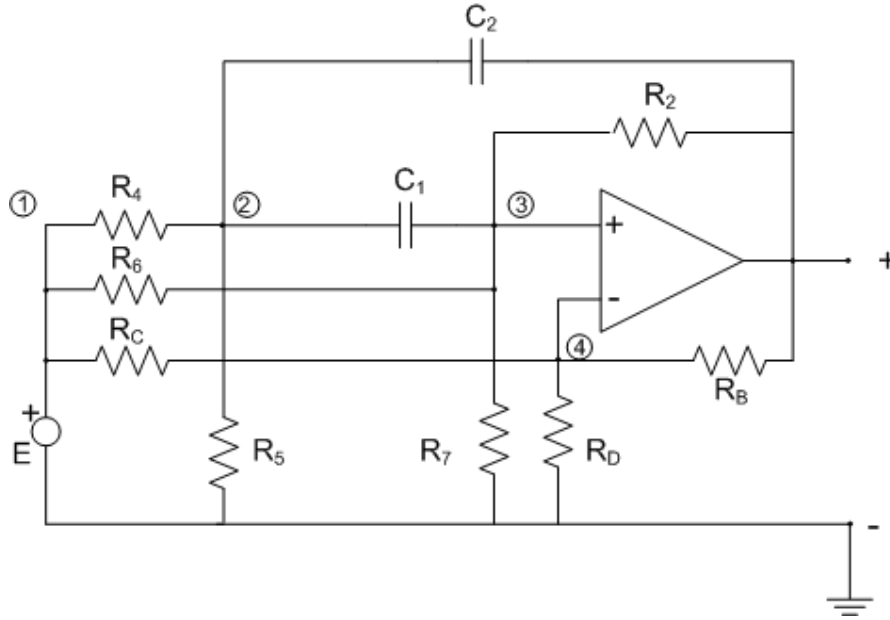
Σχήμα 4.45: Τοπολογία αναστρέφουσας συνδεσμολογίας αρνητικής ανάδρασης

Άρα η τελευταία παίρνει τη μορφή που έχουν οι συναρτήσεις $g_1(s)$ έως $g_7(s)$, οι οποίες είναι της μορφής $\frac{a+s}{b+s}$, αν είναι έστω $C_1 = C_2 = C$, και αν έπειτα εξισώσουμε τα $\frac{1}{R_1 C} = a$ και $\frac{1}{R_2 C} = b$.

Άρα οι συναρτήσεις $g_1(s)$ έως $g_7(s)$ γράφονται στη μορφή

$$g_i(s) = \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 C}\right)}{\left(s + \frac{1}{R_2 C}\right)} \quad (4.45)$$

Για την $g_8(s)$ η οποία είναι της μορφής $K \frac{ms^2 + cs + d}{s^2 + as + b}$ θα προσπαθήσουμε μια υλοποίηση χρησιμοποιώντας το κύκλωμα του Friend, το οποίο έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.46.



Σχήμα 4.46: Το κύκλωμα του Friend που πραγματοποιεί τη γενική συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξης

Για να βρεθούν οι τιμές του κυκλώματος του σχήματος 4.46 είναι απαραίτητο να γίνει επίλυσή του. Επιλύοντας το κύκλωμα στους κόμβους 1, 2, 3 και 4 προκύπτει το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων σε μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} G_4 + G_5 + s(C_1 + C_2) & -sC_1 & -sC_2 \\ -sC_1 & G_2 + G_6 + G_7 + sC_1 & -G_2 \\ 0 & G_C + G_D + G_B & -G_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_4 \\ G_6 \\ G_C \end{bmatrix} \cdot V_{in} \quad (4.46)$$

Επιλύοντας ως προς V_0 προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχήματος 4.46 η οποία είναι:

$$\xi_8(s) = \frac{s^2 + k_1 s + k_2}{s^2 + k_3 s + k_4} \quad (4.47)$$

όπου:

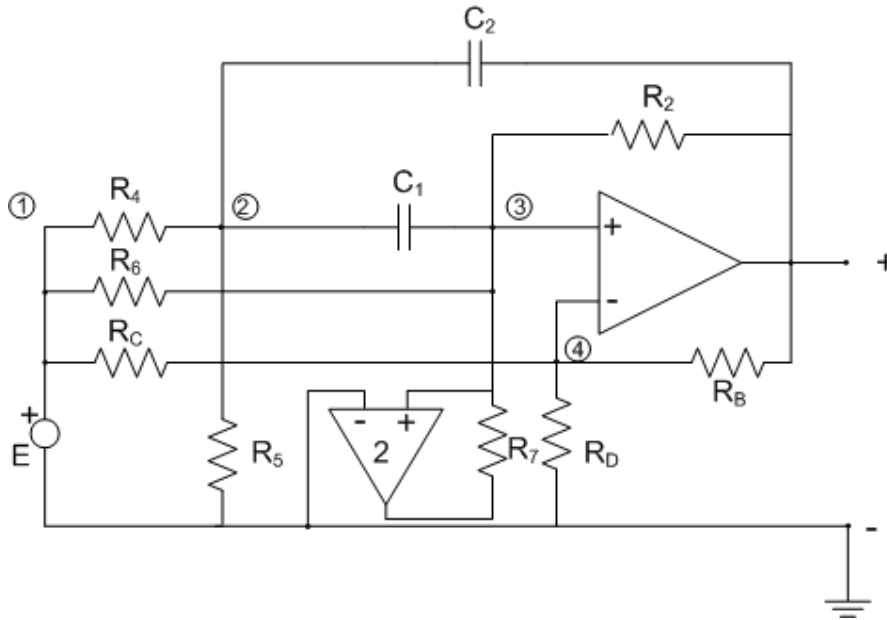
$$k_1 = \frac{(C_1 + C_2)[G_C(G_2 + G_7) - G_6 G_B] + C_1(G_C G_5 - G_B G_4)}{C_1 C_2 G_C} \quad (4.48)$$

$$k_2 = \frac{(G_4 + G_5)[G_C(G_2 + G_7) - G_6 G_B]}{C_1 C_2 G_C} \quad (4.49)$$

$$k_3 = \frac{(C_1 + C_2)[G_2 G_C - G_B(G_6 + G_7)] - C_1 G_B(G_4 + G_5)}{C_1 C_2 G_C} \quad (4.50)$$

$$k_4 = \frac{(G_4 + G_5)[G_2 G_C - G_B(G_6 + G_7)]}{C_1 C_2 G_C} \quad (4.51)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι είναι $G_7 < 0$. Κάτι τέτοιο υλοποιείται με την παράλληλη τοποθέτηση τελεστικού ενισχυτή με κέρδος 2, όπως στο σχήμα 4.47.



Σχήμα 4.47: Το κύκλωμα του Friend με την τροποποίηση, για «αρνητική» R_7 .

Επομένως οι συντελεστές k_1 , k_2 , k_3 και k_4 θα πρέπει να ισούνται με τους αντίστοιχους συντελεστές της σχέσης (4.42). Έτσι προκύπτει το ακόλουθο σύστημα 4 εξισώσεων με 9 αγνώστους:

$$\begin{cases} \frac{(C_1 + C_2)[G_C(G_2 + G_7) - G_6 G_B] + C_1(G_C G_5 - G_B G_4)}{C_1 C_2 G_C} = 0.15191 \cdot 10^9 \\ \frac{(G_4 + G_5)[G_C(G_2 + G_7) - G_6 G_B]}{C_1 C_2 G_C} = 6.806 \cdot 10^9 \\ \frac{(C_1 + C_2)[G_2 G_C - G_B(G_6 + G_7)] - C_1 G_B(G_4 + G_5)}{C_1 C_2 G_C} = 0.032833 \cdot 10^{18} \\ \frac{(G_4 + G_5)[G_2 G_C - G_B(G_6 + G_7)]}{C_1 C_2 G_C} = 14.7809 \cdot 10^{18} \end{cases} \quad (4.52)$$

Προκειμένου να επιλυθεί το παραπάνω σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε το Mathematica. Το Mathematica δεν λειτουργούσε όταν θεωρούσαμε 4 αγνώστους και 9 παραμέτρους, γεγονός που υποδήλωνε ότι υπήρχαν ισοδύναμες εξισώσεις ανάμεσα από τις 4 αυτές όπως φαίνονται στην (4.52).

Θεωρώντας ως αγνώστους τις G_2 , G_4 , G_7 , ενώ τις υπόλοιπες μεταβλητές σαν παραμέτρους με τιμές $C_1=C_2=1$ nF, $G_B=G_C=G_5=G_6=1$ Ω^{-1} προκύπτουν οι σχέσεις :

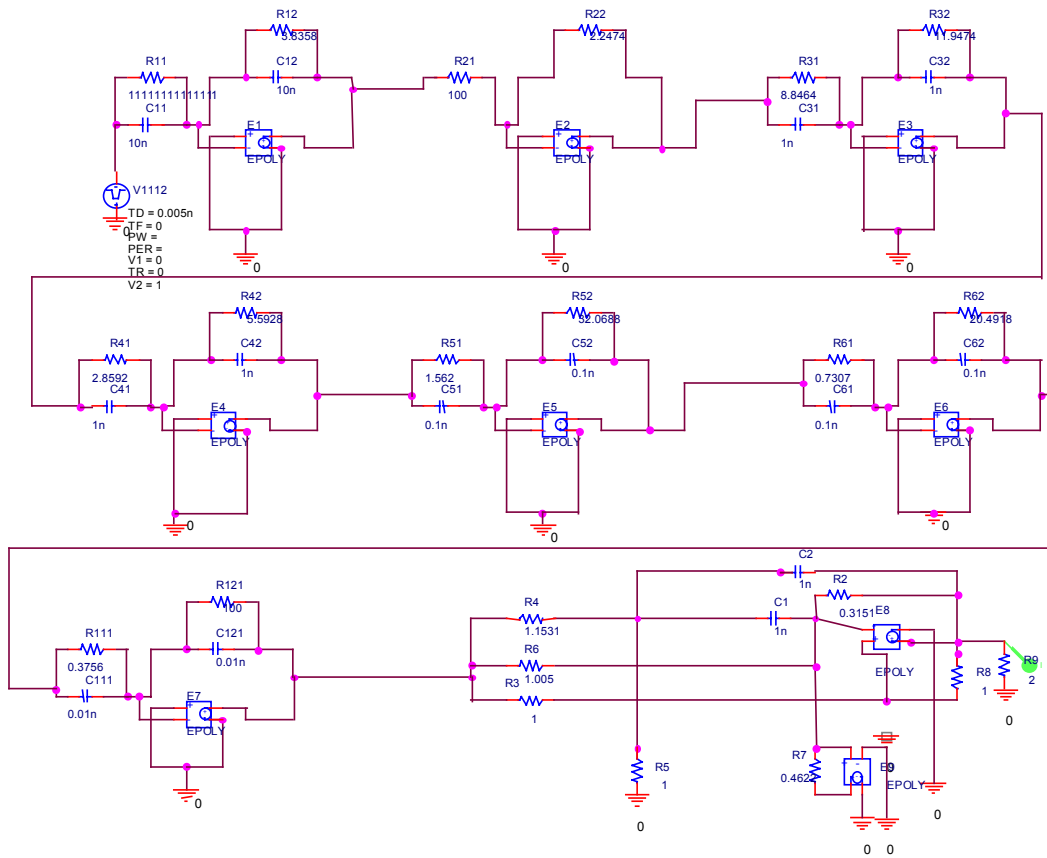
$$G_2 = \frac{(0.0022213G_B + G_C)G_7 + 0.9978G_B G_6}{0.9978G_C} \quad (4.53)$$

$$G_4 = \frac{(C_1 + C_2)(0.0022213G_C G_7 + 0.0022213G_B G_7) + (0.9978G_5 - 0.1516 \cdot 10^9 C_2)C_1 G_C}{0.9978C_1 G_B} \quad (4.54)$$

$$G_7 = \frac{C_1(G_B + G_C)G_5 + 6.6541 \cdot 10^9 C_1 C_2 G_C}{(C_1 + C_2)(G_B + G_C)} \quad (4.55)$$

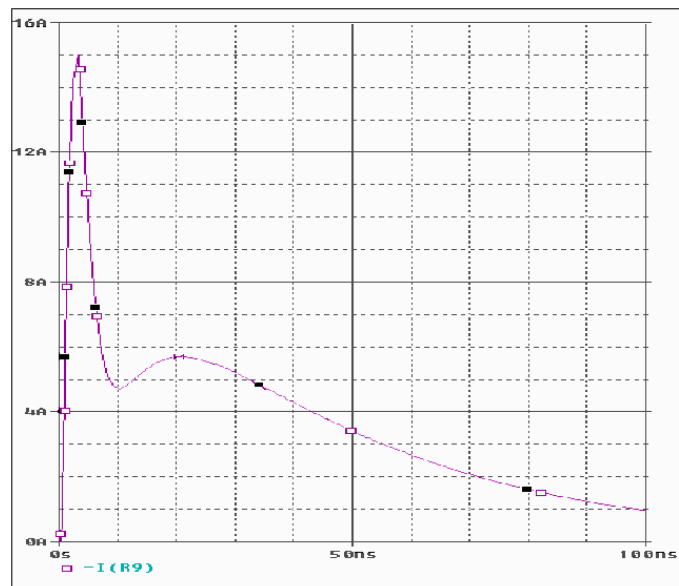
Από τις σχέσεις (4.53), (4.54), (4.55) προκύπτει ότι: $G_2=3,1731$ Ω^{-1} , $G_4=0,8672$ Ω^{-1} και $G_7=2,1635$ Ω^{-1} . Επομένως: $R_2=0,3152$ Ω , $R_4=1,1531$ Ω και $R_7=0,4622$ Ω .

