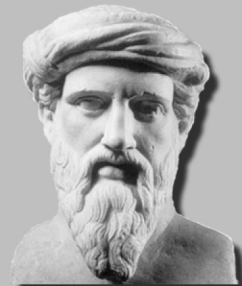




ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



Προβολή της επιστημονικής έρευνας
στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Πλωμάρι Λέσβου
5-8 Ιουλίου 2007

Πολύκεντρο Πλωμαρίου



<http://pythagoras.ntua.gr>

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ



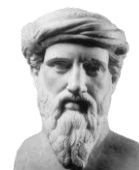
ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



Ανάπτυξη παντού. Ανάπτυξη για όλους.



Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Εκπαίδευσης και Αρχικής
Επαγγελματικής Κατάρτισης



Ατρωσία Ηλεκτροτεχνικού Εξοπλισμού σε Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις

Γεώργιος Π. Φώτης
Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Φανή Η. Ασημακοπούλου
Υποψήφια Διδάκτορας Ε.Μ.Π.
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ιωάννης Φ. Γκόνος *
Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη, Ζωγράφου, Τ. Κ. 15780, Αθήνα
Τηλ. 210-7723539, Φαξ 210-7723504, e-mail: igonos@ieee.org

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία συνοψίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα γύρω από το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Εστιάζει κυρίως στη μέτρηση του ρεύματος και του παραγόμενου από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεδομένου ότι ανάλογα με τον προσανατολισμό που έχει η γεννήτρια ως προς το δοκίμιο, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τον ελεγχόμενο ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Επίσης, με τη βοήθεια κατάλληλου γενετικού αλγορίθμου, προσδιορίζεται η εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης, όπως αυτή ορίζεται στο Πρότυπο.

Λέξεις Κλειδιά: Ατρωσία, Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση, Ομοαξονικός Προσαρμοστής Μέτρησης, Ρεύμα Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης, Επαλήθευση Γεννητριών Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων, Γενετικός Αλγόριθμος

ABSTRACT: This paper summarizes the research results on the electrostatic discharge phenomenon. This work is focuses on the measurement of the current and the electromagnetic field produced by electrostatic discharge generators. Depending on the orientation of the ESD generator towards the equipment under test the results may differ. Also, the equation of the electrostatic discharge current that corresponds to the waveform described in the Standard is defined by using a genetic algorithm.

Keywords: Immunity, Electrostatic discharge (ESD), Pellegrini target, ESD current, Verification, Genetic Algorithm

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα πολύ κοινό φαινόμενο στην καθημερινή μας ζωή. Το ηλεκτροστατικό φορτίο δημιουργείται είτε μέσω της επαφής των υλικών και της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, διαδικασία που είναι γνωστή ως τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, είτε μέσω φόρτισης εξ επαγωγής. Εξαιτίας του τριβοηλεκτρικού φαινομένου, ένας άνθρωπος μπορεί να φορτισθεί έως και μερικά kV απλά περπατώντας πάνω σε ένα χαλί. Όταν η εκφόρτιση λάβει χώρα, το ρεύμα εκφόρτισης μπορεί να φτάσει μέχρι μερικά Ampere. Αν και το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικές εκατοντάδες ns η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να είναι καταστρεπτική για τα ηλεκτρονικά ή ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [1] καθορίζει τη διαδικασία, η οποία πρέπει να ακολουθηθεί

για τις δοκιμές στον ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό έναντι των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

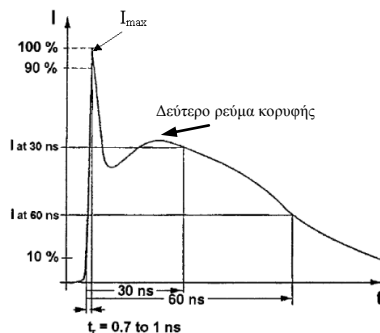
Στη διάρκεια των παρελθόντων ετών έχει γίνει μια σημαντική προσπάθεια για τη μελέτη του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είχε δοθεί μάλλον μικρή σημασία μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '80, όταν οι Wilson και Ma [5] ήταν οι πρώτοι, οι οποίοι μέτρησαν ταυτόχρονα το ρεύμα και το ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διάρκεια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε μια απόσταση 1,5m από το σημείο της εκφόρτισης. Ο D. Pommerenke [2], [3] διαπίστωσε ότι η κυματομορφή του ρεύματος είναι ανάλογη με το σχετικό μήκος των παραγόμενων τόξων, την τάση φόρτισης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μετάλλων μέσω των οποίων πραγματοποιείται η εκφόρτιση. Ο Fujiwara σε μια πρόσφατη δημοσίευση [4] πρότεινε ένα ισοδύναμο πρότυπο κύκλωμα για την ανάλυση του ρεύματος εκφόρτισης, ενώ εξήγαγε χρήσιμα συμπεράσματα για τους παράγοντες που επηρεάζουν το ρεύμα εκφόρτισης.

Στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τη διάρκεια των επαληθεύσεων των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, διαπιστώθηκε ότι, αν και το ρεύμα εκφόρτισης ήταν εντός των ορίων που καθορίζονται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2[1], οι γεννήτριες έδιναν διαφορετικά αποτελέσματα για τον ίδιο υπό εξέταση εξοπλισμό, κρίνοντάς τον άλλοτε κατάλληλο και άλλοτε ακατάλληλο. Αυτό ήταν ένα σημάδι ότι διάφορα δοκίμια μπορούσαν να επηρεαστούν όχι μόνο από το ρεύμα εκφόρτισης, αλλά και από κάτι άλλο, το οποίο είχε μια δραματική επίδραση σε αυτά. Αυτό το γεγονός οδήγησε στη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παράγει η κάθε γεννήτρια, και απέδειξε ότι κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό πεδίο, τόσο ως προς την κυματομορφή, όσο και ως προς τη μέγιστη τιμή. Οι συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών γεννητριών οδήγησαν σε χρήσιμα συμπεράσματα και στην επιβεβαίωση της ανάγκης να θεσπισθούν όρια για τις τιμές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά την επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, ώστε να είναι δυνατή η επαναληψιμότητα των δοκιμών, που διεξάγονται με χρήση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι, καταρχάς, να διερευνηθεί το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανάλογα με το πού είναι τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Επίσης, διερευνάται και το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, για δύο διαφορετικούς τύπους γεννητριών του εμπορίου, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι στο κέντρο μεταλλικής βάσης. Τέλος, με τη βοήθεια γενετικού αλγορίθμου προσδιορίζεται η καταλληλότερη εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

II. ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ EN 61000-4-2

Το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [1] ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία σύμφωνα με την οποία η δοκιμή του Προτύπου αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά.



Σχήμα 1 - Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [1]

Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 1, μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και αντιπροσωπεύει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που αντιπροσωπεύει την εκφόρτιση του ανθρώπινου σώματος. Κατά την επαλήθευση των γεννητριών σύμφωνα με το υπάρχον Πρότυπο [1] πρέπει να ελέγχονται τα όρια τεσσάρων βασικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος. Αυτές είναι:

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

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

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

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

μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

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

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

Οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα εκφόρτισης δίνονται στον Πίνακα 1, που ακολουθεί.

Πίνακας 1 - Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [1]

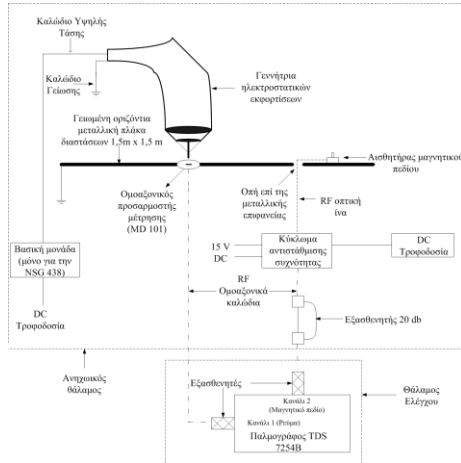
Επίπεδο	Ενδεικνυόμενη τάση φόρτισης (kV)	Κορυφή ρεύματος (I_{max}) $\pm 10\%$ (A)	Χρόνος ανόδου t_r (ns)	Ρεύμα ($\pm 30\%$) στα 30ns (I_{30}) (A)	Ρεύμα ($\pm 30\%$) στα 60ns (I_{60}) (A)
1	2	7,5	0,7 έως 1	4	2
2	4	15	0,7 έως 1	8	4
3	6	22,5	0,7 έως 1	12	6
4	8	30	0,7 έως 1	16	8

III. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

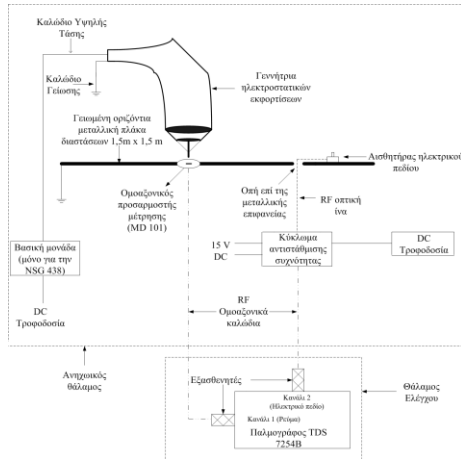
Στα Σχήματα 2 και 3 [8], [9] παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις, που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του ρεύματος, καθώς και του παραγόμενου μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου, αντίστοιχα, που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση δύο διαφορετικών γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5m×1,5m.

