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

Βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εξίσωσης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ασημακοπούλου Η. Φανή

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Γεώργιος Π. Φώτης

Αθήνα, Μάρτιος 2006

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

131

Βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εξίσωσης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ασημακοπούλου Η. Φανή

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Γεώργιος Π. Φώτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20η Μαρτίου 2006.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος	Περικλής Δ. Μπούρκας	Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2006

Στην οικογένειά μου

Της Παιδείας την μεν ρίζαν είναι πικράν,
τον δε καρπόν γλυκύν.

Ισοκράτης (436–338 π.Χ.), Απόσπασμα 19

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Ασημακοπούλου Φανής για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου 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 MATLAB και χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων των εξισώσεων του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα συνάγονται συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητα ή μη των υπό εξέταση συναρτήσεων. Επίσης, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει και προσομοίωση κυκλωματικών μοντέλων γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με την βοήθεια του προγράμματος SPICE.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρατίθενται γενικά στοιχεία που αφορούν στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του υπό εξέταση φαινομένου. Επιπρόσθετα, αναφέρονται τρόποι δημιουργίας ηλεκτροστατικής φόρτισης, καθώς και μοντέλα για την περιγραφή της.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2. Το Πρότυπο αυτό σχετίζεται με τη μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα. Επίσης, γίνεται αναφορά στο Πρότυπο ANSI C63.16.1993, που αποτελεί την αντίστοιχη έκδοση του IEC 61000-4-2 σύμφωνα με τα Αμερικανικά Πρότυπα, και παρουσιάζονται οι κύριες διαφορές τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρατίθεται αναλυτικά και με φωτογραφικό υλικό η πειραματική διάταξη, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός, που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται εισαγωγή στην έννοια και λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων, ενώ αναλύεται η ανάγκη εύρεσης μιας αναλυτικής εξίσωσης για την περιγραφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και παρουσιάζονται οι εξισώσεις, των οποίων η καταλληλότητα θα εξεταστεί. Ακολούθως, αναλύεται ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του MATLAB και πώς εφαρμόζεται στα πειραματικά δεδομένα.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου και παρατίθενται σε κοινά διαγράμματα οι μεταξύ τους συγκρίσεις. Ακολουθούν συμπεράσματα.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται προσομοίωση με τη βοήθεια του προγράμματος SPICE των προταθέντων μοντέλων για την περιγραφή του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ακολουθούμενη από σύγκρισή τους. Ακόμα γίνεται εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή 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 Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τη συμπαράστασή του και το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που μου παρείχε.
Τον κ. Γεώργιο Π. Φώτη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράστασή του, καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μελέτης.
Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα 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.

Την κυρία Νικολέττα Ηλία υπεύθυνη ποιότητας του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την βοήθεια που παρείχε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τον κ. Χρήστο Ηλία για την τεχνική υποστήριξη στη διεξαγωγή του πειράματος.

Τέλος, δε θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των εξισώσεων που περιγράφουν το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τη βοήθεια γενετικών αλγορίθμων. Διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων και των κυματομορφών που περιγράφονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2 καθιστούν απαραίτητη την εύρεση μιας κατάλληλης εξίσωσης που να περιγράφει με επαρκή ακρίβεια το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του MATLAB και χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων τεσσάρων προτεινόμενων εξισώσεων του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο γενετικός αλγόριθμος έχει σαν είσοδο πραγματικά δεδομένα ρεύματος εκφόρτισης τα οποία χρησιμοποιεί για να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους των εξισώσεων. Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα συνάγονται συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητα ή μη των υπό εξέταση συναρτήσεων.

Επίσης, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει και προσομοίωση κυκλωματικών μοντέλων γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με την βοήθεια του προγράμματος SPICE.

Λέξεις κλειδιά

Βελτιστοποίηση, γενετικός αλγόριθμος, γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, εξισώσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, προσομοίωση, Πρότυπο IEC 61000-4-2, ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Abstract

This diploma thesis attempts to investigate the discharge current equations during an electrostatic discharge using genetic algorithms. The development of an accurate equation, which describes the electrostatic discharge current is complementary due to aberrations between simulations and the waveform described in the Standard. The genetic algorithm, which was developed using MATLAB, was used for the optimization of the equation's parameters of the ESD current and has as input data real measurements of the discharge current produced by an electrostatic discharge generator. Comparing the results of the equations, the most suitable equation for the discharge current derives.

Also, a SPICE simulation was carried out for different electrostatic discharge models of the ESD generator.

Key words

Discharge current equations, electrostatic discharge (ESD), electrostatic discharge current, ESD generators, genetic algorithm, IEC 61000-4-2, optimization, simulation.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.1 Γενικά για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό τη δυνατότητα 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 σε κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων περίπου πριν από έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι στα επόμενα χρόνια θα προκαλέσει μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας.

Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξή τους. Σύμφωνα με το IEEE [1]:

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

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να δοθούν οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

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

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 μιας ηλεκτρικής διαταραχής.

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

Στάθμη Ατρωσίας (Immunity Level) είναι η μέγιστη στάθμη μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία η διάταξη, η συσκευή ή το σύστημα 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 του ίδιου του μέσου διάδοσης.

Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, είναι σημαντικό να έχει στο νου του ότι θα 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, λοιπόν, η συχνότητα και το μέγεθος του συστήματος παίζουν σημαντικό ρόλο.

1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

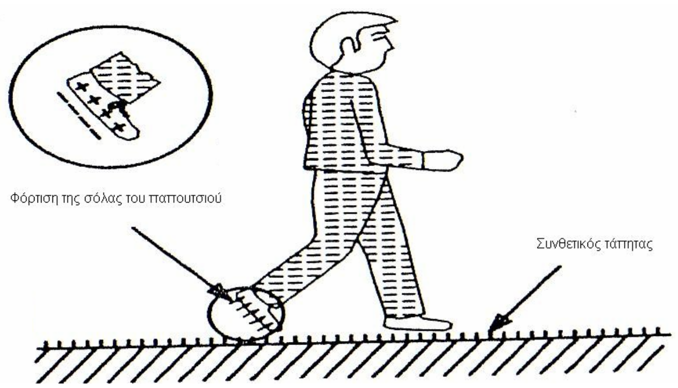
Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο, ενώ βρίσκονται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό), συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [1], [2]. Ο δεύτερος 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 φορτίζεται αρνητικά. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25kV, 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.

Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.

Η τριβοηλεκτρική σειρά γενικά δεν προλέγει τη σωστή πολικότητα της φόρτισης που παρατηρείται σε κάθε περίπτωση. Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβοηλεκτρική σειρά του Πίνακα 1.1 που ακολουθεί, όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).



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

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

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 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). Επιβλαβείς τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν ακόμα και για 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 παράγονται από διαφορετικά γεγονότα, φαίνονται στον Πίνακα 1.3. Γενικά, είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ	
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ
Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάιλον Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο Ατσάλι	Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξείδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά

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

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

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

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)

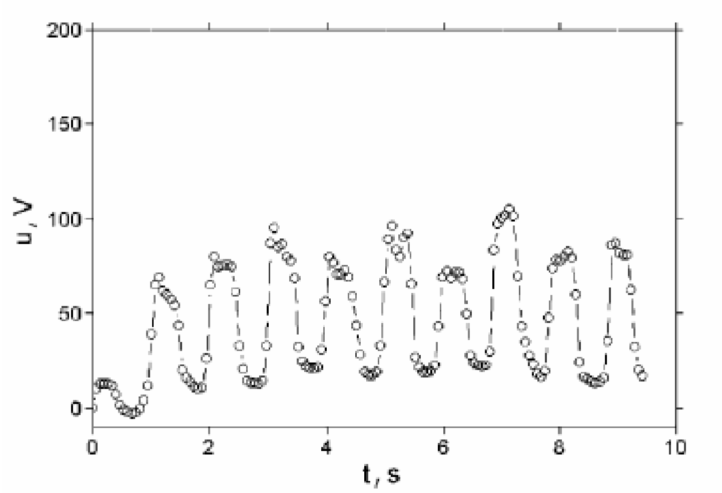
Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [3],[4] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι, συνήθως, καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

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

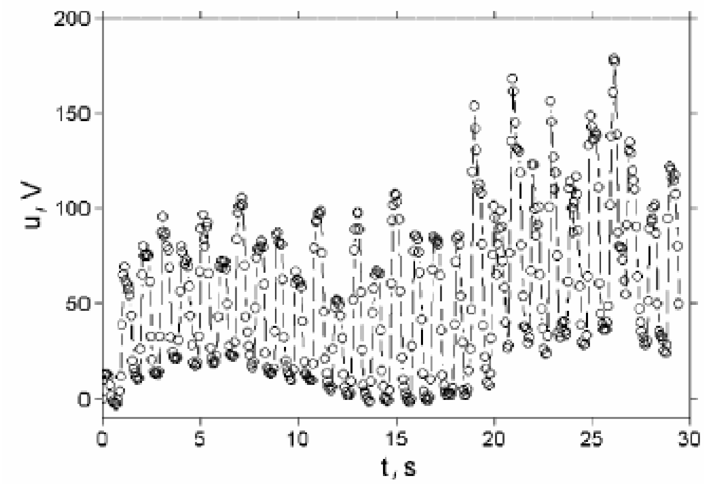
1.2.1.1 Φόρτιση του ανθρώπινου σώματος κατά το περπάτημα

1.2.1.1.1 Μοντέλο του ανθρώπινου δυναμικού

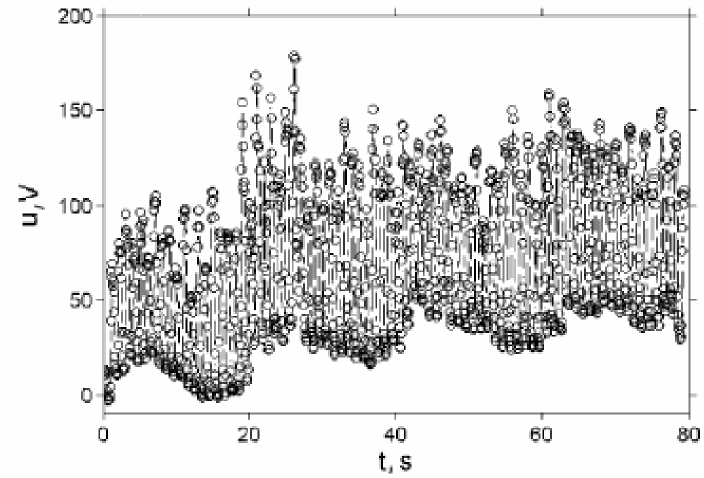
Το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται κατά το περπάτημα πάνω σε δάπεδα υψηλής αντίστασης [5]. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες το δυναμικό του σώματος μπορεί να λάβει σημαντικές τιμές και να φτάσει ακόμα και σε τιμές των kV. Στα Σχήματα 1.2-1.5 φαίνεται η αύξηση του δυναμικού ενός ανθρώπου που περπάτησε πάνω σε δάπεδο από PVC με παπούτσια με λαστιχένιες σόλες. Η διάρκεια φόρτισης των 160 βημάτων σχεδιάστηκε για τέσσερις διαφορετικές φάσεις έτσι ώστε τα Σχήματα 1.2-1.5 να αντιστοιχούν στα 10, 30, 80 και 160 βήματα.



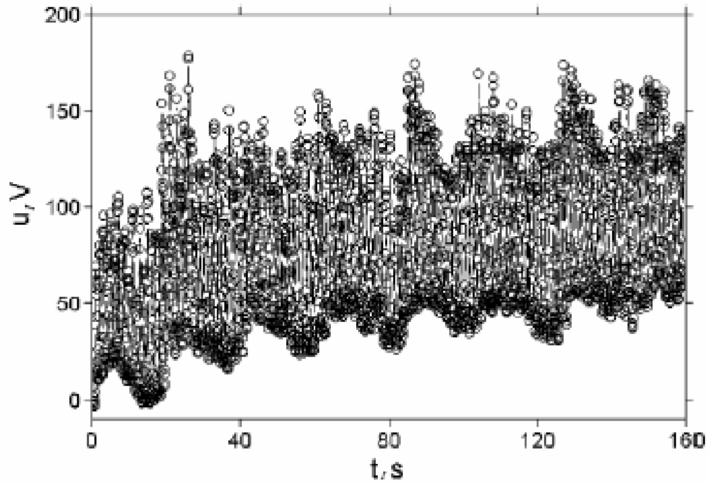
Σχήμα 1.2: Δυναμικό μετά από 10 βήματα (λαστιχένια παπούτσια-δάπεδο PVC, κανονικό περπάτημα)[5]



Σχήμα 1.3: Δυναμικό μετά από 30 βήματα (λαστιχένια παπούτσια-δάπεδο PVC, κανονικό περπάτημα)[5]



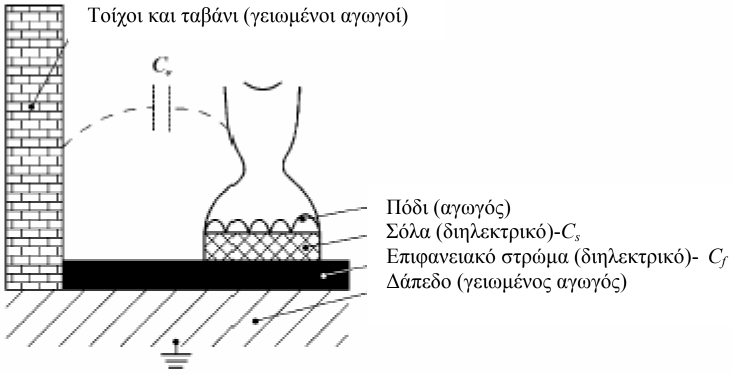
Σχήμα 1.4: Δυναμικό μετά από 80 βήματα (λαστιχένια παπούτσια-δάπεδο PVC, κανονικό περπάτημα)[5]



Σχήμα 1.5: Δυναμικό μετά από 160 βήματα (λαστιχένια παπούτσια-δάπεδο PVC, κανονικό περπάτημα)[5]

Με τη βοήθεια αυτών των Σχημάτων παρατηρούμε την σταδιακή αύξηση του δυναμικού του ανθρώπου. Στο Σχήμα 1.2, που αντιστοιχεί στα 10 πρώτα βήματα, παρατηρείται μια περιοδική αυξομείωση του δυναμικού. Αυτές οι εναλλαγές έχουν συχνότητα 1Hz που είναι ακριβώς ίδια με τη συχνότητα που ο άνθρωπος περπατά. Τα τοπικά μέγιστα της καμπύλης δυναμικού αντιστοιχούν σε εκείνες τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το πόδι βρίσκεται στο μέγιστο ύψος από το έδαφος. Βέβαια οι τιμές των μεγίστων διαφέρουν ελάχιστα εφόσον ο άνθρωπος που περπατά δεν διατηρεί ακριβώς την ίδια συχνότητα ούτε το ύψος του βήματός του. Αναλύοντας τα Σχήματα 1.3-1.5, παρατηρούμε ότι το περιοδικά ταλαντευόμενο δυναμικό λαμβάνει στο σύνολό του μεγαλύτερες τιμές. Η περιβάλλουσα προσομοιάζει στην εκθετική χαρακτηριστική φορτιζόμενου πυκνωτή.

Ας υποθέσουμε ότι μεταξύ του πέλματος του ανθρώπου και του γειωμένου εδάφους υπάρχουν δύο διηλεκτρικά στρώματα υψηλής αντίστασης: η σόλα του παπουτσιού (π.χ. λάστιχο) και η επιφάνεια του δαπέδου (π.χ. PVC), Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Σχηματική παράσταση των αλληλεπιδράσεων του ανθρώπινου σώματος με το γειωμένο δάπεδο[5]

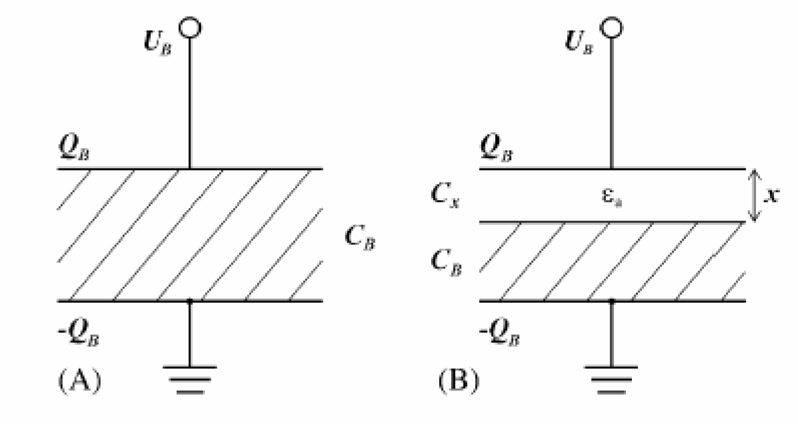
Τότε, η χωρητικότητα C_{sf} του πέλματος σε σχέση με το δάπεδο θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η χωρητικότητα δύο εν σειρά πυκνωτών, ενός πρώτου που αντιστοιχεί στη σόλα (C_s) και ενός δευτέρου, που αντιστοιχεί στο επιφανειακό στρώμα του δαπέδου (C_f). Δηλαδή:

$$C_{sf} = \frac{C_s \cdot C_f}{C_s + C_f}, \text{ όπου συνήθως } C_s << C_f \Rightarrow C_{sf} \approx C_s \qquad (1.1)$$

Εκτός από τη χωρητικότητα του πέλματος υπάρχει επίσης και η χωρητικότητα C_0 του υπόλοιπου σώματος σε σχέση με τα γειτονικά γειωμένα αντικείμενα (τοίχοι, ταβάνι, θερμαντικά σώματα, κ.ά.). Έτσι η χωρητικότητα C_B ολόκληρου ακίνητου ανθρώπινου σώματος πάνω σε γειωμένο δάπεδο και δίπλα σε γειωμένα αντικείμενα μπορεί να προσομοιωθεί από δύο εν παραλλήλω συνδεδεμένους πυκνωτές (C_0, C_{sf}):

$$C_B = C_0 + C_{sf} \tag{1.2}$$

Στο Σχήμα 1.7α φαίνεται η C_B ως η χωρητικότητα ενός πυκνωτή παραλλήλων επίπεδων πλακών, του οποίου ο κάτω οπλισμός του είναι γειωμένος και ο πάνω οπλισμός του αντιπροσωπεύει το ανθρώπινο σώμα ενός ανθρώπου, που στέκεται δημιουργώντας το δυναμικό U_B.



Σχήμα 1.7: Αναπαράσταση του ανθρώπινου σώματος ως πυκνωτή παραλλήλων πλακών C_B [5]

Οι δύο οπλισμοί διαχωρίζονται με διηλεκτρικό και το ηλεκτρικό δυναμικό μετράται σε σχέση με το δυναμικό του κάτω οπλισμού.

Όταν ο άνθρωπος αρχίσει να περπατά, σηκώνει εναλλάξ τα πέλματά του, που έχουν συγκεκριμένη επιφάνεια S, σε ορισμένο ύψος από το έδαφος x (Σχήμα 1.7β). Σε αυτήν την περίπτωση, ένα κενό αέρα με διηλεκτρική επιτρεπτότητα ε_a δημιουργείται μεταξύ της σόλας και του δαπέδου, που αντιστοιχεί σε εν σειρά σύνδεση του πυκνωτή C_B με τον C_x και έτσι η συνολική χωρητικότητα του σώματος ορίζεται ως εξής:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_x}, \quad C_x = \varepsilon_a \frac{S}{x} \tag{1.3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_B} + \frac{x}{\varepsilon_a S} \tag{1.4}$$

Τότε, το δυναμικό του σώματος θα δίνεται από τον τύπο:

$$U_B = \frac{Q_B}{C} = Q_B\left(\frac{1}{C_B} + \frac{x}{\varepsilon_a S}\right) \tag{1.5}$$

όπου Q_B είναι η άμεση φόρτιση του σώματος του ανθρώπου.

Η χωρητικότητα C_B αλλάζει πολύ λιγότερο απ' ότι η χωρητικότητα C_x κατά το περπάτημα και γι' αυτό μπορούμε, προσεγγιστικά, να τη θεωρήσουμε σταθερή. Μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος, το φορτίο Q_B αυξάνει κατά μία ποσότητα ΔQ_B ως αποτέλεσμα του αποχωρισμού των φορτίων μεταξύ της σόλας και του δαπέδου, που σημαίνει ότι το Q_B μεταβάλλεται βηματικά. Για μία μεγαλύτερη διάρκεια περπατήματος με μία αρκετά υψηλή συχνότητα f, αυτή η βηματική συνάρτηση μπορεί να αντικατασταθεί από μία συνεχή συνάρτηση του χρόνου $Q_B(t)$. Ωστόσο, η φόρτιση του σώματος του ανθρώπου που περπατάει συνοδεύεται από μία εκφόρτισή του, η οποία οφείλεται στην ουδετεροποίηση (ανασύνδεση) λόγω των ιόντων του αέρα και κυρίως λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος που κατευθύνεται από τις σόλες και το δάπεδο στο έδαφος. Πειράματα καταδεικνύουν ότι η καμπύλη φόρτισης προσομοιάζει μία εκθετική συνάρτηση, η οποία πλησιάζει την κορεσμένη τιμή Q_{0B}, οπότε η ταχύτητα φόρτισης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{dQ_B(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_0}\left[Q_{0B} - Q_B(t)\right] - \frac{1}{\tau_r}Q_B(t) - \frac{1}{RC_B}Q_B(t) \tag{1.6}$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ταχύτητα φόρτισης με μία σταθερά χρόνου τ_0, ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την αποσβεννύμενη ανασύνδεση με μία σταθερά χρόνου τ_r και ο τελευταίος όρος αντιπροσωπεύει τη χαλάρωση με μία σταθερά χρόνου RC_B και η οποία οφείλεται στο ρεύμα διαρροής δια μέσου της σόλας και της επιφάνειας του δαπέδου και δια μέσου του ατμοσφαιρικού αέρα και δομικών στοιχείων του κτηρίου (τοίχοι). R είναι η συνολική αντίσταση των σολών, του δαπέδου και του περιβάλλοντος γύρω από τον άνθρωπο που περπατά, για παράδειγμα, είναι η αντίσταση που μετράται μεταξύ του εδάφους και του ανθρώπου που στέκεται ακίνητος στο δάπεδο.

Επιλύοντας την εξίσωση (1.6) προκύπτει:

$$Q_B(t) = \frac{Q_{0B}}{1 + \tau_0(1/\tau_r + 1/RC_B)}(1 - e^{-t/\tau}) \tag{1.7}$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{RC_B} \tag{1.8}$$

Εισάγοντας την (1.7) στην (1.5) προκύπτει η εξίσωση του δυναμικού του σώματος ως συνάρτηση του χρόνου:

$$U_B(t) = U_{0B}(1 - e^{-t/\tau})\left[1 + \frac{C_B}{\varepsilon_a S}x\right] \tag{1.9}$$

$$U_{0B} = \frac{Q_{0B}}{C_B[1 + \tau_0(1/\tau_r + 1/RC_B)]} \tag{1.10}$$

όπου U_{0B} είναι η κορεσμένη τιμή του δυναμικού του σώματος σε σχέση με το έδαφος. Η καμπύλη φόρτισης παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$u(t) = U_{0B}(1 - e^{-t/\tau}) \tag{1.11}$$

Προκειμένου να λάβουμε μία ακριβή συνάρτηση του δυναμικού του σώματος $U_B(t)$ με το χρόνο, το μεταβλητό ύψος x πρέπει να εκφραστεί και αυτό σα συνάρτηση του χρόνου $x(t)$. Κατά τη διάρκεια ενός κανονικού βαδίσματος το ύψος $x(t)$ των βημάτων μεταβάλλεται περιοδικά με μία περίοδο $T=1/f$, για παράδειγμα με μία γωνιακή συχνότητα $\omega=2\pi f$. Μία ημιτονοειδής προσέγγιση για το $x(t)$,

$$x = \frac{x_0}{2}(1 - \cos\omega t) \tag{1.12}$$

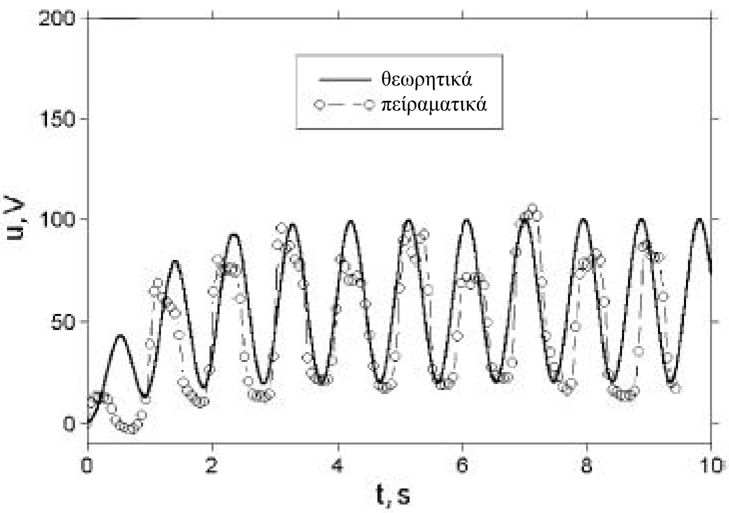
(όπου x_0 το μέγιστο ύψος των βημάτων) συνδυαζόμενη με την εξίσωση (1.9) δίνει:

$$U_B(t) = U_{0B}(1 - e^{-t/\tau})\left[1 + A[1 - \cos(2\pi f t)]\right] \tag{1.13}$$

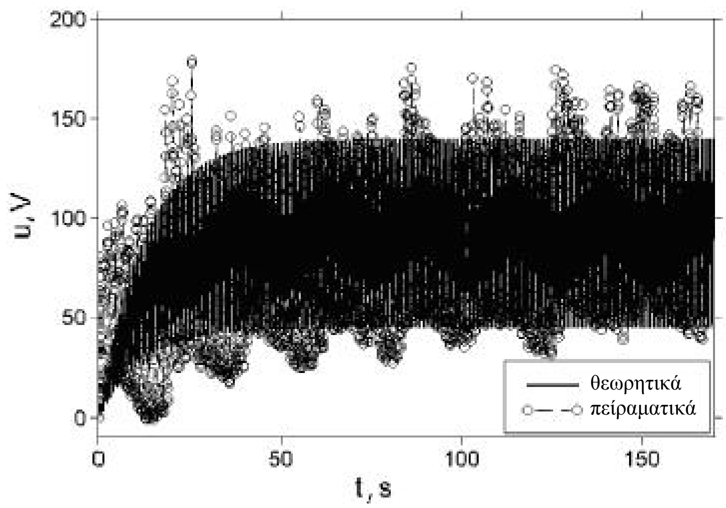
$$A = \frac{C_B}{2\varepsilon_a S} = \frac{C_B}{C_{x_0/2}}, \quad C_{x_o/2} = \varepsilon_a \frac{S}{(x_0/2)} \tag{1.14}$$

όπου A η αναλογία της χωρητικότητας του σώματος C_B προς τη χωρητικότητα $C_{\chi 0/2}$ του ποδιού υψωμένη στο μισό του ύψους του βήματος x_0. Ο λόγος A, λοιπόν, εξαρτάται μεταξύ των άλλων και από την τιμή του ύψους x_0 των βημάτων. Σύμφωνα με την εξίσωση (1.10), η κορεσμένη τιμή του δυναμικού του σώματος U_{0B} εξαρτάται τόσο από τη χωρητικότητα C_B του σώματος όσο και από την αντίσταση R του περιβάλλοντος του ανθρώπου που περπατά. Ωστόσο, τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα οι σόλες και το δάπεδο μπορούν να συνεισφέρουν αρκετά στην τιμή του R. Όσο μικρότερο είναι το γινόμενο RC_B τόσο μικρότερη είναι και η κορεσμένη τιμή του δυναμικού που επιβάλλεται στον άνθρωπο που περπατά. Αυτή μάλιστα είναι η αρχή με βάση την οποία κατασκευάζονται τα αντιστατικά δάπεδα ($\lim_{R\to\infty} U_{0B} = U_0/(1 + \tau_0/\tau_r)$).

Η εξίσωση (1.13) αντιπροσωπεύει μία μοντελοποιημένη καμπύλη του δυναμικού του σώματος. Δεδομένου ότι αποτελεί απόρροια θεωρητικών συλλογισμών είναι επιθυμητή η πειραματική επιβεβαίωση. Γι' αυτό το σκοπό η μοντελοποιημένη καμπύλη (1.13) προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα που φαίνονται στα Σχήματα 1.2 έως 1.5. Το αποτέλεσμα αυτής της προσαρμογής φαίνεται στα σχήματα 1.8 και 1.9.



Σχήμα 1.8: Καμπύλη ανθρώπινου δυναμικού από την εφαρμογή του μοντέλου μαζί με τα πειραματικά δεδομένα για τα πρώτα 10 βήματα [5]



Σχήμα 1.9: Καμπύλη ανθρώπινου δυναμικού από την εφαρμογή του μοντέλου μαζί με τα πειραματικά δεδομένα για 160 βήματα [5]

$(U_B = 47V, \quad \tau = 12s, \quad A = 1{,}05, \quad f = 50Hz)$

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει συμφωνία μεταξύ της θεωρητικής και της πειραματικής καμπύλης. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι το προταθέν μοντέλο λαμβάνει υπ' όψιν του όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά, τα οποία συμμετέχουν στην υπό μελέτη διαδικασία φόρτισης. Όπως είναι φυσικό, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπ' όψιν του μικρές μεταβολές στη χωρητικότητα όταν ο άνθρωπος που περπατά πλησιάζει τοίχους ή άλλα γειωμένα αντικείμενα στο δωμάτιο. Προκειμένου να ληφθούν υπ' όψιν τέτοιες αλλαγές, αρκεί να εκφραστεί η C_B ως συνάρτηση του χρόνου $C_B(t)$ κατ' αναλογία προς την C_χ η οποία εκφράστηκε σαν αρμονική συνάρτηση του χρόνου $C_x(t)$. Στην πραγματικότητα αυτό δεν θα ήταν καθόλου επιθυμητό διότι μία δεδομένη έκφραση για το $C_B(t)$ δεν θα διατηρούσε τις ιδιότητές του, όπως το $C_x(t)$, καθόσον θα άλλαζε τιμή από δωμάτιο σε δωμάτιο και για κάθε διαφορετική κατεύθυνση βαδίσματος. Παρ' όλα αυτά, εκτός από διακυμάνσεις της καμπύλης φόρτισης, αποκλίσεις στο ρυθμό βαδίσματος και στο ύψος των βημάτων, το μοντέλο συμφωνεί αρκετά ικανοποιητικά με τα πειραματικά δεδομένα. Είναι, λοιπόν, ασφαλές να συμπεράνουμε ότι το προταθέν μοντέλο για το δυναμικό του σώματος περιγράφει σωστά τον βασικό μηχανισμό της ηλέκτρισης, που εμφανίζεται όταν περπατάμε σε δάπεδα με υψηλή αντίσταση.

1.2.1.1.2 Δυναμικό σώματος και ηλεκτροστατικές μικροεκφορτίσεις

Το μοντέλο του δυναμικού του σώματος εξήγησε το φυσικό υπόβαθρο του ταλαντευόμενου εύρους του δυναμικού, που εκτείνεται σε ένα τεράστιο διάστημα τιμών. Σε αυτό το σημείο ανακύπτει το ερώτημα κατά πόσο η τιμή του ανθρώπινου δυναμικού είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να προκαλέσει μικροεκφορτίσεις στο διάκενο ανάμεσα στη σόλα και στην επιφάνεια του δαπέδου, όπου λαμβάνει χώρα ο αρχικός διαχωρισμός των φορτίων.

Το προταθέν μοντέλο του ανθρώπινου δυναμικού προσδιόρισε μία τιμή δυναμικού U_g στο κενό ανάμεσα στη σόλα και στο δάπεδο χρησιμοποιώντας την κορεσμένη τιμή του δυναμικού του σώματος U_{0B} σύμφωνα με τη σχέση (βλ. εξ. (1.9)):

$$U_g(t) = \frac{U_{0B} C_B}{\varepsilon_a S}(1 - e^{-t/\tau}) x(t) = U_{0B}\frac{C_B}{C_x}(1 - e^{-t/\tau}) \qquad (1.15)$$

$$x(t) = \frac{x_0}{2}[1 - \cos(2\pi f t)] \qquad (1.16)$$

Μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό βημάτων, για παράδειγμα μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, το δυναμικό διακένου $U_g(t)$ προσεγγίζει την κορεσμένη του τιμή $U_g^*(t)$:

$$U_g^*(t) = \lim_{t\to\infty} U_g(t) = \frac{U_{0B} C_B}{\varepsilon_a S} x(t) \tag{1.17}$$

Η κορεσμένη τιμή της τάσης διακένου $U_g^*(t)$ μπορεί να θεωρηθεί σαν μία ποσότητα εξαρτώμενη από το ύψος x:

$$U_g^*(x) = \frac{U_{0B} C_B}{\varepsilon_a S} x \tag{1.18}$$

Οποτεδήποτε οι μικροεκφορτίσεις [6]-[8] λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στη σόλα και στο έδαφος, η κορεσμένη τιμή της τάσης διακένου $U_g^*(x)$ θα ισούται με την τάση Paschen $U_p(x)$. Αυτή η τάση μπορεί να προσδιοριστεί από την καμπύλη του Paschen [14]-[16] ή από την ακόλουθη αναλυτική προσέγγιση της καμπύλης:

$$U_p(x) = \frac{K_1 p x}{\ln[K_2 p x / \ln(1 + 1/\gamma)]} \tag{1.19}$$

όπου K_1=273,8V/(Pa·m), K_2=10,98(Pa·m)$^{-1}$, $\gamma\approx 0{,}025$, p: η ατμοσφαιρική πίεση. Προκειμένου να εμφανιστούν μικροεφορτίσεις Paschen πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση:

$$U_g^*(x_1) = U_p(x_1) \tag{1.20}$$

Εισάγοντας την τάση διακένου (1.18) και τη τάση Paschen (1.19) στην (1.20) προκύπτει:

$$\ln x_1 = \frac{K_1 p \varepsilon_a S}{U_{0B} C_B} + \ln\left[\frac{\ln(1 + 1/\gamma)}{K_2 p}\right] \tag{1.21}$$

Επιστρέφοντας στην εξίσωση (1.18) μπορεί να προσδιοριστεί η κρίσιμη τιμή U_{gp}^* της τάσης διακένου:

$$\ln U_{gp}^* = \ln\frac{U_{0B} C_B}{\varepsilon_a S} + \frac{K_1 p \varepsilon_a S}{U_{0B} C_B} + \ln\left[\frac{\ln(1 + 1/\gamma)}{K_2 p}\right] \tag{1.22}$$

$$U_{gp}^* = \frac{U_{0B} C_B \ln(1 + 1/\gamma)}{\varepsilon_a K_2 p S} \exp\left[\frac{K_1 p \varepsilon_a S}{U_{0B} C_B}\right] \tag{1.23}$$

Η κρίσιμη τιμή της τάσης εξαρτάται μεταξύ άλλων από το κορεσμένο δυναμικό σώματος U_{0B}. Αναζητώντας το ελάχιστο κορεσμένο δυναμικό σώματος, το οποίο θα εξασφάλιζε εκφόρτιση Paschen υπολογίζουμε το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης:

$$\frac{dU_{gp}^{*}(U_{0B})}{dU_{0B}}\Big|_{U_{0B}^{*}}=0 \tag{1.24}$$

$$U_{0B}^{*}=\frac{K_1\varepsilon_a pS}{C_B} \tag{1.25}$$

όπου U_{0B}^{*} είναι το ελάχιστο δυναμικό σώματος που εξασφαλίζει ελάχιστη τιμή τάσης Paschen στο διάκενο αέρος μεταξύ της σόλας και του δαπέδου. Χρησιμοποιώντας τυπικές τιμές K_1=273,8V/(Pa·m), ε_a=8,859×10^{-12}F·m^{-1}, p=101,325Pa, s=215×10^{-4}m^2 και $C_B\in$(20,200)×10^{-12}F το εύρος του ελάχιστου δυναμικού σώματος U_{0B}^{*} είναι:

$$U_{0B}^{*}\in(26{,}421,\ 264{,}21)\ \mathrm{kV} \tag{1.26}$$

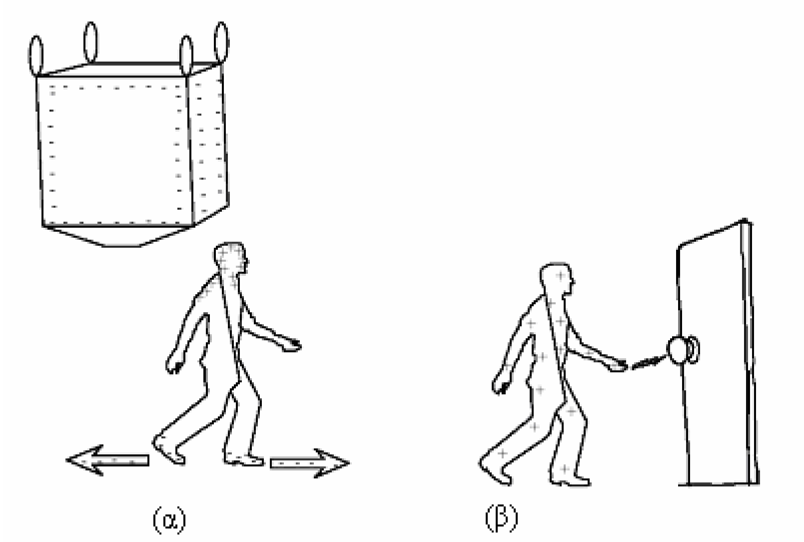
Όπως βλέπουμε από την (1.26), το ελάχιστο δυναμικό σώματος που μπορεί να προκαλέσει εκφόρτιση Paschen υπερβαίνει τα 26kV και είναι δύσκολο να επιτευχθεί με τα περισσότερα αντιστατικά δάπεδα. Γι’ αυτό το λόγο, οι μικροεκφορτίσεις Paschen στις σόλες είναι πολύ δύσκολο να παρατηρηθούν. Παρ’ όλα αυτά θα πρέπει να τονιστεί ότι η τάση Paschen είναι ένα όριο για τη μετάβαση σε αυτοδιατηρούμενη εκφόρτιση. Υπάρχουν, ωστόσο, μικροεκφορτίσεις που έχουν χαμηλή τάση έναρξης. Για παράδειγμα, το φαινόμενο χιονοστιβάδας κατά Townsend μπορεί να εμφανιστεί σε τάσεις κάτω από τις τάσεις Paschen, αλλά ούτε αυτό είναι παρατηρήσιμο.

Μια αρκετά διαφορετική κατάσταση συμβαίνει όταν ένας φορτισμένος άνθρωπος που περπατά πλησιάσει ένα γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο με ένα ακάλυπτο τμήμα του σώματός του. Σε μια τέτοια περίπτωση, ολόκληρη η τάση του σώματος θα επιβληθεί στο κενό αέρος και αν η τάση φτάσει σε τιμές εκατοντάδων Volts θα αναπτυχθούν ορατά streamers σε αντίθεση με τα κενά κάτω από τις σόλες. Αυτό συμβαίνει διότι με το κενό κάτω από τη σόλα, η τάση του σώματος χωρίζεται σε τρία τμήματα: το ένα τμήμα επιβάλλεται στη σόλα (η σόλα είναι η πρώτη αντίσταση), το δεύτερο τμήμα επιβάλλεται στην επιφάνεια το δαπέδου (η επιφάνεια του δαπέδου είναι η δεύτερη αντίσταση) και μόνο το τρίτο τμήμα επιβάλλεται στο διάκενο του αέρα. Η σόλα, η επιφάνεια του δαπέδου και το διάκενο αέρα αντιπροσωπεύουν έναν καταμεριστή τάσης, που χειροτερεύει τις συνθήκες έναρξης ορατών μικροεκφορτίσεων κάτω από τις σόλες.

1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο [9], 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 είτε μακριά από το φορτισμένο σώμα. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της 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 1.10 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 την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10β.



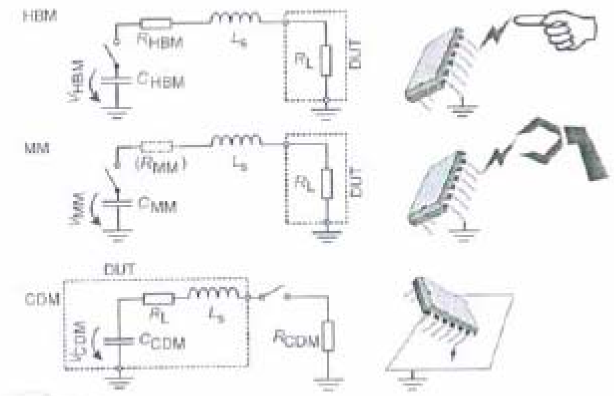
Σχήμα 1.10: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

1.3 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.3.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση, που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2], [10], [11]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρώπινου 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 1.11. Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα.



Σχήμα 1.11: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [10]

Θεωρώντας R_{ESD} τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης R_L της υπό εξέτασης συσκευής (Device Under Test, DUT), C_{ESD} την χωρητικότητα του πυκνωτή, ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_{ESD} και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης, η διαφορική εξίσωση $2^{ας}$ τάξης που ισχύει είναι:

$$L_S \frac{d^2 i}{dt} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0 \tag{1.27}$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\, t),\ \gamma\iota\alpha\ \alpha > \omega_0 \quad (1.28)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}\, t),\ \gamma\iota\alpha\ \alpha < \omega_0 \quad (1.29)$$

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

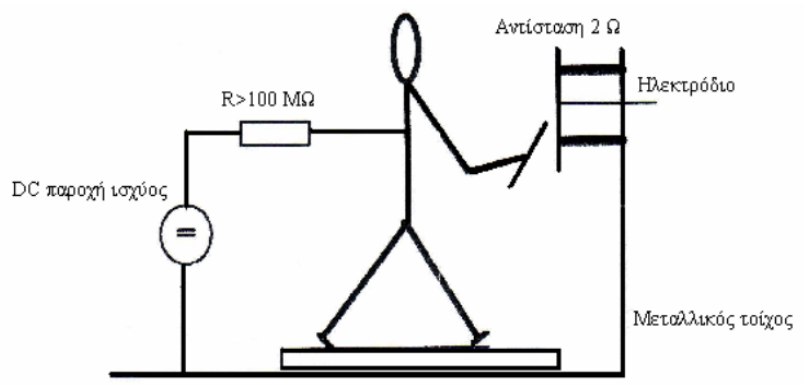
Παραδείγματα για τις τυπικές παραμέτρους και των τριών μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
V_{ESD}	4000 V	200 V	500 V
$R_{HBM} / R_{MM} / R_{CDM}$	1,5 kΩ	5 Ω	10 Ω
C_{ESD}	100 pF	200 pF	10 pF
L_S	500 nH	750 nH	750 nH
R_L	10Ω		
I_{ESD}	2,6 A	2,8 A	10,4 A
$t_{rise}(10\%/90\%)$	≈ 7 ns	≈ 11 ns	≈ 0,3 ns
A	$1{,}5 \times 10^8 s^{-1}$	$0{,}1 \times 10^8 s^{-1}$	$10 \times 10^8 s^{-1}$
ω_O	$0{,}5 \times 10^8 s^{-1}$	$0{,}8 \times 10^8 s^{-1}$	$30 \times 10^8 s^{-1}$
FWHM	≈ 120 ns	≈ 26 ns	≈ 0,7ns

Πίνακας 1.4 : Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης[10]

1.3.2 Αξιολόγηση του μοντέλου ανθρώπινου σώματος

Από πολλές μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικούς ανθρώπους [12] είναι ξεκάθαρο ότι δημιουργήθηκαν πολλές διαφορετικές αποδεκτές κυματομορφές. Ο χρόνος ανόδου αυτών των κυματομορφών κυμαίνεται μεταξύ 100ps έως 30ns. Οι άνθρωποι νιώθουν μια εκφόρτιση, μόνον όταν η τάση είναι περίπου 3 kV ή μεγαλύτερη.

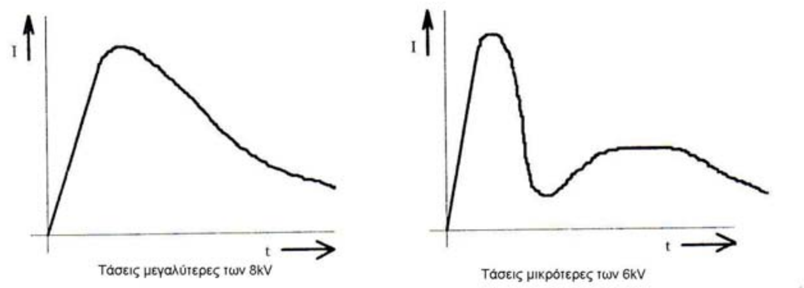


Σχήμα 1.12: Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρώπινου σώματος

Μια ανάλυση των αποτελεσμάτων από μετρήσεις που έχουν παρθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.11 δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- 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)
- ανθρώπινη χωρητικότητα είναι περίπου 150pF
- τάσεις πάνω από 15kV 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. Δυο ακραία παραδείγματα φαίνονται στο Σχήμα 1.13:



Σχήμα 1.13: Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)

Κεφάλαιο 2

Πρότυπο IEC 61000-4-2

2.1 Σκοπός

Το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 [3] περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες, που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα. Το Πρότυπο ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα τάσεων δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία η δοκιμή του Προτύπου αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά.

2.2 Εξοπλισμός δοκιμών

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός [13] για την διακρίβωση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι ο ακόλουθος:

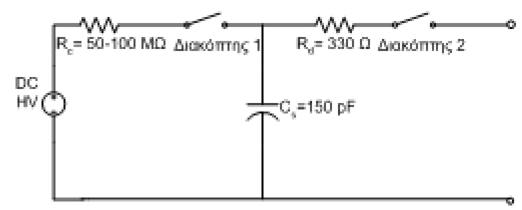
- κλωβός Faraday για τοποθέτηση του εξοπλισμού μετρήσεων
- γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)
- παλμογράφος με εύρος ζώνης τουλάχιστον 1GHz
- ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης
- εξασθενιτής
- ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχνα σήματα
- βολτόμετρο συνεχούς υψηλής τάσης (R_i>30GΩ).

2.2.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Το αρχικό Πρότυπο, που δημιουργήθηκε για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ήταν το IEC 801-2 [14] το οποίο αναθεωρήθηκε και έφτασε στην τελική του μορφή σαν IEC 61000-4-2 [15] και στην Ευρωπαϊκή του έκδοση είναι γνωστό σαν EN 61000-4-2 [3]. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 βασίζεται στο μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model). Το κύκλωμά της, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.1, το απαρτίζουν:

- ο πυκνωτής ενταμίευσης (C_s)
- το τροφοδοτικό υψηλής τάσης
- η αντίσταση φόρτισης (R_c)
- η αντίσταση εκφόρτισης (R_d)
- ο διακόπτης εκκένωσης που τυπικά είναι ένα ρελέ διακένου.