Στο σημείο αυτό έχει βρεθεί η κυκλωματική υλοποίηση των συναρτήσεων $g_i(s)$ έως $g_8(s)$. Κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα εξετάστηκε στην ac-ανάλυση στο PSpice, ενώ παράλληλα βρέθηκε και το γράφημα της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς ($g_i(s)$) σε πρόγραμμα που υλοποιήθηκε σε Matlab. Η σύγκριση των γραφημάτων αυτών (Pspice – Matlab) έδειξε ότι για όλες τις βαθμίδες τα γραφήματα συνέπεσαν ικανοποιητικά, επιβεβαιώνοντας την ορθότητα κατασκευής των κυκλωμάτων αυτών στο πεδίο της συχνότητας. Επίσης, κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα εξετάστηκε και στο πεδίο του χρόνου τόσο στο PSpice, όσο και στο Simulink του Matlab (στο οποίο υλοποιήθηκαν οι συναρτήσεις μεταφοράς). Πάλι, όμοια με πριν, συγκρίναμε για κάθε συνάρτηση $g_i(s)$ τα γραφήματα Pspice – Matlab (Simulink), όπου και διαπιστώθηκε ότι συνέπεσαν για κάθε μια συνάρτηση ικανοποιητικά επιβεβαιώνοντας την ορθότητα κατασκευής τους και στο πεδίο του χρόνου. Τελικά, η αλυσωτή σύνδεση των παραπάνω κυκλωμάτων μας δίνει το ζητούμενο κύκλωμα. Το κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 4.48.



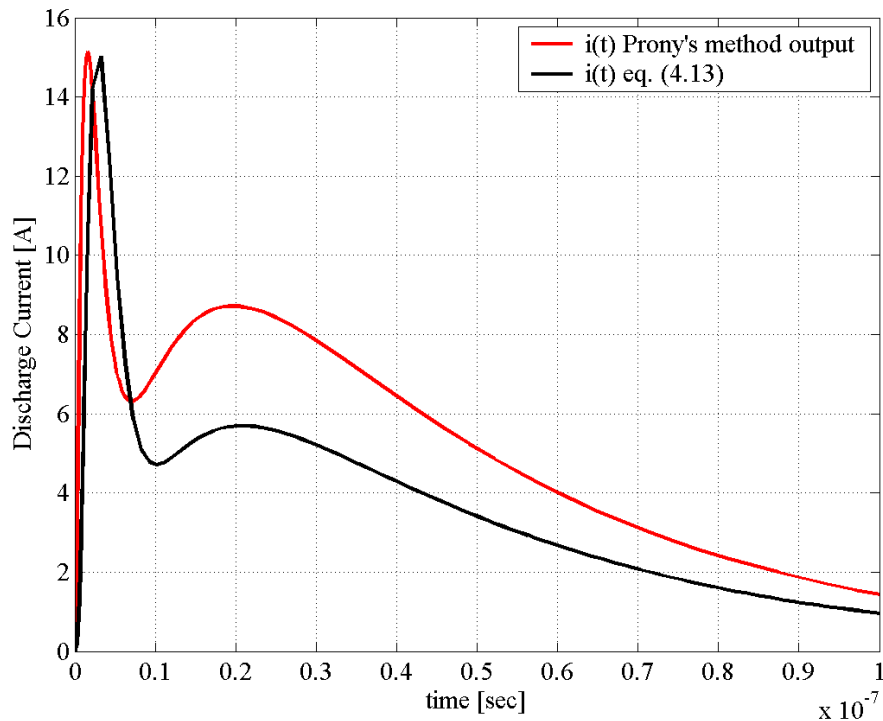
Σχήμα 4.48: Το κύκλωμα για την παραγωγή της ζητούμενης κυματομορφής ρεύματος εκφόρτισης υλοποιημένο στο PSpice.

Το κύκλωμα δίνει έξοδο, για είσοδο βηματική συνάρτηση, όπως έδειξε προσομοίωση στο Spice, την ακόλουθη καμπύλη του σχήματος 4.49.



Σχήμα 4.49: Έξοδος του κυκλώματος για βηματική είσοδο-Προσομοίωση στο PSpice

Με τη λήψη των ζευγών ρεύματος-χρόνου που δίνει το κύκλωμα σύμφωνα με την προσομοίωση στο Spice, έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε σε κοινό γράφημα τη θεωρητική καμπύλη, και αυτήν που προκύπτει από τη μέθοδο Prony, και να ελέγξουμε το κατά πόσο ικανοποιητική είναι η σύμπτωση των δύο καμπύλων. Το σχήμα 4.50, που παρατίθεται πιο κάτω, δείχνει τις δύο αυτές καμπύλες.



Σχήμα 4.50: Κοινό γράφημα της θεωρητικής εξίσωσης και της εξόδου του κυκλώματος

4.5 Συμπεράσματα της υπολογιστικής προσέγγισης

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά παρουσιάστηκαν κυκλωματικές προσομοιώσεις του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με χρήση του προγράμματος PSpice. Αρχικά διαπιστώθηκε η απόκλιση της κυματομορφής του ρεύματος, που παράγει η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτά ορίζονται στο υπάρχον Πρότυπο [17].

Από τις προσομοιώσεις για τα δύο διαφορετικά κυκλωματικά μοντέλα των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων προκύπτει ότι αλλαγή στη σχεδίαση του διακόπτη στις γεννήτριες σύμφωνα με το σχήμα 4.3 μειώνει την τιμή του I_{max} . Επίσης, κυκλωματικές προσομοιώσεις για τα δύο μοντέλα των γεννητριών απέδειξε

ότι η θέση του καλωδίου γείωσης επηρεάζει κατά πολύ την παράμετρο I_{60} , η οποία υπολογίζεται κατά τη διακρίβωση των γεννητριών. Γεγονός είναι πως οι αποκλίσεις του κυκλώματος της γεννήτριας όπως προτείνεται από το υπάρχον Πρότυπο είναι τεράστιες σε σχέση με αυτό που προτείνεται στο μοντέλο 2, τόσο ως προς την κυματομορφή, όσο και ως προς την ενέργεια που έχει. Οι συγκρίσεις αυτές βέβαια θα μπορούσαν στο μέλλον να γίνουν και για πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις ρεύματος άλλων γεννητριών εκτός Schaffner.

Πέρα όμως από τις κυκλωματικές προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο πρώτο μισό του παρόντος κεφαλαίου έγινε προσπάθεια να βρεθεί μια εξίσωση, η οποία θα μπορούσε να περιγράψει την κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Δεδομένου ότι υπάρχει απόκλιση της κυματομορφής του ρεύματος, που παράγει η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως αυτά ορίζονται στο υπάρχον Πρότυπο [17] όταν γίνονται κυκλωματικές προσομοιώσεις και χρησιμοποιείται το κύκλωμα της γεννήτριας, όπως αυτό ορίζεται στο Πρότυπο, εισέρχονται σφάλματα στα υπολογιζόμενα ηλεκτρικά μεγέθη των προσομοιώσεων. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν αυτά τα σφάλματα χρησιμοποιήθηκε γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος έχοντας σαν εισόδους του πειραματικά δεδομένα βελτιστοποιούσε τις παραμέτρους τεσσάρων υποψηφίων εξισώσεων, που θα μπορούσαν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τελικά, αφού ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου και χρησιμοποιώντας διάφορες συναρτήσεις δειγματοληψίας για τα πειραματικά δεδομένα για διάφορες χρονικές περιόδους, βρέθηκε ότι η πιο κατάλληλη συνάρτηση για να περιγράψει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι η (4.13). Μάλιστα, η (4.13) είναι η καλύτερη εξίσωση τόσο επειδή παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα για οποιαδήποτε συνάρτηση δειγματοληψίας σε σχέση με τις υπόλοιπες εξισώσεις, όσο κι επειδή η καμπύλη της για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της έχει την καλύτερη προσαρμογή πάνω στα πειραματικά δεδομένα. Το γεγονός αυτό καθιστά επιβεβλημένο να συμπεριληφθεί η εξίσωση αυτή στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, ώστε να μην υπάρχει πλέον η απόκλιση μεταξύ κυκλώματος και κυματομορφής.

Όσον αφορά τις διάφορες συναρτήσεις δειγματοληψίας, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο φάνηκαν τα διαφορετικά αποτελέσματα, που είχαμε για κάθε συνάρτηση δειγματοληψίας. Όταν υπήρχε ισοκατανομή των επιλεχθέντων πειραματικών δεδομένων υπήρχε πολύ καλή σύγκλιση των

αποτελεσμάτων που έδινε ο γενετικός αλγόριθμος με τα αντίστοιχα πειραματικά στην ουρά της κυματομορφής. Αντίθετα, η προσέγγιση του πρώτου μεγίστου ήταν λιγότερο ικανοποιητική σε σχέση με τις συναρτήσεις δειγματοληψίας, οι οποίες λάμβαναν πιο πολλά σημεία στα πρώτα ns και λιγότερα στα επόμενα. Επομένως, αν κάναμε μια αποτίμηση για το ποιες συναρτήσεις θα πρέπει να προτιμώνται θα λέγαμε ότι είναι αυτές που έχουν πολλά σημεία στα πρώτα ns και λιγότερα στα επόμενα, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις συναρτήσεις δειγματοληψίας I_{dataV} , $exp4N$ και $I_{data20N}$. Τονίζεται και πάλι ότι η επιλογή μιας κατάλληλης συνάρτησης δειγματοληψίας για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου είναι εξαιρετικά σημαντική, γιατί ο γενετικός αλγόριθμος δεν μπορεί να λάβει σαν είσοδό του όλο το πλήθος των σημείων που μετρήθηκαν, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου υπολογιστικού χρόνου, που απαιτείται.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι οι συναρτήσεις που ελαχιστοποίησε ο γενετικός αλγόριθμος ήταν δύο, όπως αυτές φαίνονται στις σχέσεις (4.16) και (4.17). Παρατηρείται ότι επιλέγοντας την (4.17), η οποία εκφράζει το σχετικό σφάλμα, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου συγκλίνουν καλύτερα στα πειραματικά σε σχέση με τα αντίστοιχα που δίνει η σχέση (4.16), η οποία εκφράζει το σχετικό σφάλμα. Συγκεκριμένα, υπάρχει πολύ καλύτερη προσέγγιση του πρώτου μεγίστου του ρεύματος εκφόρτισης στα πρώτα ns, ενώ η προσέγγιση της καμπύλης των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι εξίσου ικανοποιητική με αυτά που δίνει ο γενετικός αλγόριθμος, όταν η συνάρτηση ελαχιστοποίησης είναι η (4.16). Αυτό συμβαίνει γιατί όταν η ελαχιστοποίηση γίνεται με το σχετικό σφάλμα όλα τα σημεία “πρακτικά” έχουν την ίδια βαρύτητα. Όταν όμως χρησιμοποιούμε το απόλυτο σφάλμα είναι σαν να έχουμε ζητούμενο τη σύγκλιση στα σημεία που έχουν μέγιστο στη συνάρτηση (διότι εκεί υπήρχε το μέγιστο σφάλμα).

Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου βρέθηκε η συνάρτηση μεταφοράς κυκλώματος το οποίο υπό δεδομένη είσοδο (εδώ για είσοδο την βηματική συνάρτηση) παράγει ως έξοδο την γραφική παράσταση της εξίσωσης (4.13), η οποία είναι και η βέλτιστη. Για τις ανάγκες αυτής της προσπάθειας αναπτύχθηκε μέθοδος, που αποτελεί μια τροποποίηση της μεθόδου Prony από τη Σύνθεση Δικτύων. Για την εξαγόμενη από αυτήν την μέθοδο συνάρτηση μεταφοράς, κατασκευάστηκε κύκλωμα το οποίο χαρακτηρίζει αυτή η συνάρτηση μεταφοράς. Η κυκλωματική προσομοίωση στο PSpice έδειξε πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος της εξίσωσης (4.13) και του ρεύματος που βγάζει το κύκλωμα, όπως αυτό βρέθηκε μετά

από εφαρμογή της μεθόδου Prony. Ενδεχομένως το κύκλωμα που προτείνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλωματικές προσομοιώσεις, ώστε να αναιρεθεί το πρόβλημα που υπάρχει με το κύκλωμα του υπάρχοντος Προτύπου.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια υλοποίηση αυτού του κυκλώματος με ιδανικά στοιχεία: αντιστάσεις, πυκνωτές, και τελεστικούς ενισχυτές. Το μειονέκτημα της είναι όμως ότι το Γινόμενο Κέρδους-Εύρους Ζώνης (Gain Bandwidth Product - GBWP) των 8 βαθμίδων του κυκλώματος της παρούσας εφαρμογής είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των τελεστικών ενισχυτών που συνήθως υπάρχουν στο εμπόριο (με συνήθεις τιμές που φτάνουν περί τα 2 MHz) και άρα δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις του προβλήματός μας. Παρόλα αυτά πρόσφατα έχουν κατασκευαστεί και είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο τελεστικοί ενισχυτές με GBWP της τάξεως των 1,5 GHz [131]. Επίσης, πρόσφατη ερευνητική εργασία [132] έδειξε τη δυνατότητα κατασκευής τελεστικών ενισχυτών με GBWP που φτάνει τα 37GHz.

