

ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Γ.Π. Φώτης, Ι.Φ. Γκόνοσ, Ν.Χ. Ηλία, Ι.Α. Σταθόπουλος
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, Τ. Κ. 15780, Αθήνα
e-mail: gfortis@ieee.org

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [1], ταυτιζόμενο κατ' ουσία με το Διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2, ορίζει τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί, κατά τη διάρκεια των δοκιμών ατρωσίας έναντι ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον εξοπλισμό που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, καθώς και τη διαδικασία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Η παρούσα εργασία εξετάζει τις αποκλίσεις που υπάρχουν στη μέτρηση του ρεύματος ανάλογα με τη βάση τοποθέτησης του ομοαξονικού προσαρμοστή (διαστάσεις, υλικό βάσης, κ.λ.π.). Για την ανασύνθεση του ρεύματος περιγράφονται δύο μέθοδοι: η μία βασίζεται σε DC κυκλωματική ανάλυση της διάταξης, ενώ η άλλη στηρίζεται σε ανάλυση με δίθυρα. Η σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων δείχνει ποια είναι η καταλληλότερη για τον υπολογισμό του ρεύματος εκφόρτισης. Επίσης προτείνει έναν τρόπο μέτρησης του παραγόμενου, από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου γίνεται, επειδή κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό πεδίο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορετικές επαγόμενες τάσεις, εξαιτίας των οποίων ένα δοκίμιο μπορεί να “περνά” με μια γεννήτρια (α) τη δοκιμή, ενώ με μια άλλη γεννήτρια (β) να αποτυγχάνει.

Λέξεις-Κλειδιά: Ρεύμα από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2, επαλήθευση γεννητριών, μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι πολύ κοινή στην καθημερινή μας ζωή. Το ηλεκτροστατικό φορτίο δημιουργείται μέσω της επαφής των υλικών και της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, διαδικασία που είναι γνωστή ως τριβηλεκτρικό φαινόμενο. Ο άνθρωπος μπορεί να φορτισθεί έως και μερικά kV απλά με το περπάτημα 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. Για αυτό το λόγο η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) όρισε το Πρότυπο 61000-4-2 προκειμένου να καθορίσει τη διαδικασία, η οποία πρέπει να ακολουθηθεί για τις δοκιμές στον ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξοπλισμό έναντι των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Βάσει αυτού του Προτύπου γίνονται στην Ελλάδα οι δοκιμές του ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, από τα εργαστήρια, που διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό και τεχνογνωσία.

Στη διάρκεια των παρελθόντων ετών έχει γίνει μια σημαντική προσπάθεια για τη μελέτη του ρεύματος ηλεκτροστατικής 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 έχουν

εξαχθεί χρήσιμα συμπεράσματα για τους παράγοντες που επηρεάζουν το ρεύμα εκφόρτισης.

Στη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είχε δοθεί μικρή, μάλλον, 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 1,5 m. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που προέρχεται από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Ο D. Pommerenke [2] μέτρησε το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο σε απόσταση μεταξύ 0,1 και 1 m, για εκφορτίσεις αέρα και επαφής. Διαπίστωσε ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται έντονα από τον παράγοντα $1/R$ (όπου R είναι η απόσταση από το σημείο όπου λαμβάνει χώρα η εκφόρτιση), ενώ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γενικώς μειώνεται, με παρεμβολή, πάντως, διαστήματος εντός του οποίου αυξάνει. Έχουν υπάρξει, επίσης, μελέτες [6], [7], σύμφωνα με τις οποίες το ρεύμα εκφόρτισης μπορεί να υπολογισθεί μέσω της μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και 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, οι γεννήτριες αυτές μπορούσαν να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα στον ίδιο υπό εξέταση εξοπλισμό. 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 να ερευνηθεί το παραγόμενο από τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, για δύο διαφορετικούς τύπους γεννητριών του εμπορίου, ηλεκτρομαγνητικό πεδίο όταν δεν τοποθετείται ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης σε μεταλλική βάση, αλλά είναι άντ' αυτού σε ένα μονωτικό υλικό. Επίσης μελετώνται οι διαφορές που παρουσιάζει το ρεύμα εκφόρτισης όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, κατά την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, είναι τοποθετημένος σε διαφορετικά υλικά στήριξης.