Για την παραγωγή ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων χρησιμοποιήθηκαν οι γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 της Schaffner. Η έκχυση του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση γινόταν πάνω στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης MD 101 της Schaffner, που βρισκόταν στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5m×1,5m, η οποία ήταν τοποθετημένη σε απόσταση 70cm από το έδαφος και ήταν γειωμένη σε κοινό σημείο με τη γείωση της γεννήτριας. Το ρεύμα από τον ομοαξονικό προσαρμοστή ρεύματος μεταφερόταν στο κανάλι 1 του παλμογράφου μέσω ομοαξονικού καλωδίου και αφού το αντίστοιχο

σήμα είχε εξασθενήσει μέσω εξασθεניתή της Tektronix (011-0059-03). Οι αισθητήρες του μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου ήταν κατασκευής του καθηγητή Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του Πανεπιστημίου του Missouri-Rolla, David Pommerenke και έχουν χρησιμοποιηθεί από τον ίδιο για ανάλογους ερευνητικούς σκοπούς. Τα αποτελέσματα των ερευνών του έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικά περιοδικά [9], [10].



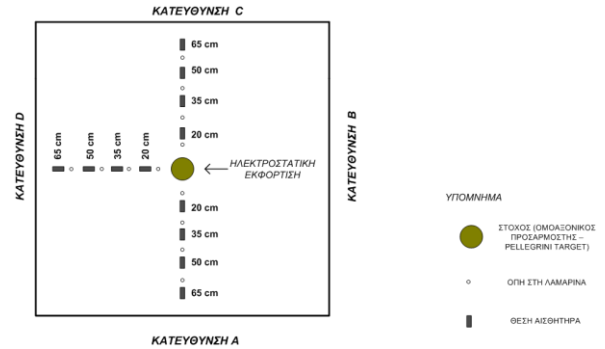
Σχήμα 2 - Διάταξη μέτρησης μαγνητικού με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5m×1,5m



Σχήμα 3 - Διάταξη μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου (β) με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5m×1,5m

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε διαδοχικές αποστάσεις (20cm, 35cm, 50cm και 65cm) προς τρεις κατευθύνσεις (A, C και D), οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η τοπολογία της πειραματικής διάταξης. Δεν έγιναν μετρήσεις ως προς τέταρτη κατεύθυνση (B) διότι οι παρεμβολές του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (περνούσε ακριβώς πάνω από το probe και σε απόσταση λίγων εκατοστών) προκαλούσαν σοβαρές αλλοιώσεις. Οι αισθητήρες αυτοί για να λειτουργήσουν χρειάζονται τροφοδοτικό, που στην προκειμένη περίπτωση ήταν το GP4303D της LG. Το σήμα του πεδίου οδηγείται στο κανάλι 2 του παλμογράφου, αφού πρώτα εξασθενήσει κατά 20dB.

Προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων, το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχοϊκό θάλαμο της Lindgren-Rayproof Series 81, ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τουλάχιστον έως 1GHz.

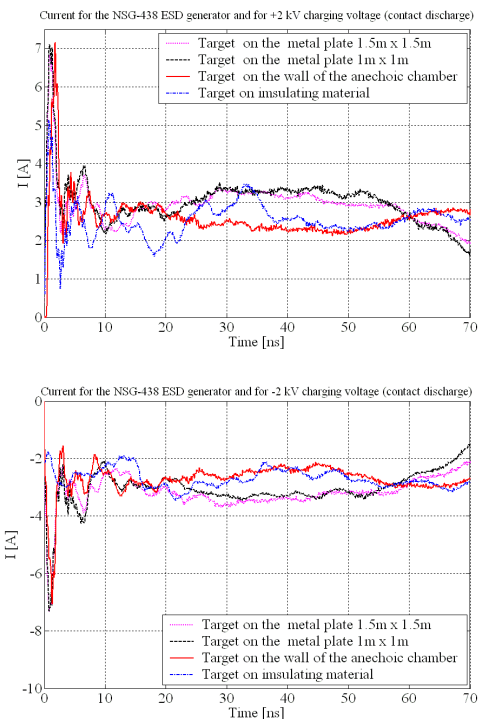


Σχήμα 4 - Θέσεις αισθητήρων για τη μέτρηση του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στο κέντρο οριζόντιας μεταλλικής επιφάνειας διαστάσεων 1,5m×1,5m

IV. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

A) ΡΕΥΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

Το ρεύμα εκφόρτισης επαφής για τη γεννήτρια NSG-438 για τάση φόρτισης τα $\pm 2\text{kV}$ και για διάφορες βάσεις τοποθέτησης του ομοαξονικού προσαρμοστή φαίνεται στο Σχήμα 5. Στους Πίνακες 2 και 3 υπάρχουν οι μέσες τιμές των 4 βασικών παραμέτρων (t_r , I_{max} , I_{30} και I_{60}) αυτών των μετρήσεων. Τα σκιασμένα κελιά του Πίνακα δηλώνουν ότι η αντίστοιχη παράμετρος είναι εκτός των ορίων που ορίζονται στον Πίνακα 1 από το Πρότυπο.



