

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

Το νέο Πρότυπο 61000-4-2:2009 -Επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Γ. ΠΑΝΤΖΑΛΗΣ

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. **Επιβλέπων:** Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Αθήνα, Ιούλιος 2009



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



Το νέο Πρότυπο 61000-4-2:2009 -Επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Γ. ΠΑΝΤΖΑΛΗ

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Παύλος Σ. Κατσιβέλης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14 η Ιουλίου 2009.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π Περικλής Δ. Μπούρκας Καθηγητής Ε.Μ.Π Φραγκίσκος Β. Τοπαλής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2009

Βασίλειος Π. Πάντζαλης Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

"Ζήσε σαν να ήταν να πεθάνεις αύριο. Μάθε σαν να ήταν να ζεις για πάντα" *Mahatma Gandhi*

<u>Περίληψη</u>

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του παραγόμενου ρεύματος από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και των συνεπειών του, δόθηκε έμφαση στην παρουσίαση διεθνούς βιβλιογραφίας που ασχολείται με μετρήσεις σε πραγματικά συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όσο και του ανθρώπινου σώματος, καθώς και με τη μοντελοποίηση του φαινομένου.

Το Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 για την δοκιμή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ορίζει τα όρια για τις τέσσερις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης για συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. Επίσης, προτρέπει η κυματομορφή του ρεύματος να είναι εντός του $65\% \cdot I(t)$ και $135\% \cdot I(t)$, για χρόνο από 2 ns έως 60 ns, όπου το I(t) δίνεται από την αναλυτικό τύπο που ορίζει το Πρότυπο, προτροπή η οποία εξετάζεται επίσης.

Στην εργασία αυτή έγινε επαλήθευση τριών γεννητριών, που υπάρχουν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Εξετάστηκαν μέσα από σειρές μετρήσεων για τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 της Schaffner, και DITO της EM TEST, οι τιμές των παραμέτρων που ορίζει το Πρότυπο σε κάθετο επίπεδο διακρίβωσης. Επίσης, το Πρότυπο προσπαθώντας να επιτύχει υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας, εισάγει την έννοια της αβεβαιότητας των μετρήσεων θέτοντας κάποια όρια για αυτή. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες τύπου Α και Β των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και ελέγχθηκαν αν βρίσκονται εντός ορίων.

Τέλος, παρουσιάζεται η τεχνική οδηγία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σκοπός της οποίας είναι να περιγράψει τη διαδικασία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο.

<u>Λέξεις κλειδιά</u>

Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κατακόρυφο γειωμένο επίπεδο διακρίβωσης, επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, εξίσωση ρεύματος Heidler, επαναληψημότητα γεννητριών, αβεβαιότητα.

Abstract

This diploma thesis attempts to evaluate the discharge current generated by electrostatic discharge (ESD) generators. For the better understanding of the electrostatic discharge phenomenon and its consequences, it has been given emphasis to the presentation of the bibliography that has to do with measurements in real electrostatic discharge events of generators and human bodies, and to the modelling of the phenomenon.

The EN 61000-4-2:2009 Standard for ESD defines the acceptable values of the four parameters of the discharge-current waveshape for the specific experimental setup. Moreover, the Standard recommends that the discharge-current waveshape be between $65\% \cdot I(t)$ and $135\% \cdot I(t)$, for the time interval from 2ns to 60ns, where I(t) is defined by the analytical formula included in the Standard. This recommendation was also checked.

Three ESD generators, which are available in the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens, are being verified in the present diploma thesis. The parameter values of Schaffner's ESD generators, models NSG-433, NSG-438 and EM TESTS' ESD generator, model DITO were tested through series of measurements. The previous measurements took place with the current transducer (Pellegrini Target) placed on the center of a vertical grounded calibration plane. Additionally, the Standard tries to increase the level of reliability by introducing the concept of uncertainty and by defining the acceptable limits of it. This parameter was also checked.

Finally, in the present diploma thesis is presented the technical protocol according to which the verification of the electrostatic discharge generators is done.