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ EN 61000-4-2

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

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που περιγράφεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model) [8]. Το κύκλωμα της όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1α το απαρτίζουν:

- Το τροφοδοτικό υψηλής τάσης.
- Ο πυκνωτής ενταμίευσης (C_s).
- Η αντίσταση φόρτισης (R_c).
- Η αντίσταση εκφόρτισης (R_d).
- Ο διακόπτης εκκένωσης.

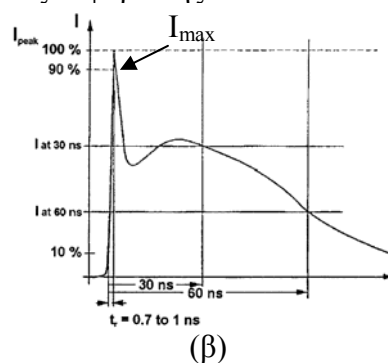
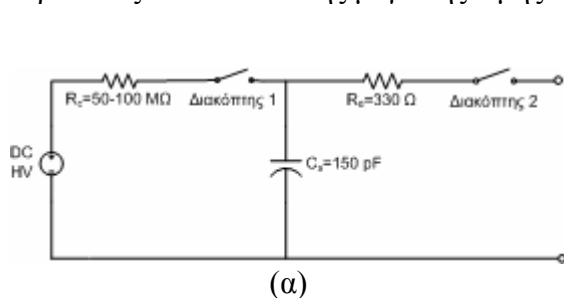
Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 1β, μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Κατά την επαλήθευση των γεννητριών 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 (Rise time t_r): Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns.

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

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



Σχήμα 1: α) Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και β) κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που ορίζει το Πρότυπο 61000-4-2.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την επαλήθευση των ηλεκτροστατικών γεννητριών, ο οποίος γίνεται μόνο για εκκενώσεις επαφής είναι:

- Ανηχιακός θάλαμος.
- Παλμογράφος με εύρος τουλάχιστον 1 GHz.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target).
- Ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχνα σήματα.

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]

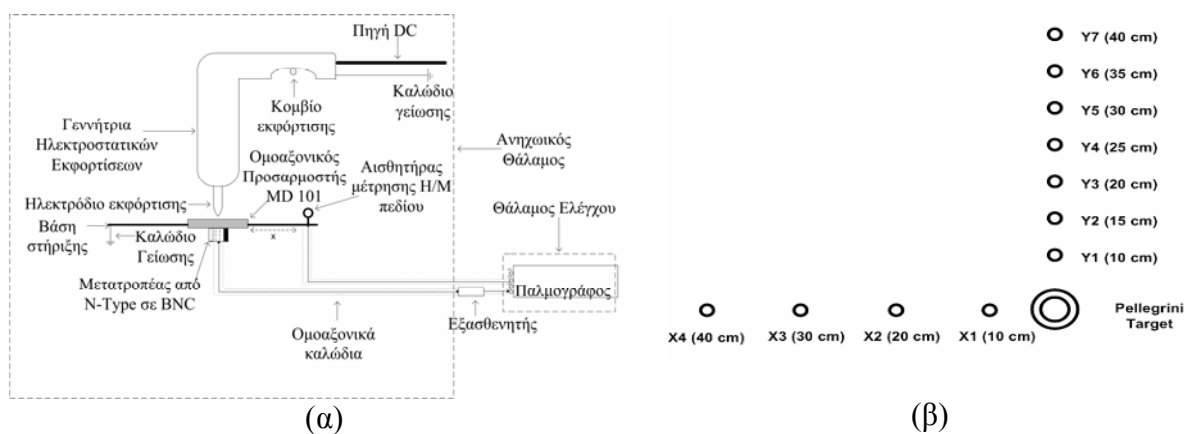
Επίπεδο	Ενδεικνύομενη τάση	Κορυφή ρεύματος	Χρόνος ανόδου	Ρεύμα ($\pm 30\%$)στα	Ρεύμα ($\pm 30\%$)στα
1	2	7,5	0,7 έως 1	4	2
2	4	15	0,7 έως 1	8	4
3	6	22,5	0,7 έως 1	12	6
4	8	30	0,7 έως 1	16	8