Σχήμα 5 - Σύγκριση του ρεύματος εκφόρτισης για 2 αντίθετες τάσεις φόρτισης (εκφορτίσεις επαφής)

Πίνακας 2 - Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης +2kV (εκφορτίσεις επαφής)

	Εκφορτίσεις επαφής στα +2 kV			
	t_r	I_{max}	I_{30}	I_{60}
Περίπτωση 1 (μεταλλική πλάκα 1,5x 1,5 m ²)	0,73	6,96	3,25	2,48
Περίπτωση 2 (μεταλλική πλάκα 1 x 1 m ²)	0,71	7,09	3,30	2,59
Περίπτωση 3 (μεταλλική πλάκα 36 x 36 cm ² , επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχικού θαλάμου)	1,19	7,16	2,54	2,61
Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	0,68	5,13	2,80	2,65

Πίνακας 3 - Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης -2kV (εκφορτίσεις επαφής)

	Εκφορτίσεις επαφής στα +2 kV			
	t_r	I_{max}	I_{30}	I_{60}
Περίπτωση 1 (μεταλλική πλάκα 1,5x 1,5 m ²)	0,71	-7,55	-3,56	-2,55
Περίπτωση 2 (μεταλλική πλάκα 1 x 1 m ²)	0,70	-7,30	-3,25	-2,59
Περίπτωση 3 (μεταλλική πλάκα 36 x 36 cm ² , επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχικού θαλάμου)	1,20	-7,06	-2,68	-2,85
Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	1,89	-3,01	-2,90	-2,90

Για τις εκφορτίσεις επαφής στα $\pm 2\text{kV}$ συμπεραίνεται ότι όσο πιο αγωγήμη είναι η μεταλλική πλάκα (μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής), επί της οποίας ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος, τόσο μικρότερος ο χρόνος ανόδου, παρ' όλο που στις περιπτώσεις 1 και 2 είναι περίπου ο ίδιος. Επίσης στα +2kV, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας τόσο μικρότερη είναι η τιμή του μέγιστου ρεύματος I_{max} , ενώ το αντίθετο συμπέρασμα παρατηρείται για τα -2kV. Φαίνεται επίσης, ότι για τις τρεις γειωμένες μεταλλικές πλάκες οι τιμές του I_{max} είναι παρόμοιες, αλλά όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι πάνω σε μονωτικό υλικό το I_{max} είναι πολύ μικρότερο.

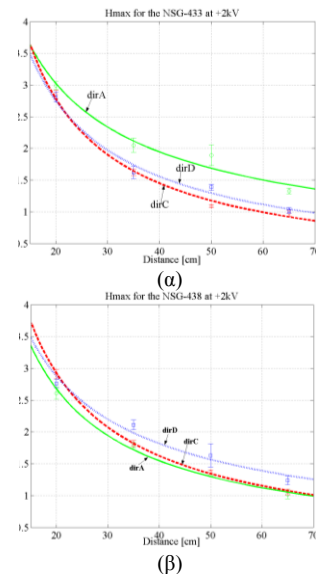
Όσον αφορά τα ρεύματα I_{30} και I_{60} υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των τεσσάρων διαφορετικών περιπτώσεων. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [11], το ρεύμα I_{60} είναι πολύ ευαίσθητο ανάλογα με τη θέση του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας. Στο πείραμα που περιγράφηκε καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης του πιστολιού να μη μεταβάλλεται. Το γεγονός αυτό εξηγεί την παρόμοια τιμή του για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις:

Επίσης από τους Πίνακες 2 και 3 είναι εμφανές ότι, στις περιπτώσεις 1 και 2, όπου ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος πάνω στις μεταλλικές πλάκες με διαστάσεις 1,5m×1,5m και 1m×1m αντίστοιχα, οι τιμές και των τεσσάρων παραμέτρων είναι στα όρια που ορίζει το Πρότυπο. Συνεπώς το Πρότυπο θα μπορούσε να είναι

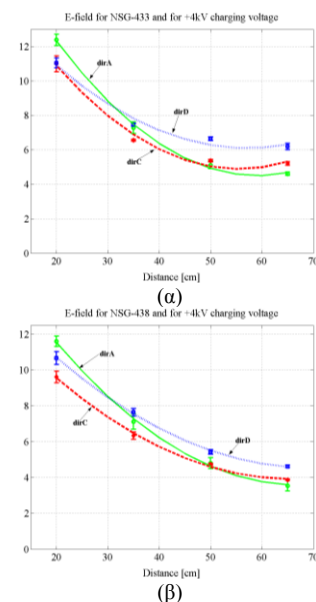
πιο ελαστικό ως προς τις διαστάσεις της μεταλλικής επιφάνειας πάνω στην οποία πρέπει να στερεωθεί ο ομοαξονικός προσαρμοστής, και να μην ορίζει αυστηρά τις διαστάσεις 1,5m×1,5m.

Β) ΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Στα Σχήματα 6 και 7 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα και η τυπική τους απόκλιση συναρτήσει της απόστασης, ανά κατεύθυνση για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις $\pm 2\text{kV}$ και $\pm 4\text{kV}$ με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.