Οι δοκιμές συμμόρφωσης απαιτούν μη συνεχόμενες εκφορτίσεις. Για διερευνητικούς λόγους μπορεί να γίνονται συνεχείς εκφορτίσεις. Γι' αυτό η γεννήτρια πρέπει να έχει την δυνατότητα συνεχών εκφορτίσεων με ρυθμό μέχρι και 20 ανά δευτερόλεπτο (20Hz). Το Πρότυπο απαιτεί την εφαρμογή και θετικών και αρνητικών εκφορτίσεων. Συνεπώς, η γεννήτρια πρέπει να διαθέτει και τις δύο πολικότητες ή να υπάρχουν δύο διαφορετικές γεννήτριες (μία για θετικές και μία για αρνητικές εκφορτίσεις). Η τάση εκφόρτισης εξαρτάται από τον τύπο της εκφόρτισης. Για εκφορτίσεις επαφής (contact discharge) η μέγιστη τάση δοκιμών είναι 8kV. Για εκφορτίσεις στον αέρα (air discharge) η τάση δοκιμών φτάνει τα 15kV. Η γεννήτρια πρέπει να παρέχει τις τιμές αυτές κατ' ελάχιστον. Τον κρίσιμο ρόλο στην κατασκευή της γεννήτριας παίζει το ηλεκτρόδιο και το κύκλωμα εκφόρτισης προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες κυματομορφές εκφόρτισης με χρόνο ανόδου μεταξύ 0,7ns και 1ns. Για τις εκφορτίσεις επαφής χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο με οξύ άκρο ενώ για τις εκφορτίσεις διακένου ηλεκτρόδιο με στρογγυλό άκρο. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται μια κυκλωματική αναπαράσταση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

<u>Τεχνικά χαρακτηριστικά:</u>

Τάση εκφόρτισης: 200V..15kV για εκφόρτιση αέρος
200V..8kV για εκφόρτιση επαφής

Ηλεκτρόδια εκφορτίσεων: επαφής/τοξοειδούς

Πολικότητα: θετική/αρνητική

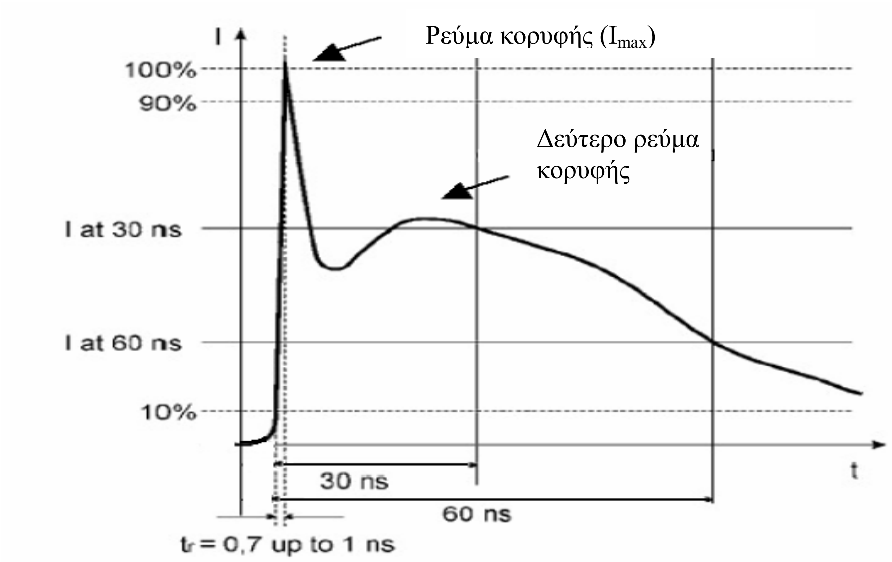
Πυκνωτής ενταμίευσης: C_s=150pF

Αντίσταση εκφόρτισης: R_d=330Ω

Αντίσταση φόρτισης: R_c=50–100MΩ

Λειτουργία: μονές εκφορτίσεις/συνεχείς εκφορτίσεις (έως 20Hz)

Ηλεκτρόδια εκφορτίσεων: επαφής/τοξοειδούς



Σχήμα 2.2: Η κυματομορφή του ρεύματος κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2

Ο παλμός σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.2 μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (Initial Peak) προέρχεται από την εκφόρτιση του χεριού, ενώ το δεύτερο προέρχεται από την εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής είναι μεταξύ 0,7ns και 1ns, ενώ το πλάτος του εξαρτάται από την τάση φόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

2.2.2 Περιγραφή του χώρου δοκιμών

Το εύρος των διαταραχών από τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι μεγάλο και εκτείνεται μέχρι την περιοχή VHF. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις προβλέπεται να γίνονται σε θωρακισμένο θάλαμο. Το δοκίμιο και η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων τοποθετούνται εντός του θωρακισμένου θαλάμου μεταβατικών διαταραχών (transient immunity room). Ο παλομογράφος καταγραφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βρίσκεται στον θάλαμο ελέγχου (control room). Κατά την διάρκεια των δοκιμών η πόρτα του θαλάμου μεταβατικών διαταραχών είναι κλειστή.

2.2.3 Διάταξη δοκιμών (test set-up)

Η διάταξη δοκιμών αποτελείται από την γεννήτρια δοκιμών, το δοκίμιο (EUT) και τα βοηθητικά όργανα και εξοπλισμό που απαιτείται για την εκτέλεση άμεσων και έμμεσων ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το δοκίμιο τοποθετείται και συνδέεται σύμφωνα με τις λειτουργικές απαιτήσεις. Τηρείται απόσταση 1m κατ' ελάχιστον μεταξύ του δοκιμίου και των τοίχων του εργαστηρίου ή άλλης μεταλλικής κατασκευής. Το δοκίμιο συνδέεται με το σύστημα γείωσης σύμφωνα με τις οδηγίες και τις απαιτήσεις εγκατάστασης. Δεν επιτρέπεται πρόσθετη γείωση. Το καλώδιο της γείωσης (πράσινο-κίτρινο) της γεννήτριας συνδέεται στο εδαφικό επίπεδο αναφοράς. Το συνολικό μήκος του καλωδίου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2m.

Επιτραπέζιος εξοπλισμός

Ο επιτραπέζιος εξοπλισμός τοποθετείται στο ειδικά διαμορφωμένο ξύλινο τραπέζι, ύψους 0,8m με επικολλημένο το οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (HCP) διαστάσεων 1,6m×0,8m από χαλκό.

Επιδαπέδιος εξοπλισμός

Το δοκίμιο και τα καλώδια πρέπει να απομονώνονται από το εδαφικό επίπεδο αναφοράς με ένα μονωτικό στήριγμα πάχους 0,1m. Τυχόν πόδια στήριξης του δοκιμίου παραμένουν στη θέση τους.

2.3 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται είναι:

- ρεύμα κορυφής
- χρόνος ανόδου
- χρόνος καθόδου παλμού
- γραμμικότητα τάσης

Δίνεται ο κατωτέρω πίνακας σύμφωνα με την παράγραφο 6.2 του Προτύπου IEC 61000-4-2:

Επίπεδο	Ένδειξη τάσης kV	Ρεύμα κορυφής (±10%) A	Χρόνος ανόδου με διακόπτη εκκένωσης t_r (ns)	Ρεύμα στα 30 ns (±30%) A	Ρεύμα στα 60 ns (±30%) A
1	2	7.5	0.7-1	4	2
2	4	15	0.7-1	8	4
3	6	22.5	0.7-1	12	6
4	8	30	0.7-1	16	8

Πίνακας 2.1: Επίπεδα τάσεων δοκιμών

2.4 Τι ορίζει το Πρότυπο ANSI για τις κυματομορφές του ρεύματος εκφορτίσεως

Στο Πρότυπο ANSI (American National Standard Institute) C63.16.1993 [16] οι τύποι εκφόρτισης για την παραγόμενη ηλεκτροστατική εκφορτίση είναι οι ακόλουθοι:

- εκφορτίσεις από το ανθρώπινο σώμα προς μεταλλικά σώματα (hand metal)
- εκφορτίσεις μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων (metallic furniture).

Αυτές οι δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για δοκιμές μέσω αέρα ή επαφής.

2.4.1 Δοκιμές ESD μέσω αέρα ή επαφής

Οι μέθοδοι προσομοίωσης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον αέρα ή σε επαφή έχουν επιλεχθεί ως οι πιο κατάλληλοι για τον καθορισμό των αποτελεσμάτων που δημιουργούνται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παρόλα αυτά κάθε ένα από τα παραπάνω είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, οπότε θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφασιστεί ποιο είδος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι:

- για δοκιμές σε μεταλλικές επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δυο μέθοδοι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που αναφέρονται παραπάνω.
- για δοκιμές σε μονωτικές επιφάνειες η επικρατούσα μέθοδος είναι η εκφόρτιση μέσω αέρα.

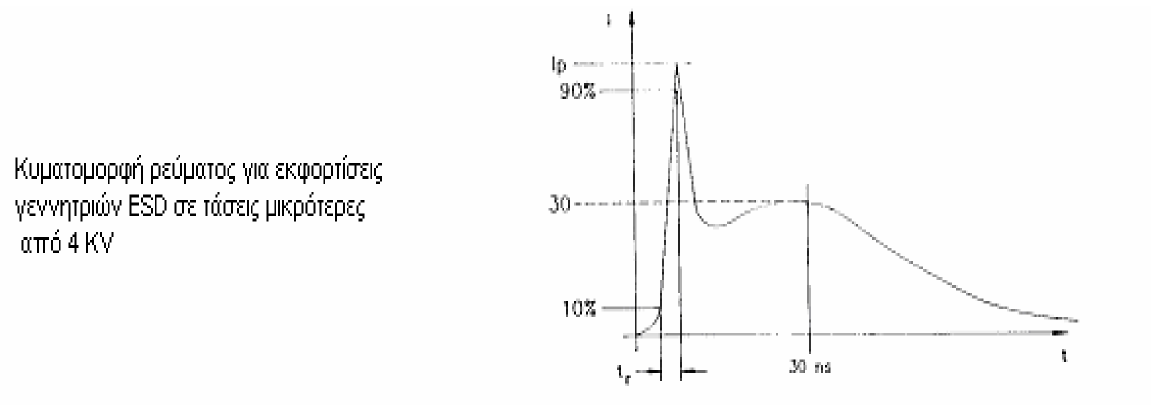
Όταν επιχειρούμε έμμεσα τέστ ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιώντας επίπεδα ζεύξης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε εκφορτίσεις μέσω αέρα είτε μέσω επαφής, αλλά οι εκφορτίσεις επαφής προτιμούνται λόγω της ικανότητάς τους για επαναληπτικότητα.

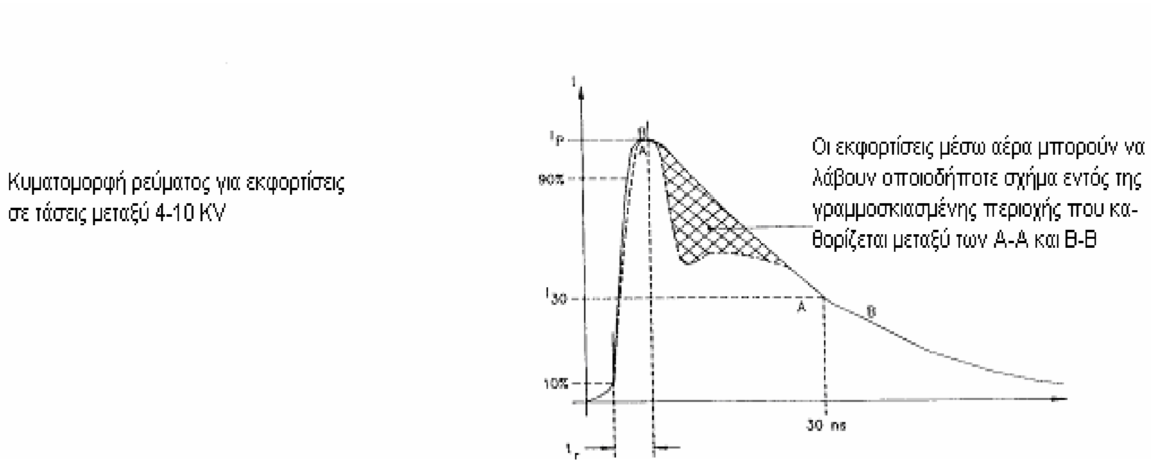
2.4.2 Ρεύμα ESD σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI

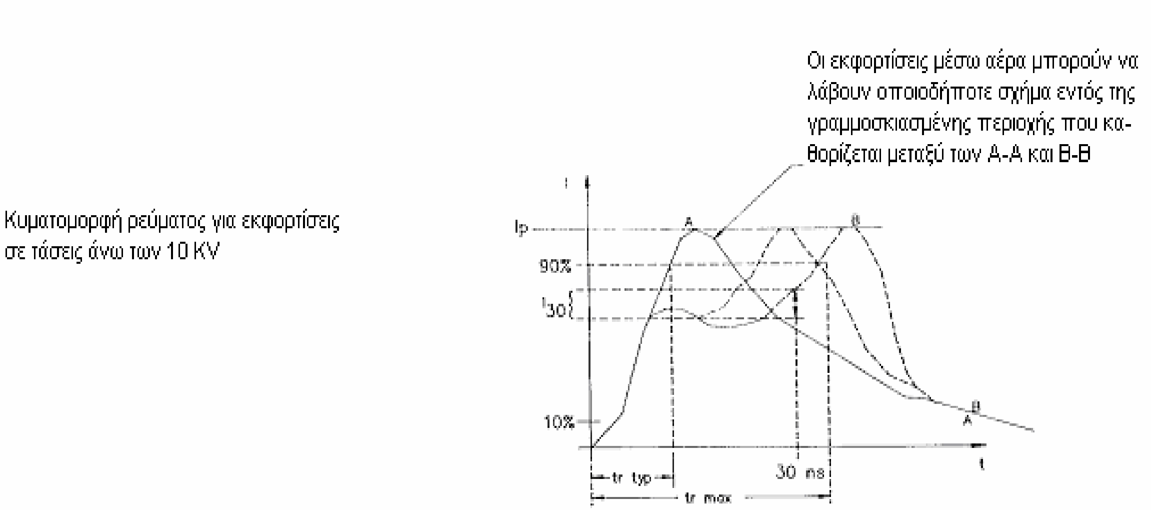
Οι γεννήτριες ESD, οι οποίες είναι ικανές να παράγουν τις κυματομορφές που φαίνονται στο Σχήμα 2.3, πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθούν τις προδιαγραφές για κάθε επαναλαμβανόμενο ρυθμό εκφόρτισης που είναι σύμφωνος με τα πειράματα. Το Πρότυπο ANSI ορίζει την κυματομορφή του ρεύματος για τρεις διαφορετικές περιοχές τάσης φόρτισης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ESD σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI είναι τα ακόλουθα:

- ρεύμα φορτίσεως (I_{ch}): $\leq$3,5mA (dc) σε κάθε τάση φόρτισης
- τάση εξόδου: τουλάχιστον 1-6kV για εκφορτίσεις επαφής και 2-15kV για εκφορτίσεις μέσω αέρα
- ακρίβεια στην τάση εξόδου: ±5%
- πολικότητα της τάσης εξόδου: και οι δύο πολικότητες της εκφόρτισης πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των ερευνητικών ελέγχων για να καθοριστούν τα αποτελέσματα που δημιουργούνται στα υπό εξέταση δοκίμια
- χρόνος κρατήματος (holding time): τουλάχιστον 5sec.







Σχήμα 2.3: Κυματομορφές ρεύματος για εκφορτίσεις σε διαφορετικές τάσεις σύμφωνα με το Πρότυπο ANSI

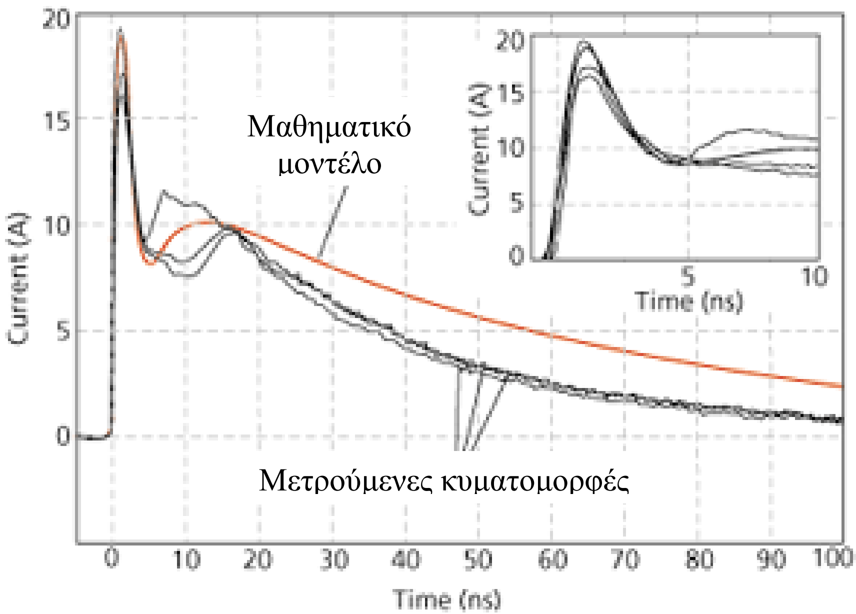
2.5 Ανάγκη αναθεώρησης του Προτύπου

Το υπάρχον Πρότυπο για τις δοκιμές εξοπλισμού έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων κρίνεται ανεπαρκές και χρήζει αναθεώρησης. Αυτό έχει να κάνει με το ότι σε δοκιμές εξοπλισμού που γίνονται σε διαπιστευμένα εργαστήρια - μεταξύ των οποίων και το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου - υπάρχει η πιθανότητα ένα δοκίμιο (εξοπλισμός υπό δοκιμή) να περνά το δοκιμή με μια γεννήτρια και να αποτυγχάνει με μια άλλη, παρόλο που η τάση φόρτισης και στις δυο γεννήτριες είναι η ίδια και το ρεύμα εκφόρτισης είναι εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο.

Το γεγονός αυτό οφείλεται σε δύο λόγους που άπτονται της κατασκευής των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Ο πρώτος λόγος είναι ότι οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων μπορεί να παράγουν κυματομορφές ρεύματος εκφόρτισης εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο, αλλά η μεταβολή του ρεύματος (πρώτη παράγωγος) να είναι διαφορετική. Ο δεύτερος λόγος, που είναι και ο βασικότερος, είναι το διαφορετικό πεδίο που παράγει κάθε γεννήτρια. Συγκεκριμένα, το διαφορετικό πεδίο που παράγεται από κάθε γεννήτρια ή από την ίδια γεννήτρια, όταν αυτή βρίσκεται σε διαφορετικό προσανατολισμό ως προς το υπό εξέταση δοκίμιο, προκαλεί διαφορετικές επαγόμενες τάσεις. Άρα, η επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου θα πρέπει να εστιάσει τόσο στην παράγωγο του ρεύματος εκφόρτισης, όσο και στο παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ένα ακόμα σημείο, το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί, είναι η εύρεση μιας εξίσωσης που να περιγράφει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

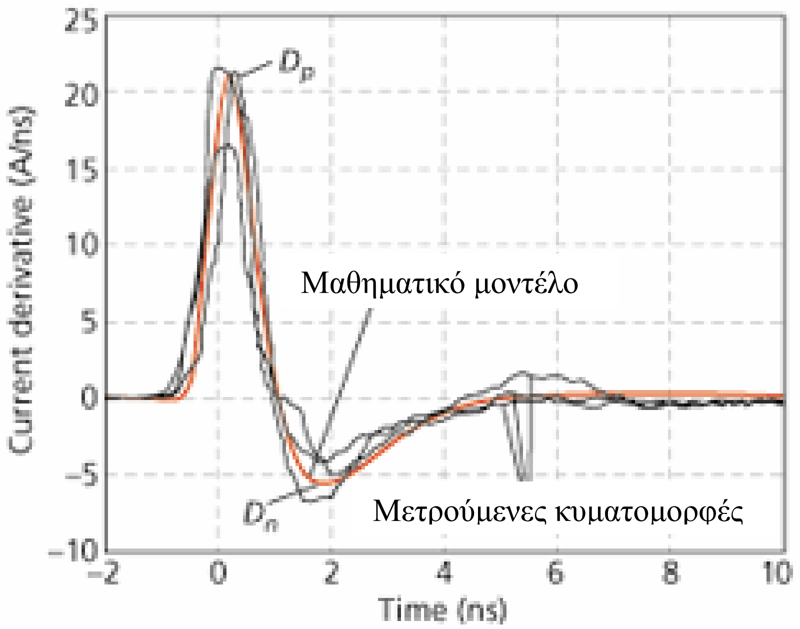
2.5.1 Παράγωγος ρεύματος εκφόρτισης

Η μέγιστη τιμή της παραγώγου του ρεύματος που θα είναι επιτρεπτή σε μια κυματομορφή, βρίσκεται υπό εξέταση [17]. Η τιμή θα βρίσκεται σε ένα διάστημα με κέντρο την τιμή των $4{,}2\frac{A}{ns*kV}$ και περιθώρια $\pm 30\%$. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η προτεινόμενη κυματομορφή εκφόρτισης με εστίαση στα πρώτα 10ns.



Σχήμα 2.4: Προτεινόμενη κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης

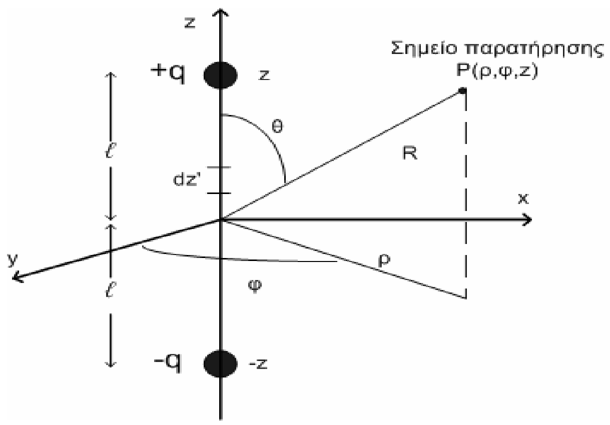
Η παραπάνω κυματομορφή αφορά θετική εκφόρτιση 5kV, μεταξύ ανθρώπου και μετάλλου (Human body model). Παρουσιάζει μέγιστο στα 20A, ενώ έχει χρόνο ανόδου 1ns. Για αυτό το λόγο η παράγωγος θα παρουσιάζει μέγιστο με τιμή περίπου 20A/ns. Η αναθεωρημένη έκδοση θα καθορίζει επίσης και την μέγιστη αρνητική τιμή της παραγώγου D_n. Αυτό θα γίνεται μέσω του καθορισμού του λόγου D_p / D_n. Η τιμή του λόγου θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη του λόγου 3:1. Το μαθηματικό μοντέλο που προτείνεται, δίνει για το I_{30} και το I_{60} τιμές ρεύματος εκτός των τιμών που καθορίζει το τωρινό Πρότυπο. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται τιμές 7A και 2,5A περίπου, ενώ θα έπρεπε να είναι 10A και 5A αντίστοιχα. Για αυτό υπάρχουν σκέψεις για αλλαγή και των τιμών αυτών. Για να ευρεθούν οι παράμετροι του ρεύματος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν πέντε κυματομορφές, από τις οποίες θα υπολογιστούν πέντε τιμές για κάθε παράμετρο. Ο μέσος όρος των πέντε μετρήσεων θα αποτελεί την τιμή που θα πρέπει να συγκριθεί με την τιμή που δίνει το Πρότυπο. Ο λόγος που γίνεται η παραπάνω διαδικασία είναι ότι η γεννήτρια περιέχει στο εσωτερικό της μηχανικά ρελέ, που χρησιμεύουν για την εκκίνηση του ηλεκτροστατικού παλμού και τα οποία προκαλούν κάθε φορά διαφορετικό ρεύμα εκφόρτισης. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται αρκετές κυματομορφές για τον υπολογισμό των παραμέτρων. Στο Σχήμα 2.5, που ακολουθεί, φαίνεται η γραφική παράσταση για την παράγωγο του ρεύματος καθώς και το ολικό μέγιστο και ελάχιστο αυτής.



Σχήμα 2.5: Προτεινόμενη κυματομορφή της παραγώγου του ρεύματος εκφόρτισης

2.5.2 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προερχόμενο από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα z, με το κέντρο του στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων (σημείο O) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το κυλινδρικό λόγω της συμμετρίας του προβλήματος. Το φορτίο $+q$ βρίσκεται σε ύψος z, οπότε το είδωλό του βρίσκεται στο $-z$. Τα χρονομεταβλητά πεδία μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [18]. Η εκφόρτιση γίνεται πάνω στο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6 που παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 2.6: Ηλεκτρικό δίπολο ευρισκόμενο πάνω από επίπεδο

Οι αναλυτικές εξισώσεις για την ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου [19], $\vec{E}$ και $\vec{H}$ αντιστοίχως είναι:

$$\vec{E} = E_\rho \cdot \overrightarrow{\alpha_\rho} + E_z \cdot \overrightarrow{\alpha_z} \tag{2.1}$$

$$E_\rho = \frac{d}{2\cdot\pi\cdot\varepsilon_0}\cdot\frac{\rho\cdot z}{R^2}\left(\frac{3\cdot i(z,t-\frac{R}{c})}{c\cdot R^2}+\frac{1}{c^2 R}\frac{\partial i(z,t-\frac{R}{c})}{\partial t}\right) \tag{2.2}$$

$$E_z = \frac{d}{2\cdot\pi\cdot\varepsilon_0}\left(\left(\frac{3\cdot z^2}{c\cdot R^4}\cdot\frac{1}{c\cdot R^2}\right)\cdot i(z,t-\frac{R}{c})+\left(\frac{z^2}{c^2\cdot R^3}\cdot\frac{1}{c^2\cdot R}\right)\cdot\frac{\partial i(z,t-\frac{R}{c})}{\partial t}\right) \tag{2.3}$$

$$H_\phi(\rho,z,t) = \frac{d}{2\cdot\pi}\cdot\frac{\rho}{R}\left(\frac{i(z,t-\frac{R}{c})}{R^2}+\frac{1}{c\cdot R}\frac{\partial i(z,t-\frac{R}{c})}{\partial t}\right) \tag{2.4}$$

όπου R είναι η απόσταση του σημείου εκφόρτισης από το σημείο παρατήρησης (ρ, φ, z), c η ταχύτητα του φωτός, d=2ℓ το μήκος του αγώγιμου δρόμου που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία, ε_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, α_z, α_p τα μοναδιαία διανύσματα στο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων και ρ η προβολή του μήκους R πάνω στο επίπεδο xy.

Ο D. Pommerenke [20] έχει ασχοληθεί με τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση και στηριζόμενος στη σχέση (2.4) αναφέρει πώς αυτή μπορεί να τροποποιηθεί προκειμένου να περιγραφεί καλύτερα το μαγνητικό πεδίο σε μακρινές και κοντινές αποστάσεις. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η σχέση (2.4) δείχνει ότι υπάρχουν δυο βασικές περιοχές για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο:

Η περιοχή του εγγύς πεδίου στη οποία επικρατεί το ρεύμα $i(\mathrm{z},\mathrm{t}-\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{c}})$ και η περιοχή του μακρινού πεδίου στην οποία επικρατών όρος είναι η παράγωγος του ρεύματος $\frac{\partial i(\mathrm{z},\mathrm{t}-\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{c}})}{\partial t}$.

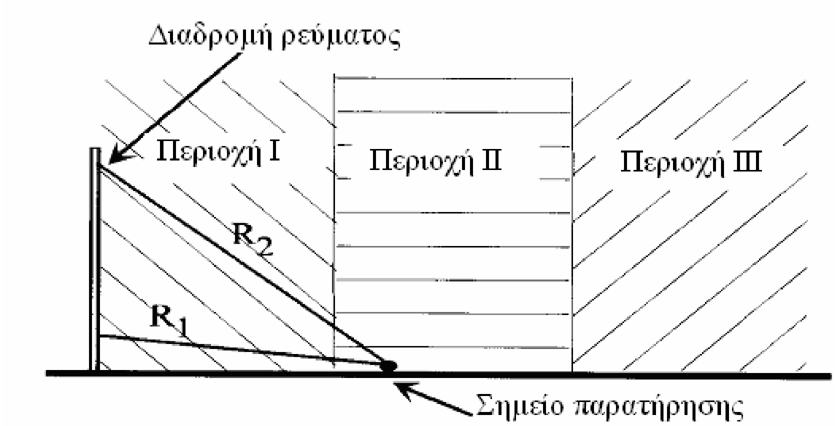
Στην ίδια εργασία του ο D. Pommerenke [20] έχει μελετήσει τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης. Εάν η παράγωγος του ρεύματος δεν είναι επικρατούσα, δηλαδή $\frac{\partial i}{\partial t}=0$ τότε το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (2.5):

$$H_{\varphi}(\rho,\mathrm{z},t)=\frac{I}{2\cdot\pi\cdot\rho}\cdot\frac{\ell}{\sqrt{\rho^{2}+\ell^{2}}} \tag{2.5}$$

Αντίθετα, όταν $\rho>>\ell$ ή $\rho<<\ell$, ισχύει ο νόμος του Ampere και το μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (2.6):

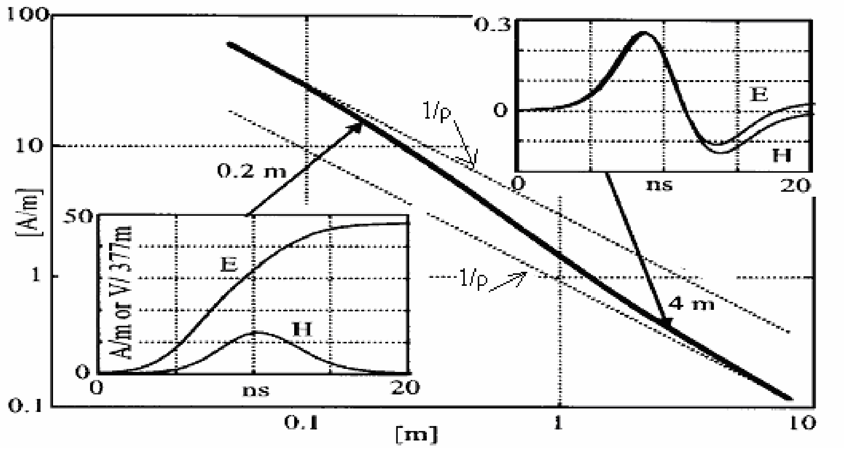
$$H_{\phi}(\rho,\mathrm{z},t)=\frac{I}{2\cdot\pi\cdot\rho} \tag{2.6}$$

Στο μαγνητικό πεδίο μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Στην περιοχή I το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται συναρτήσει του παράγοντα $1/\rho$. Οι κυματομορφές ρεύματος και πεδίου είναι σχεδόν ίδιες. Στην περιοχή II το πεδίο μεταβάλλεται συναρτήσει του παράγοντα $1/\rho^2$ ενώ στην περιοχή III βάση του $1/\rho$. Στα Σχήματα 2.8 και 2.9 φαίνεται η μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για απόσταση από 0,1m ως 10m.



Σχήμα 2.7: Μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης

Στο Σχήμα 2.8 εμφανίζεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρα, όπου το ρεύμα μεταβάλλεται ως τη μέγιστη τιμή του με αργό ρυθμό (t_r=4ns), ενώ στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρα, όπου το ρεύμα εκφόρτισης μεταβάλλεται πολύ γρήγορα (t_r=377psec). Άλλωστε οι διαφορετικοί χρόνοι ανόδου είναι απόλυτα λογικοί εφόσον στις εκφορτίσεις αέρα το ρεύμα εκφόρτισης είναι κάθε φορά διαφορετικό και εξαρτάται από τα μήκη τόξου, την υγρασία και την ταχύτητα προσέγγισης του πιστολιού.



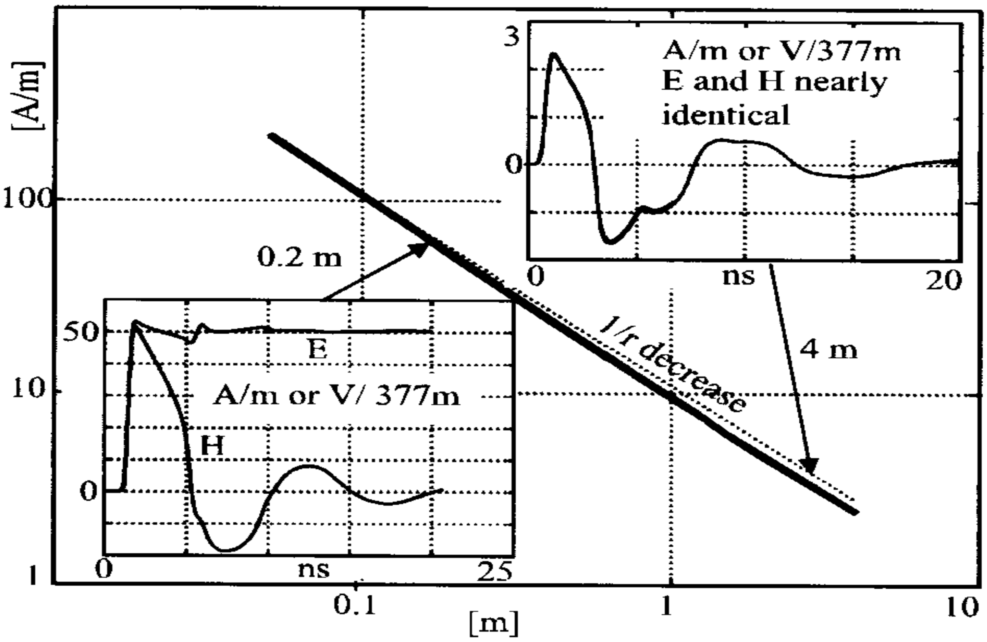
Σχήμα 2.8: Μεταβολή της κορυφής του μαγνητικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης συναρτήσει της απόστασης

Στο Σχήμα 2.8 έχουμε ανάπτυξη τόξου σε απόσταση 2,7mm από το δοκίμιο υπό τάση 10kV και ο χρόνος ανόδου του ρεύματος είναι αργός της τάξης των 4ns. Το ηλεκτρικό πεδίο φθάνει τη μέγιστη τιμή του μετά από 20ns και με χρόνο ανόδου 10ns για την κοντά στο δοκίμιο περιοχή. Σε μακρινότερες αποστάσεις ο χρόνος ανόδου, τόσο για το μαγνητικό όσο και για το ηλεκτρικό πεδίο, είναι της τάξης των

4ns. Οι περιοχές I, II και III μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν. Στην περιοχή κοντά στο δοκίμιο οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι πολύ διαφορετικές, αλλά στην απόσταση των 4m παρουσιάζονται σχεδόν ίδιες.

Κοντά στο σφαιροειδές το πεδίο μειώνεται βάσει του παράγοντα $1/\rho$ και συνεπώς βρισκόμαστε στην περιοχή I. Σε απόσταση γύρω στα 0,2m το πεδίο αρχίζει να μειώνεται γρηγορότερα σύμφωνα με το λόγο $1/\rho^2$ οπότε βρισκόμαστε στην περιοχή II. Από τα 2m και μετά η μείωση ακολουθεί το λόγο $1/\rho$, οπότε έχουμε περάσει στην περιοχή III.

Στο Σχήμα 2.9 έχουμε ανάπτυξη τόξου σε απόσταση 1,22mm από το δοκίμιο υπό τάση 10kV, ενώ έχουμε γρήγορο χρόνο ανόδου του ρεύματος της τάξης των 377ps.



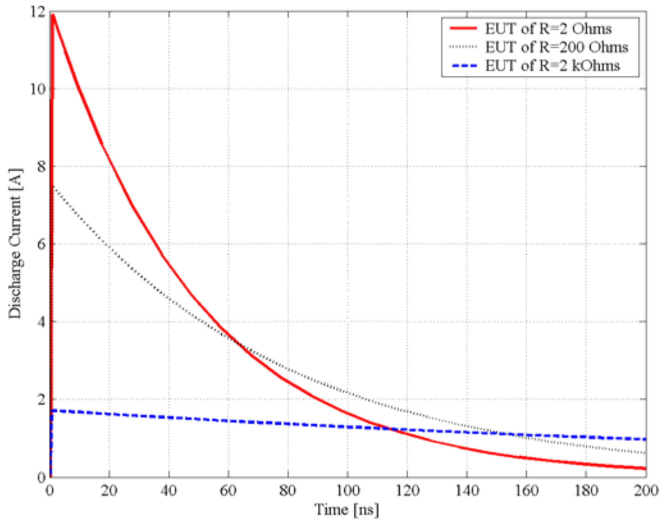
Σχήμα 2.9: Μεταβολή της κορυφής του μαγνητικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης συναρτήσει της απόστασης

Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο μειώνεται βάσει του παράγοντα $1/\rho$ λόγω της παραγώγου της σχέσης (2.4) που αρχίζει πλέον να κυριαρχεί κοντά στο σφαιροειδές. Η αλλαγή της κυματομορφής, η οποία καθορίζεται από το ρεύμα σε κοντινές αποστάσεις και την παράγωγό του σε μακρινότερες, όπως φαινόταν στην προηγούμενη περίπτωση, όπου είχαμε αργό χρόνο ανόδου του ρεύματος, εδώ δεν είναι πλήρως ορατή.

2.5.3 Εξισώσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

2.5.3.1 Η ανάγκη μίας αναλυτικής και ακριβούς εξίσωσης για το ρεύμα εκφόρτισης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων εμπορικής χρήσης

Έχει παρατηρηθεί ότι, χρησιμοποιώντας το κύκλωμα που ορίστηκε στο Πρότυπο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, και για διάφορα δοκίμια, η κυματομορφή του ρεύματος στο Σχήμα 2.10 είναι διαφορετική από εκείνη που ορίζεται από το Πρότυπο που φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Το Σχήμα 2.10 είναι προϊόν προσομοιώσεων με τη βοήθεια του Spice για ωμικά δοκίμια και φόρτιση συνεχούς ρεύματος των 4kV [21],[22].



Σχήμα 2.10: Κυματομορφές του ρεύματος μέσω του λογισμικού SPICE για το κύκλωμα RC και ωμικό δοκίμιο

Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα οι προσομοιώσεις με τη βοήθεια υπολογιστή για το κύκλωμα που ορίστηκε στο Πρότυπο να εισάγουν σφάλματα στις υπολογιζόμενες τάσεις και ρεύματα. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση αυτού του σφάλματος. Προς επίτευξη αυτού του στόχου υπάρχουν δύο μέθοδοι. Η πρώτη είναι η δημιουργία ενός νέου κυκλώματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ανάλογα με την εργασία που έγινε στα [23], [25]. Η δεύτερη περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση μιας πηγής ρεύματος ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στην οποία η παραγόμενη κυματομορφή του ρεύματος είναι συνάρτηση ενός πλήθους παραμέτρων όπως έχει προταθεί στις εργασίες [28], [29] και [26].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος. Έχει αναπτυχθεί μια μεθοδολογία η οποία περιγράφει μαθηματικά το ρεύμα εκφόρτισης χρησιμοποιώντας έναν αριθμό εξισώσεων. 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. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε είναι ένας γενετικός αλγόριθμος που περιγράφεται στην συνέχεια.

2.5.3.2 Εξισώσεις που περιγράφουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα πρέπει να αναπαράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αξιόπιστα και με ακρίβεια. Το Πρότυπο καθορίζει τις τιμές των παραμέτρων της κυματομορφής της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι εξής: η πρώτη κορυφή του ρεύματος, ο χρόνος ανόδου, η τιμή του ρεύματος στα 30ns, η τιμή του ρεύματος στα 60ns. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι κρίσιμες για την διακρίβωση μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για παράδειγμα: για τάση εκφόρτισης 4kV η τιμή του πρώτου μεγίστου πρέπει να είναι 15A±10%, του ρεύματος 30ns 8A±10% και του ρεύματος στα 60ns 4A±10%. Ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης για τα συγκεκριμένα επίπεδα τάσης φόρτισης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 1ns.

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση, που δεν αντιστοιχεί στο ρεύμα εκφόρτισης, αλλά θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση στην εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, είναι η εξίσωση του κεραυνικού ρεύματος που δίδεται από τον ακόλουθο τύπο [27]:

$$i(t) = i_0 \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right) \tag{2.7}$$

Μια πρώτη προσεγγιστική εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης εμπορικών προσομοιωτών [28] χρησιμοποιεί τη διπλοεκθετική συνάρτηση:

$$i(t) = i_1 \cdot e^{-\frac{t}{t_1}} - i_2 \cdot e^{-\frac{t}{t_2}} \tag{2.8}$$

Σύμφωνα με το [24] η συνάρτηση αναφοράς του ρεύματος εκφόρτισης είναι η ακόλουθη:

$$i(t) = A \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2} - B \cdot t \cdot e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2} \tag{2.9}$$

Ο παλμός του γραφήματος 1 μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα δύο γκαουσιανών καμπυλών, μίας στενής και μίας ευρείας. Η 2.9 είναι πιο κοντά σε αυτήν εφόσον οι παράγοντες $A\cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2}$ και $B\cdot t\cdot e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2}$ αντιπροσωπεύουν την στενή και την ευρεία γκαουσιανή, αντίστοιχα.

Μια άλλη κυματομορφή στην οποία έχει γίνει αναφορά δίνεται από τον ακόλουθο τύπο, όπως έχει προταθεί από τον Heidler [29] και έχει υιοθετηθεί για τις ανάγκες του προβλήματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από τον Pommerenke [23]:

$$i(t)=\frac{i_1}{k_1}\cdot\frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1+\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}\cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}+\frac{i_2}{k_2}\cdot\frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1+\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}\cdot e^{-\frac{t}{\tau_4}} \tag{2.10}$$

όπου $k_1=e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2}\left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{1/n}}$ και $k_2=e^{-\frac{\tau_3}{\tau_4}\left(\frac{n\tau_4}{\tau_3}\right)^{1/n}}$

i_1, i_2 είναι τα ρεύματα σε Amperes, τ_1, τ_2, τ_3, τ_4 είναι χρονικές σταθερές σε ns και το n καθορίζει πόσες φορές μπορεί να παραγωγισθεί προς το χρόνο.

Οι άγνωστες παράμετροι των τεσσάρων αυτών εξισώσεων πρέπει να βελτιστοποιηθούν, ώστε να περιγράψουν αναλυτικά το μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Σε αυτή τη βελτιστοποίηση μπορεί να βοηθήσει ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διάταξη-Αποτελέσματα

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων για τη διεξαγωγή δοκιμών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

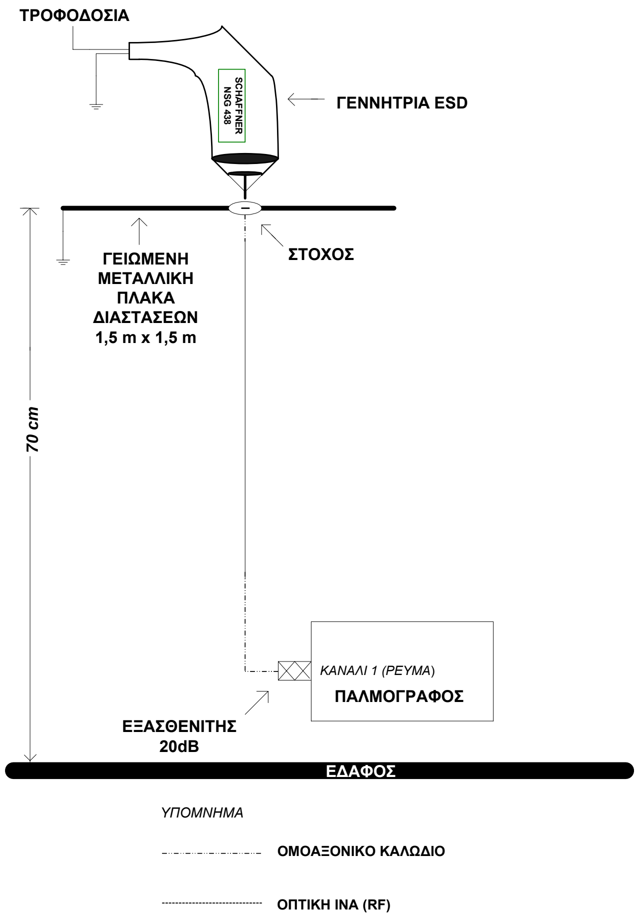
3.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

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

- γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generator) NSG-438 της Schaffner
- ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target)
- ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας
- εξασθενιτής (attenuator)
- παλμογράφος Tektronix TDS 7254B
- γειωμένη μεταλλική πλάκα διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m
- ανηχωικός θάλαμος.

3.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος, που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, για τάσεις φόρτισης +2kV και +4kV.



Σχήμα 3.1: Η πειραματική διάταξη

Ο παλμογράφος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από dc έως 2,5GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε την κυματομορφή του θα πρέπει να εξασθενίσουμε το αντίστοιχο σήμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται εξασθενιτής της Tektronix (011-0059-03). Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 ως στόχος, είναι μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μετράται το εκχεόμενο κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ρεύμα. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 101 της Schaffner.

Τέλος, προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχωικό θάλαμο, ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως 1GHz.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη στο εσωτερικό του ανηχωικού θαλάμου.

Εικόνα 3.1: Η πειραματική διάταξη στο εσωτερικό του ανηχωικού θαλάμου

Η μεταλλική πλάκα είναι τοποθετημένη σε απόσταση 70cm από το έδαφος και είναι γειωμένη σε κοινό σημείο με τη γείωση της γεννήτριας. Η γείωση της μεταλλικής πλάκας έχει μεγάλη σημασία στη διεξαγωγή του πειράματος, γιατί παρέχει ασφάλεια στο χρήστη της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για το λόγο αυτό είναι ένα από τα σημεία που πρέπει να ελέγχονται συνεχώς και σχολαστικά πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η γείωση της μεταλλικής πλάκας.

Εικόνα 3.2: Η γείωση της μεταλλικής πλάκας

3.3.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generator) NSG-438

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν από μία γεννήτρια της εταιρείας Schaffner την NSG-438 [30]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά της.

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται.

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

Πρέπει να σημειωθεί ότι διαθέτει οθόνη αφής, μέσω της οποίας γίνονται οι χειρισμοί. Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

Τη βασική μονάδα, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.4, και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και τον ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 κομβία (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock).

Το «πιστόλι» στο οποίο 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 κομβίο, το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.

Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει σαν είσοδό του 100-250Vac, 50-60Hz, 1A και δίνει στην βασική μονάδα 24Vdc, 2,3A.

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

Όταν η γεννήτρια είναι έτοιμη για λειτουργία, στην οθόνη αφής εμφανίζεται το μενού που φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Από την οθόνη αφής μπορούμε να επιλέξουμε την πολικότητα και την τιμή της τάσης εκφόρτισης που θέλουμε να κάνουμε, καθώς και τη λειτουργία της γεννήτριας σε θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -). 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. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-438.