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αποτελούν την κύρια αιτία καταστροφής ηλεκτρονικών και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορεί να διαρκεί λίγα ns, που όμως είναι αρκετά για να καταστρέψουν ηλεκτρονικές κυρίως συσκευές. Για το λόγο αυτό έχει θεσπισθεί το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2, μέσα στο οποίο ορίζεται η διαδικασία ελέγχου ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον εξοπλισμό, που χρησιμοποιείται στις δοκιμές, καθώς επίσης και τη διαδικασία με την οποία θα πρέπει να γίνεται η διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει υπάρξει πληθώρα δημοσιεύσεων πάνω στο φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει εστιάσει κυρίως σε δύο προβλήματα, που άπτονται του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το πρώτο είναι να διερευνηθεί, γιατί σε ορισμένες περιπτώσεις που εξετάζονται δοκίμια έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τη μια γεννήτρια το ίδιο δοκίμιο να περνάει τη δοκιμή και με μια άλλη να αποτυγχάνει. Προκειμένου να γίνει αυτό μετράται στην παρούσα διατριβή το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που χρησιμοποιούνται στις εν λόγω δοκιμές, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης βρίσκεται εντός μονωτικού υποστρώματος ή στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας. Οι μετρήσεις είναι συγκριτικές, τόσο μεταξύ των γεννητριών, όσο και για την ίδια γεννήτρια, αλλά για διαφορετική κατεύθυνση ως προς τη γεννήτρια. Επίσης, στην παρούσα εργασία έχει δοθεί βάρος στην εύρεση μιας εξίσωσης, η οποία θα μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η ύπαρξη ασυμφωνίας στο υπάρχον Πρότυπο μεταξύ του κυκλώματος και της κυματομορφής που ορίζει, οδηγεί στην ανάγκη εύρεσης μιας αναλυτικής εξίσωσης, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιείται αντί του κυκλώματος σε κυκλωματικές προσομοιώσεις, ώστε να μην υπάρχουν σφάλματα στα υπολογιζόμενα ηλεκτρικά μεγέθη. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνοντας σαν είσοδό του πειραματικά δεδομένα

από μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βελτιστοποιεί τις παραμέτρους υποψήφιων εξισώσεων για το ρεύμα. Τέλος, έχοντας βρει με αυτόν τον τρόπο την βέλτιστη εξίσωση και χρησιμοποιώντας μεθοδολογία από τη Σύνθεση Δικτύων, προτείνεται ένα κύκλωμα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που παράγει την καθοριζόμενη από το Πρότυπο κυματομορφή, αναιρώντας την υπάρχουσα στη σημερινή μορφή του Προτύπου προαναφερθείσα ασυμφωνία.

Στη διδακτορική αυτή διατριβή ακολουθήθηκε η εξής διάρθρωση. Αφού στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση στο φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και εξηγήθηκαν πλήρως όσα ορίζονται στο υπάρχον Πρότυπο για τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, ακολούθως στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι πειραματικές διατάξεις, που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό της παρούσας διατριβής. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι μετρήσεις του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αλλά και του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης βρισκόταν επί μονωτικού υποστρώματος ή στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας. Εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το πώς το διαφορετικό πεδίο από γεννήτρια σε γεννήτρια, αλλά και για την ίδια γεννήτρια, ανάλογα με την κατεύθυνση προς την οποία μετράται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, μπορεί να επηρεάσει τον υπό εξέταση εξοπλισμό. Κατόπιν, στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν κυκλωματικές προσομοιώσεις του κυκλώματος, που ορίζει το υπάρχον Πρότυπο, καθώς και κάποιων τροποποιημένων μορφών του. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο γενετικός αλγόριθμος, που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του οποίου βρέθηκαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πλέον κατάλληλης εξίσωσης, η οποία μπορεί να περιγράψει την κυματομορφή του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Τέλος, με χρήση μεθόδου από τη Σύνθεση Δικτύων προτείνεται κύκλωμα για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας τη μέθοδο Prony από τη Σύνθεση Δικτύων βρέθηκε ποιο είναι εκείνο το κύκλωμα το οποίο δίνει την κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο και παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.2.

5.2 Συμβολή – Πρωτοτυπία της διατριβής

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αποτελούν την κύρια αιτία δυσλειτουργίας έως και καταστροφής ηλεκτρονικών και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορεί να διαρκεί λίγα ns μόνο, αυτά, όμως, είναι αρκετά για να διαταράξουν τη λειτουργία ή και να καταστρέψουν ηλεκτρονικές,

κυρίως, συσκευές. Για το λόγο αυτό έχει θεσπισθεί το διεθνές Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [19], το οποίο ορίζει τη διαδικασία ελέγχου ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον εξοπλισμό, που χρησιμοποιείται στις δοκιμές, καθώς, επίσης, και τη διαδικασία, με την οποία θα πρέπει να γίνεται η διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις πάνω στο φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει εστιασθεί, κυρίως, σε δύο προβλήματα, που άπτονται του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Το πρώτο είναι να διερευνηθεί, γιατί, σε ορισμένες περιπτώσεις δοκιμών με ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, το ίδιο δοκίμιο με τη μια γεννήτρια περνάει τη δοκιμή και με μια άλλη αποτυγχάνει. Προκειμένου να γίνει αυτό, μετράται στην παρούσα διατριβή το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που χρησιμοποιούνται στις εν λόγω δοκιμές, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι είτε στο κέντρο μονωτικού υποστρώματος, είτε στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας. Οι μετρήσεις είναι συγκριτικές, τόσο μεταξύ διαφόρων γεννητριών, όσο και για την ίδια γεννήτρια, αλλά για διαφορετική κατεύθυνση ως προς αυτή. Το δεύτερο πρόβλημα, στο οποίο δίνει βάρος η παρούσα εργασία, είναι η εύρεση μιας εξίσωσης ικανής να περιγράψει με ακρίβεια το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η ύπαρξη ασυμφωνίας στο υπάρχον Πρότυπο μεταξύ του κυκλώματος και της κυματομορφής που ορίζει, οδηγεί στην ανάγκη εύρεσης μιας αναλυτικής εξίσωσης, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιείται αντί του κυκλώματος σε κυκλωματικές προσομοιώσεις, ώστε να μην υπάρχουν σφάλματα στα υπολογιζόμενα ηλεκτρικά μεγέθη. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος, λαμβάνοντας ως είσοδό του πειραματικά δεδομένα, από μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, βελτιστοποιεί τις παραμέτρους υποψήφιων εξισώσεων για το ρεύμα. Τέλος, από την εξίσωση αυτή, βρέθηκε το κύκλωμα της γεννήτριας, που παράγει τη ζητούμενη κυματομορφή.

Η συμβολή-πρωτοτυπία της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγκειται στα ακόλουθα:

- Πρόταση αλλαγής των διαστάσεων της μεταλλικής επιφάνειας, πάνω στην οποία είναι τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, κατά τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Σειρά πειραμάτων, που έγιναν για τη μέτρηση του ρεύματος εκφόρτισης, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος πάνω σε διάφορα υλικά διαφόρων διαστάσεων απέδειξε ότι, στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, θα μπορούσε, πιθανότατα, να αποφευχθεί ο αυστηρός ορισμός των διαστάσεων της μεταλλικής επιφάνειας, “τουλάχιστον 1,5 m x 1,5 m” και να γίνει πιο ελαστικός. Από τα πειράματα, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 της διατριβής, προκύπτει ότι, οι τέσσερις παράμετροι του ρεύματος είναι εντός των ορίων και για μικρότερες διαστάσεις της μεταλλικής επιφάνειας, έως και 1 m x 1 m. Συνεπώς, στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, οι διαστάσεις θα μπορούσαν να ελαττωθούν και η περί αυτών απαίτηση να γίνει “τουλάχιστον 1 m x 1 m”. Το γεγονός αυτό θα διευκόλυνε, σε πρακτικό επίπεδο, τα ασχολούμενα με τη συγκεκριμένη δοκιμή εργαστήρια, επειδή η σμίκρυνση των ελαχίστων διαστάσεων της μεταλλικής επιφάνειας θα ελάττωνε τον όγκο της απαιτούμενης για τη διακρίβωση των γεννητριών διάταξης. Επίσης, η κατακόρυφη διάταξη της μεταλλικής επιφάνειας, κατά τη διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, θα μπορούσε να βελτιώσει την επαναληψιμότητα της διαδικασίας, κάτι, που θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου: δεδομένου ότι το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης παραμένει, τότε, λόγω της βαρύτητας, σταθερό, εξασφαλίζεται μικρότερη αβεβαιότητα για την παράμετρο I_{60} , η οποία επηρεάζεται από τη θέση του καλωδίου αυτού.

- Μέτρηση του παραγόμενου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας και για διάφορες κατευθύνσεις.

Είναι γνωστό ότι έχουν γίνει κατά καιρούς μετρήσεις του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και έχει διαπιστωθεί ότι κάθε μια γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Από την υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι, δεν είχε γίνει, μέχρι τώρα, μια πλήρης μελέτη του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που προέρχεται από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για διάφορες κατευθύνσεις προς την ίδια γεννήτρια, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος πάνω σε γειωμένη μεταλλική επιφάνεια. Από τα πειράματα, που διεξήχθησαν, αποδεικνύεται ότι, μία και η αυτή γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό

πεδίο, στις διάφορες ως προς αυτή κατευθύνσεις, και, κατά συνέπεια, διαφορετικές επαγόμενες τάσεις. Το γεγονός αυτό είναι αξιοσημείωτο, διότι, ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχει η γεννήτρια ως προς το δοκίμιο, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα στον ελεγχόμενο ηλεκτροτεχνικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό: ειδικά, όταν η έκβαση των δοκιμών είναι σε οριακό σημείο, είναι δυνατό το δοκίμιο να περνά τη δοκιμή, για ένα δεδομένο προσανατολισμό της γεννήτριας ως προς αυτό, και να αποτυγχάνει με την ίδια γεννήτρια, αλλά για άλλο προσανατολισμό της, υπό την αυτή τάση φόρτισης, και, προφανώς, και ρεύμα εκφόρτισης. Το γεγονός ότι έχουμε διαφορετικό παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, ανάλογα με τον προσανατολισμό της γεννήτριας ως προς το ελεγχόμενο δοκίμιο, και, κατά συνέπεια, διαφορετικές επαγόμενες τάσεις, οδηγεί σε διαφορετική έκβαση της δοκιμής. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες, εν όψει της επερχόμενης αναθεώρησης του Προτύπου, η οποία θα πρέπει, όχι μόνο να περιλαμβάνει παραμέτρους και όρια για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά και μετρήσεις του παραγόμενου πεδίου, για διάφορους προσανατολισμούς ως προς τη γεννήτρια.

- Μέτρηση του παραγόμενου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος στο κέντρο μονωτικού υποστρώματος.

Είναι η πρώτη φορά που διεξήχθησαν πειράματα, για τη μέτρηση του παραγόμενου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος σε μονωτικό υλικό και όχι σε γειωμένη μεταλλική επιφάνεια. Τα πειράματα αυτά προσομοιώνουν καλύτερα το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις: στις εκφορτίσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στην καθημερινή μας ζωή δεν υπάρχει γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, αλλά συμβαίνουν συνήθως σε μονωτικά υλικά (π.χ. η εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος πάνω σε μια ηλεκτρονική συσκευή, η οποία βρίσκεται σε ένα ξύλινο γραφείο). Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, με τον ομοαξονικό προσαρμοστή στο κέντρο μονωτικού υποστρώματος, επιβεβαιώθηκε, όπως όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας, ότι, κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και, επιπλέον, ότι μία και η

αυτή γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, στις διάφορες ως προς αυτή κατευθύνσεις.

- Διαπίστωση της αναντιστοιχίας, που υπάρχει μεταξύ της κυματομορφής και του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όπως αυτά ορίζονται στο υπάρχον Πρότυπο.

Η κυματομορφή, που ορίζει το ισχύον Πρότυπο για τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αποτελείται από δύο τμήματα: Ένα πρώτο μέγιστο, που ονομάζεται “αρχικό μέγιστο”, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, οπότε και εμφανίζεται το απολύτως μέγιστο ρεύμα, και ένα δεύτερο μέγιστο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Προσομοιώσεις, που έγιναν με χρήση του προγράμματος Pspice, απέδειξαν ότι, η κυματομορφή του ρεύματος, που παράγεται από την προτεινόμενη από το Πρότυπο γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, είναι διαφορετική από αυτή, που ορίζει το ίδιο Πρότυπο.

- Εύρεση μιας αναλυτικής εξίσωσης, η οποία περιγράφει με ακρίβεια την κυματομορφή του ρεύματος, του προερχόμενου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.

