



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

**Ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού παραμέτρων εξισώσεων
του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστίνα Δ. Αναγνωστοπούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Αθήνα, Οκτώβριος 2009



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

152

**Ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού παραμέτρων εξισώσεων
του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστίνα Δ. Αναγνωστοπούλου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Οκτωβρίου 2009.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

.....
Χριστίνα Δ. Αναγνωστοπούλου
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χριστίνα Δ. Αναγνωστοπούλου, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθόδου υπολογισμού των παραμέτρων των εξισώσεων που περιγράφουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με τη βοήθεια γενετικών αλγορίθμων. Ο αλγόριθμος αυτός, υλοποιήθηκε μέσω του προγραμματιστικού πακέτου MATLAB, και χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων πέντε προτεινόμενων εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, χρησιμοποιώντας τέσσερα διαφορετικά κριτήρια τερματισμού για κάθε εξίσωση. Ο γενετικός αλγόριθμος έχει σαν είσοδο πραγματικά δεδομένα ρεύματος εκφόρτισης, που προέκυψαν από σειρές μετρήσεων για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 της Schaffner, και DITO της EM TEST, και τα οποία ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί σαν αναφορά για να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους των εξισώσεων. Για την ενίσχυση της αποδοτικότητας του γενετικού αλγορίθμου, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα κατάλληλη συνάρτηση δειγματοληψίας, που καταφέρνει να μειώσει σημαντικά το μέγεθος της πληροφορίας η οποία είναι απαραίτητη για την κανονική λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου.

Λέξεις κλειδιά

Βελτιστοποίηση, γενετικός αλγόριθμος, κριτήρια τερματισμού, γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, εξισώσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, συνάρτηση δειγματοληψίας,.

Abstract

This diploma thesis attempts to develop a method for the estimation of the parameters of the electrostatic discharge current equations, using genetic algorithms. The genetic algorithm, created using the MATLAB software package, was applied on five electrostatic discharge current equations, using four different termination criteria. The input data of the genetic algorithm are real current measurements, produced by two Schaffner's electrostatic discharge generators: NSG-433, NSG-438 and EM TEST's DITO. By using these data as a reference, the genetic algorithm optimizes the equations' parameters. In order to enhance the algorithm's efficiency, an appropriate sampling function was developed and applied to the experimental data. This function manages to, drastically, cut down the necessary information needed by the genetic algorithm in order, for the last one, to work properly.

Key words

Optimization, genetic algorithm, termination criteria, electrostatic discharge generators, electrostatic discharge, electrostatic discharge current equations, sampling function.

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Χριστίνας Αναγνωστοπούλου για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των εξισώσεων, που περιγράφουν το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τη βοήθεια γενετικού αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB και χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων των εξισώσεων του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τον υπολογισμό του εκάστοτε ελάχιστου σφάλματος. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ελήφθησαν μετρήσεις ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων εξ επαφής με τις γεννήτριες NSG-433, NSG-438 και DITO, σε δοκίμιο τοποθετημένο σε κατακόρυφη θέση υπό τάση φόρτισης ± 4 kV.

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

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί, που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του υπό εξέταση φαινομένου. Επίσης αναφερόμαστε στους τρόπους δημιουργίας της ηλεκτροστατικής φόρτισης, στα μοντέλα που την περιγράφουν καθώς και στα μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν προκειμένου να προστατεύσουμε τον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό μας. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι εξισώσεις που περιγράφουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το διεθνές Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 καθώς και οι αλλαγές που έγιναν σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση EN 61000-04-02:1996, και δίνονται ορισμοί διαφόρων σημαντικών όρων που περιέχονται σε αυτό. Στο Πρότυπο ορίζονται: η τυπική κυματομορφή του ρεύματος, τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής, τα όρια για τις παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και τις αβεβαιότητες τύπου A και B των μετρήσεων, ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός και η διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται κάθε φορά για την διενέργεια των δοκιμών.

Επίσης περιγράφεται η διαδικασία των μετρήσεων και παρατίθεται αναλυτικά και με φωτογραφικό υλικό η πειραματική διάταξη, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός, που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Δίνονται σχήματα και τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών NSG-433, NSG-438 και DITO και των σημαντικών μερών της όλης διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται εισαγωγή στην έννοια και στην λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων. Παρουσιάζονται οι συναρτήσεις σφάλματος που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια σύγκρισης και περιγράφεται λεπτομερώς η συνάρτηση δειγματοληψίας που εφαρμόστηκε. Ακολούθως, αναλύεται ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB και η εφαρμογή του στα πειραματικά δεδομένα.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου και δίνονται σε πίνακες οι τιμές σφάλματος που υπολογίστηκαν και οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι μεταξύ τους συγκρίσεις παρατίθενται σε κοινά διαγράμματα.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη συμπαράστασή του και το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που μου παρείχε.

Τον κ. Παύλο Σ. Κατσιβέλη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράστασή του, καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόδυθμα προσέφερε τη βοήθειά του και τις γνώσεις του πάνω σε θέματα προγραμματισμού, που αφορούσαν τη διπλωματική μου εργασία και κυρίως πάνω σε θέματα του προγράμματος MATLAB, δίνοντας λύση σε κρίσιμα σημεία.

Την κ. Φανή Η. Ασημακοπούλου, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές της.

Τέλος, δεν θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω πρωτίστως τους γονείς μου αλλά και τους φίλους μου, για την υποστήριξη και την συμπαράσταση τους.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περιεχόμενα	iii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις	1
1.1 Περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας	1
1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)	3
1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	3
1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	7
1.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και μέτρα προστασίας	8
1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	8
1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού	9
1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	11
1.4.1 Γενικά	11
1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model	13
1.4.3 Μαθηματικά μοντέλα για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	14
Κεφάλαιο 2: Μετρήσεις σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 61000-4-2	20
2.1 Πρότυπο EN 61000-4-2:2009	20
2.1.1 Περιγραφή νέου Προτύπου	20
2.2 Πειραματική διάταξη	27
2.2.1 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων	27
2.2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης	27
2.2.3 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	28
2.2.3.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433	28
2.2.3.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438	30
2.2.3.3 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO	33
2.2.4 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης	35

2.2.5 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας	37
2.2.6 Παλμογράφος	37
2.3 Μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης ± 4 kV – Μεθοδολογία	39
2.3.1 Διαδικασία μετρήσεων	39
2.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων-γραφικές παραστάσεις	42
Κεφάλαιο 3: Ο γενετικός αλγόριθμος	50
3.1 Γενικά για τους γενετικούς αλγορίθμους	50
3.2 Λειτουργία γενετικών αλγορίθμων	52
3.3 Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε	56
3.3.1 Η συνάρτηση δειγματοληψίας που αναπτύχθηκε	60
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου (Γ.Α.) σε πειραματικά δεδομένα	62
4.1 Εισαγωγή	62
4.2 Εξειδίκευση του Γ.Α. για τις εξισώσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	62
4.2.1 Γεννήτρια NSG-433	64
4.2.1.1 Τάση φόρτισης 4 kV θετικής πολικότητας	64
4.2.1.1.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος	65
4.2.1.1.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος	66
4.2.1.1.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος	67
4.2.1.1.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος	69
4.2.1.2. Τάση φόρτισης 4 kV αρνητικής πολικότητας	70
4.2.1.2.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος	71
4.2.1.2.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος	72
4.2.1.2.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος	73
4.2.1.2.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος	75
4.2.2 Γεννήτρια NSG-438	76
4.2.2.1 Τάση φόρτισης 4 kV θετικής πολικότητας	77
4.2.2.1.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος	77
4.2.2.1.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος	79

4.2.2.1.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος	80
4.2.2.1.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος	81
4.2.2.2. Τάση φόρτισης 4 kV αρνητικής πολικότητας	82
4.2.2.2.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος	83
4.2.2.2.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος	85
4.2.2.2.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος	86
4.2.2.2.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος	87
4.2.3 Γεννήτρια DITO	89
4.2.3.1 Τάση φόρτισης 4 kV θετικής πολικότητας	89
4.2.3.1.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος	90
4.2.3.1.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος	91
4.2.3.1.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος	92
4.2.3.1.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος	94
4.2.3.2 Τάση φόρτισης 4 kV αρνητικής πολικότητας	95
4.2.3.2.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος	96
4.2.3.2.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος	98
4.2.3.2.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος	99
4.2.3.2.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος	101
4.3 Συμπεράσματα	102
Κεφάλαιο 5: Η επόμενη μέρα	103
Βιβλιογραφία	105
Παράρτημα Α	108
Παράρτημα Β	115

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

1.1 Περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

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

Σύμφωνα με το IEEE [1]: **Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα** (EMC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης μιας συσκευής ή ενός συστήματος, να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σε αυτό το περιβάλλον.

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

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

Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility) είναι η αδυναμία μίας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μίας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

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

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

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

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

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

Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή ίδιου του μέσου διάδοσης. Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα

ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μία αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών.

Συνεπώς, η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

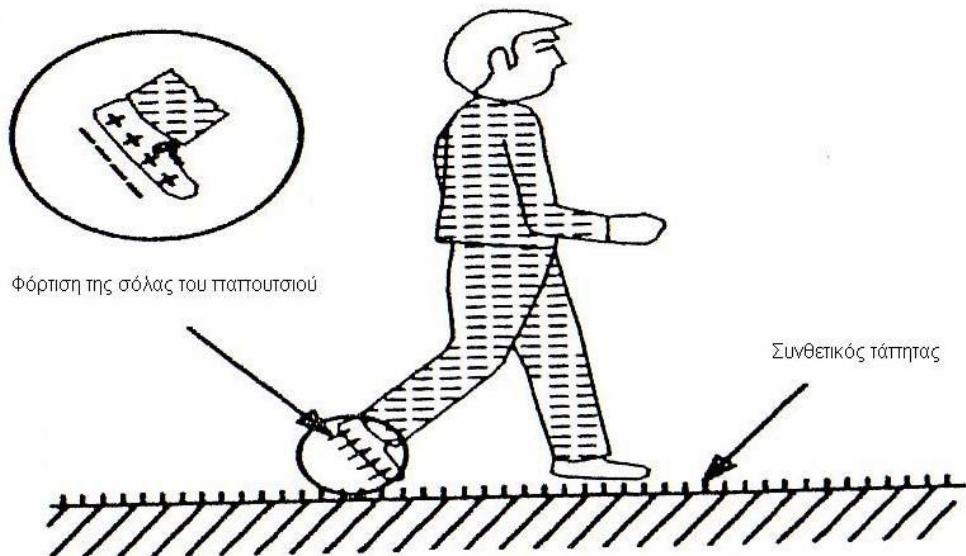
1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

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

1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια γίνεται φορτίζεται αρνητικά.

Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με 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 να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.



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

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Η ιδιότητα αυτή των υλικών συνοψίζεται στην **τριβοηλεκτρική σειρά**, μια λίστα όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με τις φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική). Αυτή η λίστα, που δίνεται παρακάτω Πίνακας 1.1, συνήθως κατατάσσει τα υλικά σε φθίνουσα σειρά θετικής φόρτισης (δίνουν ηλεκτρόνια), και αύξουσα σειρά αρνητικής φόρτισης (δέχονται ηλεκτρόνια). Κάπου στη μέση είναι εκείνα τα υλικά που δεν έχουν έντονη τάση ούτε προς θετική ούτε προς αρνητική φόρτιση.

ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΠΙΟ ΘΕΤΙΚΑ	
Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυναί Ανθρώπινα μαλλιά Νάιλον Μαλλί ⁺ Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη	+++ +
Βαμβάκι	
Ατσάλι Ξύλο Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξείδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό ⁻ Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης	- - - -
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΠΙΟ ΑΡΝΗΤΙΚΑ	

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά

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

Η φόρτιση εξ επαφής είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου. Άλλοι τρόποι, όπως μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona είναι επίσης δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό

διάστημα. Η απότομη και στιγμιαία μεταφορά αυτού του φορτίου (ροή ηλεκτρικού ρεύματος) 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 παρακάτω:

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

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 ήπιας 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). Επιβλαβής τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν ακόμα και 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

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

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

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών φαίνονται στον Πίνακα 1.2. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

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

Πίνακας 1.2: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις

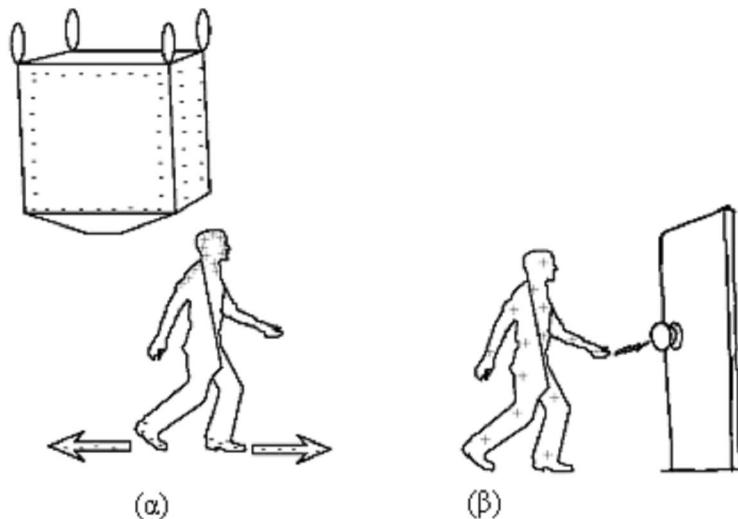
Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [3], [4] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Με δεδομένο ότι η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα στιγμιαίο φαινόμενο, με διάρκεια μικρό κλάσμα του ms, κατά τη διάρκεια του φαινομένου, αποκλείεται εκ των πραγμάτων η οποιαδήποτε επέμβαση στις παραμέτρους του παλμού, είναι απαραίτητος ο σαφής και εκ των προτέρων καθορισμός των παραμέτρων του τυπικού παλμού ρεύματος.

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

1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο [5], αλλά μπορεί να γίνει εξ επαγωγής. Συγκεκριμένα όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται δίπλα σε ένα φορτισμένο σώμα) τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγώγιμης σύνδεσης. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

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



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

1.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και μέτρα προστασίας

1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

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

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

1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

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

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

ως προς γη μικρότερη των 107Ω και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

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

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

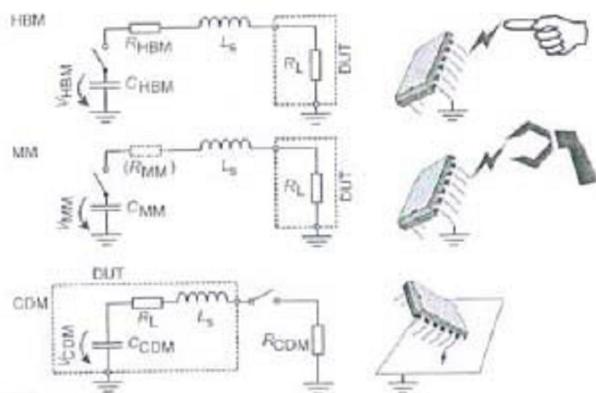
Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Για αυτό προκειμένου να είναι αποτελεσματικές πρέπει τα πλαίσια να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα ή έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μποντόν, τα οποία διαπερνούν το πλαίσιο. Το μέγιστο δυναμικό το οποίο μπορεί να αναπτύξει ένα ανθρώπινο σώμα είναι 25 kV . Εάν ένα άτομο πλησιάσει κάποιο μέρος του σώματός του, το οποίο συνηθέστερα είναι το δάκτυλό του, πλησιέστερα από 1 cm , μακριά από το κύκλωμα, τότε δεν θα συμβεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εφόσον η διάσπαση του αέρα γίνεται στα 30 kV . Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας κυκλωμάτων από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η τοποθέτησή τους σε ένα αγώγιμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματά του.

1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.4.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να εκτιμηθεί η επίδραση που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2, 6, 8]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model – HBM), το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM).

Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των μοντέλων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από δεύτερης 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 [6]

Θεωρώντας *RESD* τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης *RL* της υπό εξέτασης συσκευής (Device Under Test, DUT), *CESD* την χωρητικότητα του πυκνωτή, ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση *VESD* και *LS* την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης, η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

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

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

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

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

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} a^2 t e^{-at}, \text{ για } a = \omega_0 \quad (1.4)$$

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

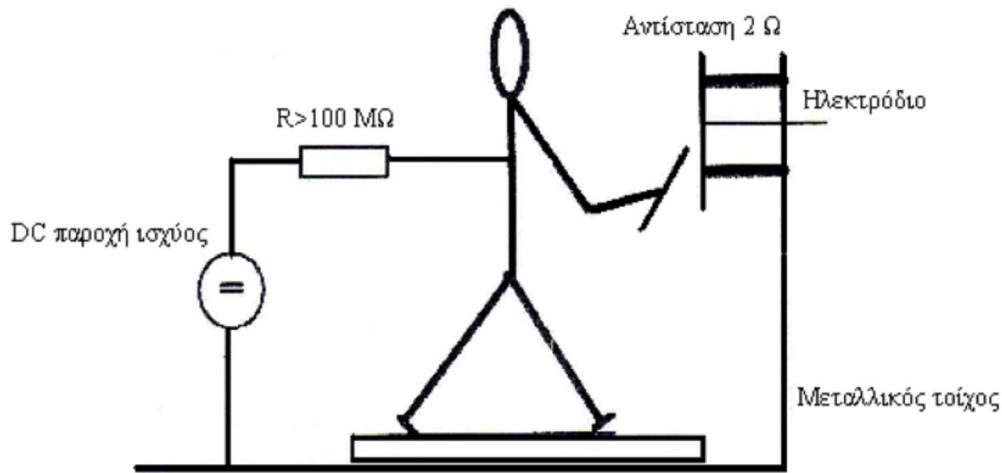
Παραδείγματα για τις τυπικές παραμέτρους και των τριών μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1.3.

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 x 10 ⁸ s ⁻¹	0,1 x 10 ⁸ s ⁻¹	10 x 10 ⁸ s ⁻¹
ω_0	0,5 x 10 ⁸ s ⁻¹	0,8 x 10 ⁸ s ⁻¹	30 x 10 ⁸ s ⁻¹

Πίνακας 1.3: Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

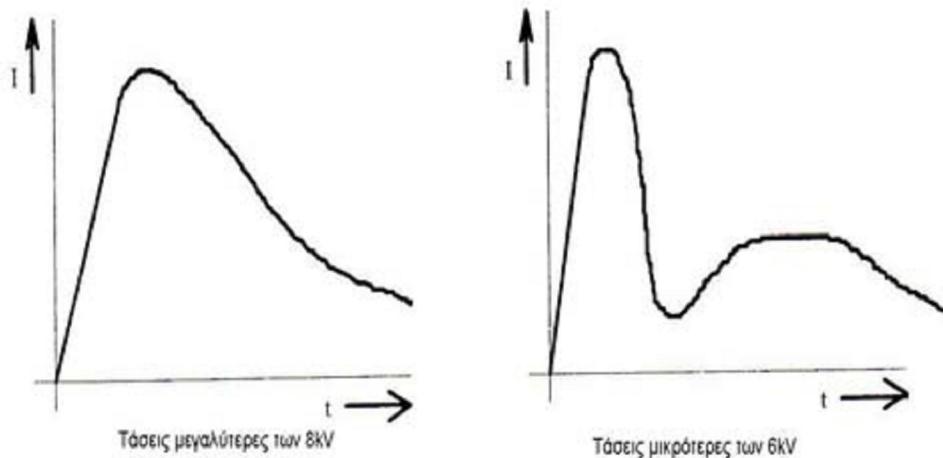
1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model

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



Σχήμα 1.4: Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρωπίνου σώματος

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



Σχήμα 1.5: Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)

1.4.3 Μαθηματικά μοντέλα για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που είναι στην ουσία ένα κύκλωμα προσομοίωσης των διάφορων μοντέλων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης θα πρέπει να αναπαράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αξιόπιστα και με ακρίβεια. Όσον αφορά στο HUMAN BODY MODEL το Πρότυπο [16], που αναλύεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2, καθορίζει λίγες από τις παραμέτρους της κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Όπως θα δούμε παρακάτω οι παράμετροι αυτοί είναι οι εξής: η πρώτη κορυφή του ρεύματος, ο χρόνος ανόδου, η τιμή του ρεύματος στα 30 ns, η τιμή του ρεύματος στα 60 ns. Οι ορισμένες τιμές, παραδείγματος χάριν, για τάση εκφόρτισης 4 kV είναι η τιμή του πρώτου μεγίστου $15 \text{ A} \pm 15\%$, του ρεύματος 30 ns $8 \text{ A} \pm 30\%$ και του ρεύματος στα 60 ns $4 \text{ A} \pm 30\%$. Ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης για τα συγκεκριμένα επίπεδα τάσης φόρτισης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 1 ns.

Έχει παρατηρηθεί όμως ότι, ενώ έχουν κατασκευαστεί γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης συμμορφωμένες προς το Πρότυπο [16], για δοκιμές σε διάφορα δοκίμια αδυνατούν να αναπαράγουν την ίδια κυματομορφή ρεύματος που ορίζεται από το Πρότυπο [16]. Έτσι προέκυψε η ανάγκη ανάπτυξης μιας αναλυτικής και ακριβούς εξίσωσης για το ρεύμα εκφόρτισης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων εμπορικής χρήσης με αποτέλεσμα πολλοί ερευνητές προκείμενου να πλησιάσουν την ιδανική μορφή της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, να προτείνουν σε εργασίες

τους διαφορετικές μαθηματικές εκφράσεις συναρτήσει ενός πλήθους παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτών των εξισώσεων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τιμές ρευμάτων εκφόρτισης που μετρήθηκαν από μία γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ευρέως χρησιμοποιούμενη στο εμπόριο, που κατασκευάστηκε σύμφωνα με το Πρότυπο.

Διάφορες μαθηματικές περιγραφές σύμφωνες με το Πρότυπο [16], που έχουν προταθεί για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για μοντέλο εκφόρτισης ανθρώπου-μετάλλου, παρουσιάζονται παρακάτω με παράθεση των ορισμένων τιμών των παραμέτρων τους [12].

Πρώτες προτεινόμενες εξισώσεις του ρεύματος εκφόρτισης εμπορικών προσομοιωτών είναι μια τετραπλο-εκθετική συνάρτηση (1.5), η γκαουσσιανή συνάρτηση (1.6) και η διωνυμική βηματική συνάρτηση για $p=8$ και $q=1$ (1.7) :

$$\triangleright \quad i(t) = I_1 \left(e^{-t/t_1} - e^{[-t/t_2]} \right) + I_2 \left(e^{[-t/t_3]} - e^{[-t/t_4]} \right) \quad (1.5)$$

με τιμές παραμέτρων

$$I_1 = 498 \text{ A} \quad t_1 = 1.4 \text{ ns} \quad t_3 = 23.37 \text{ ns}$$

$$I_2 = 148.5 \text{ A} \quad t_2 = 1.3 \text{ ns} \quad t_4 = 20 \text{ ns}$$

$$\triangleright \quad i(t) = I_1 e^{[-(t-t_1/s_1)^2]} + I_2 t e^{[-(t-t_2/s_2)^2]} \quad (1.6)$$

με τιμές παραμέτρων

$$I_1 = 13.25 \text{ A} \quad t_1 = 2 \text{ ns} \quad s_1 = 0.6 \text{ ns}$$

$$I_2 = 391 \text{ A} \quad t_2 = 300 \text{ ns} \quad s_2 = 122.2 \text{ ns}$$

$$\triangleright \quad i(t) = I_1 \left(1 - e^{[-t/t_1]} \right)^p e^{[-t/t_2]} + I_2 \left(1 - e^{[-t/t_3]} \right)^q e^{[-t/t_4]} \quad (1.7)$$

με τιμές παραμέτρων

$$I_1=106.5 \text{ A}$$

$$t_1=0.62 \text{ ns}$$

$$t_3=55 \text{ ns}$$

$$p=8$$

$$I_2=60.5 \text{ A}$$

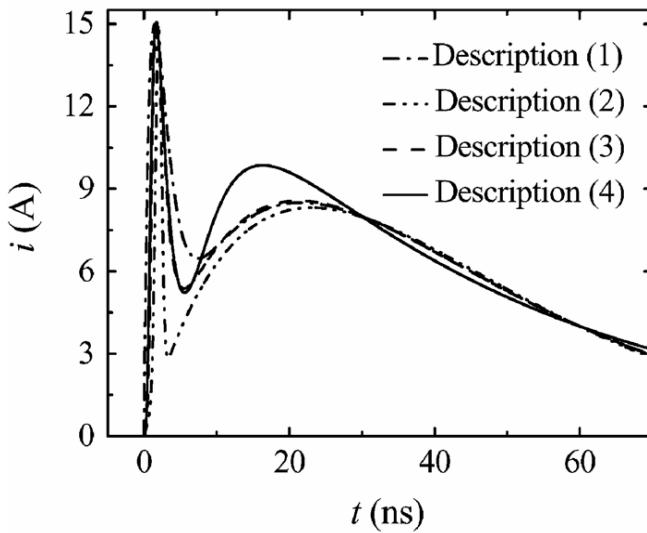
$$t_2=1.1 \text{ ns}$$

$$t_4=26 \text{ ns}$$

$$q=1$$

που είναι μια ειδική μορφή της βηματικής συνάρτησης που είχε εισαχθεί για πρώτη φορά στο βιβλίο με τίτλο “*A new analytical expression of standard current waveform*” των S.Shenglin, B.Zengjun και L.Shanghe σύμφωνα με το [12] και περιγράφεται από την εξίσωση $i(t)=I_o \left(1-e^{-[t/\tau_1]}\right)^p e^{-[t/\tau_2]}$.

Οι κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για καθεμία από τις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις, μαζί με την πρότυπη περιγραφή του Heidler [11] φαίνονται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης ρεύματος εκφόρτισης για τις μαθηματικές περιγραφές (1.5), (1.6), (1.7) και (1.13) [12]

Λόγω της αποτελεσματικότητας της βηματικής συνάρτησης, ως προς το να παράγει πιστά την ιδανική κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, στο [12] παρουσιάστηκαν αναλυτικά δυο νέες εναλλακτικές πολυωνυμικές μορφές της συνάρτησης, που προέκυψαν από παραγοντοποίηση, ως προτεινόμενες εξισώσεις για την αναπαράσταση του ρεύματος εκφόρτισης. Αυτές είναι οι τετραωνυμική (1.8) και η τριωνυμική (1.9) συνάρτηση παλμού που δίνονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \Rightarrow i(t) = & I_o \left(1 - e^{-t/t_1}\right)^p e^{-t/t_2} + I_1 \left(1 - e^{-t/t_3}\right)^q e^{-t/t_4} + I_2 \left(1 - e^{-t/t_5}\right)^r e^{-t/t_6} \\ & + I_3 \left(1 - e^{-t/t_7}\right)^s e^{-t/t_8} \end{aligned} \quad (1.8)$$

με τιμές παραμέτρων

$$I_o = 60.5 \text{ A} \quad t_1 = 0.641 \text{ ns} \quad t_5 = 46.620 \text{ ns} \quad p = 5$$

$$I_1 = 68.78 \text{ A} \quad t_2 = 1.640 \text{ ns} \quad t_6 = 32.080 \text{ ns} \quad q = 4$$

$$I_2 = 52.84 \text{ A} \quad t_3 = 7.144 \text{ ns} \quad t_7 = 16.710 \text{ ns} \quad r = 5$$

$$I_3 = 54.83 \text{ A} \quad t_4 = 8.254 \text{ ns} \quad t_8 = 19.750 \text{ ns} \quad s = 4$$

$$\Rightarrow i(t) = I_o \left(1 - e^{-t/t_1}\right)^p e^{-t/t_2} + I_1 \left(1 - e^{-t/t_3}\right)^q e^{-t/t_4} + I_2 \left(1 - e^{-t/t_5}\right)^r e^{-t/t_6} \quad (1.9)$$

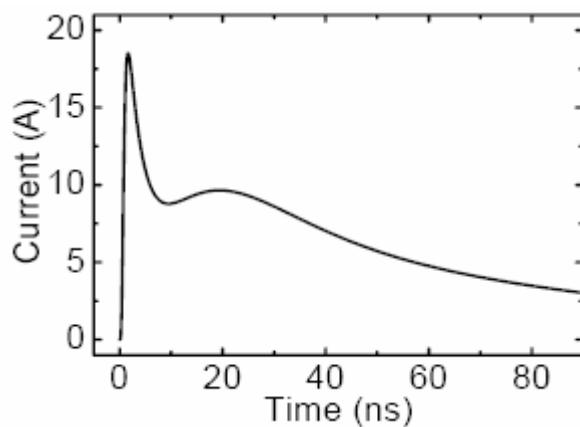
με τιμές παραμέτρων

$$I_o = 53.52 \text{ A} \quad t_1 = 0.606 \text{ ns} \quad t_4 = 14.220 \text{ ns} \quad p = 5$$

$$I_1 = 27.89 \text{ A} \quad t_2 = 1.759 \text{ ns} \quad t_5 = 18.170 \text{ ns} \quad q = 5$$

$$I_2 = 19.19 \text{ A} \quad t_3 = 5.000 \text{ ns} \quad t_6 = 38.260 \text{ ns} \quad r = 3$$

Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης που έλαβαν για την τριωνυμική εξίσωση (1.9) φαίνεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης [10]

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση, που δεν αντιστοιχεί στο ρεύμα εκφόρτισης, αλλά έχει χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση με εφαρμογή γενετικού αλγορίθμου, είναι η εξίσωση του κεραυνικού ρεύματος που δίδεται από τον ακόλουθο τύπο [13]:

$$\triangleright \quad i(t) = i_0 \left(e^{\frac{t}{t_1}} - e^{\frac{t}{t_2}} \right) \quad (1.10)$$

Μια άλλη προσεγγιστική εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης εμπορικών προσομοιωτών [14] χρησιμοποιεί τη διπλοεκθετική συνάρτηση:

$$\triangleright \quad i(t) = i_1 e^{\frac{t}{t_1}} - i_2 e^{\frac{t}{t_2}} \quad (1.11)$$

Σύμφωνα με το [15] η συνάρτηση αναφοράς του ρεύματος εκφόρτισης είναι η ακόλουθη:

$$\triangleright \quad i(t) = A e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)} - B t e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)} \quad (1.12)$$

Ο παλμός που περιγράφεται στο [15] μπορεί να θεωρηθεί ως άθροισμα δύο γκαουσσιανών καμπυλών, μίας στενής και μίας ευρείας. Η (1.12) είναι πιο κοντά σε

αυτήν εφόσον οι παράγοντες $A e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)}$ και $B t e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)}$ αντιπροσωπεύουν την στενή και την ευρεία γκαουσσιανή, αντίστοιχα.

Μια άλλη κυματομορφή προσεγγίζεται από μια σύνθετη μαθηματική περιγραφή προερχόμενη από τη πρότυπη μαθηματική έκφραση του κεραυνού όπως έχει προταθεί από τον Heidler [11] (εξίσωση του Heidler) και υιοθετηθεί, με ελαφρώς διαφοροποιημένες παραμέτρους, για τις ανάγκες του προβλήματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το Πρότυπο [16]:

$$\triangleright \quad i(t) = \frac{i_1}{k_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{\frac{t}{\tau_2}} + \frac{i_2}{k_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} e^{\frac{t}{\tau_4}} \quad (1.13)$$

με

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

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

με τιμές παραμέτρων

$$i_1 = 17.5 \text{ A}$$

$$\tau_1 = 1.3 \text{ ns}$$

$$\tau_3 = 8.7 \text{ ns}$$

$$i_2 = 10.1 \text{ A}$$

$$\tau_2 = 1.7 \text{ ns}$$

$$\tau_4 = 42 \text{ ns}$$

το ο καθορίζει πόσες φορές μπορεί να παραγωγισθεί ως προς το χρόνο και εδώ ορίζεται $n=3$. [12]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω εξισώσεις (1.5), (1.6), (1.7), (1.8) και (1.9), οι άγνωστες παράμετροι των οποίων πρέπει να βελτιστοποιηθούν, ώστε να περιγράψουν αναλυτικά το μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον αριθμό εξισώσεων αναπτύχθηκε ο γενετικός αλγόριθμος που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.