Εικόνα 3.5: Το μενού στην οθόνη αφής της NSG-438

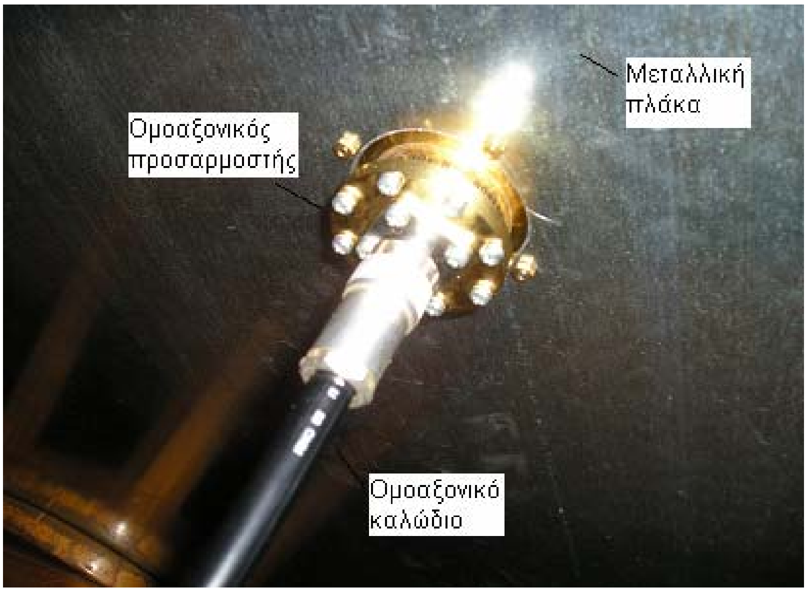
	NSG-438
Πυκνωτής εκκένωσης C_s	150pF
Αντίσταση εκκένωσης R_d	330Ω
Αντίσταση φόρτισης R_c	50MΩ
Τάση εξόδου V_0	200V-30kV για εκφορτίσεις στον αέρα και για εκφορτίσεις εξ επαφής
Πολικότητα τάσης εξόδου	θετική/αρνητική
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% V_0)	>5sec
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (t_r)	< 1ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις $\leq$8kV 0,7–1ns για εξ επαφής εκφορτίσεις
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240VAC, 50-60Hz
Κατανάλωση	25VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40°C
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

3.3.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [13] δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχεόμενο ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Στη διάταξη θα χρησιμοποιήθηκε ο MD 101 της Schaffner. Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζουμε τον ομοαξονικό προσαρμοστή που χρησιμοποιήσαμε και στην Εικόνα 3.7 τον ομοαξονικό προσαρμοστή τοποθετημένο στη διάταξη.

Εικόνα 3.6: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 101



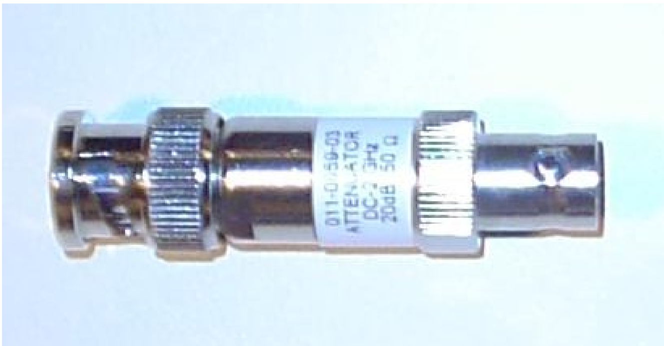
Εικόνα 3.7: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη

3.3.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Για αυτό το λόγο απαιτείται τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας (RF, Radio Frequency). Από τα τέσσερα ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν ένα καλώδιο συνδέει τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης με το βύσμα στην εσωτερική πλευρά του μεταλλικού τοίχου του ανηχωικού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική πλευρά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο κανάλι του παλμογράφου. Τα υπόλοιπα δυο χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου με ανάλογο τρόπο, έτσι ώστε ένα καλώδιο να συνδέει τον αισθητήρα με έναν όμοιο με το παραπάνω βύσμα στην εσωτερική πλευρά του μεταλλικού τοίχου του ανηχωικού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική πλευρά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο άλλο κανάλι του παλμογράφου.

3.3.4 Εξασθενιτής (attenuator)

Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε την κυματομορφή του, το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνέψει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι’ αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενιτής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2GHz, με εξασθένιση 20dB και αντίσταση 50Ω. Ο εξασθενιτής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Εξασθένιση 20dB σημαίνει υποβίβαση του σήματος 10 φορές, εφ’ όσον κατά τα γνωστά ισχύει $20dB = 20\log(\frac{U_2}{U_1})$. Ο εν λόγω εξασθενιτής φαίνεται στην Εικόνα 3.8 που ακολουθεί:



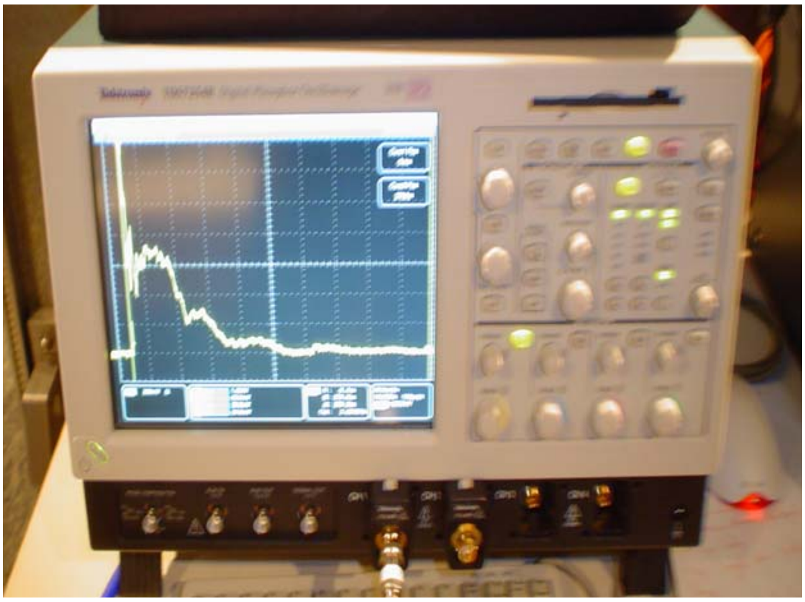
Εικόνα 3.8: Ο εξασθενιτής (attenuator) 011-0059-03

3.3.5 Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Ο παλμογράφος αυτός, που είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix, λειτουργεί στα 2,5GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο EN 61000-4-2 για παλμογράφο τουλάχιστον 1GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024×768, 3,5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.9 ενώ μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί.

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

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B



Εικόνα 3.9: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το κάθε κανάλι του παλμογράφου αντέχει μέγιστη τιμή ρεύματος μέχρι 5V (rms τιμή), οπότε πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεχτικοί και να χρησιμοποιείται πάντα ο εξασθενιτής.

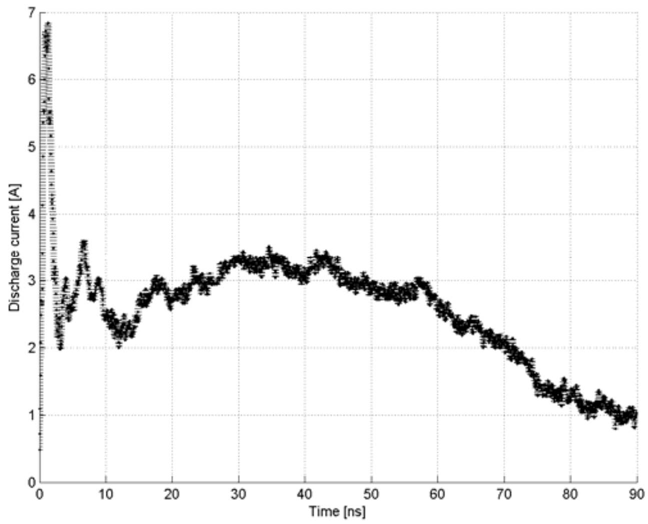
Εικόνα 3.10:Κομβία χειρισμού του παλμογράφου Tektronix TDS 7254B

3.3.6 Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)

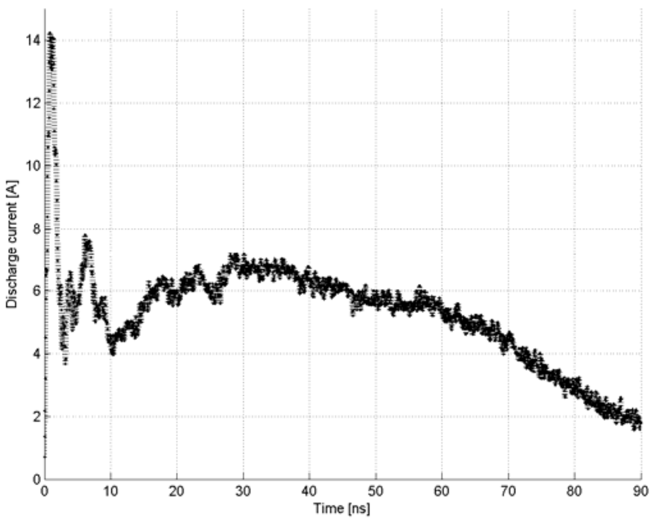
Προκειμένου να εξαλείψουμε τις παρεμβολές που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση στον εξοπλισμό καταγραφής (παλμογράφος), χρησιμοποιείται θωρακισμένος θάλαμος μεταβατικών διαταραχών. Ο παλμογράφος βρίσκεται στο θάλαμο ελέγχου (control room) διαστάσεων $3,2 \times 2,5 \times 3,3 m^3$. Ο θωρακισμένος θάλαμος του εργαστηρίου που θα χρησιμοποιηθεί στην πειραματική διάταξη είναι ο Lindgren-Rayproof Series 81. Ο θάλαμος αυτός έχει διαστάσεις $3,5 \times 6,5 \times 3,3 m^3$, τα τοιχώματά του οποίου είναι κατασκευασμένα από φερρίτη (μαλακός σίδηρος), υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό τις παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (Electromagnetic Interferences). Ο θάλαμος αυτός αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως και 1GHz.

3.4 Μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης +2kV, +4kV

Με τη βοήθεια της πειραματικής διάταξης που περιγράφηκε παραπάνω μετρήθηκαν οι κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επαφής για τη γεννήτρια NSG-438 που φαίνονται στα Σχήματα 3.2 και 3.3.



Σχήμα 3.2: Ρεύμα εκφόρτισης από τη γεννήτρια NSG-438 για τάση φόρτισης +2kV



Σχήμα 3.3: Ρεύμα εκφόρτισης από τη γεννήτρια NSG-438 για τάση φόρτισης +4kV

Η κυματομορφή του Σχήματος 3.2 αντιστοιχεί σε τάση φόρτισης +2kV ενώ η κυματομορφή του Σχήματος 3.3 αντιστοιχεί στα +4kV. Τα δεδομένα από τα δύο παλμογραφήματα απετέλεσαν είσοδο του γενετικού αλγορίθμου με σκοπό τον έλεγχο της ακρίβειας των προτεινόμενων εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που αναλύονται στο Κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή με τους γενετικούς αλγόριθμους

4.1 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 [31]. 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.

Στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων, οι μεταβλητές αναπαριστώνται ως γονίδια σε ένα χρωμόσωμα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι απεικονίζουν μία ομάδα υποψήφιων λύσεων (πληθυσμός) στην επιφάνεια ελέγχου (επιφάνεια ανίχνευσης της βέλτιστης λύσης). Με χρήση φυσικής επιλογής και τελεστών γενετικής, όπως μετάλλαξη και διασταύρωση γονιδίων, βρίσκονται τα χρωμοσώματα με την καλύτερη «*καταλληλότητα*» (fitness). Η φυσική επιλογή εγγυάται ότι τα χρωμοσώματα με την καλύτερη καταλληλότητα θα διαδίδονται στους μελλοντικούς πληθυσμούς. Χρησιμοποιώντας τον τελεστή διασταύρωσης γονιδίων, ο γενετικός αλγόριθμος συνδυάζει γονίδια από χρωμοσώματα δύο γονέων και παράγει δύο νέα χρωμοσώματα (απογόνους), τα οποία έχουν μεγάλη πιθανότητα να έχουν καλύτερη καταλληλότητα από τους γονείς τους. Η μετάλλαξη επιτρέπει να ελεγχθούν νέες περιοχές της επιφάνειας ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο η καταλληλότητα των χρωμοσωμάτων βελτιώνεται και μετά από πολλές γενιές θα δημιουργηθούν χρωμοσώματα που θα περιέχουν τις βέλτιστες τιμές των υπό μελέτη μεταβλητών (επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης) [32].

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 βοηθητική 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 [32]:

- 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.

4.2 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 δυαδικού 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 [33]

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 gab).* 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.

4.3 Πότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι γενετικοί αλγόριθμοι

Η απάντηση στο ερώτημα αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι γενετικοί αλγόριθμοι σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι αρκετά δύσκολη. Οι περισσότεροι ερευνητές ισχυρίζονται ότι δεν υπάρχει καλύτερη μέθοδος βελτιστοποίησης. Υπάρχουν παραπλήσιες δυνατότητες για κάθε τεχνική βελτιστοποίησης (*προσομοιωμένη ανόπτηση*-simulated annealing, *γενετικοί αλγόριθμοι*, *αλγόριθμοι ανύψωσης κλίσης*-gradient ascent, *βελτιστοποίηση Simplex*-Simplex optimization, *Monte Carlo* κτλ.) για να εκτελεστεί το ίδιο έργο. Το κλειδί είναι η χρήση της γνώσης του συστήματος που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, ώστε έπειτα να επιλεγεί η καλύτερη τεχνική, η οποία θα βρίσκει τη «βέλτιστη» λύση γρηγορότερα.

Όταν δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία για την επιφάνεια ελέγχου-βελτιστοποίησης και ο υπολογισμός της κλίσης είναι είτε εντατικός, είτε αριθμητικά ασταθής, πολλοί ερευνητές προτιμούν τη χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης, όπως *γενετικοί αλγόριθμοι* και *βελτιστοποίηση Simplex*, οι οποίες δεν απαιτούν πληροφορία για την κλίση. Ένας από τους λόγους που μπορεί να προτιμηθούν οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι η *προσαρμοστικότητά* τους (versatility). Χρησιμοποιώντας τη γνώση για ένα σύστημα ο αλγόριθμος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να προσαρμοστεί. Αν ένα πρόβλημα παγιδευτεί σε ένα τοπικό ελάχιστο, μπορεί να αυξηθεί η μετάλλαξη. Έτσι, ενώ δεν υπάρχει εγγύηση ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να συμπεριφερθούν καλύτερα σε μία εφαρμογή, συχνά υπάρχει η δυνατότητα μέσα από την τροποποίηση των παραμέτρων διαμόρφωσης του γενετικού αλγορίθμου ή με χρήση διαφορετικών γενετικών τελεστών να επιτευχθεί πολύ ικανοποιητική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων είναι ότι δεν βελτιστοποιούν απευθείας τις μεταβλητές, αλλά τις παραστάσεις τους. Για εφαρμογές, όπως επιλογή χαρακτηριστικών, όπου το χρωμόσωμα μπορεί να κωδικοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε γονίδιο να παριστάνει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μία άριστη επιλογή.

Για εφαρμογές όπου οι υπό βελτιστοποίηση μεταβλητές διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, π.χ. ακέραιες, δυαδικές, και πραγματικές μεταβλητές, οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι επίσης μία άριστη επιλογή. Η διαμόρφωσή τους μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να συμπεριλάβει διαφορετικούς τελεστές μετάλλαξης για διαφορετικά τμήματα του χρωμοσώματος.

Για εφαρμογές όπου ο υπολογισμός της κλίσης του διανύσματος είναι αριθμητικά ακριβής και γρήγορος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια μορφή της μεθόδου της *καθοδικής κλίσης*. Οι γενετικοί αλγόριθμοι θα δουλέψουν και σε αυτού του τύπου τις εφαρμογές, αλλά θα φτάσουν τη βέλτιστη περιοχή πολύ πιο αργά από τις μεθόδους «*αναρρίχησης του λόφου*» (hill-climbing).

Εφαρμογές που απαιτούν την εύρεση του ακριβούς ολικού ελάχιστου ίσως είναι μία πρόκληση για τους γενετικούς αλγόριθμους. Οι τελευταίοι είναι καλύτεροι στην εύρεση της περιοχής του ολικού ελάχιστου, αλλά μερικές φορές έχουν πρόβλημα να βρουν τη θέση του ακριβούς ολικού ελάχιστου. Πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τους γενετικούς αλγόριθμους για να φτάσουν κοντά στη βέλτιστη περιοχή και μετά χρησιμοποιούν μία άλλη μέθοδο για την τελική εξερεύνηση.

Μία από τις πιο συχνά παρατηρούμενες δυσκολίες με τους γενετικούς αλγόριθμους είναι ότι συγκρινόμενοι με τις μεθόδους «*αναρρίχησης του λόφου*» γενικά απαιτούν περισσότερους υπολογισμούς της συνάρτησης καταλληλότητας. Αν η επιφάνεια της συνάρτησης καταλληλότητας είναι εντελώς ομαλή, τότε μία μέθοδος αναρρίχησης του λόφου, όπως η *βελτιστοποίηση Simplex* θα συμπεριφέρεται καλύτερα από τον γενετικό αλγόριθμο για ένα δεδομένο αριθμό ανακυκλώσεων.

Δυστυχώς, υπάρχουν συγκεκριμένα προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία αποτελούν μία δύσκολη πρόκληση για τους γενετικούς αλγόριθμους. Μία από τις κύριες περιοχές έρευνας είναι η μελέτη των εφαρμογών αυτού του τύπου και η ανάπτυξη μεθόδων που να προσδιορίζουν προκαταβολικά αν το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι δύσκολο να επιλυθεί με γενετικούς αλγόριθμους. Σχετικά πρόσφατα οι θεωρητικοί των γενετικών αλγορίθμων εντόπισαν μερικές από τις πιο συχνές αιτίες που δυσχεραίνουν την εφαρμογή τους. Μία από αυτές είναι όταν τα γονίδια του χρωμοσώματος δεν είναι κατάλληλα διευθετημένα και το μήκος των σχημάτων*, *L(H)*, είναι υπερβολικά μεγάλο για να επεξεργαστεί από τον γενετικό αλγόριθμο. Σύμφωνα με το θεώρημα του σχήματος, σχήματα μεγαλύτερου μήκους έχουν υψηλότερη πιθανότητα να καταστραφούν από μετάλλαξη και διασταύρωση των γονιδίων. Ένα σχήμα αλλαγής της διευθέτησης όπου τα «0» και τα «1» είναι πιο κοντά μεταξύ τους στο σχήμα του χρωμοσώματος, θα παρεμποδίζει την καταστροφή αυτή μειώνοντας το *L(H)*. Μία αυτόματη μέθοδος αλλαγής της διευθέτησης των χρωμοσωμάτων έχει αναπτυχθεί από τον D. Goldberg.

4.4 Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε

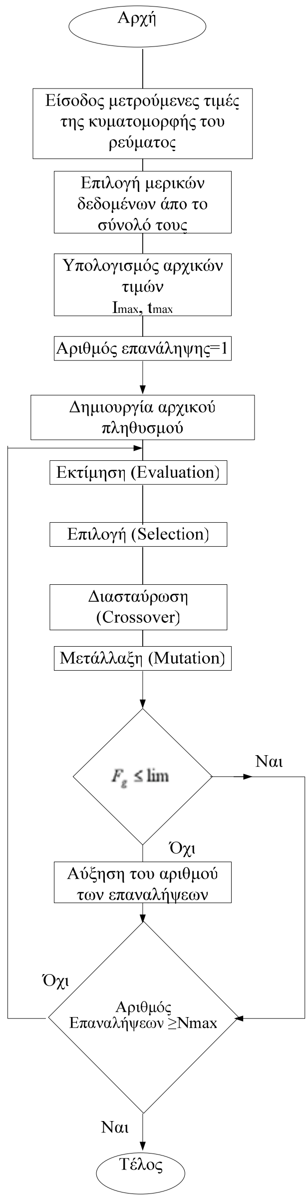
Ένας απλός γενετικός αλγόριθμος βασίζεται στις διαδικασίες της αναπαραγωγής, της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation) για την επίτευξη του ολικού ή μερικώς-ολικού βελτίστου. Για να ξεκινήσει η έρευνα ο γενετικός αλγόριθμος απαιτεί ένα αρχικό σύνολο σημείων P_s, που ονομάζονται πληθυσμός κατ΄ αναλογία με τα βιολογικά συστήματα. Μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιουργεί τον αρχικό πληθυσμό. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν

*Σημείωση: Ένα σχήμα (*H*) ορίζεται ως ένα πρότυπο για την περιγραφή ενός συνόλου χρωμοσωμάτων με παρόμοια τμήματα. Το πρότυπο αποτελείται από πολλαπλά «μηδέν» και «ένα», και από μετα-χαρακτήρες ή σύμβολα «μη ενδιαφέροντος», όπως #. Ο μετα-χαρακτήρας είναι απλά ένα συμβολικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για να υποδηλώνει ότι σε εκείνο το πρότυπο ταιριάζει είτε ένα «0», είτε ένα «1». Σύμφωνα με τον *Holland*, η τάξη ενός σχήματος (*o(H)*) είναι ίση με τον αριθμό των σταθερών θέσεων, δηλαδή των μη μετα-χαρακτήρων, και το μήκος του σχήματος (*L(H)*) είναι ίσο με το συνολικό αριθμό των χαρακτήρων του. Έτσι το σχήμα #00#0 είναι σχήμα τάξης 3 (*o(H)=3*) και έχει μήκος 5 (*L(H)=5*) [34].

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 η 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}.

Ο γενετικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του MATLAB. Ο ίδιος γενετικός αλγόριθμος παράγει εξαιρετικά αποτελέσματα σε αρκετά προβλήματα βελτιστοποίησης. Έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής εδάφους [35], την παραγοντοποίηση πολυδιάστατων πολυωνύμων [36] και για τον υπολογισμό των παραμέτρων δημιουργούμενου τόξου σε ακάθαρτους μονωτήρες [37]. Η λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου, που έχει αναπτυχθεί, περιγράφεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου γενετικού αλγορίθμου

4.5 Απόδειξη της αποτελεσματικότητας του γενετικού αλγορίθμου

Το σημαντικότερο βήμα για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου είναι η επιβεβαίωση της αποτελεσματικής λειτουργίας του. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.7)-(2.10), που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παράχθηκαν δεδομένα αποτελούμενα από 30 ζεύγη τιμών-δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα ήταν η είσοδος του γενετικού αλγορίθμου ώστε να βρεθούν οι ίδιες παράμετροι για τις 4 εξισώσεις, θεωρώντας τα άγνωστα. Για κάθε εξίσωση αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε MATLAB που παρήγαγε το γράφημα της εξίσωσης και επιπλέον έσωζε τα δεδομένα (ρεύμα και χρόνος) σε αρχεία txt, όταν οι παράμετροι είχαν συγκεκριμένες τιμές. Αυτές οι τιμές παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη των Πινάκων 4.1-4.4. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται αυτά τα 30 δεδομένα σημεία. Η επιλογή αυτών των σημείων είναι κοινή και για τις 4 γραφικές παραστάσεις και έχουν επιλεχθεί για χρόνους 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 7.5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 20, 22, 25, 27, 30, 35, 45, 60, 70 ns.

Ο γενετικός αλγόριθμος έχει εφαρμοστεί σε έναν τυχαία παραγόμενο πληθυσμό P_s χρωμοσωμάτων (P_s*=20-100)*. Κάθε παράμετρος διαιρείται σε έναν 20bit δυαδικό αριθμό. Κάθε χρωμόσωμα έχει m μεταβλητές (m=3 ή 4 ή 6 ή 7 για τις εξισώσεις (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) αντίστοιχα) έτσι 60 ή 80 ή 120 ή 140 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 5-20% πιθανότητα μετάλλαξης. Η διαδικασία τερματίζεται όταν N_{max}=100 γενίες ή *lim=0,001.*

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων κάθε εξίσωσης είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συναρτήσης F_g. Η F_g δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F_g = \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| I_i^m - I_i^c \right|}{I_i^m} \tag{4.1}$$

όπου το I_i^m είναι η τιμή του ρεύματος που προέκυψε από τις δεδομένες τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων (2.7)-(2.10) που βρίσκονται στη δεύτερη στήλη των Πινάκων 4.1-4.4. Το I_i^c είναι η υπολογιζόμενη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης για τις άγνωστες παραμέτρους των εξισώσεων (2.7)-(2.10) Ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει τις άγνωστες παραμέτρους των τεσσάρων αυτών εξισώσεων οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στην τρίτη στήλη των Πινάκων 4.1-4.4.

Το F_{gtotal} αντιπροσωπεύει το συνολικό σφάλμα και δίνεται από τη ακόλουθη εξίσωση: $F_{gtotal} = \sum_{j=1}^{N_{total}} \frac{|I_j^m - I_j^c|}{I_j^m}$ (4.2)

Από τις τιμές των δύο σφαλμάτων για κάθε εξίσωση μπορούν να συναχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για το ποια εξίσωση δίνει τα καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα.

	Δεδομένη τιμή	Γενετικός αλγόριθμος
i_0 [A]	15	14,98
t_1 [ns]	50	49,79
t_2 [ns]	5	4,98
F_g	-	0,1380

Πίνακας 4.1: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης (2.7)

	Δεδομένη τιμή	Γενετικός Αλγόριθμος
i_1 [A]	15	14,39
i_2 [A]	12	11,39
t_1 [ns]	65	69,53
t_2 [ns]	10	9,61
F_g	-	0,0989

Πίνακας 4.2: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης (2.8)

	Δεδομένη τιμή	Γενετικός Αλγόριθμος
A [A]	13	10,59
B [A]	0,4	0,41
t_1 [ns]	5	5,06
t_2 [ns]	10	12,53
σ_1 [ns]	1,414	1,510
σ_2 [ns]	35,35	33,338
F_g	-	1,3788

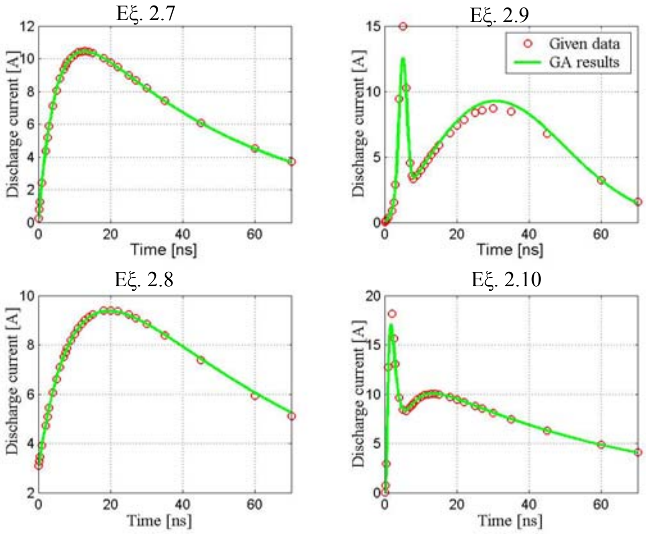
Πίνακας 4.3: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης (2.9)

	Δεδομένη τιμή	Γενετικός Αλγόριθμος
i_1 [A]	21,9	19,69
i_2 [A]	10	10,00
t_1 [ns]	1,3	1,32
t_2 [ns]	1,7	1,79
t_3 [ns]	6	6,05
t_4 [ns]	58	56,85
n	3	2,93
F_g	-	0,5628

Πίνακας 4.4: Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων και των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης (2.10)

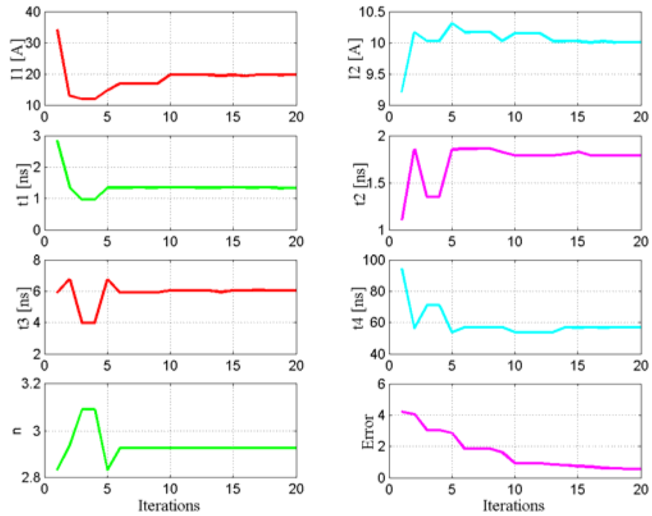
Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται σε κοινό γράφημα το ρεύμα εκφόρτισης με δεδομένες τιμές παραμέτρων των Πινάκων 4.1-4.4 και το ρεύμα εκφόρτισης για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων μετά τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου για τις εξισώσεις (2.7)-(2.10). Είναι προφανές ότι ο γενετικός αλγόριθμος είναι αρκετά αποδοτικός δεδομένου ότι οι δύο γραφικές είναι σχεδόν ταυτόσημες.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2 αποδεικνύουν ότι ο γενετικός αλγόριθμος δίνει ακριβή αποτελέσματα και οι βελτιστοποιημένες τιμές των αγνώστων παραμέτρων της εξίσωσης είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές. Φυσικά και παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των μετρούμενων και των παραγόμενων δεδομένων εφόσον τα μετρούμενα δεδομένα δεν είναι τόσο ομαλά όσο τα αναλυτικά παραγόμενα δεδομένα, αλλά με τη σωστή επιλογή του αριθμού των γενιών μπορούμε να λάβουμε ακριβή αποτελέσματα.



Σχήμα 4.2: Σύγκριση μεταξύ των βελτιστοποιημένων και των δεδομένων τιμών του ρεύματος εκφόρτισης για τις εξισώσεις (2.7)-(2.10)

Μετά από μερικές επαναλήψεις οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων συγκλίνουν σε μία οριακές τιμές που βρίσκονται πολύ κοντά στις αληθινές. Στο Σχήμα 4.3 καταδεικνύονται οι τιμές των 7 παραμέτρων της (2.10), όταν αυτή χρησιμοποιείται σαν συνάρτηση επαναλήψεων. Το σφάλμα (F_g) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Παρατηρούμε ότι για τις περισσότερες τιμές των παραμέτρων ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει μετά από λίγες μόνο επαναλήψεις.



Σχήμα 4.3: Οι βελτιστοποιημένες τιμές των επτά παραμέτρων για την εξίσωση (2.10)

4.6 Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου σε πειραματικά δεδομένα

Όπως είναι προφανές από τα προηγούμενα ο γενετικός αλγόριθμος είναι αρκετά αποτελεσματικός, εφόσον οι τιμές των παραμέτρων που υπολογίζει έχουν πολύ μικρό σφάλμα. Τώρα, ο γενετικός αλγόριθμος θα εφαρμοστεί σε πειραματικά δεδομένα, που συλλέχθηκαν με τη βοήθεια της πειραματικής διάταξης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Δίνοντας ως δεδομένα εισόδου το ρεύμα εκφόρτισης μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει και βελτιστοποιεί τις παραμέτρους των εξισώσεων (2.7)-(2.10). Στην εξίσωση (2.10) η σταθερά n έχει σταθερή τιμή ίση με 3. Έτσι η (2.10) έχει 6 άγνωστες παραμέτρους, όπως και η (2.9). Από το σφάλμα F_g κάθε εξίσωσης προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την καλύτερη και ακριβέστερη εξίσωση.

Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να γίνει 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 2250 σημεία, δεν χρησιμοποιείται. Αντ' αυτού χρησιμοποιούνται 8 διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας των τιμών, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

Στον παρακάτω πίνακα μπορεί κανείς να δει την επιλογή των σημείων για τις 8 συναρτήσεις δειγματοληψίας και για 3 διαφορετικές χρονικές διάρκειες του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (30, 50, 90ns). Οι διαφορετικές χρονικές διάρκειες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 έγιναν με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση που έχει ο αριθμός των σημείων στην απόδοση του γενετικού αλγορίθμου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πιο κρίσιμη χρονική περίοδος της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης είναι τα πρώτα ns, τα οποία προκαλούν και τα μεγαλύτερα προβλήματα στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Ο αριθμός των επιλεγμένων σημείων φαίνεται επίσης στον παρακάτω πίνακα.

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

Πίνακας 4.5: Συναρτήσεις δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου

Κεφάλαιο 5

Σύγκριση αποτελεσμάτων

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σκοπός είναι να φανεί και εποπτικά όχι μόνο ποια είναι η εξίσωση που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας, αλλά και οι διαφορές που υπάρχουν για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας για διαφορετικές χρονικές περιόδους της (30ns, 50ns, 90ns) σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

5.2 Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου (ΓΑ)

Στους πίνακες 5.1-5.16, που ακολουθούν, παρατίθενται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων και τα σφάλματά των τεσσάρων εξισώσεων για διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας και διαφορετικές χρονικές περιόδους (30ns, 50ns, 90ns).

Εξ. (2.7)	**exp4**	**exp6**	**exp8**	**Idata10**	**Idata15**	**Idata20**	**exp4N**	**Idata20N**
I_1**[A]**	2,93	3,05	3,05	3,04	3,04	3,18	3,28	4,41
t_1**[ns]**	433,59	190,62	162,50	168,75	161,71	175,80	159,38	42,65
t_2**[ns]**	0,07	0,04	0,00	0,06	1,57	0,63	0,20	0,25
F_g	12,66	9,81	7,89	6,54	8,45	6,74	29,87	20,74
F_{gsxima}	667,89	557,76	545,09	544,67	553,52	557,24	540,47	944,18

Πίνακας 5.1: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.7) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 30ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.8)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	4,37	4,60	3,65	3,18	3,29	4,13	4,37	4,95
I_2[A]	2,19	2,85	3,12	2,42	2,80	3,64	2,19	4,52
t_1[ns]	103,71	103,63	106,05	104,87	97,50	102,11	103,71	35,25
t_2[ns]	17,49	17,18	5,00	0,16	0,00	9,62	17,49	0,35
F_g	14,81	11,31	7,98	12,26	7,64	7,00	14,81	20,84
F_{gsxima}	480,28	502,62	501,07	527,52	527,36	493,45	818,36	1099,60

Πίνακας 5.2: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.8) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 30ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.9)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A[A]	2,39	1,86	2,35	1,88	2,42	2,25	2,50	5,32
B[A]	0,17	0,17	0,14	0,14	0,19	0,16	0,16	0,18
t_1[ns]	5,47	5,18	6,17	5,17	4,99	5,00	2,24	1,46
t_2[ns]	13,44	3,27	7,21	1,48	3,49	12,91	0,10	3,16
σ_1[ns]	4,23	5,47	5,02	10,00	3,75	5,42	8,18	1,25
σ_2[ns]	21,17	39,20	56,08	60,32	32,30	26,70	50,21	37,52
F_g	11,83	6,95	6,29	10,65	6,24	5,28	34,53	19,49
F_{gsxima}	1340,50	791,95	943,97	545,62	1127,20	1134,40	284,68	917,70

Πίνακας 5.3: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.9) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 30ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.10)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	3,75	3,28	3,49	4,00	3,56	4,03	5,22	5,37
I_2[A]	3,05	4,16	3,72	4,22	3,57	4,32	3,49	3,09
t_1[ns]	0,17	0,28	0,08	0,00	0,42	0,14	0,29	0,30
t_2[ns]	14,89	17,68	18,46	16,07	17,90	12,80	9,10	8,42
t_3[ns]	23,72	39,84	42,77	40,18	32,11	39,17	24,12	20,39
t_4[ns]	69,94	23,05	16,36	25,10	56,26	19,30	50,01	58,75
F_g	9,94	6,46	5,37	4,64	5,90	4,74	21,64	15,57
F_{gsxima}	353,37	339,88	760,04	240,68	575,73	569,29	281,66	336,67

Πίνακας 5.4: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.10) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 30ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.7)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	5,43	4,39	5,63	4,22	4,39	4,49	3,24	3,61
t_1[ns]	87,50	137,51	84,12	146,88	131,53	137,52	287,97	233,48
t_2[ns]	13,96	12,02	14,79	10,44	11,72	12,50	0,19	0,17
F_g	23,70	15,50	12,25	9,47	13,06	10,02	35,72	24,39
F_{gsxima}	555,85	689,09	552,82	685,39	657,26	719,48	667,46	745,87

Πίνακας 5.5: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.7) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 50ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.8)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	13,82	6,03	6,83	5,63	16,04	5,13	5,87	4,47
I_2[A]	11,75	4,14	5,23	4,37	14,12	4,61	3,56	4,38
t_1[ns]	77,19	103,75	87,82	91,18	68,99	102,59	99,64	97,44
t_2[ns]	47,98	28,13	27,19	18,75	45,59	15,17	28,11	0,25
F_g	16,56	12,25	9,77	15,22	10,54	8,15	41,52	25,72
F_{gsxima}	742,85	676,97	646,23	546,48	698,67	617,08	467,94	606,53

Πίνακας 5.6: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.8) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 50ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.9)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A[A]	1,83	2,21	2,54	1,87	2,19	2,00	2,54	6,90
B[A]	0,15	0,15	0,17	0,16	0,13	0,16	0,14	0,31
t_1[ns]	5,25	5,47	5,33	5,82	4,94	5,25	3,15	1,11
t_2[ns]	0,02	10,66	3,11	9,38	12,31	4,67	3,19	0,12
σ_1[ns]	6,73	5,17	4,06	5,49	6,88	5,63	8,15	0,78
σ_2[ns]	51,57	37,49	40,30	36,99	40,18	41,28	51,86	31,19
F_g	13,22	9,36	8,32	13,95	8,19	6,90	38,16	27,41
F_{gsxima}	247,51	671,28	727,55	725,56	488,04	631,11	189,48	1289,70

Πίνακας 5.7: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.9) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 50ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.10)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	3,77	3,23	3,07	3,27	3,76	4,12	4,92	5,14
I_2[A]	3,40	2,81	2,97	2,66	3,88	3,16	3,16	3,17
t_1[ns]	0,26	0,49	0,76	0,19	0,03	0,12	0,24	0,27
t_2[ns]	13,76	20,14	17,73	24,61	17,95	13,75	9,40	10,65
t_3[ns]	26,53	24,74	24,09	26,36	38,70	25,02	19,87	22,59
t_4[ns]	50,23	89,85	79,98	78,59	27,09	66,12	106,56	88,83
F_g	11,44	7,70	6,54	5,10	6,75	5,57	22,79	17,15
F_{gsxima}	277,79	448,89	428,19	379,34	222,43	369,92	561,30	525,83

Πίνακας 5.8: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.10) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 50ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.7)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	34,85	34,95	34,74	34,85	30,78	34,93	3,64	4,35
t_1[ns]	31,95	31,96	31,95	31,96	32,04	30,72	103,13	74,61
t_2[ns]	24,74	24,74	24,71	24,74	23,91	23,75	0,19	0,25
F_g	36,93	24,80	18,66	14,88	23,79	17,59	61,75	37,55
F_{gsxima}	348,87	348,71	348,74	348,80	348,58	349,85	509,77	537,81

Πίνακας 5.9: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.7) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.8)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	8,28	9,88	9,71	8,78	10,08	11,43	6,10	4,69
I_2[A]	7,19	9,37	9,22	8,12	9,53	10,94	3,75	4,27
t_1[ns]	51,04	55,31	45,31	56,07	54,53	40,26	69,37	85,05
t_2[ns]	18,64	18,68	18,28	16,90	18,75	18,40	18,43	0,32
F_g	36,69	24,12	17,83	35,98	23,71	17,04	63,75	37,64
F_{gsxima}	366,21	737,90	361,32	611,75	742,45	354,73	426,23	595,44

Πίνακας 5.10: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.8) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.9)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A[A]	2,03	1,87	2,50	1,97	2,09	2,54	2,82	6,87
B[A]	0,15	0,15	0,14	0,12	0,12	0,13	0,11	0,16
t_1[ns]	4,33	5,64	6,14	5,44	7,32	6,14	3,27	1,09
t_2[ns]	0,77	0,00	1,95	9,56	6,35	6,65	14,85	1,53
σ_1[ns]	7,52	6,25	4,83	8,76	3,87	4,84	8,70	0,78
σ_2[ns]	53,12	53,66	52,80	50,01	51,24	51,45	46,75	51,56
F_g	18,99	13,45	10,26	20,35	17,57	10,46	46,84	23,57
F_{gsxima}	178,14	185,69	199,96	195,62	266,57	212,01	215,76	322,55

Πίνακας 5.11: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.9) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.10)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	3,57	3,93	2,80	3,47	3,15	3,45	4,69	4,69
I_2[A]	3,63	3,98	4,41	3,69	3,75	3,69	3,81	4,34
t_1[ns]	0,23	0,14	1,49	0,27	0,78	0,80	0,23	0,19
t_2[ns]	17,64	15,59	17,42	18,72	18,28	16,07	11,24	12,83
t_3[ns]	34,37	37,06	44,65	37,18	35,88	35,74	30,47	39,70
t_4[ns]	33,10	29,87	25,38	30,65	31,24	31,23	35,94	27,46
F_g	19,00	12,78	11,44	8,35	13,06	10,85	32,35	22,41
F_{gsxima}	186,75	184,30	109,27	182,84	194,87	206,80	212,27	200,85

Πίνακας 5.12: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.10) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +2kV)

Εξ. (2.7)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	31,17	28,67	34,84	35,75	33,23	33,90	8,44	9,18
t_1[ns]	38,28	39,55	37,60	36,64	38,01	37,30	87,50	78,22
t_2[ns]	21,09	20,70	22,02	21,68	21,71	21,39	0,20	0,24
F_g	32,14	21,12	16,00	31,93	21,12	15,80	59,50	36,71
F_{gsxima}	317,79	319,95	317,34	315,96	317,51	317,75	495,27	517,09

Πίνακας 5.13: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.7) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +4kV)

Εξ. (2.8)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	18,52	18,22	16,40	18,05	17,53	19,61	8,91	9,77
I_2[A]	17,81	17,50	15,71	17,34	16,84	18,91	8,79	9,07
t_1[ns]	57,87	58,05	63,32	58,13	50,22	55,31	82,85	73,36
t_2[ns]	17,46	17,49	16,99	17,04	17,50	17,48	0,24	0,28
F_g	31,56	20,49	15,65	32,80	21,52	15,64	60,80	36,47
F_{gsxima}	689,52	656,82	646,50	665,19	335,09	706,17	509,23	537,87

Πίνακας 5.14: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.8) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +4kV)

Εξ. (2.9)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
A[A]	4,06	3,75	5,57	5,96	5,00	5,09	6,25	11,20
B[A]	0,27	0,25	0,32	0,29	0,29	0,23	0,29	0,31
t_1[ns]	4,36	3,13	5,67	4,99	6,25	5,93	3,13	1,28
t_2[ns]	1,52	3,13	0,00	0,43	0,13	9,41	0,34	2,99
σ_1[ns]	8,75	17,50	4,01	4,77	4,53	4,25	6,25	0,95
σ_2[ns]	55,01	55,35	53,92	54,92	54,68	51,58	54,58	51,56
F_g	25,27	16,95	13,43	24,13	15,02	12,67	50,68	28,85
F_{gsxima}	209,70	194,64	250,92	229,84	235,35	267,40	226,27	348,05

Πίνακας 5.15: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.9) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +4kV)

Εξ. (2.10)	exp4	exp6	exp8	Idata10	Idata15	Idata20	exp4N	Idata20N
I_1[A]	7,16	7,05	7,25	5,62	6,91	6,03	9,21	10,76
I_2[A]	7,13	6,80	6,61	7,81	7,30	6,39	7,74	9,67
t_1[ns]	0,31	0,24	0,20	0,34	0,38	1,13	0,19	0,19
t_2[ns]	14,99	16,93	15,58	29,98	18,73	33,28	11,88	11,41
t_3[ns]	28,71	28,11	24,97	48,12	34,37	43,38	29,70	43,65
t_4[ns]	41,41	42,35	48,55	24,99	34,08	29,13	37,85	25,00
F_g	21,87	13,71	11,46	22,29	14,39	11,51	33,94	23,62
F_{gsxima}	227,30	218,87	229,38	217,07	216,50	217,26	232,75	263,83

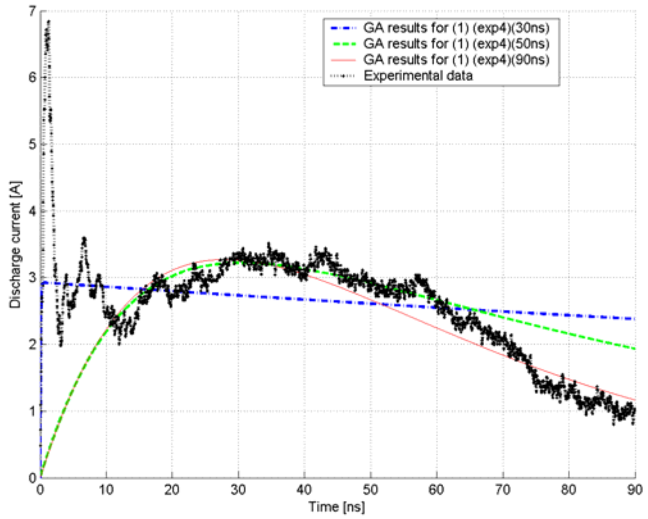
Πίνακας 5.16: Βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων της (2.10) χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα για διάρκεια του ρεύματος εκφόρτισης 90ns (τάση φόρτισης +4kV)

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

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για τάση φόρτισης +2kV, για την ίδια εξίσωση και την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας αλλά για διαφορετική διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας (30ns, 50ns, 90ns).

5.3.1 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (1)[1]

Στο Σχήμα 5.1 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 στα 30ns προσεγγίζουν καλύτερα τη μέγιστη τιμής I_{max} την οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζουν με ακρίβεια. Όμως η (1) στα 30ns χάνει στην προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις άλλες δύο συναρτήσεις στα 50 και 90ns. Ο γενετικός αλγόριθμος για τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 90ns προσεγγίζει καλύτερα της ουρά της κυματομορφής πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνει πιο πολλά σημεία στο σιάστημα 0-90ns.