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο Σχήμα 2α παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος, καθώς και του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TDS 7254B της Tektronix, ο οποίος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από

dc έως 2,5 GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες της Schaffner, τη NSG-433 και τη NSG-438. Προκειμένου να μετρηθεί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και τα παραγόμενα πεδία και να προκύψουν οι κυματομορφές τους θα πρέπει να εξασθενήσουν τα αντίστοιχα σήματα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε εξασθενητής (20 dB) της Tektronix. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης MD 101 της Schaffner δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος, με τη βοήθεια του οποίου μετρήθηκε το εκχυόμενο ρεύμα κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης τοποθετήθηκε σε 4 διαφορετικές βάσεις στήριξης προκειμένου να μελετηθεί σε κάθε μια περίπτωση η συμπεριφορά του ρεύματος εκφόρτισης. Για τις ανάγκες μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν τα probes HZ-11 της Rohde-Schwarz. Τα probes τοποθετήθηκαν σε διαδοχικές αποστάσεις προς δυο κατευθύνσεις οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης. Στο Σχήμα 2β παρουσιάζονται οι θέσεις που των probes για τη μέτρηση του πεδίου. Τέλος προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχικό θάλαμο, ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως 1 GHz.



Σχήμα 2: Η πειραματική διάταξη και οι θέσεις των probes για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου

ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

1^{ος} ΤΡΟΠΟΣ

Στον παλμογράφο αυτό που μετράται είναι η τάση, οπότε είναι αναγκαία η ανασύνθεση του ρεύματος μέσω της τάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης [9] στην dc ανάλυση, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3 και περιλαμβάνει την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον ομοαξονικό προσαρμοστή και τον παλμογράφο. Το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ESD} = \frac{C \cdot V_{out}}{Z_0} \quad (1)$$

$$C = C_{CT} \cdot C_A \quad (2)$$

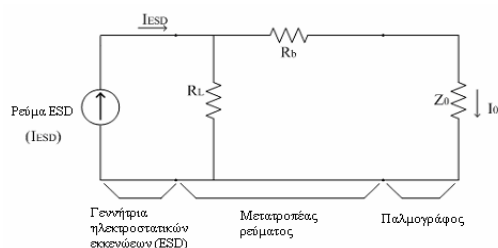
$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L} \quad (3)$$

όπου I_{ESD} είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης, V_{out} η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση εξαιτίας του ρεύματος I_0 , C είναι ένας συντελεστής μετατροπής, ενώ C_{CT} και C_A είναι οι συντελεστές μετατροπής του ομοαξονικού προσαρμοστή και του

εξασθενητή αντίστοιχα. Οι τιμές των R_L και R_b μπορούν να βρεθούν μετρώντας την dc αντίσταση του ομοαξονικού προσαρμοστή. Η αντίσταση φόρτισης R_L είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού ηλεκτροδίου (δίσκου) και του εξωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και είναι ίση με $2,018 \Omega$. Η R_b είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και ισούται με $48,964 \Omega$. Για τον υπολογισμό αυτών των δύο τιμών (R_L και R_b) γίνονται 20 μετρήσεις και εξάγεται ο μέσος όρος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα της μέτρησης. Από την (3) υπολογίζεται η τιμή του C_{CT} όπου $C_{CT}=50,0406 \approx 50$.