Στο υπάρχον Πρότυπο, για τις δοκιμές ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, υπάρχει έλλειψη μιας αναλυτικής μαθηματικής εξίσωσης, ικανής να περιγράψει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το λόγο που αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο (ασυμφωνία στο Πρότυπο μεταξύ υποδεικνυόμενου κυκλώματος και κυματομορφής του ρεύματος δοκιμής), κάποιος, που κάνει κυκλωματικές προσομοιώσεις μέσω υπολογιστή και χρησιμοποιεί το κύκλωμα, του Προτύπου, εισάγει σφάλμα στα ηλεκτρικά μεγέθη του κυκλώματος, που θέλει να επιλύσει. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, και προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα, αναπτύχθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος βελτιστοποιεί τις τιμές των παραμέτρων διαφόρων εξισώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και μπορούν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τελικά, αποδείχθηκε ότι, η εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι της μορφής εκείνης, που είχε χρησιμοποιήσει ο Heidler [23] για το κεραυνικό ρεύμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η εξίσωση αυτή φαίνεται να είναι σκόπιμο να συμπεριληφθεί στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου. Η εξίσωση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά τη διακρίβωση των γεννητριών και να αποτελέσει μια ακόμα ελεγχόμενη παράμετρο: θα πρέπει δηλαδή, να ορισθεί ένα περιθώριο σφάλματος της κυματομορφής, που δίνει η δεδομένη εξίσωση, μέσα στο οποίο θα πρέπει να βρίσκεται η κυματομορφή του ρεύματος κάθε γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

- Μεθοδολογία επιλογής των πειραματικών σημείων της κυματομορφής του ρεύματος, το οποίο μετρήθηκε, για χρήση τους στο γενετικό αλγόριθμο, που αναπτύχθηκε.

Για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος αναπτύχθηκε χρειάζονται πειραματικά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται ως είσοδος του. Το πρόβλημα, όμως, που υπάρχει είναι ότι, τα δεδομένα αυτά δεν κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν στο σύνολό τους, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού χρόνου, που απαιτείται. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιήθηκαν διάφορες συναρτήσεις δειγματοληψίας, για τις οποίες υπήρξαν, αντίστοιχα, διάφορα αποτελέσματα από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου. Τελικά, αποδείχθηκε ότι, όσο περισσότερα σημεία επιλέγουμε στα πρώτα ns του ρεύματος εκφόρτισης, τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή της βέλτιστης εξίσωσης στα πειραματικά δεδομένα. Όμως, τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου διαφέρουν, επίσης, ανάλογα με τη συνάρτηση ελαχιστοποίησης, που κάθε φορά επιλέγεται: διαπιστώθηκε ότι, ο γενετικός αλγόριθμος έχει καλύτερη σύγκλιση προς τα πειραματικά αποτελέσματα, όταν ως συνάρτηση ελαχιστοποίησης επιλέγεται το απόλυτο, και όχι το σχετικό σφάλμα.

- Εύρεση κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που ανταποκρίνεται στην κυματομορφή, που ορίζει το υπάρχον Πρότυπο.

Αφού διαπιστώθηκε η ασυμφωνία μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και του κυκλώματος της γεννήτριας, όπως αυτά ορίζονται στο υπάρχον Πρότυπο, έγινε εφαρμογή της μεθόδου Prony, από τη Σύνθεση Δικτύων ώστε να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος. Συγκεκριμένα η, κατάλληλα τροποποιημένη, μέθοδος Prony υπολόγισε τη συνάρτηση μεταφοράς κυκλώματος που παράγει ρεύμα μορφής ίδιας με αυτό που περιγράφεται στην εξίσωση του Heidler. Κατόπιν, η συνάρτηση αυτή υλοποιήθηκε κυκλωματικά στο πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice, οπότε και βρέθηκε ότι το

σχεδιασθέν κύκλωμα δίνει ρεύμα εκφόρτισης πολύ κοντά σε αυτό της εξίσωσης του Heidler. Το κύκλωμα, το οποίο προτείνεται από την παρούσα διατριβή, είναι χρήσιμο για την προσομοίωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων κατά τον έλεγχο διαφόρων δοκιμών.

- Διερεύνηση του κατά πόσο η ηλεκτροστατική εκφόρτιση σχετίζεται με την απώλεια λιπώδους ιστού στο δέρμα.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια συνεργασία με το ερευνητικό κέντρο Vito στο Βέλγιο, στο οποίο ο γράφων είχε προσκληθεί, για να συμβάλει στη διερεύνηση ενδεχόμενης συσχέτισης της πάθησης της ημικυκλικής λιποατροφίας (lipoatrophia semicircularis) με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Συγκεκριμένα, συμμετείχε στη διερεύνηση του ενδεχομένου η ηλεκτροστατική εκφόρτιση, η οποία λαμβάνει χώρα στα έπιπλα, που υπάρχουν στο εργασιακό περιβάλλον μιας βελγικής τράπεζας, να επηρεάσει την ανθρώπινη υγεία, και, συγκεκριμένα, να προκαλέσει την ημικυκλική λιποατροφία, συνεπεία της οποίας οι ασθενείς εμφανίζουν στο πάνω μέρος των μηρών τους ζώνες, στις οποίες δεν υπάρχει λιπώδης ιστός. Από τη διεξαχθείσα έρευνα, και αφού αποκλείσθηκε η συσχέτιση του παραγόμενου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πεδίου με την πάθηση αυτή, διαπιστώθηκε ότι, υπάρχει, ενδεχομένως, συσχέτιση της συγκεκριμένης πάθησης με το, διαρρέον τους μηρούς των εργαζομένων, ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, από τα έπιπλα γραφείου.

Βάσει των παραπάνω, η Διδακτορική Διατριβή κρίνεται πρωτότυπη, ενώ η έρευνα, οι προτάσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, συμβάλλουν καθοριστικά στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αλλά και προτάσεων για την επερχόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, οι οποίες θα περιορίσουν την αβεβαιότητα στις εν λόγω δοκιμές.

5.3 Επέκταση της διατριβής

Αντικείμενο μίας μελλοντικής ερευνητικής προσπάθειας που θα επεκτείνει τις μεθοδολογίες και τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής αποτελούν:

- Χρήση του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για το σκοπό της παρούσας διατριβής ή άλλης μεθόδου βελτιστοποίησης, που θα λαμβάνει σαν είσοδο μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε πραγματικά δοκίμια και όχι του ρεύματος που μετράται κατά τη διακρίβωση των γεννητριών. Για το σκοπό

αυτό απαιτείται χρήση ειδικού αισθητήρα μέτρησης ρεύματος (πηνίο Rogowski), ο οποίος θα έχει χρόνο ανόδου μικρότερο από 1ns.

- Το γεγονός ότι η μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ακόμα ένα υπό διερεύνηση ζήτημα, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν, ανάλογα με τον πειραματικό εξοπλισμό, που κάθε φορά χρησιμοποιείται καθιστά επιβεβλημένη στο μέλλον την ανάπτυξη μιας μεθόδου και την εύρεση της πειραματικής διάταξης, η οποία θα εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αυτό ενδεχομένως θα περιλαμβάνει το σχεδιασμό νέων τύπων αισθητήρων, τη διεξαγωγή μετρήσεων για διάφορες θέσεις των γειώσεων κλπ.
- Η μελέτη και κατασκευή κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με χρήση αποκλειστικά και μόνο παθητικών στοιχείων. Κάτι τέτοιο όμως είναι αρκετά δύσκολο να γίνει λόγω της μορφής που έχει η συνάρτηση μεταφοράς, η οποία δεν είναι συνήθης για να υλοποιηθεί με τις ευρέως διαδεδομένες τεχνικές κατασκευής κυκλωμάτων αποκλειστικά και μόνο με παθητικά στοιχεία. Στο πρόβλημα αυτό ενδεχομένως να δίνει λύση η μέθοδος του Darlington [133], η οποία φαίνεται να υλοποιεί αποκλειστικά και μόνο με παθητικά στοιχεία κύκλωμα το οποίο χαρακτηρίζεται από οποιαδήποτε συνάρτηση μεταφοράς.
- Κατασκευή κυκλώματος γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, η οποία αφενός θα παράγει την κυματομορφή του ρεύματος, όπως αυτή ορίζεται στο υπάρχον Πρότυπο και αφετέρου θα είναι έτσι κατασκευασμένο και σε συνδυασμό με τη θωράκιση του εξωτερικού περιβλήματος της γεννήτριας, ώστε να εξασφαλίζει την ομοιομορφία του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αυτό φυσικά προϋποθέτει όχι μόνο προσομοιώσεις, ενδεχομένως μέσω κάποιου υπολογιστικού πακέτου για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αλλά και πείραμα με ανάλογες πειραματικές διατάξεις όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, οι οποίες θα επιβεβαιώνουν τόσο την κυματομορφή του παραγόμενου ρεύματος, όσο και την ομοιομορφία του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Π.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων της εταιρείας Schaffner την NSG-433 [134] και την NSG-438 [135]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτές.

Π.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433, η οποία φαίνεται στο σχήμα Π.1 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις της τάξης των ± 18 kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο πιστόλι μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο, το οποίο δείχνει την τάση εκφόρτισης.



Σχήμα Π.1: Η γεννήτρια NSG-433

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία, καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή, η οποία

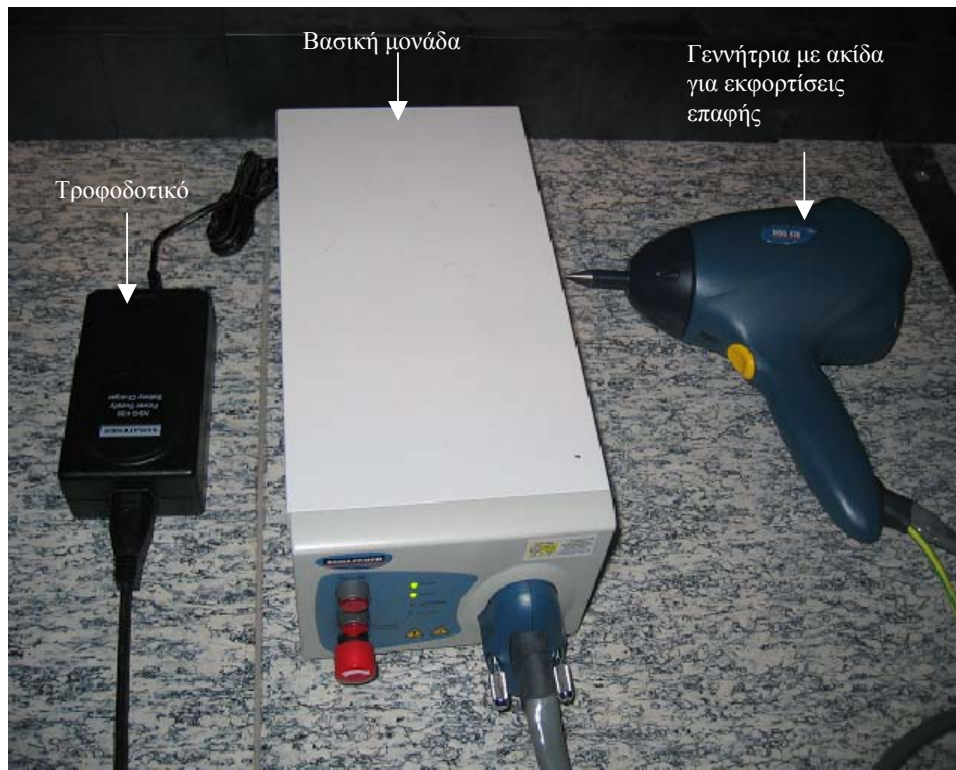
ονομάζεται προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής, καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκφορτίσεων μέσω αέρα φαίνονται στο σχήμα Π.2. Η γεννήτρια NSG-433 περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκφορτίσεων, που πραγματοποιούνται.



Σχήμα Π.2: Ακίδες για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής για τη γεννήτρια NSG-433

Π.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στο σχήμα Π.3 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η οθόνη είναι οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής.



Σχήμα Π.3: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

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



Σχήμα Π.4: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες

Στον πίνακα Π.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δυο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433 και NSG-438, που χρησιμοποιήσαμε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

	NSG-433	NSG-438
Πυκνωτής εκκένωσης C_s	150 pF \pm 10%	150 pF
Αντίσταση εκκένωσης R_d	330 Ω \pm 10%	330 Ω
Αντίσταση φόρτισης R_c	100 M Ω	50 M Ω
Τάση εξόδου V_0	2-18 kV για εκφορτίσεις στον αέρα 2-9 kV για εξ επαφής εκφορτίσεις	200 V-30 kV για εκφορτίσεις στον αέρα και για εκφορτίσεις εξ επαφής
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% V_0)	>5 sec	>5 sec
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (t_r)	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις \leq 8 kV 0,7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις \leq 8 kV 0,7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις
Μέγιστο ρεύματος	2 kV: 7,5A \pm 10% 4 kV: 15A \pm 10%	2 kV: 7,5A \pm 10% 4 kV: 15A \pm 10%
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240 Vac, 50-60 Hz	100/120/220/240 Vac, 50-60 Hz
Κατανάλωση	25 VA	25 VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40 $^{\circ}$ C	5-40 $^{\circ}$ C
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%	20%-80%

Πίνακας Π.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Π.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [116] δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε ο MD 101 της Schaffner.

Στο σχήμα Π.5 παρουσιάζεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής που χρησιμοποιήθηκε και στο σχήμα Π.6 ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη.