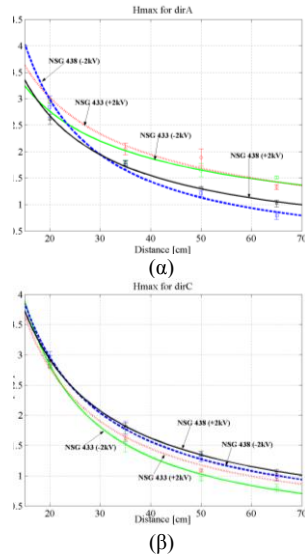


Σχήμα 6 - Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση +2kV: α) με τη γεννήτρια NSG-433 και β) με τη γεννήτρια NSG-438

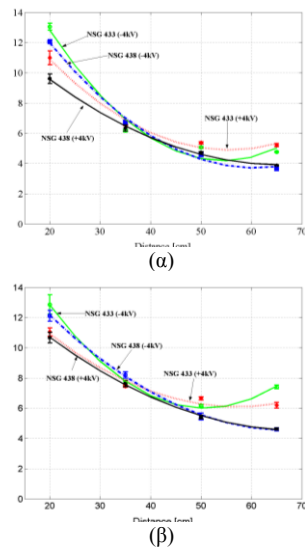


Σχήμα 7 - Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλισή τους στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής υπό τάση +4kV με: α) τη γεννήτρια NSG-433 και β) τη γεννήτρια NSG-438

Στα Σχήματα 8 και 9 παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέσων μέγιστων τιμών της έντασης του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου, αντίστοιχα, συναρτήσει της απόστασης για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά για εκφορτίσεις επαφής, υπό τάσεις $\pm 2\text{kV}$ και $\pm 4\text{kV}$ με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.



Σχήμα 8 - Οι μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και η τυπική απόκλιση τους στην κατεύθυνση Α (σχήμα α) και την κατεύθυνση C (σχήμα β) και για όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις $+2\text{kV}$ και -2kV



Σχήμα 9 - Μέσες μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και η τυπική απόκλιση τους στην κατεύθυνση C (σχήμα α) και την κατεύθυνση D (σχήμα β) και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις $+4\text{kV}$ και -4kV

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία όχι μόνο σε σύγκριση με άλλες, αλλά και η ίδια γεννήτρια ανάλογα με τον προσανατολισμό της. Αυτό σημαίνει πως το εσωτερικό κύκλωμα κάθε γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι κατασκευασμένο κατά τέτοιο τρόπο (τοπολογία ηλεκτρικού κυκλώματος), ώστε το πεδίο που παράγεται σε κάθε κατεύθυνση να είναι διαφορετικό. Εδώ

πρέπει να τονισθεί ότι το εκπεμπόμενο μαγνητικό πεδίο οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι τα εσωτερικά ρεύματα του κυκλώματος της γεννήτριας, ενώ ο δεύτερος το πεδίο που παράγεται από το ρεύμα εκφόρτισης. Κατά συνέπεια, διαφορές στο εσωτερικό κύκλωμα οδηγούν στο να εκπέμπει κάθε γεννήτρια διαφορετικό μαγνητικό πεδίο, ενώ η ασυμμετρία, που υπάρχει στο εκπεμπόμενο πεδίο από κάθε γεννήτρια οδηγεί στο να υπάρχει διαφορετικό πεδίο σε κάθε κατεύθυνση. Αυτές οι διαφορές στο εκπεμπόμενο πεδίο δημιουργούν πρόβλημα στον υπό δοκιμή εξοπλισμό, ο οποίος εξετάζεται από την εκάστοτε γεννήτρια, γιατί ανάλογα με τον προσανατολισμό της ίδιας γεννήτριας ή ανάλογα με το μοντέλο της γεννήτριας μπορεί να προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα. Είναι δυνατόν λοιπόν ο υπό δοκιμή εξοπλισμός άλλοτε να περνά επιτυχώς τη δοκιμή και άλλοτε να αποτυγχάνει, λόγω των διαφορετικών επαγόμενων τάσεων που κάθε φορά δημιουργούνται.

Παρατηρείται, λοιπόν, από τα παραπάνω πως το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [1] δεν είναι επαρκές για τα όσα ορίζει για την κατασκευή των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Πέρα από τις τέσσερις παραμέτρους που ορίζει το Πρότυπο (t_r , I_{max} , I_{30} και I_{60}) πρέπει να ορισθούν παράμετροι για το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, καθώς και για τις επαγόμενες τάσεις που προκαλούν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια στα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων. Μάλιστα θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν πως κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων προκαλεί διαφορετικό μαγνητικό πεδίο ανάλογα με τον προσανατολισμό της.

V. ΕΥΡΕΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

Μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων θα πρέπει να εξασφαλίζει την επαναληψιμότητα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το Πρότυπο καθορίζει τις τιμές των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση [12], που δεν αντιστοιχεί στο ρεύμα εκφόρτισης, αλλά θα χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση στην εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου, είναι η εξίσωση του κεραυνικού ρεύματος που δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$i(t) = i_0 \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (1)$$

Η διπλοεκθετική συνάρτηση έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε μια προσπάθεια να περιγραφεί το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ευρέως

χρησιμοποιούμενες στο εμπόριο [13]:

$$i(t) = i_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - i_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2)$$

Μια άλλη εξίσωση, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για την περιγραφή του ρεύματος του προερχόμενου από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι η ακόλουθη συνάρτηση [14]:

$$i(t) = A \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2} - B \cdot t \cdot e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2} \quad (3)$$

Η κυματομορφή που δίνει η εξίσωση (3) μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα δύο κανονικών κατανομών στο πεδίο του χρόνου, μίας στενής και μίας ευρείας. Η εξίσωση (4.12) είναι πιο κοντά σε αυτή εφόσον οι

παράγοντες $A \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{\sigma_1}\right)^2}$ και $B \cdot t \cdot e^{-\left(\frac{t-t_2}{\sigma_2}\right)^2}$ αντιπροσωπεύουν μια στενή και μια πιο ευρεία κανονική κατανομή αντίστοιχα.

Μια άλλη εξίσωση, η οποία είχε προταθεί από τον Heidler για το κεραυνικό ρεύμα [15] και κατόπιν υιοθετήθηκε και από τον Pommerenke [16] για το ρεύμα από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_4}} \quad (4)$$

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.

Η βελτιστοποίηση των άγνωστων παραμέτρων των τεσσάρων αυτών εξισώσεων ώστε να περιγράψουν αναλυτικά το μετρούμενο ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, γίνεται με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου, που αναπτύχθηκε.

Ένας απλός γενετικός αλγόριθμος βασίζεται στις διαδικασίες της αναπαραγωγής, της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation) για την επίτευξη του ολικού ή μερικώς-ολικού βέλτιστου. Το διάγραμμα ροής του γενετικού αλγορίθμου φαίνεται στο Σχήμα 10 που ακολουθεί.

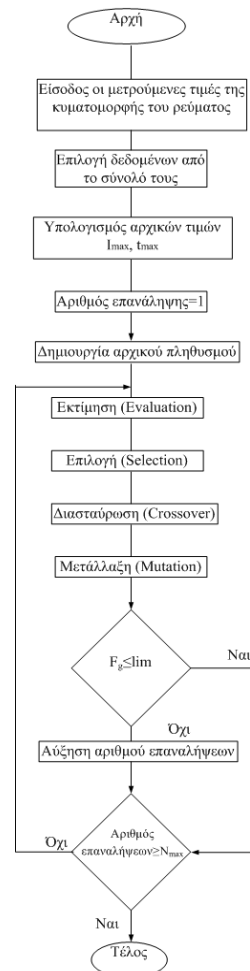
Ως κριτήριο βελτιστοποίησης επιλέγεται είτε η ελαχιστοποίηση της συναρτήσεως F_{g1} (σχετικό σφάλμα):

$$F_{g1} = \sum_{i=1}^N \frac{|I_i^m - I_i^c|}{I_i^m} \quad (5)$$

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

$$F_{g2} = \sum_{i=1}^N |I_i^m - I_i^c| \quad (6)$$

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



Σχήμα 10 - Διάγραμμα ροής του Γενετικού Αλγορίθμου

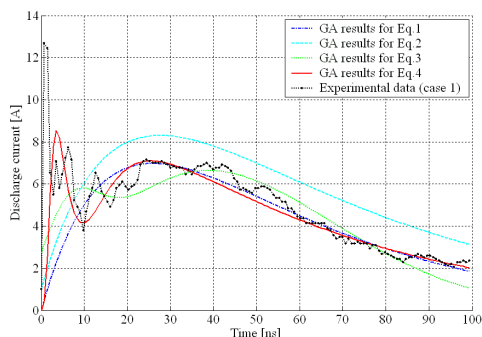
Δίνοντας ως δεδομένα εισόδου το ρεύμα εκφόρτισης μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ο γενετικός αλγόριθμος υπολογίζει και βελτιστοποιεί τις παραμέτρους των εξισώσεων (1)-(4), [17] - [19]. Οι εξισώσεις (1) και (2) έχουν τρεις και τέσσερις άγνωστες παραμέτρους αντίστοιχα. Η εξίσωση (3) έχει 6 άγνωστες παραμέτρους, όπως και η εξίσωση (4), θεωρώντας το n σταθερό και ίσο με 3. Από το σφάλμα F_{g1} κάθε εξίσωσης προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την καλύτερη και ακριβέστερη εξίσωση.

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 τις 2250, δεν χρησιμοποιείται. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι δειγματοληψίας, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4 που ακολουθεί.