Κεφάλαιο 2

Μετρήσεις σύμφωνα με το ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2

2.1 Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009

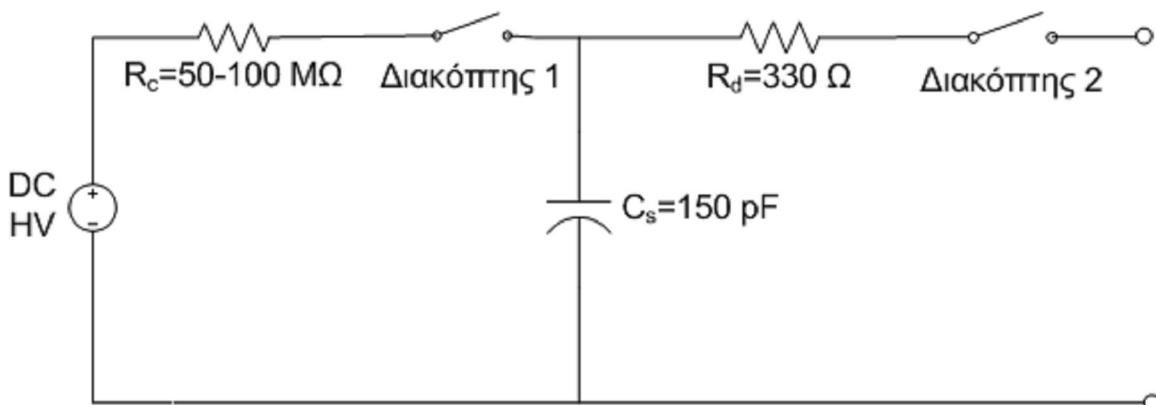
Το διεθνές Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [16] περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, που αποτελεί αναθεώρηση του Προτύπου ΕΝ 61000.04.02:1996 [17] περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες, που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διεξαγωγή της δοκιμής ατρωσίας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης. Συγκεκριμένα ορίζει την τυπική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, τα επίπεδα τάσεων δοκιμών, τον απαιτούμενο εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία των δοκιμών.

2.1.1 Περιγραφή νέου Προτύπου

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που περιγράφεται στο Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [16] βασίζεται στο μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model). Το κύκλωμά της, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.1, αποτελείται από τον πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας (C_s), με τιμή αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος, την αντίσταση φόρτισης (R_c), την αντίσταση εκφόρτισης (R_d) (συνολική αντίσταση της επιδερμίδας-όχι μόνο της περιοχής κοντά στο σημείο της εκφόρτισης), το τροφοδοτικό υψηλής τάσης και τον διακόπτη εκκένωσης που τυπικά είναι ένα ρελέ διακένου.

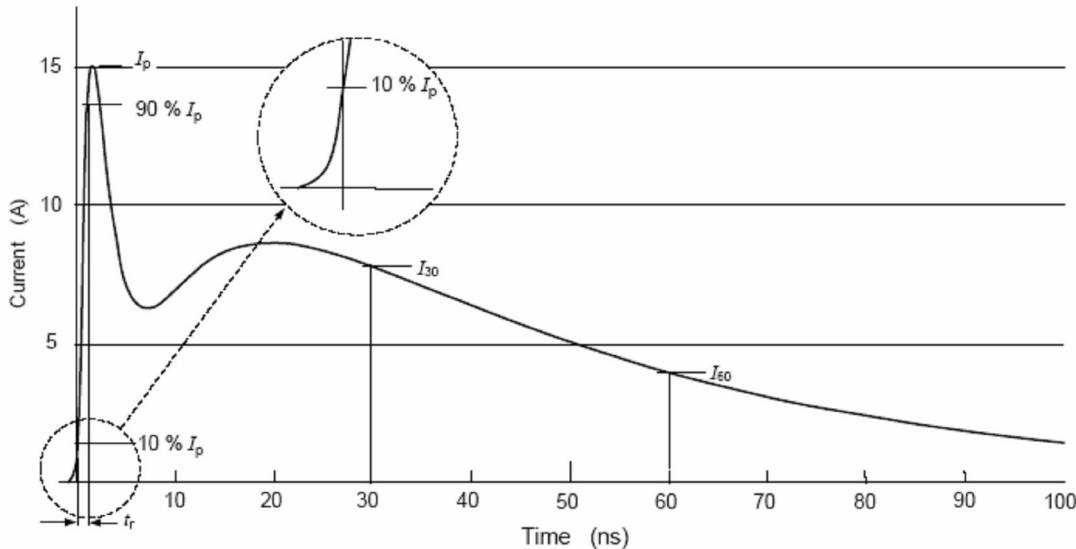
Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πυκνωτής εκκένωσης:	$C_s = 150 \text{ pF} \pm 10\%$
Αντίσταση φόρτισης:	$R_c = 50 \div 100 \text{ M}\Omega$
Αντίσταση εκκένωσης:	$R_d = 330 \Omega \pm 10\%$
Τάση εκκένωσης:	200 V..15 kV εκφόρτιση αέρος 200 V..8 kV εκφόρτιση επαφής



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 στα 4 kV [16]

Το μοντέλο αναφοράς της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι η εκφόρτιση ανθρώπου-μετάλλου. Σε αυτό το μοντέλο, 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. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση που συμβαίνει όταν ένα άτομο ακουμπά μια γειωμένη συσκευή. Η πηγή τάσης μέσω της R_c φορτίζει τον πυκνωτή C_s . Ο πυκνωτής με το κλείσιμο του διακόπτη που βρίσκεται στο δεξί μέρος του κυκλώματος εκφορτίζεται και θεωρούμε ότι συμβατικά μας δίνει την τυποποιημένη καμπύλη ρεύματος που ακολουθεί [16].



Σχήμα 2.2: Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 στα 4 kV [16]

Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.2, κυματομορφή ευκρινέστερη και πιο αναλυτική σε σχέση με αυτή του Προτύπου EN 61000-4-2:1996 [17], 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 ανθρωπίνου σώματος.

Οι τέσσερις βασικές παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται για το ρεύμα εκφόρτισης είναι: η πρώτη κορυφή του ρεύματος, ο χρόνος ανόδου, η τιμή του ρεύματος στα 30 ns, η τιμή του ρεύματος στα 60 ns. Όπου συγκεκριμένα:

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.

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

Στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις που διενεργούνται σύμφωνα με τις συνθήκες και τον εξοπλισμό που ορίζει το Πρότυπο [16] τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής του ρεύματος είναι καθορισμένα και οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων γνωστές, με κάποια βέβαια περιθώρια απόκλισης. Οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων κυριότερων παραμέτρων του ρεύματος που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων δίνονται στον Πίνακα 2.1, και αποτελούν την δεύτερη αλλαγή που εισάγει το αναθεωρημένο Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [16].

Επίπεδο	Ενδεικνυόμενη τάση φόρτισης (kV)	Κορυφή ρεύματος ±15% (A)	Χρόνος ανόδου tr ±25% (ns)	Ρεύμα (±30%) στα 30 ns(A)	Ρεύμα (±30%) στα 60 ns(A)
1	2	7,5	0,8	4	2
2	4	15		8	4
3	6	22,5		12	6
4	8	30		16	8

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής που ορίζει το

Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 στα 4 kV [16]

Η ανοχή της πρώτης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης διευρύνθηκε από ±10% σε ±15%. Επίσης ο χρόνος ανόδου κυμαίνονταν από $0.7 \div 1$ ns ενώ τώρα κυμαίνεται από $0.6 \div 1$ ns αφού η ανοχή του χρόνου ανόδου έχει γίνει ±25%.

Επίσης, το Πρότυπο [16] προτρέπει η κυματομορφή του ρεύματος να είναι εντός του $I(t) \pm 35\%$ για χρόνο από $2 \div 60$ ns, προτροπή που δεν υπήρχε μέχρι τώρα. Το $I(t)$ δίνεται από την εξίσωση (2.1), όπως έχει προταθεί από τον Heidler [11] (εξίσωση του Heidler) και υιοθετηθεί, για τις ανάγκες του προβλήματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το Πρότυπο [16], την οποία θα αναφέρουμε στο εξής ως εξίσωση Προτύπου:

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

όπου

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

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

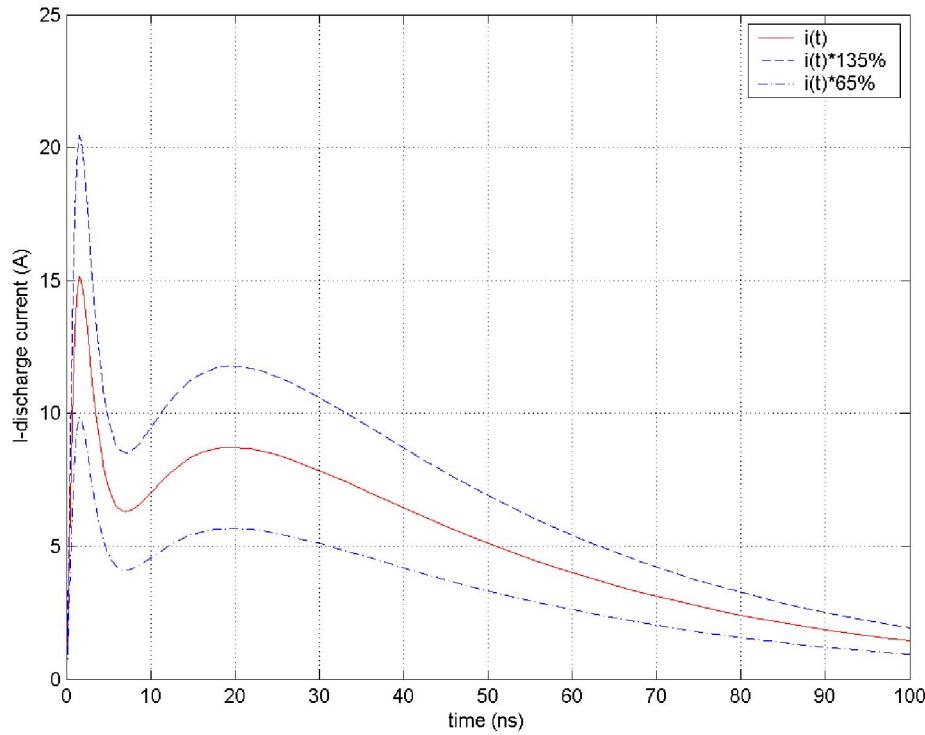
και

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

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

$$n = 1.8$$

Η απαιτούμενη κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο [16] για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται επίσης και οι συναρτήσεις $I(t) \cdot 135\%$ και $I(t) \cdot 65\%$ που αποτελούν τα προτεινόμενα όρια.

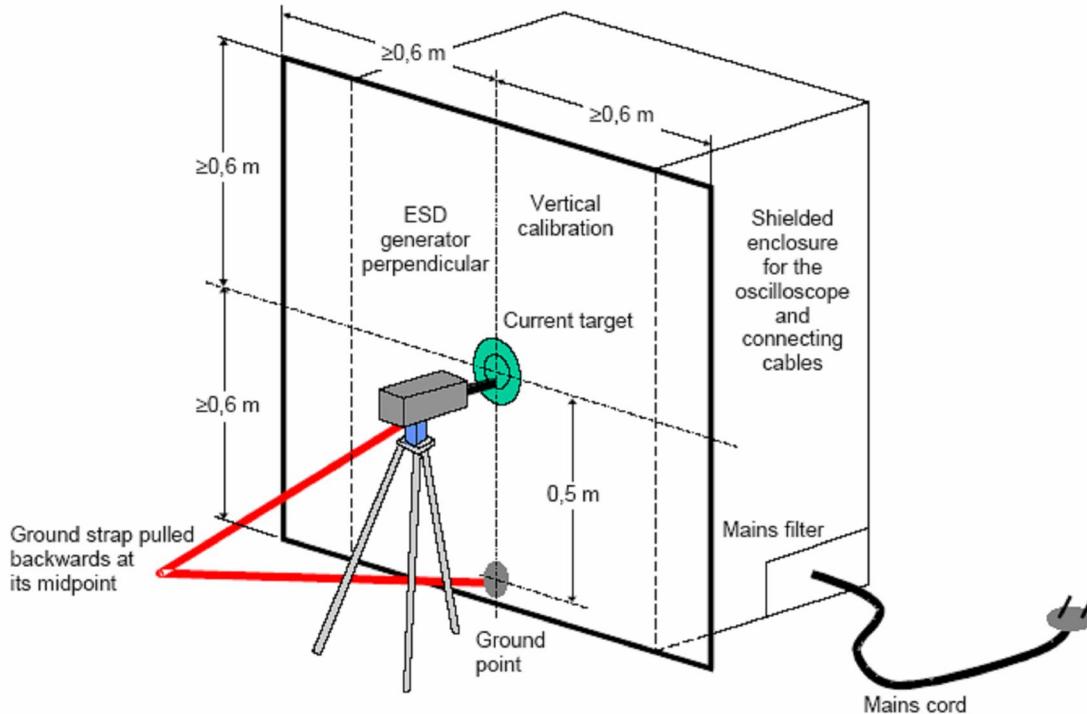


Σχήμα 2.3: Καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV

Μια τρίτη τροποποίηση που έγινε είναι ότι αντί να προσδιορίζουμε τις απώλειες του ομοαξονικού στόχου, προσδιορίζουμε τις απώλειες της μετρητικής αλυσίδας που αποτελείται από τον στόχο, τον εξασθενητή ο οποίος, σε αντίθεση με το προηγούμενο Πρότυπο [17], είναι προσαρμοσμένος πάνω στον στόχο και το ομοαξονικό καλώδιο. Έτσι απλοποιείται ο χαρακτηρισμός του μετρητικού συστήματος καθώς μόνο η μετρητική αλυσίδα και ο παλμογράφος χρειάζονται να χαρακτηριστούν και όχι κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

Μια τέταρτη διαφοροποίηση είναι ότι η γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, στης οποίας το κέντρο βρίσκεται τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης δεν είναι σε οριζόντια διάταξη, αλλά σε κατακόρυφη και αυτό γιατί με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η καλύτερη επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.4 ο στόχος τοποθετείται στο κέντρο του επιπέδου, και το σημείο γείωσης βρίσκεται σε κάθετη απόσταση 0.5 m από το στόχο. Το καλώδιο της γείωσης είναι τραβηγμένο προς τα πίσω από το μέσο του σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο. Τέλος η γεννήτρια

στηρίζεται πάνω σε ένα τρίποδο και θα πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα τροφοδοτείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 2.4: Διάταξη για την διακρίβωση της γεννήτριας-πειραματική διάταξη [16]

Τέλος το Πρότυπο [16] προσπαθώντας να επιτύχει υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας, εισάγει την έννοια της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: Τις αβεβαιότητες Τύπου Α, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους και τις αβεβαιότητες Τύπου Β, που υπολογίζονται με άλλα μέσα.

2.2 Πειραματική διάταξη

Παρακάτω παρουσιάζεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη και ο διαθέσιμος για τις δοκιμές εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα πάντα με αυτά που ορίζει το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [16] περί διεξαγωγής των δοκιμών.

2.2.1 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

Για την διεξαγωγή των δοκιμών ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- 3 γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης
- Βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή
- Ομοαξονικά καλώδια για υψίσυχα σήματα
- Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B
- Κλωβός Faraday

2.2.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η προτεινόμενη από το Πρότυπο [16], όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2.4 .

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 εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με τις γεννήτριες NSG-438, NSG-433 της εταιρίας Schaffner και DITO της εταιρίας EMTEST. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε τις κυματομορφές του, χρησιμοποιούμε ομοαξονικά καλώδια που μεταφέρουν στο εσωτερικό του θαλάμου το σήμα. Επειδή το ρεύμα που δημιουργείται έχει μεγάλες τιμές (περίπου 3.5 A/kV) για να εξασθενήσουμε τα αντίστοιχα σήμα πριν την εισαγωγή του στον παλμογράφο, στο ομοαξονικό καλώδιο υπάρχει ενσωματωμένος εξασθενητής. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ο οποίος παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 ως Pellegrini target είναι ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο

ρεύμα κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 103 της Schaffner.

2.2.3 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων της εταιρείας Schaffner την NSG-433 [18] και NSG-438 [19] και με την DITO της εταιρείας EMTEST [20]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά για κάθε μια από αυτές.

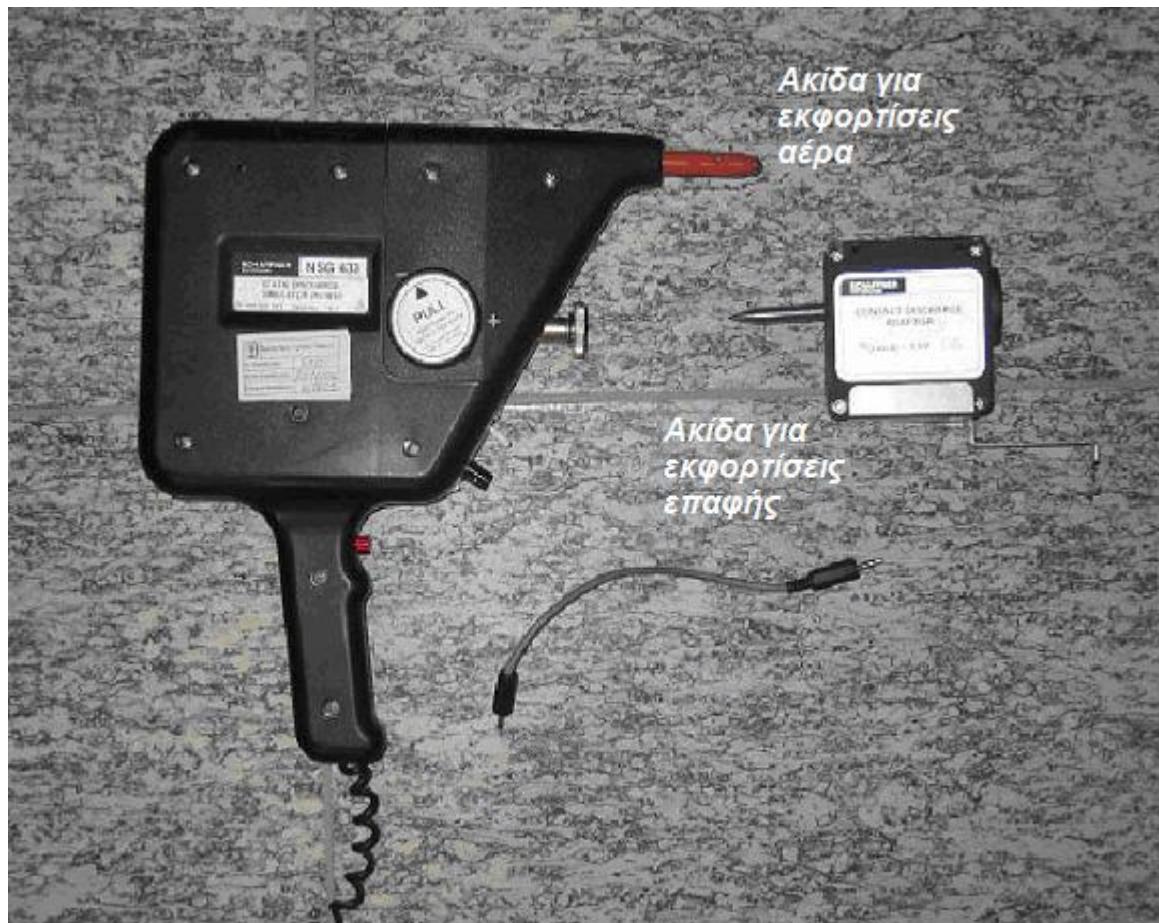
2.2.3.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 [18], η οποία φαίνεται στην Εικόνα 2.1 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.



Εικόνα 2.1: Η γεννήτρια NSG-433 [18]

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 [18] 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 στην Εικόνα 2.2. Η γεννήτρια NSG-433 [18] περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκφορτίσεων, που πραγματοποιούνται.



Εικόνα 2.2: Ακίδες για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής για τη γεννήτρια NSG-433 [18]

2.2.3.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 36 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται η γεννήτρια NSG-438 [19] και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται.



Εικόνα 2.3: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 [19]

Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 2.4 και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την 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

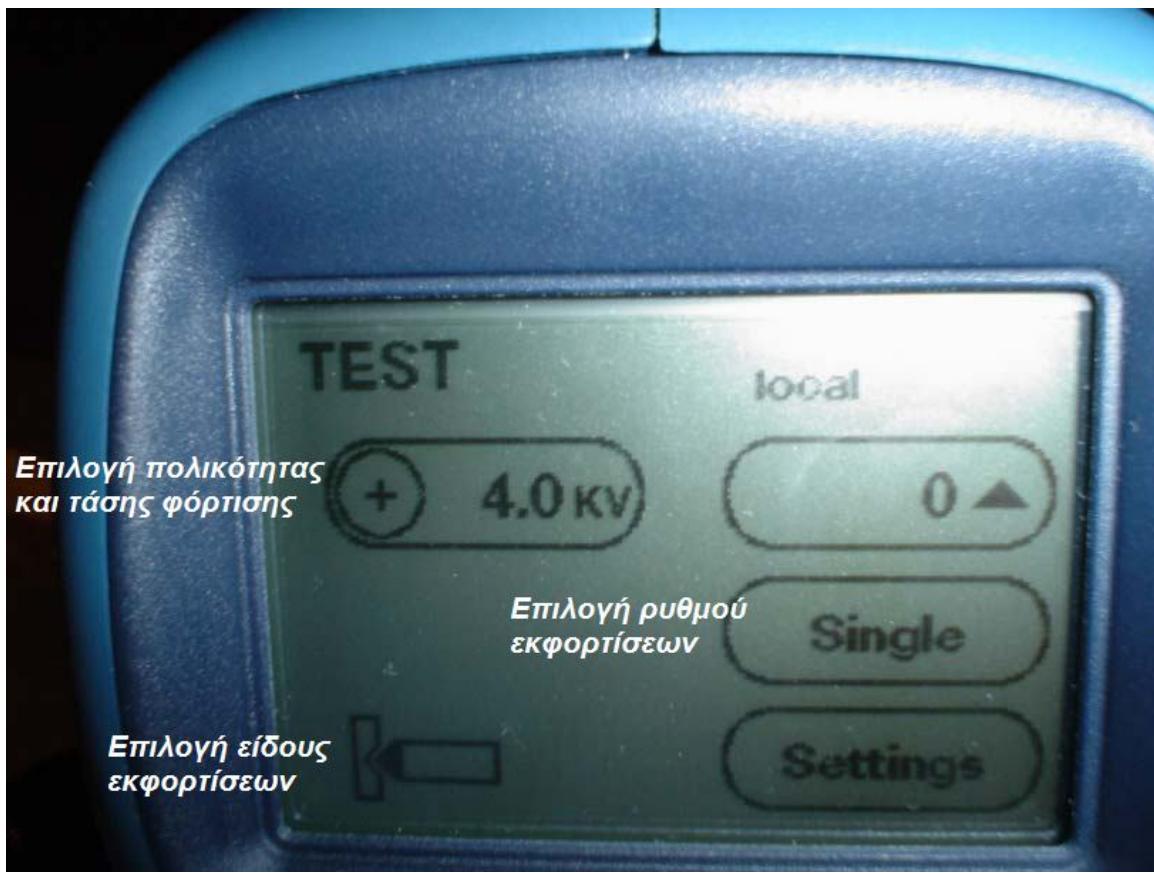
καλώδιο γείωσης. Στην λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.

- 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.



Εικόνα 2.4: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες [19]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η οθόνη είναι οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής. Όταν η γεννήτρια είναι έτοιμη για λειτουργία, στην οθόνη αφής εμφανίζεται το μενού που φαίνεται στην Εικόνα 2.5. Από την οθόνη αφής μπορούμε να επιλέξουμε την πολικότητα και την τιμή της τάσης εκφόρτισης που θέλουμε να κάνουμε, τη λειτουργία της γεννήτριας σε θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -), καθώς και το ρυθμό εκφόρτισης (απλός παλμός “single” ή επαναλαμβανόμενος “repeated”). Επίσης, προσέχουμε η ένδειξη στην οθόνη να δείχνει τη μορφή της εκκένωσης που θα πραγματοποιήσουμε. Αν θέλουμε να κάνουμε εκφορτίσεις επαφής και στην οθόνη υπάρχει το σύμβολο εκφόρτισης μέσω αέρα τότε από το Menu Settings επιλέγουμε διαδοχικά Discharge και Contact.



Εικόνα 2.5: Το μενού στην οθόνη αφής της NSG-438

Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δυο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433 [18] και NSG-438 [19], που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

	NSG-433	NSG-438
Πυκνωτής εκκένωσης C_s	150 pF $\pm 10\%$	150 pF
Αντίσταση εκκένωσης R	330 Ω $\pm 10\%$	330 Ω
Τάση φόρτισης 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: 7.5 A $\pm 10\%$ 4 kV: 15 A $\pm 10\%$	2 kV: 7.5 A $\pm 10\%$ 4 kV: 15 A $\pm 10\%$
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 °C	5 - 40 °C
Υγρασία λειτουργίας	20% - 80%	20% - 80%

Πίνακας 2.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριων ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

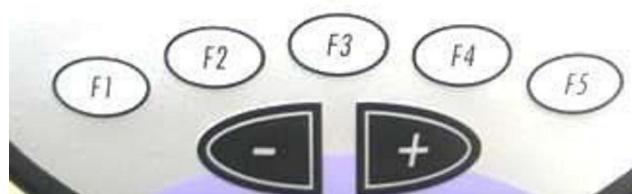
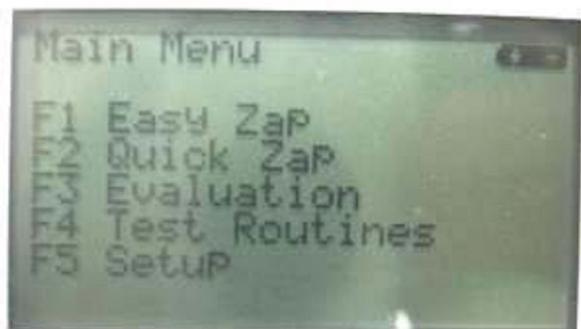
[18] και NSG-438 [19]

2.2.3.3 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO

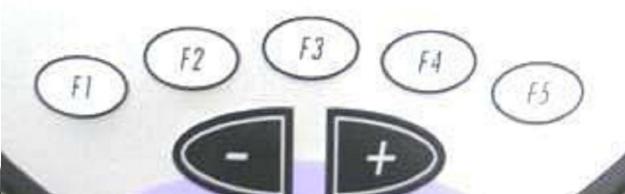
Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO [20] που φαίνεται στην Εικόνα 2.6, παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις έως ± 16.5 kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Η αλλαγή της πολικότητας, η ρύθμιση του επιπέδου τάσης, και όλες οι επιθυμητές ρυθμίσεις για τη διεξαγωγή της δοκιμής γίνονται με τα πλήκτρα που βρίσκονται πάνω στη γεννήτρια. Η οθόνη υποδοχής και το μενού μέσα από το οποίο γίνονται όλες οι ρυθμίσεις φαίνεται στις Εικόνες 2.7 και 2.8 αντίστοιχα.



Eikόνα 2.6: Γεννήτρια DITO



Eikόνα 2.7: Οθόνη υποδοχής



Eikόνα 2.8: Οθόνη MENU [20]

Η γεννήτρια Dito [20] συνίσταται βασικά από το καθεαυτό «πιστόλι». Οι ακίδες για εκφόρτιση αέρος ή επαφής, είναι ξεχωριστές από το κύριο σώμα της γεννήτριας και εφαρμόζουν εύκολα σε αυτό. Για την τροφοδοσία της γεννήτριας χρησιμοποιείται η μπαταρία της γεννήτριας, η οποία βγαίνει και επαναφορτίζεται.

Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO [20] που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Πυκνωτής εκκένωσης C_s	$150 \text{ pF} \pm 10\%$
Αντίσταση εκκένωσης R	$330 \Omega \pm 10\%$
Τάση φόρτισης V_0	$500 \text{ V} \div 10 \text{ kV}$ για εκφορτίσεις εξ επαφής $500 \text{ V} \div 16.5 \text{ kV}$ για εκφορτίσεις στον αέρα
Πολικότητα	θετική/αρνητική
Χρόνος ανόδου	$0.7 \div 1 \text{ ns}$
Μέγιστο ρεύματος	$2 \text{ kV}: 7.5 \text{ A} \pm 10\% \quad 4 \text{ kV}: 15 \text{ A} \pm 10\% \quad 6 \text{ kV}: 22.5 \text{ A} \pm 10\% \quad 8 \text{ kV}: 30 \text{ A} \pm 10\%$
Τροφοδοσία φορτιστή μπαταρίας	$100 \text{ V} - 240 \text{ V} \pm 10\%; 50/60 \text{ Hz}$
Θερμοκρασία λειτουργίας	$5^\circ \text{C} - 40^\circ \text{C}$
Υγρασία λειτουργίας	$20\% - 80\%$

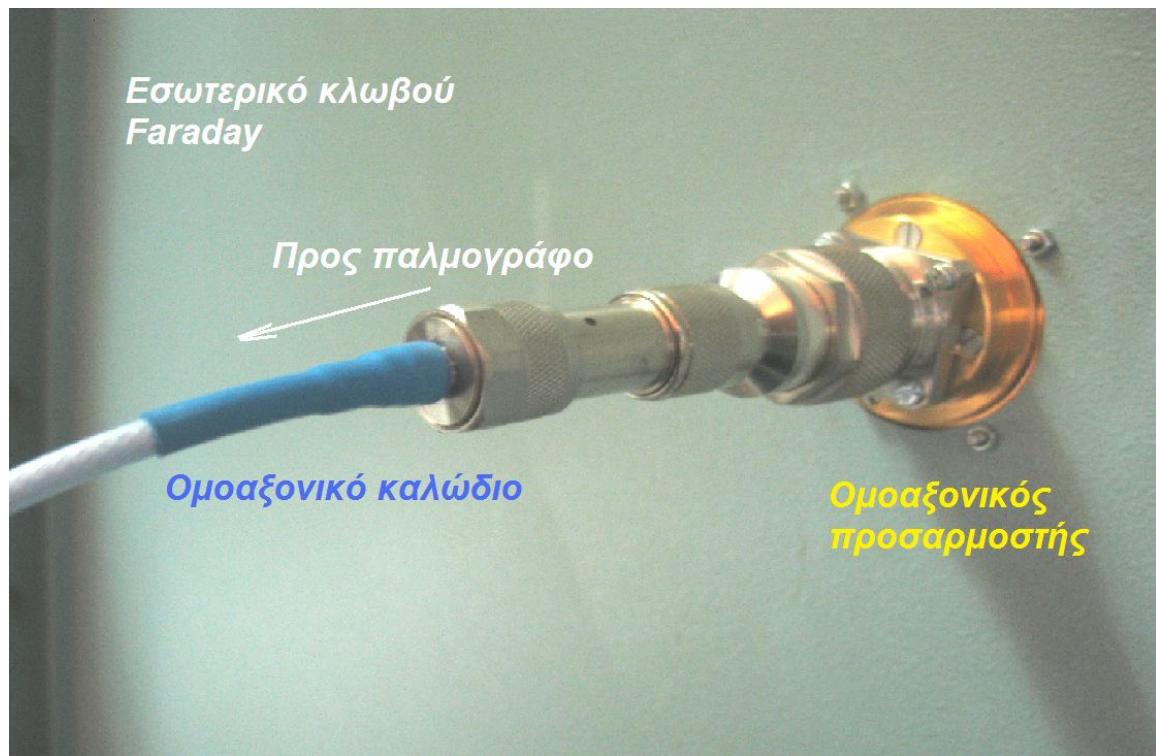
Πίνακας 2.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO [20]

2.2.4 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [21] είναι 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 103 της Schaffner [21]. Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής, που χρησιμοποιήθηκε και στην Εικόνα 2.10 ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη.



Εικόνα 2.9 : Ο ομοαξονικός προσαρμοστής TESEQ MD 103 [21]



Εικόνα 2.10: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής και το ομοαξονικό καλώδιο τοποθετημένα στη διάταξη

2.2.5 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.

2.2.6 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος μοντέλο TDS 7254B [22] είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix και λειτουργεί στα 2.5 GHz καλύπτοντας τις απαρτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [16] 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 [22] παρουσιάζεται στις Εικόνες 2.11, 2.12 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 2.4.



Εικόνα 2.11: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B [22]



Εικόνα 2.12: Κουμβία χειρισμού των παλμογράφου Tektronix TDS 7254B

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το κάθε κανάλι του παλμογράφου αντέχει μέγιστη τιμή ρεύματος μέχρι 5 V (rms τιμή).