Key words

EN Standard 61000-4-2:2009, electrostatic discharge, current transducer, ESD current, upright grounded plane, verification of ESD generators, Heidler's equation, generators' repeatability, uncertainty.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΝ	TENA		Σελίδα i
ΠΡΟΛΟΓΟ	Σ		iii
КЕФАЛАІ	0 1	Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση	
1.1	Περί ηλ	λεκτρομαγνητικής συμβατότητας	1
1.2	Η ηλεκ	τροστατική φόρτιση	3
	1.2.1	Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	3
	1.2.2	2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	6
1.3	Ηλεκτρ	ροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και	
	μέτρα 2	προστασίας	7
	1.3.1	Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	7
	1.3.2	2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού	
		εξοπλισμού	8
1.4	Μοντέ	λα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	9
	1.4.1	Γενικά	9
	1.4.2	2 Αξιολόγηση του Human Body Model	11
КЕФАЛАІ	0 2	Πρότυπο EN 61000-4-2:2009	
2.1	Επισκά	σπηση του Προτύπου EN 61000-4-2:2009	13
2.2	Αλλαγ	ή και παρουσίαση Προτύπου	13
КЕФАЛАІ() 3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	
3.1	Εισαγα	ογή	20
3.2	Προσο	μοιώσεις	21
3.3	Μετρή	σεις	29
3.4	Κυκλω	ρματικά μοντέλα	42
	3.4.1	Κυκλωματικό μοντέλο που προτείνεται στο Πρότυπ	o 42
	3.4.2	2. Κυκλωματικά μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρία	43
	3.4.3	Β Κυκλωματικό μοντέλο του Nobuo Murota	45

КЕФАЛАІС) 4	Πειραματική διάταξη	
4.1	Εισαγωγή		42
4.2	Ο εξοπλισμ	ός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων	42
4.3	Περιγραφή	πειραματικής διάταξης	42
	4.3.1	Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	49
	4.3.1.1	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433	49
	4.3.1.2	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438	51
	4.3.1.3	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO	54
	4.3.2	Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης	55
	4.3.3	Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας	57
	4.3.4	Εξασθενητής	57
	4.3.5	Παλμογράφος	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ	5	Επαλήθευση γεννητριών
	U	

5.1	Εισαγωγή	59
5.2	Παρουσίαση του αλγόριθμου	59
5.3	Μεθοδολογία	61
5.4	Γραφικές παραστάσεις	63
5.5	Μετρήσεις για την επαλήθευση των γεννητριών NSG-433, NSG-	
	438 και DITO σε τάσεις φόρτισης ±2 kV, ±4 kV, ±6 kV, ±8 kV	124
5.6	Εισαγωγή στην αβεβαιότητα των μετρήσεων	133
5.7	Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου Α	134
5.8	Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου Β	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ	6	Η επόμενη μέρα	152
ПАРАРТНМА		Οδηγία εργασίας	153
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙ	4		174