Σχήμα Π.5: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 101



Σχήμα Π.6: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη

Π.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Για αυτό το λόγο απαιτείται

τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας. Από τα τέσσερα ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν, ένα καλώδιο συνδέει τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης με το βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχικού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο κανάλι του παλμογράφου. Τα υπόλοιπα δυο χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου με ανάλογο τρόπο, έτσι ώστε ένα καλώδιο να συνδέει τον αισθητήρα με ένα όμοιο με το παραπάνω βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχικού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο άλλο κανάλι του παλμογράφου.

Π.4 Εξασθενητής

Προκειμένου να μετρηθεί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνέψει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2 GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Ο εν λόγω εξασθενητής φαίνεται στο σχήμα Π.7 που ακολουθεί:

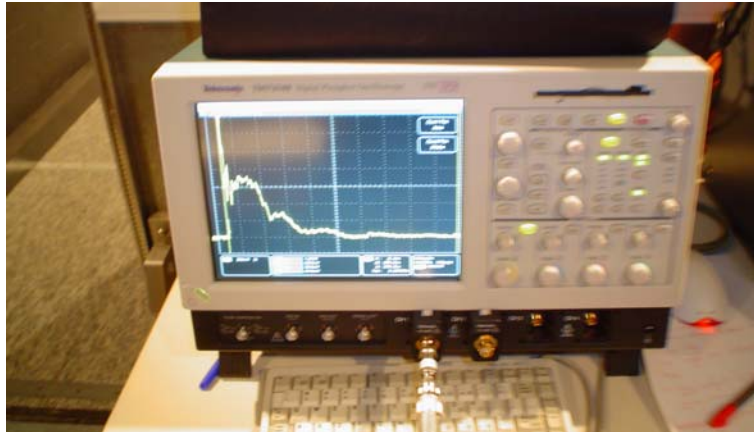


Σχήμα Π.7: Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix

Π.5 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος μοντέλο TDS 7254B είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix και λειτουργεί στα 2,5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [17] για παλμογράφο τουλάχιστον 1 GHz. Διαθέτει 4

κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024 x 768, 3,5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στο σχήμα Π1.8 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα Π.2.



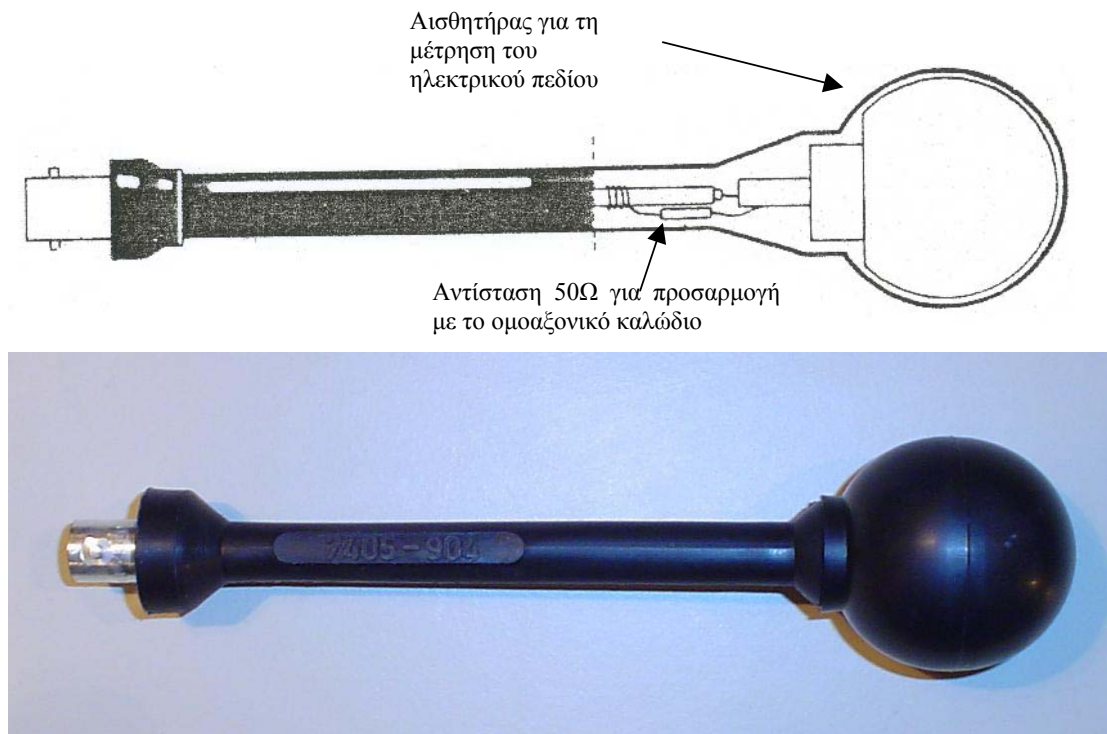
Σχήμα Π1.8: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

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

Πίνακας Π.2: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B

Π.6 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος

Ο αισθητήρας, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της έντασης E του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι το μοντέλο 904 της εταιρείας Rohde-Schwarz [117] και παρουσιάζεται στο σχήμα Π.9.



Σχήμα Π.9: Ο αισθητήρας για τη μέτρηση της έντασης E του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Ο παραπάνω αισθητήρας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου για σήματα έως 2,5 GHz. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα Π.9 ο αισθητήρας περιλαμβάνει αντίσταση 50 Ω για προσαρμογή με το ομοαξονικό καλώδιο ενώ ο κεντρικός αγωγός του εκτείνεται και προσκολλάται στο σφαιρίδιο διαμέτρου 3,6 cm. Ο σφαιρικός αισθητήρας χρησιμοποιείται για τη συλλογή του ηλεκτρικού πεδίου, που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Εξαιτίας της απουσίας επαγόμενου ρεύματος εντός του αισθητήρα (δεν υπάρχει βρόχος) δεν επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο αισθητήρας, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου μετράει την παράγωγο της διηλεκτρικής μετατόπισης dD/dt και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου προκύπτει έμμεσα από αυτή όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Όπως και κατά τη μέτρηση του ρεύματος ο παλμογράφος μετράει τάση, έτσι και κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση να μετατραπεί σε μονάδες ηλεκτρικού πεδίου. Ο αισθητήρας, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μετράει την παράγωγο της διηλεκτρικής μετατόπισης dD/dt σύμφωνα με την

ακόλουθη εξίσωση:

$$V_0 = 10 \cdot R \cdot A_{eq} \cdot \frac{dD}{dt} = R \cdot A_{eq} \cdot \frac{d(\epsilon_0 \cdot E)}{dt} \quad (\text{Π.1})$$

$$A_{eq} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (\text{Π.2})$$

όπου V_0 είναι η έξοδος του αισθητήρα σε Volt, A_{eq} η ισοδύναμη επιφάνεια του σε m^2 , r η ακτίνα του σφαιρικού αισθητήρα και R η αντίσταση των 50Ω για την προσαρμογή με το ομοαξονικό καλώδιο. Επίσης ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού η τιμή της οποίας είναι $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{Cb}^2/\text{Nm}^2$. Το 10 στην (Π.1) προέρχεται από τη χρήση του εξασθενητή, ο οποίος εξασθενεί το σήμα κατά 20 db δηλαδή 10 φορές. Μετά από πράξεις και δεδομένου ότι η διάμετρος του αισθητήρα για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι 3,6 cm προκύπτει η ακόλουθη ισότητα:

$$\frac{dE}{dt} = 5.548 \cdot 10^{12} \cdot V_0 \quad (\text{Π1.3})$$

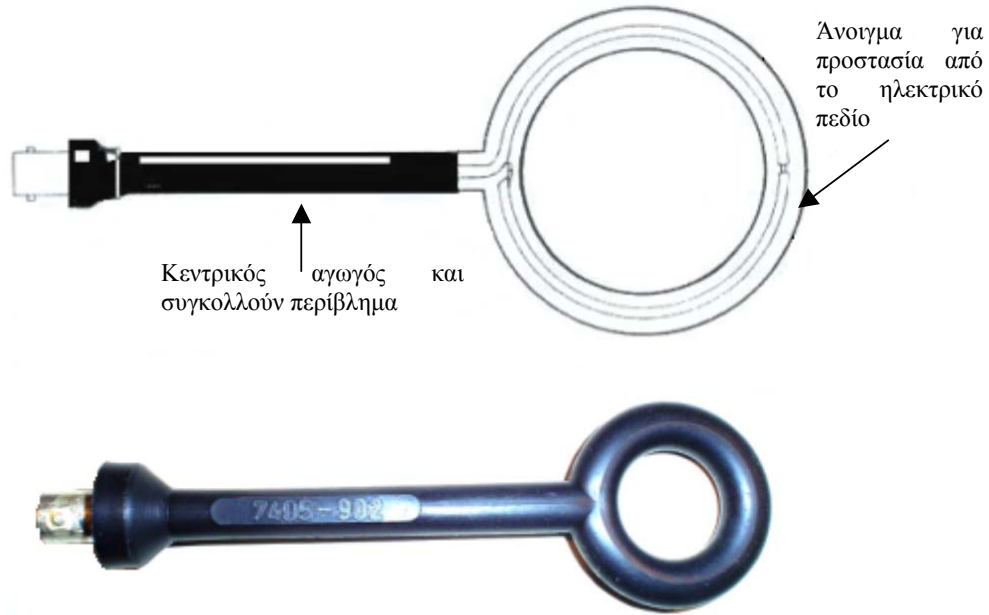
Βάσει της (Π.3) υπολογίζεται η παράγωγος του ηλεκτρικού πεδίου. Μετά από την ολοκλήρωση της παραγώγου της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab προκύπτει το ζητούμενο ηλεκτρικό πεδίο E .

Π.7 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης H του μαγνητικού πεδίου με τον ομοαξονικός προσαρμοστή μέτρησης επί μονωτικού υποστρώματος

Ο αισθητήρας, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της έντασης H του μαγνητικού πεδίου είναι το μοντέλο 902 της εταιρείας Rohde-Schwarz και παρουσιάζεται στο σχήμα Π.10.

Ο εν λόγω αισθητήρας, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, είναι ικανός να μετρήσει σήματα συχνότητας μεγαλύτερα από 1,5 GHz. Ο αισθητήρας είναι ένας βρόχος διαμέτρου 3 cm, ο οποίος περικλείει εσωτερικά ένα απλό έλιγμα, σε σχήμα βρόχου. Ο βρόχος είναι κατασκευασμένος από ένα απλό μέρος ομοαξονικού καλωδίου αντίστασης 50Ω από τον συνδετήρα και καταλήγει σε αυτόν. Στο σημείο που συναντιόνται το τέλος του ομοαξονικού καλωδίου και ο άξονας του αισθητήρα, αμφότεροι ο κεντρικός αγωγός και η προστασία είναι

συγκολλημένοι 360 μοίρες ως προς την προστασία του άξονα όπως φαίνεται και στο σχήμα Π.10. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα απλό βραχύ έλιγμα. Μία εγκοπή η οποία είναι ανοιγμένη στο ανώτερο σημείο του βρόχου εξομαλύνει το ηλεκτρικό πεδίο για την προστασία του ομοαξονικού καλωδίου. Οι βρόχοι λόγω της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης και της δομής του για την της προστασία του είναι ισοδύναμος με 50 Ω αντίσταση. Ο βρόχος απορρίπτει το ηλεκτρικό πεδίο και μετρά μόνο μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα Π.10: Ο αισθητήρας μέτρησης της έντασης H του μαγνητικού πεδίου

Ο αισθητήρας για τη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, μετράει την παράγωγο dB/dt σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_0 = 10 \cdot A_{eq} \cdot \frac{dB}{dt} \quad (\text{Π.4})$$

$$A_{eq} = \pi \cdot r^2 \quad (\text{Π.5})$$

όπου V_0 είναι η έξοδος του αισθητήρα σε Volt, A_{eq} η ισοδύναμη επιφάνεια του σε m^2 , r η ακτίνα του βροχοειδούς αισθητήρα. Επίσης μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η τιμή της οποίας είναι $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Το 10 στη σχέση (Π.4) προέρχεται από τη χρήση του εξασθενητή, ο οποίος εξασθενεί το σήμα κατά 20 db δηλαδή 10 φορές. Συμπερασματικά μία μετρούμενη τάση του 1 Volt, με τον βροχοειδή

αισθητήρα διαμέτρου 3 cm ισούται:

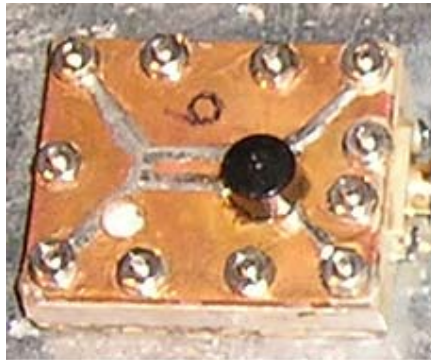
$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{7.0686 \cdot 10^{-4}} = 141471 \text{ Tesla/sec} \quad (\text{Π.6})$$

Βάσει της (Π.6) υπολογίζεται η παράγωγος του μαγνητικού πεδίου. Μετά από την ολοκλήρωση της παραγωγού της έντασης του μαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab προκύπτει η μαγνητική επαγωγή $B(t)$ και χρησιμοποιώντας την (Π.7) βρίσκεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (\text{Π.7})$$