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

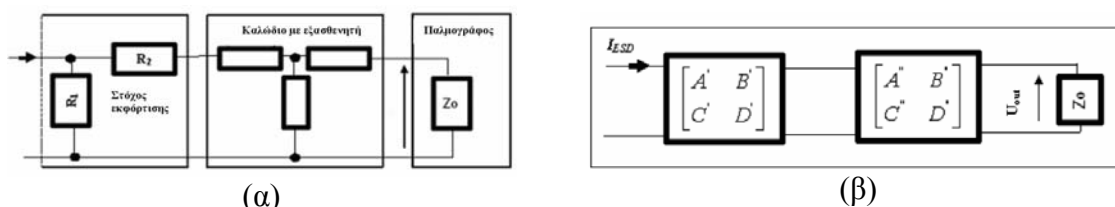
$$(1) \Rightarrow I_{ESD} = 10,0081 \cdot V_{out} \quad (4)$$



Σχήμα 3: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση

2^{ος} ΤΡΟΠΟΣ

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της έντασης του ρεύματος, βασίζεται στη θεωρία δικτύων και συγκεκριμένα αφορά τα δίθυρα [10]. Στο Σχήμα 4α παρουσιάζεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο της μετρητικής διάταξης συμπεριλαμβανομένου και του καλωδίου με τον εξασθενητή, ενώ στο Σχήμα 4β παρουσιάζεται η μοντελοποίησή της μετρητικής διάταξης με χρήση δίθυρων.



Σχήμα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης και ισοδύναμο κύκλωμα της με χρήση δίθυρων [10]

Για τον πίνακα του στόχου ισχύει:

$$P_{target} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_2 \cdot \Omega \\ \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{\Omega} & 1 + \frac{R_2}{R_1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ενώ για τον πίνακα του καλωδίου [10]:

$$P_{cable} = \begin{bmatrix} A'' & B'' \\ C'' & D'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+d^2}{2 \cdot d} & \frac{25}{d} \cdot (1-d^2) \cdot \Omega \\ \frac{1-d^2}{100 \cdot d} \cdot \frac{1}{\Omega} & \frac{1+d^2}{2 \cdot d} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

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

Για να βρούμε τον συνολικό πίνακα του κυκλώματος αρκεί να πολλαπλασιασθούν οι πίνακες των (5) και (6). Αντικαθιστώντας τις τιμές $R_1=2,018\Omega$, $R_2=48,964\Omega$ και $d = 0,1$ προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = P_{target} \cdot P_{cable} \approx \begin{bmatrix} 9,8974 & 494,7682 \\ 5,0034 & 250,2174 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Χρησιμοποιώντας την (7) βρίσκεται το ρεύμα της εκφόρτισης:

$$I_{ESD} = \left(C + \frac{D}{50\Omega}\right) \cdot V_{out} \Rightarrow I_{ESD} = 10,0077 \cdot V_{out} \quad (8)$$

Απλή σύγκριση της (4) με την (8) καταδεικνύει ότι, οι δύο τρόποι ανασύνθεσης του ρεύματος δίνουν αποτελέσματα διαφέροντα κατά 0,004%. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι οι δύο τρόποι είναι ισοδύναμοι. Η διαφορά που προκύπτει αποδίδεται στο ότι στον δεύτερο τρόπο υπολογισμού λήφθηκε υπόψη και το καλώδιο που χρησιμοποιείται για την μεταφορά του σήματος. Για αυτό το λόγο, ο δεύτερος τρόπος είναι και ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού.

ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το probe που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μετράει την παράγωγο της διηλεκτρικής μετατόπισης dD/dt σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_0 = 10 \cdot R \cdot A_{eq} \cdot \frac{dD}{dt} = R \cdot A_{eq} \cdot \frac{d(\epsilon_0 \cdot E)}{dt} \quad (9)$$

$$A_{eq} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (10)$$

όπου V_0 είναι η έξοδος του probe (σε V), A_{eq} η ισοδύναμη επιφάνεια του (σε m^2), r η ακτίνα του σφαιρικού probe και R η αντίσταση των 50Ω για την προσαρμογή με το ομοαξονικό καλώδιο. Επίσης ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού η τιμή της οποίας είναι $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{Cb}^2/\text{Nm}^2$. Ο συντελεστής 10 στην εξίσωση (9) προέρχεται από τη χρήση του εξασθενητή.