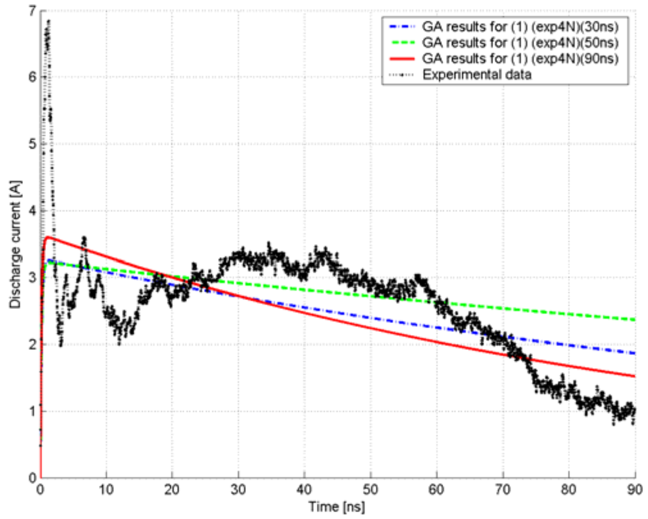


Σχήμα 5.1: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.2 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγόριθμου για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν τη μέγιστη τιμή I_{max} την οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζουν με ακρίβεια, πράγμα αναμενόμενο

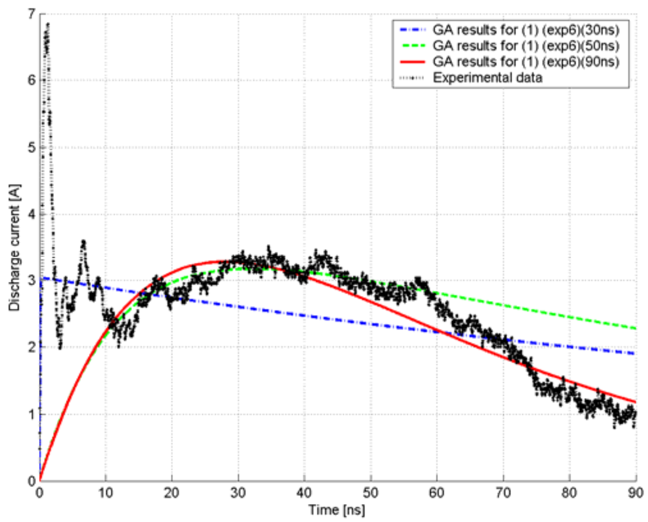
[1] **ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Στο σύνολο του παρόντος κεφαλαίου και σε όσα ακολουθούν η εξίσωση 2.7 θα αντιστοιχεί στην 1, η εξίσωση 2.8 στη 2 , η εξίσωση 2.9 στην 3 και η εξίσωση 2.10 στην 4.

εφόσον η exp4N έχει όλα τα σημεία από 0-2ns. Ο γενετικός αλγόριθμος για τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 90ns προσεγγίζει καλύτερα της ουρά της κυματομορφής πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνει πιο πολλά σημεία στο διάστημα 0-90ns



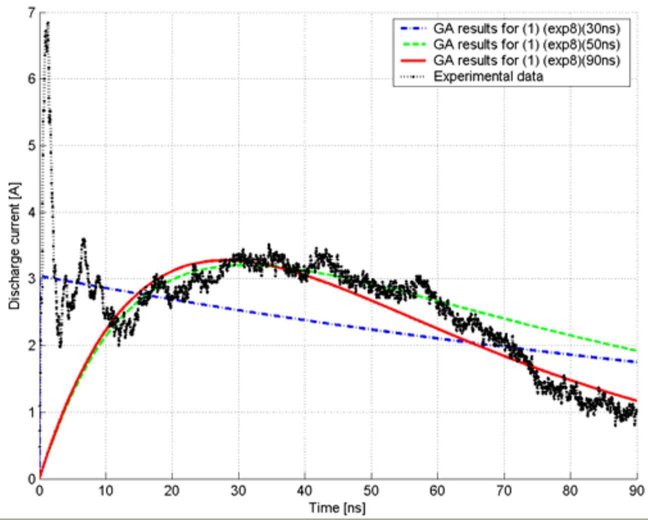
Σχήμα 5.2: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.3 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns, συγκρινόμενη με τις άλλες δύο, εντοπίζει το πρώτο μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



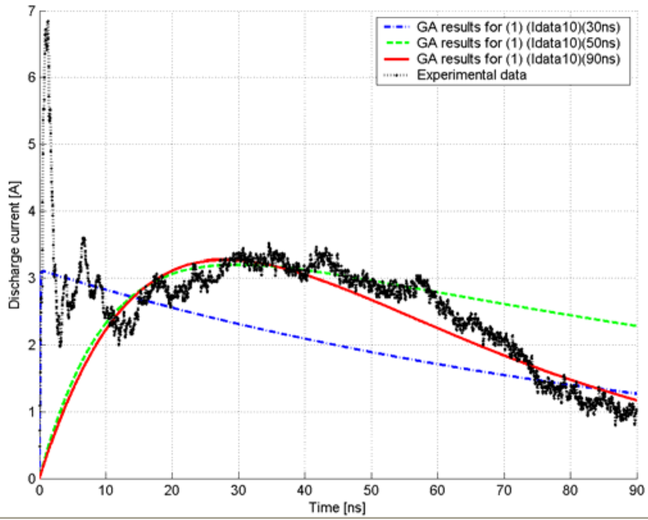
Σχήμα 5.3: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.4 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 στα 30ns προσεγγίζουν καλύτερα τη μέγιστη τιμή I_{max}, την οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζουν με ακρίβεια. Όμως η (1) στα 30ns χάνει στην προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις άλλες δύο συναρτήσεις στα 50 και 90ns. Ο γενετικός αλγόριθμος για τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 90ns προσεγγίζει καλύτερα της ουρά της κυματομορφής πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνει πιο πολλά σημεία στο διάστημα 0-90ns.



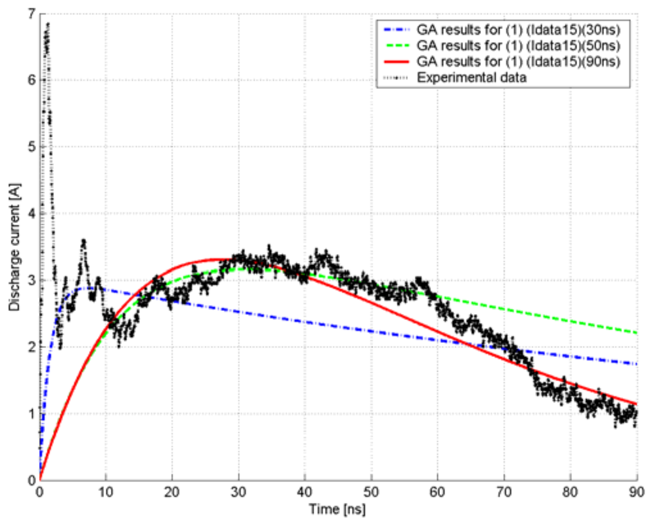
Σχήμα 5.4: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.5 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata 10 στα 30ns επιτυγχάνουν την καλύτερη προσέγγιση της μέγιστης τιμής I_{max} την οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζει σε ακρίβεια. Όμως, η (1) στα 30ns χάνει στην προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις άλλες δύο συναρτήσεις στα 50 και 90ns. Ο γενετικός αλγόριθμος για τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 90ns προσεγγίζει καλύτερα την ουρά της κυματομορφής πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνει πιο πολλά σημεία στο διάστημα 0-90ns.



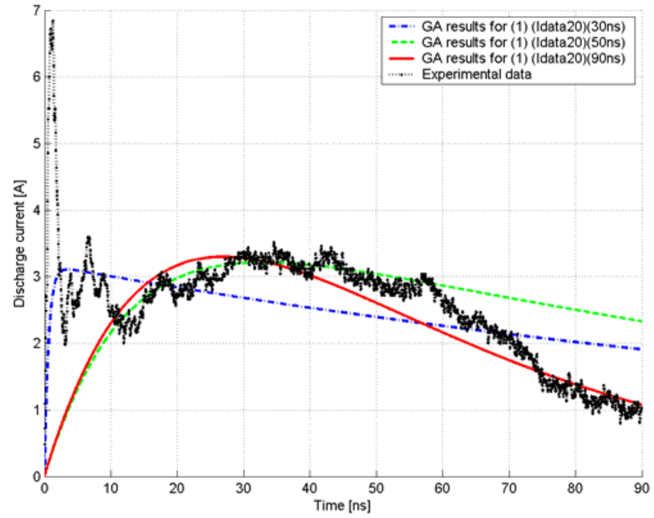
Σχήμα 5.5: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.6 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Αυτό συμβαίνει για η συνάρτηση Idata15 με διάρκεια 30ns έχει λιγότερα σημεία. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



Σχήμα 5.6: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.7 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 στα 30ns επιτυγχάνουν την καλύτερη προσέγγιση της μέγιστης τιμής I_{max} την οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν προσεγγίζουν με ακρίβεια. Όμως, η (1) στα 30ns χάνει στην προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις άλλες δύο συναρτήσεις στα 50 και 90ns. Ο γενετικός αλγόριθμος για τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 90ns προσεγγίζει καλύτερα της ουρά της κυματομορφής πράγμα αναμενόμενο εφ' όσον περιλαμβάνει πιο πολλά σημεία από 0 έως 90ns.



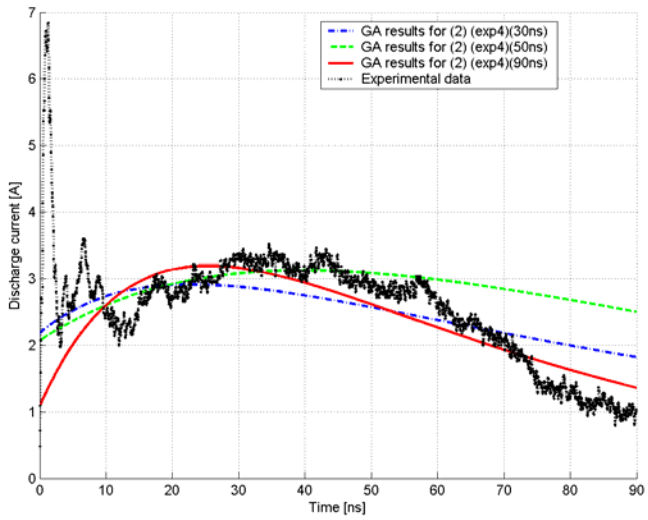
Σχήμα 5.7: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.8 παρατηρούμε ότι όλες οι συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο I_{max} χωρίς ωστόσο να το προσεγγίζουν με ακρίβεια. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.7 και 5.8 προκύπτει ότι καλύτερη προσέγγιση του μεγίστου γίνεται από την Idata20N διότι έχει όλα τα σημεία στο διάστημα 0-2ns. Η ουρά δεν προσεγγίζεται ικανοποιητικά για καμία διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας.

Σχήμα 5.8: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για την (1) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

5.3.2 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (2)

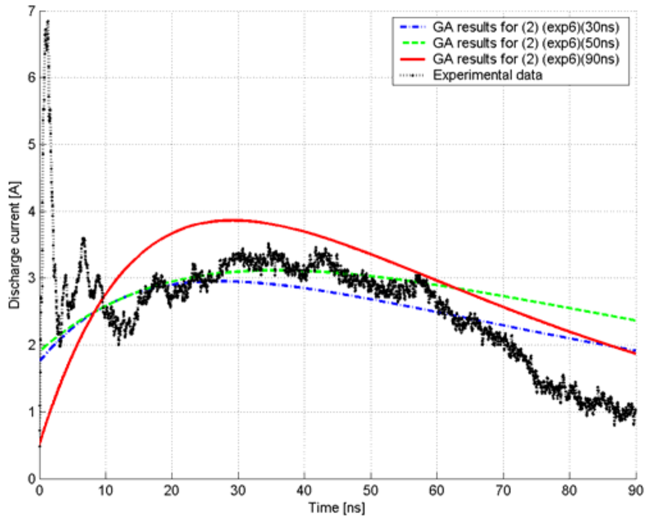
Στο Σχήμα 5.9 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος ούτε στο πρώτο μέγιστο, ούτε στην ουρά, ούτε στο δεύτερο μέγιστο.



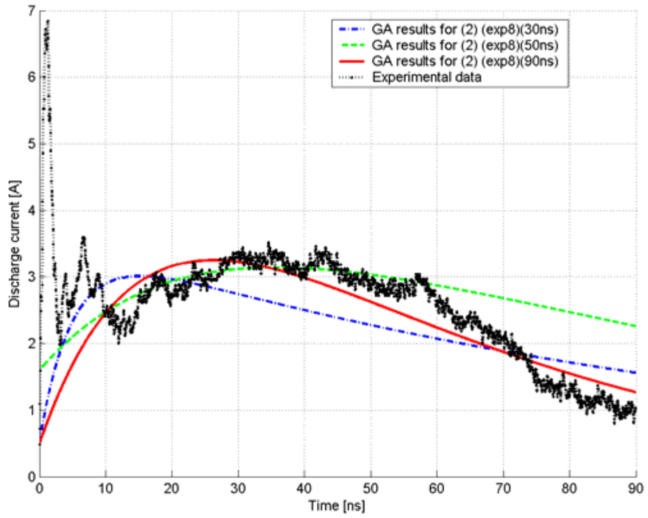
Σχήμα 5.9: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στα Σχήματα 5.10-5.12 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος ούτε στο πρώτο μέγιστο, ούτε στην ουρά, ούτε στο δεύτερο μέγιστο.

Σχήμα 5.10: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

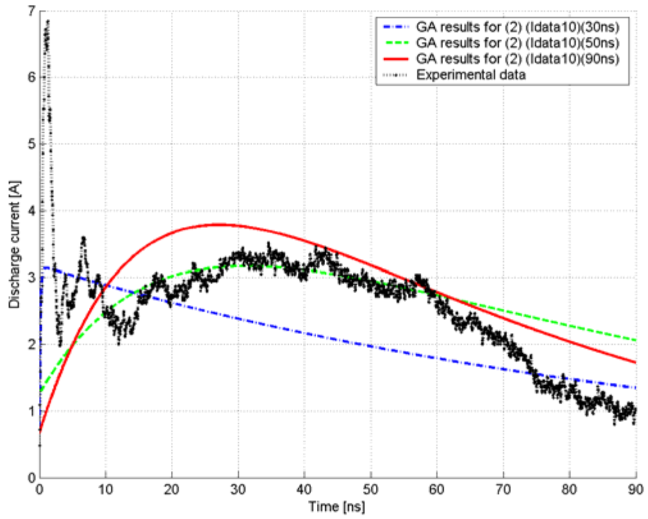


Σχήμα 5.11: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns



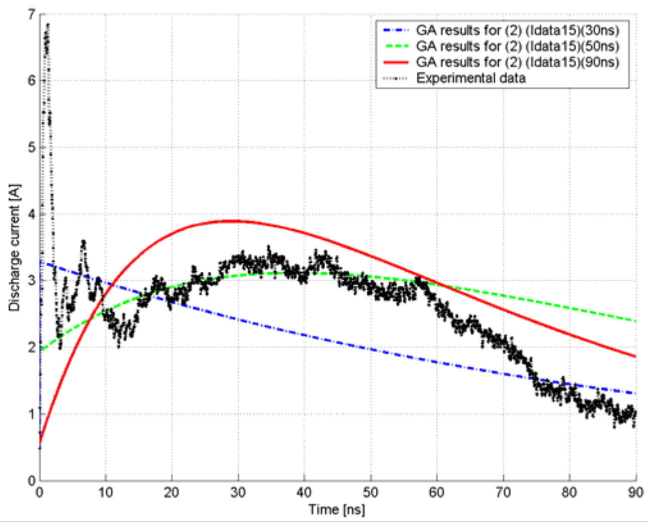
Σχήμα 5.12: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.13 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns, συγκρινόμενη με τις άλλες δύο, εντοπίζει το πρώτο μέγιστο. Η πειραματική κυματομορφή του ρεύματος δεν προσεγγίζεται για καμία διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας.



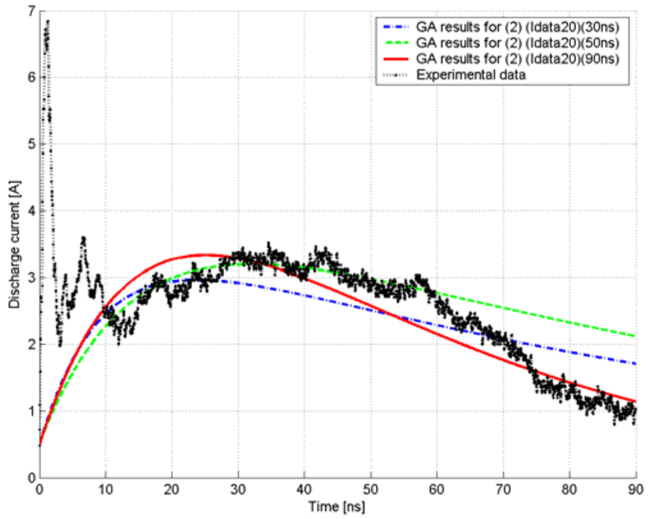
Σχήμα 5.13: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.14 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns, συγκρινόμενη με τις άλλες δύο, εντοπίζει το πρώτο μέγιστο. Κατά τα άλλα, καμία από τις τρεις καμπύλες δεν παρέχει αξιόλογη προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης.



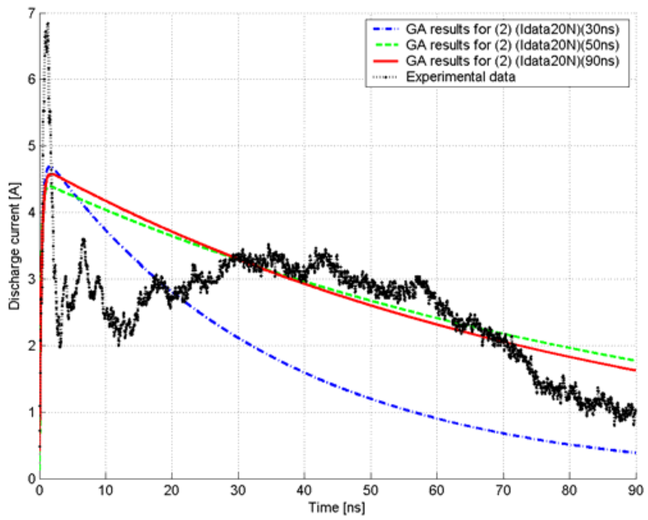
Σχήμα 5.14: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.15 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο, ούτε το δεύτερο μέγιστο, ενώ η ουρά προσεγγίζεται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 90ns.



Σχήμα 5.15: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

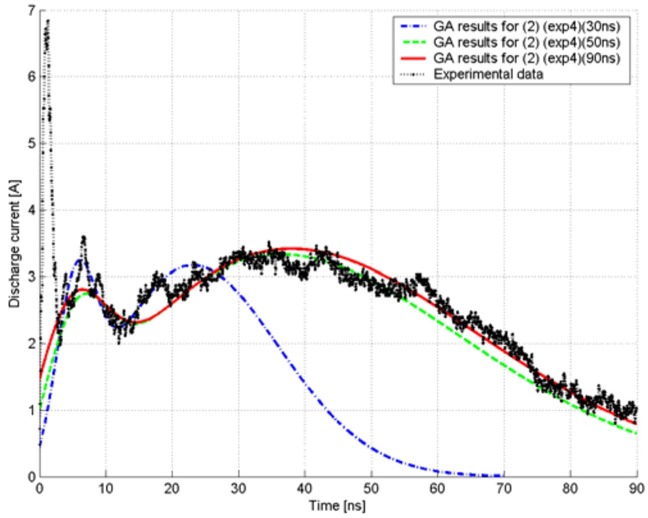
Στο Σχήμα 5.16 παρατηρούμε ότι όλες οι συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο πράγμα αναμενόμενο εφόσον η Idata20N περιέχει όλα τα σημεία από 0 έως 20ns. Ωστόσο καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την υπόλοιπη πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



Σχήμα 5.16: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για την (2) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

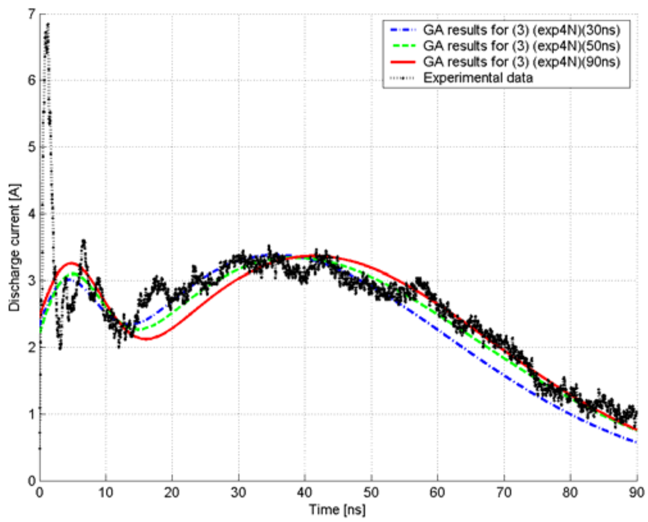
5.3.3 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (3)

Στο Σχήμα 5.17 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το δεύτερο μέγιστο με καλύτερη προσέγγιση τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 30ns. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 50ns και 90ns.



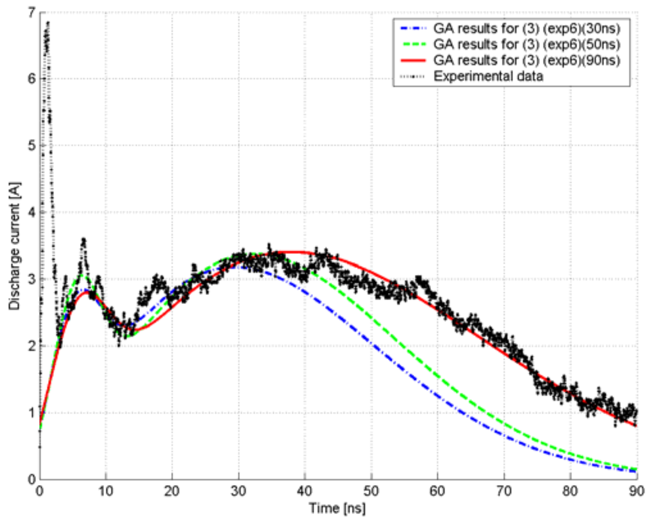
Σχήμα 5.17: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.18 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το δεύτερο μέγιστο χωρίς όμως να το προσεγγίζουν ικανοποιητικά, αλλά αποτυγχάνουν στον εντοπισμό του πρώτου μεγίστου. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σειρά αυξανομένης ακρίβειας από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns, 50ns και 90ns. Το ενδιάμεσο κομμάτι (από 20ns έως 50ns) προσεγγίζεται με σειρά αυξανομένης ακρίβειας από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns, 50ns και 30ns.



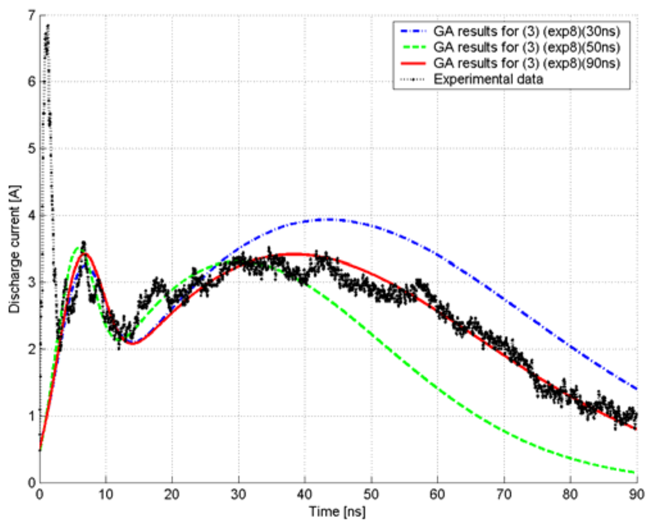
Σχήμα 5.18: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.19 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το δεύτερο μέγιστο χωρίς όμως να το προσεγγίζουν ικανοποιητικά ενώ αποτυγχάνουν στον προσδιορισμό του πρώτου μεγίστου. Η ουρά προσεγγίζεται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



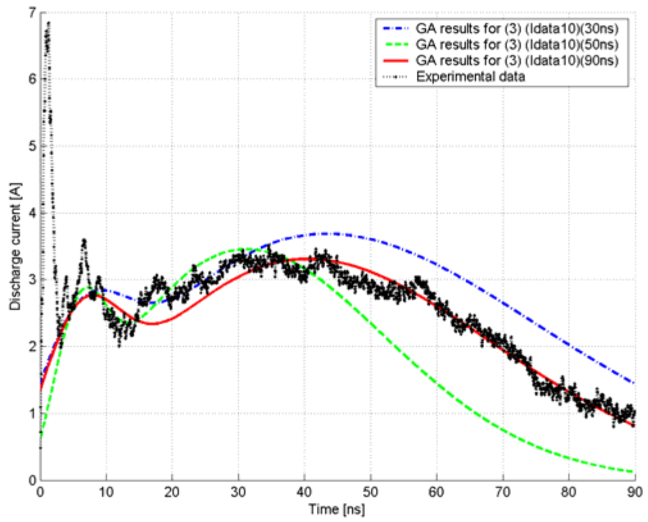
Σχήμα 5.19: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.20 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας δίνουν αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση του δεύτερου μεγίστου, ενώ δεν προσεγγίζουν καθόλου το πρώτο μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται ακριβέστερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας 90ns.



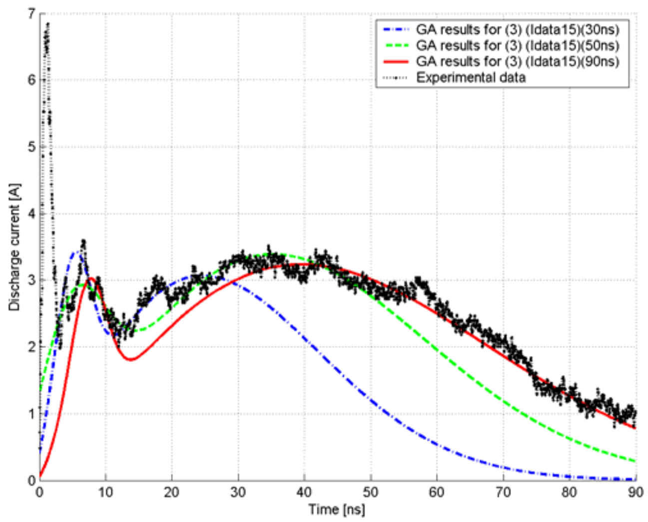
Σχήμα 5.20: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.21 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το δεύτερο μέγιστο χωρίς όμως να το προσεγγίζουν ικανοποιητικά, ενώ αποτυγχάνουν στον προσδιορισμό του πρώτου μεγίστου. Η ουρά προσεγγίζεται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



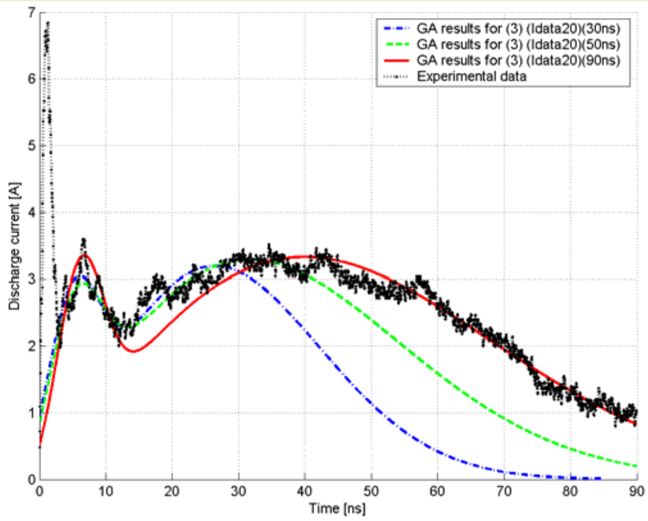
Σχήμα 5.21: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.22 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το δεύτερο μέγιστο με καλύτερη προσέγγιση τη συνάρτηση για διάρκεια 30ns. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σειρά αυξανομένης ακρίβειας από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 50ns και 90ns.



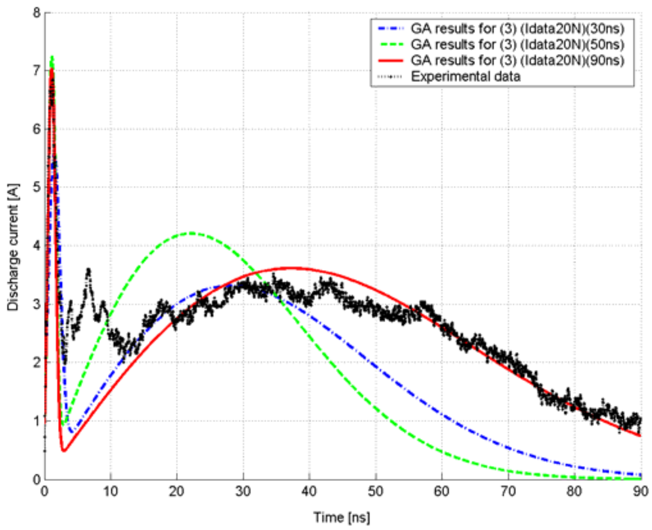
Σχήμα 5.22: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.23 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας δεν εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο αλλά εντοπίζουν το δεύτερο μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σειρά αυξανομένης ακρίβειας από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns. Το ενδιάμεσο κομμάτι (από 15 έως 40ns) προσεγγίζεται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 50ns.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

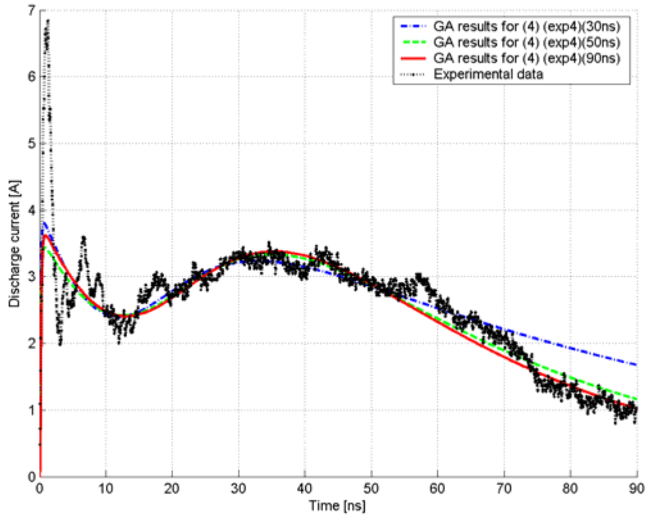
Στο Σχήμα 5.24 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο εφόσον περιέχουν όλα τα σημεία 0-2ns, ενώ δεν προσεγγίζουν το δεύτερο μέγιστο Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



Σχήμα 5.24: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για την (3) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

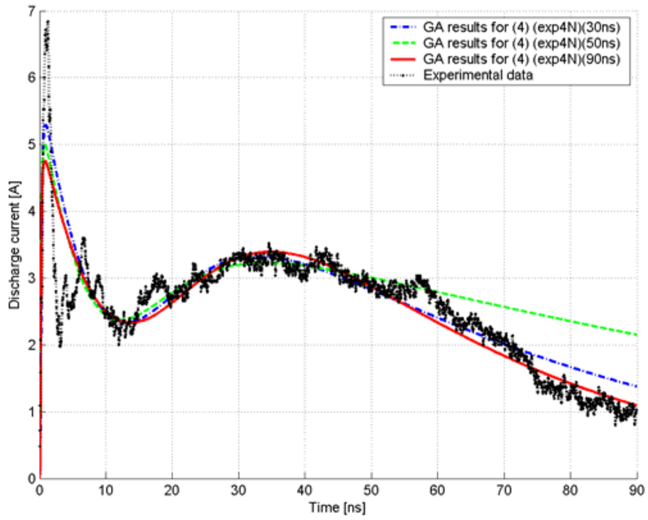
5.3.4 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (4)

Στο Σχήμα 5.25 παρατηρούμε ο γενετικός αλγόριθμος και για τις τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζει στον ίδιο περίπου βαθμό το πρώτο μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σειρά αυξανομένης ακρίβειας από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns, 50ns και 90ns. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το δεύτερο μέγιστο δεν προσεγγίζεται από καμία εκ των τριών συναρτήσεων.



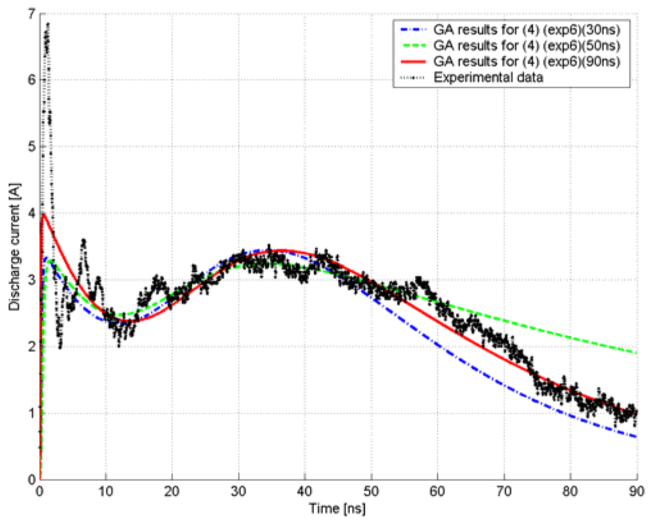
Σχήμα 5.25: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.26 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο με τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns να δίνει καλύτερη προσέγγιση. Η ουρά αλλά και η συνολική κυματομορφή προσεγγίζεται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



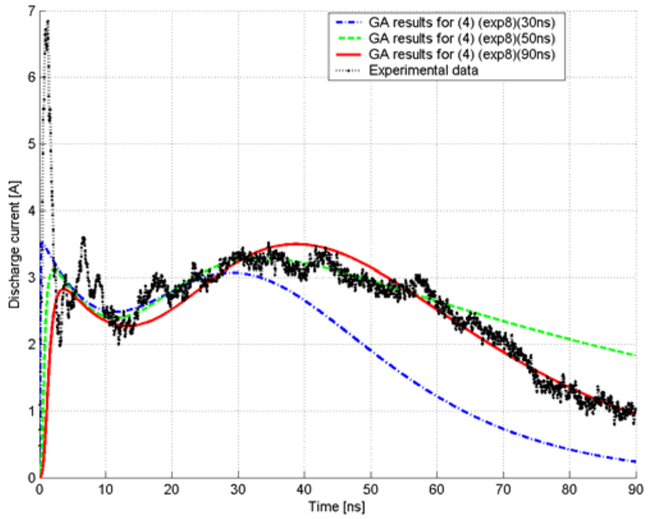
Σχήμα 5.26: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.27 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο με τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns να δίνει καλύτερη προσέγγιση. Η ουρά αλλά και η συνολική κυματομορφή προσεγγίζονται καλύτερα από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



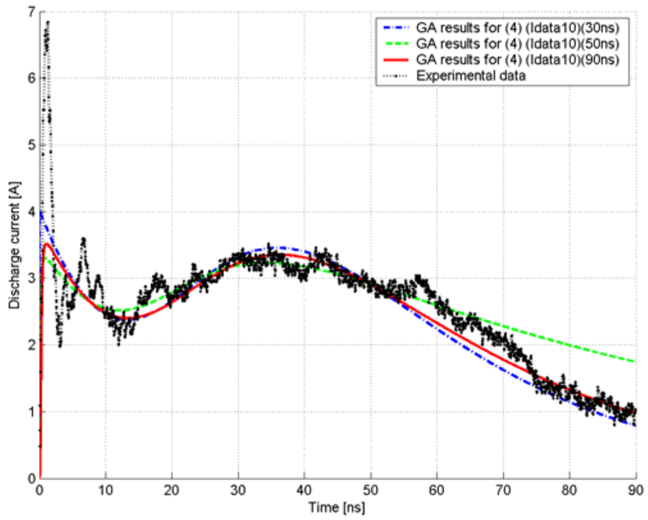
Σχήμα 5.27: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.28 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns εντοπίζει καλύτερα το πρώτο μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



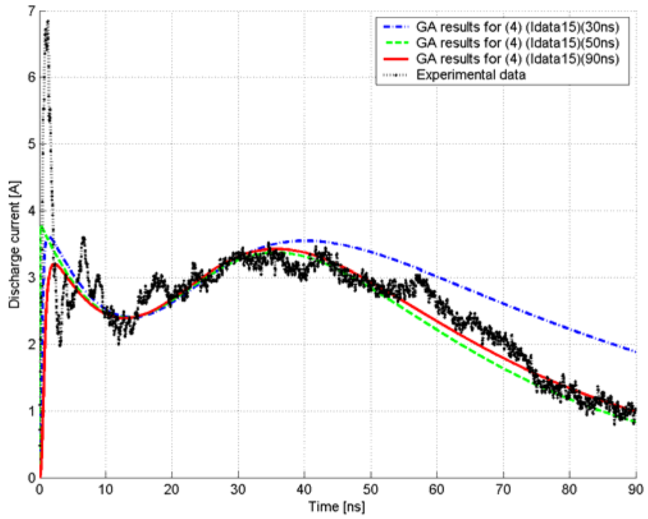
Σχήμα 5.28: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.29 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο με τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 30ns να το εντοπίζει καλύτερα. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά με σειρά αυξανομένης ακρίβειας από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 50ns, 30ns και 90ns.



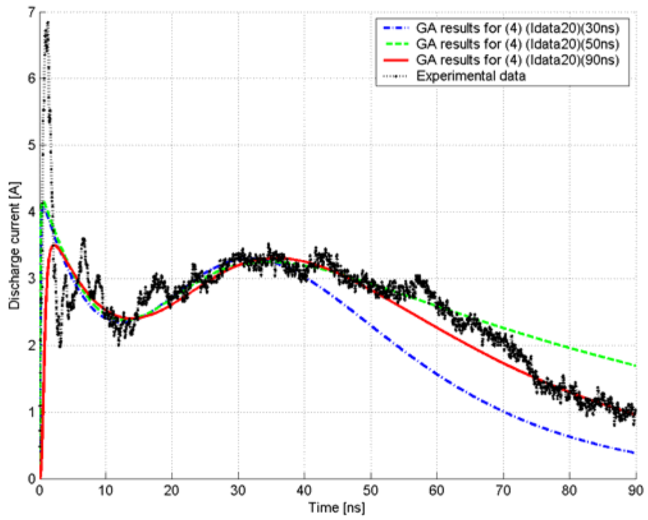
Σχήμα 5.29: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.30 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο με καλύτερη προσέγγιση αυτή της συνάρτησης δειγματοληψίας για διάρκεια 50ns. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις συναρτήσεις δειγματοληψίας για διάρκεια 50ns και 90ns.



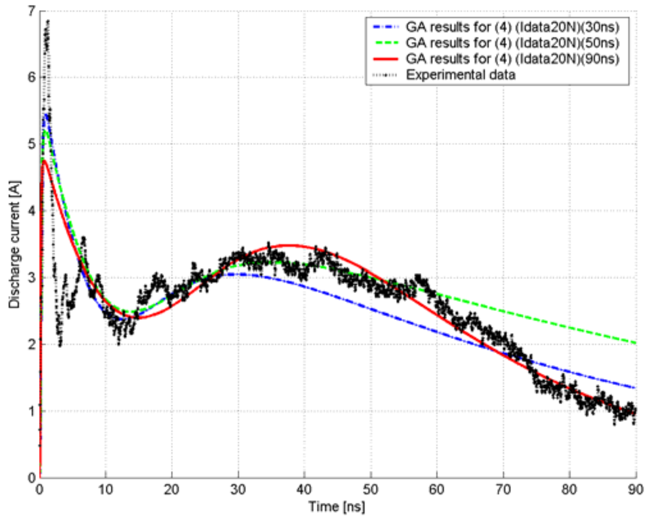
Σχήμα 5.30: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.31 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



Σχήμα 5.31: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

Στο Σχήμα 5.32 παρατηρούμε ότι και οι τρεις συναρτήσεις δειγματοληψίας εντοπίζουν το πρώτο μέγιστο με καλύτερη προσέγγιση της τιμής του από τη συνάρτηση δειγματοληψίας με διάρκεια 30ns. Η ουρά προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη συνάρτηση δειγματοληψίας για διάρκεια 90ns.



Σχήμα 5.32: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για την (4) και για χρόνους δειγματοληψίας 30ns, 50ns, 90ns

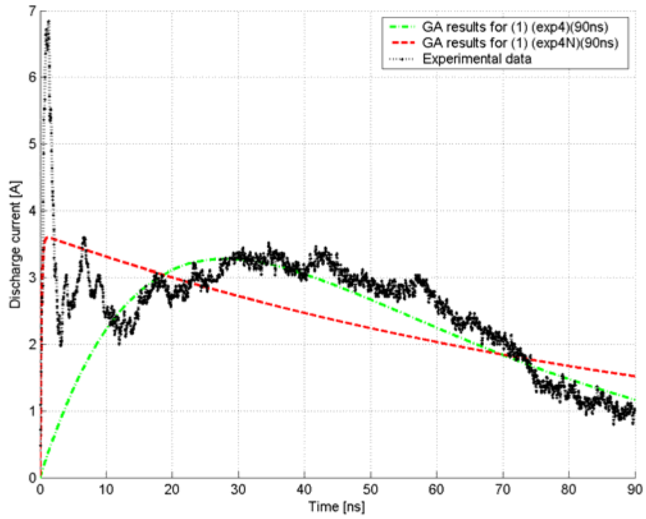
5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια εξίσωση αλλά για διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων για την ίδια εξίσωση, αλλά με διαφορετικές συναρτήσεις δειγματοληψίας, οι οποίες όμως έχουν παρόμοιο αριθμό σημείων, ώστε μια τέτοια σύγκριση να είναι εφικτή.

5.4.1 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2kV

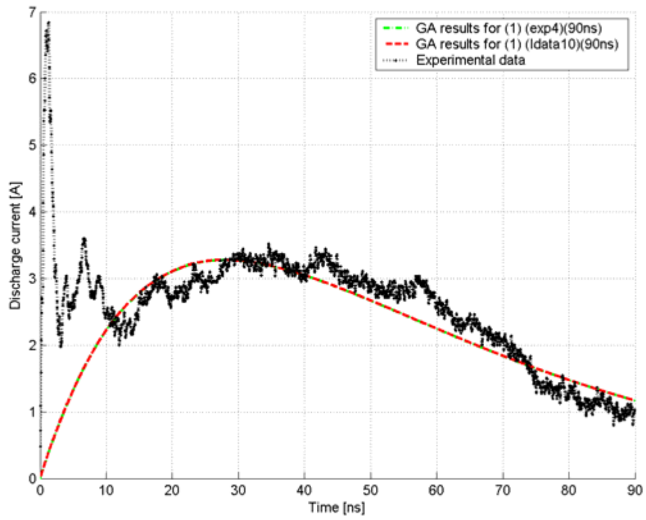
5.4.1.1 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (1)

Στο Σχήμα 5.33 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η exp4N περιέχει όλα τα σημεία στο διάστημα 0-2ns. Η συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 προσεγγίζει ικανοποιητικά το τμήμα της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος στο διάστημα 15-50ns. Όσον αφορά στην ουρά, η exp4 δίνει καλύτερη προσέγγιση.



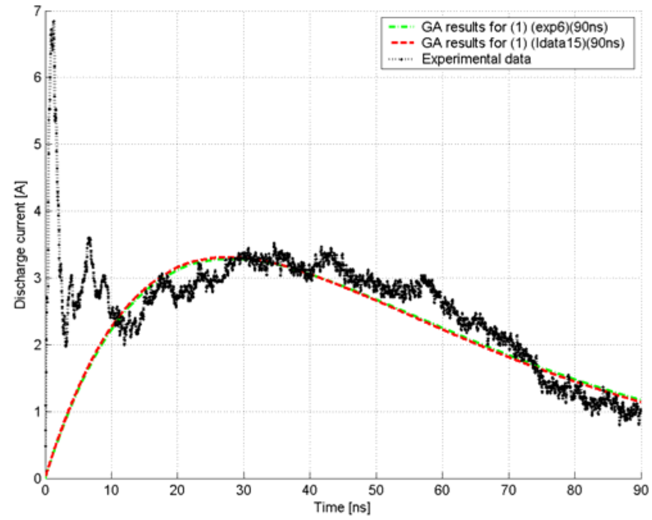
Σχήμα 5.33: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (1) και για διάρκεια, 90ns

Στο Σχήμα 5.34 παρατηρούμε ότι οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας δεν προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις προσεγγίζουν την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



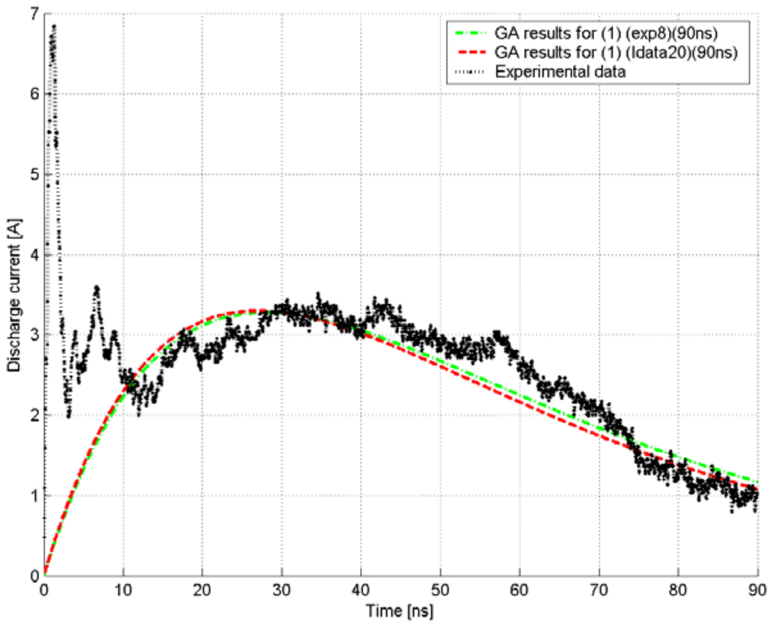
Σχήμα 5.34: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (1) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.35 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.35: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (1) και για διάρκεια 90ns

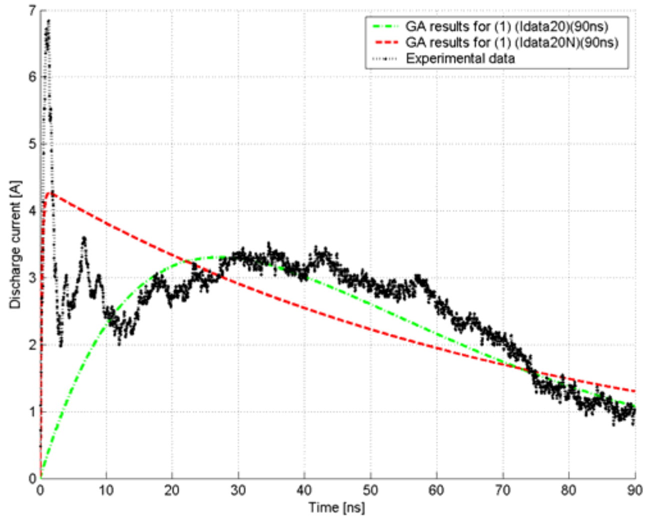
Στο Σχήμα 5.36 παρατηρούμε ότι για καμία συνάρτηση δειγματοληψίας τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου δεν προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.36: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (1) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.37 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο αλλά με κάποια ανακρίβεια. Αυτό συμβαίνει γιατί η

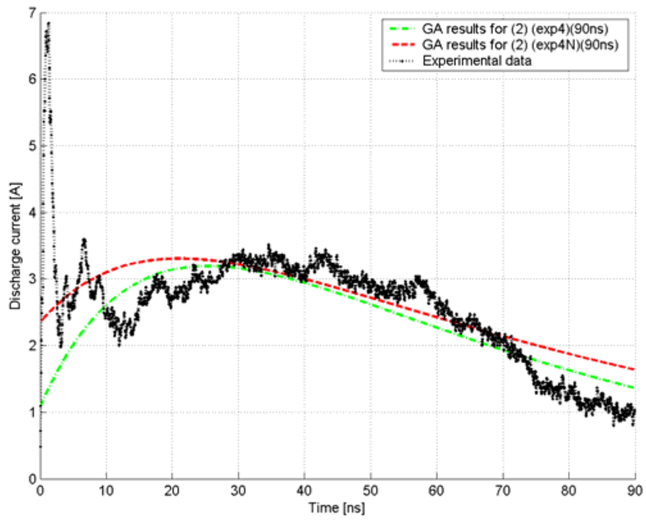
Idata20N περιέχει όλα τα σημαία 0-2ns. Όσον αφορά στην ουρά, η Idata20 δίνει καλύτερη προσέγγιση.