Π.8 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου για τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας

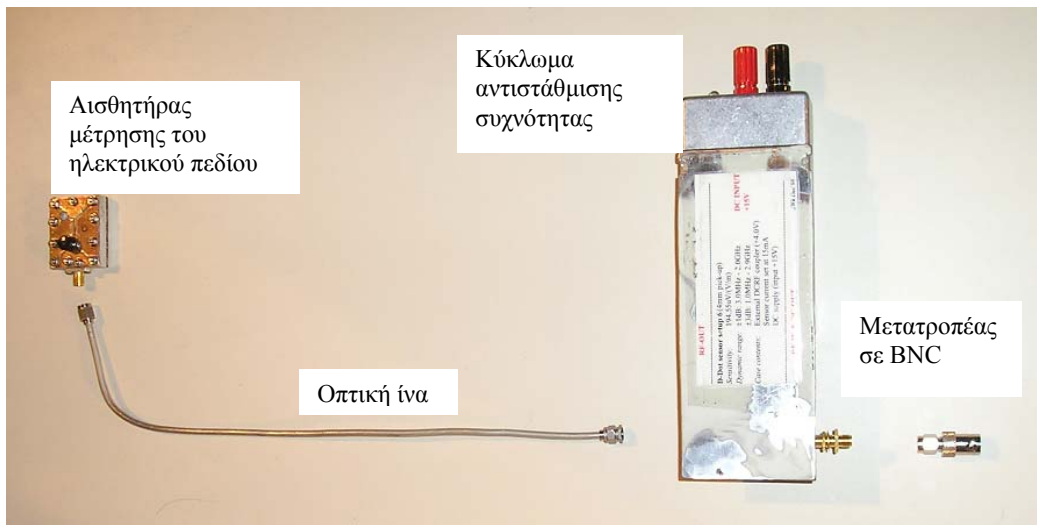
Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας κατασκευής του καθηγητή Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του Πανεπιστημίου του Missouri-Rolla, David Pommerenke, το οποίο και παρουσιάζεται στο σχήμα Π.11 [22, 50, 95].



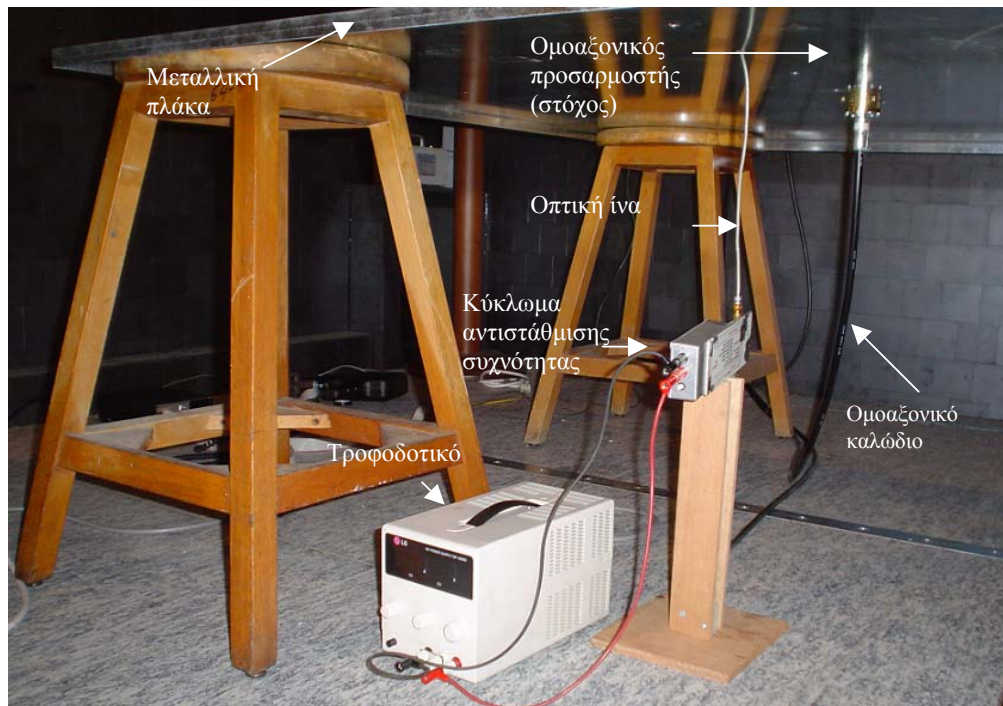
Σχήμα Π.11: Ο αισθητήρας για τη μέτρηση της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου

Το σασί του αισθητήρα είναι ορθογωνίου σχήματος αλουμινένιο πλαίσιο με μεταλλική πλάκα να κλείνει το κάτω μέρος. Οι διαστάσεις του είναι 3,9 cm [μήκος] x 0,9 cm [ύψος] x 3,1 cm [πλάτος]. Ο αισθητήρας του ηλεκτρικού πεδίου δεν έχει την τάση να λαμβάνει μαγνητικά πεδία και για το λόγο αυτό δεν χρειάζεται ασπίδα προστασίας γύρω από τον αισθητήρα. Ο παραπάνω αισθητήρας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου για σήματα έως 2 GHz και περιλαμβάνει εσωτερικό ενισχυτή τύπου ERA-5-SM, η παρουσία του οποίου εξασφαλίζει προσαρμογή στον παλμογράφο.

Το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μετρηθεί με παλμογράφο, ωστόσο ένας εξωτερικός ενισχυτής μπορεί να προστεθεί για μεγαλύτερη ενίσχυση σήματος. Ο ενισχυτής συνδέεται με την έξοδο του αισθητήρα μέσω οπτικής ίνας για ακριβέστερη μεταφορά του σήματος και τροφοδοτείται μέσω του τροφοδοτικού LG GP-4303D με συνεχή τάση 15 V. Η έξοδος του οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου υψηλής συχνότητας το οποίο μεταφέρει το σήμα του ηλεκτρικού πεδίου στον παλμογράφο. Στα σχήματα Π.12 και Π.13 φαίνεται η συνδεσμολογία, που μόλις περιγράφηκε πριν και μετά τη σύνδεσή της στην πειραματική διάταξη, αντίστοιχα.



Σχήμα Π.12: Ο αισθητήρας μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου και το κύκλωμα οδήγησής του πριν τη σύνδεση του στη διάταξη



Σχήμα Π.13: Ο αισθητήρας μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου συνδεδεμένος στην πειραματική διάταξη

Π.9 Αισθητήρας μέτρησης της έντασης H του μαγνητικού πεδίου για τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας

Για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας του καθηγητή Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του Πανεπιστημίου του Missouri-Rolla, David Pommerenke, ο οποίος και παρουσιάζεται στο σχήμα Π.14.

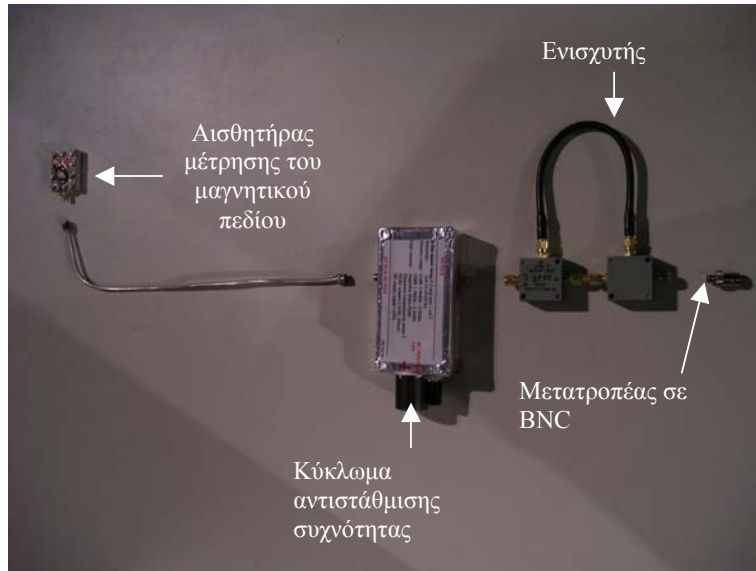


Σχήμα Π.14: Ο αισθητήρας για τη μέτρηση της έντασης H του μαγνητικού πεδίου

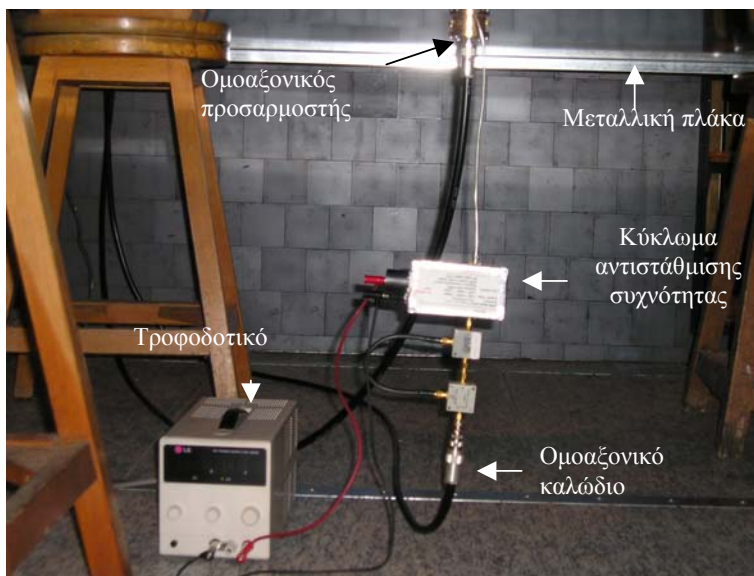
Το σασί του είναι ορθογωνίου σχήματος αλουμινένιο πλαίσιο με μεταλλική πλάκα να κλείνει το κάτω μέρος. Οι διαστάσεις του είναι 3,9 cm [μήκος] x 0,9 cm [ύψος] x 3,1

cm [πλάτος]. Στην ημικυκλική περιοχή που βρίσκεται στο πάνω μέρος του αισθητήρα το μαγνητικό πεδίο δημιουργεί τάση εξ' επαγωγής. Η ημικυκλική αυτή περιοχή είναι κατασκευασμένη από θωρακισμένο ομοαξονικό καλώδιο από το οποίο 1 mm της θωράκισης (ακριβώς στη μέση) έχει αφαιρεθεί. Η θωράκιση αποτρέπει τη σύζευξη του ηλεκτρικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο θα συζευχθεί μέσω της σχισμής. Ο παραπάνω αισθητήρας περιλαμβάνει εσωτερικό ενισχυτή τύπου ERA-5-SM, η παρουσία του οποίου εξασφαλίζει προσαρμογή στον εξοπλισμό μέτρησης (50 Ω του παλμογράφου).

Λόγω της χαμηλής ευαισθησίας του αισθητήρα είναι απαραίτητη η χρήση ενισχυτή έτσι, ώστε να παρέχεται ικανοποιητικό σήμα στον παλμογράφο. Ο ενισχυτής έχει ως είσοδό του την έξοδο του αισθητήρα, τροφοδοτείται μέσω του τροφοδοτικού LG GP-4303D με συνεχή τάση 15 V και η έξοδός του οδηγείται σε κύκλωμα αντιστάθμισης συχνότητας του οποίου ο ρόλος είναι να ρυθμίζει τη συχνότητα κατώτατου ορίου στο 1 MHz. Ακολουθεί ομοαξονικό καλώδιο υψηλής συχνότητας, το οποίο μεταφέρει το σήμα του μαγνητικού πεδίου στον παλμογράφο. Στα σχήματα Π.15 και Π.16 φαίνεται η συνδεσμολογία, που μόλις περιγράφηκε πριν και μετά τη σύνδεσή της στην πειραματική διάταξη, αντίστοιχα.



Σχήμα Π.15: Ο αισθητήρας μέτρησης του μαγνητικού πεδίου και το κύκλωμα οδήγησής του, πριν τη σύνδεση στη διάταξη



Σχήμα Π.16: Ο αισθητήρας μέτρησης του μαγνητικού πεδίου και το κύκλωμα οδήγησής του, μετά τη σύνδεση στη διάταξη

Π.10 Τροφοδοτικό

Προκειμένου να λειτουργήσουν οι αισθητήρες μέτρησης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου όπως περιγράφηκαν στα σχήματα Π.13 και Π.16, απαιτείται η χρήση τροφοδοτικού. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε από τον εξοπλισμό του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων τροφοδοτικό, μοντέλο GP4303D της LG, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα Π.17. Τα ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας του είναι 30 V, 3 A και 90 W, όσον αφορά την ονομαστική τάση, το ονομαστικό ρεύμα και την ονομαστική ισχύ. Στον πίνακα Π.3 παρατίθενται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του τροφοδοτικού.

Προγραμματισμός λειτουργιών	Αυτόματος
Μέγιστη ισχύς εξόδου	90 W
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	30A (για τάση 0 – 30V)
Πολλαπλές επιλογές μονάδας	Παράλληλα ή σε σειρά
Προστασία από υπερένταση	Ναι
Προστασία από υπερθέρμανση	Όχι

Πίνακας Π.3: Χαρακτηριστικά Τροφοδοτικού της LG μοντέλο GP 4303D



Σχήμα Π1.17: Το τροφοδοτικό LG GP 4303D.