Μετά από ολοκλήρωση της εξίσωσης (9) με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab προκύπτει το ζητούμενο ηλεκτρικό πεδίο E .

ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το probe για τη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, μετράει την παράγωγο dB/dt σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_0 = 10 \cdot A_{eq} \cdot \frac{dB}{dt} \quad (11)$$

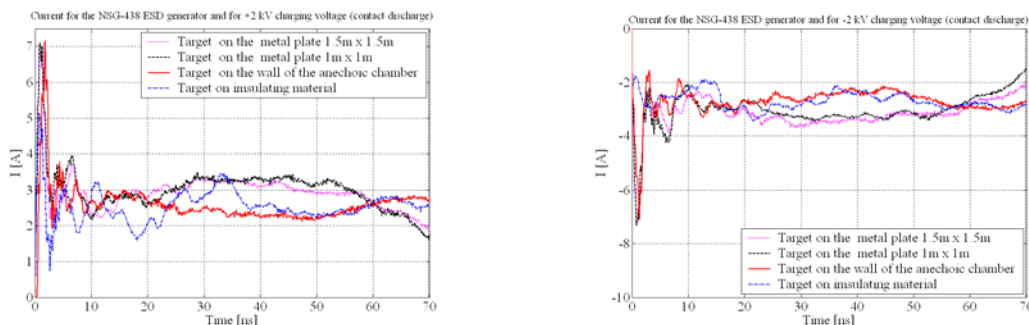
$$A_{eq} = \pi \cdot r^2 \quad (12)$$

όπου V_0 είναι η έξοδος του probe (σε V), A_{eq} η ισοδύναμη επιφάνεια του (σε m^2), r η ακτίνα του κυκλικού probe. Επίσης μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η τιμή της οποίας είναι $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$. Ο συντελεστής 10 στην εξίσωση (11) προέρχεται από τη χρήση του εξασθενητή. Από την (11) με ολοκλήρωση υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρηση ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Το ρεύμα εκφόρτισης επαφής για τη γεννήτρια NSG-438 για τάση φόρτισης τα ± 2 kV και για διάφορες βάσεις τοποθέτησης του ομοαξονικού προσαρμοστή φαίνεται στο Σχήμα 5. Στον Πίνακα II 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 I από το Πρότυπο.



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

Πίνακας II: Τιμές των 4 βασικών παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης ± 2 kV (εκφορτίσεις επαφής)

α/α		Εκφορτίσεις επαφής στα +2 kV				Εκφορτίσεις επαφής στα -2 kV			
		t_r	I_{max}	I_{30}	I_{60}	t_r	I_{max}	I_{30}	I_{60}
1	Περίπτωση 1 (μεταλλική πλάκα 1,5 x 1,5 m ²)	0,73	6,96	3,25	2,48	0,71	-7,55	-3,56	-2,55
2	Περίπτωση 2 (μεταλλική πλάκα 1 x 1 m ²)	0,71	7,09	3,30	2,59	0,70	-7,30	-3,25	-2,59
3	Περίπτωση 3 (μεταλλική πλάκα 36 x 36 cm ² , επί της παράπλευρης επιφάνειας του ανηχοϊκού θαλάμου)	1,19	7,16	2,54	2,61	1,20	-7,06	-2,68	-2,85
4	Περίπτωση 4 (μονωτικό υλικό)	0,68	5,13	2,80	2,65	1,89	-3,01	-2,90	-2,90

Στις εκφορτίσεις αέρος το μήκος του παραγόμενου ηλεκτρικού τόξου έχει διαφορετικό μήκος κάθε φορά, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την ταχύτητα προσέγγισης της γεννήτριας. Για αυτό άλλωστε η επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων γίνεται σύμφωνα με το υπάρχον Πρότυπο μόνο για εκφορτίσεις επαφής.