<u>Πρόλογος</u>

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Πάντζαλη Βασίλειου για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η αξιολόγηση της λειτουργίας των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για αυτό το λόγο, εκτελέσθηκαν εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433, NSG-438 και DITO, σε δοκίμιο τοποθετημένο σε κατακόρυφη θέση υπό τάση φόρτισης ±2 kV, ±4 kV, ±6 kV και ±8 kV, και ελήφθησαν μετρήσεις. Με τη βοήθεια ενός προγράμματος σε περιβάλλον Matlab επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις και αξιολογήθηκαν οι παράμετροί τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΝ 61000-4-2:2009. Επιπροσθέτως, υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες τύπου Α και Β των μετρήσεων και ελέγχθηκε αν βρίσκονται εντός των ορίων του Προτύπου. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο και συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται κάποια γενικά στοιχεία για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί, που θα μας επιτρέψουν να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο που θα εξετάσουμε. Επίσης αναφερόμαστε στους τρόπους με τους οποίους δημιουργείται η ηλεκτροστατική φόρτιση και στα μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν προκειμένου να προστατεύσουμε τον ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό μας.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το διεθνές Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 καθώς και οι αλλαγές που έγιναν σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση ΕΝ 61000.04.02:1996. Επίσης δίνονται ορισμοί διαφόρων σημαντικών όρων που περιέχονται σε αυτό. Στο Πρότυπο ορίζονται: η τυπική κυματομορφή του ρεύματος, τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής, τα όρια μέσα στα οποία πρέπει να βρίσκονται οι τέσσερις παράμετροι του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και οι αβεβαιότητες τύπου Α και Β των μετρήσεων, ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός και η διαδικασία των δοκιμών που πρέπει να ακολουθείται κάθε φορά.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, σχετικά με το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και των συνεπειών του, δόθηκε έμφαση στην παρουσίαση διεθνούς βιβλιογραφίας που ασχολείται με μετρήσεις σε πραγματικά συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όσο και του ανθρώπινου σώματος, καθώς και με τη μοντελοποίηση του φαινομένου.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη, καθώς και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Δίνονται σχήματα και τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών NSG-433, NSG-438 και DITO και των σημαντικών μερών της όλης διάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε, και υλοποιήθηκε σε γλώσσα Matlab με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος που παράγει καθεμιά από τις τρεις γεννήτριες (NSG-433, NSG-438, DITO) κατά την επαλήθευσή τους σύμφωνα με τα όρια που ορίζει για αυτές το Πρότυπο. Επίσης υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες τύπου A και B των μετρήσεων και εξετάσθηκε αν βρίσκονται μέσα στα όρια που ορίζει το Πρότυπο. Τέλος εξετάσθηκε η προτροπή του Προτύπου να βρίσκεται η κυματομορφή του ρεύματος εντός του 65%·*I*(t) και 135%·*I*(t), για χρόνο από 2 ns έως 60 ns, όπου το *I*(t) δίνεται από την αναλυτικό τύπο που ορίζει το Πρότυπο.

Στο **Κεφάλαιο 6** σύμφωνα με την κατεύθυνση έρευνας που ανακύπτει μέσα από την παρούσα εργασία, αναφέρεται το επόμενο βήμα από αυτήν που είναι η περαιτέρω μελέτη των χαρακτηριστικών των παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (t_r , I_{max} , I_{30} , I_{60}), καθώς και των χαρακτηριστικών των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με σκοπό την μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζεται η τεχνική οδηγία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σκοπός της οποίας είναι να περιγράψει τη διαδικασία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο.

Θα ήθελα εδώ να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για τις άριστες συνθήκες που υπάρχουν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

iv

Τον κ. Παύλο Σ. Κατσιβέλη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τη συνεργασία, τη βοήθεια, την υπομονή και τον πολύ χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τον Δρ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που ήταν πάντα κοντά στην παρούσα εργασία, και έδωσε λύσεις σε κρίσιμα σημεία.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου, για την υποστήριξη και την συμπαράστασή τους.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.1 Περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό την εξέταση της δυνατότητας αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο.

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι τα επόμενα χρόνια θα αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας. Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξη τους.

Σύμφωνα με το ΙΕΕΕ [1]: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (ΕΜC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης μιας συσκευής ή ενός συστήματος, να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε το/την περιβάλλει. Είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

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

Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility) είναι η αδυναμία μίας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της

ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

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

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

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

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

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

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

Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μία αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών. Συνεπώς, η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση

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

1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια γίνεται φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.



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

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. 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).

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

Πίνακας 1.1: Τριβοηλεκτρική σειρά

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

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

Συντελεστές παραγωγής της φόρτισης			Συντελεστές εκφόρτισης		
•	Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική	٠	Αγωγιμότητα των υλικών		
	σειρά	٠	Σχετική υγρασία		
•	Επιφάνεια επαφής	٠	Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών		
•	Συντελεστής τριβής μεταξύ των	٠	Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του		
	υλικών	٠	υλικού		
•	Βαθμός διαχωρισμού				

Πίνακας 1.2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

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 στο 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.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών φαίνονται στον Πίνακα 1.3. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

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. Με δεδομένο ότι η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα άπαξ εμφανιζόμενο (μοναδιαίο) φαινόμενο, με διάρκεια μικρό κλάσμα του μs, επομένως, κατά τη διάρκεια του φαινομένου, αποκλείεται εκ των πραγμάτων η οποιαδήποτε επέμβαση στις παραμέτρους του παλμού, είναι απαραίτητος ο σαφής και εκ των προτέρων καθορισμός των παραμέτρων του τυπικού παλμού ρεύματος.