Σχήμα 5.37: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (1) και για διάρκεια 90ns

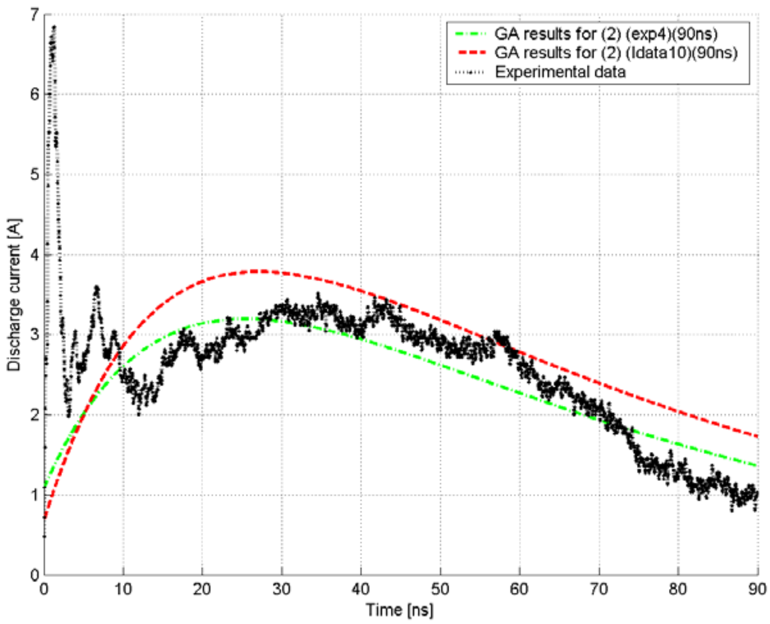
5.4.1.2 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (2)

Στο Σχήμα 5.38 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.

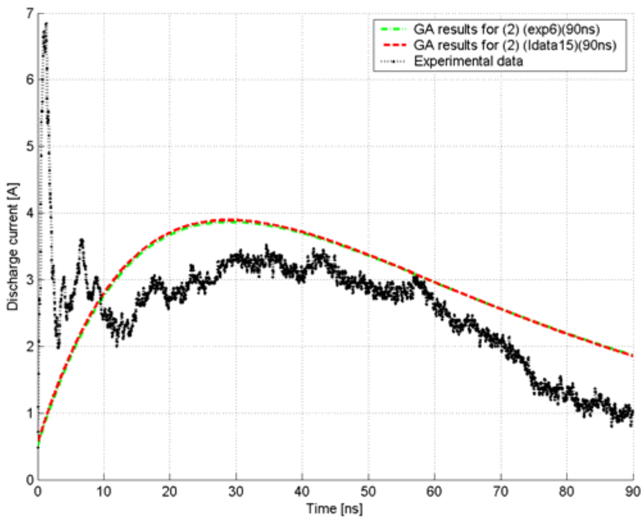


Σχήμα 5.38: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (2) και για διάρκεια 90ns

Στα Σχήματα 5.39 και 5.40 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.

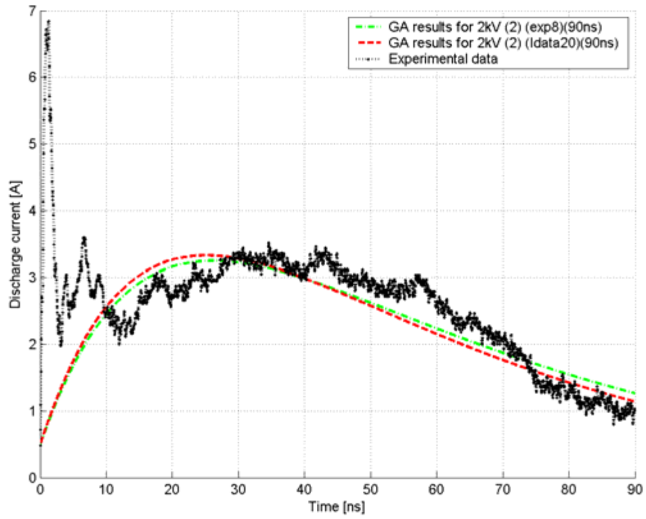


Σχήμα 5.39: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (2) και για διάρκεια 90ns



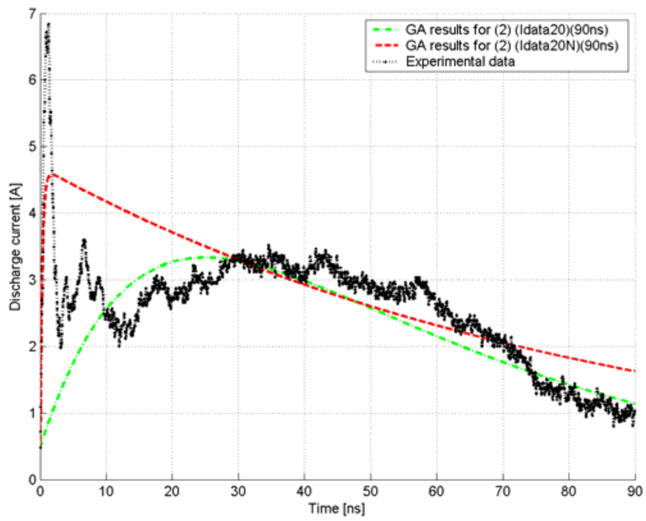
Σχήμα 5.40: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (2) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.41 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.41: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (2) και για διάρκεια 90ns

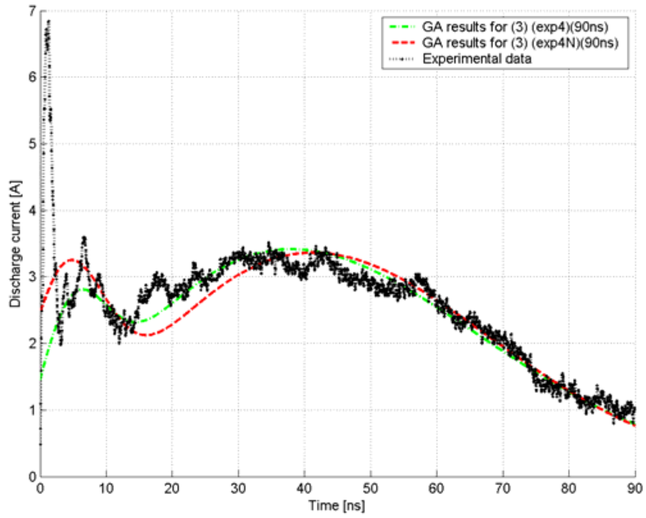
Στο Σχήμα 5.42 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο, πράγμα αναμενόμενο εφόσον η Idata20N περιέχει όλα τα σημεία 0-2ns. Σε ό,τι αφορά την ουρά η Idata20 δίνει καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



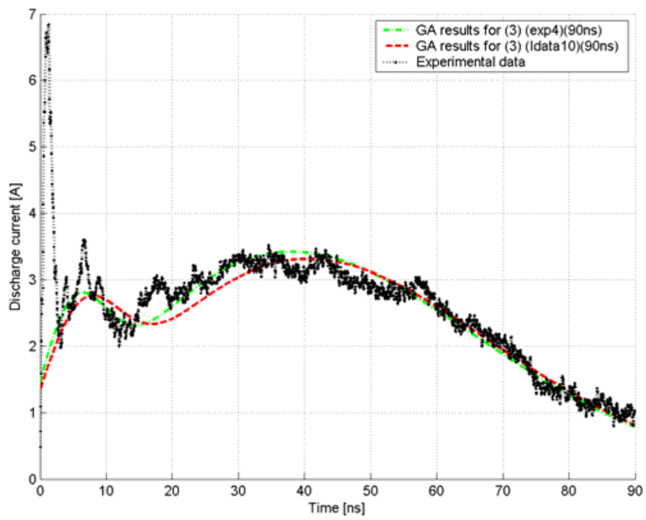
Σχήμα 5.42: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (2) και για διάρκεια 90ns

5.4.1.3 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (3)

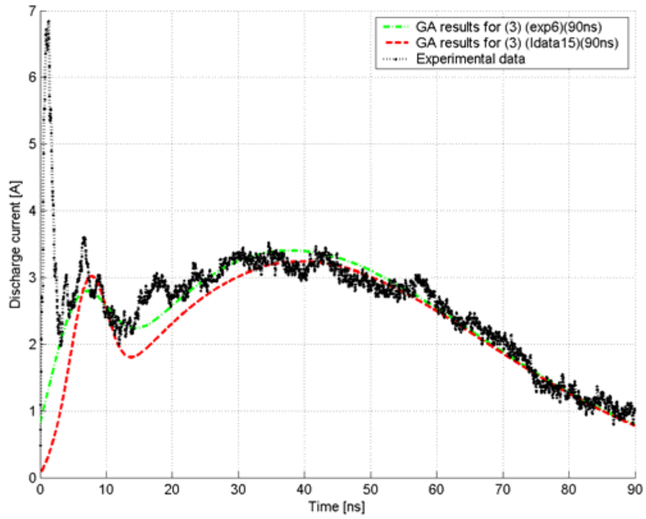
Στο Σχήματα 5.43-5.46 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο, ενώ προσεγγίζουν ανεπαρκώς το δεύτερο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά, και οι δύο συναρτήσεις την προσεγγίζουν ικανοποιητικά.



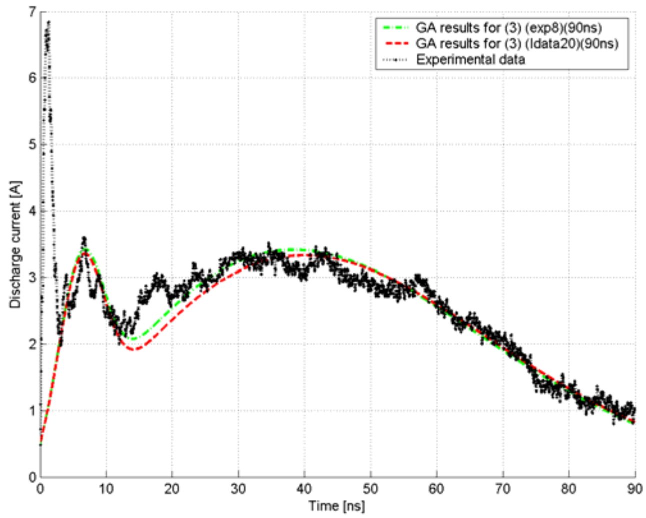
Σχήμα 5.43: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (3) και για διάρκεια 90ns



Σχήμα 5.44: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (3) και για διάρκεια 90ns

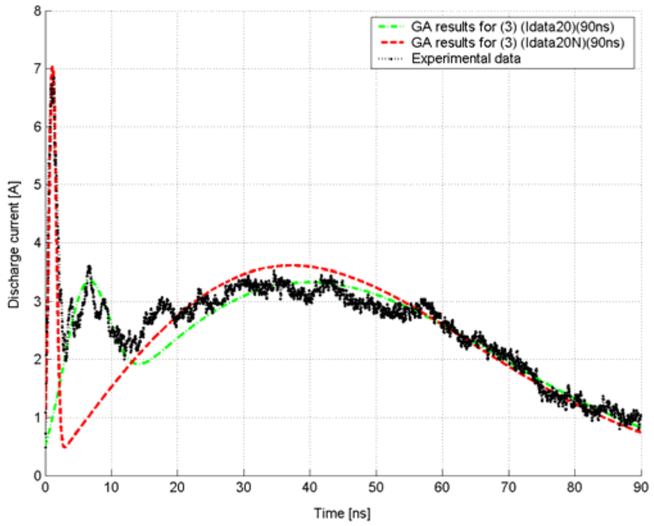


Σχήμα 5.45: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (3) και για διάρκεια 90ns



Σχήμα 5.46: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τιςσυναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (3) και για διάρκεια 90ns

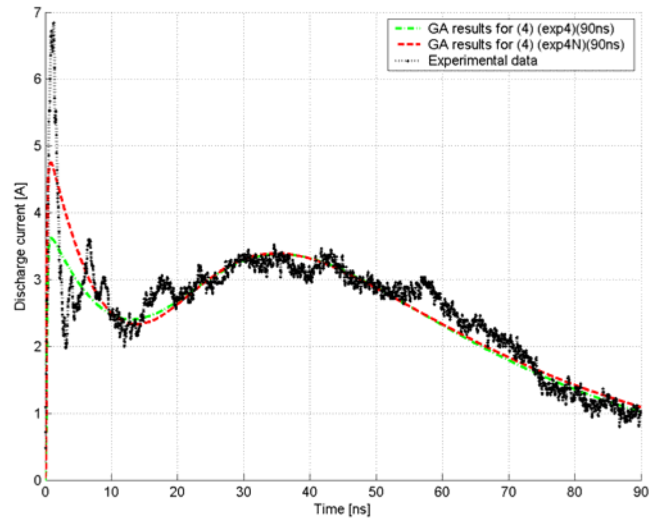
Στο Σχήμα 5.47 παρατηρούμε ότι η Idata20N προσεγγίζει ικανοποιητικά το πρώτο μέγιστο, πράγμα αναμενόμενο αφού η Idata20N περιλαμβάνει όλα τα σημεία 0-2ns και η Idata20 προσεγγίζει το δεύτερο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά, και οι δύο την προσεγγίζουν ικανοποιητικά.



Σχήμα 5.47: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (3) και για διάρκεια 90ns

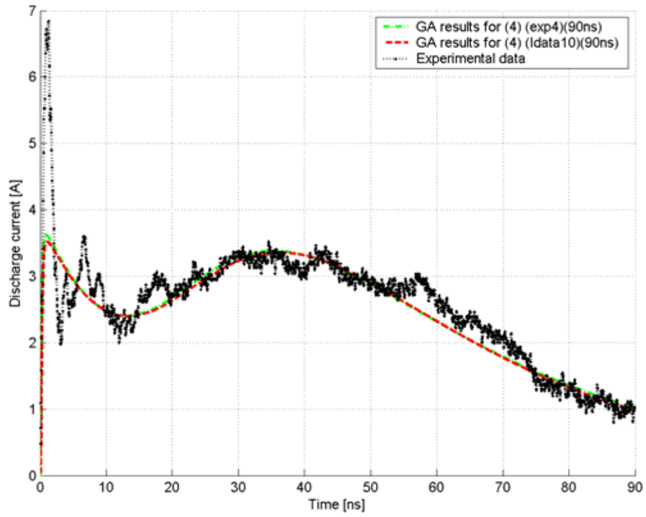
5.4.1.4 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (4)

Στο Σχήμα 5.48 παρατηρούμε ότι και οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Απ’ αυτές, η exp4N προσεγγίζει καλύτερα την τιμή του πρώτου μεγίστου. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 20ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



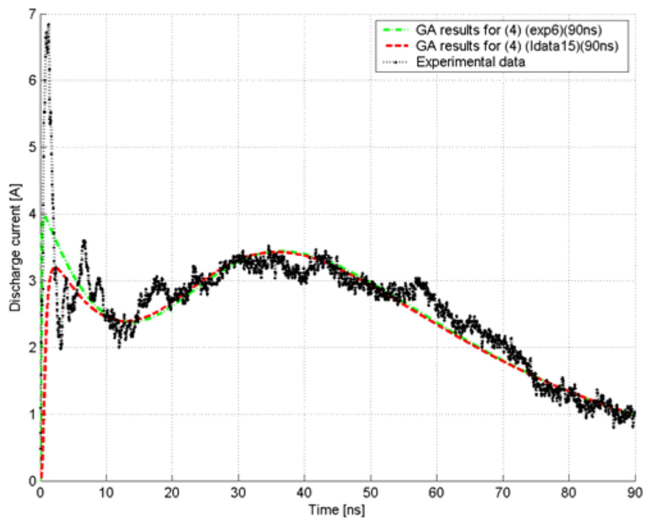
Σχήμα 5.48: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.49 παρατηρούμε ότι και οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



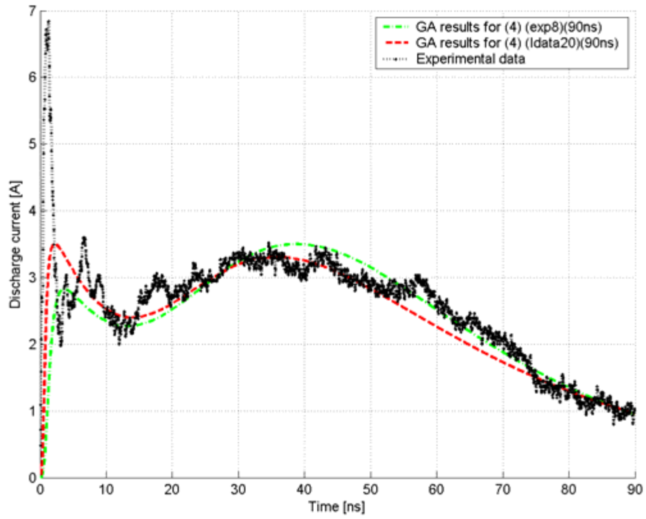
Σχήμα 5.49: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.50 παρατηρούμε ότι και οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο με την exp6 να το προσεγγίζει καλύτερα. Για το τμήμα της ουράς, και οι δύο προσφέρουν αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.50: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.51 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά της κυματομορφής, και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.51: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata15 για την (4) και για διάρκεια 90ns

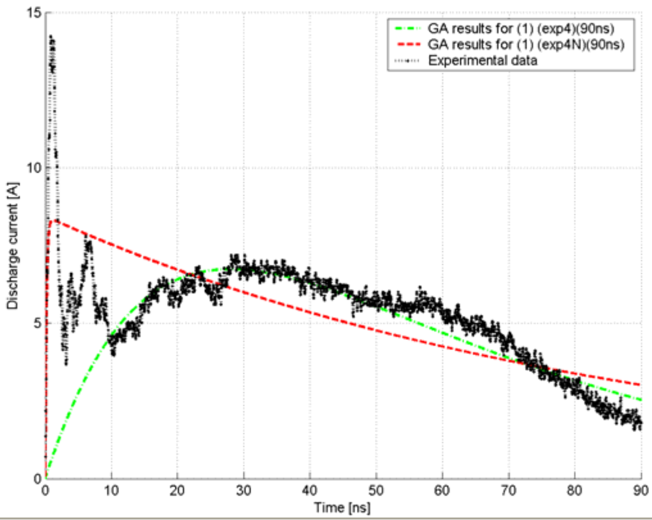
Στο Σχήμα 5.52 παρατηρούμε ότι η Idata20N προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο καλύτερα από την Idata20. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 20ns και εντεύθεν και οι δύο κυματομορφές δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.

Σχήμα 5.52: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (4) και για διάρκεια 90ns

5.4.2 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +4kV

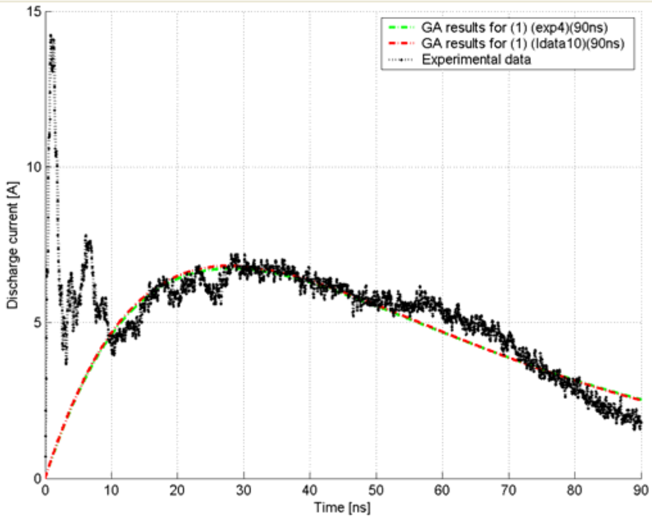
5.4.2.1 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (1)

Στο Σχήμα 5.53 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Η συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 προσεγγίζει ικανοποιητικά το τμήμα της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος στο διάστημα 15-50ns. Όσον αφορά στην ουρά, η exp4 δίνει καλύτερη προσέγγιση.



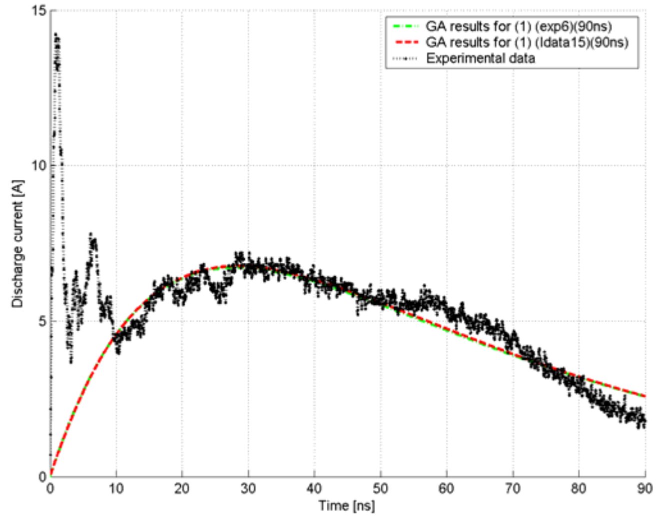
Σχήμα 5.53: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (1) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.54 παρατηρούμε ότι οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας δεν προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



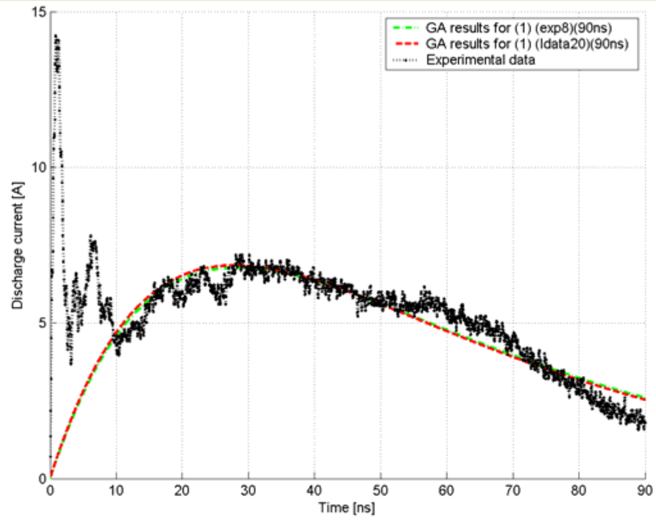
Σχήμα 5.54: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (1) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.55 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



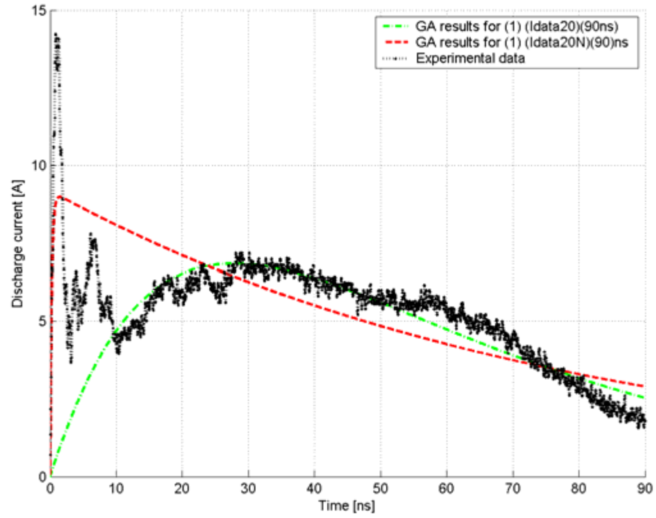
Σχήμα 5.55: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (1) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.56 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 10ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.56: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (1) και για διάρκεια 90ns

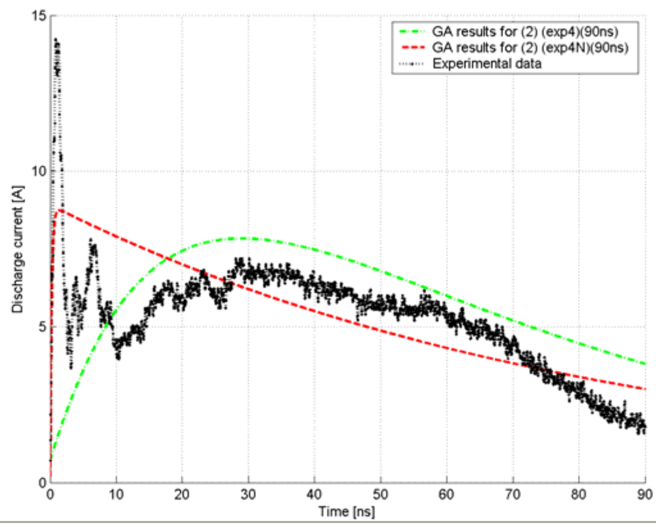
Στο Σχήμα 5.57 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 προσεγγίζει ικανοποιητικά το τμήμα της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος στο διάστημα 15-50ns. Όσον αφορά στην ουρά, η Idata20 δίνει καλύτερη προσέγγιση.



Σχήμα 5.57: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (1) και για διάρκεια 90ns

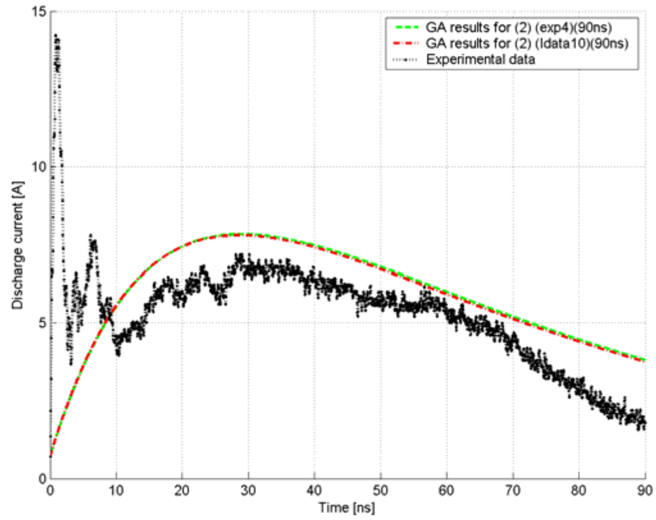
5.4.2.2 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (2)

Στο Σχήμα 5.58 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Η συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 απέχει παρασάγγας από την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



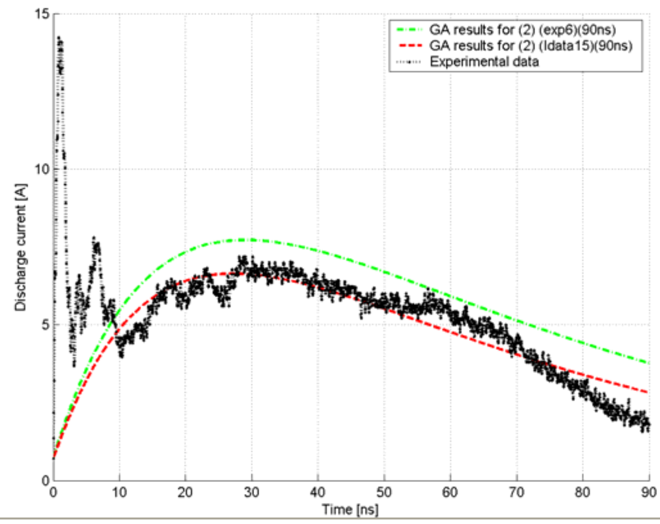
Σχήμα 5.58: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (2) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.59 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



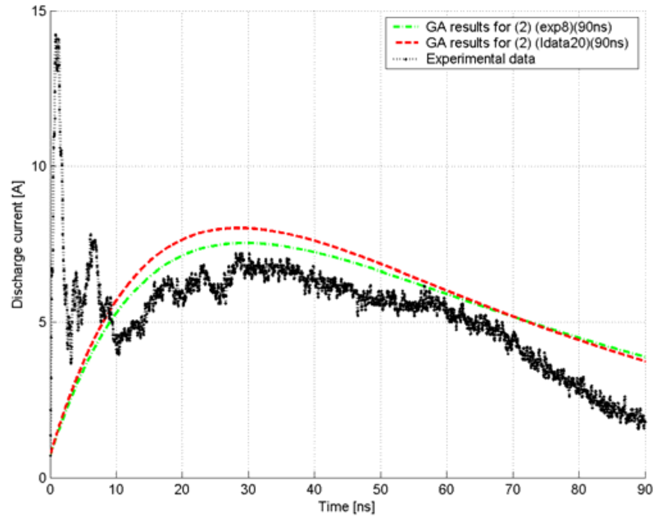
Σχήμα 5.59: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (2) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.60 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 προσεγγίζουν την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος καλύτερα απ' ότι η exp6. Και οι δύο αποτυγχάνουν στον προσδιορισμό του πρώτου μεγίστου.



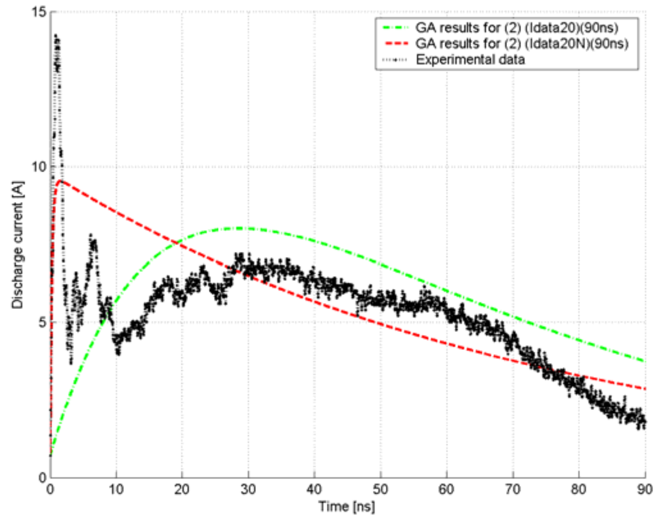
Σχήμα 5.60: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (2) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.61 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



Σχήμα 5.61: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (2) και για διάρκεια 90ns

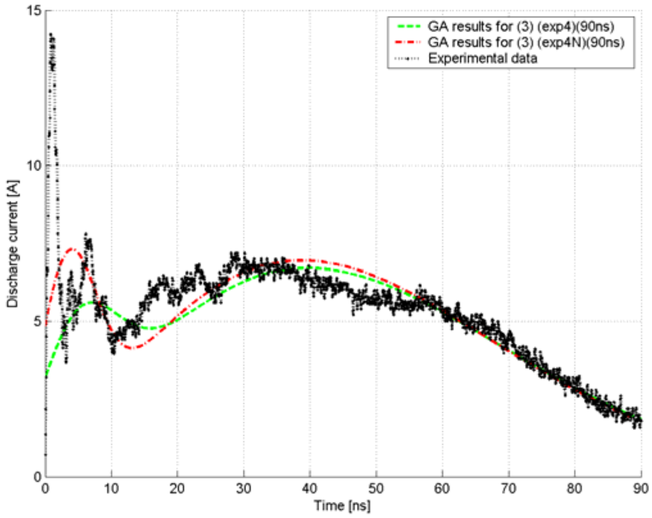
Στο Σχήμα 5.62 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 απέχει παρασάγγας από την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



Σχήμα 5.62: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (2) και για διάρκεια 90ns

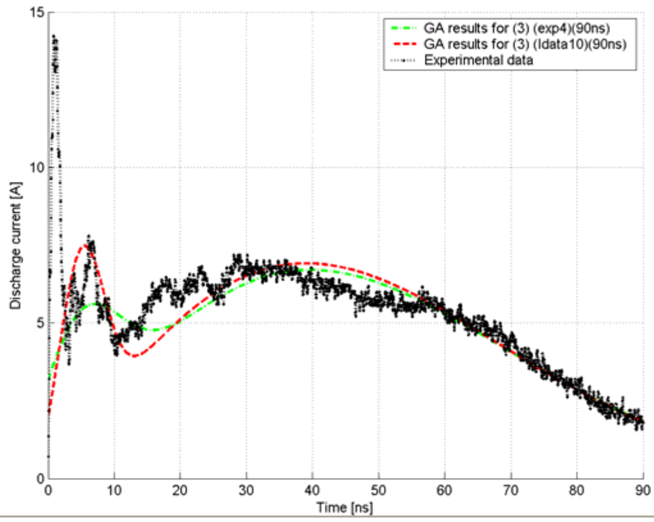
5.4.2.3 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (3)

Στο Σχήμα 5.63 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο, ενώ προσεγγίζουν ανεπαρκώς το δεύτερο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά, και οι δύο την προσεγγίζουν ικανοποιητικά.



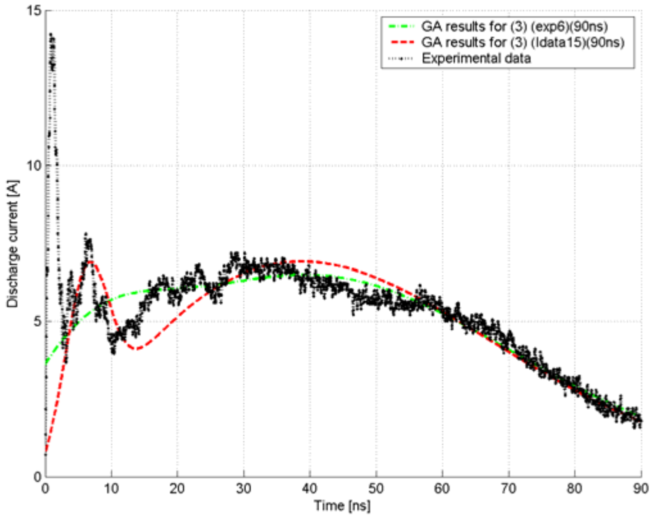
Σχήμα 5.63: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (3) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.64 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Η Idata10 προσεγγίζει επαρκώς το δεύτερο μέγιστο σε αντίθεση με την exp4. Όσον αφορά στην ουρά, και οι δύο την προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά.



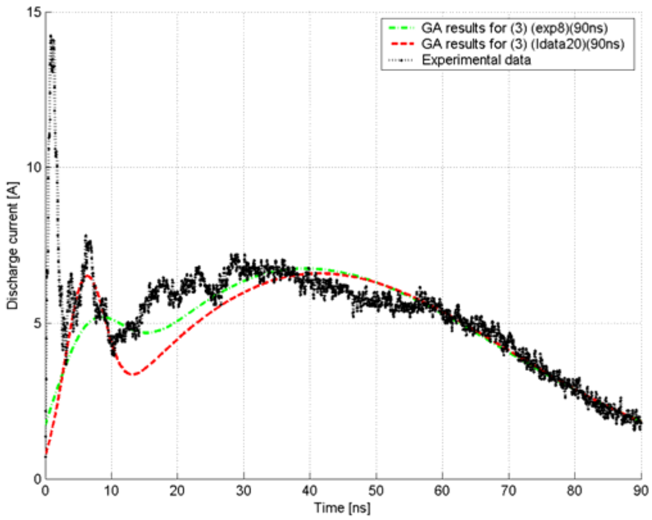
Σχήμα 5.64: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (3) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.65 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Η Idata15 προσεγγίζει αρκετά καλά το δεύτερο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά, και οι δύο την προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά.



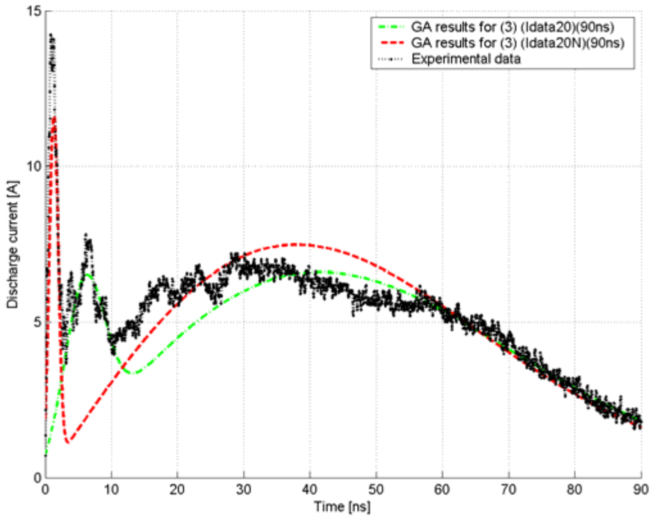
Σχήμα 5.65: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (3) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.66 παρατηρούμε ότι καμία συνάρτηση δειγματοληψίας δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο, η Idata20 προσεγγίζει επαρκώς το δεύτερο μέγιστο και η exp8 το προσεγγίζει λιγότερο ικανοποιητικά. Όσον αφορά στην ουρά, και οι δύο την προσεγγίζουν ικανοποιητικά.



Σχήμα 5.66: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (3) και για διάρκεια 90ns

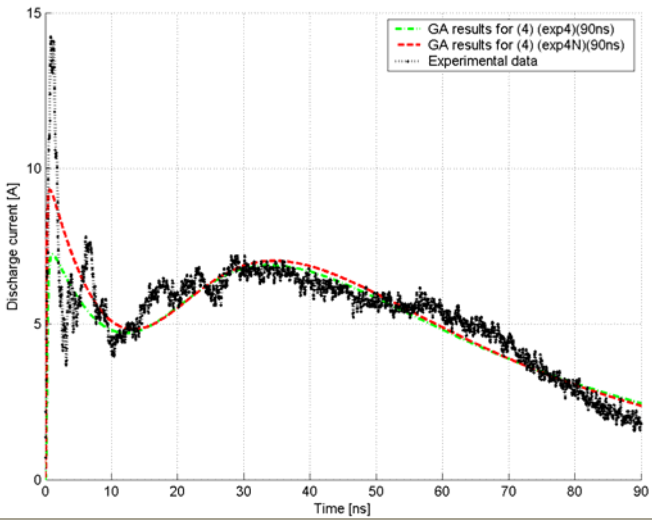
Στο Σχήμα 5.67 παρατηρούμε ότι η Idata20N προσεγγίζει ικανοποιητικά το πρώτο μέγιστο και η Idata20 προσεγγίζει το δεύτερο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά, η Idata20 την προσεγγίζει ικανοποιητικά.



Σχήμα 5.67: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (3) και για διάρκεια 90ns

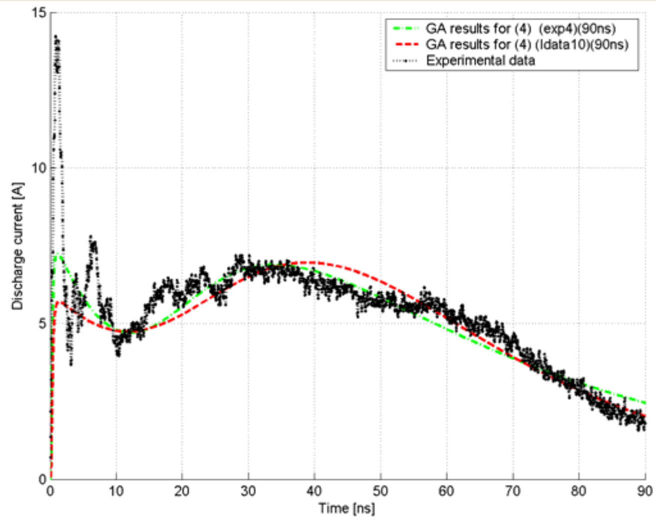
5.4.2.4 Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων για την εξίσωση (4)

Στο Σχήμα 5.68 παρατηρούμε ότι και οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Απ' αυτές, η exp4N προσεγγίζει καλύτερα την τιμή του πρώτου μεγίστου. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 30ns και εντεύθεν και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



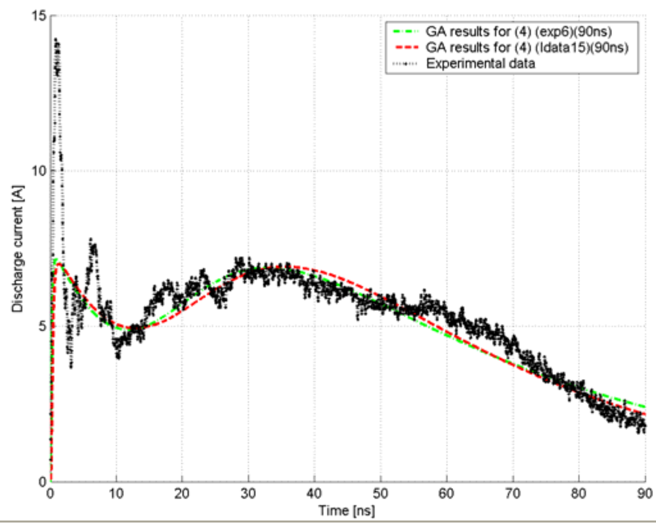
Σχήμα 5.68: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και exp4N για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.69 παρατηρούμε ότι και οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Απ' αυτές, η exp4 προσεγγίζει καλύτερα την τιμή του πρώτου μεγίστου. Για το τμήμα της ουράς η Idata10 φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική κυματομορφή του ρεύματος.



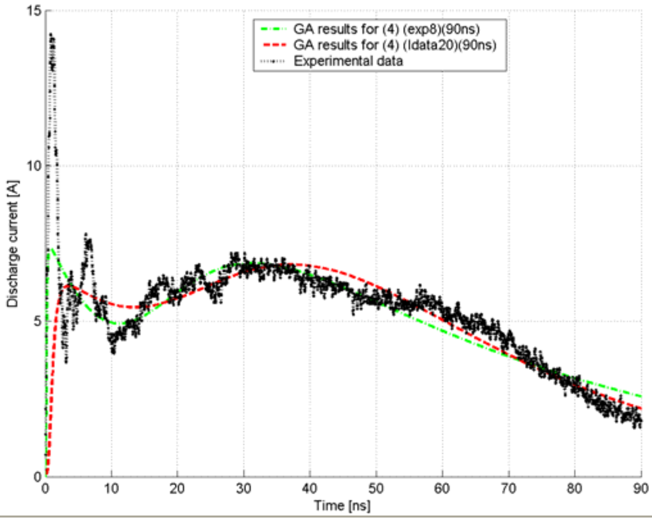
Σχήμα 5.69: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4 και Idata10 για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.70 παρατηρούμε ότι και οι δύο συναρτήσεις δειγματοληψίας προσεγγίζουν το πρώτο μέγιστο. Για το τμήμα της ουράς, και οι δύο προσφέρουν αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



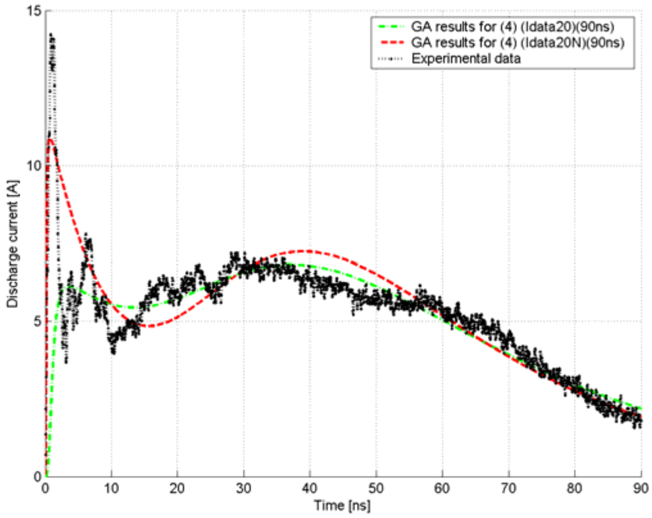
Σχήμα 5.70: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp6 και Idata15 για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.71 παρατηρούμε ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο. Όσον αφορά στην ουρά της κυματομορφής, και οι δύο συναρτήσεις δίνουν ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.71: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας exp8 και Idata20 για την (4) και για διάρκεια 90ns

Στο Σχήμα 5.72 παρατηρούμε ότι η Idata20N προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο, εφόσον έχει όλα τα σημεία από 0-2ns. Για το τμήμα της κυματομορφής από τα 30ns και εντεύθεν η Idata20 δίνει ικανοποιητική προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής του ρεύματος.



Σχήμα 5.72: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τις συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata20 και Idata20N για την (4) και για διάρκεια 90ns

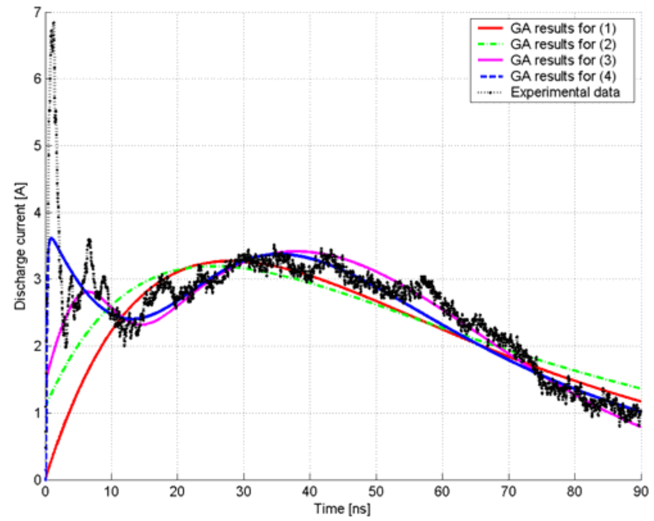
5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων γενετικού αλγορίθμου για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας αλλά για διαφορετικές εξισώσεις του ρεύματος

Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας αλλά για διαφορετικές εξισώσεις του ρεύματος με διάρκεια 90ns και για φόρτιση +2 και +4kV.