Για τις εκφορτίσεις επαφής στα ± 2 kV συμπεραίνεται ότι όσο πιο αγωγίμη είναι η μεταλλική πλάκα (μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής), όπου ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος, τόσο μικρότερος ο χρόνος ανόδου, παρ' όλο που στις περιπτώσεις 1 και 2 είναι περίπου ο ίδιος. Επίσης στα +2 kV, 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 -2 kV. 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

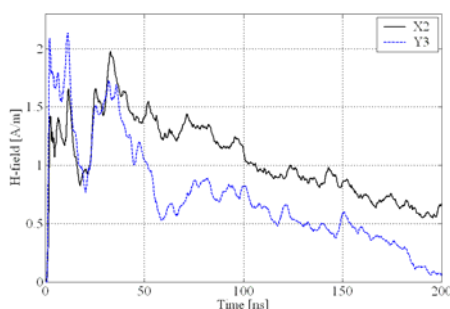
γείωσης της γεννήτριας, κάτι που εξηγεί την παρόμοια τιμή του για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις: στο πείραμα που περιγράφηκε καταβλήθηκε προσπάθεια, ώστε το ανάπτυγμα του καλωδίου γείωσης του πιστολιού να μην μεταβάλλεται.

Επίσης από τους Πίνακες I και II είναι εμφανές ότι, στις περιπτώσεις 1 και 2, όπου ο ομοαξονικός προσαρμοστής είναι τοποθετημένος πάνω στις μεταλλικές πλάκες με διαστάσεις $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$ και $1 \times 1 \text{ m}^2$ 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 $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$.

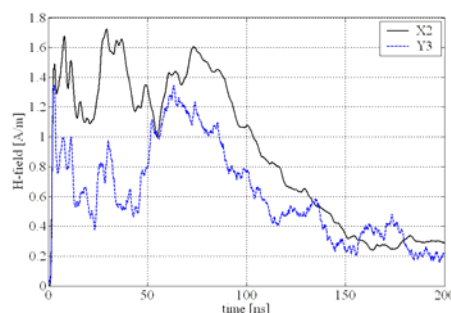
Μέτρηση μαγνητικού πεδίου

Κάποιος θα ανέμενε ότι οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο σε όλες τις κατευθύνσεις. Αντιθέτως, διαπιστώθηκε ότι για το ίδιο οριζόντιο επίπεδο, την ίδια τάση φόρτισης και την ίδια απόσταση, αλλά σε κάθετες κατευθύνσεις από τη γεννήτρια το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο ήταν διαφορετικό όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στην απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης στους άξονες X και Y, απέδειξαν ότι κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό μαγνητικό πεδίο.

Γεννήτρια NSG 433



Γεννήτρια NSG 438

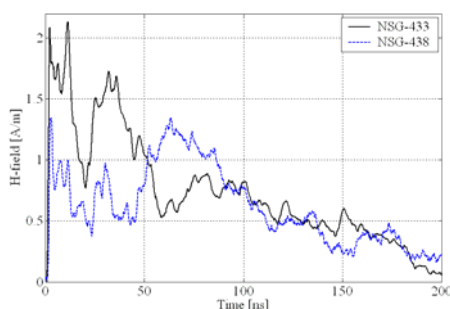


Σχήμα 6: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση 20 cm από το σημείο εκφόρτισης για δύο κάθετες άξονες.