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

1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

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

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



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

1.3 Ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και

μέτρα προστασίας

1.3.1 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

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

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη

λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.

- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

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

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού. Άρα για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου, είναι επιβεβλημένη η θωράκιση και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγώγιμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [6] με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [7] ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των 107 Ω και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

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

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

• Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

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

1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

1.4.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να εκτιμηθεί η επίδραση που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2, 6, 8]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model – HBM), το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM). Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών.



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (a) HBM, (b) MM,(c) CDM, και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [6]

Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από της δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα. 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 πυκνωτή ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_C και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

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

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

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

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

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD}C_{ESD}a^2 t e^{-\alpha t}, \ \gamma t \alpha \ a = \omega_0$$
(1.4)

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

ταλάντωσης.

Παράμετρος	HBM	ММ	CDM
$V_{\scriptscriptstyle ESD}$	4000 V	200 V	500 V
$R_{\scriptscriptstyle HBM}/R_{\scriptscriptstyle MM}/R_{\scriptscriptstyle CDM}$	1.5 kΩ	5 Ω	10 Ω
$C_{\scriptscriptstyle ESD}$	100 pF	200 pF	10 pF
L_s	5000 nH	750 nH	750 nH
R	10 Ω	10 Ω	10 Ω
$I_{\scriptscriptstyle ESD}$	2.6 A	2.8 A	10.4 A
t _{rise} (10%/90%)	\approx 7 ns	$\approx 11 \text{ ns}$	\approx 0,3 ns
a	1,5 x 108 s ⁻¹	0,1 x 108 s ⁻¹	10 x 108 s ⁻¹
ω _θ	0,5 x 108 s ⁻¹	0,8 x 108 s ⁻¹	30 x 108 s ⁻¹

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

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

1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model

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



Σχήμα 1.4: Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρωπίνου σώματος

Μια ανάλυση των αποτελεσμάτων από μετρήσεις που έχουν ληφθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν κάποιες τιμές για τα στοιχεία του κυκλώματος. Η

αντίσταση της επιδερμίδας R είναι περίπου 150 Ω έως 1000 Ω (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ), η ανθρώπινη χωρητικότητα κυμαίνεται από 50 pF έως 250 pF, ενώ βρέθηκαν τάσεις πάνω από 15 kV υπολογισμένες με το καθιερωμένο μέγεθος και τη χωρητικότητα του ανθρώπου. Η κυματομορφή της εκφόρτισης βρέθηκε να είναι πολύ διαφορετική από άνθρωπο σε άνθρωπο και επίσης από μέτρηση σε μέτρηση.



Σχήμα 1.5: Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)

<u>Κεφάλαιο</u> 2

Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009

2.1 Επισκόπηση του Προτύπου EN 61000-4-2:2009

Το Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3] πραγματεύεται την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το διεθνές αυτό Πρότυπο σχετίζεται με την ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκκενώσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης.

Σε αυτό καθορίζονται:

- Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος
- Τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής
- Ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός
- Η διαδικασία των δοκιμών

2.2 Αλλαγή και παρουσίαση Προτύπου

Το Διεθνές Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3] ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία η δοκιμή του Προτύπου [3] αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο [3] βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Σύμφωνα με το Πρότυπο [3], αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c (50-100 MΩ), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s (150 pF ± 10%) και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος (330 Ω ± 10%). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο αναφοράς της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι η εκφόρτιση

ανθρώπου-μετάλλου. Γι΄ αυτό το λόγο όταν ένας άνθρωπος κρατάει ένα κομμάτι μετάλλου, το δέρμα επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα εκφόρτισης. Συνεπώς, όταν λάβει χώρα μία εκφόρτιση το τόξο θα προσπέσει στο μέταλλο και όχι στο δέρμα. Προφανώς R_d είναι η συνολική αντίσταση της επιδερμίδας και όχι μόνο της περιοχής κοντά στο σημείο της εκφόρτισης. Η τιμή της χωρητικότητας C_s είναι αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος, ενώ επιλέχθηκε η τιμή των 330 Ω για την R_d .