Π.11 Θωρακισμένος θάλαμος

Προκειμένου να εξαιρεθούν οι παρεμβολές, που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση στον εξοπλισμό καταγραφής (παλμογράφος), χρησιμοποιείται θωρακισμένος θάλαμος μεταβατικών διαταραχών. Ο παλμογράφος βρίσκεται στο θάλαμο ελέγχου (control room) διαστάσεων $3,2 \times 2,5 \times 3,3 \text{ m}^3$. Ο θωρακισμένος θάλαμος του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη είναι ο Lindgren-Rayproof Series 81. Ο θάλαμος αυτός έχει διαστάσεις $3,5 \times 6,5 \times 3,3 \text{ m}^3$, τα εσωτερικά τοιχώματά του οποίου είναι επενδυμένα με φερρίτη (μαλακός σίδηρος), υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό τις παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Ο θάλαμος αυτός αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως και 1GHz.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Οδηγία σχετικά με την Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα 89/336/ΕΟΚ”, 3 Μαΐου 1989, διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση http://www.yme.gov.gr/imagebank/categories/ctg212_9_1106033047.pdf
- [2] “Νέα οδηγία σχετικά με την Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα 2004/108/ΕΚ”, 15 Δεκεμβρίου 2004, διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/el/oj/2004/l_390/l_39020041231e100240037.pdf
- [3] ΕΛΟΤ EN 50082-1: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα – Γένιο Πρότυπο Ατρωσίας – Μέρος 1: Περιβάλλον κατοικιών, εμπορικό περιβάλλον και περιβάλλον ελαφριάς βιομηχανίας”
- [4] ANSI C63.14-1998, “Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)”, 1998.
- [5] Dangelmayer T., “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [6] Kaplan A.,McReynolds B., “Dielectric characteristics of materials-Electrostatic Discharge”, November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>.
- [7] “Fundamentals of Electrostatic Discharge. Part I: An introduction to ESD”, 2001, ESD Association, Rome, NY, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esda.org/documents/esdfunds1print.pdf>
- [8] D. Ward D.D., “ESD Susceptibility Characterization of an EUT by Using 3D ESD Scanning System”, IEE Seminar on the "Hows" and "Whys" of EMC Design, London, March 1999.
- [9] Fujiwara O., Takanori I., “Numerical calculation of human body capacitance by surface charge method”, Electronics and Communications in Japan, vol. 85, no. 12, 2002, pp. 38-44.
- [10] Fujiwara O., Nakazawa K., Takeshita H., “An analysis of charged floor potential using electromagnetic field theory”, Electronics and Communications in Japan, Part 1, vol. 81, no. 9, 1998, pp. 28-35.
- [11] Greason W., “Analysis of the charge/discharge processes for the basic ESD models”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 5, September/October 1993, pp. 887-896.
- [12] Fujiwara O., “New approaches for measurement of static electricity toward preventing ESD”, IEICE Transactions on Communications, vol. E75-B, no. 3, March 1992, pp. 131-140.
- [13] Esmark K., Gossner H., Stadler W., “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003
- [14] Amoruso V., Helali M., Lattarulo F., “An improved model of man for ESD applications”, Journal of Electrostatics, vol. 49, issue 2, August 2000, pp. 225-244.

- [15] Barth J., Richner J., Henry L.G., Kelly M., “*Real HBM and MM waveform parameters*”, Journal of Electrostatics, vol. 62, issues 2-3, October 2004, pp. 195-209.
- [16] IEC 801-2, “*Electromagnetic compatibility for industrial process measurement and control equipment, Part 2: Electrostatic discharge requirement*”, 1991.
- [17] IEC 61000-4-2, “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test*”, 1995.
- [18] European Standard EN 61000-4-2: “*Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication*”, 1995.
- [19] ΕΛΟΤ EN 61000-4-2: “*Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 2: Δοκιμή απρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Βασικό δημοσίευμα EMC*”, 1996.
- [20] ANSI C63.16-1993: “*American National Standard Guide for Electrostatic Discharge Test Methodologies and Criteria for Electronic Equipment*”, 1994
- [21] Pommerenke D., Aidam M., “*ESD: waveform calculation, field and current of human and simulator ESD*”, Journal of Electrostatics, vol. 38, issues 1-2, October 1996, pp. 33-51.
- [22] Wang K., Pommerenke D., Chundru R., Doren T.V., Drewniak J.L., Shashindranath A., “*Numerical modeling of electrostatic discharge generators*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no. 2, May 2003, pp. 258-271.
- [23] Heidler H., “*Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung*”, presented at 18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Munich, Germany, 1985.
- [24] Berghe S.V., Zutter D., “*Study of ESD signal entry through coaxial cable shields*”, Journal of Electrostatics, vol. 44, issues 3-4, September 1998, pp. 135-148.
- [25] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Parameter Estimation for the Equation of the Electrostatic Discharge Current using Genetic Algorithms*”, Proceedings of the 40th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2005), Cork, Ireland, September 7-9, 2005, vol.2, pp.635-639 (Session TA2).
- [26] Fotis G.P., Assimakopoulou F.E, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Parameter evaluation of the equation of the electrostatic discharge current, using genetic algorithms as optimization tool*”, 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2006, Miami, USA, 30 April – 2 May 2006, Poster Session PF5: Optimization and Design VI.
- [27] Fotis G.P., Gonos I.F., Assimakopoulou F.E, Stathopoulos I.A.: “*Applying genetic algorithms for the determination of the parameters of the electrostatic discharge current equation*”, Institute of Physics (IOP), Proceedings Measurement, Science & Technology, Vol. 17, pp. 2819-2827, 2006.
- [28] Kang T.W., Chung Y.C., Won S.H., Kim H.T., “*On the uncertainty in the current waveform measurement of an ESD generator*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no. 4, November 2000, pp. 405-413.
- [29] Hilty K., Ryser H., Hermann U., “*Calibration of electrostatic discharge generators and results of an international comparison*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 2, April 2001, pp. 414-418.

- [30] Pommerenke D., “ESD: What has been achieved, what is less well understood?”, Proceedings of the International Zurich Symposium on EMC, IEEE, Piscataway, NJ, February 1999. pp. 77–82.
- [31] Katelaere W., Martens L., Braem Y., Vlietinck Y., “Calculation of the ESD-pulse parameters and associated uncertainty for ESD-gun calibration”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 21-25 August, 2000, pp. 449-452.
- [32] Sroka J., “Insertion Loss as Transfer Coefficient for the Calibration of ESD Simulators. It is sufficient to cope with?”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 13-17 August, 2001, pp. 838-840.
- [33] Sroka J., “Measurement uncertainty of the target scattering parameters built in the uncertainty estimation of ESD simulator”, IEEE Symposium on EMC, August, 2002, pp. 895-900.
- [34] Sroka J., “Calibration uncertainty of ESD simulator estimated with frequency dependent transfer impedance of the target”, 16th International Wroclaw EMC Symposium, June, 2002.
- [35] Sroka J., “Target influence on the calibration uncertainty of ESD simulators”, 14th International Symposium and Exhibition on EMC, February, 2001, pp.189-192.
- [36] Sroka J., Klampfer W.L., “Target influence of the calibration uncertainty of ESD simulators”, Proceeding of the 8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 18-19 December, 2003, pp. 241-244.
- [37] Masugi M., “Multiresolution analysis of electrostatic discharge current from electromagnetic interference aspects”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no. 2, May 2003, pp. 393-403.
- [38] Masugi M., “Self-organizing neural network based analysis of electrostatic discharge for electromagnetic interference assessment”, IEICE Transactions on Communications, vol. E86-B, no. 6, June 2003, pp. 1991-2000.
- [39] Barth J., Richner J., Henry L.G., Kelly M., “Real HBM and MM waveform parameters”, Journal of Electrostatics, vol. 62, issues 2-3, October 2004, pp. 195-209.
- [40] Salmela H., Paasi J., Kalliohaka T., Fast L., “Measurements of air discharges from insulating, electrostatic dissipative and conductive materials with different ESD probes”, Journal of Electrostatics, vol. 63, issues 6-11, June 2005, pp. 539-544.
- [41] Pekkala P., Paasi J., Hearn G., Smallwood J., “Characteristics of electrostatic discharges from intermediate bulk container materials”, Journal of Electrostatics, vol. 63, issues 6-11, June 2005, pp. 489-494.
- [42] Wilson P.F., Ma M.T., “Fields radiated by electrostatic discharges”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, February 1991, pp. 10-18.
- [43] Pommerenke D., “ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit”, Journal of Electrostatics, vol. 36, issue 1, November 1995, pp. 31-54.
- [44] Frei S., Pommerenke D., “Fields on the horizontal coupling plane excited by direct ESD and discharges to the vertical coupling plane”, Journal of Electrostatics, vol. 44, issues 3-4, September 1998, pp. 177-190.

- [45] Pommerenke D., Vandoren T.P., Wang K., “*ESD currents and fields on the VCP and the HCP modeled using quasi-static approximations*”, IEEE International Symposium on EMC, 19-23 August, 2002, pp. 81-86.
- [46] Frei S., Pommerenke D., “*A transient field measurement system to analyze the severity and occurrence rate of electrostatic discharge (ESD)*”, Journal of Electrostatics, vol. 44, issues 3-4, September 1998, pp. 191-203.
- [47] Jobava R., Pommerenke D., Karkashadze D., Shubitidze P., Zaridze R., Frei S., Aidam M., “*Computer Simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no. 1, February 2000, pp. 54-65.
- [48] Jobava R., Karkashadze D., Zaridze R., Shubitidze, Pommerenke D., Aidam M., “*Numerical calculation of ESD*”, EOS/ESD Symposium, 10-12 September, 1996, pp. 203-210.
- [49] Jobava R., Karkashadze D., Shubitidze P, Zaridze R.,, Pommerenke D., Frei S., Kalkner W., “*Computer Simulation of Electrostatic Discharge – EMC Applications*”, Tbilisi State University & Berlin Technical University, 1998.
- [50] Chundru R., Pommerenke D., Wang K., Doren T.M., Centola F., Huang J., “*Characterization of human metal ESD reference discharge event and correlation of generator parameters to failure levels Part I: Reference event*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 46, no. 4, November 2004, pp. 498-504.
- [51] Wang K., Pommerenke D., Ilavarasan P., “*Impact of ESD Generator Parameters on Failure Level in Fast CMOS System*”, IEEE International Symposium on EMC, 18-22 August, 2003, vol. 1, pp. 52-57.
- [52] Kang I.H., Fujiwara O., Lee C.B., “*Spectrum distribution of electromagnetic field radiated by electrostatic discharge on the ground screen*”, IEEE International Symposium on EMC, 24-28 August 1998, vol. 2, pp. 994-998.
- [53] Tomita H., Tabata Y., “*Measurement of electric field due to electrostatic discharge using the Pockels effect*”, IEEE Industry Applications Conference, 8-12 October 1995, pp. 1260-1263.
- [54] Leuchtmann P., Sroka J., “*Transient field simulation of electrostatic discharge (ESD) in the calibration setup (acc. IEC 61000-4-2)*”, IEEE International Symposium on EMC, 21-25 August 2000, pp. 443-448.
- [55] Leuchtmann P., Sroka J., “*Enhanced field simulations and measurements of the ESD calibration setup*”, IEEE International Symposium on EMC, 13-17 August 2001, pp. 1273-1278.
- [56] John Bendjamin, “*Characteristics of Electrostatic Discharges (ESD) Based on Current, Optical and Magnetic Radiation Fields*”, Uppsala, phd thesis, 2000.
- [57] Bendjamin J., Gomes C., Cooray V., “*Remote sensing of ESD through optical and magnetic radiation fields*”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, no. 6, December 1999, pp. 896-899.
- [58] C. Gomes, V. Cooray, “*Correlation between the optical signatures and current wave forms of long sparks: applications in lightning research*”, Journal of Electrostatics, vol. 43, issue 4, June 1998, pp. 267-254.
- [59] Bendjamin J., Thottappillil, Scuka V., “*Time varying magnetic fields generated by human metal (ESD) electrostatic discharges*”, Journal of Electrostatics, vol. 46, issue 4, May 1999, pp. 259-269.