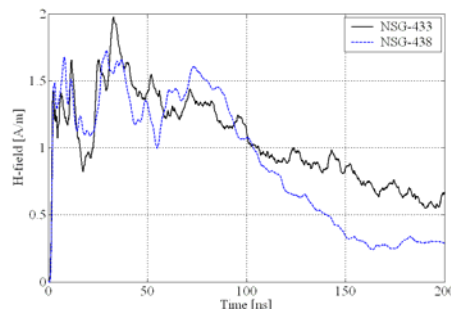
Συμπεράσματα

Το Σχήμα 7 απεικονίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου για τις δύο διαφορετικές γεννήτριες σε απόσταση 20 cm (άξονας X) για δύο διαφορετικές τάσεις φόρτισης ($\pm 2 \text{ kV}$). Η γεννήτρια NSG-433 παράγει υψηλότερο πεδίο στον άξονα X από αυτό της NSG-438.

Τάση φόρτισης = + 2 kV



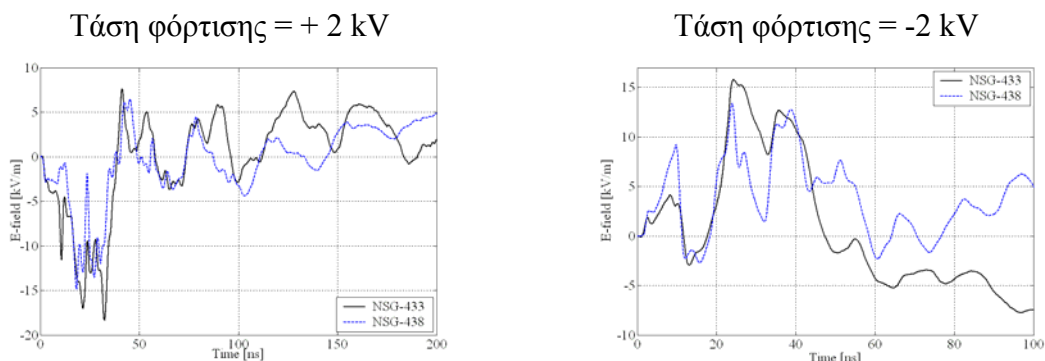
Τάση φόρτισης = -2 kV



Σχήμα 7: Σύγκριση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, 20 cm από το σημείο εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης $\pm 2 \text{ kV}$.

Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου

Στο Σχήμα 8 απεικονίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για τις δύο διαφορετικές γεννήτριες στα 20 cm (άξονας X) για δύο διαφορετικές τάσεις φόρτισης. Από τη σύγκριση των παραγόμενων ηλεκτρικών πεδίων παρατηρείται ότι όπως και στην περίπτωση των παραγόμενων μαγνητικών πεδίων η γεννήτρια NSG 433 παράγει υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο από αυτό της NSG 438.



Σχήμα 8: Σύγκριση έντασης ηλεκτρικού πεδίου στα 20 cm από το σημείο εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης ± 2 kV.

Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις που προηγήθηκαν για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Πρωτίστως πρέπει να σημειωθεί ότι η ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 είναι μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή από την αντίστοιχη της NSG-438. Η υψηλότερη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της γεννήτριας NSG-433 παρουσιάζεται, τόσο για θετικές, όσο και για αρνητικές τάσεις φόρτισης. Κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο στην ίδια απόσταση και στην ίδια κατεύθυνση. Αυτό το γεγονός θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι κάθε γεννήτρια έχει διαφορετικό κύκλωμα, το οποίο, ανάλογα με τη θωράκιση που έχει η συσκευή, παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο. Συνεπώς, λόγω του διαφορετικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που παράγεται από κάθε γεννήτρια δημιουργούνται διαφορετικές επαγόμενες τάσεις. Έτσι, ένα υπό εξέταση δοκίμιο μπορεί να περνάει τη δοκιμή με τη μια γεννήτρια και να αποτυγχάνει με μια άλλη. Επομένως καθίσταται αναγκαίο να υπάρξει στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου οδηγία προς τους κατασκευαστές, η οποία θα θέτει μέγιστα επιτρεπτά όρια για το παραγόμενο πεδίο και θα καθιστά δυνατή μια ομοιομορφία των γεννητριών ως προς το παραγόμενο από αυτές πεδίο.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η παρουσίαση της μεθόδου επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και ο αναλυτικός τρόπος ανασύνθεσης του ρεύματος εκφόρτισης, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης βρίσκεται σε διαφορετικές ως προς το υλικό και τις διαστάσεις βάσεις στήριξης. Εξετάστηκε αν οι κυματομορφές πληρούν τις προδιαγραφές του Προτύπου και αν όχι, κατά πόσο αποκλίνουν από αυτό. Επίσης, διερευνήθηκε το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.