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3]



Σχήμα 2.2: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4 kV [3]

Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.2, μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Κατά την επαλήθευση των γεννητριών σύμφωνα με το Πρότυπο [3] πρέπει να ελέγχονται τα όρια τεσσάρων βασικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος:

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

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

Ρεύμα στα 30 ns (I₃₀): Η τιμή του ρεύματος 30 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Ρεύμα στα 60 ns (I₆₀): Η τιμή του ρεύματος 60 ns μετά την χρονική στιγμή, που παρουσιάζεται για πρώτη φορά κατά τη φάση ανόδου το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

Στο Πρότυπο ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ΕΝ 61000-4-2:2009 [3] έχουν γίνει κάποιες αλλαγές σε σχέση με το Πρότυπο ΕΝ 61000.04.02:1996 [10]. Η πρώτη αλλαγή εντοπίζεται στις προδιαγραφές που πρέπει να πληρεί η υπό εξέταση γεννήτρια. Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται οι προδιαγραφές αυτές του ρεύματος εκφόρτισης καθώς και τα περιθώρια απόκλισής τους.

Αναγραφόμενη τάση (kV)	Μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης ±15% (A)	Χρόνος ανόδου t _r ±25% (ns)	Ρεύμα ±30% στα 30 ns (A)	Ρεύμα ±30% στα 60 ns (A)
2.0	7.5	0.8	4.0	2.0
4.0	15.0	0.8	8.0	4.0
6.0	22.5	0.8	12.0	6.0
8.0	30.0	0.8	16.0	8.0

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [3]

Η ανοχή της πρώτης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης αυξήθηκε από $\pm 10\%$ σε $\pm 15\%$. Επίσης ο χρόνος ανόδου κυμαίνονταν από 0.7 έως 1 ns ενώ τώρα κυμαίνεται από 0.6 έως 0.1 ns αφού η ανοχή του χρόνου ανόδου έχει γίνει $\pm 25\%$.

Η αντίστοιχη κυματομορφή του προηγούμενου Προτύπου [10] φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Τυπική κυματομορφή του ρεύματος εξόδου μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το παλιό Πρότυπο [10]

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 2.2 και 2.3 η καινούργια κυματομορφή είναι πολύ πιο ομαλή, ευκρινέστερη και αναλυτική καθώς οι άξονες της είναι αριθμημένοι.

Επίσης, το Πρότυπο [3] προτρέπει η κυματομορφή του ρεύματος να είναι εντός του $\pm 35\% \cdot I(t)$, για χρόνο από 2 ns έως 60 ns, όπου το I(t) δίνεται από την εξίσωση(2.1), προτροπή που δεν υπήρχε μέχρι τώρα..

$$I(t) = \frac{I_1}{k_1} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \cdot \exp(-t/\tau_2) + \frac{I_2}{k_2} \cdot \frac{(t/\tau_3)^n}{1 + (t/\tau_3)^n} \cdot \exp(-t/\tau_4)$$
(2.1)

όπου

$$k_{1} = \exp\left[-\frac{\tau_{1}}{\tau_{2}}\left(\frac{n\tau_{2}}{\tau_{1}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$
$$k_{2} = \exp\left[-\frac{\tau_{3}}{\tau_{4}}\left(\frac{n\tau_{4}}{\tau_{3}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$

και

 τ_1 =1.1 ns; τ_2 =2 ns; τ_3 =12 ns; τ_4 =37 ns; I_1 =16.6 A; I_2 =9.3 A; n=1.8

Η απαιτούμενη κυματομορφή που ορίζει το Πρότυπο [3] για την έξοδο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται επίσης και οι συναρτήσεις *I*(*t*)·135% και *I*(*t*)·65%.