5.5.1 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2kV

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4**

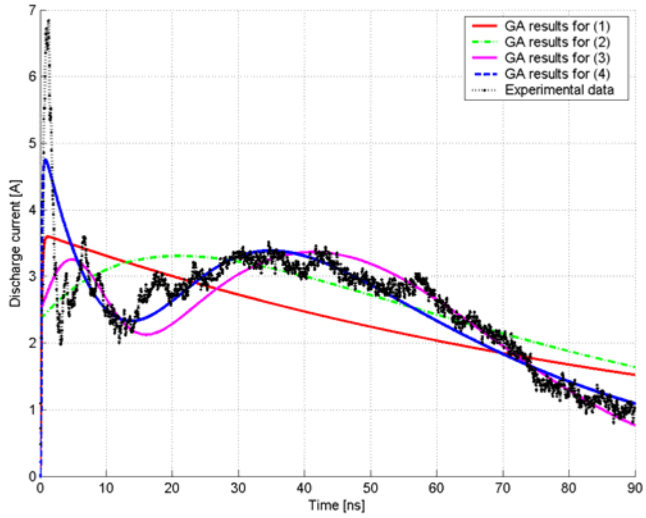
  Από το σχήμα 5.73 παρατηρούμε ότι η εξίσωση (4) δίνει την καλύτερη προσέγγιση του πρώτου μεγίστου. Αντιθέτως οι (1)-(3) δεν καταφέρνουν να το εντοπίσουν, ενώ η (3) επιτυγχάνει μόνο τον προσδιορισμό του δεύτερου μεγίστου. Σε ό,τι αφορά την ουρά η (3) δίνει την καλύτερη προσέγγιση



Σχήμα 5.73: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N**

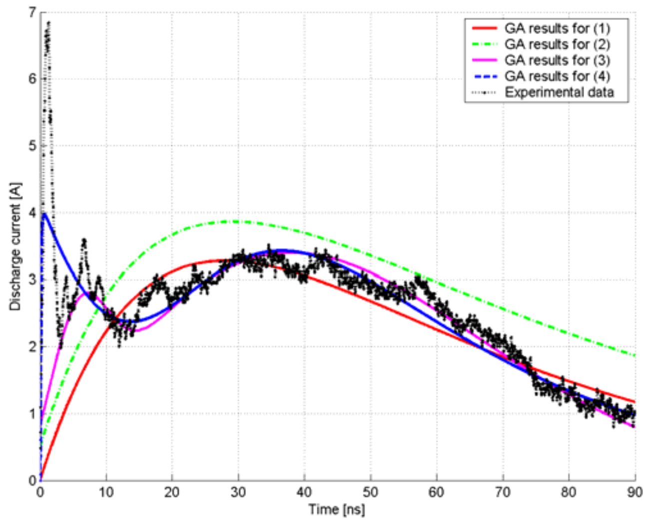
Η συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N περιλαμβάνει όλα τα σημεία στο διάστημα 0-2ns. Για το λόγο αυτό και οι τέσσερις εξισώσεις, που φαίνονται στο Σχήμα 5.74, δίνουν καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής ως προς το πρώτο μέγιστο εν συγκρίσει με το σχήμα 5.73. Την καλύτερη προσέγγιση του I_{max} την δίνει η (4) ενώ ακολουθούν (1)→(3)→(2). Το τμήμα της ουράς προσεγγίζεται καλύτερα από την εξίσωση (4).



Σχήμα 5.74: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6**

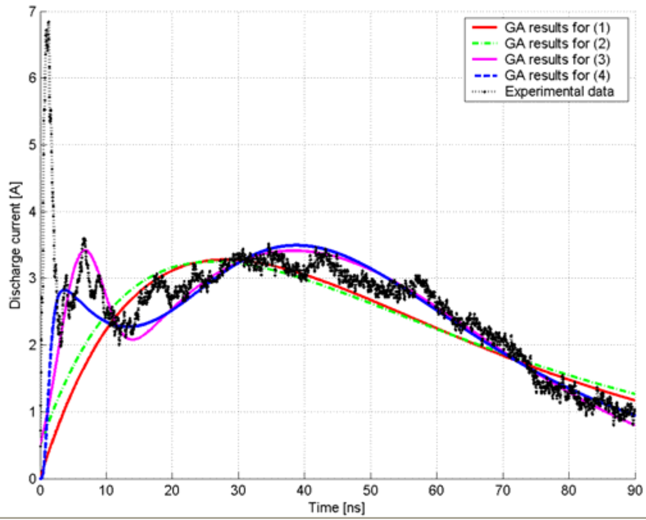
Από το παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ότι την καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής στο σύνολό της την δίνει η (4). Αυτή είναι η μοναδική εξίσωση που προσεγγίζει το I_{max} ενώ καμία από τις άλλες εξισώσεις δεν καταφέρνει να το εντοπίσει. Η (3) εντοπίζει το δεύτερο μέγιστο και δίνει ικανοποιητική προσέγγιση της ουράς. Η (2) δεν καταφέρνει να προσεγγίσει καθόλου την πειραματική κυματομορφή.



Σχήμα 5.75: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8**

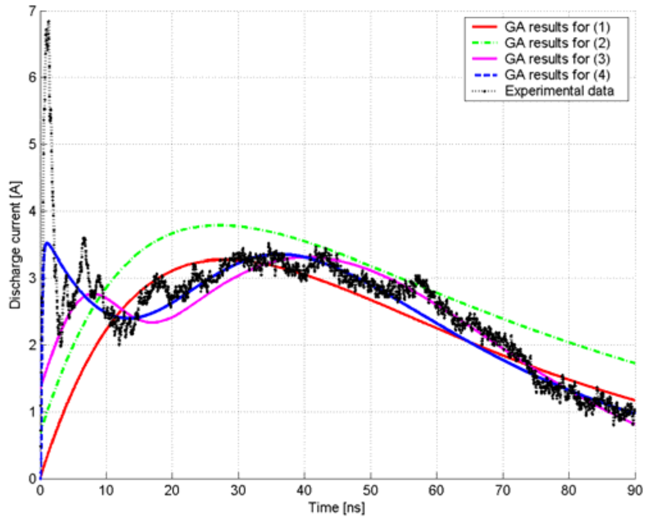
Στο Σχήμα 5.76 παρατηρούμε ότι καμία εξίσωση δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά την πειραματική κυματομορφή. Η (3) εντοπίζει το δεύτερο μέγιστο και προσομοιώνει καλύτερα την ουρά της κυματομορφής. Ακολουθεί η (4) ως προς την ακρίβεια της προσέγγισης της κυματομορφής του ρεύματος, ενώ οι (1) και (2) κρίνονται μη ικανοποιητικές για την προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής.



Σχήμα 5.76: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10**

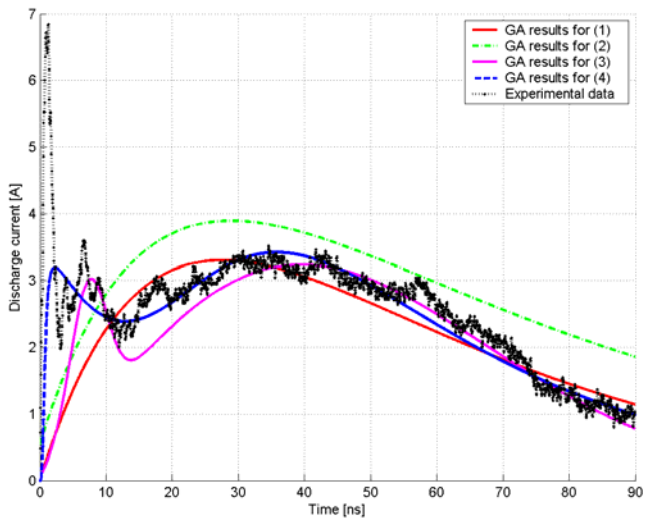
Για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 η εξίσωση (4) δίνει την καλύτερη προσέγγιση του I_{max} αλλά και ολόκληρης της πειραματικής κυματομορφής. Η (3) προσεγγίζει το δεύτερο μέγιστο, ενώ οι (1) και (2) δεν δίνουν τόσο ικανοποιητική προσέγγιση της κυματομορφής αλλά η (1) είναι καλύτερη της (2).



Σχήμα 5.77: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15**

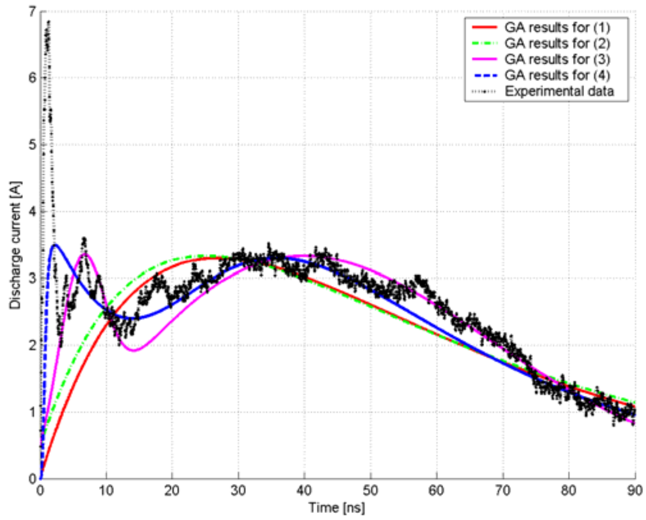
Από το Σχήμα 5.78 παρατηρούμε ότι καμία εξίσωση δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά την πειραματική κυματομορφή. Η (3) εντοπίζει το δεύτερο μέγιστο ενώ η (4) προσομοιώνει καλύτερα την ουρά της κυματομορφής. Οι (1) και (2) κρίνονται μη ικανοποιητικές για την προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής.



Σχήμα 5.78: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 για από (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20**

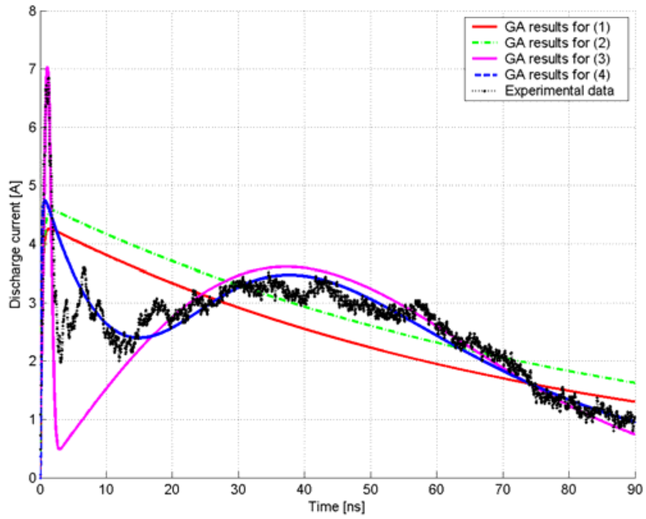
Από το Σχήμα 5.79 παρατηρούμε ότι καμία εξίσωση δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά στο σύνολό της την πειραματική κυματομορφή. Η (3) εντοπίζει το δεύτερο μέγιστο ενώ η (4) προσομοιώνει καλύτερα την ουρά της κυματομορφής. Οι (1) και (2) κρίνονται μη ικανοποιητικές για την προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής.



Σχήμα 5.79: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N**

Η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N περιλαμβάνει όλα τα σημεία από 0-2ns. Για το λόγο αυτό οι (1)-(4) δίνουν καλύτερη προσέγγιση του I_{max} εν συγκρίσει με τις προηγούμενες συναρτήσεις δειγματοληψίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.80. Την καλύτερη προσέγγιση και ως προς την τιμή του I_{max} την επιτυγχάνει η (3) η οποία ωστόσο δεν προσεγγίζει καλά την υπόλοιπη πειραματική κυματομορφή. Η (4) δίνει την καλύτερη προσέγγιση, συνολικά, της πειραματικής κυματομορφής, ενώ οι (1) και (2) πέραν του εντοπισμού του I_{max} κρίνονται ανεπαρκείς για την προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής.

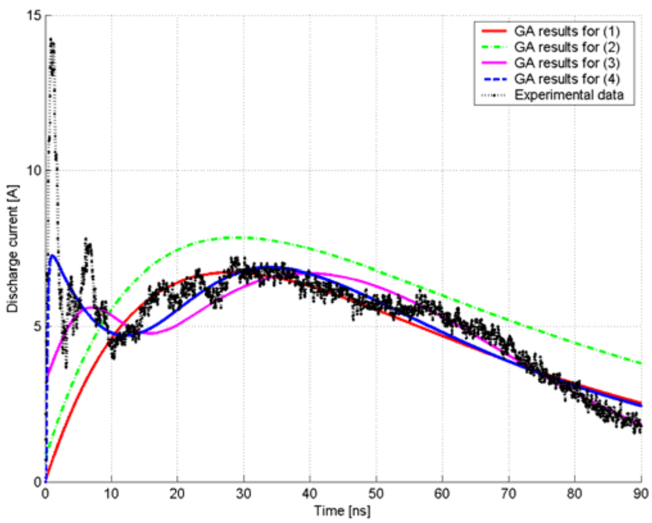


Σχήμα 5.80: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

5.5.2 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +4kV

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4**

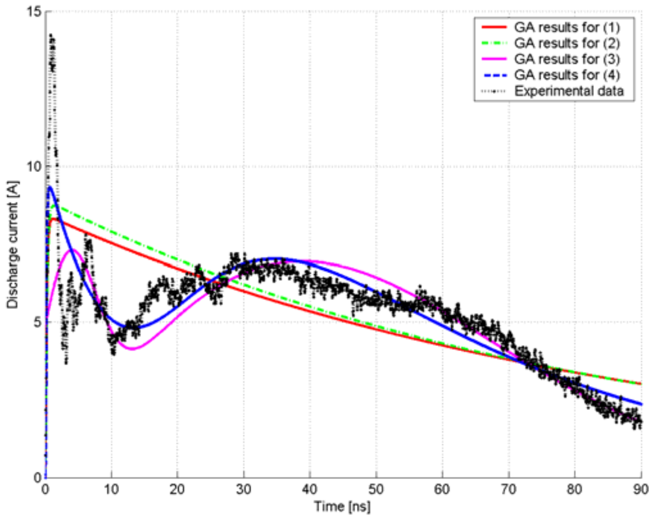
Από το σχήμα 5.81 παρατηρούμε ότι η εξίσωση (4) δίνει την καλύτερη προσέγγιση του πρώτου μεγίστου. Αντιθέτως οι (1)-(3) δεν καταφέρνουν να το εντοπίσουν, ενώ η (3) επιτυγχάνει μόνο τον προσδιορισμό του δεύτερου μεγίστου. Σε ό,τι αφορά την ουρά η (1) δίνει την καλύτερη προσέγγιση



Σχήμα 5.81: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N**

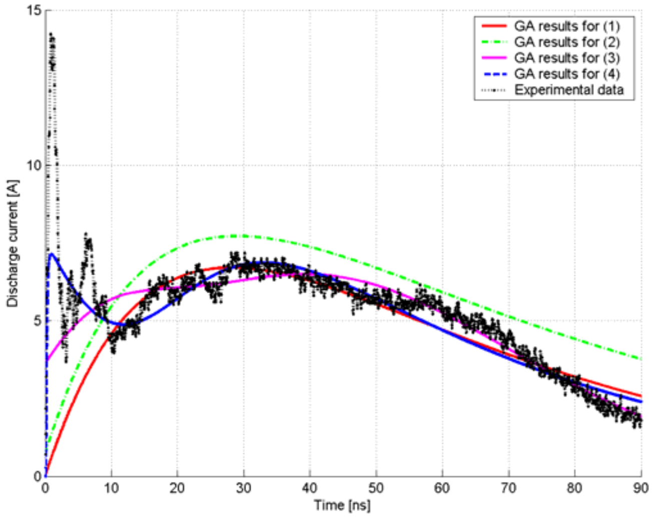
Η συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N περιλαμβάνει όλα τα σημεία από 0-2ns. Για το λόγο αυτό και οι τέσσερις εξισώσεις δίνουν καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής ως προς το πρώτο μέγιστο εν συγκρίσει με το σχήμα 5.81. Την καλύτερη προσέγγιση του I_{max} την δίνει η (4) ενώ ακολουθούν (2)→(1). Η (3) αποτυγχάνει στον εντοπισμό του I_{max} Το τμήμα της ουράς προσεγγίζεται καλύτερα από την εξίσωση (4).



Σχήμα 5.82: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6**

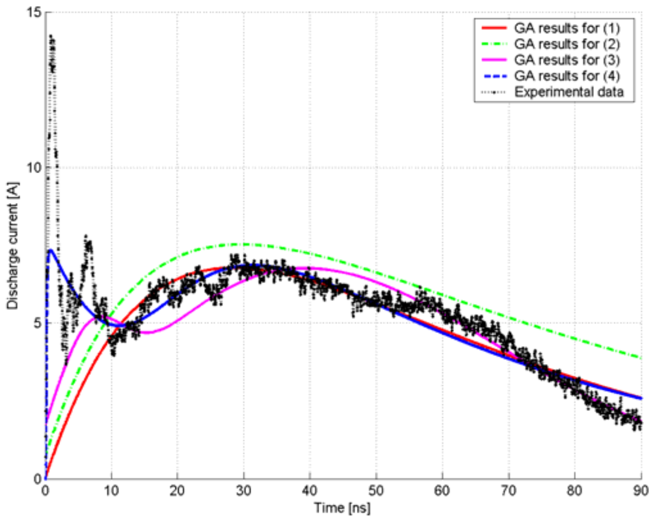
Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ότι την καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής στο σύνολό της δίνει η (4). Αυτή είναι η μοναδική εξίσωση που προσεγγίζει το I_{max} ενώ καμία από τις άλλες εξισώσεις δεν καταφέρνει να το εντοπίσει. Η (2) δεν καταφέρνει να προσεγγίσει καθόλου την πειραματική κυματομορφή. Η (1) δίνει ικανοποιητική προσέγγιση της ουράς ενώ η (4) κρίνεται μη ικανοποιητική για την προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής.



Σχήμα 5.83: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp6 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8**

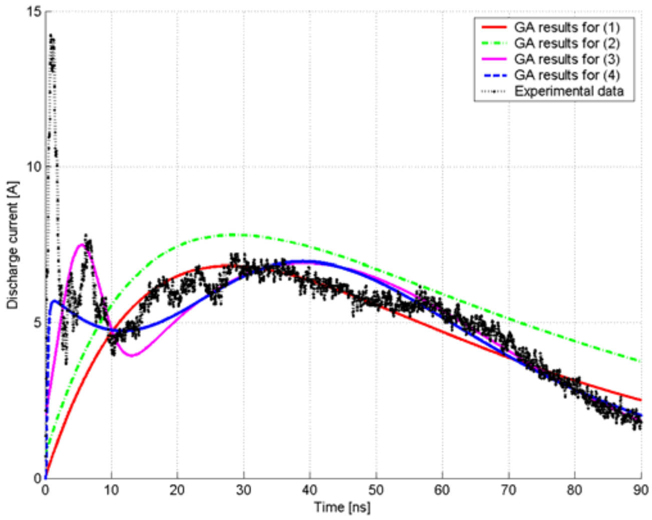
Στο Σχήμα 5.84 παρατηρούμε ότι: η (4) εντοπίζει το I_{max} και προσεγγίζει ικανοποιητικά την ουρά της κυματομορφής, η (3) αποτυγχάνει στον προσδιορισμό του δεύτερου μεγίστου, ενώ η (2) κρίνεται μη ικανοποιητική για την προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής. Σε ό,τι αφορά την (1), αυτή προσεγγίζει καλά την ουρά της κυματομορφής.



Σχήμα 5.84: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας exp8 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10**

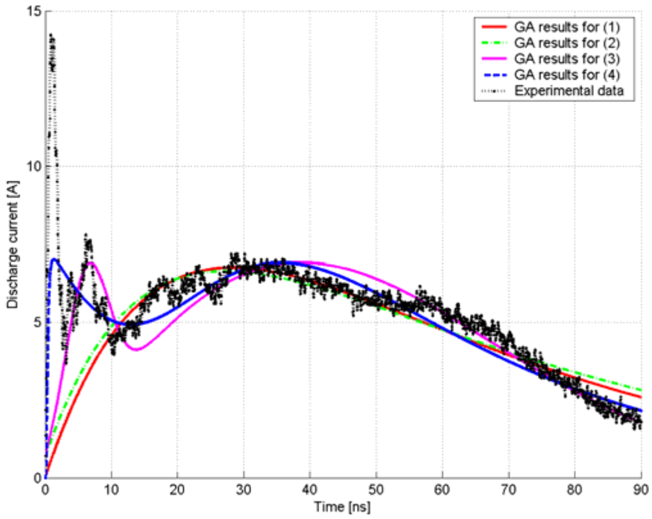
Για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 η εξίσωση (4) εντοπίζει το I_{max} αλλά όχι ως προς την τιμή. Η (3) προσεγγίζει το δεύτερο μέγιστο, ενώ οι (1) και (2) δεν δίνουν τόσο ικανοποιητική προσέγγιση της κυματομορφής αλλά η (1) είναι καλύτερη της (2). Μάλιστα η (1) δίνει την καλύτερη προσέγγιση της ουράς.



Σχήμα 5.85: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15**

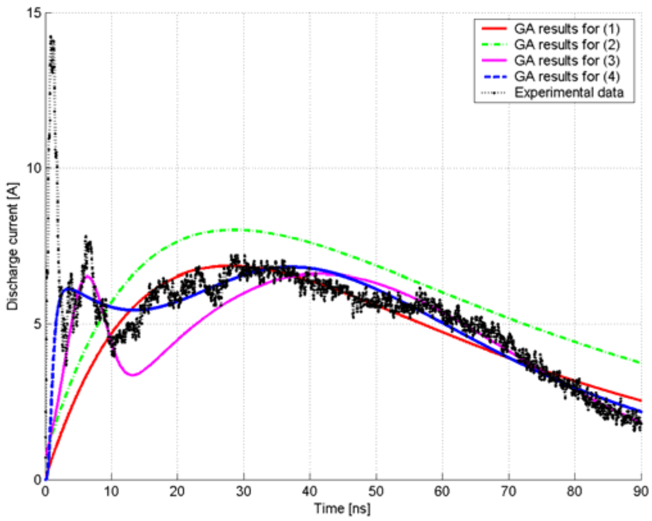
Από το Σχήμα 5.86 παρατηρούμε ότι η (4) εντοπίζει ικανοποιητικά το I_{max} και προσομοιώνει καλύτερα την ουρά της κυματομορφής. Η (3) εντοπίζει το δεύτερο μέγιστο, οι (1) και (2) κρίνονται ικανοποιητικές μόνο για την προσέγγιση της ουράς της πειραματικής κυματομορφής.



Σχήμα 5.86: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20**

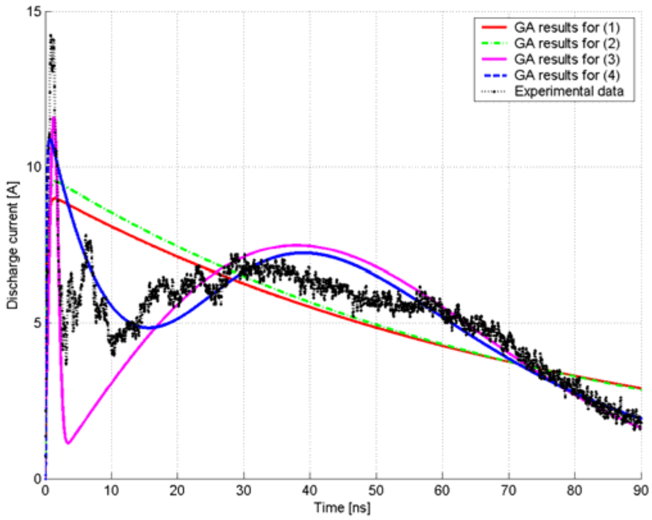
Στο Σχήμα 5.87 παρατηρούμε ότι καμία εξίσωση δεν εντοπίζει το I_{max}. Η (3) εντοπίζει το δεύτερο μέγιστο ενώ οι (1) και (4) προσομοιώνουν καλύτερα την ουρά της κυματομορφής. Η (2) κρίνεται μη ικανοποιητική για την προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής.



Σχήμα 5.87: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20 για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

- **Συγκρίσεις για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N**

Η συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N περιλαμβάνει όλα τα σημεία από 0-2ns. Για το λόγο αυτό οι (1)-(4) δίνουν καλύτερη προσέγγιση του I_{max} εν συγκρίσει με τις προηγούμενες συναρτήσεις δειγματοληψίας. Την καλύτερη προσέγγιση και ως προς την τιμή του I_{max} την επιτυγχάνει η (3) η οποία ωστόσο δεν προσεγγίζει καλά την υπόλοιπη πειραματική κυματομορφή. Η (4) δίνει την καλύτερη προσέγγιση, συνολικά, της πειραματικής κυματομορφής, ενώ οι (1) και (2) πέραν του εντοπισμού του I_{max} κρίνονται ανεπαρκείς για την προσέγγιση της υπόλοιπης κυματομορφής.



Σχήμα 5.88: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ΓΑ για τη συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για τις (1)-(4) και για διάρκεια 90ns

5.6 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις συγκρίσεις που έγιναν στις παραπάνω ενότητες.

Από τα συγκριτικά γραφήματα που έγιναν για την ίδια εξίσωση και την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας σε διαφορετικούς χρόνους (παράγραφος 5.3) μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Για την εξίσωση (1) και για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η χρονική διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας, τόσο καλύτερη προσέγγιση της ουράς της κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων έχουμε. Αντίθετα, όσο μειώνεται η διάρκεια της εκάστοτε συνάρτησης δειγματοληψίας, μειώνεται η ακρίβεια της προσέγγισης της ουράς αλλά επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση του αρχικού μεγίστου. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι όσο μειώνεται ο αριθμός σημείων της εκάστοτε συνάρτησης δειγματοληψίας τόσο χειρότερη προσέγγιση του I_{max} επιτυγχάνει ο γενετικός αλγόριθμος. Τέλος για κάθε διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας οι συναρτήσεις δειγματοληψίας με σειρά αυξανόμενου σφάλματος F_g είναι: Idata10→Idata20→exp8→Idata15→exp6→exp4→Idata20N→exp4N.

- Η εξίσωση (2) γενικά δεν δίνει καλή προσέγγιση ούτε του I_{max} ούτε της ουράς της κυματομορφής αλλά ούτε και του δεύτερου μεγίστου. Εξαίρεση αποτελούν οι συναρτήσεις δειγματοληψίας Idata10 και Idata15 για διάρκεια 30ns, που προσεγγίζουν το I_{max}. Ο γενετικός αλγόριθμος με συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N για όλες τις χρονικές διάρκειες προσεγγίζει ικανοποιητικά το I_{max} διότι περιέχει όλα τα σημεία για το διάστημα 0-2 ns. Κατατάσσοντας τις συναρτήσεις δειγματοληψίας σε σειρά αυξανόμενου σφάλματος έχουμε για διάρκεια 30ns Idata20→Idata15→exp8→exp6→Idata10→exp4→exp4N→Idata20N, ενώ για διάρκειες 50 και 90ns η κατάταξη των συναρτήσεων είναι η ακόλουθη: Idata20→exp8→Idata15→exp6→Idata10→exp4→Idata20N→exp4N.
- Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από τα συγκριτικά γραφήματα της παραγράφου 5.3.3 η εξίσωση (3) δεν προσεγγίζει το πρώτο μέγιστο Το μόνο που επιτυγχάνει είναι καλή προσέγγιση της ουράς ιδιαίτερα όταν η συνάρτηση δειγματοληψίας διαρκεί 90ns. Η κατάταξη των συναρτήσεων από το μικρότερο σφάλμα F_g στο μεγαλύτερο για διαφορετικές διάρκειες είναι η ακόλουθη:
  για διάρκεια 30ns:
  Idata20→Idata15→exp8→exp6→Idata10→exp4→Idata20N→exp4N
  για διάρκεια 50ns:
  Idata20→Idata15→exp8→exp6→exp4→Idata10→Idata20N→exp4N
  και για διάρκεια 90ns:
  exp8→Idata20→exp6→Idata15→exp4→Idata10→Idata20N→exp4N
- Η εξίσωση (4) παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας. Προσεγγίζει το I_{max} καθώς και την ουρά της κυματομορφής των πειραματικών αποτελεσμάτων (με εξαίρεση την exp6). Όσο αυξάνεται η διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση του της ουράς, ενώ όσο μικραίνει επιτυγχάνεται καλύτερη προσέγγιση του I_{max}. Ωστόσο η (4) αδυνατεί να προσεγγίσει το δεύτερο μέγιστο. Ως προς την τιμή του I_{max}, την καλύτερη προσέγγιση την επιτυγχάνει η Idata20N, εφόσον περιέχει όλα τα σημεία για το διάστημα 0-2ns. Οι συναρτήσεις δειγματοληψίας με σειρά αυξανόμενου σφάλματος είναι:

Idata10→Idata20→exp8 →Idata15→ exp6→ exp4→Idata20N→exp4N

για διάρκεια 30ns και 50ns, ενώ για διάρκεια 90ns είναι:

Idata10→Idata20→exp8 → exp6→ Idata15→ exp4→Idata20N→exp4N

Το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα συγκριτικά γραφήματα της παραγράφου 5.3 είναι ότι για μεγαλύτερη διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας έχουμε καλύτερη προσέγγιση της ουράς αλλά χειρότερη προσέγγιση του I_{max}. Το αντίθετο ισχύει όταν μειώνεται η διάρκεια της συνάρτησης δειγματοληψίας.

Από τα συγκριτικά γραφήματα των παραγράφων 5.4.1 και 5.4.2 παρατηρείται ότι η εξίσωση (4) δίνει την καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής κυματομορφής εφόσον προσεγγίζει και το πρώτο μέγιστο (I_{max}) και υπολογίζει με ακρίβεια τις παραμέτρους της διπλοεκθετικής εξίσωσης. Σε ό,τι αφορά τον αριθμό των επιλεγμένων σημείων, η Idata10 για τάση φόρτισης +2kV και διάρκεια 90ns έχει το μικρότερο σφάλμα (F_g=8,35), ενώ για τάση φόρτισης +4kV και διάρκεια 90ns το μικρότερο σφάλμα το έχει η exp8. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι συναρτήσεις δειγματοληψίας exp4N και Idata20N δίνουν καλύτερη προσέγγιση του πρώτου μεγίστου ως προς την τιμή του, αφού περιλαμβάνουν όλα τα σημεία 0-2ns, ωστόσο απαιτείται περισσότερος υπολογιστικός χρόνος. Τέλος, τόσο για τάση φόρτισης +2kV όσο και για τάση φόρτισης +4kV η κατάταξη των εξισώσεων βάσει της καταλληλότητάς τους είναι: (4)→(3)→(2)→(1).

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία προσομοίωση του κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων με τη βοήθεια του προγράμματος SPICE [38]. Επίσης, γίνεται χρήση του μοντέλου αυτού για την προσομοίωση δοκιμών πάνω σε διαφορετικά δοκίμια. Τα αποτελέσματα αυτά εισάγονται στον γενετικό αλγόριθμο για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητάς του.

6.2 Ισοδύναμο κύκλωμα εκφόρτισης

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης με τη βοήθεια του SPICE είναι απαραίτητη η εύρεση ενός ισοδυνάμου κυκλώματος εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία εξ ων συνετέθη η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων κατά την προσομοίωση στο SPICE.

Το πιστόλι της εκφόρτισης και το δοκίμιο συνδέονται μέσω του ηλεκτροδίου και του καλωδίου γείωσης μήκους 2m, που χρησιμεύει ως μονοπάτι για την επιστροφή του ρεύματος. Το καλώδιο είναι συνεστραμμένο και καλυμμένο με μονωτικό υλικό σχεδιασμένο έτσι ώστε να έχει μειωμένη αντίσταση και επαγωγή. Η αντίστασή του έχει πολύ μικρή τιμή και μπορεί να αμεληθεί συγκρινόμενη με την αντίσταση του κυκλώματος εκφόρτισης και την αντίσταση του φορτίου. Στους κανονισμούς κατά IEC διευκρινίζεται ότι το δοκίμιο θα πρέπει να συνδέεται κατά τέτοιο τρόπο με το καλώδιο ώστε να δημιουργείται τόξο.

6.2.1 Υπολογισμός των επαγωγικών στοιχείων

Η τιμή της επαγωγής του καλωδίου γείωσης επηρεάζει κυρίως την απόκριση του κυκλώματος. Είναι γνωστό ότι το ρεύμα συγκεντρώνεται στη γωνία μίας τετραγωνικής διατομής. Το γεγονός αυτό περιπλέκει τους υπολογισμούς. Για καλώδιο μήκους l και επιτρεπτότητας μ, με πλάτος w και πυκνότητα t προτείνεται ο ακόλουθος τύπος για την επαγωγή L_r [39]:

$$L_r = 0{,}002\left[\ln\left(\frac{2l}{w+t}\right) + 0.25049 + \frac{w+t}{3l} + \frac{\mu T(x)}{4}\right] \quad [\mu H] \tag{6.1}$$

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

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

$$L_s = L_{si} + L_{se} \tag{6.2}$$

$$L_{si} = \frac{\mu_0 l}{8\pi} \tag{6.3}$$

$$L_{se} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(l \ln\frac{l+\sqrt{a^2+l^2}}{a} - \sqrt{a^2+l^2} + a \right) \tag{6.4}$$

Η εξίσωση (6.4) δίνει μόνο τη συμβολή του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον αγωγό και δεν λαμβάνει υπ’ όψιν την επίδραση άλλων αγωγών. Η δοκιμή για τον έλεγχο της ατρωσίας ενός εξοπλισμού σε ρεύματα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης γίνεται μέσα σε ανηχωικό θάλαμο και ο εξοπλισμός τοποθετείται πάνω σε αγώγιμη πλάκα. Εφόσον το ρεύμα ρέει πάνω στο αγώγιμο δάπεδο εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου του καλωδίου γείωσης, η αλληλεπαγωγή δεν μπορεί να αμεληθεί. Αν υποτεθεί ότι η απόσταση μεταξύ του δαπέδου και του κέντρου του αγωγού είναι h με $h \ll l$, η επαγωγή L_{sm} του καλωδίου γείωσης είναι:

$$L_{sm} = L_{smi} + L_{sme} \tag{6.5}$$

$$L_{smi} = \frac{\mu_0 l}{8\pi} \tag{6.6}$$

$$L_{sme} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\ln\frac{2h-a}{a} \tag{6.7}$$

Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του αγωγού είναι μηδενικό και οι επαγωγές L_{si} και L_{smi} των εξισώσεων (6.3) και (6.6) μπορούν να αγνοηθούν.

6.2.2 Το καλώδιο γείωσης ως γραμμή μεταφοράς

Στην εξίσωση (6.5) γίνεται η υπόθεση ότι το καλώδιο γείωσης είναι τοποθετημένο πάνω από την αγώγιμη επιφάνεια. Τότε δημιουργείται μία γραμμή μεταφοράς, που έχει ως δρόμο επιστροφής το έδαφος. Παρόλο που το καλώδιο γείωσης έχει μονωτικό περίβλημα, που είναι κάποιο διηλεκτρικό, το στρώμα αυτό είναι λεπτό και δεν επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά του συνολικού συστήματος. Συνεπώς, το διηλεκτρικό υλικό μπορεί να αγνοηθεί. Τότε, η γραμμή μεταφοράς ικανοποιεί τις (6.5) και (6.7). Η χαρακτηριστική αντίσταση Z_m δίνεται από τον τύπο:

$$Z_m = 59.952 \ln\left(\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1}\right) \quad [\Omega] \tag{6.8}$$

6.2.3 Χωρητικότητα του πιστολιού

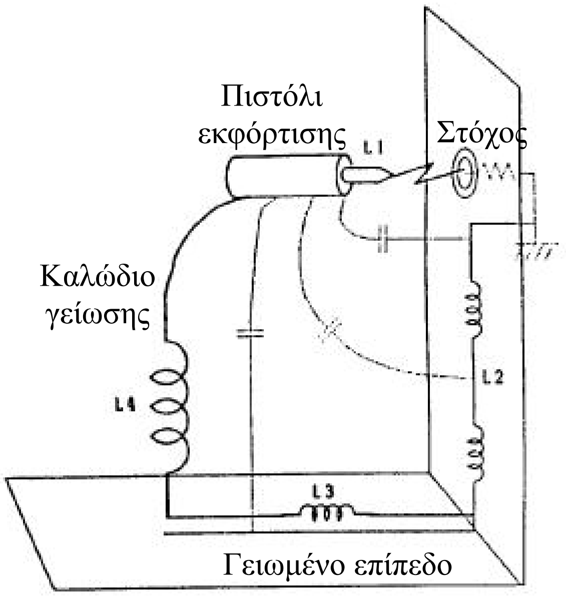
Η κατασκευή του πιστολιού όπως και η χωρητικότητα C_m προς τη γη μπορούν να αναπαρασταθούν με μία μεταλλική σφαίρα ακτίνας α. Αν η απόσταση του κέντρου της σφαίρας από το δάπεδο είναι h, η χωρητικότητα μπορεί να υπολογισθεί θεωρώντας το είδωλό της. Η έκφραση που προκύπτει είναι μία σειρά από την οποία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

$$C_m = \frac{8\pi\varepsilon_0 a h}{2h - a} \tag{6.9}$$

6.2.4 Μοντέλα γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για αριθμητική ανάλυση

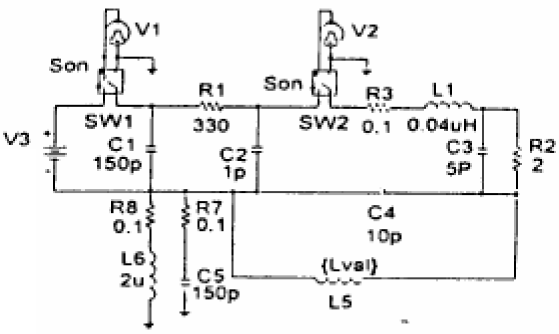
Η σχεδίαση ηλεκτρονικών αυτοματισμών βρίσκεται σε εξέλιξη σε ό,τι αφορά το σχεδιασμό ηλεκτρονικών, ενώ έχουν ήδη καθιερωθεί μέθοδοι για την αριθμητική ανάλυση της απόκρισης κυκλωμάτων. Το λογισμικό SPICE για ανάλυση κυκλωμάτων, το οποίο αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Berkeley, χρησιμοποιείται ευρέως ξεπερνώντας πολλά προβλήματα όπως η σύγκλιση [40]. Επιπλέον, στο SPICE παρέχονται μοντέλα για ολοκληρωμένα κυκλώματα. Υπάρχουν ακόμα μοντέλα που περιγράφουν ποικίλα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα [41].

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.1, η κατασκευή του ισοδυνάμου κυκλώματος περιπλέκεται λόγω των παράσιτων στοιχείων στον πειραματικό χώρο. Για την ύπαρξη κατανεμημένων χωρητικοτήτων, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα, γίνεται αναφορά στο Πρότυπο αλλά δεν φαίνονται στο κύκλωμα. Εάν δεν υπάρχει η κατανεμημένη χωρητικότητα, δεν παράγεται το αρχικό μέγιστο.



Σχήμα 6.1: Στοιχεία περιβάλλοντος δοκιμής

Κατ' αρχάς, καθορίζονται οι τιμές των σταθερών του κυκλώματος. Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται το πρώτο κυκλωματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση. Οι σταθερές του κυκλώματος ερμηνεύονται ως εξής: οι R_1, R_2 και C_1 καθορίζονται από το Πρότυπο. Για τον προσδιορισμό των υπόλοιπων κυκλωματικών στοιχείων θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και τα παράσιτα στοιχεία.



Σχήμα 6.2:Κυκλωματικό μοντέλο 1

Η τιμή της επαγωγής θα πρέπει να καθορισθεί ανεξάρτητα αφού δεν υπάρχουν περιορισμοί (specifications). Το μήκος του ηλεκτροδίου του πιστολιού εκφόρτισης έχει καθοριστεί να είναι 50mm και η ακτίνα 6mm. Τότε, η εξίσωση (6.4) εφαρμόζεται με την παραδοχή ότι δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο μέσα στο αγωγό (conductor).

Αντικαθιστώντας l=50mm και α=6mm προκύπτει L_1=0,0193μH. Στην πράξη το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης και η αντίσταση εκφόρτισης συνδέονται με κοινό καλώδιο. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και την επαγωγή του καλωδίου, η τιμή της L_1 λαμβάνεται ίση με 0,04μH. Η επαγωγή της επιφάνειας του αγώγιμου στόχου L_2 είναι επαρκώς μικρή και μπορεί να αγνοηθεί συγκρινόμενη με την επαγωγή του καλωδίου γείωσης εφόσον αυτό έχει μήκος 1m και η επιφάνεια είναι επαρκώς μεγάλη.

Υποθέτουμε ότι το καλώδιο γείωσης έχει διάμετρο 10mm. Αντικαθιστώντας στην (6.8) α=5 mm και h=6,84mm προκύπτει Z_m=50Ω. Αφαιρώντας την ακτίνα α του αγωγού το καλώδιο γείωσης βρίσκεται πάνω από την αγώγιμη επιφάνεια κατά 1,84mm. Αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί σε γραμμή μεταφοράς με αντίσταση 50Ω, σύμφωνης με την πραγματική κατάσταση, αν λάβουμε υπ' όψιν και την μονωτική επιφάνεια. Όταν το καλώδιο είναι πιο κοντά, αλλά εξακολουθεί να θεωρείται γραμμή μεταφοράς 50Ω, η αυτεπαγωγή μειώνεται λιγότερο ή περισσότερο αναλόγως με το κενό που υπάρχει μεταξύ τους. Μέσα στον αγωγό γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Εφαρμόζοντας την (6.7) και αντικαθιστώντας h=6,84mm, l=1m προκύπτει ότι η L_3 της αγώγιμης πλάκας ισούται με 0,11μH.

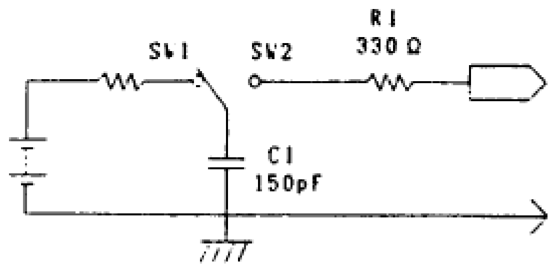
Η εξίσωση (6.7) δεν ισχύει για τον υπολογισμό της L_4 εφόσον το καλώδιο γείωσης βρίσκεται μακρύτερα από 30cm από τη μεταλλική πλάκα στην πλευρά του στόχου. Εφαρμόζοντας την (6.4) και αντικαθιστώντας l=1m προκύπτει L_4=0,861μH. Οι επαγωγές L_3 και L_4 διαφέρουν κατά ένα συντελεστή μεγαλύτερο του 8, παρόλο που έχουν τα ίδια μήκη. Αυτό συμβαίνει διότι οι αποστάσεις από τη μεταλλική πλάκα είναι διαφορετικές.

Η R_2 είναι η αντίσταση του στόχου. Η επαγωγή L_5 του καλωδίου γείωσης ισούται με το άθροισμα των L_2, L_3 και L_4, οπότε προκύπτει L_5=1μH.

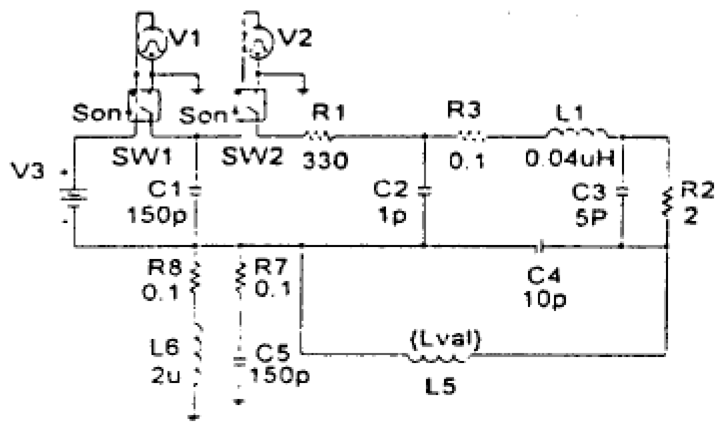
Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του καλωδίου με τη γη εφαρμόζεται η εξίσωση (6.9). Για α=3cm και h=20cm από το δάπεδο προκύπτει ότι C_m=3,6pF. Στην πράξη το πιστόλι το κρατά άνθρωπος που έχει χωρητικότητα C_5=150pF. Κατά συνέπεια δεν αρκεί η αντικατάσταση της χωρητικότητας του στόχου μόνο από την C_m. Έτσι λοιπόν τίθεται C_4=10pF, συμπεριλαμβανομένης και της χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος.

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

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.1 ο διακόπτης φόρτισης και ο διακόπτης εκφόρτισης είναι συνδεδεμένοι ξεχωριστά. Θα πρέπει να γίνεται σωστός χειρισμός τους έτσι ώστε να μην είναι και οι δύο ανοικτοί ή κλειστοί ταυτόχρονα. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα προχωρούμε σε ανασχεδίαση του διακόπτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Κυκλωματικό διάγραμμα πραγματικού κυκλώματος φόρτισης



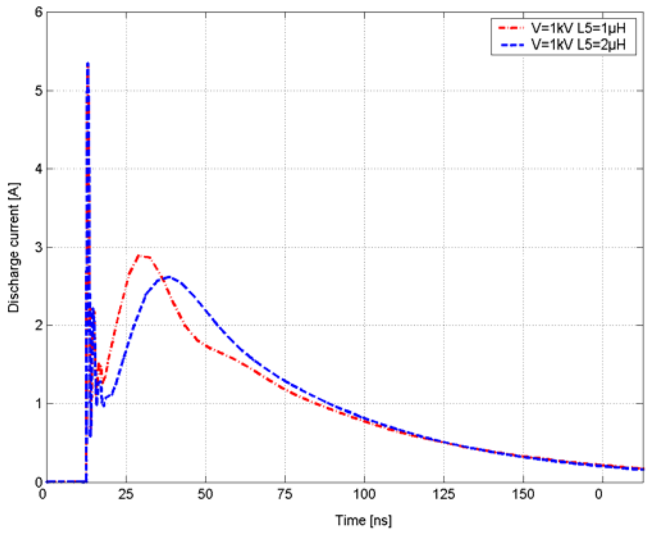
Σχήμα 6.4: Κυκλωματικό μοντέλο 2

Στο Σχήμα 6.4 που μοντελοποιείται το κύκλωμα του Σχήματος 6.3, ο διακόπτης SW_2 έχει μεταφερθεί αριστερά του πυκνωτή C_2 και της αντίστασης R_1. Οι σταθερές του κυκλώματος παραμένουν ίδιες.

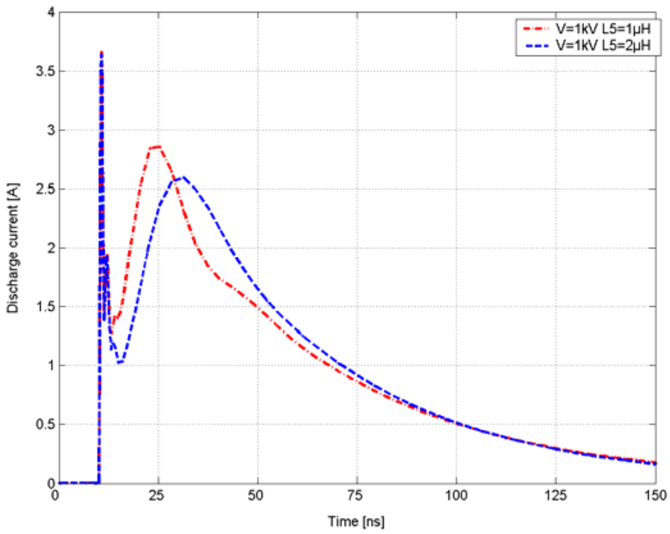
6.3 Ανάλυση της κυματομορφής του ρεύματος

6.3.1 Επίδραση του καλωδίου γείωσης στην κυματομορφή του ρεύματος

Όπως καταδείχθηκε στην παράγραφο 6.2.4. η επαγωγή του καλωδίου γείωσης εξαρτάται από τη σχετική θέση του καλωδίου γείωσης ως προς τη γειωμένη πλάκα. Στην 6.2.4 έγινε η υπόθεση ότι το καλώδιο γείωσης είναι παράλληλο προς την γειωμένη πλάκα και υπολογίσθηκε L_5=1μH. Όταν το καλώδιο γείωσης είναι απομακρυσμένο από την γειωμένη πλάκα ή δεν υπάρχει γειωμένη πλάκα κατά τη δοκιμή τότε L_3=L_4 και συνεπώς L_5=2μH. Στα Σχήμα 6.5 και 6.6 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για L_5=1μH και L_5=2μH, για τάσεις φόρτισης +1kV και για τα δύο κυκλωματικά μοντέλα.