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	$50 \Omega \pm 2.5\%$
Εναισθησία εισόδου στα 50Ω	2 mV/div ÷ 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	$<1 \text{ VRMS}$ για $r < 100 \text{ mV/div}$, $<5 \text{ VRMS}$ 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 2.4: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B [22]

2.3 Μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης ± 4 kV - Μεθοδολογία

Με τη βοήθεια της πειραματικής διάταξης που περιγράφηκε παραπάνω μετρήθηκε το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης εξ επαφής και καταγράφηκαν οι κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης +4 kV και -4 kV. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής 3 γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων: NSG-433 [18] και NSG-438 [19] της Schaffner, και DITO της EMTEST [20].

2.3.1 Διαδικασία μετρήσεων

Πριν την έναρξη των μετρήσεων προκειμένου να εξασφαλίσουμε την ορθή και ασφαλή λειτουργία καθεμιάς γεννήτριας, πραγματοποιήσαμε, σύμφωνα με την τεχνική οδηγία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, έλεγχο στην συνδεσμολογία καθώς και στην λειτουργία των γεννητριών.

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων σε κάθε γεννήτρια πραγματοποιούμε εκφορτίσεις επαφής, η τάση ορίζεται αρχικά στα +4 kV (θετική πολικότητα), έπειτα στα -4 kV (αρνητική πολικότητα), και ο παλμός απλός (single). Γι' αυτό το λόγο αφού ακουμπήσει το πιστόλι (με τη μυτερή ακίδα) στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης κατακόρυφα πατάμε το κουμπί εκφόρτισης (σκανδάλη). Επίσης, το καλώδιο της γείωσης του πιστολιού θα πρέπει να μη σχηματίζει βρόχο, αλλά να είναι όσο πιο ευθύγραμμο γίνεται. Το σχήμα του καλωδίου γείωσης επηρεάζει το ρεύμα στα 60 ns.

Για κάθε επίπεδο τάσης πραγματοποιήθηκαν δέκα κρούσεις. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η διαδικασία καταγραφής των μετρήσεων.



Εικόνα 2.14: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-433 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία



Εικόνα 2.15: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

Στην οθόνη αφής της γεννήτριας NSG-438 μπορούμε να επιλέξουμε:

- την πολικότητα [θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -)]
- το είδος των εκφορτίσεων (επαφής ή αέρος)
- την τιμή της τάσης εκφόρτισης
- το ρυθμός εκφόρτισης (απλός παλμός “single” ή επαναλαμβανόμενος “repeated”)



Εικόνα 2.16: Μετρήσεις με τη γεννήτρια DITO

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την καλύτερη εποπτεία του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, του οποίου η διάρκεια είναι μικρότερη από 200 ns, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με έμφαση, τόσο στη συνολική διάρκεια του φαινομένου (καταγράφοντας την συνολική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης), όσο και στην αρχή του φαινομένου, δηλαδή μέχρι την αρχική κορυφή του ρεύματος. Αυτό επετεύχθη με την διεξαγωγή των μετρήσεων και για τις δύο ανωτέρω περιπτώσεις με διαφορετικές ρυθμίσεις δειγματοληψίας. Πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές του παλμογράφου στην

περίπτωση της αρχής της κυματομορφής και του συνόλου φαίνονται στους Πίνακες 2.5 και 2.6 αντίστοιχα.

Τάση φόρτισης (kV)	Υποδιαιρεση χρόνου (ps/div)	Υποδιαιρεση τάσης (mV/div)	Δειγματοληψία (Gs/div)
±4	500	500	20

Πίνακας 2.5: Ρυθμίσεις στον παλμογράφο (καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος από 0 έως 3 ns)

Τάση φόρτισης (kV)	Υποδιαιρεση χρόνου (ns/div)	Υποδιαιρεση τάσης (mV/div)	Δειγματοληψία (Gs/div)
±4	10	500	20

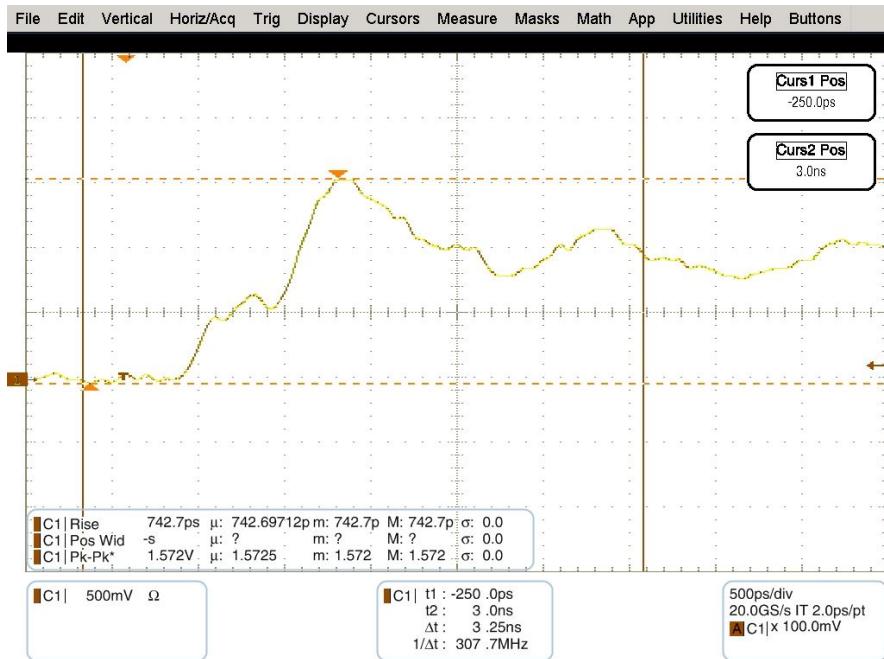
Πίνακας 2.6: Ρυθμίσεις στον παλμογράφο (καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος από 0 έως 80 ns)

Τα ζεύγη σημείων Ρεύματος – Χρόνου που λαμβάνονται, αποθηκεύονται σε ηλεκτρονική μορφή και σχεδιάζεται η κυματομορφή Ρεύματος – Χρόνου με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου υλοποιημένου σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab, ο οποίος δίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα A.

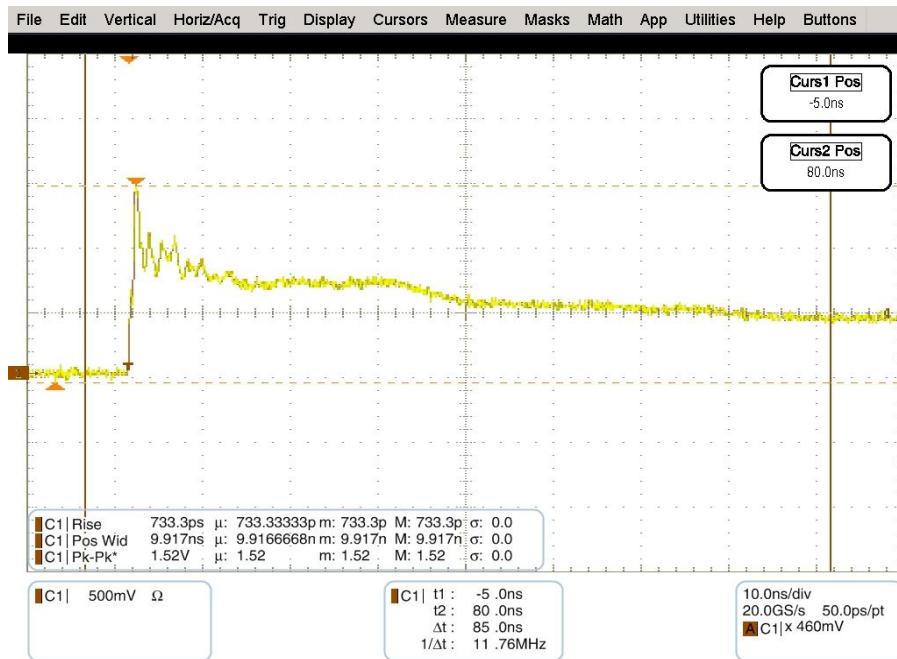
2.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων-γραφικές παραστάσεις

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μια σειρά από γραφήματα που αφορούν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που μετρήθηκε από τις τρεις γεννήτριες. Στα σχήματα που ακολουθούν, παραθέτονται τόσο τα παλμογραφήματα που προέκυψαν για τα πρώτα 3 ns της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όσο και αυτά για τη συνολική διάρκειά

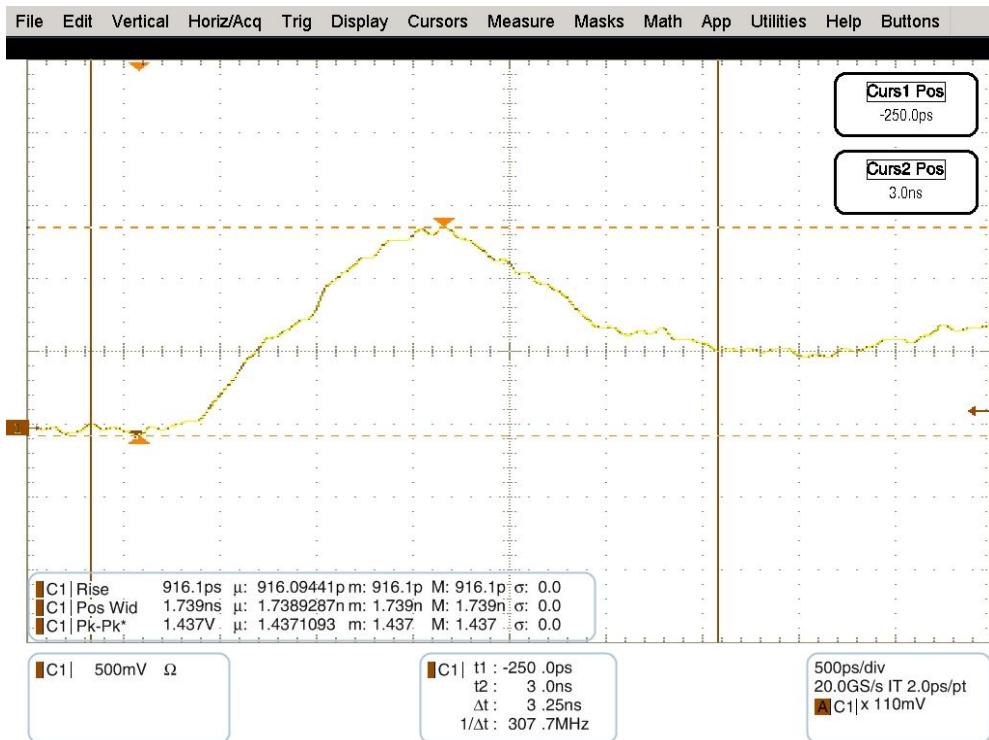
της, για εκφορτίσεις επαφής για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 [15], NSG-438 [16] και DITO [17] υπό τάσεις ± 4 kV.



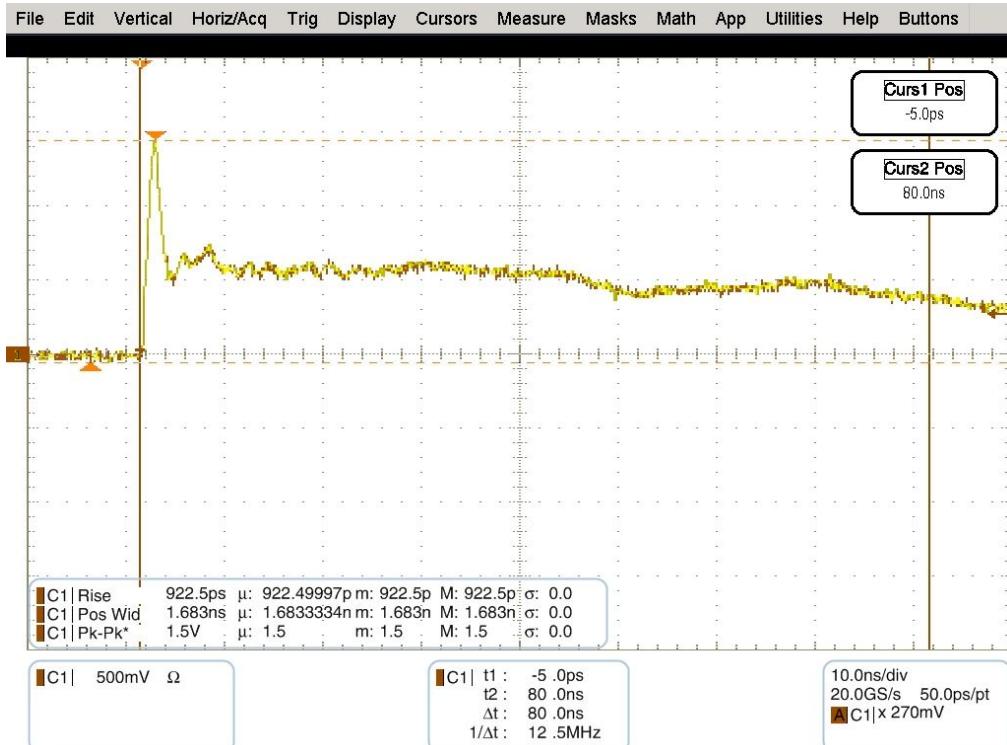
Σχήμα 2.5: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης +4 kV από 0 έως 3 ns



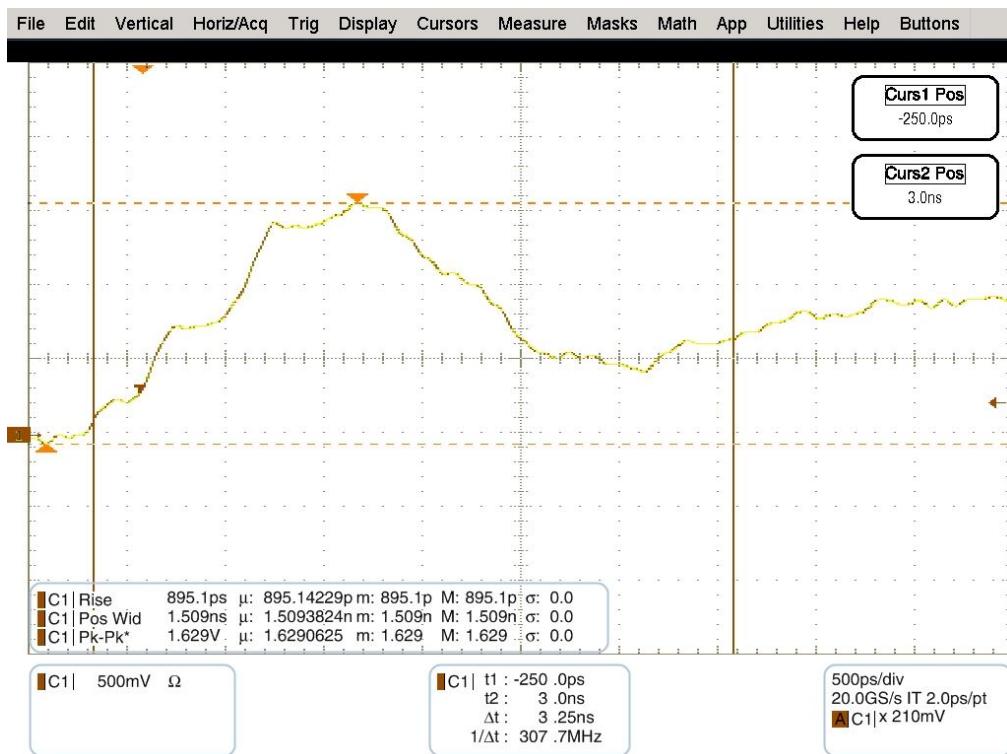
Σχήμα 2.6: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης +4 kV από 0 έως 80 ns



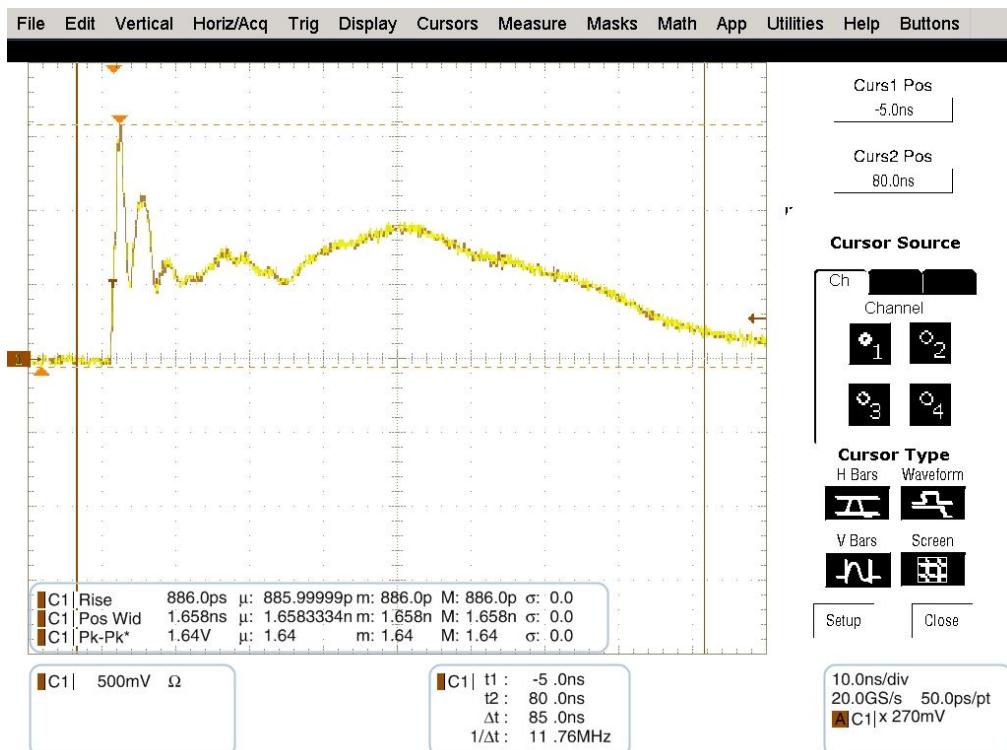
Σχήμα 2.7: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης +4 kV από 0 έως 3 ns



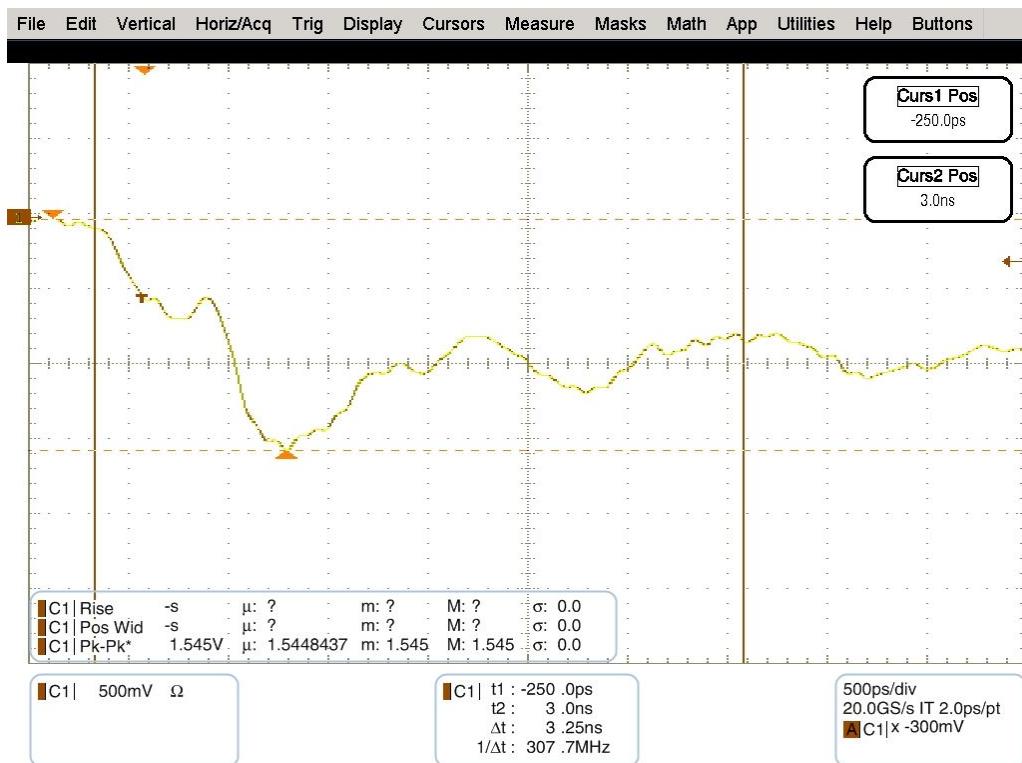
Σχήμα 2.8: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης +4 kV από 0 έως 80 ns



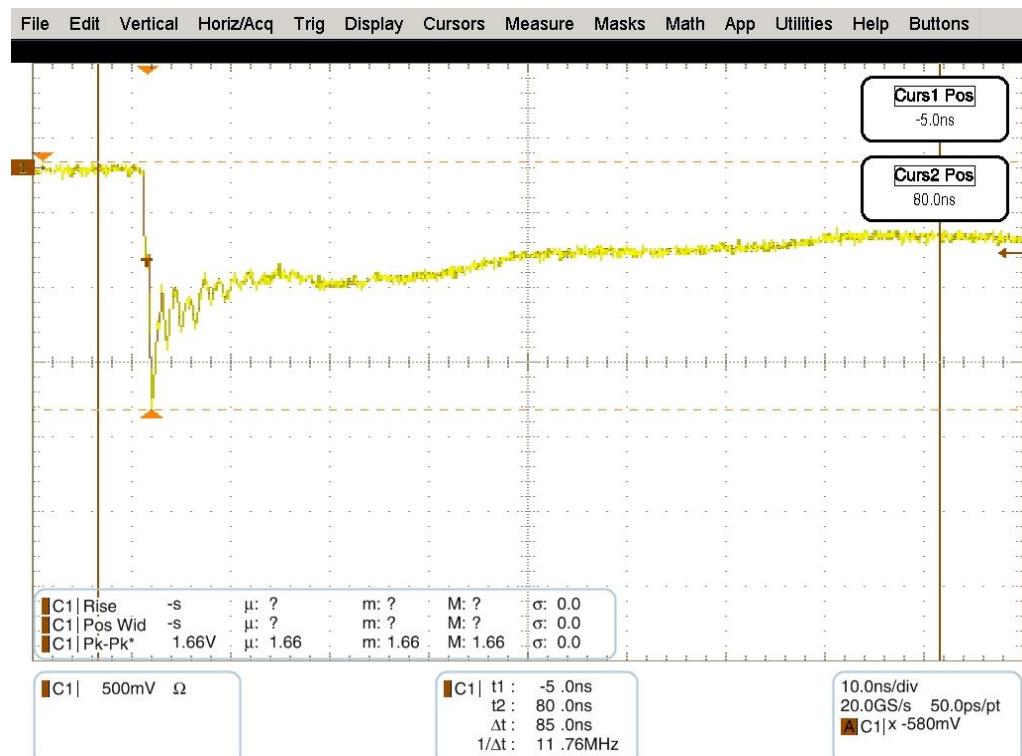
Σχήμα 2.9: Παλμογράφημα από γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης +4 kV από 0 έως 3 ns



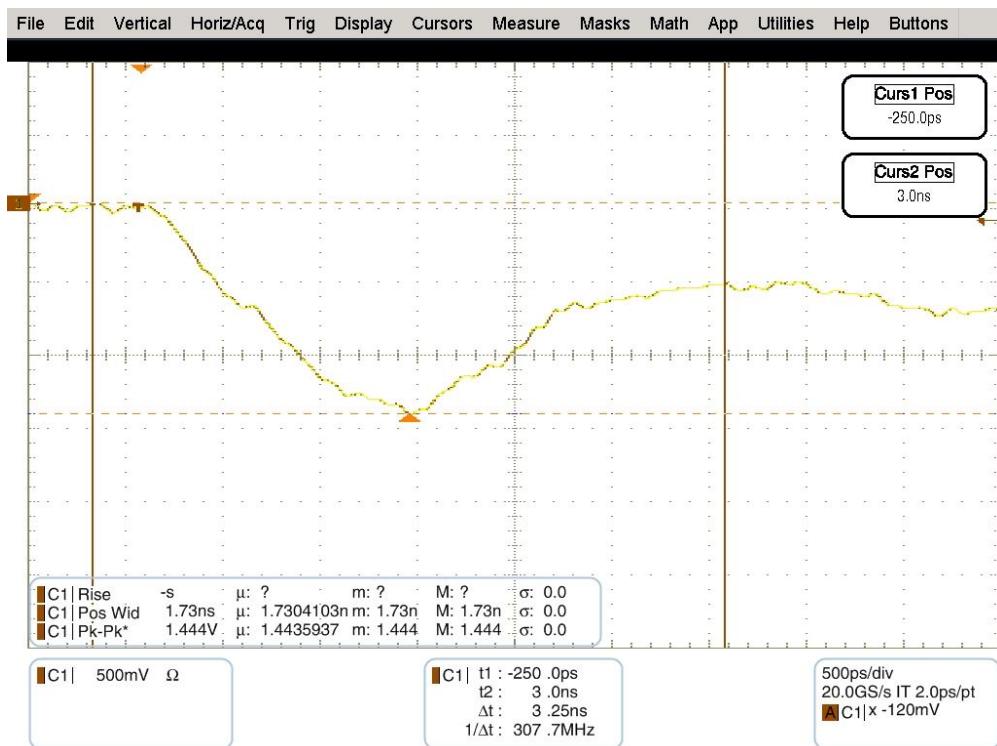
Σχήμα 2.10: Παλμογράφημα από γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 έως 80 ns



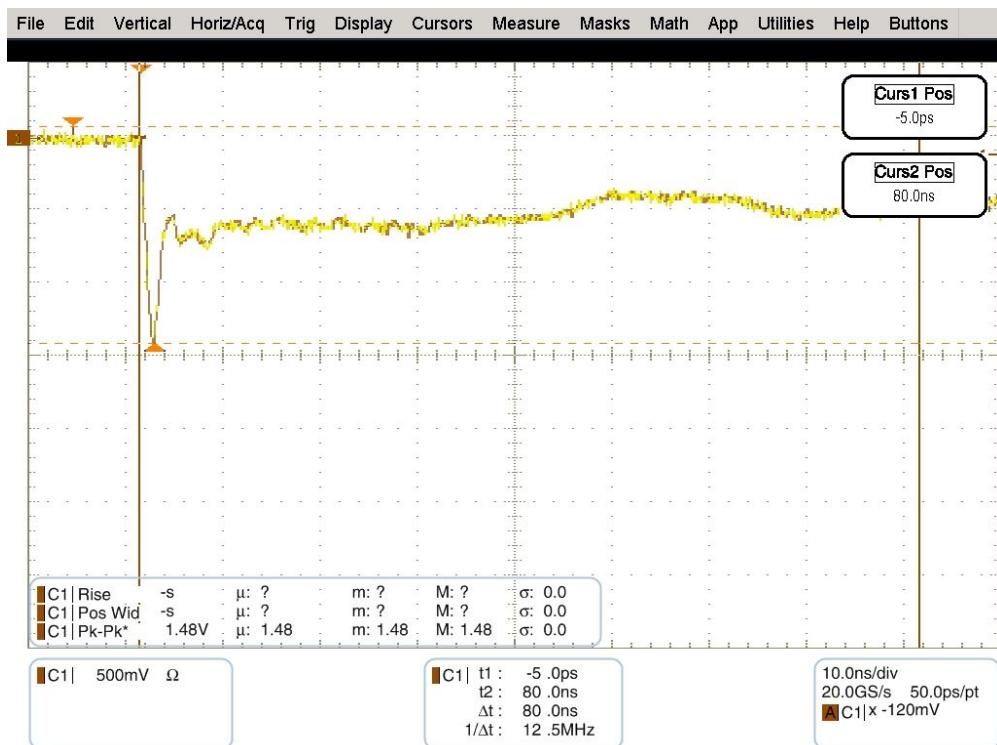
Σχήμα 2.11: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 έως 3 ns



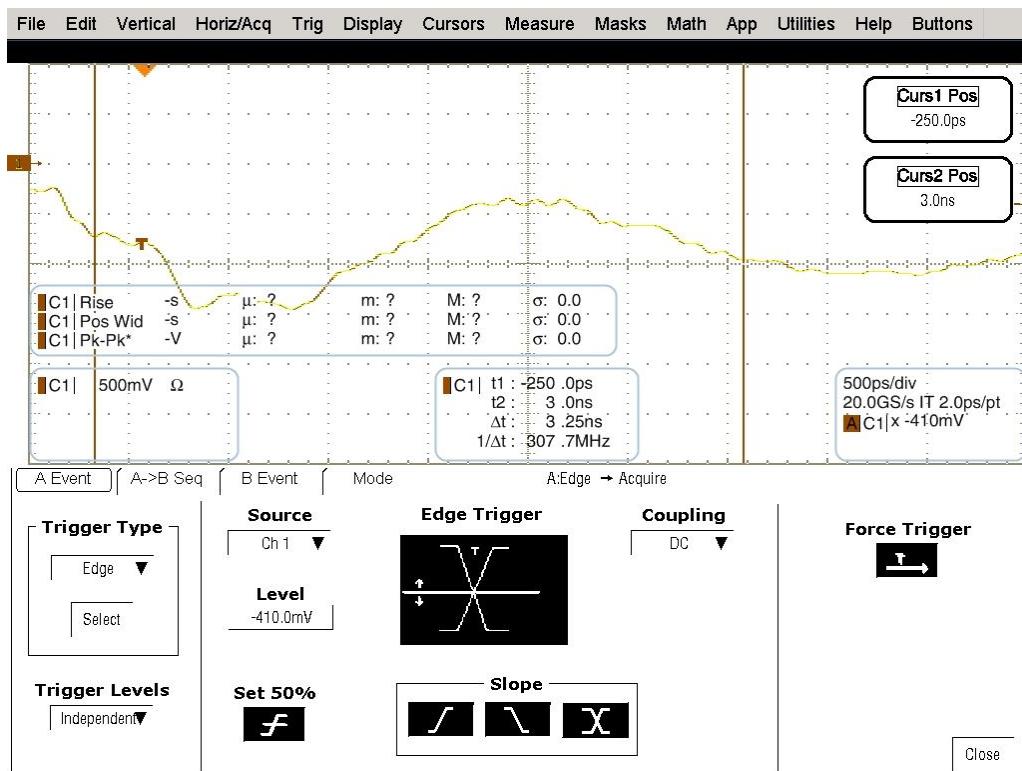
Σχήμα 2.12: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 έως 80 ns



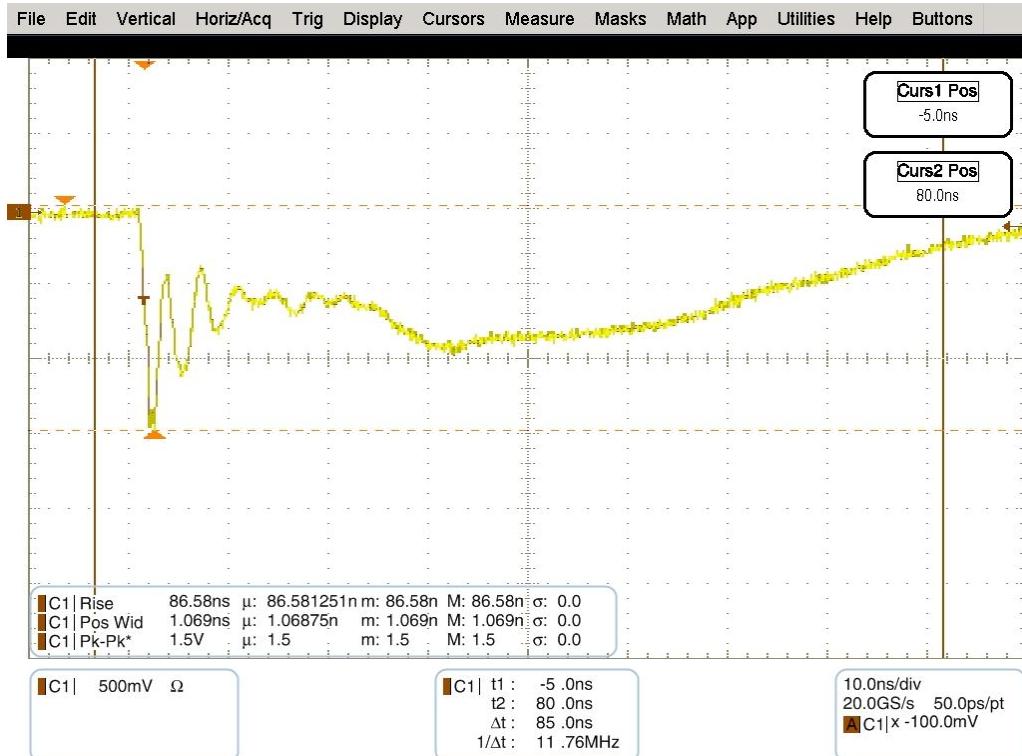
Σχήμα 2.13: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 έως 3 ns



Σχήμα 2.14: Παλμογράφημα από γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 έως 80 ns



Σχήμα 2.15: Παλμογράφημα από γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 έως 3 ns



Σχήμα 2.16: Παλμογράφημα από γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 έως 80 ns

Τα δεδομένα από τα παλμογραφήματα αποτέλεσαν είσοδο του γενετικού αλγορίθμου με σκοπό την βελτιστοποίηση των προτεινόμενων εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (1.5)-(1.9), που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Κεφάλαιο 3

Ο γενετικός αλγόριθμος

3.1 Γενικά για τους γενετικούς αλγορίθμους

Στις δεκαετίες του '50 και του '60 μηχανικοί υπολογιστών μελέτησαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο εξελικτικά συστήματα με τη σκέψη ότι η “εξέλιξη” θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης σε τεχνολογικά προβλήματα. Η ιδέα πίσω από τα συστήματα αυτά ήταν η ανάπτυξη ενός πληθυσμού από υποψήφιες λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας τελεστές εμπνευσμένους από τη φυσική γενετική μεταβολή και τη φυσική επιλογή. Οι γενετικοί αλγόριθμοι εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1970, όταν ο J. Holland δημιούργησε ένα υπολογιστικό μοντέλο που μπορούσε να λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης. Σκοπός της έρευνας του Holland ήταν η ερμηνεία των προσαρμοστικών διαδικασιών των φυσικών συστημάτων και ο σχεδιασμός συστημάτων που έχουν ίδια χαρακτηριστικά με τα φυσικά συστήματα [23].