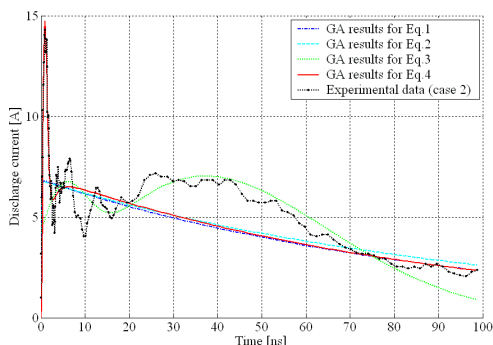
Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε πειραματικά δεδομένα και για τέσσερις περιπτώσεις. Στα Σχήματα 11-14 παρουσιάζονται κοινά γραφήματα των πειραματικών δεδομένων για το ρεύμα εκφόρτισης και το ρεύμα εκφόρτισης για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων για τις εξισώσεις (1)-(4).

Πίνακας 4 - Περιπτώσεις δειγματοληψίας ρεύματος εκφόρτισης

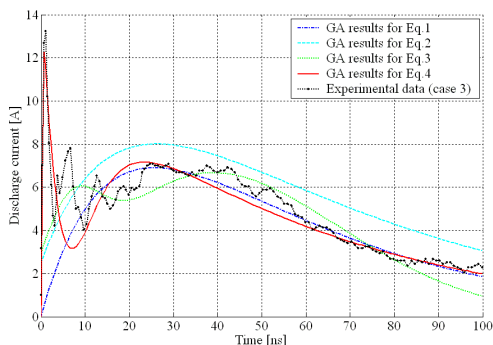
1 ^η περίπτωση	Σταθερό βήμα ίσο με 7
2 ^η περίπτωση	Βήμα=1 για 0-4 ns
	Βήμα =2 for 4-7 ns
	Βήμα =4 for 7-17 ns
	Βήμα =13 for 17-100 ns
3 ^η περίπτωση	Βήμα = $2(1+\text{round}(\log_{10}(j)))$ όπου j είναι το j ^{στο} σημείο των μετρηθέντων δεδομένων των 1000 σημείων
4 ^η περίπτωση	0 - 5 ns: Όλα τα μετρηθέντα σημεία (51 σημεία) 5 – 100 ns: Βήμα = $3(1+\text{round}(\exp(j/N)))$ (92 σημεία)



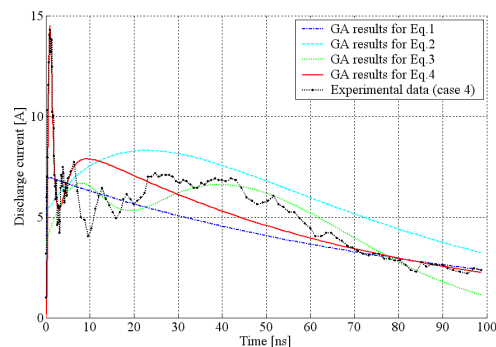
Σχήμα 11 - Σύγκριση καμπυλών μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων για το ρεύμα εκφόρτισης και του ρεύματος εκφόρτισης για τις τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων των εξισώσεων (1)-(4) για την 1^η περίπτωση.



Σχήμα 12 - Σύγκριση καμπυλών μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων για το ρεύμα εκφόρτισης και του ρεύματος εκφόρτισης για τις τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων των εξισώσεων (1)-(4) για την 2^η περίπτωση.



Σχήμα 13 - Σύγκριση καμπυλών μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων για το ρεύμα εκφόρτισης και του ρεύματος εκφόρτισης για τις τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων των εξισώσεων (1)-(4) για την 3^η περίπτωση.



Σχήμα 14 - Σύγκριση καμπυλών μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων για το ρεύμα εκφόρτισης και του ρεύματος εκφόρτισης για τις τιμές των βελτιστοποιημένων παραμέτρων των εξισώσεων (1)-(4) για την 4^η περίπτωση.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω γραφήματα προκύπτει ότι για την ίδια συνάρτηση δειγματοληψίας οι εξισώσεις μπορούν να ταξινομηθούν από την καλύτερη προς την χειρότερη ως εξής: (4)→(3)→(2)→(1). Το ποια συνάρτηση δειγματοληψίας επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε κάθε φορά εξαρτάται από την προσέγγιση στην κυματομορφή του ρεύματος, που επιθυμούμε να επιτύχουμε. Αν στόχος μας είναι η καλύτερη σύγκλιση στα πρώτα ns, όπου η ενέργεια του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι μέγιστη, τότε η 4^η συνάρτηση δειγματοληψίας είναι η καταλληλότερη. Στην περίπτωση που επιθυμούμε σύγκλιση για όλη τη χρονική διάρκεια, τότε επιλέγουμε την 1^η συνάρτηση δειγματοληψίας.

VI. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας την παρούσα εργασία αποδείχθηκε ότι στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου, θα μπορούσε, πιθανότατα να αποφευχθεί ο αυστηρός ορισμός των διαστάσεων της μεταλλικής επιφάνειας, “τουλάχιστον 1,5m×1,5m” και η περί αυτών απαίτηση να γίνει “τουλάχιστον 1m×1m”.