Σχήμα 6.5: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1



Σχήμα 6.6: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 2

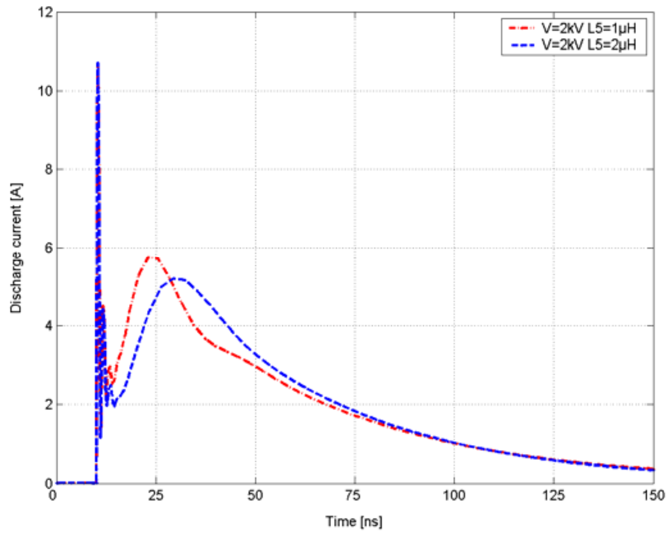
Συγκρίνοντας τα Σχήματα 6.5 και 6.6 παρατηρούμε ότι η αλλαγή στο μηχανισμό του διακόπτη επηρέασε το I_{max} και μάλιστα η τιμή του μειώθηκε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παράσιτη χωρητικότητα C_2 άλλαξε από πηγή σε φορτίο λόγω της μετατόπισης του διακόπτη εκφόρτισης.

Γι' αυτόν τον λόγο είναι σημαντικό να καθορίζονται οι συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η δοκιμή ώστε να ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι κατά τέτοιο τρόπο ώστε η τιμή της C_2 να παραμένει σταθερή.

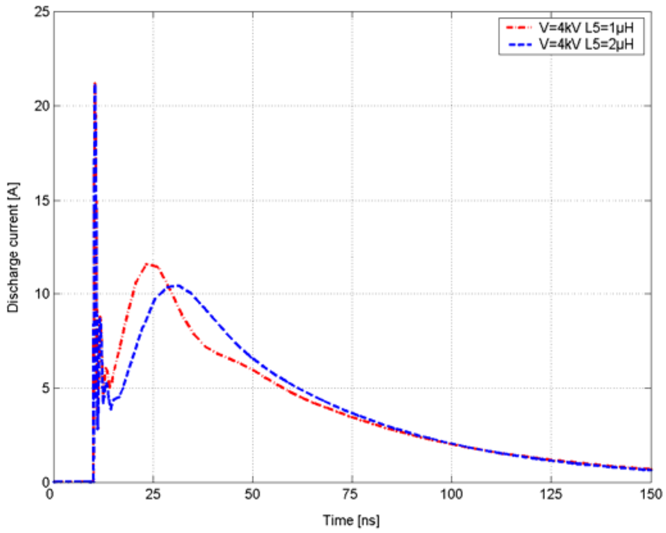
Επίσης παρατηρείται ότι η τιμή του I_{max} που προκύπτει από το κύκλωμα του Σχήματος 2.1 είναι πολύ μεγάλη. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με την αύξηση της επαγωγής L_1 που επηρεάζεται από το μήκος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης.

6.4 Σύγκριση των δύο κυκλωμάτων της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

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



Σχήμα 6.7: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1 για τάση φόρτισης +2kV

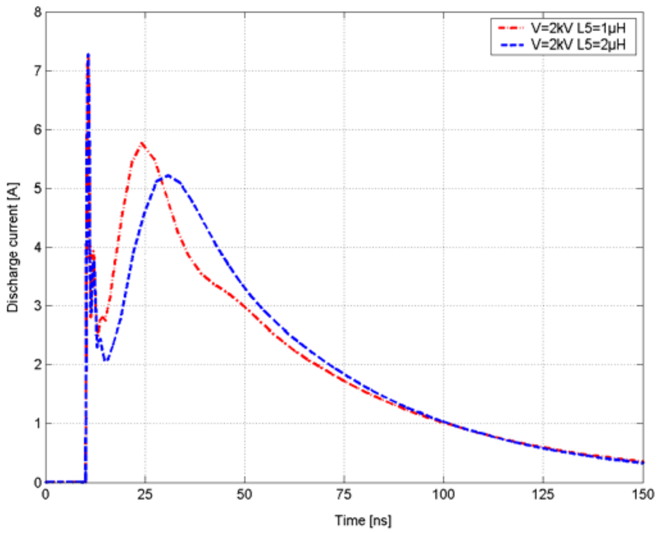


Σχήμα 6.8: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1 για τάση φόρτισης +4kV

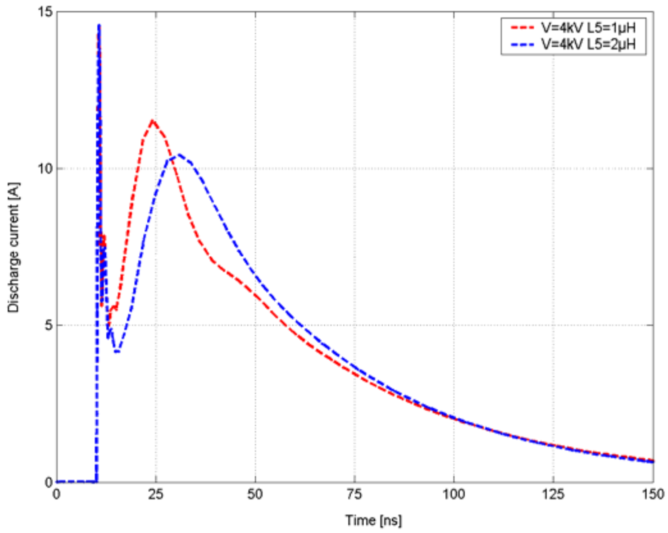
Τάση[kV]	L_5[μH]	I_{max}[A]	t_r[nsec]	I_{30}[A]	I_{60}[A]
2	1	10,7169	0,2606	3,4905	1,9091
	2	10,7119	0,2649	4,344	2,0509
4	1	21,2085	0,2345	6,948	3,8191
	2	21,1081	0,2372	8,7048	4,101

Πίνακας 6.2: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 1

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



Σχήμα 6.9: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 2 για τάση φόρτισης +2kV



Σχήμα 6.10: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 2 για τάση φόρτισης 4kV

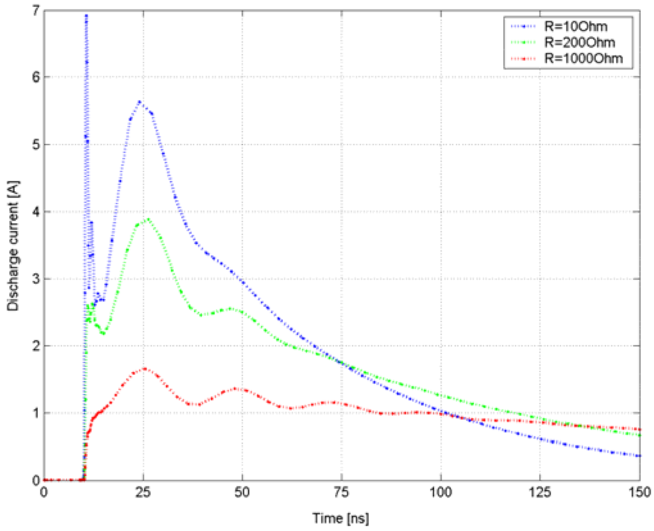
Τάση[kV]	L_5[μH]	I_{max}[A]	t_r[nsec]	I_{30}[A]	I_{60}[A]
2	1	7,245	0,3793	3,4806	1,9065
	2	7,2815	0,3956	4,3675	2,0486
4	1	14,49	0,3793	6,9613	3,8131
	2	14,563	0,3921	8,7342	4,0968

Πίνακας 6.3: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 2

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ικανοποιούνται οι προδιαγραφές και συνεπώς το κύκλωμα του Σχήματος 6.5 δίνει ικανοποιητικές κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

6.5 Δοκιμές του κυκλώματος για διαφορετικά δοκίμια

Για το κύκλωμα του Σχήματος 6.5, που προσομοιώνει την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, και για τιμή L_5=1μH και τάση φόρτισης +2kV, αντικαταστήσαμε τον στόχο των 2Ω με ωμικά δοκίμια μεγαλύτερης τιμής αντίστασης, με επαγωγικά αλλά και χωρητικά δοκίμια. Οι κυματομορφές που προέκυψαν φαίνονται στα ακόλουθα γραφήματα. Κάτω από κάθε γράφημα παρατίθενται και οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων των κυματομορφών ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος ικανοποίησης των ορίων τους.

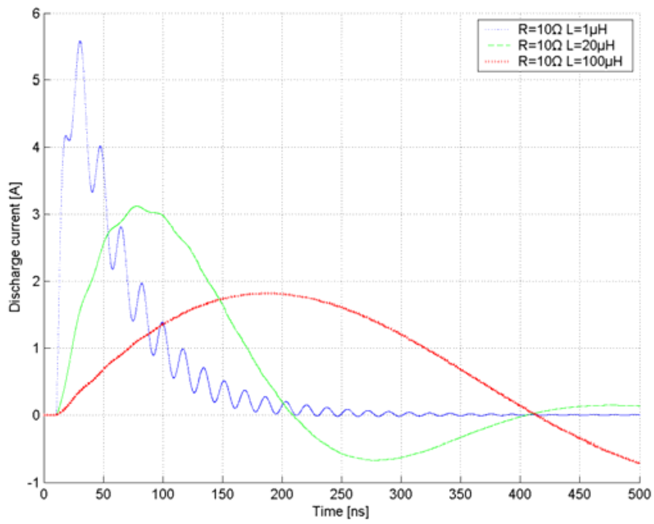


Σχήμα 6.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για ωμικό δοκίμιο

R[Ω]	I_{max}[A]	t_r[ns]	I_{30}[A]	I_{60}[A]
10	6,9713	0,3883	3,3676	1,9145
200	2,6068	0,5473	2,4678	1,8532
1000	Δεν ισχύει η κυματομορφή του ρεύματος			

Πίνακας 6.4: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 2 για ωμικά δοκίμια

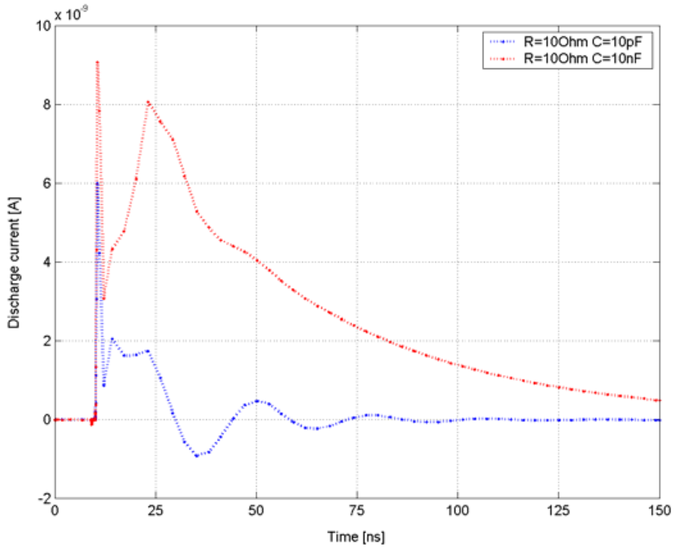
Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι αύξηση της τιμής της αντίστασης του δοκιμίου επηρεάζει την κυματομορφή του ρεύματος και μάλιστα όσο η τιμή αυξάνει παύει να ισχύει η κυματομορφή του Προτύπου.



Σχήμα 6.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης για ωμικό-επαγωγικό δοκίμιο

R[Ω]	L[μH]	I_{max}[A]	t_r[ns]	I_{30}[A]	I_{60}[A]
10	1	4,2086	0,7402	3,5315	2,5203
10	20	Δεν ισχύει η κυματομορφή του ρεύματος			
10	100	Δεν ισχύει η κυματομορφή του ρεύματος			

Πίνακας 6.5: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 2 για ωμικά-επαγωγικά δοκίμια



Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης για ωμικό-χωρητικό φορτίο

R[Ω]	C	I_{max}[A]	t_r[ns]	I_{30}[A]	I_{60}[A]
10	10pF	0,6E-09	0,3788	-5,9608E-11	-8,8058E-11
10	10nF	9,0734E-09	0,3631	4,6569E-09	2,5975E-09

Πίνακας 6.5: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης του μοντέλου 2 για ωμικά-χωρητικά δοκίμια

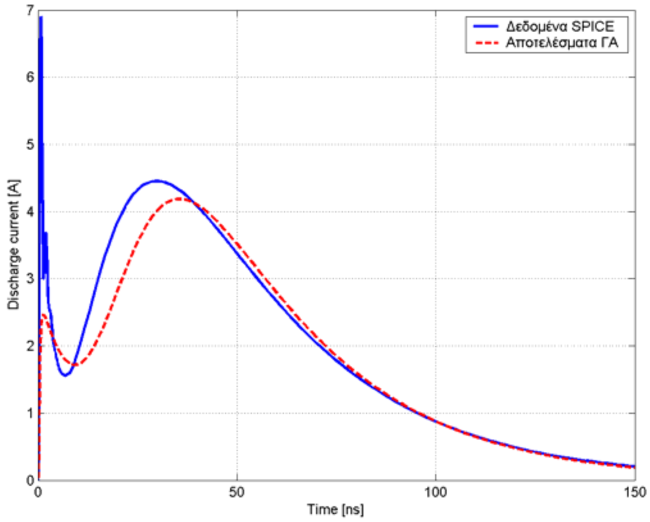
6.6 Εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου σε αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο SPICE

Για τις περιπτώσεις ωμικού δοκιμίου αντίστασης R=10Ω και ωμικού-επαγωγικού δοκιμίου με R=10Ω και L=1μH τα αποτελέσματα της προσομοίωση εισήχθησαν ως δεδομένα στον γενετικό αλγόριθμο. Για την εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δεδομένα της προσομοίωσης του SPICE αλλά έγινε δειγματοληψία. Για τα 5 πρώτα ns που είναι και τα πιο κρίσιμα για την κυματομορφή επιλέχθηκαν τα 152 πρώτα σημεία της προσομοίωσης με ακρίβεια 0,01ns ενώ για την υπόλοιπη κυματομορφή (65 σημεία) μέχρι τα 150ns χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία από την προσομοίωση με ακρίβεια 0,1ns. Θα πρέπει να αναφέρουμε ακόμα ότι η εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου έγινε για την εξίσωση (4) που όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 5 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Ακολούθως παρατίθενται οι πίνακες των αποτελεσμάτων του γενετικού αλγορίθμου για ωμικό φορτίο 10 Ω και για ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Αριθμός επαναλήψεων -Γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A]	I_2[A]	t_1[ns]	t_2[ns]	t_3[ns]	t_4[ns]
20	32,31	32,39	2,43	4,99	0,46	12,03	31,46	31,83
20	53,33	53,64	2,45	5,63	0,76	10,03	45,74	26,06
20	54,28	54,91	3,08	3,27	0,57	4,98	17,19	50,01
30	38,40	38,41	4,42	5,99	1,59	1,83	20,31	33,96

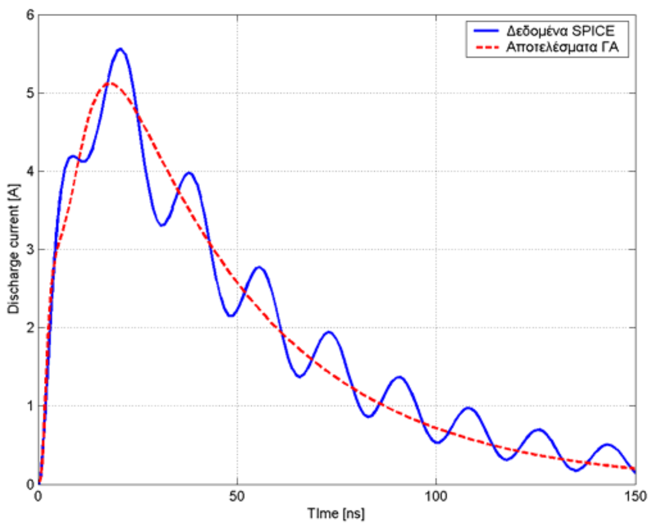
Πίνακας 6.6: Τιμές των παραμέτρων της (4) χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο SPICE για ωμικό δοκίμιο 10Ω και τάση φόρτισης +2kV



Σχήμα 6.14: Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για ωμικό δοκίμιο 10Ω και τάση φόρτισης +2kV

Αριθμός επαναλήψεων - Γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A]	I_2[A]	t_1[ns]	t_2[ns]	t_3[ns]	t_4[ns]
20	51,98	52,34	2,68	4,69	2,62	10,06	12,81	39,00
20	54,02	54,53	2,12	4,27	2,70	16,52	7,43	44,11
20	57,50	58,05	2,66	3,73	2,88	7,49	16,02	42,20
30	58,36	58,39	2,80	3,77	2,44	26,58	25,01	32,80
30	53,84	54,07	2,11	4,12	2,16	25,05	12,52	39,04

Πίνακας 6.7: Τιμές των παραμέτρων της (4) χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο SPICE για ωμικό-επαγωγικό δοκίμιο 10Ω και 1μH και τάση φόρτισης +2kV



Σχήμα 6.15: Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου για ωμικό-επαγωγικό δοκίμιο με R=10Ω, L=1μΗκαι τάση φόρτισης +2kV

Κεφάλαιο 7

Η επόμενη μέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης των παραμέτρων των εξισώσεων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ώστε να μπορεί να συναχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την καταλληλότητα καθεμιάς εξίσωσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε γενετικός αλγόριθμος, που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του MATLAB. Ωστόσο, οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν αποτελούν τη μοναδική μέθοδο βελτιστοποίησης, θα μπορούσε για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος *Simplex.*

Παράλληλα με την προσπάθεια εύρεσης κατάλληλης εξίσωσης για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, θα πρέπει αναπτυχθούν μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις ώστε οι κυματομορφές που παράγονται από τις προσομοιώσεις να ταιριάζουν με την κυματομορφή του Προτύπου.

Ακόμα θα πρέπει να εξεταστεί η επίδραση που έχει η θέση της πειραματικής διάταξης για την διακρίβωση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το υπάρχον Πρότυπο ορίζει ότι η δοκιμές πρέπει να γίνονται με τη διάταξη σε οριζόντια θέση. Κρίνεται σκόπιμο να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων όταν η διάταξη είναι σε κατακόρυφη θέση, διότι σε αυτήν την περίπτωση εξασφαλίζεται καλύτερα η επαναληψιμότητα των δοκιμών.

Τέλος, όπως προκύπτει από το Κεφάλαιο 6, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η διεξαγωγή πειραμάτων πάνω σε δοκίμια διαφορετικών τιμών και όχι μόνο ωμικού χαρακτήρα με διαφορετικά probes ώστε να γίνει έλεγχος της ικανότητας τους να αντιλαμβάνονται τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα.

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] European Standard EN 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2001.

[4] ΕΛΟΤ ΕΝ 61000.06.01: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφριάς βιομηχανίας περιβάλλοντα”, 2001.

[5] T.Ficker, “Electrification of human body by walking”, June 2005, διαθέσιμο στη διεύθυνση http://www.sciencedirect.com

[6] T.Ficker, “Electron avalanches I-Statistics of partial microdischarges in their pre-streamer stage”, IEEE Transactions on. Diel. El. Insul. 10, 2003, pp. 258-271.

[7] T.Ficker, “Electron avalanches II-Fractal morphology of partial microdischarges spots on dialectic barriers”, IEEE Transactions on. Diel. El. Insul. 10, 2003, pp. 700-707.

[8] F.Paschen, “The potential difference necessary for the Passage of sparks in air, hydrogen and carbon dioxide at different pressure”, Ann. Phys., vol. 37, 1889, pp.69-76.

[9] Paul Cartwright, “Electrostatic Hazards in the aerosol industry”, διαθέσιμο στη διεύθυνση http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp

[10] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.

[11] 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

[12] Martin Lutz, "The determination of the immunity to electrostatic discharge 'ESD' with transient 1000 generator", EMC Partner, Seminar 1999.

[13] Γεώργιος Π. Φώτης, "Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και ατρωσία εξοπλισμού ισχύος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση", Ενδιάμεση Κρίση του Υποψήφιου Διδάκτορα Γεωργίου Π. Φώτη, Ιούλιος 2004.

[14] IEC 801-2, Electromagnetic compatibility for industrial process measurement and control equipment, Part 2: Electrostatic discharge requirement, 1991.

[15] IEC 1000-4-2, International Standard, 1995.

[16] ANSI C63 16_1993_American National Standard guide for ESD test methodologies and criteria for electronic equipment, 1993.

[17] John H. Mayer, "Revised waveform drives ESD standards", Test & Measurement World, 2002, διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.reed-electronics.com/tmworld/article/CA197791.html

[18] Roman Jobara, David Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, Martin Aidam "Computer Simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no.1, February 2000, pp. 54-65.

[19] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Field radiated by electrostatic discharges", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, Feb. 1991, pp. 10 – 18.

[20] D. Pommerenke, ESD: "What has been achieved, what is less understood", IEEE Symposium on EMC, Minneapolis, August 2002, pp. 895-900.

[21] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopulos I.A.: "Determination of the Discharge Current Equation Parameters of ESD using Genetic Algorithms", Institute of Physics (IOP), Proceedings Modeling and Simulation in Materials, science and Engineering (Under Review).

[22] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopulos I.A.: "Parameter Estimation for the Equation of the Electrostatic Discharge Current using Genetic Algorithms", Proceedings of the 40th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2005), Cork, Ireland, September 7-9, 2005, vol.2, pp.635-639 (Session TA2).

[23] Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Tom Van Doren,

James L. Drewniak, Ashwin Shashindranath, "Numerical Modelling of Electrostatic Discharge Generators", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no.2, May 2003, pp. 258-271.

[24] S. V. Berghe, D. Zutter, "Study of ESD signal entry through coaxial cable shields", Journal of Electrostatics, vol.44, September, 1998, pp. 135-148.

[25] V. Amoruso, M. Helali, F. Lattarulo, "An improved model of man for ESD applications", Journal of Electrostatics, vol.49, August, 2000, pp. 225-244.

[26] O. Fujiwara, H. Tanaka, Y. Yamanaka, "Equivalent circuit modeling of discharge current injected in contact with an ESD-gun", Electrical Engineering in Japan, vol.149, no. 1, 2004, pp. 8-14.

[27] D. Kind and K. Feser, High voltage test techniques, Newnes, 2001.

[28] 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.

[29] Heidler H., "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung", presented at 18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Munich, Germany, 1985

[30] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438, Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.

[31] Σπύρος Γ. Τζαφέστας: «Υπολογιστική Νοημοσύνη, Τόμος Α: Μεθοδολογίες», Αθήνα 2002.

[32] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου: «Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας», Αθήνα 2003.

[33] Ιωάννης Βλαχάβας, Πέτρος Κεφαλάς, Νικόλαος, Βασιλειάδης, Φώτης Κόκκορας, Ηλίας Σακελαρίου, Τεχνητή Νοημοσύνη, Β' Έκδοση, Γαρταγάνης, Θεσσαλονίκη.

[34] Γ. Τσεκούρας: «Εφαρμογή της μεθόδου των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων σε θέματα σηράγγων», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2004.

[35] I. F. Gonos and I. A. Stathopulos, "Estimation of multi-layer soil parameters using genetic algorithms", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, Jan. 2005.

[36] 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.

[37] I. F. Gonos, F. V. Topalis and I. A. Stathopulos, "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.

[38] N. Murota, "Determination of Characteristics of the Discharge Current by the Human Charge Model ESD Simulator", Electronics and Communications in Japan, Part 1, vol. 80, no. 4, 1997, pp. 49-57.

[39] H. M. Greenhouse. "Design of planar microelectronics inductors", Trans. IEE, PHP-10, No.2, pp 101-109 (June 1974).

[40] A. Vladimirescu, The Spice Book, Wiley (1994)

[41] S. Celozzi and M. Felixiani, "Time-domain solution of field-excited multiconductor transmission line equation", Trans. IEEE, EMC-37, No3, pp 421-432 (Aug. 1995).

Παράρτημα

Αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου

Στο παράρτημα καταγράφονται σε πίνακες τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου που προέκυψαν για διαφορετικές τιμές του αριθμού των γεννητόρων και των επαναλήψεων για όλες τις συναρτήσεις δειγματοληψίας, για όλες τις διάρκειες και για τις δύο τιμές τάσεων εκφορτίσης. Από αυτές τις τιμές επιλέχθηκαν για κάθε περίπτωση οι καλύτερες (μικρότερο F_g και οι τιμές των παραμέτρων να μην είναι κοντά στα όρια) οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

Τάση +2kV - Διάρκεια 30ns

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	739,92	20,81	5,19	44,43	7,42
20	516,65	16,94	3,44	99,89	2,17
20	495,57	20,10	4,08	93,39	7,91
30	537,91	16,04	3,16	99,97	0,02
30	520,83	17,01	3,40	96,81	2,34
50	525,52	15,83	3,22	100,00	0,20
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..500)	t_2[ns] (0..50)
20	691,32	13,84	3,07	400,71	0,42
20	658,17	13,17	3,06	348,45	0,14
20	645,16	12,72	2,93	372,55	0,14
30	690,41	13,92	3,13	375,14	0,17
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..500)	t_2[ns] (0..20)
30	667,89	12,66	2,93	433,59	0,07

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..20)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	542,38	16,91	4,33	3,30	59,61	6,79
20	453,79	15,93	4,07	2,22	77,85	8,67
20	412,09	15,43	6,55	4,46	50,91	18,74
30	457,82	15,59	7,02	4,86	45,93	18,46
30	480,28	14,81	4,37	2,19	103,71	17,49

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	509,51	11,86	2,09	0,16	2,40	2,03	7,95	44,92
20	1340,50	11,83	2,39	0,17	5,47	13,44	4,23	21,17
20	1562,30	13,51	2,51	0,14	3,80	0,22	7,38	77,11
20	908,19	13,71	2,16	0,13	6,59	12,78	6,47	56,26
30	519,04	12,48	2,20	0,13	5,41	13,75	6,87	50,79
30	448,87	13,07	2,50	0,13	5,33	12,51	5,76	50,46

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	518,42	11,99	4,21	3,30	0,19	8,71	17,91	94,95
20	265,49	10,76	3,92	3,41	0,41	12,69	26,50	48,36
20	1147,90	11,02	3,79	4,58	0,24	16,80	36,86	56,41
30	549,85	11,76	3,56	3,18	0,76	11,15	20,60	99,18
30	353,37	9,94	3,75	3,05	0,17	14,89	23,72	69,94
50	277,98	11,74	2,81	3,05	1,59	19,98	30,47	35,94
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..200)
20	378,67	11,13	4,28	3,26	0,07	12,97	28,26	33,63
30	618,86	10,06	3,78	2,93	0,31	13,28	20,14	154,36
40	1097,90	10,41	3,75	4,19	0,26	10,82	37,49	12,50

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp6

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	636,52	13,32	3,81	62,32	3,20
20	523,61	11,99	3,35	99,90	2,15
20	459,65	14,07	4,08	93,60	7,87
30	516,38	13,66	3,91	73,27	4,79
30	538,83	11,30	3,12	99,95	0,10
50	523,99	13,06	3,75	75,01	3,27
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	536,75	10,17	3,08	149,41	0,03
20	553,38	9,88	3,05	179,55	0,00
30	557,76	9,81	3,05	190,62	0,04

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..30)
20	434,18	11,47	5,86	4,48	72,90	18,73
20	457,35	11,99	4,31	3,53	83,03	9,37
20	423,39	11,98	7,77	6,43	44,37	17,30
30	502,62	11,31	4,60	2,85	103,63	17,18
30	487,58	11,43	4,51	2,98	101,40	14,98

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	791,95	6,95	1,86	0,17	5,18	3,27	5,47	39,20
20	749,28	10,73	1,25	0,16	7,51	4,43	7,91	40,60
20	1298,80	9,36	2,58	0,16	3,32	13,00	6,26	22,60
20	909,05	20,99	13,66	0,16	0,68	15,68	0,37	32,86
30	723,75	8,41	2,21	0,14	4,02	14,35	7,65	34,43
30	816,75	9,05	1,87	0,13	6,14	18,76	6,55	30,60

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	1974,10	11,12	3,74	5,43	1,50	10,00	31,33	85,15
20	227,59	7,97	3,15	4,00	0,37	15,42	31,25	33,26
20	610,80	8,81	3,61	4,06	2,08	8,36	30,10	23,05
30	635,69	6,90	3,90	4,47	0,10	17,25	38,53	38,00
30	1848,20	7,96	4,12	6,74	0,16	14,88	48,46	40,63
50	339,88	6,46	3,28	4,16	0,28	17,68	39,84	23,05
50	593,30	6,50	3,56	3,75	0,09	19,98	33,40	50,22

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp8

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	513,09	9,26	3,65	82,33	3,02
20	856,97	10,95	33,00	22,52	17,58
20	617,75	10,26	4,42	55,73	5,78
30	530,91	8,75	3,23	99,90	0,02
30	514,38	8,96	3,44	99,21	0,05
50	508,39	9,08	3,59	99,22	3,43
20	631,75	9,85	4,08	58,78	4,13
20	547,57	8,54	3,32	154,15	2,50
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..20)
30	545,09	7,89	3,05	162,50	0,00
30	531,44	7,97	3,13	154,21	0,16

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..30)
20	527,72	8,78	8,29	7,78	39,35	14,77
20	392,10	8,70	6,50	5,34	57,22	16,99
20	381,28	8,76	7,53	6,58	51,01	17,66
30	501,07	7,98	3,65	3,12	106,05	5,00
30	465,27	8,56	4,40	3,52	92,22	11,36

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	996,12	6,81	2,99	0,19	4,64	0,24	3,39	37,50
20	2061,10	7,72	2,51	0,14	4,99	7,01	5,49	77,43
20	1664,60	14,93	12,69	0,33	2,10	2,12	0,16	20,22
20	943,97	6,29	2,35	0,14	6,17	7,21	5,02	56,08
30	736,90	6,31	2,34	0,13	6,38	18,94	5,25	27,68
30	631,49	7,03	1,82	0,14	4,96	1,25	8,47	63,30

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	336,48	6,46	3,93	3,01	0,86	10,65	21,81	47,35
20	1212,70	7,05	2,87	5,51	2,84	16,83	47,32	38,01
20	488,72	7,21	10,03	2,98	1,70	0,59	3,64	99,53
30	476,40	6,58	2,75	2,94	2,99	13,81	22,72	91,82
30	1015,60	5,94	3,62	4,43	0,33	10,00	37,87	13,38
50	270,79	5,45	4,22	3,28	0,00	15,23	29,10	35,94
50	760,04	5,37	3,49	3,72	0,08	18,46	42,77	16,36
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..200)
30	926,13	5,70	3,89	3,52	0,22	15,15	26,45	112,81
20	835,12	5,78	3,27	3,28	0,45	17,35	24,40	125,25

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	564,05	8,13	3,65	71,79	2,25
20	578,58	8,91	5,33	49,67	8,88
20	527,47	7,24	3,25	99,61	0,40
30	516,74	7,37	3,44	99,86	0,02
30	519,27	8,43	4,06	68,65	4,93
50	517,14	7,37	3,44	99,61	0,01
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	519,78	7,58	3,44	99,99	3,26
20	540,12	7,45	3,12	99,97	0,07
20	544,67	6,54	3,04	168,75	0,06

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	527,52	12,26	3,18	2,42	104,87	0,16
20	423,80	13,12	7,15	5,41	46,71	17,77
20	449,46	12,74	4,42	2,48	91,73	14,94
30	419,54	12,77	5,33	3,62	72,50	17,50
30	480,17	12,67	4,28	2,45	104,83	14,90

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	812,82	10,94	2,59	0,14	3,71	14,85	7,51	32,61
20	1527,10	14,86	1,25	0,24	3,98	5,03	4,64	21,18
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..20)	σ_2[ns] (0..100)
20	449,50	12,46	2,81	0,13	5,01	13,42	6,28	50,11
20	457,84	10,76	2,51	0,14	5,07	3,36	6,00	57,24
30	1408,30	11,12	1,87	0,12	2,52	11,55	14,38	69,50
30	545,62	10,65	1,88	0,14	5,17	1,48	10,00	60,32

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	517,00	4,91	3,36	2,57	0,20	19,91	24,91	35,88
20	275,80	4,79	3,23	2,80	0,47	19,27	26,49	45,30
20	995,13	5,70	2,81	3,75	2,14	17,45	30,36	85,35
30	383,10	4,53	3,46	3,25	0,15	19,57	29,20	56,03
30	324,21	4,82	3,60	3,94	0,38	16,59	35,02	37,51
50	240,68	4,64	4,00	4,22	0,00	16,07	40,18	25,10
50	1569,90	5,07	3,81	5,63	0,09	19,21	46,09	47,09
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	997,21	5,39	3,08	3,27	1,18	29,96	34,91	89,23
20	581,61	5,95	5,67	2,89	0,19	5,61	14,09	45,88
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..100)
30	3327,40	5,43	2,99	7,56	1,13	27,40	52,43	90,53

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	526,75	8,69	3,29	95,51	0,05
20	531,17	9,82	3,75	73,46	3,13
20	512,83	9,01	3,45	97,21	0,08
30	517,77	8,60	3,29	99,95	0,15
30	527,76	9,31	3,44	87,03	2,52
50	526,48	8,58	3,28	100,00	0,00

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	403,01	9,35	6,05	4,52	59,20	17,50
20	476,94	9,40	3,77	2,46	96,54	7,26
20	473,33	9,16	4,14	3,56	84,93	8,77
30	527,36	7,64	3,29	2,80	97,50	0,00
30	439,15	9,24	5,24	3,75	78,75	17,30

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	1254,70	8,48	1,23	0,19	5,32	6,44	4,45	28,46
20	977,76	8,74	3,14	0,15	5,36	0,20	4,35	65,00
20	1507,60	11,33	1,66	0,18	7,53	13,29	3,11	18,09
30	1127,20	6,24	2,42	0,19	4,99	3,49	3,75	32,30
30	869,03	8,13	2,19	0,18	2,10	0,01	8,97	39,57

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	1165,30	7,30	2,78	4,70	2,34	18,88	37,92	68,80
20	703,68	5,75	4,22	3,32	0,05	12,43	27,59	24,72
20	390,51	7,47	4,83	3,09	0,62	4,29	13,15	68,72
30	403,71	5,60	3,41	2,64	0,17	16,58	20,26	98,82
30	575,73	5,90	3,56	3,57	0,42	17,90	32,11	56,26
50	923,89	5,97	3,98	3,87	0,20	16,24	31,87	71,90
20	665,14	6,00	3,82	3,37	0,39	16,78	29,64	75,49
30	297,79	5,92	3,76	4,23	0,21	16,40	38,97	32,07

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	503,30	8,48	3,88	92,33	6,25
20	522,52	7,21	3,36	96,81	0,01
20	509,76	7,41	3,44	97,78	0,22
30	404,26	9,16	7,27	53,61	15,63
30	524,81	7,11	3,30	99,80	0,02
50	524,41	7,11	3,30	100,00	0,02
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	510,13	7,77	3,63	87,49	3,45
20	516,78	7,44	3,46	100,28	0,00
20	545,87	7,52	3,46	144,11	3,33
20	564,43	7,50	3,44	158,42	3,28
20	557,24	6,74	3,18	175,80	0,63

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	524,76	7,36	4,47	3,83	59,62	6,91
20	429,38	7,12	5,19	4,71	66,10	11,75
20	493,45	7,00	4,13	3,64	102,11	9,62
30	398,68	7,19	6,91	6,43	50,60	14,85
30	455,03	7,07	4,55	4,06	72,50	9,38

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	535,70	6,19	2,57	0,13	5,89	14,47	5,71	50,36
20	902,53	5,77	2,58	0,16	4,58	8,01	5,07	34,51
20	1372,70	7,73	3,73	0,21	1,76	5,68	1,18	26,05
20	1178,20	6,78	1,49	0,18	3,01	6,70	7,98	29,68
30	1134,40	5,28	2,25	0,16	5,00	12,91	5,42	26,70
30	654,05	5,76	1,77	0,15	4,82	7,36	7,50	39,69

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	2419,10	5,35	3,50	6,88	0,48	19,78	49,94	54,31
20	614,87	5,06	3,68	3,68	0,54	16,08	31,80	56,57
20	603,21	5,30	3,76	4,69	0,80	11,20	41,73	17,73
30	846,00	5,11	3,91	4,81	0,47	9,93	43,10	14,11
30	788,96	5,10	3,10	4,69	0,96	19,84	43,51	36,70
50	655,65	4,51	3,68	3,25	0,01	19,77	28,32	80,66

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..200)
20	569,29	4,74	4,03	4,32	0,14	12,80	39,17	19,30
30	603,41	5,23	3,74	3,05	0,46	8,43	15,16	153,02
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..500)
40	1119,50	4,76	3,42	3,38	0,57	14,99	22,18	374,64

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	510,65	32,42	3,49	96,36	0,11
20	508,85	31,48	3,50	98,93	0,25
20	511,91	30,77	3,38	99,69	0,14
30	508,68	30,33	3,45	99,88	0,20
30	508,66	30,29	3,45	99,60	0,20
50	507,98	30,31	3,48	99,94	0,20
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	517,08	36,63	3,75	100,03	0,40
20	530,74	31,36	3,12	149,11	0,10
20	681,42	31,78	3,71	61,15	0,21
30	542,37	34,86	3,28	156,16	0,39
30	513,45	30,05	3,44	120,49	0,17
50	511,83	30,04	3,44	118,16	0,17
50	540,47	29,87	3,28	159,38	0,20

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	711,57	41,30	4,83	2,45	46,61	9,98
20	455,47	38,88	4,04	1,64	94,94	13,57
20	449,37	39,76	4,68	2,58	89,38	17,45
30	426,14	15,59	7,02	4,86	45,93	18,46
30	818,36	14,81	4,37	2,19	103,71	17,49

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	284,68	34,53	2,50	0,16	2,24	0,10	8,18	50,21
20	1236,20	35,91	4,49	0,20	2,51	3,36	2,50	31,13
20	1438,10	40,31	2,83	0,12	5,09	24,85	7,55	53,30
30	571,46	35,99	2,50	0,13	3,76	14,08	7,92	37,63
30	1295,80	36,49	3,70	0,16	3,30	12,64	4,91	24,20

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	395,10	25,28	5,41	3,29	0,31	9,06	25,59	59,61
20	357,42	24,57	5,84	3,40	0,28	4,06	13,84	53,55
20	1342,80	24,65	6,11	4,37	0,42	3,63	21,76	12,46
30	368,61	21,87	5,86	2,94	0,37	2,93	7,14	84,17
30	457,48	21,84	4,69	2,99	0,23	9,20	19,88	46,87
50	281,66	21,64	5,22	3,49	0,29	9,10	24,12	50,01
50	786,87	22,73	4,44	3,76	0,19	13,20	28,49	71,88

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	1201,70	25,93	5,63	31,28	0,54
20	1301,20	21,93	5,42	28,05	0,34
20	1161,70	22,76	4,87	33,30	0,21
30	597,48	21,11	4,08	62,50	0,22
30	728,56	21,46	4,06	54,70	0,20
50	786,11	20,79	4,34	50,00	0,24
50	944,18	20,74	4,41	42,65	0,25

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	995,67	22,76	4,67	5,08	39,80	0,28
20	524,46	34,15	6,16	3,49	47,44	18,26
20	529,91	21,18	4,22	3,81	72,54	0,29
30	846,19	23,61	4,33	5,00	47,36	0,16
30	1165,00	21,28	5,00	5,02	32,93	0,29
30	1099,60	20,84	4,95	4,52	35,25	0,35

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	1008,30	36,43	2,72	0,18	5,67	1,01	7,57	37,95
20	271,97	30,70	3,39	0,15	2,49	3,41	3,91	50,97
20	625,70	30,25	3,37	0,13	3,52	13,50	6,34	37,58
20	1387,80	29,30	4,09	0,16	3,27	12,72	4,78	21,98
30	1351,80	29,36	5,13	0,17	3,83	14,04	4,10	22,58
30	1209,10	27,06	4,30	0,18	2,66	7,85	3,25	29,02
30	917,70	19,49	5,32	0,18	1,46	3,16	1,25	37,52

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	1428,30	17,99	5,60	3,59	0,31	6,92	42,43	8,57
20	336,67	15,57	5,37	3,09	0,30	8,42	20,39	58,75
20	853,20	17,34	4,90	4,26	0,31	10,28	30,20	56,92
20	510,58	18,18	4,42	4,22	0,22	11,43	29,33	44,08
30	450,94	16,67	4,93	3,05	0,21	11,25	22,49	83,94
30	329,14	16,20	5,39	4,76	0,26	10,33	42,19	21,97

Τάση +2kV- Διάρκεια 50ns

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	488,42	24,53	13,20	47,66	24,07
20	474,28	24,21	9,86	53,02	20,92
20	613,03	23,84	5,62	89,80	15,68
30	463,19	24,19	9,62	53,12	20,46
30	549,54	23,72	5,70	82,79	14,83
50	555,85	23,70	5,43	87,50	13,96
50	533,81	23,80	5,49	84,37	13,87

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..20)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	527,12	19,37	5,47	4,44	88,12	16,23
20	508,01	22,14	4,28	2,94	109,90	9,65
20	545,77	19,35	4,67	2,81	109,94	14,99
30	777,73	16,69	14,21	12,25	76,02	46,86
30	742,85	16,56	13,82	11,75	77,19	47,98
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..20)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..50)
20	674,47	17,96	5,83	4,38	99,86	21,85
20	460,61	17,97	11,57	9,60	59,07	32,82

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	245,75	15,97	2,53	0,14	4,96	0,87	4,90	52,06
20	783,86	19,73	1,87	0,20	2,30	0,87	7,33	39,75
20	758,26	21,97	2,51	0,12	4,93	1,70	7,41	68,09
30	340,23	17,58	2,60	0,14	1,42	8,66	8,01	45,36
30	247,51	13,22	1,83	0,15	5,25	0,02	6,73	51,57

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	411,80	11,12	3,64	2,94	0,04	19,01	25,45	76,42
20	397,97	13,72	3,08	3,35	2,08	11,77	24,14	63,40
20	317,67	18,99	2,69	3,39	2,19	7,45	19,07	48,82
30	405,98	12,26	4,69	3,25	0,03	11,20	22,89	70,06
30	448,36	13,48	2,87	3,02	2,25	16,84	25,94	75,61
50	277,79	11,44	3,77	3,40	0,26	13,76	26,53	50,23
50	204,94	10,92	3,40	3,31	0,19	20,00	32,03	39,07
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..100)
20	250,27	17,23	5,63	3,99	0,30	7,63	25,68	37,53

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp6

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	459,43	16,18	7,24	62,10	17,15
20	474,77	16,26	15,20	45,09	25,00
20	581,34	15,79	5,77	84,77	15,67
30	570,65	15,82	5,18	93,74	13,82
30	506,01	16,03	7,97	61,28	19,14
50	575,08	15,93	4,92	100,00	12,50
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
50	689,09	15,50	4,39	137,51	12,02
50	674,65	15,54	4,53	128,03	12,53

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..30)
20	592,84	12,99	5,76	5,05	89,48	17,79
20	627,06	12,38	5,93	4,44	95,52	23,15
20	654,07	12,49	6,09	4,85	93,98	22,58
30	584,87	12,38	7,75	6,25	75,03	27,13
30	676,97	12,25	6,03	4,14	103,75	28,13

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	210,45	14,20	2,58	0,12	5,17	4,98	7,98	53,63
20	897,34	16,74	2,75	0,20	1,24	1,28	6,14	37,46
20	783,21	12,11	2,95	0,15	5,76	11,35	4,88	35,38
30	671,28	9,36	2,21	0,15	5,47	10,66	5,17	37,49
30	642,19	14,19	2,10	0,12	5,50	4,51	7,86	63,24

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	215,17	8,42	3,18	3,59	0,40	16,47	30,07	37,53
20	247,69	10,32	3,05	3,82	2,40	19,79	44,12	24,77
20	226,50	8,96	3,69	4,35	0,17	14,30	39,12	25,65
30	365,64	7,47	3,21	2,99	0,38	19,46	26,27	66,80
30	223,12	10,03	3,13	3,89	2,54	13,12	34,43	30,32
50	256,03	9,33	2,78	3,81	1,08	18,75	35,64	28,13
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..50)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	427,81	7,77	2,86	2,38	0,00	38,78	26,63	82,47
30	448,89	7,70	3,23	2,81	0,49	20,14	24,74	89,85

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp8

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	434,53	12,42	13,94	44,81	23,55
20	376,29	12,63	31,35	35,24	26,51
20	428,66	12,43	16,29	42,57	24,59
30	472,65	12,36	9,34	54,45	20,43
30	552,82	12,25	5,63	84,12	14,79
50	434,49	12,43	15,98	42,97	24,51

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..30)
20	604,01	9,96	8,83	7,81	67,85	26,50
20	783,82	10,22	7,65	6,51	86,66	27,85
20	639,18	10,03	5,32	4,70	101,90	16,71
30	646,23	9,77	6,83	5,23	87,82	27,19
30	657,64	9,77	6,34	4,80	93,33	25,31

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	224,53	10,02	2,77	0,13	6,09	4,83	4,72	53,39
20	727,55	8,32	2,54	0,17	5,33	3,11	4,06	40,30
20	318,04	11,14	2,66	0,12	5,29	12,90	6,58	50,07
30	307,14	14,26	2,28	0,16	4,98	8,28	5,06	37,48
30	814,59	13,95	1,87	0,16	5,82	9,38	5,49	36,99

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	457,94	8,83	3,75	3,38	2,74	4,49	15,60	83,00
20	285,17	7,94	3,02	2,93	2,12	19,91	31,26	48,60
20	284,07	8,17	2,91	3,17	2,51	14,05	24,49	49,40
30	428,19	6,54	3,07	2,97	0,76	17,73	24,09	79,98
30	513,84	7,37	2,98	3,15	2,97	9,29	19,52	96,87
50	325,56	6,75	2,93	3,10	1,83	17,50	27,36	57,03
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..100)
20	228,97	6,69	4,00	3,26	0,10	16,47	30,99	41,08
20	458,88	7,93	4,25	5,36	0,79	9,96	59,06	15,56
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..200)
30	335,96	8,47	3,75	4,49	1,73	10,42	38,88	23,60