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

δημιουργηθούν χρωμοσώματα που θα περιέχουν τις βέλτιστες τιμές των υπό μελέτη μεταβλητών (επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης) [23].

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

Οι άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης (π.χ. μέθοδος σημείου-σημείου, στην οποία γίνεται μετακίνηση από ένα σημείο στο χώρο απόφασης σε ένα άλλο χρησιμοποιώντας κάποιον κανόνα μετάβασης) οδηγούνται πολύ συχνά σε λανθασμένο υπολογισμό του μεγίστου στις περιπτώσεις περιοχών με περισσότερα από ένα μέγιστα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, όμως, χρησιμοποιούν ταυτόχρονα μία ευρεία βάση δεδομένων σημείων ψάχνοντας πολλά ελάχιστα (ή μέγιστα ανάλογα με το πρόβλημα) ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος.

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους, που χρησιμοποιούν αιτιοκρατικούς κανόνες μετάβασης, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης για την καθοδήγηση της αναζήτησης. Συνήθεις τεχνικές αναζήτησης, όπως είναι η τεχνική της κλίσης, απαιτούν τη γνώση των παραγώγων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν στο ότι δεν χρειάζονται βιοηθητική πληροφορία. Δηλαδή μπορούν να επιτύχουν αποδοτική αναζήτηση με μοναδική απαίτηση τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζεται με τις ατομικές συμβολοσειρές.

Τελικά, η χρήση των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα [23]:

- δεν απαιτούν γνώση ή πληροφορία για την κλίση της επιφάνειας ελέγχου
- πιθανές ασυνέχειες στην επιφάνεια ελέγχου έχουν μικρή επίδραση στη συνολική απόδοση της βελτιστοποίησης
- συμπεριφέρονται πολύ καλά σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα βελτιστοποίησης

- μπορούν να εφαρμοστούν σε μία ευρεία κλίμακα προβλημάτων βελτιστοποίησης.

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

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

3.2 Λειτουργία γενετικών αλγορίθμων

Ο πυρήνας του γενετικού αλγορίθμου αποτελείται από πέντε σημαντικά βήματα:

(α) *Αρχικοποίηση* (Initialization): Ο αρχικός πληθυσμός των χρωμοσωμάτων δημιουργείται είτε τυχαία, είτε διαταράσσοντας ένα χρωμόσωμα εισόδου. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν θεωρείται κρίσιμος, καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών (έχει ένα ποικιλόμορφο πληθυσμό). Όμως, αν υπάρχει σαφής γνώση για το σύστημα που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό.

(β) *Αξιολόγηση* (Evaluation): Στο δεύτερο βήμα υπολογίζεται η καταλληλότητα. Η συνάρτηση καταλληλότητας αποτελεί το κριτήριο για την αξιολόγηση των χρωμοσωμάτων, δηλαδή των υποψήφιων λύσεων. Η αξιολόγηση αυτή χρησιμοποιείται είτε από τη συνθήκη τερματισμού ή από τη διαδικασία πιθανοκρατικής επιλογής τους για να συμπεριληφθούν (ή όχι) στον πληθυσμό της επόμενης γενιάς.

Η συνάρτηση δέχεται ως είσοδο ένα χρωμόσωμα και επιστρέφει έναν αριθμό που υποδηλώνει το βαθμό καταλληλότητάς του. Το πεδίο τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας είναι συνήθως το διάστημα των πραγματικών αριθμών από το 0 έως το 1, αν και, ανάλογα με την υλοποίηση, αυτό θα μπορούσε να διαφέρει. Η τιμή 1 υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο χρωμόσωμα είναι τέλειο, δηλαδή ικανοποιεί όλες τις

προϋποθέσεις του προβλήματος και αποτελεί αποδεκτή λύση, ενώ οι ενδιάμεσες τιμές υποδηλώνουν πόσο κοντά σε μια αποδεκτή λύση βρίσκεται.

Ο τρόπος υλοποίησης της συνάρτησης εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και μπορεί να είναι από απλός ως εξαιρετικά πολύπλοκος. Η ιδανική συνάρτηση καταλληλότητας θα πρέπει να είναι συνεχής και μονότονη. Ωστόσο, αυτό σπάνια συμβαίνει, οπότε αυτό που επιζητείται είναι μια συνάρτηση καταλληλότητας που δεν θα έχει πολλά τοπικά μέγιστα ή ένα απομονωμένο ολικό μέγιστο.

Μια προσέγγιση που ακολουθείται πολλές φορές είναι αυτή της *προσεγγιστικής συνάρτησης καταλληλότητας* (*approximate fitness function*). Το κρίσιμο θέμα είναι η επιθυμητή ακρίβεια της συνάρτησης καταλληλότητας και το υπολογιστικό κόστος που θεωρείται αποδεκτό για μία συνάρτηση καταλληλότητας που δίνει ενδεχομένως άριστα αποτελέσματα.

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

(γ) *Αξιοποίηση* (Exploitation): Το τρίτο βήμα είναι η αξιοποίηση ή το βήμα της φυσικής επιλογής. Στο βήμα αυτό, τα χρωμοσώματα με τη μεγαλύτερη βαθμολογία καταλληλότητας (fitness score) τοποθετούνται μία ή περισσότερες φορές σε ένα υποσύνολο ζευγαρώματος (mating subset) με τρόπο περίπου τυχαίο. Τα χρωμοσώματα με χαμηλή βαθμολογία καταλληλότητας απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την υλοποίηση της αξιοποίησης. Μία από τις πιο κοινές μεθόδους είναι η διαδικού αγώνα μέθοδος επιλογής υποσυνόλου ζευγαρώματος (binary tournament mating subset selection method). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κάθε χρωμόσωμα στον πληθυσμό ανταγωνίζεται για μία θέση στο υποσύνολο ζευγαρώματος. Δύο χρωμοσώματα απομακρύνονται τυχαία από τον πληθυσμό, το χρωμόσωμα με τη μεγαλύτερη βαθμολογία καταλληλότητας τοποθετείται στο υποσύνολο ζευγαρώματος. Και τα δύο χρωμοσώματα επιστρέφουν στον πληθυσμό και ένας καινούριος αγώνας αρχίζει. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το υποσύνολο ζευγαρώματος να ολοκληρωθεί. Ένα χαρακτηριστικό αυτού του σχήματος είναι ότι το χειρότερο χρωμόσωμα του πληθυσμού ποτέ δεν θα επιλεγεί στο υποσύνολο ζευγαρώματος.

(δ) Διασταύρωση (Ανασυνδυασμός - crossover): Στο τέταρτο βήμα οι λύσεις του ενδιάμεσου πληθυσμού ανασυνδυάζονται για την παραγωγή του επόμενου πληθυσμού με χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Συγκεκριμένα, από τον ενδιάμεσο πληθυσμό γίνεται τυχαία επιλογή των λύσεων ανά δύο, και έτσι δημιουργούνται οι λύσεις-γονείς. Έπειτα εφαρμόζεται στους γονείς ο τελεστής διασταύρωσης με μια πιθανότητα P_r . Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές (γενετικό υλικό) των γονέων δημιουργώντας δύο απογόνους που κληρονομούν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων.

Αναλυτικότερα δύο χρωμοσώματα-γονείς από το υποσύνολο ζευγαρώματος επιλέγονται τυχαία να ζευγαρωθούν. Συνήθως επιλέγεται μία υψηλή πιθανότητα (π.χ. 0.95) με την οποία τα χρωμοσώματα θα ανασυνδυάσουν τα γονίδιά τους. Αν επιτραπεί στους γονείς να διασταυρωθούν, εφαρμόζεται ένας τελεστής ανασυνδυασμού των γονιδίων, ο οποίος ανταλλάσσει γονίδια ανάμεσα στους δύο γονείς και παράγει δύο απογόνους. Αν δεν επιτραπεί να διασταυρωθούν, οι γονείς τοποθετούνται στην επόμενη γενιά απαράλλακτοι. Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τελεστές ανασυνδυασμού των γονιδίων είναι οι μέθοδοι διασταύρωσης ενός και δύο σημείων. Στη μέθοδο διασταύρωσης ενός σημείου, επιλέγεται ένα σημείο διασταύρωσης στο χρωμόσωμα και τα γονίδια μέχρι εκείνο το σημείο ανταλλάσσονται ανάμεσα στους δύο γονείς. Στη μέθοδο διασταύρωσης δύο σημείων, επιλέγονται δύο σημεία διασταύρωσης και τα γονίδια ανταλλάσσονται ανάμεσα στους δύο γονείς. Οι απόγονοι αντικαθιστούν τους γονείς στην επόμενη γενιά. Ένας τρίτος τελεστής ανασυνδυασμού των γονιδίων, ο οποίος έχει γίνει αρκετά δημοφιλής τελευταία, είναι η μέθοδος της ομοιόμορφης διασταύρωσης. Σε αυτήν τη μέθοδο διασταύρωσης εφαρμόζεται ανασυνδυασμός των γονιδίων σε ατομικά γονίδια του χρωμοσώματος. Αν εκτελεστεί διασταύρωση, ανταλλάσσονται τα γονίδια ανάμεσα στους δύο γονείς, ενώ, αν δε γίνει διασταύρωση, τα γονίδια παραμένουν ανέπαφα. Αυτή η μέθοδος διασταύρωσης έχει μία υψηλότερη πιθανότητα να παράγει απογόνους οι οποίοι είναι πολύ διαφορετικοί από τους γονείς τους. Γι' αυτό η πιθανότητα ανασυνδυασμού των γονιδίων συνήθως τίθεται σε μία χαμηλή τιμή (π.χ. 0.1). Η πιθανότητα να συμβεί η διασταύρωση είναι επίσης επιλέξιμη και συνήθως τίθεται σε μία χαμηλή τιμή (π.χ. 0.01) έτσι ώστε να μην καταστρέφονται καλά χρωμοσώματα.

(ε) *Μετάλλαξη* (mutation): Στο πέμπτο βήμα πραγματοποιείται μία τυχαία αλλαγή γονιδίων των απογόνων. Η διασταύρωση, αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων, δεν είναι σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Ο τελεστής της μετάλλαξης καλύπτει αυτήν την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στους απογόνους. Από πλευράς υλοποίησης η μετάλλαξη απλά αλλάζει την τιμή ενός συγκεκριμένου γονιδίου.

Κατ' άλλους ερευνητές τα δύο τελευταία βήματα είναι ενοποιημένα σε ένα τέταρτο βήμα με όνομα «εξερεύνηση» (exploration) και αποτελείται από τους τελεστές ανασυνδυασμού των γονιδίων και μετάλλαξης.

Μετά το βήμα (ε) ο πληθυσμός είναι πλήρης από νέα χρωμοσώματα (απογόνους) και εκτελούνται ξανά τα βήματα (β) έως (ε). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσο δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια τερματισμού, δηλαδή είτε πρόκειται για ένα προκαθορισμένο αριθμό γενεών, είτε μέχρι ο βαθμός καταλληλότητας της καλύτερης λύσης να είναι μεγαλύτερος από κάποιο συγκεκριμένο όριο.

(στ) Σύγκλιση και ανανέωση

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

Με έναν αποδοτικό γενετικό αλγόριθμο, ο πληθυσμός θα πρέπει μετά από αρκετές επαναλήψεις να συγκλίνει προς το ολικό μέγιστο. Η σύγκλιση αυτή αφορά είτε στο καλύτερο στοιχείο ή στον μέσο όρο του πληθυσμού. Κατά την πρόωρη σύγκλιση, ο πληθυσμός πολύ γρήγορα συγκλίνει γύρω από κάποιο χρωμόσωμα, το οποίο όμως αποτελεί τοπικό μέγιστο. Το αποτέλεσμα είναι να μην μπορεί πλέον ο γενετικός αλγόριθμος να ξεφύγει από το τοπικό μέγιστο, παρά μόνο με τη διαδικασία της μετάλλαξης, η οποία έχει ελάχιστη πιθανότητα να συμβεί. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου η συνάρτηση καταλληλότητας εμφανίζει πολύ απότομες μεταβολές και έντονα τοπικά μέγιστα και μπορεί να αντιμετωπιστεί με δύο

τρόπους. Ο πρώτος είναι η απεικόνιση της συνάρτησης καταλληλότητας σε μία νέα συνάρτηση, λιγότερο απότομη (*fitness remapping*). Ο δεύτερος είναι ο καθορισμός ελαχίστων και μεγίστων ορίων, που αφορά το πόσες φορές επιλέγεται ένα χρωμόσωμα για αναπαραγωγή σε κάθε νέο κύκλο ανανέωσης του πληθυσμού.

Η *αργή σύγκλιση* είναι το ακριβώς αντίθετο φαινόμενο της πρόωρης σύγκλισης. Σε αυτήν, μετά από ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, ο πληθυσμός εξακολουθεί να μην συγκλίνει. Το φαινόμενο εμφανίζεται όταν η συνάρτηση καταλληλότητας έχει μικρές κλίσεις, με αποτέλεσμα τα μέγιστα και τα ελάχιστά της να έχουν μικρές διαφορές. Η λύση είναι πάλι η απεικόνιση της συνάρτησης με μία νέα με πιο έντονες διακυμάνσεις.

Ένα άλλο θέμα που εξετάζεται στους γενετικούς αλγορίθμους είναι η ανανέωση του πληθυσμού από γενιά σε γενιά. Το ποσοστό των χρωμοσωμάτων κάθε γενιάς που ανανεώθηκε προς το σύνολο των χρωμοσωμάτων, ορίζεται ως *χάσμα γενεών* (*generation gap*). Στους τυπικούς γενετικούς αλγορίθμους ο συντελεστής αυτός ισούται με τη μονάδα. Ωστόσο μια νέα τάση είναι η ανανέωση μέρους του πληθυσμού και μάλιστα, στην πιο ακραία περίπτωση, μόνο δύο μελών. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος της *μερικής ανανέωσης* (*steady-state replacement*). Η μέθοδος της μερικής ανανέωσης προσεγγίζει πιο πολύ την πραγματικότητα, αφού εκεί συνυπάρχουν πάντα σε κάποιο βαθμό οι διαφορετικές γενιές. Μάλιστα δίνεται η δυνατότητα στους απογόνους να ανταγωνιστούν τους γονείς τους, με σκοπό την επικράτηση του καλύτερου. [23-26]

3.3 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 βελτίστου. Για να ξεκινήσει η έρευνα ο γενετικός αλγόριθμος απαιτεί ένα αρχικό σύνολο σημείων P_s , που ονομάζονται πληθυσμός κατ' αναλογία με τα βιολογικά συστήματα. Μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιουργεί τον αρχικό πληθυσμό. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν είναι κρίσιμος, καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών. Όμως, αν υπάρχει γνώση για το σύστημα, η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό. Το αρχικό σύνολο μετατρέπεται σε δυαδικό σύστημα και θεωρείται ως χρωμοσώματα, δηλαδή ακολουθίες από 0 και 1. Το επόμενο

βήμα είναι η δημιουργία $P_s/2$ ζευγών από αυτά τα μέλη του πληθυσμού που 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 του 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 γεννητόρων δίνει N_c παιδιά. Μετά την αναπαραγωγή το πλήθος των γονέων έχει εμπλουτιστεί με τα "παιδιά". Έτσι αυξάνεται ο αρχικός πληθυσμός αφού προστίθενται νέα μέλη. Οι γονείς πάντα θεωρούνται 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. Ακολούθως εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής. Σύμφωνα με αυτήν τη διαδικασία μόνο P_s μέλη επιβιώνουν από τα $P_s + N_c \cdot P_s/2$. Αυτά τα P_s μέλη επιλέγονται ως εκείνα που έχουν τις χαμηλότερες τιμές F_g , 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 εάν είτε η μέση τιμή του F_g στον αποτελούμενο από P_s μέλη πληθυσμό δεν βελτιώνεται περαιτέρω, είτε όταν ο αριθμός των επαναλήψεων γίνει μεγαλύτερος από τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων N_{max} .

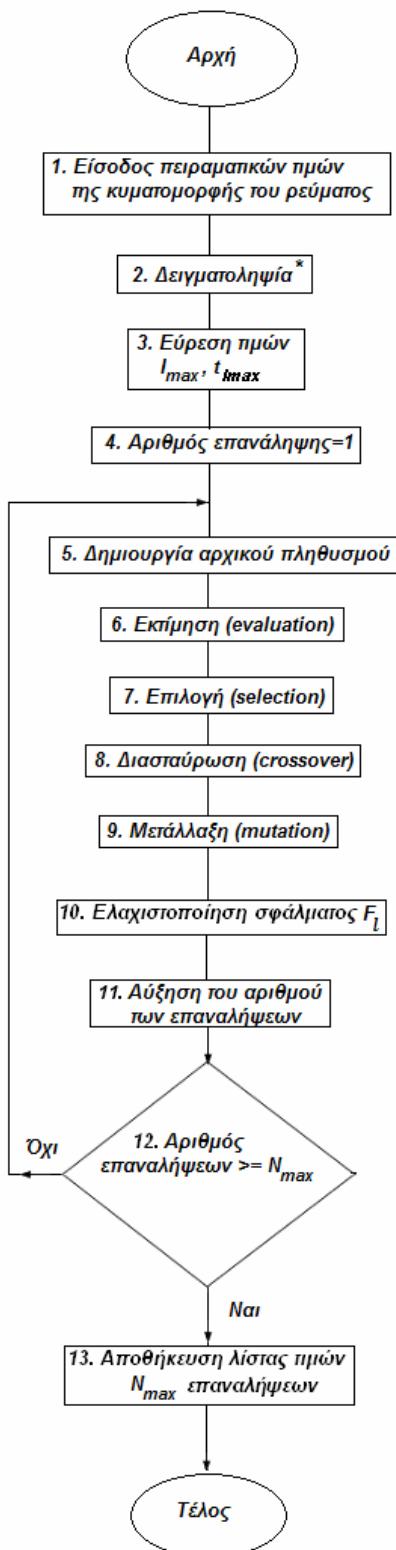
Στον γενετικό αλγόριθμο που αναπτύξαμε το F_g ελαχιστοποιείται για τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις σφάλματος. Αυτές είναι το **απόλυτο σφάλμα**, το **σχετικό απόλυτο σφάλμα**, το **σχετικό τετραγωνικό σφάλμα** και τέλος το **μέγιστο σφάλμα**. Οι μαθηματικές περιγραφές αυτών των τεσσάρων συναρτήσεων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

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

Πίνακας 3.1: Συναρτήσεις σφάλματος F_g

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

Ο γενετικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του MATLAB και η λειτουργία του περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.1).



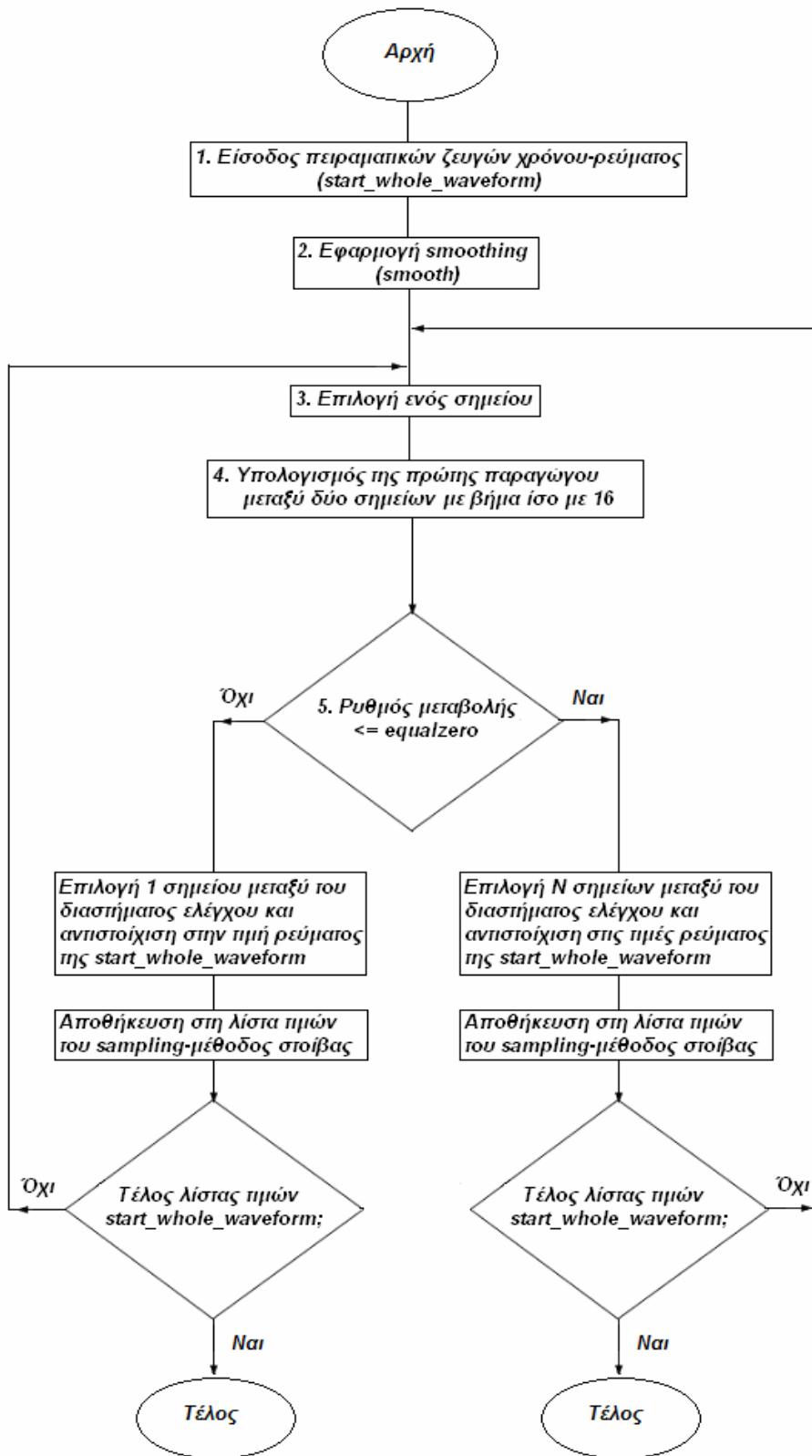
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής γενετικού αλγόριθμου (* το διάγραμμα ροής της δειγματοληψίας δίνεται στο Σχήμα 3.2)

3.3.1 Η συνάρτηση δειγματοληψίας που αναπτύχθηκε

Για την εφαρμογή του Γ.Α., στα πειραματικά δεδομένα τα οποία καταγράψαμε, με χρήση του παλμογράφου, δεν απαιτείται ο μεγάλος αριθμός μετρήσεων που ελήφθησαν, η χρήση των οποίων θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα και δε θα ενίσχυε σε τίποτα την διαδικασία βελτιστοποίησης. Αντιθέτως, συνίσταται, επιλεκτική εισαγωγή δεδομένων, αύξηση του αριθμού των γονέων και του αριθμού των επαναλήψεων, στο βαθμό που αυτό είναι απαραίτητο, ώστε να επιτευχθεί η αποτελεσματική λειτουργία του Γ.Α.. Για αυτό το σκοπό, έχουν αναπτυχθεί [27] κατάλληλες συναρτήσεις δειγματοληψίας για την κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως: επιλογή σημείων με μεταξύ τους βήμα ίσο με 20, επιλογή όλων των σημείων στα πρώτα 2 ns και συνέχεια με βήμα ίσο με 20 μέχρι το τέλος του φαινομένου· στόχος είναι να ληφθεί υπόψιν το πρώτο μέρος της κυματομορφής (οι μεγαλύτερες τιμές ακτινοβολίας και παραγώγου ρεύματος αναπτύσσονται σε αυτήν την περίοδο).

Στην παρούσα εργασία λόγω του ότι κατεγράφησαν ξεχωριστά μετρήσεις για τα πρώτα 3 ns αλλά και για το σύνολο των 80 ns, με σκοπό την καλύτερη εποπτεία του φαινομένου, έγινε συνδυασμός των παραπάνω με αποτέλεσμα να έχουμε καταρχάς πολλά ζεύγη τιμών για την αρχή της κυματομορφής. Έτσι, δημιουργήσαμε μία και μόνο συνάρτηση δειγματοληψίας, η οποία να αναπτύσσει μια πιο δυναμική συμπεριφορά, και να μπορεί να επεξεργάζεται “έξυπνα” το μεγάλο πλήθος διαφορετικών μετρήσεων, αποδίδοντας μια σειρά ζευγών χρόνου-ρεύματος που να αντιπροσωπεύουν εκείνες τις περιοχές που συγκεντρώνονται οι πιο σημαντικές πληροφορίες.

Συγκεκριμένα, η δειγματοληψία που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί το κριτήριο του ρυθμού μεταβολής της πρώτης παραγώγου, δηλαδή ελέγχει σε ποιες περιοχές της κυματομορφής του ρεύματος παρατηρείται τοπικό ακρότατο και επιλέγει ένα πλήθος σημείων σε αυτή τη “γειτονιά”, καθώς και σε ποιες περιοχές υπάρχει σχεδόν μονότονη μεταβολή της καμπύλης επιλέγοντας ένα μοναδικό σημείο περίπου στο μέσο του διαστήματος ελέγχου. Έτσι καταλήγουμε, από έναν αρχικό αριθμό μετρήσεων οι οποίες λήφθησαν από τον παλμογράφο, για τάσεις φόρτισης ± 4 kV, σε ένα πολύ μικρότερο αρχείο μετρήσεων (20 φορές μικρότερο περίπου) και για τις τρεις γεννήτριες. Ακολουθεί το διάγραμμα ροής της συνάρτησης δειγματοληψίας που αναλύθηκε παραπάνω.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής της δειγματοληψίας

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου (Γ.Α.) σε πειραματικά δεδομένα

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε την εφαρμογή του Γ.Α. στα πειραματικά δεδομένα που συλλέξαμε, σύμφωνα με την πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, για τις τρεις διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων την NSG-433 [18], την NSG-438 [19] και την DITO [20]. Επίσης θα παραθέσουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα καθώς και τις συνδυαστικές γραφικές παραστάσεις του ρεύματος εκφόρτισης των πειραματικών δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων που προέκυψαν για κάθε κριτήριο σφάλματος.

4.2 Εξειδίκευση του Γ.Α. για τις εξισώσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει τις άγνωστες παραμέτρους πέντε διαφορετικών εξισώσεων, των (1.5), (1.6), (1.7), (1.8) και (1.9), που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 1, και προσεγγίζουν την περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων κάθε εξίσωσης είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g . Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τον συγκεκριμένο αλγόριθμο τον εφαρμόσαμε για τέσσερα κριτήρια: το *σχετικό απόλυτο σφάλμα*, το *σχετικό τετραγωνικό σφάλμα*, το *απόλυτο σφάλμα* και τέλος το *μέγιστο σφάλμα*, οι τύποι των οποίων βρίσκονται στον Πίνακα 3.1.

Ο γενετικός αλγόριθμος έχει εφαρμοστεί σε έναν τυχαία παραγόμενο πληθυσμό P_s χρωμοσωμάτων ($P_s=20$). Κάθε παράμετρος διαιρείται σε έναν 20bit δυαδικό αριθμό. Κάθε χρωμόσωμα έχει m μεταβλητές ($m=6$ για πρώτες τρεις εξισώσεις (1.5), (1.6), (1.7) ή 16 για την εξίσωση (1.8) ή 12 για την (1.9) έτσι 120 ή 320 ή 240 bits απαιτούνται για

κάθε χρωμόσωμα. Κάθε ζεύγος γεννητόρων που διασταυρώνεται παράγει $N_c=4$ παιδιά. Η διασταύρωση ξεκινά καθώς κάθε χρωμόσωμα από κάθε γεννήτορα διαιρείται σε $N_p=6$ τμήματα και στη συνέχεια το ζεύγος των γονέων ανταλλάσσει γενετικό υλικό. Μετά τη διασταύρωση υπάρχει 20% πιθανότητα μετάλλαξης. Ο αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποιήσαμε είναι ίσος με $N_r=30$.

Δίνοντας ως δεδομένα εισόδου το ρεύμα εκφόρτισης μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει και βελτιστοποιεί τις παραμέτρους των εξισώσεων (1.5), (1.6), (1.7), (1.8) και (1.9). Συγκεκριμένα λόγω του ότι έχουμε καταγράψει μετρήσεις ξεχωριστά για τα πρώτα ns ($0 \div 3$ ns) και για το σύνολο ($0 \div 80$ ns) του φαινομένου, με κατάλληλη συνάρτηση στο πρόγραμμα MATLAB συνδυάζουμε αυτές τις τιμές έτσι ώστε να έχουμε πολλά ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος για την αρχή της κυματομορφής, που περιέχει κρίσιμες πληροφορίες και επίσης αρκετά ζεύγη για το υπόλοιπό της. Από το σφάλμα F_g κάθε εξίσωσης προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την καλύτερη και ακριβέστερη εξίσωση.

Για τον σκοπό αυτό έγινε μια προσεκτική επιλογή των δεδομένων που αποθηκεύτηκαν στον παλμογράφο. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η χρήση του γενετικού αλγορίθμου δεν απαιτεί τη χρησιμοποίηση όλων των μετρήσεων. Αυτό θα ήταν όχι μόνο μια χρονοβόρα διαδικασία, αλλά δεν θα έδινε και πιο ακριβείς λύσεις απ' ότι 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 3165 σημεία, δεν χρησιμοποιείται. Αντ' αυτού εφαρμόσαμε μια δυναμική συνάρτηση δειγματοληψίας, τη λειτουργία καθώς και το διάγραμμα ροής της οποίας είδαμε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Για κάθε εξίσωση αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε MATLAB που παρήγαγε το γράφημα της εξίσωσης μαζί με τη κυματομορφή των πειραματικών τιμών και επιπλέον έσωζε τα αποτελέσματα του γενετικού, δηλαδή τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων και των συναρτήσεων σφάλματος σε αρχεία txt.

4.2.1 Γεννήτρια NSG-433

4.2.1.1 Τάση φόρτισης 4 kV θετικής πολικότητας

Παρακάτω δίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ελαχιστοποίηση των τεσσάρων συναρτήσεων σφάλματος, μέσω του γενετικού αλγόριθμου, για ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος όπως προέκυψαν από μετρήσεις για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 [18]. Επίσης παρουσιάζονται σε γραφήματα οι συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ και για τις πέντε διαφορετικές εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$ μαζί.