- [60] Bendjamin J., Thottappillil R., Scuka V., “*Time varying electromagnetic fields generated by electrostatic discharges*”, 1st IEEE International Symposium on Polymeric Electronics Packaging, 27-29 October 1997, pp. 197-202.
- [61] Kim K., Lee K., Lee D., “*Estimation of ESD current waveshapes by radiated electromagnetic fields*”, IEICE Transactions on Communications, vol. E83-B, no. 3, March 2000, pp. 608-612.
- [62] Cerri G., Coacci F., Fenucci L., Primiani M., “*Measurement of Magnetic Fields Radiated from ESD Using Field Sensors*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 43, no. 2, May 2001, pp. 187-196.
- [63] Cerri G., Leo R.D., Primiani V.M., Pennesi S., “*Modeling of electromagnetic interference induced by electrostatic discharge (ESD) inside resonant structures*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 1, February 2002, pp. 192-202.
- [64] Cerri G., Leo R., Primiani V.M., Righetti M., “*Field penetration into metallic enclosures through slots excited by ESD*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 36, no. 2, May 1994, pp. 110-116.
- [65] Cerri G., Leo R., Primiani V.M., Righetti M., “*ESD indirect coupling modeling*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, August 1996, pp. 274-281.
- [66] Cerri G., Chiarandini S., Constantini S., Leo R.D., Primiani V.M., Russo P., “*Theoretical and experimental characterization of transient electromagnetic fields radiated by electrostatic discharge (ESD) currents*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 1, February 2002, pp. 139-147.
- [67] Fujiwara O., Okuda K., Fukunaga K., Yamanaka Y., “*FDTD computation of electromagnetic fields caused by electrostatic discharge between charged metal spheres*”, Electronics and Communications in Japan, Part 1, vol. 86, no. 7, 2003, pp. 54-63.
- [68] Fujiwara O., Kawaguchi K., “*FDTD Analysis of electromagnetic fields caused by sparks between charged metals*”, Electronics and Communications in Japan, Part 2, vol. 83, no. 2, 2000, pp. 44-51.
- [69] Ishigami S., Iwasaki T., “*Evaluation of charge transition in a small gap discharge*”, IEICE Transactions on Communications, vol. E79-B, no. 4, April 1996, pp. 474-482.
- [70] Gianneti R., Macucci M., Tellini B., “*Remarks on models for prediction of radiated fields in electrical discharge events*”, Electronics Letters, vol. 37, no. 13, June 2001, pp. 817-819.
- [71] Dawson T.W., Stuchly M.A., Kavet R., “*Electric fields in the human body due to electrostatic discharges*”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 51, no. 8, August 2004, pp. 1460-1468.
- [72] T. W. Dawson, K. Caputa, M. A. Stuchly, and R. Kavet, “*Electric fields in the human body resulting from 60 Hz contact currents*” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 48, pp. 1020–1026, September. 2001.
- [73] Okoniewska E., Stuchly M.A., Okoniewski M., “*Interactions on electrostatic discharge with the human body*”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 8, August 2004, pp. 2030-2039.

- [74] *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, IEEE Standard C95.1-1991, 1991.
- [75] Honda M., “*Fundamental Aspects of ESD Phenomena and Its Measurement Techniques*”, IEICE Trans. Commun., vol. E79-B, no.4, April 1996, pp. 515-521.
- [76] Στασινόπουλου Κ.Α., “*Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων*”, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1996.
- [77] Kang I., Fujiwara O., Wang J., “*Analytical approach to the spark resistance formula caused by electrostatic discharge*”, IEE, Electronic Letters, vol. 33, July 1997, pp. 1203-1204.
- [78] Rompe R., Weizel W., “*Über das Toeplershe Funkengesetz*”, Z. Physik, 1944, vol.122, pp. 636-639.
- [79] Toepler M., “*Zum Kenntnis der Gasetze der Gleitfunkenbildung*”, Ann. Phys., 1906, vol. 21, no. 12, pp. 193.
- [80] Fujiwara O., “*An Analytical Approach to Model Indirect Effect Caused by Electrostatic Discharge*”, IEICE Transactions on Communications, vol. E79-B, no. 4, April 1996, pp. 483-489.
- [81] Kawamata K., Minegishi S., Haga A., “*Wideband measurement of transition duration and frequency spectra due to a small gap discharge as low-voltage ESD*”, Journal of Electrostatics, vol. 62, issues 2-3, October 2004, pp. 185-193.
- [82] Kawamata K., Minegishi S., Haga A., Sato R., “*A measurement of very fast transition durations due to gap discharge in air using distributed constant line system*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, no. 2, May 1999, pp. 137-141.
- [83] Bonisch S., Pommerenke D., Kalkner W., “*Broadband measurement of ESD risetimes to distinguish between different discharge mechanisms*”, Journal of Electrostatics, vol. 56, issue 3, October 2002, pp. 363-383.
- [84] Bonisch S., Kalkner W., Pommerenke D., “*Modeling of short gap ESD under consideration of different discharge mechanisms*”, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 31, no. 4, August 2003, pp. 736-744.
- [85] Bonisch S., “*Die elektrostatische entladung (ESD) bei kleinen abstanden und spannungen*”, phd thesis, Berlin, 2004.
- [86] Ishigami S., Gokita R., Nishiyama Y., Yokoshima I., Iwasaki T., “*Measurements of fast transient fields in the vicinity of short gap discharges*”, IEICE Transactions on Communications, vol. E78-B, no. 2, February 1995, pp. 199-206.
- [87] Honda M., “*Fundamental aspects of ESD phenomena and its measurement techniques*”, IEICE Transactions on Communications, vol. E79-B, no. 4, April 1996, pp. 457-461.
- [88] Greason W.D., “*Methodology to study the resistance of spark discharges*”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 8, March/April 1999, pp. 359-365.
- [89] Fujiwara O., Tanaka H., Yamanaka Y., “*Equivalent circuit modeling of discharge current injected in contact with an ESD gun*”, Electrical Engineering in Japan, vol. 149, no. 1, 2004, pp. 8-14.
- [90] Murota N., “*Determination of characteristics of the discharge current by the human charge model ESD Simulator*”, Electronics and Communications in Japan, Part 1, vol. 80, no. 4, 1997, pp. 49-57.

- [91] Wang K., Pommerenke D., Chundru R., "Numerical modeling for ESD-simulators", IEEE International Symposium on EMC, 19-23 August, 2003, vol. 1, pp.93-98.
- [92] Greason W.D., "Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge", Journal of Electrostatics, vol. 44, issues 3-4, September 1998, pp. 205-219.
- [93] Amoruso V., Helali M., Lattarulo F., "An improved model of man for ESD applications", EOS/ESD Symposium, 28-30 September, 1999, pp.335-343.
- [94] Giannetti R., Tellini B., "Equivalent network modeling to simulate electrical discharges", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, no. 4, July 2000, pp. 971-976.
- [95] Wang K., Pommerenke D., Chundru R., Doren T.M., Centola F., Huang J., "Characterization of human metal ESD reference discharge event and correlation of generator parameters to failure levels Part II: Correlation of generator parameters to failure levels", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 46, no. 4, November 2004, pp. 505-511.
- [96] Huang J.S., Pommerenke D., Ilavarasan P., "Investigation of ESD Current and Induced Voltage from Different ESD Simulators", Proceeding of ESA-IEEE Joint Annual Meetings, Little Rock, Arkansas, USA. June. 24-28, 2003.
- [97] Bandinelli M, Bessi F., Chiti S., Giorgi L., "Measured versus simulated transient disturbances induced on a system harness", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, August 1996, pp. 282-289.
- [98] Rudack A.C., Pendley M., Levit L., "Measurement technique developed to evaluate transient EMI in a photo bay", Journal of Electrostatics, vol. 54, issue 1, January 2002, pp. 95-104.
- [99] Diaz, C.H., Sung-Mo Kang, Duvvury, C, "Simulation of electrical overstress thermal - Failures in integrated circuits", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, no. 3, March 1994, pp. 259-266.
- [100] Paasi J., "Assessment of ESD threats to electronic components", Journal of Electrostatics, vol. 63, issues 6-11, June 2005, pp. 589-596.
- [101] Stephen G. Beebe, "Characterization, modeling and design of ESD protection circuits", Stanford, PhD thesis, 1998.
- [102] Esmark K., "Device simulation of ESD protection elements", Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, PhD thesis, 2001.
- [103] Kwang-Hoon Oh, "Investigation of ESD performance in advanced CMOS technology", Stanford Universtiy, PhD thesis, 2002.002.
- [104] Gschwandtner W.R., Münzberger H., "Lipoatrophia semicircularis. Ein Beitrag zu bandförmig-circulären Atrophien des subcutanen Fettgewebes im Extremitätenbereich", Der Hautarzt 1974, 25: 222-227.
- [105] Gschwandtner W.R., Münzberger H., "Lipoatrophia semicircularis. Wiener klein", Wochenschr. 1975, 87: 164-168.
- [106] Curvers B., "Lipoatrophia Semicircularis: a new office disease?", 2004, διαθέσιμο στη διεύθυνση: www.sfowler.com/esdjournal/lipoatrophia.htm.
- [107] Decat G, Wevers M., Kessels P., Meynen G., Scheepers K., Duyssens K., Deckx L, Van Tichelen P., Grabarczyk Z., Fotis G.P., "Is electrostatic discharge produced under office working conditions in such a way that it can trigger lipoatrophia semicircularis?", Proceedings of the International Workshop on

- Electromagnetic Fields in the Workplace, Warszawa, Poland, September 5-7, 2005, pp. 17-22.
- [108] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Measurement of the magnetic field radiating by electrostatic discharges using commercial ESD generators*”, Measurement, vol. 39, Issue 2, pp. 137-146, 2006.
- [109] Φώτης Γ.Π., Γκόνος Ι.Φ., Ηλία Ν.Χ., Σταθόπουλος Ι.Α.: “*Μέτρηση ρεύματος και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά την επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων*”, 1^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα, 2005, 11-12 Νοεμβρίου 2005, σελ. 122-131.
- [110] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Measurement of the electric field radiating by electrostatic discharges*”, Institute of Physics (IOP), Proceedings Measurement, Science & Technology, Vol. 17, pp. 1292-1298, 2006.
- [111] Fotis G.P., Rapanakis A.G, Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Measurement of the magnetic field radiating by electrostatic discharge generators along various directions*”, 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2006, Miami, USA, 30 April – 2 May 2006, Poster Session PF5: Optimization and Design VI., Poster Session PE 1: Static and Quasi - Static Fields VII.
- [112] Fotis G.P., Rapanakis A.G., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Measurement of the magnetic field radiating by electrostatic discharges during the verification of the ESD generators*”, Journal of the International Measurement Confederation, (έγινε αποδεκτό για δημοσίευση και είναι στη διαδικασία της έκδοσης).
- [113] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*An Approach to the Better Understanding of the Experimental Setup for the Verification of the ESD Generators*”, Proceedings of the 14th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, China, August 25-29, 2005 (paper A-02).
- [114] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Current Measurement Procedure for the ESD Generators according to the EN 61000-4-2*”, Proceedings of the 8th WSEAS World Multiconference on Circuits, Systems Communications and Computers» (CSCC 2004), Athens, Greece, July 12 - 15, 2004 (paper 487-725).
- [115] J. Sroka, “*Recalculation of the discharge current from the oscilloscope reading applied by the Schaffner Calibration Laboratory in Luterbach*”, Schaffner’s Technical Document.
- [116] Schaffner Company, Technical document and product information for the MD 101.
- [117] H. Westenberger, “*Overview of equipment and applications*”, News Special from Rohde & Schwarz, no. 291, 1996, pp. 40-42.
- [118] Fotis G.P., Ilia N.C., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “*Measurement of the Magnetic Field Radiating by Electrostatic Discharges using the Standard ESD Generators*”, Proceedings of the 4th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution and Energy Conversion (Medpower 2004), November 14-17, 2004, Lemesos, Cyprus, paper MED04/CH2.
- [119] Ι. Α. Τσαλαμέγκα, Ι.Α. Ρουmeliώτη, “*Σημειώσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων-Τόμοι 1 & 2*”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1998.
- [120] Fotis G.P., Gonos I.F., Iracleous D.P., Stathopoulos I.A., “*Mathematical Analysis and Simulation for the Electrostatic Discharge (ESD) according to the EN*

- 61000-4-2”, Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004), Bristol, UK, September 6-8, 2004, pp. 228-232.
- [121] Kind D., Feser K., “*High voltage test techniques*”, Newnes, 2001.
- [122] Holland H., “*Adaptation in natural and artificial systems*”, University of Michigan Press, Reprinted in MIT Press, 1992.
- [123] Goldberg D.E., “*Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*”, Addison-Wesley, 1989.
- [124] Γκόνοβ Ι.Φ., “*Μεταβατική συμπεριφορά ςυςτημάτων γείωςης*”, Διδακτορικὴ Διατριβὴ, Αθήνα, 2002.
- [125] Gonos I.F. and Stathopoulos I.A., “*Estimation of multi-layer soil parameters using genetic algorithms*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, Jan. 2005.
- [126] Gonos I.F., Mastorakis N.E., Swamy M.N., “*A genetic algorithm approach to the problem of factorization of general multidimensional polynomials*”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I, vol. 50, no. 1, January 2003, pp. 16-22.
- [127] Gonos I.F., Topalis F.V., Stathopoulos I.A., “*A genetic algorithm approach to the modeling of polluted insulators*”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, No. 3, May 2002, pp. 373-376.
- [128] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A.: “*Determination of the Discharge Current Equation Parameters of ESD using Genetic Algorithms*”, IEE, Electronics Letters, Vol. 42, Issue 14, pp. 797-799, 2006.
- [129] Τρύφων Κουςιουρὴς, “*Θεωρία Συνθέςεως Δικτύων*”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1989.
- [130] Χρήςτος Χαλκιάς, Γιάννης Παπανάνος, “*Σχεδίαση Ηλεκτρονικών Φίλτρων – Ενεργά Αναλογικά Φίλτρα*”, Εκδόσεις Συμμετρία, 1987.
- [131] “Κατάλογος προϊόντων της εταιρείας Analog Devices” διαθέςιμος στην ιστοσελίδα www.analog.com.
- [132] Voinescu S.P., Beerkens R., Dickson T.O., and Chalvatzis T., “*Design Methodology and Applications of SiGe BiCMOS Cascode Opamps with up to 37-GHz Unity Gain Bandwidth*” IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, Technical Digest, pp.283-286, Nov. 2005
- [133] Darlington S., “*Synthesis of Reactance 4-Poles*”, J. Math. Phys. 18 (1939), pp. 257-353.
- [134] “*Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433*”, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.
- [135] “*Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438*”, Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.