Επίσης, από τα πειράματα, που διεξήχθησαν, αποδεικνύεται ότι όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής ήταν στο κέντρο μεταλλικής επιφάνειας, η ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, στις διάφορες ως προς αυτή κατευθύνσεις, και, κατά συνέπεια, διαφορετικές επαγόμενες τάσεις. Ο διαφορετικός προσανατολισμός, που έχει η γεννήτρια ως προς το δοκίμιο, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα στον ελεγχόμενο ηλεκτροτεχνικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό ειδικά, όταν η έκβαση των δοκιμών είναι σε οριακό σημείο.

Αναπτύχθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος βελτιστοποιεί τις τιμές των παραμέτρων διαφόρων εξισώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και μπορούν να περιγράψουν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τελικά, αποδείχθηκε ότι, η εξίσωση, η οποία μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι της μορφής εκείνης, που είχε χρησιμοποιήσει ο Heidler για το κεραυνικό ρεύμα.

Τα πειραματικά δεδομένα για την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου δεν κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν στο σύνολό τους, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού χρόνου, που απαιτείται. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν διάφορες συναρτήσεις δειγματοληψίας, για τις οποίες υπήρξαν, αντίστοιχα, διάφορα αποτελέσματα από την εφαρμογή του γενετικού αλγορίθμου.

VII. EYXARISTIES

Το έργο αυτό συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς πόρους (25%) – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχικής Επαγγελματικής Κατάρτισης (ΕΠΕΑΕΚ) και ειδικότερα από το πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ.

VIII. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ΕΛΟΤ EN 61000-4-2: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 2: Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Βασικό δημοσίευμα EMC”, 1996.
- [2] “ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit”, Pommerenke D., Journal of Electrostatics, Vol. 36, issue 1, November 1995, pp. 31-54.
- [3] “ESD: waveform calculation, field and current of human and simulator ESD”, Pommerenke D., Aidam M., Journal of Electrostatics, Vol. 38, issues 1-2, October 1996, pp. 33-51.
- [4] “Equivalent circuit modeling of discharge current injected in contact with an ESD gun”, Fujiwara O., Tanaka H., Yamanaka Y., Electrical Engineering in Japan, Vol. 149, Nr. 1, 2004, pp. 8-14.
- [5] “Fields radiated by electrostatic discharges”, Wilson P.F., Ma M.T., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 33, Nr. 1, February 1991, pp. 10-18.
- [6] ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control, Dangelmayr T., Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [7] “Measurement of the magnetic field radiating by electrostatic discharges during the verification of the ESD generators”, Fotis G.P., Rapanakis A.G., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Journal of the International Measurement Confederation, Vol. 40, 2007, pp. 428-436.
- [8] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “An Approach to the Better Understanding of the Experimental Setup for the Verification of the ESD Generators”, Proceedings of the 14th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, China, August 25-29, 2005 (paper A-02).
- [9] “Numerical modeling of electrostatic discharge generators”, Wang K., Pommerenke D., Chundru R., Doren T.V., Drewniak J.L., Shashindranath A., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, Nr. 2, May 2003, pp. 258-271.
- [10] “Characterization of human metal ESD reference discharge event and correlation of generator parameters to failure levels Part I: Reference event”, Chundru R., Pommerenke D., Wang K., Doren T.M., Centola F., Huang J., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, Nr. 4, November 2004, pp. 498-504.
- [11] “Calibration of electrostatic discharge generators and results of an international comparison”, Hilty K., Ryser H., Hermann U., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, Nr. 2, April 2001, pp. 414-418.
- [12] High voltage test techniques, Kind D., Feser K., Newnes, 2001.
- [13] “ESD indirect coupling modeling”, Cerri G., Leo R., Primiani V.M., Righetti M., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 38, Nr. 3, August 1996, pp. 274-281.
- [14] “Study of ESD signal entry through coaxial cable shields”, Berghe S.V., Zutter D., Journal of Electrostatics, Vol. 44, issues 3-4, September 1998, pp. 135-148.
- [15] Heidler H., “Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung”, 18th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Munich, Germany, 1985.
- [16] “Numerical modeling of electrostatic discharge generators”, Wang K., Pommerenke D., Chundru R., Doren T.V., Drewniak J.L., Shashindranath A., IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, Nr. 2, May 2003, pp. 258-271.
- [17] Fotis G.P., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Parameter Estimation for the Equation of the Electrostatic Discharge Current using Genetic Algorithms”, Proceedings of the 40th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2005), Cork, Ireland, September 7-9, 2005, Vol. 2, pp.635-639 (Session TA2).
- [18] Fotis G.P., Assimakopoulou F.E., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Parameter evaluation of the equation of the electrostatic discharge current, using genetic algorithms as optimization tool”, 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2006, Miami, USA, 30 April – 2 May 2006, Poster Session PF5: Optimization and Design VI.
- [19] “Applying genetic algorithms for the determination of the parameters of the electrostatic discharge current equation”, Fotis G.P., Gonos I.F., Assimakopoulou F.E., Stathopoulos I.A., Institute of Physics (IOP), Proceedings Measurement, Science & Technology, Vol. 17, 2006, pp. 2819-2827.