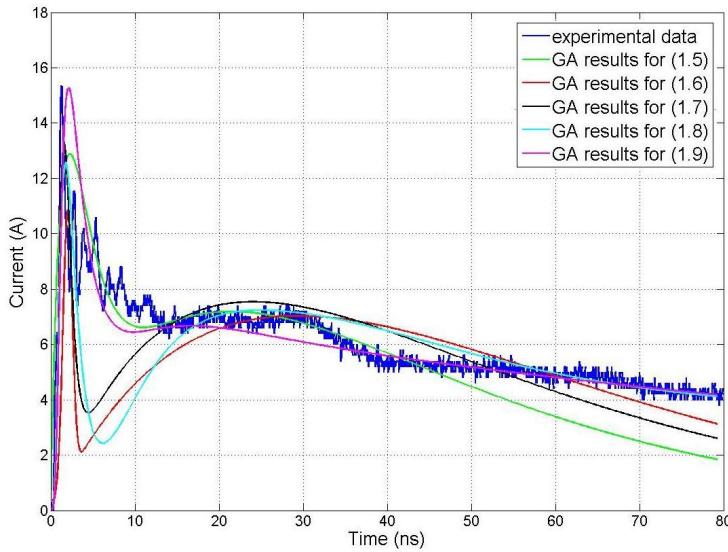
<i>Eξισώσεις Ρεύματος</i>	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
<i>Κριτήρια Σφάλματος</i>					
<i>Σχετικό απόλυτο σφάλμα</i>	347.14	61.55	55.41	36.10	42.80
<i>Σχετικό τετραγωνικό σφάλμα</i>	15315.81	75.13	74.60	19.21	23.92
<i>Απόλυτο σφάλμα</i>	233.29	171.06	173.17	161.51	198.17
<i>Μέγιστο σφάλμα</i>	7.24	6.08	4.30	5.43	3.42

Πίνακας 4.1: Βελτιστοποιημένες τιμές των συναρτήσεων σφάλματος για τις 5 εξισώσεις

ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-433

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν ενώ στους πίνακες δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων συγκεντρωτικά για τις εξισώσεις $(1.5) \div (1.9)$.

4.2.1.1.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος



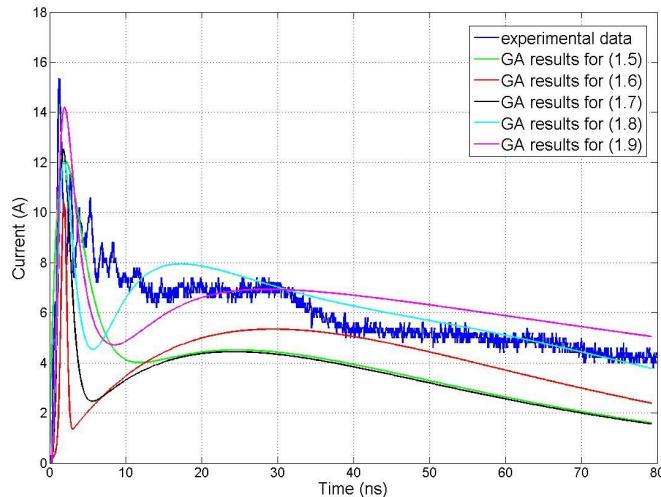
Σχήμα 4.1: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.1 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνουν πιο πολλά σημεία στο διάστημα $0 \div 3$ ns, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή. Η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max} , όχι όμως με απόλυτη ακρίβεια, είναι η εξίσωση (1.9). Η ίδια εξίσωση συνεχίζει να έχει την καλύτερη προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ παρατηρούμε πως και η εξίσωση (1.7) προσεγγίζει καλά το σύνολο της κυματομορφής σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ακολούθως δίνεται ο πίνακας των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	70.50	40.23
$I_1 (A)$	1501.49	9.68	459.67	71.01	82.96
$I_2 (A)$	148.64	291.16	49.50	75.70	7.45
$I_3 (A)$	-	-	-	54.40	-
$t_1 (ns)$	1.99	1.99	0.77	0.68	0.59
$t_2 (ns)$	1.95	387.08	0.63	1.39	2.57
$t_3 (ns)$	23.12	0.74	58.34	10.24	24.82
$t_4 (ns)$	20.27	156.25	29.82	8.13	6.08
$t_5 (ns)$	-	-	-	69.43	7.27
$t_6 (ns)$	-	-	-	52.87	136.72
$t_7 (ns)$	-	-	-	19.89	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	23.15	-
P	-	-	-	5.88	6.98
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.2: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.1.1.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος



Σχήμα 4.2: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος

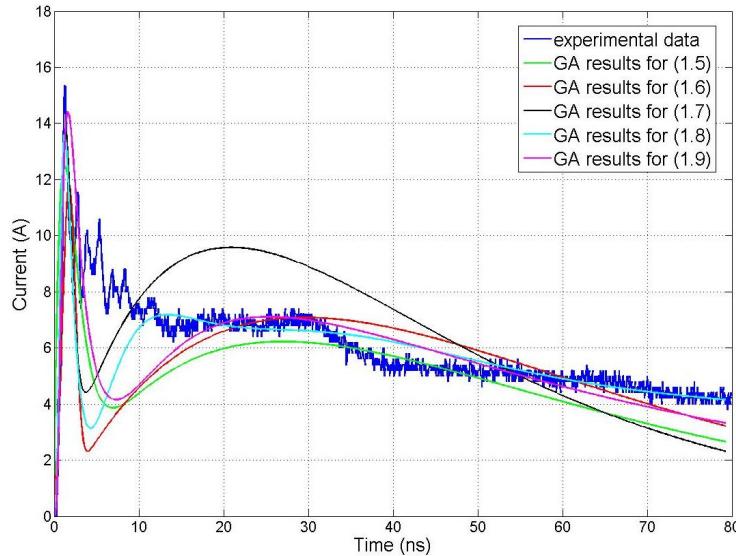
Στο Σχήμα 4.2 παρατηρούμε ότι ενώ όλες πάλι εντοπίζουν το πρώτο και δεύτερο μέγιστο της κυματομορφής, η εξίσωση (1.9) συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες φτάνει πιο κοντά στο πρώτο μέγιστο και ενώ η (1.8) πετυχαίνει να προσεγγίσει καλύτερα την ουρά της κυματομορφής.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0(A)$	-	-	-	66.18	40.01
$I_1(A)$	1500.31	9.84	314.28	53.38	133.97
$I_2(A)$	378.81	213.03	30.00	65.58	10.06
$I_3(A)$	-	-	-	50.94	-
$t_1(ns)$	1.92	1.88	0.84	0.75	0.58
$t_2(ns)$	1.88	386.19	0.78	1.50	2.34
$t_3(ns)$	25.18	0.48	59.91	6.58	40.14
$t_4(ns)$	24.37	156.34	29.94	6.33	7.83
$t_5(ns)$	-	-	-	33.29	13.69
$t_6(ns)$	-	-	-	32.48	115.89
$t_7(ns)$	-	-	-	12.66	-
$t_8(ns)$	-	-	-	14.99	-
P	-	-	-	5.47	6.50
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.3: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)-(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.1.1.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.3 παρατηρούμε ότι ενώ η εξίσωση (1.9) πλησιάζει την τιμή I_{max} , σε καμία περίπτωση με ακρίβεια καθώς είναι ελαφρώς μετατοπισμένη ως προς τη θέση του πρώτου μεγίστου, η (1.7) είναι αυτή που εντοπίζει καλύτερα την πρώτη κορυφή αλλά όχι την τιμή. Όσον αφορά στην ουρά της κυματομορφής, η (1.7) αποτυγχάνει να προσεγγίσει τη τιμή του δεύτερου μεγίστου αφήνοντας στην (1.9) την πιο καλή προσέγγιση.

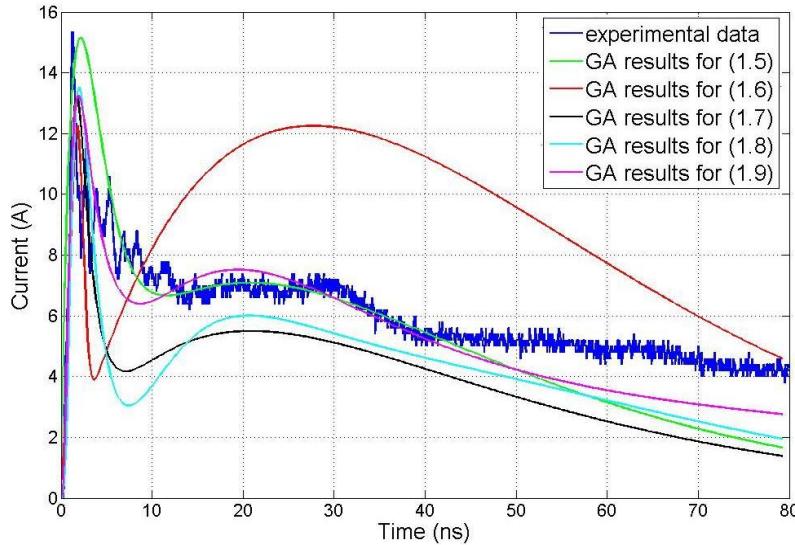


Σχήμα 4.3: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	69.99	40.22
I_1 (A)	1537.48	10.76	384.59	56.75	118.52
I_2 (A)	123.05	311.02	75.08	75.15	13.72
I_3 (A)	-	-	-	53.99	-
t_1 (ns)	1.18	1.75	0.65	0.47	0.49
t_2 (ns)	1.16	394.80	0.57	1.03	2.00
t_3 (ns)	28.99	1.03	59.93	6.14	48.54
t_4 (ns)	25.27	158.49	24.99	7.06	7.57
t_5 (ns)	-	-	-	65.95	13.01
t_6 (ns)	-	-	-	51.13	55.95
t_7 (ns)	-	-	-	19.19	-
t_8 (ns)	-	-	-	22.45	-
P	-	-	-	5.99	5.93
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.4: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.1.1.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος



Σχήμα 4.4: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
<i>I₀</i> (A)	-	-	-	57.36	27.32
<i>I₁</i> (A)	1502.21	10.39	48.65	42.15	128.65
<i>I₂</i> (A)	534.23	68.17	28.55	60.10	5.63
<i>I₃</i> (A)	-	-	-	51.89	-
<i>t₁</i> (ns)	1.95	1.72	0.52	0.76	0.58
<i>t₂</i> (ns)	1.91	251.18	1.57	1.86	3.16
<i>t₃</i> (ns)	21.34	0.97	39.38	11.65	33.10
<i>t₄</i> (ns)	20.59	124.25	27.50	6.16	10.77
<i>t₅</i> (ns)	-	-	-	29.04	10.77
<i>t₆</i> (ns)	-	-	-	25.31	107.74
<i>t₇</i> (ns)	-	-	-	11.80	-
<i>t₈</i> (ns)	-	-	-	12.12	-
<i>P</i>	-	-	-	5.07	4.16
<i>q</i>	-	-	-	4	2
<i>r</i>	-	-	-	5	2
<i>s</i>	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.5: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-433

Στο Σχήμα 4.4 παρατηρήσαμε ότι η εξίσωση (1.5) προσεγγίζει καλύτερα την τιμή I_{max} της πρώτης κορυφής, σε καμία περίπτωση όμως με ακρίβεια καθώς είναι μετατοπισμένη, ενώ η (1.9) είναι αυτή που δίνει την πλησιέστερη περιγραφή στα πειραματικά δεδομένα της υπόλοιπης κυματομορφής.

4.2.1.2. Τάση φόρτισης 4 kV αρνητικής πολικότητας

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ελαχιστοποίηση των τεσσάρων συναρτήσεων σφάλματος, μέσω του γενετικού αλγόριθμου, για ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος όπως προέκυψαν από μετρήσεις για τάση φόρτισης -4 kV, καθώς και παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων ΓΑ και για τις πέντε διαφορετικές εξισώσεις ρεύματος (1.5) ÷ (1.9) μαζί.

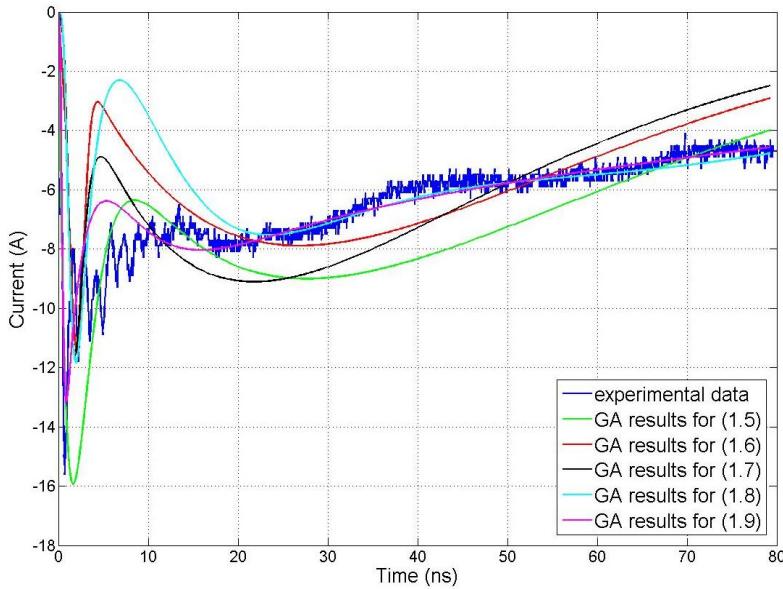
<i>Eξισώσεις Ρεύματος</i>	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
<i>Κριτήρια Σφάλματος</i>					
<i>Σχετικό απόλυτο σφάλμα</i>	60.05	38.64	45.52	40.26	22.81
<i>Σχετικό τετραγωνικό σφάλμα</i>	30.21	19.37	25.57	17.72	25.25
<i>Απόλυτο σφάλμα</i>	258.41	337.86	368.88	270.69	154.02
<i>Μέγιστο σφάλμα</i>	5.43	8.50	11.80	7.52	5.51

Πίνακας 4.6: Βελτιστοποιημένες τιμές των συναρτήσεων σφάλματος για τις 5 εξισώσεις

ρεύματος (1.5)÷(1.9), τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-433

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν, σε τάση φόρτισης -4 kV με τη γεννήτρια NSG-433. Στους πίνακες δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων συγκεντρωτικά για τις πέντε εξισώσεις (1.5) ÷ (1.9).

4.2.1.2.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος



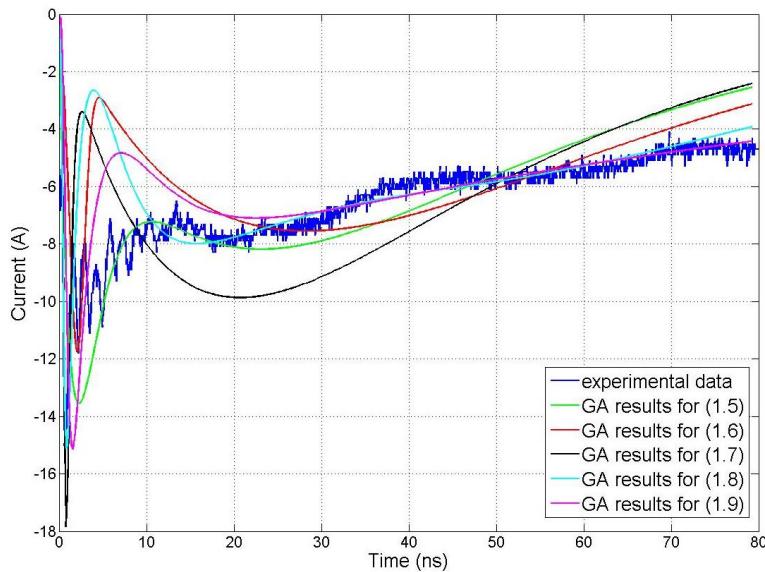
Σχήμα 4.5: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο **σχετικού απόλυτου σφάλματος**

Στο Σχήμα 4.5 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνουν πιο πολλά σημεία στο διάστημα $0 \div 3$ ns, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή. Η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max} , όχι όμως με απόλυτη ακρίβεια, είναι η εξίσωση (1.5). Για την υπόλοιπη κυματομορφή, η εξίσωση (1.8) και η (1.9) με σειρά αυξανομένης ακρίβειας προσεγγίζουν ικανοποιητικά την ουρά σε σχέση με τις υπόλοιπες.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	-64.59	-20.29
$I_1 (A)$	-1688.11	-10.03	-304.87	-40.62	-143.33
$I_2 (A)$	-703.33	-524.26	-59.94	-76.87	-8.55
$I_3 (A)$	-	-	-	-31.67	-
$t_1 (ns)$	1.53	2.00	0.86	0.75	0.19
$t_2 (ns)$	1.50	375.29	0.75	1.57	2.32
$t_3 (ns)$	28.13	1.15	52.38	11.10	43.42
$t_4 (ns)$	27.17	146.97	27.01	11.89	6.33
$t_5 (ns)$	-	-	-	40.56	5.02
$t_6 (ns)$	-	-	-	37.87	126.37
$t_7 (ns)$	-	-	-	14.11	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	17.15	-
P	-	-	-	5.07	6.91
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.7: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.1.2.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος



Σχήμα 4.6: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος

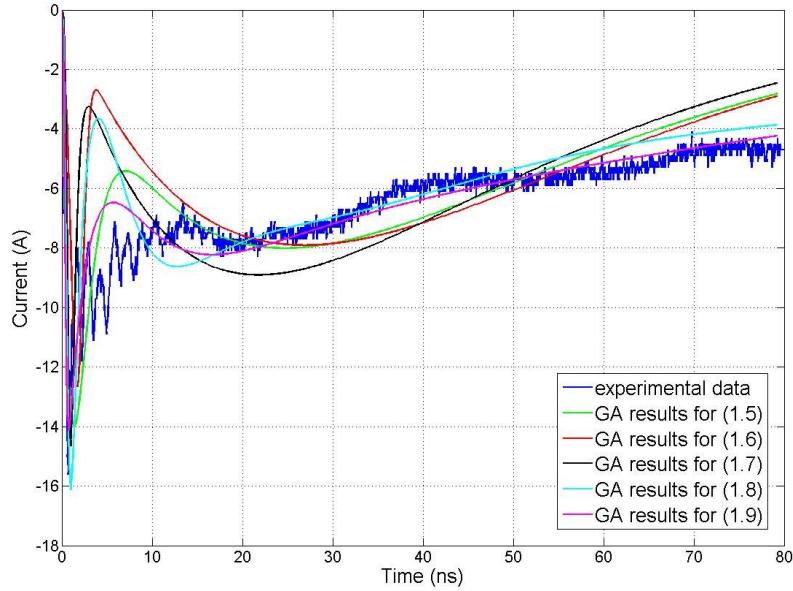
Στο Σχήμα 4.6 παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.8) συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες πετυχαίνει να προσεγγίζει καλύτερα τόσο την αρχή όσο και την ουρά της κυματομορφής.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0(A)$	-	-	-	-49.53	-40.05
$I_1(A)$	-1572.42	-10.44	-412.65	-42.18	-60.78
$I_2(A)$	-78.31	-392.69	-54.35	-68.54	-8.95
$I_3(A)$	-	-	-	-45.63	-
$t_1(ns)$	1.99	2.05	0.38	0.31	0.49
$t_2(ns)$	1.95	384.42	0.37	1.01	2.00
$t_3(ns)$	26.85	1.23	41.51	5.76	38.50
$t_4(ns)$	20.19	152.81	26.83	7.07	7.34
$t_5(ns)$	-	-	-	32.52	7.74
$t_6(ns)$	-	-	-	32.19	112.37
$t_7(ns)$	-	-	-	12.50	-
$t_8(ns)$	-	-	-	14.88	-
P	-	-	-	4.98	5.29
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.8: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.1.2.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.7 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνουν πιο πολλά σημεία στο διάστημα 0÷3 ns, όπου εμφανίζεται η πρώτη κορυφή. Η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max} , είναι η εξίσωση (1.8). Για την υπόλοιπη κυματομορφή, η εξίσωση (1.5) προσεγγίζει καλύτερα τη δεύτερη κορυφή και την ουρά της κυματομορφής.

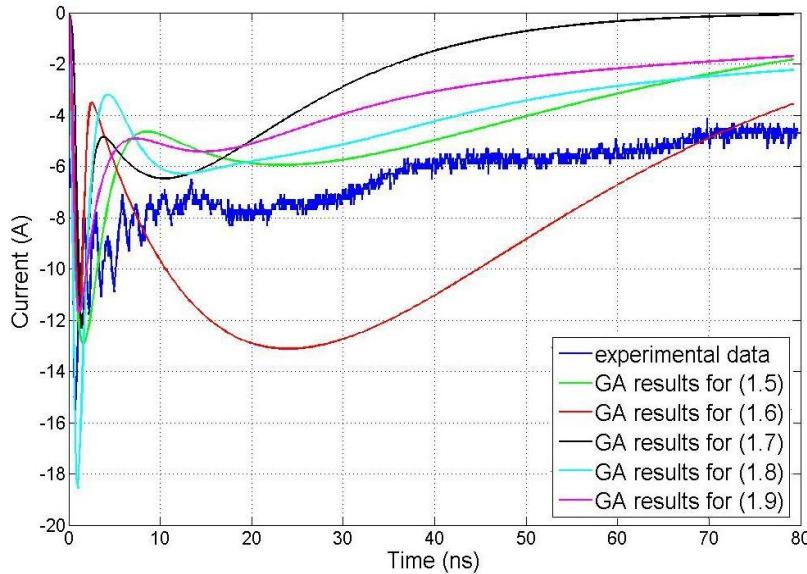


Σχήμα 4.7: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος

	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
<i>I₀</i> (A)	-	-	-	-56.42	-20.05
<i>I₁</i> (A)	-1613.20	-11.54	-315.31	-66.18	-140.76
<i>I₂</i> (A)	-714.32	-313.58	-54.64	-57.64	-9.40
<i>I₃</i> (A)	-	-	-	-51.14	-
<i>t₁</i> (ns)	1.28	1.67	0.44	0.40	0.17
<i>t₂</i> (ns)	1.25	347.65	0.44	1.09	2.56
<i>t₃</i> (ns)	25.08	0.99	48.84	5.99	32.29
<i>t₄</i> (ns)	24.30	141.85	27.50	7.11	6.26
<i>t₅</i> (ns)	-	-	-	58.20	6.87
<i>t₆</i> (ns)	-	-	-	49.07	99.34
<i>t₇</i> (ns)	-	-	-	17.64	-
<i>t₈</i> (ns)	-	-	-	21.63	-
<i>P</i>	-	-	-	4.04	5.75
<i>q</i>	-	-	-	4	2
<i>r</i>	-	-	-	5	2
<i>s</i>	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.9: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.1.2.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος



Σχήμα 4.8: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.8 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο όμως καμία από αυτές δεν πλησιάζει την τιμή I_{max} . Θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η (1.8) προσεγγίζει καλύτερα την τιμή I_{max} , χωρίς βέβαια απόλυτη ακρίβεια, καθώς οι υπόλοιπες καταλήγουν σε μικρότερες τιμές. Η ίδια εξίσωση δείχνει να προσεγγίζει πιο ικανοποιητικά την ουρά σε σχέση με τις υπόλοιπες.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0(A)$	-	-	-	-62.12	-19.84
$I_1(A)$	-1502.94	-10.00	-350.48	-57.70	-74.53
$I_2(A)$	-516.66	-472.27	-100.58	-57.13	-4.42
$I_3(A)$	-	-	-	-55.70	-
$t_1(ns)$	1.47	1.16	0.67	0.36	0.33
$t_2(ns)$	1.44	300.13	0.56	1.06	2.66
$t_3(ns)$	23.63	0.69	59.89	5.91	23.13
$t_4(ns)$	22.90	124.65	11.46	5.98	8.28
$t_5(ns)$	-	-	-	53.95	8.28
$t_6(ns)$	-	-	-	36.64	82.81
$t_7(ns)$	-	-	-	16.79	-
$t_8(ns)$	-	-	-	16.66	-
P	-	-	-	4.29	3.66
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.10: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-433

4.2.2 Γεννήτρια NSG-438

4.2.2.1 Τάση φόρτισης 4 kV θετικής πολικότητας

Παρακάτω δίνονται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ελαχιστοποίηση των τεσσάρων συναρτήσεων σφάλματος, μέσω του γενετικού αλγόριθμου, για ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος όπως προέκυψαν από μετρήσεις για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 [19]. Επίσης παρουσιάζονται σε γραφήματα οι συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ και για τις πέντε διαφορετικές εξισώσεις ρεύματος (1.5)÷(1.9) μαζί.

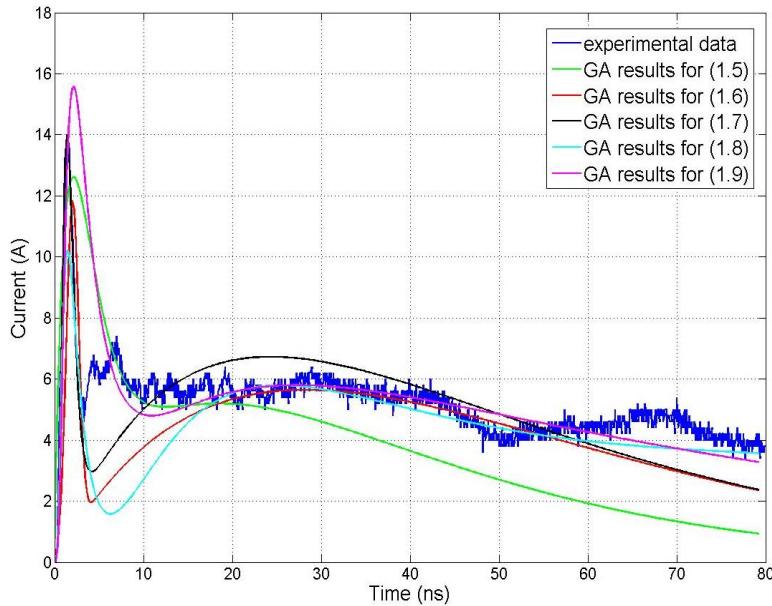
<i>Eξισώσεις Ρεύματος</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.5)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.6)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.7)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.8)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.9)</i>
<i>Κριτήρια Σφάλματος</i>					
<i>Σχετικό απόλυτο σφάλμα</i>	695.05	54.97	51.50	30.26	55.58
<i>Σχετικό τετραγωνικό σφάλμα</i>	4203.92	64.28	494.35	13.58	21.01
<i>Απόλυτο σφάλμα</i>	247.57	120.31	109.41	116.93	168.59
<i>Μέγιστο σφάλμα</i>	3.93	3.53	3.03	3.87	2.58

Πίνακας 4.11: Βελτιστοποιημένες τιμές των συναρτήσεων σφάλματος για τις 5 εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$, τάση φόρτισης $+4\text{ kV}$, γεννήτρια NSG-438

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν ενώ στους πίνακες δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων για τις εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$.

4.2.2.1.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.9 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνουν πιο πολλά σημεία στο διάστημα $0 \div 3\text{ ns}$, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή, όμως χάνουν τη δεύτερη κορυφή. Η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max} , όχι όμως με απόλυτη ακρίβεια, είναι η εξίσωση (1.7) . Πρώτα η ίδια και μετά η (1.9) είναι οι δυο καλύτερες εξισώσεις για την περιγραφή της ουράς σε σχέση με τις υπόλοιπες.

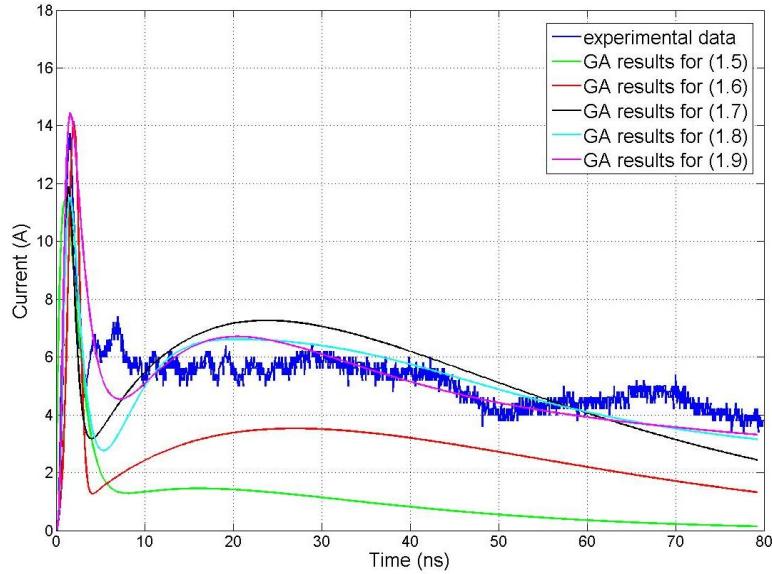


Σχήμα 4.9: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικό απόλυτου σφάλματος

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	37.45	40.79
I_1 (A)	1506.09	10.87	443.79	40.36	55.41
I_2 (A)	198.77	336.52	45.41	59.89	9.96
I_3 (A)	-	-	-	35.96	-
t_1 (ns)	1.95	2.02	0.68	0.49	0.67
t_2 (ns)	1.91	392.22	0.57	1.51	2.76
t_3 (ns)	19.84	0.94	59.99	10.75	28.81
t_4 (ns)	18.49	154.27	29.99	9.59	5.08
t_5 (ns)	-	-	-	60.91	11.03
t_6 (ns)	-	-	-	50.85	71.38
t_7 (ns)	-	-	-	18.18	-
t_8 (ns)	-	-	-	22.34	-
P	-	-	-	5.91	5.17
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.12: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικό απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-438

4.2.2.1.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος



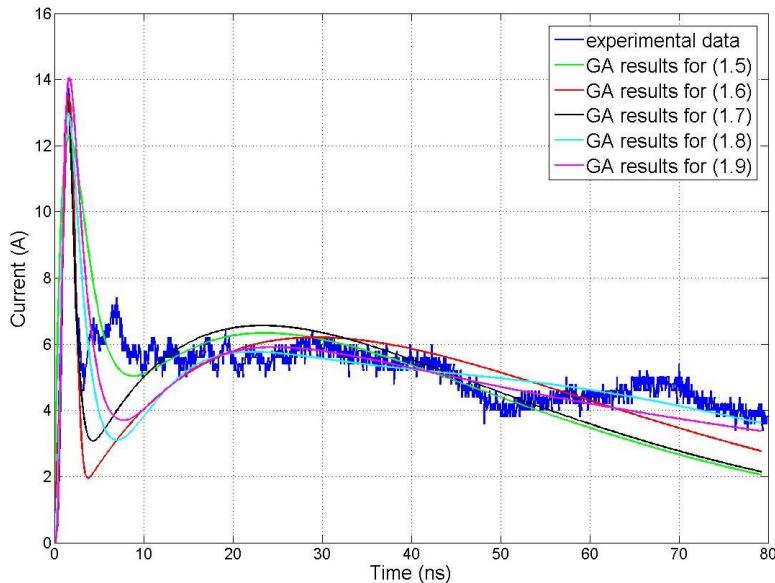
Σχήμα 4.10: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος

	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
<i>I₀ (A)</i>	-	-	-	61.86	40.10
<i>I₁ (A)</i>	1508.85	13.52	334.42	54.27	125.40
<i>I₂ (A)</i>	126.83	263.24	50.10	59.52	5.58
<i>I₃ (A)</i>	-	-	-	55.49	-
<i>t₁ (ns)</i>	1.03	2.00	0.66	0.63	0.50
<i>t₂ (ns)</i>	1.01	383.51	0.58	1.28	2.01
<i>t₃ (ns)</i>	16.36	0.87	60.00	7.76	39.68
<i>t₄ (ns)</i>	15.86	148.83	29.22	7.67	10.09
<i>t₅ (ns)</i>	-	-	-	68.47	8.50
<i>t₆ (ns)</i>	-	-	-	49.29	148.67
<i>t₇ (ns)</i>	-	-	-	19.69	-
<i>t₈ (ns)</i>	-	-	-	21.72	-
<i>P</i>	-	-	-	5.25	6.00
<i>q</i>	-	-	-	4	2
<i>r</i>	-	-	-	5	2
<i>s</i>	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.13: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-

Στο Σχήμα 4.10 παρατηρήσαμε ότι ενώ η εξίσωση (1.6) πλησιάζει την τιμή I_{max} , όχι με ακρίβεια καθώς είναι ελαφρώς μετατοπισμένη ως προς τη θέση του πρώτου μέγιστου, η (1.9) είναι αυτή που εντοπίζει καλύτερα την πρώτη κορυφή αλλά όχι την τιμή. Όσον αφορά στην ουρά της κυματομορφής, η (1.9) καθώς και η (1.8) έχουν την πιο καλή προσέγγιση.