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	503,19	9,72	5,70	78,22	13,92
20	607,48	9,76	5,29	95,46	14,18
20	382,57	10,03	13,96	41,85	21,75
30	546,24	9,65	5,18	90,62	12,79
30	455,12	9,82	6,76	64,44	15,61
50	562,29	9,65	4,84	100,00	11,84
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	549,90	9,77	5,79	81,55	14,85
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..20)
50	685,39	9,47	4,22	146,88	10,44
50	701,75	9,48	4,22	150,40	10,63

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	520,07	15,93	5,97	5,08	80,40	17,57
20	503,96	15,69	5,69	4,47	83,42	17,50
20	539,30	16,07	5,14	4,31	94,81	14,95
30	540,53	15,38	5,16	3,70	97,38	17,18
30	546,48	15,22	5,63	4,37	91,18	18,75

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	971,74	26,80	0,98	0,20	4,77	1,59	1,45	37,43
20	477,34	17,91	2,15	0,11	4,96	1,39	8,40	63,51
20	484,08	16,32	1,99	0,12	4,59	0,57	8,89	62,59
20	1297,60	24,04	2,69	0,11	5,63	8,48	8,59	75,25
30	718,29	14,26	2,28	0,16	4,98	8,28	5,06	37,48
30	725,56	13,95	1,87	0,16	5,82	9,38	5,49	36,99

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	228,40	6,14	3,02	3,67	1,93	13,84	32,52	32,71
20	322,61	6,03	2,90	2,76	1,24	19,97	25,20	64,88
20	502,70	6,00	3,29	4,21	0,81	16,28	42,83	19,50
30	219,13	6,38	4,88	3,90	0,38	9,76	29,41	34,57
30	380,61	5,70	3,04	2,80	1,15	19,55	25,79	74,47
50	462,88	5,10	3,52	2,81	0,04	19,26	23,43	98,44
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1 [A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..50)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	860,89	8,70	2,87	3,75	2,00	24,87	42,44	53,37
30	409,93	5,69	2,67	2,54	0,75	28,51	24,62	88,19
40	379,34	5,10	3,27	2,66	0,19	24,61	26,36	78,59
40	385,99	5,12	3,28	2,89	0,37	19,53	25,20	75,02

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	458,34	13,77	32,48	38,22	29,13
20	601,52	13,24	5,07	99,86	13,61
20	460,49	14,16	5,84	71,87	13,80
30	492,19	13,59	9,60	54,69	21,19
30	507,75	13,53	6,05	74,95	15,22
50	593,54	13,26	5,18	96,48	13,87
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	608,41	13,44	5,74	87,50	16,13
50	657,26	13,06	4,39	131,53	11,72
50	592,92	13,24	5,02	100,00	13,28

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	584,92	10,98	5,12	3,73	103,66	17,36
20	493,40	11,85	5,95	5,47	75,91	14,96
20	581,07	10,87	5,17	4,35	99,83	16,20
20	587,50	11,55	5,89	5,03	86,10	17,22
30	698,67	10,54	16,04	14,12	68,99	45,59
30	818,35	10,66	14,06	12,21	78,75	47,65
30	694,09	10,57	6,11	4,37	103,75	27,93

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	744,47	14,94	2,69	0,12	4,03	3,23	6,83	65,98
20	321,01	13,65	2,52	0,12	5,99	12,60	3,95	50,07
20	806,09	12,57	2,85	0,12	7,66	21,44	4,64	30,24
30	286,09	9,87	1,92	0,13	5,20	0,86	7,52	57,67
30	488,04	8,19	2,19	0,13	4,94	12,31	6,88	40,18

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	475,48	6,78	3,69	2,95	0,38	16,51	25,00	87,75
20	365,13	7,97	3,73	3,37	0,71	9,89	22,22	62,82
20	284,57	8,97	3,31	3,42	2,19	9,94	23,04	49,20
30	424,18	7,17	3,52	3,08	0,78	14,64	24,27	75,20
30	367,76	6,47	3,40	2,90	0,09	19,45	24,99	73,38
30	222,43	6,75	3,76	3,88	0,03	17,95	38,70	27,09
30	392,60	7,54	3,75	3,16	0,38	19,68	31,37	55,18
50	217,58	7,18	3,28	3,80	0,76	18,84	39,48	27,32

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	425,98	10,41	16,25	42,29	24,25
20	536,27	10,15	6,27	74,87	16,03
20	526,20	10,53	9,77	55,70	21,88
30	419,84	10,43	20,01	39,98	25,51
30	574,90	10,00	5,30	91,70	13,53
50	528,96	10,12	5,23	87,50	12,50
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
30	719,48	10,02	4,49	137,52	12,50
30	540,27	10,05	5,63	82,72	14,04

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..20)
20	526,23	9,74	4,69	2,97	106,85	17,55
20	542,50	8,97	4,62	4,14	103,39	9,96
20	531,92	8,90	4,56	4,07	103,50	10,00
20	531,57	8,29	5,78	5,09	91,27	18,21
30	613,02	8,18	5,57	5,08	84,93	15,00
30	617,08	8,15	5,13	4,61	102,59	15,17

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	631,11	6,90	2,00	0,16	5,25	4,67	5,63	41,28
20	564,97	7,38	3,15	0,16	5,64	4,46	4,01	43,15
20	370,98	9,66	2,84	0,12	6,19	15,63	7,10	42,33
30	189,80	7,31	1,86	0,14	6,05	0,97	7,50	54,76
30	454,26	8,56	2,50	0,15	2,49	6,80	8,10	43,46

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	494,91	7,03	3,97	3,30	0,96	5,77	15,02	96,08
20	321,94	6,49	2,70	3,07	1,38	17,42	24,49	60,52
20	273,67	7,25	3,61	3,05	0,66	19,85	33,11	34,35
30	514,44	6,22	3,20	3,09	1,60	10,87	20,12	99,60
30	187,30	5,60	3,67	3,75	0,03	19,37	39,19	28,74
50	289,90	5,71	3,45	4,10	0,32	17,01	39,81	24,28
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..200)
20	684,40	6,28	3,64	3,06	0,29	18,84	26,60	110,14
20	654,78	6,47	3,16	3,08	0,95	8,63	15,55	164,80
20	433,17	6,86	3,09	3,20	2,75	15,08	28,16	63,44
30	369,92	5,57	4,12	3,16	0,12	13,75	25,02	66,12
30	633,00	5,63	4,21	3,04	0,04	11,44	18,65	148,21

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	519,87	44,18	3,84	99,88	0,31
20	398,21	66,02	22,41	38,28	25,68
20	508,22	43,35	3,47	99,60	0,17
30	511,26	42,19	3,72	99,97	0,19
30	876,54	55,79	3,75	50,00	0,19
50	511,50	42,19	3,73	100,00	0,20
50	511,41	42,19	3,73	100,00	0,19
50	512,59	42,21	3,75	100,00	0,20
20	731,59	63,71	3,92	185,04	8,88
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	t_1[ns] (0..300)	t_2[ns] (0..20)
20	650,66	39,51	3,24	262,38	0,31
20	667,46	35,72	3,24	287,97	0,19
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..20)	t_1[ns] (0..300)	t_2[ns] (0..20)
30	630,38	36,46	3,34	222,65	0,17

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..30)
20	504,57	44,69	9,36	7,66	62,67	28,04
20	578,96	42,74	5,54	3,45	97,53	22,49
20	371,83	45,59	13,60	11,56	46,61	28,09
30	410,13	43,36	7,28	5,00	69,86	26,61
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..120)	t_2[ns] (0..30)
30	613,88	43,94	5,45	3,11	84,95	22,50
30	467,94	41,52	5,87	3,56	99,64	28,11

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	1031,40	53,55	2,47	0,16	5,10	9,71	8,79	31,94
20	540,97	42,13	3,95	0,13	2,78	13,65	6,88	39,57
20	818,38	39,43	2,87	0,13	2,71	18,49	8,52	30,37
20	801,75	45,07	2,47	0,16	2,36	15,66	7,48	31,96
30	189,48	38,16	2,54	0,14	3,15	3,19	8,15	51,86
30	706,40	47,62	4,38	0,12	2,49	19,08	2,84	35,13

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	427,30	26,54	4,75	2,96	0,19	15,03	25,39	74,90
20	318,47	26,37	3,82	3,08	0,10	18,60	28,70	56,46
20	299,53	28,73	4,50	3,42	0,18	7,60	17,93	49,94
30	519,73	29,72	3,60	3,28	0,20	9,37	18,79	92,38
30	401,15	27,23	3,81	4,00	0,13	16,45	37,49	23,29
50	482,16	25,43	3,99	2,81	0,16	17,94	24,77	98,03
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..200)
30	613,81	22,84	5,16	3,15	0,31	7,42	16,67	134,37
30	609,55	23,38	4,67	3,05	0,21	10,52	19,13	135,76
40	621,53	23,30	4,65	3,08	0,20	10,02	18,59	137,65
40	561,30	22,79	4,92	3,16	0,24	9,40	19,87	106,56

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	613,12	26,07	4,45	99,60	0,29
20	584,39	26,97	4,38	96,58	0,19
20	569,25	26,60	4,49	86,48	0,29
30	545,76	27,95	4,06	100,00	0,15
30	564,67	26,00	4,38	90,62	0,25
50	597,40	26,66	4,38	100,00	0,20
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
20	692,27	25,69	4,05	144,35	0,30
20	659,84	24,85	4,15	127,99	0,22
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	t_1[ns] (0..300)	t_2[ns] (0..50)
30	766,02	27,68	3,50	279,63	0,08
30	745,87	24,39	3,61	233,48	0,17

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..110)	t_2[ns] (0..30)
20	511,53	27,50	3,74	3,75	97,47	0,18
20	518,54	35,63	6,60	4,03	77,91	26,41
20	606,53	25,72	4,47	4,38	97,44	0,25
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..120)	t_2[ns] (0..30)
30	606,36	28,05	4,79	4,38	82,80	0,47
30	533,78	27,51	4,16	3,71	69,98	0,27

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	1357,50	37,73	6,34	0,11	3,13	6,30	2,93	75,17
20	353,74	31,48	6,25	0,14	2,59	6,57	2,36	50,91
20	614,21	29,05	5,06	0,16	2,54	6,42	2,68	42,27
30	694,12	33,30	3,15	0,14	2,48	16,80	7,64	33,79
30	1289,70	27,41	6,90	0,31	1,11	0,12	0,78	31,19

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	378,39	17,91	6,28	3,44	0,34	4,81	16,14	68,99
20	278,16	20,21	4,81	4,43	0,17	13,83	44,14	28,23
20	484,27	24,13	3,28	4,44	0,13	16,98	46,41	18,26
30	525,83	17,15	5,14	3,17	0,27	10,65	22,59	88,83
30	668,72	18,79	5,56	3,49	0,33	9,33	26,97	75,01

Τάση +2kV- Διάρκεια 90ns

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
30	348,87	36,93	34,85	31,95	24,74
30	352,23	37,08	26,71	33,82	24,23
30	359,36	37,46	18,08	37,21	22,71
40	366,68	38,05	12,21	41,70	19,83
50	356,27	37,20	30,83	33,84	25,36

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..20)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	510,25	37,45	7,26	5,76	64,64	17,83
20	444,23	41,73	4,73	2,49	88,05	15,09
20	763,93	36,35	11,44	10,56	50,33	19,54
20	366,21	36,69	8,28	7,19	51,04	18,64
30	811,12	36,05	11,68	10,62	50,62	19,99
30	392,01	38,85	5,94	4,46	63,08	15,96
30	640,46	37,15	9,34	8,82	53,75	16,87
50	654,87	36,90	7,97	6,72	61,86	18,59

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	378,01	44,89	5,11	0,11	6,00	15,82	5,44	46,82
20	609,89	62,17	3,63	0,18	6,61	8,29	3,06	47,34
20	245,89	26,90	2,72	0,11	5,76	11,83	4,53	49,24
30	335,28	36,33	10,05	0,16	0,91	0,59	0,52	53,13
30	227,59	26,70	2,67	0,10	3,78	19,12	9,54	44,66
30	422,57	45,59	2,66	0,10	6,21	0,88	7,56	63,10
50	226,85	23,29	2,50	0,12	6,25	12,68	5,84	46,87
50	178,14	18,99	2,03	0,15	4,33	0,77	7,52	53,12

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	301,12	28,39	6,14	3,46	0,03	8,80	23,43	50,01
30	270,68	26,32	2,76	2,92	0,82	19,97	24,95	50,05
30	354,80	22,85	3,08	3,56	1,50	14,38	29,76	38,31
30	235,37	23,80	3,17	3,75	2,18	10,58	27,73	38,34
40	204,62	21,58	3,19	4,02	1,69	14,37	37,50	29,74
40	222,93	22,77	3,04	3,74	1,89	12,92	29,97	36,07
50	185,40	19,34	3,28	3,75	0,38	19,37	39,07	29,70
50	186,75	19,00	3,57	3,63	0,23	17,64	34,37	33,10

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp6

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
30	366,10	25,45	12,44	41,44	19,97
30	348,71	24,80	34,95	31,96	24,74
30	352,34	24,83	26,87	33,87	24,28
40	358,92	25,03	18,09	37,16	22,66
40	359,67	25,43	13,71	38,77	19,99

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	737,90	24,12	9,88	9,37	55,31	18,68
20	949,56	24,99	13,06	12,66	47,40	18,66
20	428,90	26,51	6,52	4,96	65,84	16,16
30	488,89	25,81	6,56	5,62	68,64	15,66
30	492,45	25,89	7,38	6,56	59,99	14,99
50	703,99	24,34	10,08	9,37	53,75	18,79

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	314,58	22,47	1,74	0,15	2,32	10,86	9,19	45,67
20	302,17	21,87	1,97	0,12	4,23	14,15	4,08	45,98
20	479,58	29,83	2,55	0,13	5,32	22,96	4,80	36,65
20	194,83	16,63	2,51	0,13	3,70	4,66	7,83	52,44
20	194,83	16,59	2,14	0,15	2,29	4,18	8,88	49,60
30	391,33	24,46	2,03	0,11	6,61	23,02	6,90	37,49
30	254,56	17,31	2,51	0,12	6,64	13,55	4,84	45,80
50	219,42	16,51	2,54	0,13	5,00	7,88	5,00	50,10
50	185,69	13,45	1,87	0,15	5,64	0,00	6,25	53,66
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..25)	σ_2[ns] (0..100)
30	307,68	19,27	2,11	0,14	5,80	13,72	5,50	43,71

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	226,59	16,07	3,37	4,28	2,98	8,57	32,53	31,26
30	266,42	18,85	3,99	5,22	1,97	8,75	45,32	22,33
30	184,30	12,78	3,93	3,98	0,14	15,59	37,06	29,87
30	274,99	17,31	3,90	3,26	0,38	11,25	22,49	50,11
40	267,53	16,02	4,00	3,28	0,01	13,36	24,68	50,01
50	200,92	13,17	4,22	3,94	0,04	13,75	33,59	32,24

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp8

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
30	363,90	19,22	12,38	40,87	19,58
30	348,74	18,66	34,74	31,95	24,71
30	352,34	18,77	26,72	33,89	24,22
40	360,03	18,98	18,14	37,31	22,68
40	353,00	19,26	32,73	30,46	22,95

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	459,53	19,98	5,43	4,82	78,05	12,90
20	778,88	19,24	11,84	11,24	47,48	17,85
20	481,96	19,82	6,15	4,96	73,00	15,54
30	461,65	19,85	5,52	5,03	76,48	12,50
30	668,11	18,06	8,64	8,16	59,31	17,64
50	851,94	17,57	11,12	10,64	53,33	19,69
50	361,32	17,83	9,71	9,22	45,31	18,28
50	647,31	18,58	8,20	7,42	63,13	18,75

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	261,15	13,19	2,13	0,16	4,94	3,33	4,82	49,91
20	265,57	13,20	2,56	0,15	4,98	6,50	4,49	48,37
20	253,93	14,28	1,24	0,12	7,39	9,23	9,95	49,99
20	339,82	16,72	1,92	0,16	6,28	8,10	5,45	46,96
30	256,89	14,32	2,27	0,11	4,99	19,01	7,46	42,83
30	247,88	13,96	2,59	0,12	6,23	5,44	4,88	54,32
50	199,96	10,26	2,50	0,14	6,14	1,95	4,83	52,80
50	270,56	13,37	1,25	0,13	7,48	12,54	9,92	45,89

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	241,10	12,58	3,17	3,55	2,57	17,67	37,59	35,16
30	209,27	11,44	2,80	4,41	1,49	17,42	44,65	25,38
30	187,50	10,25	3,69	4,46	0,31	16,89	45,83	24,81
30	291,21	14,41	3,21	3,27	0,82	11,11	22,02	51,29
40	201,06	10,93	3,28	4,69	0,89	17,56	49,97	22,77
40	213,96	10,96	3,04	3,34	0,75	19,68	31,05	38,35
40	352,85	17,47	4,08	3,27	0,24	7,63	14,99	62,61
40	303,92	14,91	4,34	3,04	0,20	11,24	21,85	54,29

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
30	366,89	15,31	12,37	41,63	20,02
30	348,80	14,88	34,85	31,96	24,74
30	350,41	14,92	26,71	33,29	23,82
40	356,20	15,02	19,18	36,33	22,74
40	349,06	14,97	33,29	31,18	23,82

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	1034,20	40,34	13,17	12,68	45,16	16,22
20	967,08	38,40	12,18	12,50	51,19	19,13
20	369,97	36,56	8,31	7,66	46,53	15,53
20	497,68	38,14	7,11	6,21	60,94	13,74
30	611,75	35,98	8,78	8,12	56,07	16,90
30	582,84	36,40	8,41	7,48	57,65	17,03
50	585,40	36,98	7,85	7,03	61,56	16,90

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	195,62	20,35	1,97	0,12	5,44	9,56	8,76	50,01
20	230,62	23,91	2,06	0,10	5,74	12,82	9,74	50,11
20	456,91	44,83	13,07	0,11	1,70	19,75	0,84	42,77
20	533,45	53,33	10,34	0,16	8,45	11,28	0,04	44,27
30	298,65	31,91	2,54	0,12	5,16	20,31	7,62	40,61
30	282,48	29,07	2,62	0,16	4,98	5,58	4,83	48,33
50	206,33	21,86	2,01	0,12	5,00	14,17	10,00	46,48
50	228,83	22,33	2,50	0,12	6,31	8,26	4,98	51,59

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	237,30	10,61	3,25	3,27	2,57	19,89	37,57	35,21
30	208,48	9,35	3,05	4,64	2,16	14,66	46,63	23,60
30	335,08	13,65	2,34	3,24	1,44	12,42	19,71	58,03
30	182,84	8,35	3,47	3,69	0,27	18,72	37,18	30,65
30	205,81	9,35	3,05	4,64	2,16	14,66	46,63	23,60
40	208,48	8,78	3,05	4,69	1,12	18,12	50,00	22,26

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
30	363,99	24,80	11,85	40,63	18,70
30	349,49	23,85	34,19	32,31	24,88
30	360,89	24,60	12,97	39,13	19,31
40	352,51	24,06	25,01	32,03	22,17
40	348,58	23,79	30,78	32,04	23,91

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	579,43	25,05	7,93	7,45	57,54	14,21
20	674,86	24,31	8,77	8,25	58,74	17,71
20	465,46	26,40	7,00	5,62	65,01	17,52
30	489,25	25,70	6,66	6,16	65,52	14,06
30	382,90	25,37	7,09	6,48	53,79	15,20
30	1161,40	23,01	15,57	15,09	45,67	20,00
50	742,45	23,71	10,08	9,53	54,53	18,75
50	371,52	24,44	8,33	7,81	46,87	15,96

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	470,22	32,72	1,79	0,08	4,64	16,45	9,50	53,76
20	279,38	19,05	2,61	0,11	4,91	12,60	4,90	50,25
20	514,68	34,73	2,38	0,16	4,83	13,50	2,31	41,38
20	266,57	17,57	2,09	0,12	7,32	6,35	3,87	51,24
30	251,84	17,80	1,82	0,14	4,71	9,35	8,26	46,80
30	247,05	17,44	2,23	0,11	6,67	19,48	9,63	42,96
30	260,46	18,15	2,66	0,10	6,06	22,03	7,03	43,40
50	377,42	25,24	5,00	0,16	5,66	5,26	2,50	48,43

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	234,94	15,59	3,52	3,72	2,43	12,42	34,44	33,89
30	216,70	14,55	3,46	3,16	0,46	19,95	32,15	38,36
30	206,03	13,80	2,77	3,75	1,49	18,21	35,16	32,07
30	206,74	13,73	4,01	4,28	0,03	15,04	37,42	28,51
30	194,87	13,06	3,15	3,75	0,78	18,28	35,88	31,24
30	201,66	15,59	3,52	3,72	2,43	12,42	34,44	33,89
40	234,94	13,33	3,02	4,06	2,49	15,00	39,85	28,59

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
30	366,99	18,50	11,05	41,02	17,78
30	348,87	17,72	34,73	32,01	24,75
30	349,93	17,72	26,62	32,94	23,54
40	355,08	17,83	19,92	33,35	21,09
40	349,85	17,59	34,93	30,72	23,75

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	856,58	17,42	11,05	10,51	53,75	19,76
20	703,77	17,58	10,02	9,54	51,30	16,44
20	1116,70	18,91	14,16	13,75	45,19	17,47
20	361,74	17,39	12,35	11,87	37,65	17,88
30	502,57	18,85	6,84	6,35	63,81	13,71
30	586,56	18,13	7,98	7,49	60,03	16,25
50	1038,20	16,97	14,44	13,95	45,94	19,38
50	354,73	17,04	11,43	10,94	40,26	18,40
50	371,05	17,89	8,41	7,93	46,87	15,76

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	199,56	12,02	2,22	0,13	4,61	8,66	6,81	49,15
20	273,26	13,58	2,15	0,15	8,79	0,50	7,48	52,33
20	458,14	23,38	10,05	0,12	5,50	14,36	1,56	46,43
20	353,19	17,91	2,14	0,09	9,83	16,94	10,00	51,85
30	274,58	13,49	2,13	0,14	7,53	10,18	6,16	47,30
30	212,01	10,46	2,54	0,13	6,14	6,65	4,84	51,45
50	206,34	11,21	2,42	0,14	5,00	4,69	5,00	51,83
50	219,80	11,56	2,01	0,12	6,60	12,50	6,75	48,03

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	220,87	11,69	3,30	3,74	2,25	12,49	32,07	34,52
30	256,66	13,50	3,43	3,57	2,26	17,51	37,57	35,16
30	277,78	14,38	4,12	5,11	2,99	6,86	43,42	23,77
30	206,80	10,85	3,45	3,69	0,80	16,07	35,74	31,23
30	311,85	16,20	2,58	4,13	1,04	9,89	22,48	37,10
30	233,89	12,37	3,63	3,75	0,67	11,25	27,06	37,90
40	202,25	10,52	3,52	4,69	0,75	15,61	48,00	23,49
40	223,10	11,75	3,04	3,63	2,01	13,12	29,99	36,48

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	512,41	62,08	3,86	87,44	0,21
20	380,31	61,80	3,74	98,30	0,20
20	511,31	80,44	8,71	47,27	16,20
20	589,10	70,98	5,00	60,90	0,29
30	510,34	61,78	3,71	99,22	0,20
30	356,42	78,66	19,22	36,33	22,80
30	513,32	62,11	3,88	87,40	0,21
50	516,82	66,03	3,83	93,76	0,39
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..50)
50	509,77	61,75	3,64	103,13	0,19
50	512,21	62,20	3,44	118,75	0,17

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	467,91	66,76	4,39	2,07	99,34	13,67
20	430,41	63,34	6,70	4,37	65,27	19,40
20	522,74	62,57	7,85	5,77	61,55	19,98
20	402,45	64,55	5,35	3,14	67,44	16,17
20	363,71	62,57	8,28	6,21	49,96	19,76
20	441,49	67,97	4,26	2,19	86,00	9,98
30	426,23	63,75	6,10	3,75	69,37	18,43
30	459,86	66,84	4,34	1,86	97,03	15,01
30	414,18	65,21	4,98	2,65	71,84	15,00
50	422,43	63,90	5,74	3,44	75,57	18,48

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	212,66	47,72	2,59	0,13	3,16	1,13	9,83	56,52
20	545,89	81,29	12,73	0,15	3,18	3,61	1,94	49,51
20	586,68	88,39	7,52	0,16	2,01	19,11	1,60	35,78
20	743,79	109,66	10,70	0,10	8,83	13,04	0,63	53,19
30	215,76	46,84	2,82	0,11	3,27	14,85	8,70	46,75
30	275,16	50,29	2,85	0,13	3,84	15,18	7,47	43,71
50	194,97	45,43	2,65	0,12	2,50	9,71	9,69	50,14
50	257,39	49,78	2,99	0,11	3,75	18,76	7,50	43,35

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	344,44	49,54	3,72	2,49	0,30	18,48	21,65	63,10
20	342,30	42,56	5,70	3,30	0,25	9,63	25,59	54,69
20	321,76	42,36	6,26	3,73	0,43	6,76	25,98	34,67
30	276,31	41,34	4,16	3,23	0,38	14,47	27,17	50,14
30	250,72	34,93	5,02	3,52	0,24	9,46	24,59	44,16
50	212,27	32,35	4,69	3,81	0,23	11,24	30,47	35,94
50	225,17	33,99	4,39	3,54	0,19	12,51	28,12	40,82

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	360,01	63,50	17,54	37,57	22,52
20	363,99	62,98	30,10	30,17	21,95
20	599,99	42,31	4,99	72,19	0,49
30	537,81	37,55	4,35	74,61	0,25
30	592,09	39,59	5,05	62,11	0,39
50	537,15	37,56	4,35	74,61	0,24

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (10..100)	t_2[ns] (0..20)
20	555,44	41,58	4,29	3,80	89,95	0,12
20	655,31	47,61	5,44	4,11	68,47	1,25
20	703,68	46,75	9,94	7,42	52,50	19,83
30	595,44	37,64	4,69	4,27	85,05	0,32
30	660,28	39,05	5,42	5,02	70,02	0,39
50	603,19	38,22	5,01	5,00	73,39	0,30

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	236,86	40,72	2,21	0,12	2,34	7,39	7,31	51,90
20	510,25	46,40	5,40	0,20	3,17	0,65	2,49	48,07
20	504,12	42,40	9,15	0,16	0,98	12,22	0,54	43,57
30	696,99	59,84	3,57	0,06	4,38	13,49	7,49	62,53
30	576,08	53,41	3,35	0,16	3,28	18,39	6,25	37,46
50	322,55	23,57	6,87	0,16	1,09	1,53	0,78	51,56
50	1160,20	34,61	4,02	0,14	3,47	3,33	5,00	52,81

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	301,93	25,93	5,78	4,05	0,32	15,83	48,39	24,96
30	262,22	24,38	5,39	5,16	0,39	9,07	40,62	24,41
30	313,73	25,97	5,99	3,41	0,38	5,94	17,90	50,77
30	262,22	24,38	5,39	5,16	0,39	9,07	40,62	24,41
40	200,85	22,41	4,69	4,34	0,19	12,83	39,70	27,46
40	253,97	29,36	3,75	3,45	0,15	11,81	22,85	43,75

Τάση +4V- Διάρκεια 90ns

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	322,22	32,22	33,12	38,83	22,27
20	343,36	33,66	18,73	49,02	18,00
20	362,04	34,84	15,04	56,64	15,74
30	338,60	33,78	18,06	47,64	16,41
30	351,65	34,15	17,13	52,03	17,19
50	317,79	32,14	31,17	38,28	21,09
50	325,47	32,50	23,79	42,53	19,34

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	564,52	33,06	14,54	13,39	67,35	15,75
20	439,03	37,35	11,37	7,50	82,26	16,33
20	689,52	31,56	18,52	17,81	57,87	17,46
30	647,33	32,19	16,76	15,75	63,13	17,87
30	571,76	32,71	15,35	13,75	65,28	17,03
50	745,10	31,13	20,04	19,22	56,88	18,91
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1 [A] (0..30)	I_2 [A] (0..30)	t_1 [ns] (0..100)	t_2 [ns] (0..20)
50	696,68	31,63	19,69	17,81	56,87	19,39

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	351,62	41,79	10,28	0,24	4,29	12,67	3,85	48,47
20	278,81	32,13	3,74	0,22	5,49	6,29	9,95	56,28
20	338,95	38,49	5,98	0,22	4,43	14,68	4,84	50,11
20	275,10	31,95	5,75	0,22	5,82	14,07	5,35	49,36
30	272,93	32,65	4,92	0,31	2,50	1,11	4,81	52,87
30	250,97	27,70	3,22	0,26	6,40	8,97	9,97	50,00
30	293,95	30,22	5,01	0,31	4,98	4,09	4,14	50,00
50	218,16	26,14	3,76	0,25	5,01	5,57	10,00	53,13
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..20)	σ_2[ns] (0..100)
50	209,70	25,27	4,06	0,27	4,36	1,52	8,75	55,01
50	237,43	27,34	3,62	0,25	5,01	10,23	10,00	49,22

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	232,2871	24,28	6,10	8,70	1,54	19,04	46,76	25,63
20	266,44	25,61	7,03	6,96	1,38	12,15	26,62	47,60
20	350,25	34,83	7,03	7,74	0,09	6,53	13,65	56,57
30	233,68	23,80	6,11	7,00	1,62	16,61	32,05	37,56
30	227,30	21,87	7,16	7,13	0,31	14,99	28,71	41,41
50	224,3577	21,07	7,53	6,44	0,01	19,53	29,15	43,62
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	241,05	22,84	8,21	7,15	0,39	9,94	22,17	48,03
40	259,07	24,23	6,08	6,80	1,34	14,33	25,02	50,01

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp6

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	326,80	21,48	37,02	38,29	23,36
20	320,28	21,13	28,42	39,76	20,68
20	345,32	22,24	21,87	46,39	19,95
20	341,93	22,10	20,00	47,64	18,75
30	315,33	20,89	39,74	36,38	22,85
30	320,91	21,25	27,06	39,96	20,02
30	334,38	21,80	19,45	46,53	17,63
50	319,95	21,12	28,67	39,55	20,70
50	320,06	21,19	28,01	39,63	20,31

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	736,64	20,18	20,11	19,41	56,22	18,63
20	554,79	22,23	14,47	12,64	69,59	17,50
20	424,86	23,71	12,69	9,92	72,44	16,33
30	532,92	21,47	14,77	13,75	67,23	16,31
30	570,10	21,47	14,77	13,75	67,23	16,31
50	656,82	20,49	18,22	17,50	58,05	17,49
50	667,21	20,50	17,93	17,23	59,19	17,50
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..30)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	624,67	21,20	15,69	14,95	66,01	17,20
30	639,63	20,92	16,86	15,92	62,50	17,81

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	235,13	19,27	3,64	0,25	4,98	8,90	8,26	50,52
20	479,94	32,75	4,31	0,35	0,39	0,96	0,29	49,12
20	270,33	19,31	4,88	0,31	4,82	2,53	4,24	51,42
30	235,61	18,56	3,72	0,27	5,28	6,39	7,79	51,05
30	314,96	22,28	5,99	0,32	3,09	0,29	2,33	52,80
50	214,22	17,85	3,79	0,27	5,00	0,19	9,99	56,26
50	248,28	18,90	3,71	0,26	6,07	8,60	9,91	49,99
50	250,87	19,39	3,48	0,24	7,50	12,53	9,99	48,43
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..20)	σ_2[ns] (0..100)
50	194,64	16,95	3,75	0,25	3,13	3,13	17,50	55,35
50	208,98	16,41	2,66	0,24	7,59	3,51	19,36	55,47

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	227,18	14,10	7,25	7,12	0,24	14,37	27,74	42,41
20	218,87	13,71	7,05	6,80	0,24	16,93	28,11	42,35
20	263,05	17,85	7,64	8,38	2,08	9,73	32,04	33,66
30	242,04	15,25	5,34	6,33	1,55	19,93	26,95	45,69
30	215,85	13,97	6,56	7,10	0,38	19,97	33,92	34,94
50	226,58	14,69	6,09	7,27	0,75	18,73	32,70	35,44
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	259,75	16,34	5,62	7,12	2,13	9,94	21,47	48,42
30	222,01	13,83	5,61	5,89	0,41	29,62	29,69	41,60

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp8

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	334,12	16,48	21,03	45,77	18,64
20	342,05	16,63	21,52	46,30	19,23
20	323,05	16,83	30,39	37,26	19,97
30	349,89	17,09	31,54	41,42	23,10
30	337,78	16,78	18,59	47,65	16,91
50	328,73	16,38	22,54	43,59	18,75
50	317,34	16,00	34,84	37,60	22,02

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	548,29	16,27	13,78	13,08	69,89	14,90
20	593,16	16,21	15,87	15,18	61,13	14,96
20	528,40	17,59	13,10	12,67	69,72	12,45
30	616,17	15,72	16,09	15,39	62,68	16,24
30	564,13	16,09	14,44	13,75	67,81	15,63
50	646,50	15,65	16,40	15,71	63,32	16,99
50	325,57	15,25	20,52	19,83	45,31	18,12

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	560,73	28,88	4,20	0,15	9,69	13,09	9,49	63,25
20	368,62	36,42	3,63	0,15	1,99	18,00	6,30	56,25
30	268,01	14,90	2,93	0,26	7,71	9,11	7,90	50,00
20	615,16	18,84	3,60	0,24	9,91	20,80	8,62	41,98
30	233,65	14,49	3,43	0,27	4,98	5,10	7,46	52,42
50	228,23	13,64	3,21	0,28	5,93	0,11	7,50	55,51
50	273,00	14,47	5,01	0,25	6,04	11,74	4,33	48,79

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..20)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	273,80	16,05	3,93	0,28	4,96	9,58	6,17	48,44
30	250,83	16,68	4,62	0,23	4,97	7,09	6,74	53,98
30	250,92	13,43	5,57	0,32	5,67	0,00	4,01	53,92

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	280,94	14,10	7,25	7,12	0,24	14,37	27,74	42,41
20	256,20	12,06	8,80	6,93	0,11	10,97	22,97	53,32
20	230,45	12,04	8,44	8,02	0,03	14,53	35,61	32,48
20	260,91	12,69	5,62	6,30	0,28	17,30	21,87	54,68
30	265,71	14,07	8,47	7,72	2,84	5,85	22,13	43,55
30	230,64	11,61	7,16	7,32	0,39	14,18	28,16	40,73
50	229,38	11,46	7,25	6,61	0,20	15,58	24,97	48,55
50	220,00	11,31	6,73	6,53	0,28	19,73	29,30	42,87

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata10

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	339,04	34,31	18,12	47,65	16,34
20	327,52	33,57	35,69	35,05	20,76
20	320,77	32,54	28,98	38,47	20,01
30	318,20	32,21	32,62	37,30	20,91
30	315,96	31,93	35,75	36,64	21,68
50	318,52	32,12	32,75	38,28	21,65

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	554,67	36,82	15,48	14,41	66,25	18,23
20	541,08	34,68	14,76	13,74	64,41	14,99
20	583,92	35,22	15,23	13,73	66,25	17,03
30	654,39	33,02	17,68	16,97	59,48	17,35
30	665,19	32,80	18,05	17,34	58,13	17,04
50	778,54	32,47	20,39	19,69	56,88	19,02
50	645,75	33,59	17,93	16,87	56,87	16,25

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	229,84	24,13	5,96	0,29	4,99	0,43	4,77	54,92
20	475,71	50,35	4,69	0,18	7,39	6,30	9,66	64,10
20	461,86	49,62	5,03	0,24	4,52	24,46	8,16	36,61
20	480,20	27,94	5,03	0,29	5,33	6,13	5,03	49,76
20	300,93	32,69	5,98	0,33	3,28	1,85	4,95	52,11
30	247,58	25,29	5,75	0,27	5,00	6,34	4,36	51,44
30	249,38	27,82	5,00	0,22	5,00	14,30	7,25	48,67
30	270,10	27,94	5,03	0,29	5,33	6,13	5,03	49,76
30	279,10	28,19	5,24	0,22	6,24	15,43	4,99	47,96
50	247,37	26,34	3,57	0,24	7,23	12,55	9,96	48,44

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	243,44	24,88	5,92	7,75	0,94	16,26	31,24	35,67
20	303,12	30,93	6,28	5,39	1,59	19,37	23,24	62,32
20	252,99	25,83	7,98	7,06	0,85	14,97	33,43	37,62
30	238,63	24,13	7,74	7,39	0,75	18,17	38,23	32,21
30	231,51	23,41	6,37	8,05	1,32	17,33	39,53	29,84
50	232,65	23,90	5,61	7,97	1,64	20,00	40,53	29,12
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..100)
20	234,11	23,53	7,98	8,56	0,48	15,00	42,42	27,57
40	217,07	22,29	5,62	7,81	0,34	29,98	48,12	24,99
40	216,58	22,48	5,86	6,83	0,23	26,80	34,85	33,74

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata15

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	319,58	21,27	30,20	39,20	21,20
20	348,60	23,29	26,21	37,45	17,87
20	320,63	21,38	37,16	35,15	21,13
20	344,18	22,87	26,99	42,99	21,92
30	318,18	21,26	32,50	37,11	20,84
30	317,51	21,12	33,23	38,01	21,71
50	321,64	21,37	39,37	37,31	23,44
50	317,12	21,17	32,66	37,45	21,09

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	608,25	22,27	16,40	15,57	63,01	17,51
20	596,82	23,21	16,29	14,33	62,60	17,57
20	595,18	22,08	15,68	14,94	63,01	15,69
30	525,80	23,62	13,19	12,48	72,50	14,71
30	667,99	21,55	17,63	16,93	58,44	16,25
50	740,60	20,88	19,99	19,29	56,10	18,28
50	335,09	21,52	17,53	16,84	50,22	17,50
50	666,62	21,61	17,92	17,19	60,10	18,13

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	409,56	28,30	5,17	0,39	5,07	0,09	5,06	49,94
20	384,92	19,63	6,00	0,23	4,99	8,60	4,36	53,13
20	328,53	21,52	2,15	0,27	8,08	9,77	6,15	48,39
30	268,15	18,26	5,16	0,29	5,67	6,19	5,02	49,94
30	237,34	15,68	3,73	0,27	6,24	2,66	5,77	54,13
50	235,35	15,02	5,00	0,29	6,25	0,13	4,53	54,68
50	242,12	15,48	5,00	0,28	6,26	3,42	4,53	53,12

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	242,28	15,93	10,02	7,35	0,30	8,12	22,30	44,26
20	228,04	14,93	8,30	7,23	0,02	18,58	38,54	32,85
20	221,24	15,00	8,03	6,60	0,17	18,92	32,29	38,68
30	233,28	15,29	6,56	8,17	0,75	16,01	37,49	30,02
30	237,58	15,77	9,37	7,53	0,29	8,53	22,80	43,05
50	209,76	14,04	7,38	7,74	0,19	20,00	40,92	29,28
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..30)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
50	216,50	14,39	6,91	7,30	0,38	18,73	34,37	34,08
50	2354,40	14,65	7,43	7,50	0,19	15,99	31,24	35,76

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	827,84	16,55	38,01	38,09	23,44
20	327,52	16,44	22,77	43,36	18,90
20	332,39	16,98	25,57	39,05	18,30
20	333,26	16,96	24,39	40,04	17,96
30	317,75	15,80	33,90	37,30	21,39
30	320,61	15,99	28,51	39,67	20,51
50	323,52	16,16	27,54	40,63	20,52

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	737,71	15,87	20,39	19,71	53,73	17,24
20	648,43	16,68	17,03	16,65	60,05	16,23
20	655,24	16,06	17,38	16,69	60,01	17,01
30	469,24	17,17	13,59	12,89	66,25	13,75
30	503,62	17,99	12,57	11,88	72,50	12,50
50	706,17	15,64	19,61	18,91	55,31	17,48
50	766,27	16,43	19,07	18,38	60,00	18,93
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..30)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	848,31	15,99	22,19	21,49	52,07	17,44

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	332,24	16,70	5,97	0,23	5,46	18,50	4,13	43,75
20	266,69	13,38	5,04	0,29	4,96	4,74	3,90	51,22
20	535,09	25,98	2,12	0,37	4,23	6,48	3,51	45,57
30	290,38	13,93	4,99	0,21	6,76	11,19	4,99	51,80
30	351,98	17,94	4,96	0,24	4,96	18,49	4,08	43,73
30	243,59	14,35	3,94	0,24	4,66	10,60	7,38	50,08
50	267,40	12,67	5,09	0,23	5,93	9,41	4,25	51,58
50	280,92	13,43	5,00	0,23	6,88	5,47	5,00	54,88

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	235,29	12,63	8,50	7,04	0,19	15,00	29,13	42,35
20	256,52	13,54	6,55	8,39	2,22	9,89	31,46	33,69
20	261,99	13,74	8,36	7,34	0,45	7,30	18,53	51,83
30	224,78	11,86	6,87	7,27	0,56	20,00	37,52	33,63
30	229,93	12,27	8,46	7,56	0,00	13,34	29,46	37,06
50	231,79	14,04	7,38	7,74	0,19	20,00	40,92	29,28
30	226,57	12,76	7,06	6,32	0,05	24,61	39,19	34,67
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..25)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	226,57	12,76	7,06	6,32	0,05	24,61	39,19	34,67
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..40)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
30	217,26	11,51	6,03	6,39	1,13	33,28	43,38	29,13
40	214,17	11,62	6,28	5,86	0,24	29,07	30,91	40,72

Συνάρτηση δειγματοληψίας exp4N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	508,27	60,75	8,76	89,26	0,19
20	348,52	75,48	22,66	46,11	20,34
20	506,04	64,35	8,68	85,72	0,39
30	360,69	76,08	14,37	57,03	14,85
30	486,13	58,62	7,89	99,94	0,18
30	495,27	59,50	8,44	87,50	0,20
50	486,99	58,63	7,96	98,83	0,20
50	204,06	60,32	8,75	85,16	0,22

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	556,20	63,50	14,98	12,51	66,63	17,52
20	614,02	62,14	17,44	14,11	59,41	18,75
20	500,58	62,50	13,62	9,37	73,11	19,98
30	463,23	62,49	14,30	10,00	66,25	18,74
30	506,38	59,10	8,44	7,81	98,74	0,22
50	494,73	62,16	15,00	11,25	64,69	18,58
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..20)
20	376,90	65,85	11,04	7,52	67,57	12,09
30	360,62	62,97	12,53	8,32	64,01	18,02
30	509,23	60,80	8,91	8,79	82,85	0,24

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	415,59	67,55	5,39	0,23	4,00	24,62	9,78	37,49
20	393,37	70,37	6,91	0,17	2,06	14,21	9,04	54,48
20	314,14	59,18	10,08	0,26	3,28	7,00	5,03	51,29
30	245,93	56,72	5,01	0,21	5,04	14,63	9,96	49,23
30	247,08	56,33	5,01	0,23	5,63	13,29	8,72	48,58
50	243,00	52,77	5,63	0,27	2,42	7,81	7,50	50,00
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..110)
50	210,16	50,81	4,92	0,27	2,50	4,85	9,72	52,74
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..35)	σ_1[ns] (0..20)	σ_2[ns] (0..100)
20	268,25	54,95	6,29	0,31	0,28	2,27	10,36	51,43
20	487,20	80,70	3,97	0,32	7,56	10,43	7,42	43,65
30	223,72	51,36	6,02	0,27	1,11	6,59	9,33	51,47
50	226,27	50,68	6,25	0,29	3,13	0,34	6,25	54,58
50	221,17	52,90	4,79	0,17	5,44	29,73	20,00	39,84

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	310,68	38,72	11,72	7,50	0,38	3,52	14,01	58,04
20	306,09	41,33	12,42	8,40	0,34	4,80	20,80	39,79
20	319,99	39,79	12,72	7,19	0,28	3,17	14,28	60,38
30	232,75	33,94	9,21	7,74	0,19	11,88	29,70	37,85
30	211,78	36,78	7,44	7,97	0,19	19,42	41,67	28,89
30	234,39	35,89	8,85	9,38	0,16	14,00	44,91	25,24
50	216,09	34,23	7,95	7,08	0,15	16,94	32,43	37,65

Συνάρτηση δειγματοληψίας Idata20N

- *Εξίσωση 1*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..40)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..50)
20	577,17	38,65	10,33	62,34	0,24
20	591,28	38,66	10,87	61,32	0,27
20	579,45	38,16	10,53	62,40	0,28
30	573,44	42,27	10,54	67,88	0,49
30	561,62	37,24	10,37	67,66	0,28
50	517,09	36,71	9,18	78,22	0,24
50	542,67	37,12	9,90	72,65	0,29

- *Εξίσωση 2*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..100)	t_2[ns] (0..20)
20	504,75	36,85	8,44	7,77	97,51	0,21
20	592,13	37,29	10,05	10,08	84,99	0,27
20	429,75	51,03	10,70	5,00	79,54	14,83
30	589,62	36,86	10,32	9,69	79,45	0,28
30	508,55	50,11	13,59	9,04	66,44	15,00
50	496,58	37,21	8,20	7,50	99,83	0,20
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..20)	t_1[ns] (0..200)	t_2[ns] (0..20)
20	379,60	50,47	11,89	6,95	62,71	14,99
20	484,75	38,91	7,68	7,70	100,83	0,15
30	537,87	36,47	9,77	9,07	73,36	0,28
50	484,70	38,89	7,50	6,88	101,17	0,19
50	494,21	37,61	8,14	7,45	100,00	0,21

- *Εξίσωση 3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	A[A] (0..20)	B[A] (0..10)	t_1[ns] (0..10)	t_2[ns] (0..25)	σ_1[ns] (0..10)	σ_2[ns] (0..100)
20	384,59	40,94	9,98	0,24	2,51	14,79	2,56	46,75
20	416,93	39,02	15,67	0,21	1,27	13,01	0,61	50,02
20	289,80	42,43	7,19	0,22	2,25	10,37	6,67	51,84
30	468,94	37,99	10,00	0,20	1,31	10,13	1,10	54,78
30	377,43	44,89	10,04	0,22	5,01	16,81	5,18	46,99
30	348,05	28,85	11,20	0,31	1,28	2,99	0,95	51,56
50	345,92	38,28	10,74	0,27	2,50	6,66	2,50	51,53

- *Εξίσωση 4, n=3*

Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..50)	t_4[ns] (0..100)
20	288,10	25,48	9,90	6,05	0,20	17,77	30,54	46,13
20	263,83	23,62	10,76	9,67	0,19	11,41	43,65	25,00
20	224,26	28,12	7,50	7,31	0,19	13,41	26,13	41,80
30	312,39	25,78	12,51	7,97	0,30	5,27	18,83	50,14
30	271,65	24,27	10,78	7,47	0,23	5,22	17,00	51,56
50	263,03	23,35	10,78	9,84	0,20	11,74	49,85	23,33
Επαναλήψεις - Αριθμός γονέων	F_{gsxima}	F_g	I_1[A] (0..30)	I_2[A] (0..15)	t_1[ns] (0..3)	t_2[ns] (0..20)	t_3[ns] (0..70)	t_4[ns] (0..100)
40	270,76	23,83	11,25	10,39	0,21	12,81	64,80	19,59