Τα συμπεράσματα από τα παραπάνω πειράματα μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:
α) το γεγονός ότι κάθε γεννήτρια παράγει διαφορετικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, και, κατά

συνέπειαν, διαφορετικές επαγόμενες τάσεις στον υπό εξέταση εξοπλισμό, φανερώνει ότι, στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου [1], θα πρέπει να θεσπισθούν όρια και κανονισμοί για το παραγόμενο από τις ηλεκτροστατικές γεννήτριες ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και β) στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου [1], θα μπορούσε, πιθανότατα, να αποφευχθεί ο αυστηρός ορισμός των διαστάσεων (1,5 x 1,5 m²) της μεταλλικής επιφάνειας και να γίνει πιο ελαστικός [π.χ. να είναι ανεκτές διαστάσεις της (τετράγωνης) μεταλλικής επιφάνειας μεταξύ 1 x 1 m² και 1,5 x 1,5 m²], γεγονός που θα διευκόλυνε, σε πρακτικό επίπεδο, τα ασχολούμενα με τη συγκεκριμένη δοκιμή εργαστήρια.

Ευχαριστίες



Αυτή η εργασία χρηματοδοτήθηκε από το Εθνικό Ερευνητικό Πρόγραμμα, ΕΠΕΑΕΚ, Πυθαγόρας II, το οποίο συγχρηματοδοτείται κατά 75% από Ευρωπαϊκούς πόρους (European Social Fund) και κατά 25% από Εθνικούς πόρους.

Ο Υποψήφιος Διδάκτορας Γεώργιος Φώτης ευχαριστεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), για την οικονομική ενίσχυσή του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΛΟΤ EN 61000-4-2: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 2: Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Βασικό δημοσίευμα EMC.
- [2] Pommerenke D., “ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit”, Journal of Electrostatics, vol. 36, issue 1, November 1995, pp. 31-54.
- [3] Pommerenke D., Aidam M., “ESD: waveform calculation, field and current of human and simulator ESD”, Journal of Electrostatics, vol. 38, issues 1-2, October 1996, pp. 33-51.
- [4] Fujiwara O., Tanaka H., Yamanaka Y., “Equivalent circuit modeling of discharge current injected in contact with an ESD gun”, Electrical Engineering in Japan, vol. 149, no. 1, 2004, pp. 8-14.
- [5] Wilson P.F., Ma M.T., “Fields radiated by electrostatic discharges”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, February 1991, pp. 10-18.
- [6] Kim K., Lee K., Lee D., “Estimation of ESD current waveshapes by radiated electromagnetic fields”, IEICE Transactions on Communications, vol. E83-B, no. 3, March 2000, pp. 608-612.
- [7] Ishigami S., Gokita R., Nishiyama Y., Yokoshima I., Iwasaki T., “Measurements of fast transient fields in the vicinity of short gap discharges”, IEICE Transactions on Communications, vol. E78-B, no. 2, February 1995, pp. 199-206.
- [8] Theodore Dangelmayr, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [9] Kang T.W., Chung Y.C., Won S.H., Kim H.T., “On the uncertainty in the current waveform measurement of an ESD generator”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no. 4, November 2000, pp. 405-413.
- [10] Jean Sroka, “Recalculation of the discharge current from the oscilloscope reading applied by the Schaffner Calibration Laboratory in Luterbach”, Schaffner’s Technical Document.
- [11] Hilty K., Ryser H., Hermann U., “Calibration of electrostatic discharge generators and results of an international comparison”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 2, April 2001, pp. 414-418.