4.2.2.1.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος



Σχήμα 4.11: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος

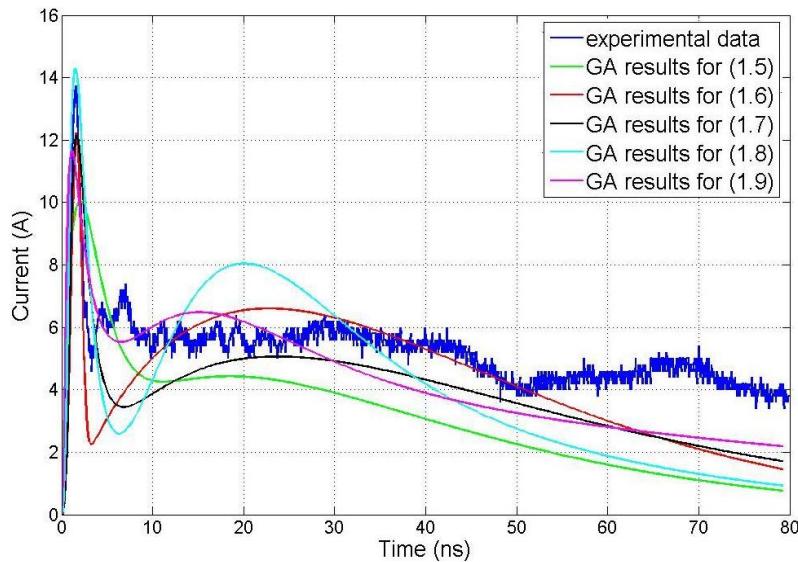
Στο Σχήμα 4.11, η εξίσωση (1.6) έχει την καλύτερη προσέγγιση της πρώτης κορυφής, ενώ δεν συνεχίζει το ίδιο ικανοποιητικά. Η εξίσωση (1.7) προσεγγίζει πιο καλά την ουρά σε σχέση με τις υπόλοιπες.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	36.27	40.09
$I_1 (A)$	1500.22	12.66	387.18	37.01	83.32
$I_2 (A)$	58.57	206.53	37.59	54.53	8.38
$I_3 (A)$	-	-	-	35.02	-
$t_1 (ns)$	1.57	1.63	0.69	0.52	0.50
$t_2 (ns)$	1.54	375.39	0.61	2.00	2.02
$t_3 (ns)$	27.42	0.97	48.74	8.60	35.85
$t_4 (ns)$	20.41	154.26	29.96	6.77	9.30
$t_5 (ns)$	-	-	-	33.81	13.45
$t_6 (ns)$	-	-	-	34.77	87.20
$t_7 (ns)$	-	-	-	12.76	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	15.91	-
P	-	-	-	5.07	6.55
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.14: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο **απόλυτου σφάλματος**, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-438

4.2.2.1.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος

Σχήμα 4.12: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο **μέγιστου σφάλματος**

Στο Σχήμα 4.12 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνουν πιο πολλά σημεία στο διάστημα $0 \div 3$ ns, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή. Η συνάρτηση που είναι πιο ακριβής στην προσέγγιση της μέγιστη τιμής I_{max} , είναι η εξισωση (1.8), που συνεχίζει να είναι καλή και στο υπόλοιπο. Η εξισωση (1.6) προσεγγίζει πιο ικανοποιητικά την ουρά της κυματομορφής.

	<i>Eξισωση</i> (1.5)	<i>Eξισωση</i> (1.6)	<i>Eξισωση</i> (1.7)	<i>Eξισωση</i> (1.8)	<i>Eξισωση</i> (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	48.93	19.46
I_1 (A)	484.58	11.12	46.51	50.60	80.93
I_2 (A)	71.54	66.78	30.97	39.13	5.77
I_3 (A)	-	-	-	45.14	-
t_1 (ns)	1.86	1.62	0.50	0.52	0.32
t_2 (ns)	1.77	225.01	1.48	1.63	2.63
t_3 (ns)	20.52	0.75	53.03	11.81	22.62
t_4 (ns)	17.35	106.24	29.96	12.52	8.15
t_5 (ns)	-	-	-	31.42	8.15
t_6 (ns)	-	-	-	22.82	81.54
t_7 (ns)	-	-	-	12.28	-
t_8 (ns)	-	-	-	11.13	-
P	-	-	-	5.30	3.63
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.15: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια NSG-438

4.2.2.2. Τάση φόρτισης 4 kV αρνητικής πολικότητας

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ελαχιστοποίηση των τεσσάρων συναρτήσεων σφάλματος, μέσω του γενετικού αλγόριθμου, για ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος όπως προέκυψαν από μετρήσεις για τάση φόρτισης -4 kV, καθώς και παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων ΓΑ και για τις πέντε διαφορετικές εξισώσεις ρεύματος (1.5)÷(1.9) μαζί.

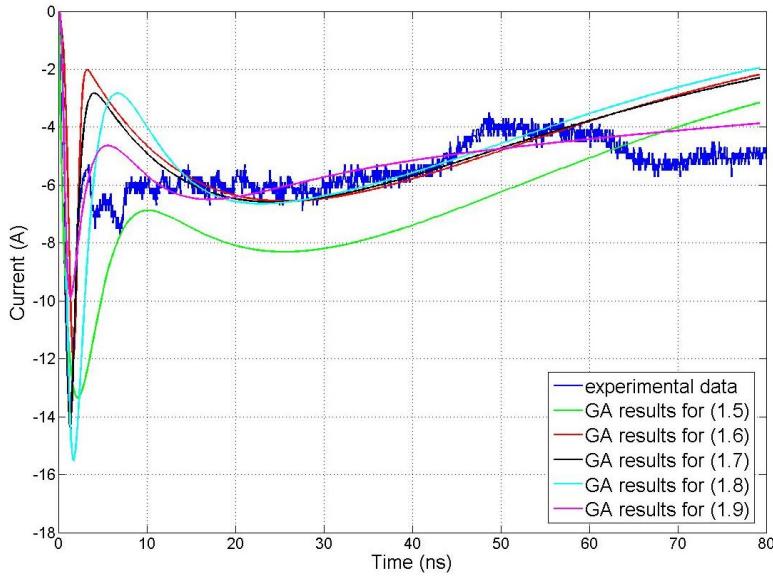
<i>Eξισώσεις Ρεύματος</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.5)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.6)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.7)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.8)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.9)</i>
<i>Κριτήρια Σφάλματος</i>					
<i>Σχετικό απόλυτο σφάλμα</i>	146.27	50.80	36.69	58.58	35.76
<i>Σχετικό τετραγωνικό σφάλμα</i>	10731.63	37.69	26.93	22.40	32.70
<i>Απόλυτο σφάλμα</i>	328.74	179.75	174.20	109.43	128.17
<i>Μέγιστο σφάλμα</i>	4.81	3.52	7.46	5.80	2.67

Πίνακας 4.16: Βελτιστοποιημένες τιμές των συναρτήσεων σφάλματος για τις 5 εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-438

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν, σε τάση φόρτισης -4 kV με τη γεννήτρια NSG-438, ενώ στους πίνακες δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων συγκεντρωτικά και για τις πέντε εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$.

4.2.2.2.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.13 παρατηρούμε ότι όλες οι εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο λόγω των πολλών σημείων στο διάστημα $0 \div 3$ ns, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή. Η εξίσωση (1.7) είναι η συνάρτηση που προσεγγίζει τόσο τη θέση της πρώτης κορυφής όσο και την τιμή της I_{max} , με μεγάλη ακρίβεια, και συνεχίζει να περιγράφει, καλύτερα από τις υπόλοιπες, το υπόλοιπο της κυματομορφής.

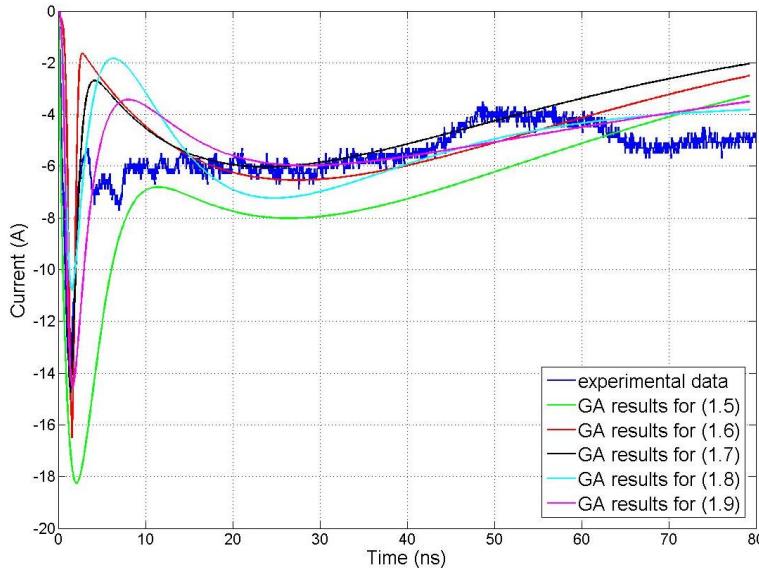


Σχήμα 4.13: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλντον σφάλματος

	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
I_0 (A)	-	-	-	-75.81	-22.31
I_1 (A)	-1512.41	-11.18	-389.11	-47.60	-75.92
I_2 (A)	-737.89	-492.81	-43.61	-41.40	-6.62
I_3 (A)	-	-	-	-40.65	-
t_1 (ns)	1.94	1.68	0.62	0.73	0.38
t_2 (ns)	1.90	363.41	0.56	1.52	2.00
t_3 (ns)	25.96	0.70	58.56	10.47	21.53
t_4 (ns)	25.17	141.46	29.99	5.01	7.18
t_5 (ns)	-	-	-	21.50	8.61
t_6 (ns)	-	-	-	26.69	147.79
t_7 (ns)	-	-	-	10.30	-
t_8 (ns)	-	-	-	12.68	-
P	-	-	-	4.49	6.15
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.17: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλντον σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-438

4.2.2.2.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος



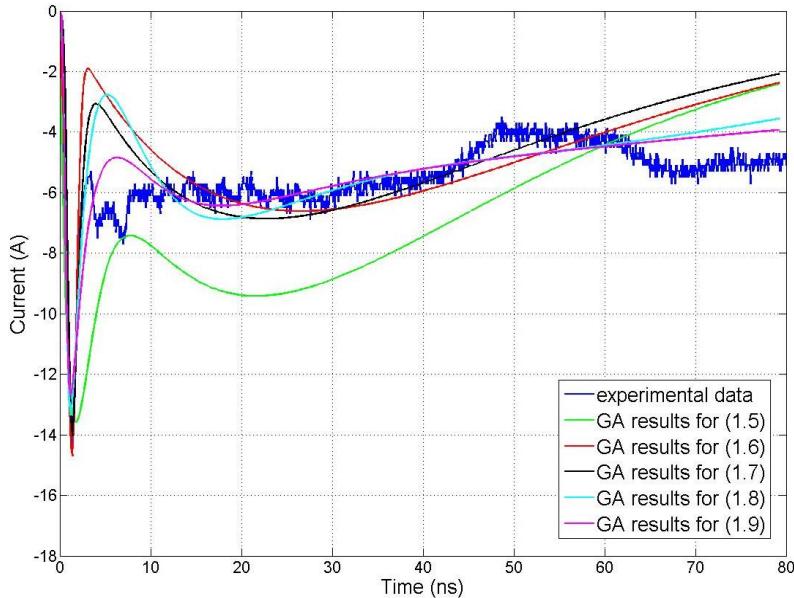
Σχήμα 4.14: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	-40.57	-40.12
I_1 (A)	-2250.01	-15.60	-529.84	-44.38	-59.01
I_2 (A)	-713.45	-349.84	-36.99	-68.82	-10.15
I_3 (A)	-	-	-	-38.46	-
t_1 (ns)	1.94	1.57	0.68	0.54	0.49
t_2 (ns)	1.90	370.89	0.55	1.57	2.06
t_3 (ns)	26.90	0.50	53.27	11.07	47.56
t_4 (ns)	26.09	147.52	29.99	11.66	8.09
t_5 (ns)	-	-	-	63.57	12.34
t_6 (ns)	-	-	-	51.28	74.69
t_7 (ns)	-	-	-	18.71	-
t_8 (ns)	-	-	-	22.51	-
P	-	-	-	5.88	6.39
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.18: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-438

Στο Σχήμα 4.14 παρατηρήσαμε ότι τα αποτελέσματα του Γ.Α. για την εξίσωση (1.7), όπως και στο προηγούμενο γράφημα, προσεγγίζουν τη θέση της πρώτης κορυφής, την τιμή της I_{max} και την ουρά της κυματομορφής με μεγάλη ακρίβεια.

4.2.2.2.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος



Σχήμα 4.15: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.15 παρατηρούμε ότι όλες οι εξισώσεις εντοπίζουν πολύ καλά το πρώτο μέγιστο και καταλήγουν κοντά στην τιμή I_{max} με καλύτερη προσέγγιση αυτή της εξίσωσης (1.6). Όσο για το υπόλοιπο της κυματομορφής η (1.7) δίνει και πάλι μια καλύτερη περιγραφή.

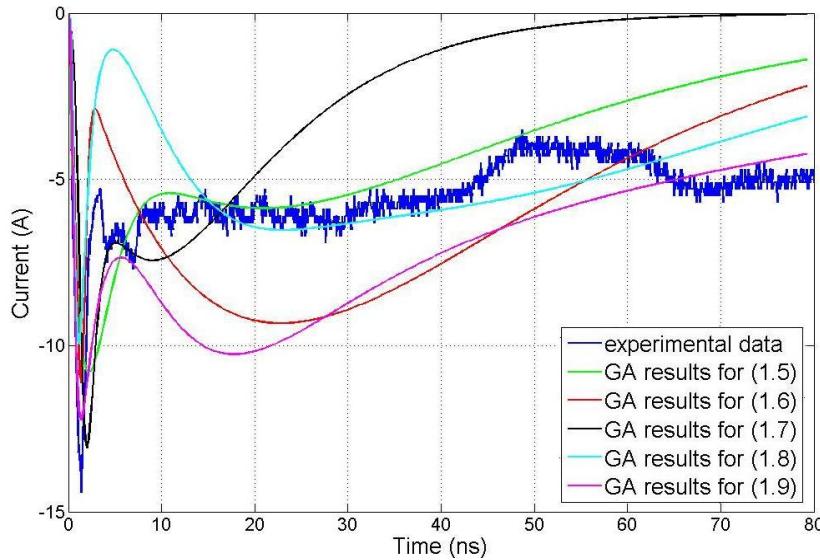
	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	-39.55	-25.00
$I_1 (A)$	-1561.77	-13.97	-498.35	-45.57	-63.85
$I_2 (A)$	-701.47	-389.99	-45.88	-54.90	-6.68
$I_3 (A)$	-	-	-	-37.64	-
$t_1 (ns)$	1.54	1.32	0.67	0.39	0.32
$t_2 (ns)$	1.51	364.09	0.54	1.45	2.13
$t_3 (ns)$	22.03	0.78	55.59	7.59	19.93
$t_4 (ns)$	21.24	144.03	28.12	7.50	7.76
$t_5 (ns)$	-	-	-	36.36	9.72
$t_6 (ns)$	-	-	-	35.68	149.24
$t_7 (ns)$	-	-	-	13.27	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	16.27	-
P	-	-	-	5.44	6.10
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.19: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο **απόλυτον σφάλματος**, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-438

4.2.2.2.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.16 παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.7) φτάνει πιο κοντά στην μέγιστη τιμή I_{max} , ενώ αδυνατεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη συνέχεια της κυματομορφής. Η (1.8) είναι η εξίσωση που δίνει, σε σχέση με τις υπόλοιπες, την καλύτερη προσέγγιση για την υπόλοιπη κυματομορφή.



Σχήμα 4.16: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος

	Eξίσωση (1.5)	Eξίσωση (1.6)	Eξίσωση (1.7)	Eξίσωση (1.8)	Eξίσωση (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	-43.88	-21.50
I_1 (A)	-1251.05	-9.84	-358.00	-45.73	-114.06
I_2 (A)	-520.64	-492.85	-100.06	-67.31	-10.36
I_3 (A)	-	-	-	-41.10	-
t_1 (ns)	1.95	1.32	0.93	0.41	0.38
t_2 (ns)	1.91	300.51	0.76	1.02	2.77
t_3 (ns)	21.43	0.74	44.64	11.28	25.34
t_4 (ns)	20.78	121.39	10.02	6.98	8.83
t_5 (ns)	-	-	-	28.65	8.85
t_6 (ns)	-	-	-	28.46	88.34
t_7 (ns)	-	-	-	11.73	-
t_8 (ns)	-	-	-	13.38	-
P	-	-	-	5.75	3.77
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.20: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια NSG-438

4.2.3 Γεννήτρια DITO

4.2.3.1 Τάση φόρτισης 4 kV θετικής πολικότητας

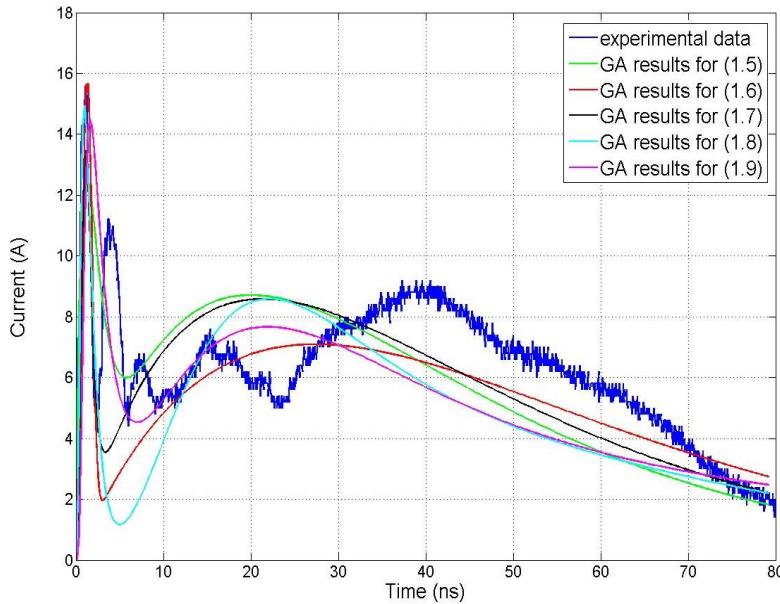
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ελαχιστοποίηση των τεσσάρων συναρτήσεων σφάλματος, μέσω του γενετικού αλγόριθμου, για ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος όπως προέκυψαν από μετρήσεις για τάση φόρτισης +4 kV, και έπειτα παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων ΓΑ και για τις πέντε διαφορετικές εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$ μαζί.

<i>Eξισώσεις Ρεύματος</i>	<i>Eξισωση (1.5)</i>	<i>Eξισωση (1.6)</i>	<i>Eξισωση (1.7)</i>	<i>Eξισωση (1.8)</i>	<i>Eξισωση (1.9)</i>
<i>Κριτήρια Σφάλματος</i>					
<i>Σχετικό απόλυτο σφάλμα</i>	68.10	44.88	43.10	40.42	75.53
<i>Σχετικό τετραγωνικό σφάλμα</i>	28.38	27.30	28.65	21.26	64.03
<i>Απόλυτο σφάλμα</i>	235.40	379.11	390.68	183.95	210.07
<i>Μέγιστο σφάλμα</i>	6.22	8.03	7.57	7.70	4.88

Πίνακας 4.21: Βελτιστοποιημένες τιμές των συναρτήσεων σφάλματος για τις 5 εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια DITO

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν. Στους πίνακες δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων συγκεντρωτικά και για τις πέντε εξισώσεις ρεύματος ηλεκτοστατικής εκφόρτισης $(1.5) \div (1.9)$.

4.2.3.1.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος



Σχήμα 4.17: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος

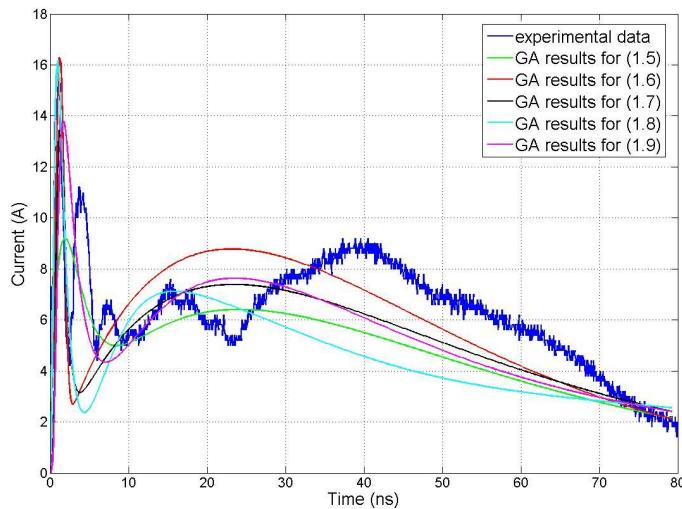
Στο Σχήμα 4.17 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για όλες τις εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνουν πιο πολλά σημεία στο διάστημα $0 \div 3$ ns, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή. Η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max} , όχι όμως επακριβώς, είναι η εξίσωση (1.6). Ενώ η ίδια εξίσωση δεν δίνει τόσο καλή προσέγγιση για την υπόλοιπη κυματομορφή, παρατηρούμε πως η (1.9) προσεγγίζει καλύτερα, σε σχέση με τις υπόλοιπες, την ουρά της κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	54.65	40.06
$I_1 (A)$	1504.49	15.05	337.49	35.85	122.38
$I_2 (A)$	105.19	399.50	62.90	46.88	6.41
$I_3 (A)$	-	-	-	49.72	-
$t_1 (ns)$	1.12	1.29	0.54	0.38	0.49
$t_2 (ns)$	1.09	374.94	0.50	1.03	2.01
$t_3 (ns)$	22.42	0.77	57.19	11.94	35.92
$t_4 (ns)$	17.89	148.49	25.86	13.11	12.26
$t_5 (ns)$	-	-	-	33.29	12.09
$t_6 (ns)$	-	-	-	29.44	78.21
$t_7 (ns)$	-	-	-	12.66	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	13.78	-
P	-	-	-	4.55	6.25
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.22: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.1.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος



Σχήμα 4.18: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος

Στο Σχήμα 4.18, η εξίσωση (1.8) έχει την καλύτερη προσέγγιση της πρώτης κορυφής, και της μέγιστης τιμής I_{max} , ενώ η εξίσωση (1.9) προσεγγίζει καλύτερα την τιμή της δεύτερης κορυφής και γενικά περιγράφει πιο ικανοποιητικά την ουρά της κυματομορφής σε σχέση με τις υπόλοιπες.

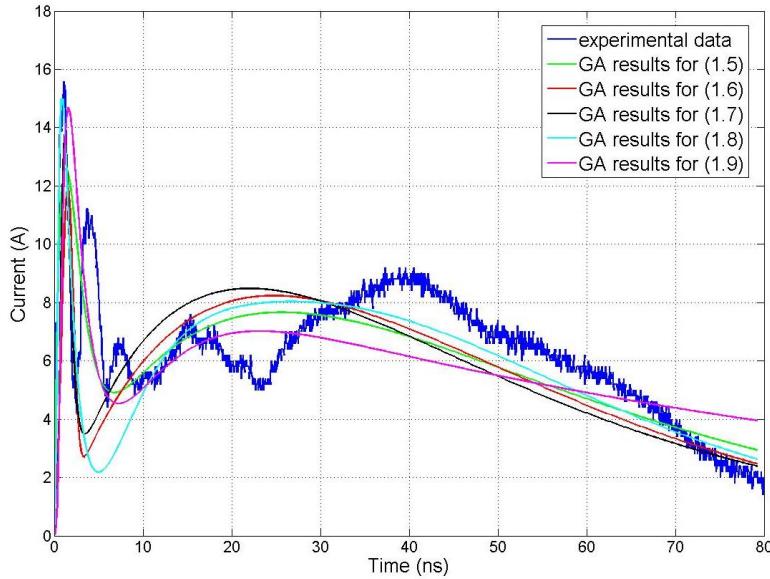
	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0(A)$	-	-	-	58.38	40.02
$I_1(A)$	1056.98	15.26	309.51	57.44	116.88
$I_2(A)$	527.22	206.87	45.76	58.80	7.67
$I_3(A)$	-	-	-	52.70	-
$t_1(ns)$	1.68	1.26	0.58	0.38	0.50
$t_2(ns)$	1.65	268.64	0.56	1.03	2.00
$t_3(ns)$	24.52	0.75	52.87	7.09	49.85
$t_4(ns)$	23.72	116.24	29.43	7.15	14.36
$t_5(ns)$	-	-	-	51.32	9.35
$t_6(ns)$	-	-	-	37.11	61.42
$t_7(ns)$	-	-	-	16.26	-
$t_8(ns)$	-	-	-	16.84	-
P	-	-	-	4.25	6.99
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.23: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.1.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.19, η εξίσωση (1.8) έχει την καλύτερη προσέγγιση της πρώτης κορυφής, ενώ παρατηρούμε στην συνέχεια της κυματομορφής ότι και οι προσεγγίσεις των εξισώσεων (1.5) και (1.6) είναι ικανοποιητικές.

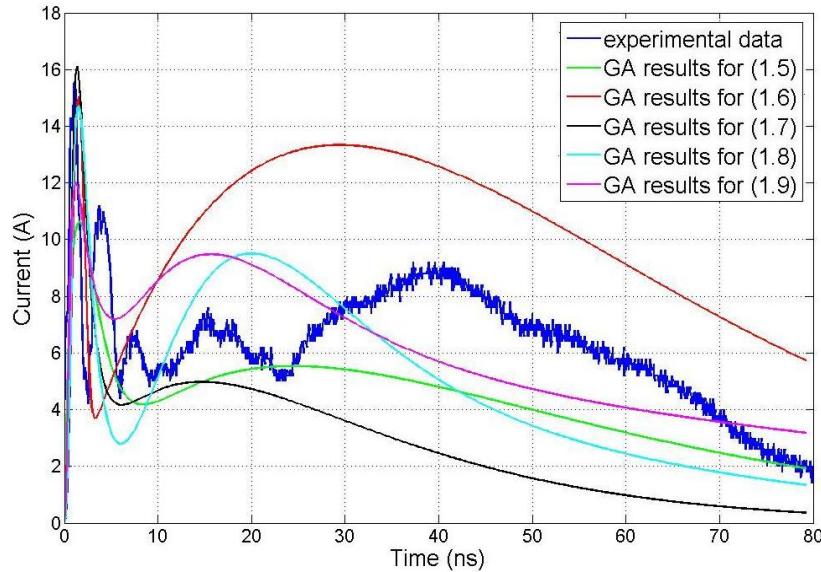


Σχήμα 4.19: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο **απόλυτου σφάλματος**

	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
I_0 (A)	-	-	-	37.11	40.02
I_1 (A)	1547.93	10.78	383.14	41.31	116.25
I_2 (A)	151.15	406.55	54.48	59.59	9.78
I_3 (A)	-	-	-	35.69	-
t_1 (ns)	1.23	1.51	0.57	0.30	0.50
t_2 (ns)	1.21	327.39	0.50	1.32	2.03
t_3 (ns)	27.50	0.88	51.64	8.48	35.35
t_4 (ns)	23.95	132.08	27.46	6.48	8.44
t_5 (ns)	-	-	-	20.52	12.65
t_6 (ns)	-	-	-	26.07	87.60
t_7 (ns)	-	-	-	10.10	-
t_8 (ns)	-	-	-	12.43	-
P	-	-	-	4.30	5.63
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.24: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο **απόλυτου σφάλματος**, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.1.4 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος



Σχήμα 4.20: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.20 παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.7) εντοπίζει καλύτερα την πρώτη κορυφή δίνοντας όμως μεγαλύτερη τιμή για την τιμή I_{max} . Όσον αφορά στην ουρά της κυματομορφής, η (1.8) έχει την πιο καλή προσέγγιση.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	59.85	20.34
$I_1 (A)$	431.52	13.41	60.00	41.44	127.09
$I_2 (A)$	100.13	69.17	41.98	36.57	8.10
$I_3 (A)$	-	-	-	53.88	-
$t_1 (ns)$	1.53	1.50	0.41	0.63	0.35
$t_2 (ns)$	1.44	266.56	1.25	1.50	2.69
$t_3 (ns)$	26.41	0.87	45.49	10.41	23.78
$t_4 (ns)$	22.73	132.00	17.37	12.87	8.45
$t_5 (ns)$	-	-	-	31.96	8.45
$t_6 (ns)$	-	-	-	26.26	84.45
$t_7 (ns)$	-	-	-	12.39	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	12.51	-
P	-	-	-	4.11	3.69
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.25: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος, τάση φόρτισης +4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.2 Τάση φόρτισης 4 kV αρνητικής πολικότητας

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές που υπολογίστηκαν από την ελαχιστοποίηση των τεσσάρων συναρτήσεων σφάλματος, μέσω του γενετικού αλγόριθμου, για ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος όπως προέκυψαν από μετρήσεις για τάση φόρτισης -4 kV, και παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων ΓΑ και για όλες τις εξισώσεις ρεύματος (1.5) ÷ (1.9) μαζί.

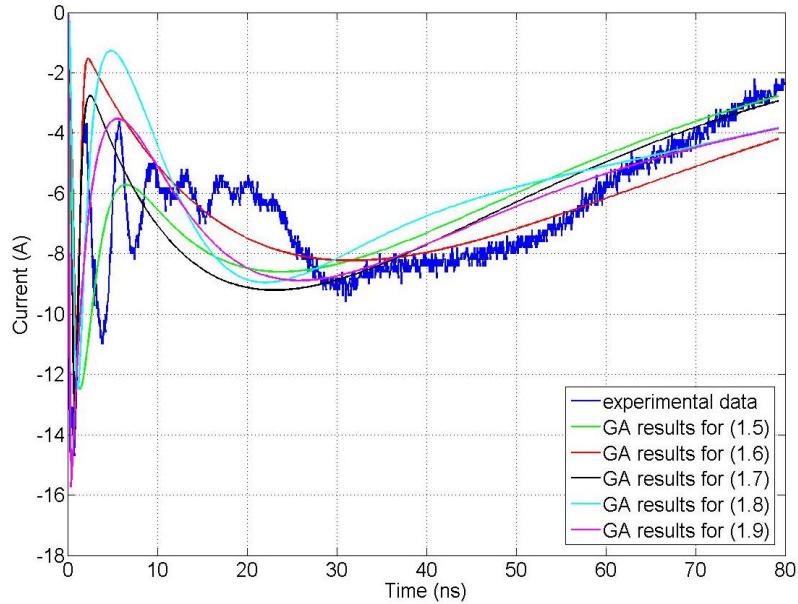
<i>Eξισώσεις Ρεύματος</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.5)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.6)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.7)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.8)</i>	<i>Eξίσωση</i> <i>(1.9)</i>
<i>Κριτήρια Σφάλματος</i>					
<i>Σχετικό απόλυτο σφάλμα</i>	146.27	50.80	36.69	58.58	35.76
<i>Σχετικό τετραγωνικό σφάλμα</i>	10731.63	37.69	26.93	22.40	32.70
<i>Απόλυτο σφάλμα</i>	328.74	179.75	174.20	109.43	128.17
<i>Μέγιστο σφάλμα</i>	10.51	12.27	13.97	12.55	6.10

Πίνακας 4.26: Βελτιστοποιημένες τιμές των συναρτήσεων σφάλματος για τις 5 εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια DITO

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν, σε τάση φόρτισης -4 kV με τη γεννήτρια DITO, ενώ στους πίνακες δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων συγκεντρωτικά και για τις πέντε εξισώσεις ρεύματος $(1.5) \div (1.9)$.

4.2.3.2.1 Κριτήριο σχετικού απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.21 παρατηρούμε ότι όλες οι εξισώσεις εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο λόγω των πολλών σημείων στο διάστημα $0 \div 3$ ns, όπου εντοπίζεται η πρώτη κορυφή. Η εξίσωση (1.7) είναι η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη θέση της πρώτης κορυφής και δίνει μια τιμή μεγίστου κοντά στην τιμή I_{max} των πειραματικών δεδομένων, ενώ η ίδια μαζί με την εξίσωση (1.9) αποδίδουν καλύτερα το υπόλοιπο της κυματομορφής.

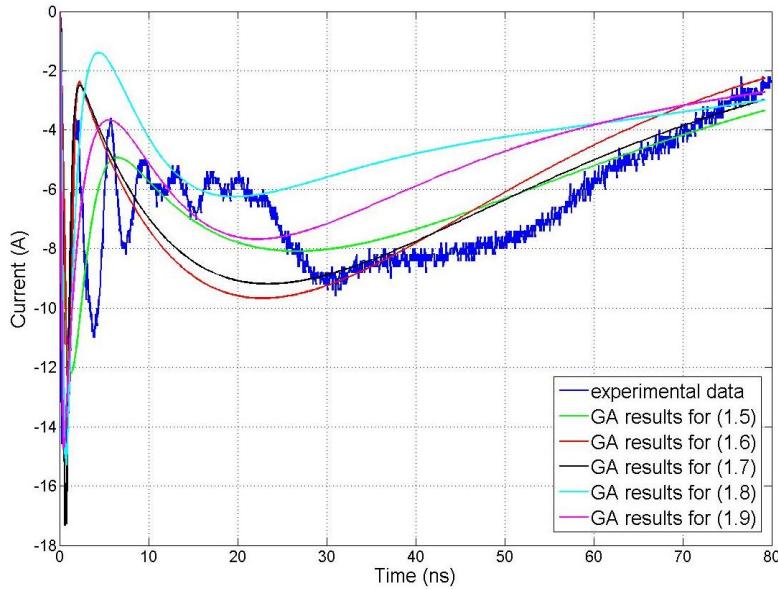


Σχήμα 4.21: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλντον σφάλματος

	Eξίσωση (1.5)	Eξίσωση (1.6)	Eξίσωση (1.7)	Eξίσωση (1.8)	Eξίσωση (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	-58.78	-20.03
I_1 (A)	-1512.77	-10.32	-366.23	-39.49	-64.91
I_2 (A)	-707.15	-239.02	-49.99	-60.03	-9.99
I_3 (A)	-	-	-	-37.03	-
t_1 (ns)	1.25	1.02	0.38	0.46	0.08
t_2 (ns)	1.23	399.02	0.35	1.00	2.00
t_3 (ns)	24.14	0.56	45.54	10.25	30.77
t_4 (ns)	23.36	164.87	29.99	12.45	14.85
t_5 (ns)	-	-	-	34.35	13.49
t_6 (ns)	-	-	-	34.25	77.64
t_7 (ns)	-	-	-	12.87	-
t_8 (ns)	-	-	-	15.70	-
P	-	-	-	4.51	6.18
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.27: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού απόλντον σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.2.2 Κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος



Σχήμα 4.22: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος

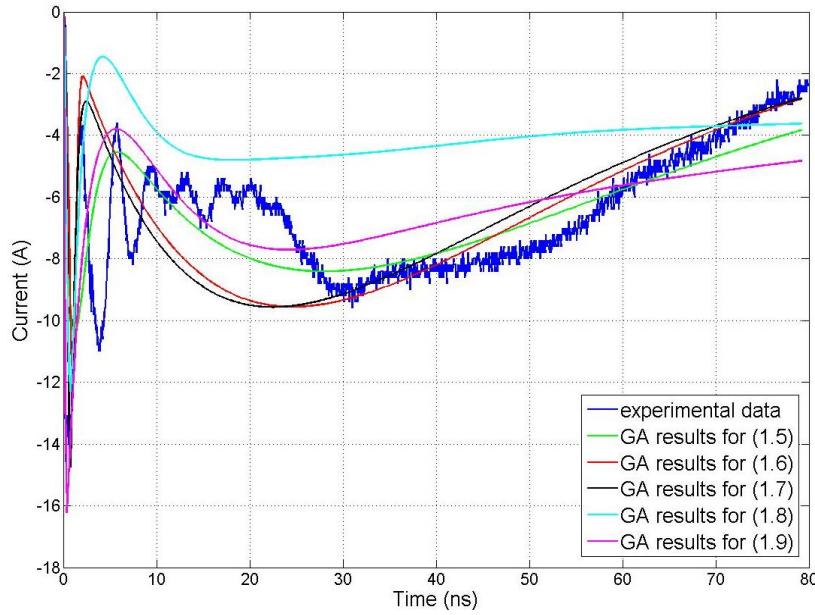
Στο Σχήμα 4.22 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση που προσεγγίζει καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max} είναι η εξίσωση (1.9), όχι όμως με απόλυτη ακρίβεια καθώς είναι ελαφρώς μετατοπισμένη ως προς τη θέση της πρώτης κορυφής. Οι (1.9) και (1.7) είναι οι δυο καλύτερες προσεγγίσεις για την περιγραφή της ουράς της κυματομορφής σε σχέση με τις υπόλοιπες.

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
$I_0 (A)$	-	-	-	-40.56	-20.01
$I_1 (A)$	-1504.26	-12.48	-407.71	-46.94	-66.53
$I_2 (A)$	-716.31	-381.60	-62.71	-43.01	-7.50
$I_3 (A)$	-	-	-	-38.45	-
$t_1 (ns)$	1.21	1.00	0.31	0.25	0.10
$t_2 (ns)$	1.19	287.16	0.31	1.00	2.00
$t_3 (ns)$	27.05	0.56	58.43	8.32	26.22
$t_4 (ns)$	26.23	118.85	28.81	6.87	13.07
$t_5 (ns)$	-	-	-	37.10	13.12
$t_6 (ns)$	-	-	-	36.78	74.56
$t_7 (ns)$	-	-	-	13.42	-
$t_8 (ns)$	-	-	-	16.71	-
P	-	-	-	4.17	5.33
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.28: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο σχετικού τετραγωνικού σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.2.3 Κριτήριο απόλυτου σφάλματος

Στο Σχήμα 4.23 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του Γ.Α. για την εξίσωση (1.7) προσεγγίζουν τόσο τη θέση της πρώτης κορυφής όσο και την τιμή της I_{max} με αρκετή ακρίβεια, ενώ η εξίσωση (1.5) είναι αυτή που δίνει την πιο ικανοποιητική περιγραφή για την ουρά της κυματομορφής.



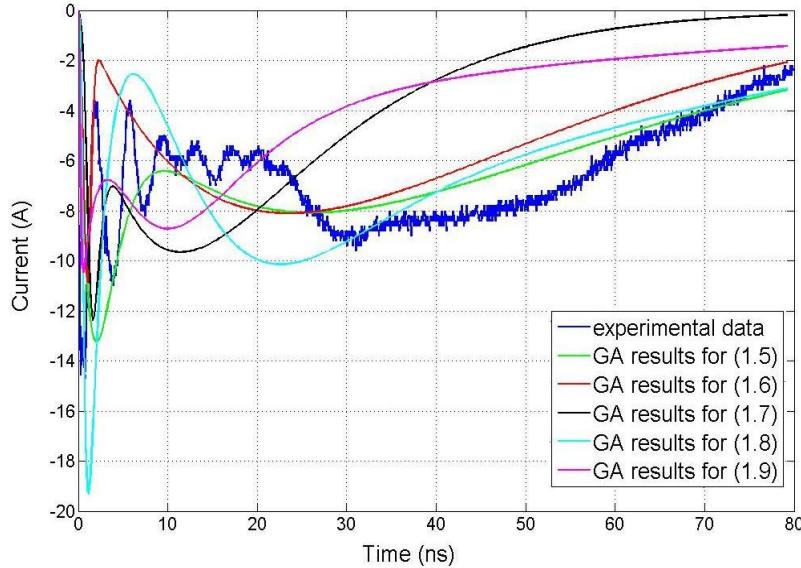
Σχήμα 4.23: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος

	<i>Eξίσωση</i> (1.5)	<i>Eξίσωση</i> (1.6)	<i>Eξίσωση</i> (1.7)	<i>Eξίσωση</i> (1.8)	<i>Eξίσωση</i> (1.9)
I_0 (A)	-	-	-	-32.95	-20.26
I_1 (A)	-1201.10	-11.54	-216.99	-38.02	-118.09
I_2 (A)	-554.01	-510.45	-68.70	-59.99	-8.40
I_3 (A)	-	-	-	-32.36	-
t_1 (ns)	1.11	1.00	0.31	0.26	0.08
t_2 (ns)	1.09	328.95	0.38	1.03	2.04
t_3 (ns)	28.63	0.50	59.01	7.10	48.48
t_4 (ns)	27.47	131.93	27.34	7.34	9.94
t_5 (ns)	-	-	-	57.93	9.14
t_6 (ns)	-	-	-	49.63	141.80
t_7 (ns)	-	-	-	17.59	-
t_8 (ns)	-	-	-	21.85	-
P	-	-	-	4.25	5.26
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.29: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9)

για το κριτήριο απόλυτου σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια DITO

4.2.3.2.3 Κριτήριο μέγιστου σφάλματος



Σχήμα 4.24: Συγκριτικά αποτελέσματα γενετικού αλγόριθμου και πειραματικών δεδομένων για εξισώσεις (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος

	<i>Eξίσωση (1.5)</i>	<i>Eξίσωση (1.6)</i>	<i>Eξίσωση (1.7)</i>	<i>Eξίσωση (1.8)</i>	<i>Eξίσωση (1.9)</i>
I_0 (A)	-	-	-	-49.92	-13.78
I_1 (A)	-1562.81	-9.98	-352.96	-46.53	-121.73
I_2 (A)	-625.32	-339.66	-137.54	-56.66	-5.06
I_3 (A)	-	-	-	-45.94	-
t_1 (ns)	1.82	1.00	0.78	0.39	0.13
t_2 (ns)	1.78	300.30	0.63	1.59	2.25
t_3 (ns)	26.48	0.60	59.63	11.73	15.04
t_4 (ns)	25.57	123.33	12.56	13.44	6.26
t_5 (ns)	-	-	-	32.76	6.26
t_6 (ns)	-	-	-	31.21	62.60
t_7 (ns)	-	-	-	12.55	-
t_8 (ns)	-	-	-	14.48	-
P	-	-	-	4.00	3.25
q	-	-	-	4	2
r	-	-	-	5	2
s	-	-	-	4	-

Πίνακας 4.30: Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων των 5 εξισώσεων ρεύματος (1.5)÷(1.9) για το κριτήριο μέγιστου σφάλματος, τάση φόρτισης -4 kV, γεννήτρια DITO

Στο Σχήμα 4.24 παρατηρήσαμε ότι η εξίσωση (1.5) προσεγγίζει καλύτερα την πρώτη κορυφή της κυματομορφής, χωρίς βέβαια απόλυτη ακρίβεια, ενώ βλέπουμε σε αυτή την περίπτωση την ίδια εξίσωση να δίνει, σε σχέση με τις υπόλοιπες, την καλύτερη προσέγγιση για το υπόλοιπο της κυματομορφής.

4.3 Συμπεράσματα

Ο γενετικός αλγόριθμος όπως είδαμε είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο βελτιστοποίησης. Στη δική μας περίπτωση, η εφαρμογή του Γ.Α. έγινε σε πειραματικά δεδομένα, τα οποία επιλέξαμε μέσω μιας μόνο συνάρτησης δειγματοληψίας, που αναπτύχθηκε με σκοπό να περιορίσει με δυναμικό τρόπο τα ζεύγη τιμών χρόνου-ρεύματος.

Παρατηρώντας λοιπόν τα παραπάνω συνδυαστικά γραφήματα, μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα από την προσέγγιση που πετυχαίνουν τα αποτελέσματα του Γ.Α. στην κυματομορφή των πειραματικών δεδομένων συγκρίνοντας τις γραφικές παραστάσεις.

Λόγω του ότι τα δεδομένα εισόδου του Γ.Α. ήταν συνδυαστικά, περιλαμβάνοντας πολλές τιμές για το διάστημα $0 \div 3$ ns, η εκάστοτε εξίσωση, στην οποία έχει εφαρμοστεί ο Γ.Α., προσαρμόζεται με μεγάλη συνέπεια στα πειραματικά δεδομένα, ειδικά στην αρχική, αυτή, περιοχή. Η εξίσωση που είχε την πιο ικανοποιητική προσέγγιση σε αυτήν την περιοχή ήταν, για τα τέσσερα διαφορετικά κριτήρια:

- σχετικού απόλυτου σφάλματος αρχικά η (1.7) και έπειτα η (1.9)
- σχετικού τετραγωνικού σφάλματος η (1.9) και η (1.8)
- απόλυτου σφάλματος η (1.8) και η (1.6)
- μέγιστου σφάλματος η (1.8)

Όσο για την περιγραφή της υπόλοιπης κυματομορφής οι εξισώσεις που δίνουν μια πιο καλή προσέγγιση είναι πρωτίστως η (1.9) και ακολουθεί η (1.8) για τις περισσότερες περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 5

Η επόμενη μέρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την βελτιστοποίηση των εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ώστε να μπορεί να συναχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την καταλληλότητα καθεμιάς εξίσωσης.

Πέντε εξισώσεις που έχουν προταθεί για την περιγραφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επιλέχθησαν. Οι τιμές των παραμέτρων τους τέθηκαν υπό αμφισβήτηση και υπολογίσθηκαν εκ νέου, βάση γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ούτως ώστε οι εξισώσεις στις οποίες αντιστοιχούν, να περιγράφουν την κυματομορφή του ρεύματος με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αναφορά για την κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αποτέλεσαν σειρές μετρήσεων, που ελήφθησαν από εμπορικές γεννήτριες, οι οποίες είναι διακριβωμένες για την ορθότητα του ρεύματος εκφόρτισης που παράγουν σύμφωνα με το IEC 61000-4-2.

Διαπιστώνοντας την ανάγκη ανάπτυξης μιας συνάρτησης δειγματοληψίας για την πιο αποδοτική λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου, υλοποιήθηκε αλγόριθμος δυναμικής δειγματοληψίας των μετρήσεων.

Θα ήταν χρήσιμη η διεξαγωγή πειραμάτων σε πραγματικά γεγονότα εκφόρτισης ανθρώπου – γειωμένου μετάλλου, για την ακριβέστερη καταγραφή των τιμών των παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες και θα αντιπροσώπευαν την πραγματική (πιο σύντομη από τις προδιαγραφές των ισχυόντων Προτύπων [16]) συμπεριφορά του φαινομένου. Με τα υπάρχοντα κυκλώματα των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, η προσομοίωση του φαινομένου συμβαίνει πιο αργά από ότι στην πραγματικότητα, και οι τιμές που έχουν οριστεί μέχρι τώρα είναι συμβατικές. Γι' αυτό και χρειάζεται να καταγράφουν αρκετές μετρήσεις σε συνθήκες πραγματικού φαινομένου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ώστε να αποκτήσουμε πιο

αξιόπιστα και σαφή συμπεράσματα για τις εξισώσεις που περιγράφουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Αυτό θα πρέπει να γίνει σε συνδυασμό με τη βελτίωση των μετρητικών συστημάτων έτσι ώστε να μπορούν να καταγράψουν ένα τέτοιο εύρος τιμών που να ανταποκρίνεται στη γρήγορη εξέλιξη του φαινομένου.

Επίσης, ίσως θα ήταν βοηθητικό να γίνει μια επέκταση, του αλγόριθμου δειγματοληψίας που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε αυτός να διαφοροποιεί περαιτέρω τον αριθμό των σημείων τα οποία λαμβάνει από την αρχική καμπύλη ανάλογα με την κλίση αυτής.

Βιβλιογραφία

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

- Electrostatic Discharge”, Tsinghua University, Department of Electrical Engineering, Beijing, China, presented at 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006*
- [11] Heidler H., “*Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung*”, presented at 18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Munich, Germany, 1985
 - [12] Zhiyong Yuan, Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen, Rong Zeng “*New Mathematical Descriptions of ESD Current Waveform Based on the Polynomial of Pulse Function*”, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 48, No. 3, pp. 589-591, 2006.
 - [13] D. Kind and K. Feser, “*High voltage test techniques*”, Newnes, 2001.
 - [14] G. Cerri, R. Leo, V. M. Primiani, “*ESD Indirect Coupling Modelling*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, August 1996, pp. 274-281.
 - [15] S. V. Berghe, D. Zutter, “*Study of ESD signal entry through coaxial cable shields*”, Journal of Electrostatics, vol.44, September, 1998, pp. 135-148.
 - [16] EN 61000-4-2:2009: “*Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part4 - 2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test*”, 2009.
 - [17] EN 61000.04.02:1996: “*Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part4: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test – Basic EMC Publication*”, 1996.
 - [18] “*Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433*”, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.
 - [19] “*Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438*”, Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.
 - [20] “*Instruction manual for the electrostatic discharge generator DITO*”, EM TEST, dito_v100.doc
 - [21] Schaffner Company, Technical document and product information for the MD 103.
 - [22] CSA7000B Series & TDS7000B Series Instruments User Manual.

- [23] Φανή Ασημακοπούλου, “Βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εξίσωσης των ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Μάρτιος 2006.
- [24] I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “*Estimation of multi-layer soil parameters using genetic algorithms*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, Jan. 2005.
- [25] I. F. Gonos, N. E. Mastorakis and M. N. S. Swamy, “*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.
- [26] I. F. Gonos, F. V. Topalis and I. A. Stathopoulos, “*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.
- [27] G P Fotis, F E Asimakopoulou, I F Gonos and I A Stathopoulos, “*Applying genetic algorithms for the determination of the parameters of the electrostatic discharge current equation*”, IOP Measurement Science and Technology, vol. 17, September 2006, pp. 2819-2827.

Παράρτημα A

A.1 Κώδικας για την αναπαραγωγή της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από πειραματικά δεδομένα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα Matlab, ο οποίος λαμβάνοντας μια σειρά μετρήσεων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αναπαράγει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό τάση φόρτισης ± 4 kV, δίνοντας έμφαση, τόσο στη συνολική διάρκεια του φαινομένου (καταγράφοντας την συνολική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης από 0 έως 80 ns), όσο και στην αρχή του φαινομένου, δηλαδή μέχρι την αρχική κορυφή του ρεύματος (καταγράφοντας την συνολική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης από 0 έως 3 ns). Ο κώδικας που ακολουθεί συνδυάζει τις δυο αυτές περιπτώσεις μετρήσεων ώστε να προκύπτει μια “καλύτερη” κυματομορφή με πιο λεπτομερή περιγραφή στην αρχή της.

A.1.1 Κώδικας JUNCTION-συνδυασμός αρχικής και συνολικής κυματομορφής

```
load C:\ptyxio\KWDIKES\ESD_GENERATOR_VERIFICATION\olokliro.txt;
load C:\ptyxio\KWDIKES\ESD_GENERATOR_VERIFICATION\arxi.txt;
```

```
time1=arxi(:,1);
current1=arxi(:,2);
time2=olokliro(:,1);
current2=olokliro(:,2);
T1=0;
T2=110;
TIME=time1;
CURRENT=current1;

N=length(time1);
for i=1:length(time2)
    if time2(i)>=time1(N)
        break;
    end
```

```

end
end

N1=i;
for i=1:length(time2)
    if time2(i)>time1(N)
        TIME(N+i-N1)=time2(i);
        CURRENT(N+i-N1)=current2(i);
    end
end

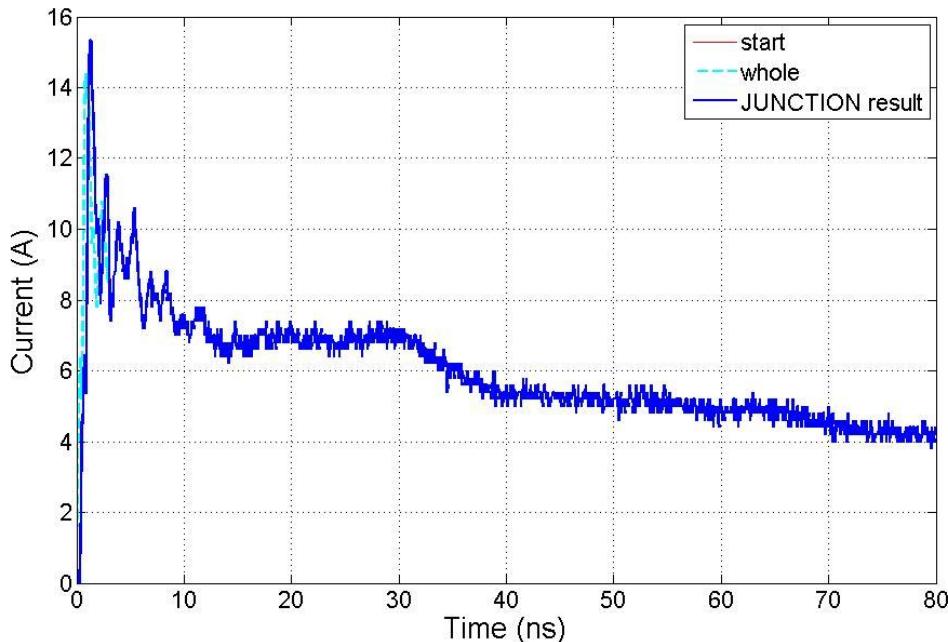
z=[TIME CURRENT];
save start_whole_waveform.txt z -ascii;

plot (time1, current1, 'r');grid;hold on;
plot (time2, current2, 'c');grid; hold on;
plot (TIME, CURRENT, 'b');grid;

```

A.1.2 Αποτέλεσμα κώδικα JUNCTION

Ο κώδικας JUNCTION αποθηκεύει τη νέα σειρά ζευγών χρόνου-ρεύματος σε ένα txt αρχείο με όνομα *start_whole_waveform*.



Σχήμα Π.Α.1: Γραφική παράσταση των μετρηθέντος ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια NSG-433, όπως εξάγεται από το πρόγραμμα σε Matlab με συνδυασμό αρχικής και συνολικής κυματομορφής

A.2 Κώδικας για “smoothing” της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πειραματικών δεδομένων

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα Matlab, ο οποίος λαμβάνοντας τη κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπως εξάγεται από το κάδικα JUNCTION που παρουσιάστηκε προηγουμένως, δίνει σαν αποτέλεσμα μια πιο ομαλή κυματομορφή ρεύματος, η οποία θα μας βοηθήσει να βγάλουμε συμπεράσματα για την αρχική.

A.2.1 Κώδικας smoothing

```
%Take an array (with two coloumns) that is named xristina
%The first coloumn is the time
%The second one is the current

load C:\ptuxio\KWDIKES\ESD_GENERATOR_VERIFICATION\start_whole_waveform.txt;

Dt=1e9;           % convert sec to ns
Du=10;            % 10 convert current

T=Dt*start_whole_waveform(:,1);
U=-Du*start_whole_waveform(:,2);

Samples=length(U);

%Smoothing
Us=smthall(U,Samples,3,20);
Us1_5=smthall(U,Samples,1,5);
Us1_10=smthall(U,Samples,1,10);

% apothikeusi arxeiou
sm=[T -Us'];
save smooth.txt sm -ascii;

% Sxediasmos grafikon parastaseon
figure (11)
f1=plot(T,-U,'g');
hold on
f2=plot(T,-Us,'r');
f3=plot(T,-Us1_5,'m');
f4=plot(T,-Us1_10,'c');
grid;
Xlabel('Time (ns)');
Ylabel('Current (A)');

set(f2,'LineWidth',2)
```

A.2.2 Συνάρτηση SmthAll που καλείται από το παραπάνω πρόγραμμα

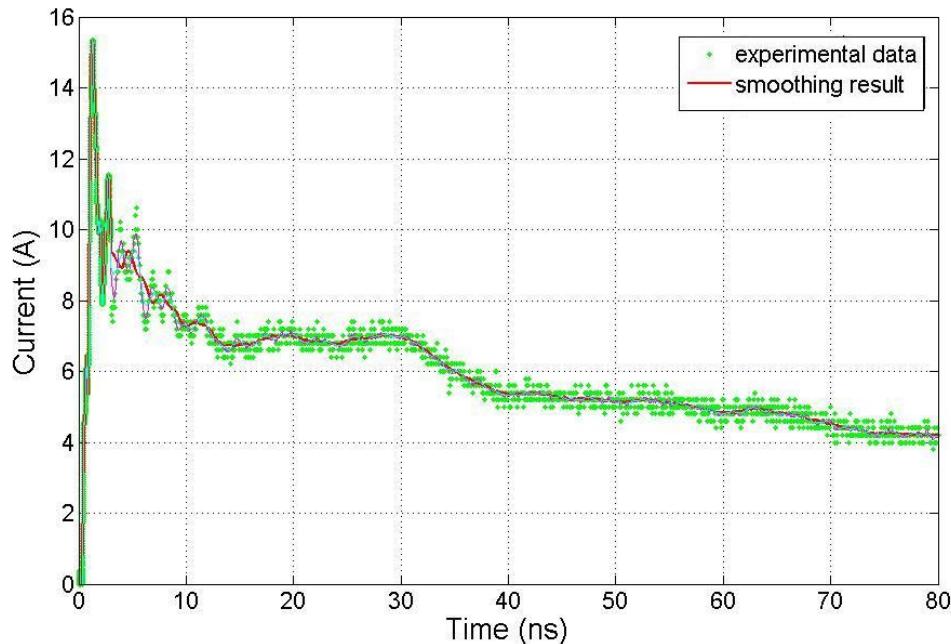
```
function y=SmthAll(ar,N,Mf,Me)
% SmoothAll
% y(ar,N,Mf,Me)
% ar is the vector
% N are the samples
% Mf is the number of smoothing samples of front part
% Me is the number of smoothing samples of End part
```

```
ThesiMax = AMaxPos(ar);
SIs = SmthFrnt(ar,N,Mf);
SIE = SmthEnd(ar,N,Me);
for k=1:1:ThesiMax
    is(k)=SIs(k);
end
dummy=ThesiMax+1;
for k=dummy:1:N
    is(k)=SIE(k);
end
```

y=is;

A.2.3 Αποτέλεσμα κώδικα smoothing

Ο κώδικας **smoothing** αποθηκεύει το αποτέλεσμα σε ένα txt αρχείο με όνομα *smooth*.



Σχήμα Π.Α.2: Γραφική παράσταση των ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια NSG-433, όπως εξάγεται μετά την εφαρμογή του κώδικα *smoothing*

A.3 Κώδικας για δειγματοληψία (sampling) στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πειραματικών δεδομένων

Εδώ παρατίθεται ο κώδικας σε γλώσσα Matlab, που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή δειγματοληψίας στα πειραματικά δεδομένα. Ο κώδικας φορτώνει τα αποτελέσματα που εξάγονται από τους κώδικες JUNCTION και smoothing και δίνει σαν αποτέλεσμα μια επιλεγμένη σειρά ζευγών χρόνου-ρεύματος. Για παράδειγμα, σε καταγραφή μετρήσεων με τη γεννήτρια NSG-433 για τάση φόρτισης +4 kV, από έναν αριθμό μετρήσεων 3165 σημείων καταλήγουμε στην επιλογή 164 ζευγών χρόνου-ρεύματος. Το διάγραμμα ροής όπως δόθηκε στο Σχήμα 3.2 του Κεφαλαίου 3, περιγράφει αναλυτικά την λειτουργία του κώδικα δειγματοληψίας που παρατίθεται παρακάτω.

A.3.1 Κώδικας δειγματοληψίας

```

close all;
clear all;

load
C:\ptuxiaki\KWDIKES\ESD_GENERATOR_VERIFICATION\start_whole_waveform.t
xt; % metriseis apo pistolia-sindiasmos arxis-ouras

load C:\ptuxiaki\KWDIKES\smoothing\smooth.txt; % [time,current]
apo smoothing sindiasmou peiramatikwn dedomenwn

Dt=1e9; % convert sec to ns
Di=10; % 10 convert current

T=Dt*start_whole_waveform(:,1);
I=Di*start_whole_waveform(:,2);

Ism=smooth(:,2);

equalzero=1e-010;
k=1;
window=16;

for i=1:window+(window/2):(length(T)-window)
    abs( ( Ism(i)-Ism(i+window) )/( T(i)-T(i+window) ) );
    if abs( ( Ism(i)-Ism(i+window) )/( T(i)-T(i+window) ) ) < equalzero % elegxos
prwtis paragwgou-allagi klisis

```

```
if (i>=window)

    Sample_I(k:k+window)=I(i-(window/2):i+(window/2));
    Sample_T(k:k+window)=T(i-(window/2):i+(window/2));
else

    Sample_I(k:k+window)=I(i:i+window);
    Sample_T(k:k+window)=T(i:i+window);

end
k=k+window+1;

else
    d=round((2*i+window)/2);
    Sample_I(k)=I(d);
    Sample_T(k)=T(d);
    k=k+1;
end
end

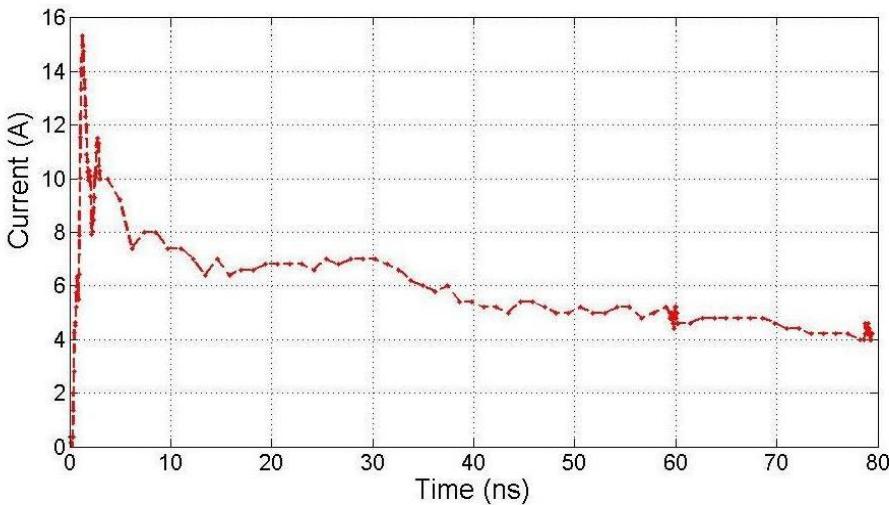
% apothikesi arxeiou-----
y=[Sample_T ,Sample_I];
save sampling.txt y -ascii;

% sxediasi grafikis parastasis deigmatolipsias-----
figure(12);
plot(Sample_T, Sample_I, '-r');grid;hold on;

Xlabel('Time (ns)');
Ylabel('Current (A)');
NN=length(Sample_T);
fid = fopen('Im_data.txt','w');
for i=1:NN;
    %Im(i,1)=(1e9)*Sample_T(i);
    Im(i,1)=Sample_T(i);
    Im(i,2)=Sample_I(i);
    fprintf(fid, '% 10.3f % 10.3f\n',Im(i,:));
end
fclose (fid)
```

A.3.1 Αποτέλεσμα κώδικα δειγματοληψίας

Ο κώδικας δειγματοληψίας αποθηκεύει την επιλεγμένη σειρά ζευγών χρόνου-ρεύματος σε ένα txt αρχείο με όνομα *sampling*.



Σχήμα Π.Α.4: Γραφική παράσταση των μετρηθέντος ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια NSG-433, όπως προκύπτει μετά την εφαρμογή του κώδικα δειγματοληψίας

Παράρτημα **Β**

B.1 Κώδικας του γενετικού αλγορίθμου που βελτιστοποιεί τις παραμέτρους πέντε διαφορετικών εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Παρακάτω δίνεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε γλώσσα Matlab, ο οποίος δέχεται σαν είσοδο το αποτέλεσμα της δειγματοληψίας του μετρηθέντος ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, και για κάθε διαφορετική εξίσωση ρεύματος, εξάγει τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της, ελαχιστοποιώντας κάθε φορά μία από τις τέσσερις συναρτήσεις σφάλματος.

B.1.1 Κώδικας γενετικού αλγορίθμου (Γ.Α.) για την εξίσωση (1.5)

```
% Genetic Algorithm
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
clear;
close all
PlithosGonion=20;
Bit=20;
Variables=6;
ChildrenNumber=4;
ProbMutation=0.2;
IterationNumber=30;

dio=2^Bit-1;
fid = fopen('Pavlos1.txt','w');
load Im_data.txt
Im_data=abs(Im_data);

for j=1:PlithosGonion
    FirstParents=parents(PlithosGonion, Bit, Variables);
    for i=1:1
        g=gagenia(FirstParents, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
        f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
    end
end
```

```
FirstParents=g;
end
j
par(j,:)=FirstParents(1,:);
end
FirstParents=par
for i=1:IterationNumber
g=gagenia(par, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
par=g;

I1 = 45 +100*par(1,1)/dio;
I2 = 5 + 10*par(1,2)/dio;
t1 = 1 + 1*par(1,3)/dio;
t2 = 1 + 1*par(1,4)/dio;
t3 = 10 + 20*par(1,5)/dio;
t4 = 10 + 20*par(1,6)/dio;

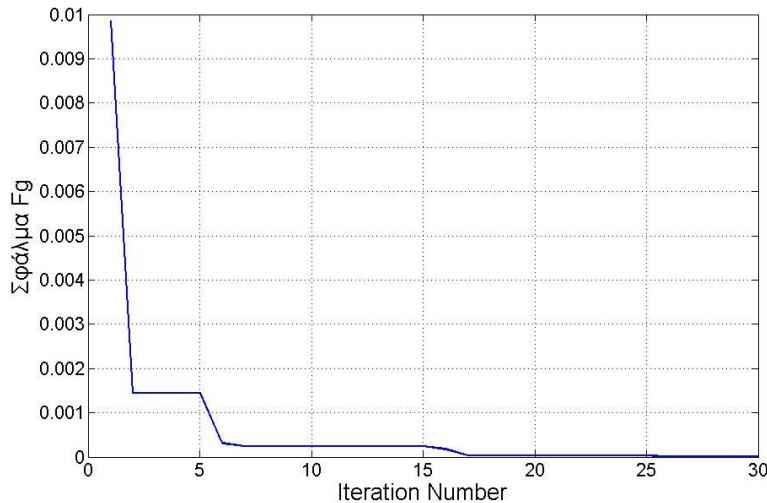
fprintf(fid,'%5d %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f\n',i,f(i),I1,I2,t1,t2,t3,t4);
i
end
fclose(fid)

figure (1)
plot(-f)
grid

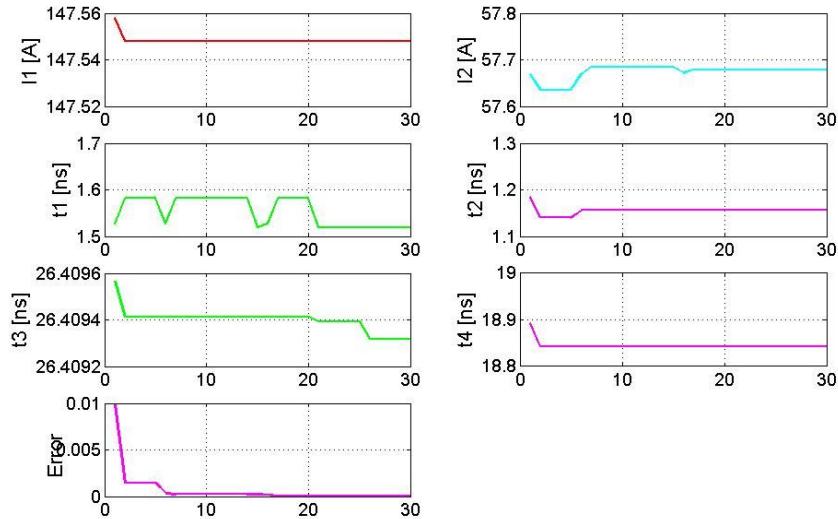
load Pavlos1.txt
P_case1=Pavlos1;
figure (2)
subplot(4,2,1)
plot(P_case1(:,3),'r')
ylabel('I1 [A]')
grid
subplot(4,2,2)
plot(P_case1(:,4),'c')
ylabel('I2 [A]')
grid
subplot(4,2,3)
plot(P_case1(:,5),'g')
ylabel('t1 [ns]')
grid
subplot(4,2,4)
plot(P_case1(:,6),'m')
ylabel('t2 [ns]')
grid
subplot(4,2,5)
plot(P_case1(:,7),'g')
ylabel('t3 [ns]')
grid
subplot(4,2,6)
plot(P_case1(:,8),'m')
ylabel('t4 [ns]')
grid
subplot(4,2,7)
plot(-P_case1(:,2),'m')
```

```
ylabel('Error ')
grid
sxima
```

B.1.1.1 Αποτελέσματα Γ.Α. για την εξίσωση (1.5)



Σχήμα Π.Β.1: Γραφική παράσταση ελαχιστοποίησης σφάλματος, για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια DITO και για συνάρτηση μέγιστου σφάλματος, όπως εξάγεται από το πρόγραμμα σε Matlab



Σχήμα Π.Β.2: Γραφικές παραστάσεις των βελτιστοποιημένων παραμέτρων της εξίσωσης (1.5), για τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια DITO και για συνάρτηση μέγιστου σφάλματος, όπως εξάγεται από το πρόγραμμα σε Matlab

Ο Γ.Α. δίνει παρόμοια αποτελέσματα και για τις υπόλοιπες εξισώσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παρατίθενται παρακάτω.

B.1.2 Κώδικας Γ.Α. για την εξίσωση (1.6)

```
% Genetic Algorithm
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
clear;
close all

PlithosGonion=20;
Bit=20;
Variables=6;
ChildrenNumber=4;
ProbMutation=0.2;
IterationNumber=30;

dio=2^Bit-1;

fid = fopen('Pavlos2.txt','w');
load Im_data.txt
Im_data=abs(Im_data);

for j=1:PlithosGonion
    FirstParents=parents(PlithosGonion, Bit, Variables);
    for i=1:1
        g=gagenia(FirstParents, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
        f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
        FirstParents=g;
    end
    j
    par(j,:)=FirstParents(1,:);
end
FirstParents=par
for i=1:IterationNumber
    g=gagenia(par, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
    f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
    par=g;

    I1 = 0 + 30*par(1,1)/dio;
    I2 = 50 + 50*par(1,2)/dio;
    t1 = 1 + 2*par(1,3)/dio;
    t2 =200 +200*par(1,4)/dio;
    s1 = 0 + 2*par(1,5)/dio;
    s2 = 50 +150*par(1,6)/dio;

    fprintf(fid,'%5d %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f\n',i,f(i),I1,I2,t1,t2,s1,s2);
    i
end

fclose(fid)
```

```

figure (1)
plot(-f)
grid

load Pavlos2.txt
P_case1=Pavlos2;
figure (2)
subplot(4,2,1)
plot(P_case1(:,3),'r')
ylabel('I1 [A]')
grid
subplot(4,2,2)
plot(P_case1(:,4),'c')
ylabel('I2 [A]')
grid
subplot(4,2,3)
plot(P_case1(:,5),'g')
ylabel('t1 [ns]')
grid
subplot(4,2,4)
plot(P_case1(:,6),'m')
ylabel('t2 [ns]')
grid
subplot(4,2,5)
plot(P_case1(:,7),'g')
ylabel('s1 [ns]')
grid
subplot(4,2,6)
plot(P_case1(:,8),'m')
ylabel('s2 [ns]')
grid
subplot(4,2,7)
plot(-P_case1(:,2),'m')
ylabel('Error ')
grid

sxima

```

B.1.3 Κώδικας Γ.Α. για την εξίσωση (1.7)

```

% Genetic Algorithm
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*((1-exp(-T/t1))^8) * exp(-T/t2) + I2*(1- exp(-T/t3))*exp(-T/t4)

clear;
close all

PlithosGonian=20;
Bit=20;
Variables=6;
ChildrenNumber=4;
ProbMutation=0.2;
IterationNumber=30;

```

```
dio=2^Bit-1;

fid = fopen('Pavlos3.txt','w');
load Im_data.txt
Im_data=abs(Im_data);

for j=1:PlithosGonion
    FirstParents=parents(PlithosGonion, Bit, Variables);
    for i=1:1
        g=gagenia(FirstParents, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
        f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
        FirstParents=g;
    end
    j
    par(j,:)=FirstParents(1,:);
end
FirstParents=par
for i=1:IterationNumber
    g=gagenia(par, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
    f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
    par=g;

    I1 = 10 + 50*par(1,1)/dio;
    I2 = 20 + 30*par(1,2)/dio;
    t1 = 0 + 1*par(1,3)/dio;
    t2 = 0 + 2*par(1,4)/dio;
    t3 = 30 + 30*par(1,5)/dio;
    t4 = 10 + 20*par(1,6)/dio;

    fprintf(fid,'%5d %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f\n',i,f(i),I1,I2,t1,t2,t3,t4);
    i
end

fclose(fid)

figure (1)
plot(-f)
grid

load Pavlos3.txt
P_case1=Pavlos3;
figure (2)
subplot(4,2,1)
plot(P_case1(:,3),'r')
ylabel('I1 [A]')
grid
subplot(4,2,2)
plot(P_case1(:,4),'c')
ylabel('I2 [A]')
grid
subplot(4,2,3)
plot(P_case1(:,5),'g')
ylabel('t1 [ns]')
grid
subplot(4,2,4)
plot(P_case1(:,6),'m')
```

```

ylabel('t2 [ns]')
grid
subplot(4,2,5)
plot(P_case1(:,7),'g')
ylabel('t3 [ns]')
grid
subplot(4,2,6)
plot(P_case1(:,8),'m')
ylabel('t4 [ns]')
grid
subplot(4,2,7)
plot(-P_case1(:,2),'m')
ylabel('Error ')
grid

```

sxima

B.1.4 Κώδικας Γ.Α. για την εξίσωση (1.8)

```

% Genetic Algorithm
% Function of I0, I1, I2,I3, t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, P, q, r, s
% I(t)=I0*((1-exp(-T/t1))^P)*exp(-T/t2) +
% I1*((1-exp(-T/t3))^q)*exp(-T/t4) + I2*((1-exp(-T/t5))^r)*exp(-T/t6)+ I3*((1-exp(-T/t7))^s)*exp(-T/t8)
clear;
close all

PlithosGonian=20;
Bit=20;
Variables=16;
ChildrenNumber=4;
ProbMutation=0.2;
IterationNumber=30;

dio=2^Bit-1;

fid = fopen('Pavlos4.txt','w');
load Im_data.txt
Im_data=abs(Im_data);

for j=1:PlithosGonian
    FirstParents=parents(PlithosGonian, Bit, Variables);
    for i=1:1
        g=gagenia(FirstParents, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
        f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
        FirstParents=g;
    end
    j
    par(j,:)=FirstParents(1,:);
end
FirstParents=par
for i=1:IterationNumber
    g=gagenia(par, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
    f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
    par=g;

```

```

I0 = 30 + 50*par(1,1)/dio;
I1 = 40 + 70*par(1,2)/dio;
I2 = 20 + 50*par(1,3)/dio;
I3 = 30 + 40*par(1,1)/dio;
t1 = 0 + 1*par(1,4)/dio;
t2 = 1 + 2*par(1,5)/dio;
t3 = 2 + 10*par(1,6)/dio;
t4 = 5 + 10*par(1,7)/dio;
t5 = 20 + 50*par(1,8)/dio;
t6 = 20 + 50*par(1,9)/dio;
t7 = 10 + 10*par(1,8)/dio;
t8 = 10 + 20*par(1,9)/dio;
P = 4 + 2*par(1,10)/dio;
q = 4 + 0*par(1,11)/dio;
r = 5 + 0*par(1,12)/dio;
s = 4 + 0*par(1,10)/dio;

fprintf(fid,'%5d %12.8f %12.8f\n',i,f(i),-I0,-I1,-I2,-I3,t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,P,q,r,s);

i
end

fclose(fid)

figure (1)
plot(-f)
grid

load Pavlos4.txt
P_case1=Pavlos4;
figure (2)
subplot(6,2,1)
plot(P_case1(:,3),'r')
ylabel('I0 [A]')
grid
subplot(6,2,2)
plot(P_case1(:,4),'c')
ylabel('I1 [A]')
grid
subplot(6,2,3)
plot(P_case1(:,5),'g')
ylabel('I2 [A]')
grid
subplot(6,2,4)
plot(P_case1(:,6),'m')
ylabel('I3 [A]')
grid
subplot(6,2,5)
plot(P_case1(:,7),'g')
ylabel('t1 [ns]')
grid
subplot(6,2,6)
plot(P_case1(:,8),'m')
ylabel('t2 [ns]')
grid

```

```

subplot(6,2,7)
plot(P_case1(:,9),'m')
ylabel('t3 [ns]')
grid
subplot(6,2,8)
plot(P_case1(:,10),'m')
ylabel('t4 [ns]')
grid
subplot(6,2,9)
plot(P_case1(:,11),'m')
ylabel('t5 [ns]')
grid
subplot(6,2,10)
plot(P_case1(:,12),'m')
ylabel('t6 [ns]')
grid
subplot(6,2,11)
plot(P_case1(:,13),'m')
ylabel('t7 [ns]')
grid
subplot(6,2,12)
plot(P_case1(:,14),'m')
ylabel('t8 [ns]')
grid
sxima

```

B.1.5 Κώδικας Γ.Α. για την εξίσωση (1.9)

```

% Genetic Algorithm
% Function of I0, I1, I2, t1, t2, t3, t4, t5, t6, P, q, r
% I(t)=I0*((1-exp(-T/t1))^P)*exp(-T/t2) +
% +I1*((1-exp(-T/t3))^q)*exp(-T/t4) + I2*((1-exp(-T/t5))^r)*exp(-T/t6)
clear;
close all

PlithosGonion=20;
Bit=20;
Variables=12;
ChildrenNumber=4;
ProbMutation=0.2;
IterationNumber=30;
dio=2^Bit-1;
fid = fopen('Pavlos5.txt','w');
load Im_data.txt
Im_data=abs(Im_data);

for j=1:PlithosGonion
    FirstParents=parents(PlithosGonion, Bit, Variables);
    for i=1:1
        g=gagenia(FirstParents, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
        f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
        FirstParents=g;
    end
    j
    par(j,:)=FirstParents(1,:);
end
FirstParents=par

```

```

for i=1:IterationNumber
g=gagenia(par, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
f(i)=gafun(g(1,:), Bit, Im_data);
par=g;

I0 = 10 + 30*par(1,1)/dio;
I1 = 50 + 100*par(1,2)/dio;
I2 = 0 + 20*par(1,3)/dio;
t1 = 0 + 1*par(4)/dio;
t2 = 2 + 2*par(5)/dio;
t3 = 10 + 40*par(6)/dio;
t4 = 5 + 10*par(7)/dio;
t5 = 5 + 10*par(8)/dio;
t6 = 50 + 100*par(9)/dio;
P = 3 + 2*par(10)/dio;
q = 2 + 0*par(11)/dio;
r = 2 + 0*par(12)/dio;
fprintf(fid,'%5d %12.8f %12.8f\n',i,f(i),I0,I1,I2,t1,t2,t3,t4,t5,t6,P,q,r);
i
end
fclose(fid)
figure (1)
plot(-f)
grid

load Pavlos5.txt
P_case1=Pavlos5;
figure (2)
subplot(4,2,1)
plot(P_case1(:,3),'r')
ylabel('I0 [A]')
grid
subplot(4,2,2)
plot(P_case1(:,4),'c')
ylabel('I1 [A]')
grid
subplot(4,2,3)
plot(P_case1(:,5),'g')
ylabel('I2 [A]')
grid
subplot(4,2,4)
plot(P_case1(:,6),'m')
ylabel('t1 [ns]')
grid
subplot(4,2,5)
plot(P_case1(:,7),'g')
ylabel('t2 [ns]')
grid
subplot(4,2,6)
plot(P_case1(:,8),'m')
ylabel('t3 [ns]')
grid
subplot(4,2,7)
plot(P_case1(:,9),'m')
ylabel('t4 [ns]')
grid
subplot(4,2,8)
plot(P_case1(:,10),'m')
ylabel('t5 [ns]')
grid
sxima

```

B.2 Συναρτήσεις που καλεί ο Γ.Α.

Η βασική συνάρτηση που καλείται από τον Γ.Α. είναι η **gafun**, η οποία είναι στην ουσία η συνάρτηση ελαχιστοποίησης του σφάλματος F_g και διαφοροποιείται για κάθε μια από τις τέσσερις συναρτήσεις σφάλματος.

B.2.1 Η gafun για το σχετικό απόλυτο σφάλμα

```
function f=gafun(p,N,Im);
% ESD reuma
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
% N is the number of bits
% f=gafun(p,N,Im)
Im=abs(Im);
dio=2^N-1;
I1 = 45 +100*p(1)/dio;
I2 = 5 + 10*p(2)/dio;
t1 = 1 + 1*p(3)/dio;
t2 = 1 + 1*p(4)/dio;
t3 = 10 + 20*p(5)/dio;
t4 = 10 + 20*p(6)/dio;
NIm=length(Im(:,1));
S=0;
if t2>0.98*t1
    S=99999;
elseif t4>0.97*t3
    S=99999;
elseif I2>0.5*I1
    S=99999;
else
    for i=1:NIm
        T=Im(i,1);
        Ic=I1*(exp(-T/t1)-exp(-T/t2))+I2*(exp(-T/t3)-exp(-T/t4));
        S=S+abs((Ic-Im(i,2))/Im(i,2));
    end
end
f=-S;
```

B.2.2 Η gafun για το σχετικό τετραγωνικό σφάλμα

```
function f=gafun(p,N,Im);
% ESD reuma
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
% N is the number of bits
% f=gafun(p,N,Im)
```

```

Im=abs(Im);
dio=2^N-1;

I1 = 45 +100*p(1)/dio;
I2 = 5 + 10*p(2)/dio;
t1 = 1 + 1*p(3)/dio;
t2 = 1 + 1*p(4)/dio;
t3 = 10 + 20*p(5)/dio;
t4 = 10 + 20*p(6)/dio;

NIm=length(Im(:,1));
S=0;
if t2>0.98*t1
    S=99999;
elseif t4>0.97*t3
    S=99999;
elseif I2>0.5*I1
    S=99999;
else
    for i=1:NIm
        T=Im(i,1);
        Ic=I1*(exp(-T/t1)-exp(-T/t2))+I2*(exp(-T/t3)-exp(-T/t4));
        S=S+((Ic-Im(i,2))/Im(i,2))^2;
    end
end

f=-S;

```

B.2.3 Η gafun για το απόλυτο σφάλμα

```

function f=gafun(p,N,Im);

% ESD reuma
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
% N is the number of bits
% f=gafun(p,N,Im)

```

```

Im=abs(Im);
dio=2^N-1;

I1 = 45 +100*p(1)/dio;
I2 = 5 + 10*p(2)/dio;
t1 = 1 + 1*p(3)/dio;
t2 = 1 + 1*p(4)/dio;
t3 = 10 + 20*p(5)/dio;
t4 = 10 + 20*p(6)/dio;

```

```

NIm=length(Im(:,1));
S=0;
if t2>0.98*t1
    S=99999;
elseif t4>0.97*t3
    S=99999;
elseif I2>0.5*I1
    S=99999;
else
    for i=1:NIm
        T=Im(i,1);
        Ic=I1*(exp(-T/t1)-exp(-T/t2))+I2*(exp(-T/t3)-exp(-T/t4));
        S=S+abs(Ic-Im(i,2));
    end
end

```

f=-S;

B.2.4 Η gafun για το μέγιστο σφάλμα

```

function f=gafun(p,N,Im);

% ESD reuma
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
% N is the number of bits
% f=gafun(p,N,Im)

Im=abs(Im);
dio=2^N-1;

I1 = 45 +100*p(1)/dio;
I2 = 5 + 10*p(2)/dio;
t1 = 1 + 1*p(3)/dio;
t2 = 1 + 1*p(4)/dio;
t3 = 10 + 20*p(5)/dio;
t4 = 10 + 20*p(6)/dio;

NIm=length(Im(:,1));
S=0;
if t2>0.98*t1
    S=99999;
elseif t4>0.97*t3
    S=99999;
elseif I2>0.5*I1
    S=99999;
else
    for i=1:NIm
        T=Im(i,1);
        Ic=I1*(exp(-T/t1)-exp(-T/t2))+I2*(exp(-T/t3)-exp(-T/t4));
        S=S+abs(Ic-Im(i,2));
    end
end

```

```
S=max(abs(Ic-Im(i,2)));
end
end
```

f=-S;

B.2.6 Η συνάρτηση parents

Η παρακάτω συνάρτηση δημιουργεί τους πρώτους γονείς του Γ.Α.

```
function p=parents(NoP,N,M);

% Parents gives the first generation.
% NoP is the Number of Parents.
% The struct of the child is M chromosome of N-bits
% p=parents(NoP,N,M)

Megisto=2^N;
for i=1:NoP
    for j=1:M
        p(i,j)=floor(Megisto*rand);
    end
end
```

B.2.7 Η συνάρτηση gagenia

Η παρακάτω συνάρτηση δημιουργεί τη νέα γενιά του Γ.Α.

```
function g=gagenia(par, Bit, Variable, ChildrenNumber, ProbMutation);

% GaGenia gives new generation.
% par is the vector of Parents.
% The struct of the child is Variable chromosomes of Bit-bits
% g=gagenia(par, Bit, Variable, ChildrenNumber, ProbMutation);

PlithosGonion=size(par,1);
goneis=ones(1, PlithosGonion);

while sum(goneis)>0
    % Selection of the first parents
    FirstGonios=floor(PlithosGonion*rand)+1;
    while goneis(FirstGonios) == 0,
        FirstGonios=FirstGonios+1;
        if FirstGonios>PlithosGonion FirstGonios=1; end;
    end
    if goneis(FirstGonios) == 1 goneis(FirstGonios) = 0; end

    % Selection of the second parents
    SecondGonios=floor(PlithosGonion*rand)+1;
```

```

while goneis(SecondGonios) == 0,
    SecondGonios = SecondGonios+1;
    if SecondGonios>PlithosGonion SecondGonios=1; end
end
if goneis(SecondGonios) == 1 goneis(SecondGonios) = 0; end

% Conversion of the Decimal data to binary data
for i=1:Variable
    par1(i,:)=ga10to2(par(FirstGonios,i),Bit);
    par2(i,:)=ga10to2(par(SecondGonios,i),Bit);
end

% Birth of a child by crossover
for c=1: ChildrenNumber
    child=crossover(par1,par2,Bit,Variable);
    if rand < ProbMutation child=mutation(child, Bit, Variable); end;
    children((2*sum(goneis))+c,:)=GA2to10(child,Bit,Variable);
end
end

g=newgen(par,children, PlithosGonion, Bit, Variable);

```

B.2.8 Η συνάρτηση sxima

Με την κλίση της συνάρτησης sxima δημιουργείται η γραφική παράσταση του Γ.Α. σε συνδυασμό με τη κυματομορφή των πειραματικών δεδομένων για κάθε μία εξίσωση ρεύματος.

```

% Calculation of current
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
% Sxima ==> plot data and calculations

load Pavlos1.txt;
N1=length(Pavlos1(:,1));

I1=Pavlos1(N1,3)
I2=Pavlos1(N1,4)
t1=Pavlos1(N1,5)
t2=Pavlos1(N1,6)
t3=Pavlos1(N1,7)
t4=Pavlos1(N1,8)

load Im_data.txt
figure (33)
plot(Im_data(:,1),Im_data(:,2),'or')
hold on
Tmin=min(Im_data(:,1));
Tmax=max(Im_data(:,1));

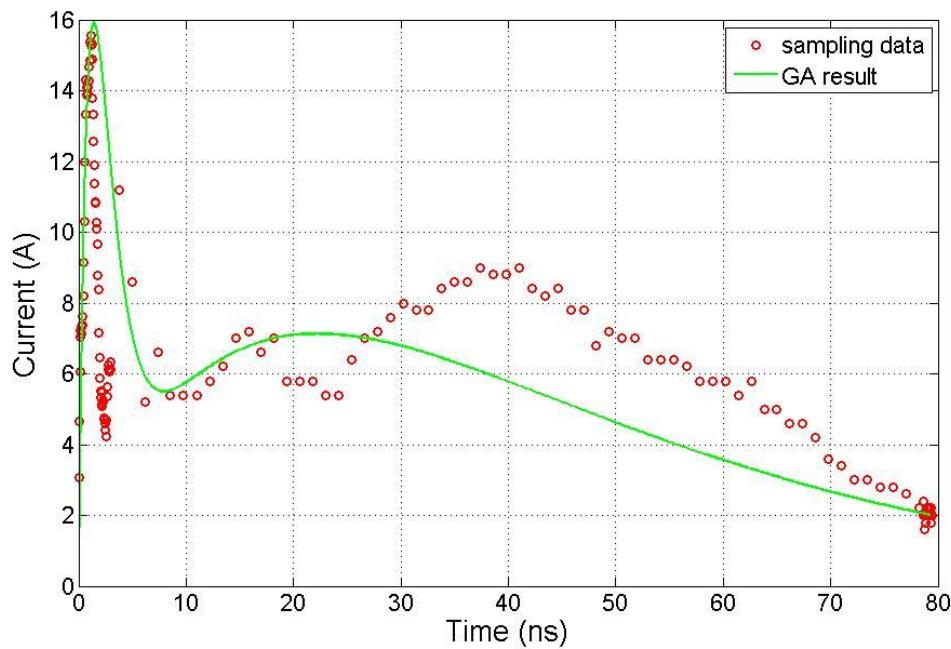
```

```

T=0.01;
j=1;
while T < Tmax,
    Tc(j)=T;
    Ic(j)=I1*(exp(-T/t1)-exp(-T/t2))+I2*(exp(-T/t3)-exp(-T/t4));
    T=T+0.2;
    j=j+1;
end
plot(Tc,Ic,'g')
grid
zoom on

```

B.2.8.1 Αποτέλεσμα της συνάρτησης sxima



Σχήμα Π.Β.3: Γραφική παράσταση του Γ.Α. και των πειραματικών δεδομένων για την εξίσωση (1.5), υπό τάση φόρτισης +4 kV, με τη γεννήτρια DITO και για συνάρτηση μέγιστου σφάλματος, όπως εξάγεται από το πρόγραμμα σε Matlab

B.2.8.2 Η συνάρτηση sxima1 – συνδυασμός εξισώσεων (1.5)-(1.9)

Με την κλήση της παρακάτω συνάρτησης δημιουργούνται τα συνδυαστικά γραφήματα (4.1)-(4.24) που παρουσιαστήκαν στο Κεφάλαιο 4.

```

% Calculation of current
% Function of I1, I2, t1, t2, t3, t4

```

```
% I(t)=I1*(exp(-t/t1)-exp(-t/t2))+I2*(exp(-t/t3)-exp(-t/t4))
% Sxima ==> plot data and calculations

load plot_2_1.txt;
N1=length(plot_2_1(:,1));

I1=plot_2_1(N1,3);
I2=plot_2_1(N1,4);
t1=plot_2_1(N1,5);
t2=plot_2_1(N1,6);
t3=plot_2_1(N1,7);
t4=plot_2_1(N1,8);

load Im_data.txt;
load start_whole_waveform.txt;
time=1e9*start_whole_waveform(:,1);
current=10*start_whole_waveform(:,2);
figure (33)
plot(time,current,'bl');
hold on;
Tmin=min(Im_data(:,1));
Tmax=max(Im_data(:,1));

T=0;
j=1;
while T < Tmax,
    Tc(j)=T;
    Ic(j)=I1*(exp(-T/t1)-exp(-T/t2))+I2*(exp(-T/t3)-exp(-T/t4));
    T=T+0.2;
    j=j+1;
end
plot(Tc,Ic,'g');
hold on;
grid
zoom on
% Calculation of current
% Function of I1, I2, t1, t2, s1, s2
% I(t)=I1*exp(-((T-t1)/s1)^2) + I2*T*exp(-((T+t2)/s2)^2)
% Sxima ==> plot data and calculations
load plot_2_2.txt;
N2=length(plot_2_2(:,1));

Ia=plot_2_2(N2,3)
Ib=plot_2_2(N2,4)
ta=plot_2_2(N2,5)
tb=plot_2_2(N2,6)
sa=plot_2_2(N2,7)
sb=plot_2_2(N2,8)

T=0;
j=1;
while T < Tmax,
    Tc(j)=T;
    Ic(j)=Ia*exp(-((T-ta)/sa)^2) + Ib*T*exp(-((T+tb)/sb)^2);
    T=T+0.2;
end;
```

```

j=j+1;
end
plot(Tc,Ic,'r');hold on;
grid
zoom on
% Calculation of current
% Function of A, B, t1, t2, s1, s2
% I(t)= I1*((1-exp(-T/t1))^8) * exp(-T/t2) + I2*(1-exp(-T/t3))*exp(-T/t4)
% Sxima ==> plot data and calculations
load plot_2_3.txt;
N3=length(plot_2_3(:,1));

IA=plot_2_3(N3,3)
IB=plot_2_3(N3,4)
tA=plot_2_3(N3,5)
tB=plot_2_3(N3,6)
tC=plot_2_3(N3,7)
tD=plot_2_3(N3,8)

T=0;
j=1;
while T < Tmax,
    Tc(j)=T;
    Ic(j)=IA*((1-exp(-T/tA))^8) * exp(-T/tB) + IB*(1- exp(-T/tC))*exp(-T/tD);
    T=T+0.2;
    j=j+1;
end
plot(Tc,Ic,'black');hold on;
grid
zoom on
% Calculation of current
% Function of A, B, t1, t2, s1, s2
% I(t)= =I0*((1-exp(-T/t1))^P)*exp(-T/t2) +
% I1*((1-exp(-T/t3))^q)*exp(-T/t4) + I2*((1-exp(-T/t5))^r)*exp(-T/t6)+ I3*((1-exp(-T/t7))^s)*exp(-T/t8)
% Sxima ==> plot data and calculations
load plot_2_4.txt;
N4=length(plot_2_4(:,1));

I_0=plot_2_4(N4,3);
I_1=plot_2_4(N4,4);
I_2=plot_2_4(N4,5);
I_3=plot_2_4(N4,6);
t_1=plot_2_4(N4,7);
t_2=plot_2_4(N4,8);
t_3=plot_2_4(N4,9);
t_4=plot_2_4(N4,10);
t_5=plot_2_4(N4,11);
t_6=plot_2_4(N4,12);
t_7=plot_2_4(N4,13);
t_8=plot_2_4(N4,14);
P1 =plot_2_4(N4,15);
q1 =plot_2_4(N4,16);
r1 =plot_2_4(N4,17);
s1 =plot_2_4(N4,18);

T=0;

```

```

j=1;
while T < Tmax,
    Tc(j)=T;
    Ic(j)=I_0*((1-exp(-T/t_1))^P1)*exp(-T/t_2) + I_1*((1-exp(-T/t_3))^q1)*exp(-T/t_4) + I_2*((1-
exp(-T/t_5))^r1)*exp(-T/t_6)+ I_3*((1-exp(-T/t_7))^s1)*exp(-T/t_8);
    T=T+0.2;
    j=j+1;
end
plot(Tc,Ic,'c')
grid
zoom on
% Calculation of current
% ESD reuma
% Function of I0, I1, I2, t1, t2, t3, t4, t5, t6, P, q, r
% I(t)=I0*((1-exp(-T/t1))^P)*exp(-T/t2) +
% I1*((1-exp(-T/t3))^q)*exp(-T/t4) + I2*((1-exp(-T/t5))^r)*exp(-T/t6)
% Sxima ==> plot data and calculations
load plot_2_5.txt;
N5=length(plot_2_5(:,1));

I0=plot_2_5(N5,3);
I_a=plot_2_5(N5,4);
I_b=plot_2_5(N5,5);
t_a=plot_2_5(N5,6);
t_b=plot_2_5(N5,7);
t_c=plot_2_5(N5,8);
t_d=plot_2_5(N5,9);
t_e=plot_2_5(N5,10);
t_f=plot_2_5(N5,11);
P =plot_2_5(N5,12);
q =plot_2_5(N5,13);
r =plot_2_5(N5,14);

T=0;
j=1;
while T < Tmax,
    Tc(j)=T;
    Ic(j)=I0*((1-exp(-T/t_a))^P)*exp(-T/t_b) + I_a*((1-exp(-T/t_c))^q)*exp(-T/t_d) + I_b*((1-exp(-
T/t_e))^r)*exp(-T/t_f);
    T=T+0.2;
    j=j+1;
end
plot(Tc,Ic,'m')
grid
zoom on

```

B.3 Η συνάρτηση διασταύρωσης (crossover) του Γ.Α.

```

function c=crossover(p1,p2,N,M);
% Crossover born a child from two parents.

```

```
% The struct of the parents is M chromosome N-bits
% c=crossover(p1,p2,N,M)
```

```
for i=1:M
    CutPosition=1+floor((N-1)*rand);
    for j=1:CutPosition
        c(i,j)=p1(i,j);
    end
    for j=CutPosition+1:N
        c(i,j)=p2(i,j);
    end
end
```

B.4 Η συνάρτηση μετάλλαξης (mutation) του Γ.Α.

```
function p=mutation(p,N,M);

% Mutation converts a bit from a child.
% The struct of the child is M chromosome of N-bits
% p=mutation(p,N,M)
```

```
PositionY=1+floor(N*rand);
PositionX=1+floor(M*rand);
if p(PositionX, PositionY)==1
    p(PositionX, PositionY)=0;
else
    p(PositionX, PositionY)=1;
End
```