Σχήμα 2.4: Καμπύλη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάση φόρτισης +4 kV

Μια άλλη τροποποίηση που έγινε είναι ότι αντί να προσδιορίζουμε τις απώλειες του ομοαξονικού στόχου, προσδιορίζουμε τις απώλειες της μετρητικής αλυσίδας που αποτελείται από τον στόχο, τον εξασθενητή ο οποίος, σε αντίθεση με το προηγούμενο Πρότυπο [10], είναι προσαρμοσμένος πάνω στον στόχο και το ομοαξονικό καλώδιο. Έτσι απλοποιείται ο χαρακτηρισμός του μετρητικού συστήματος καθώς μόνο η μετρητική αλυσίδα και ο παλμογράφος χρειάζονται να χαρακτηριστούν και όχι κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

Η επαλήθευση μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι εξαιρετικά σημαντική. Ιδίως στην περίπτωση διεξαγωγής δοκιμών χρησιμοποιώντας γεννήτριες διαφορετικών κατασκευαστών. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την επαλήθευση μιας γεννήτριας, σύμφωνα με το Πρότυπο [3], είναι:

- Παλμογράφος με επαρκές φάσμα συχνοτήτων (≥2 GHz).
- Μετρητική αλυσίδα που περιλαμβάνει τον ομοαξονικό στόχο, τον εξασθενητή και το ομοαξονικό καλώδιο.
- Βολτόμετρο το οποίο είναι ικανό να μετρήσει τάση τουλάχιστον 15 kV.

- Κάθετο επίπεδο διακρίβωσης με τον ομοαξονικό στόχο τοποθετημένο κατάλληλα έτσι ώστε να απέχει τουλάχιστον 0.6 m από οποιαδήποτε κορυφή του επιπέδου.
- Εξασθενητή με επαρκή ισχύ.

Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η διάταξη για την βαθμονόμηση της γεννήτριας [3].



Σχήμα 2.5: Διάταξη για την διακρίβωση της γεννήτριας [3]

Μια άλλη αλλαγή που έχει γίνει είναι ότι η γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, στης οποίας το κέντρο βρίσκεται τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης δεν είναι σε οριζόντια διάταξη, αλλά σε κατακόρυφη και αυτό γιατί με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η καλύτερη επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.5 ο στόχος τοποθετείται στο κέντρο του επιπέδου, και το σημείο γείωσης βρίσκεται σε κάθετη απόσταση 0.5 m από το στόχο. Το καλώδιο της γείωσης είναι τραβηγμένο προς τα πίσω από το μέσο του σχηματίζοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο. Τέλος η γεννήτρια στηρίζεται πάνω σε ένα τρίποδο και θα πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα τροφοδοτείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αξίζει να σημειωθεί ότι καμία από τις παραπάνω λεπτομέρειες σχετικά με την επαλήθευση της γεννήτριας δεν αναφέρονταν στο προηγούμενο Πρότυπο [10].

Τέλος το Πρότυπο [3] προσπαθώντας να επιτύχει υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας, εισάγει την έννοια της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να

κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: Τις αβεβαιότητες Τύπου Α, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους και τις αβεβαιότητες Τύπου Β, που υπολογίζονται με άλλα μέσα.

Η αβεβαιότητα τύπου Α προκύπτει από την τυπική απόκλιση (standard deviation) μιας σειράς δοκιμών. Συνήθως ακολουθεί την κανονική κατανομή ή την κατανομή Gauss. Υπολογίζεται από τον τύπο 2.2

$$U_{C}(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} (u_{j} - \overline{u})^{2}}$$
(2.2)

Η αβεβαιότητα τύπου Β, η οποία γενικά σχετίζεται με αστοχίες, απώλειες καλωδίου και μη γραμμικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, αν και δεν προκύπτει από κάποια στατιστική επεξεργασία, μπορεί να υπολογιστεί από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης, δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις, χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης ή απλά μέσα από την εμπειρία και τις επιστημονικές γνώσεις του μετρολόγου. Η αβεβαιότητα προκύπτει από την εφαρμογή του διαιρέτη στην κατανομή πιθανότητας. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι 95%, η τιμή του συντελεστή k για την κανονική κατανομή είναι 2, στην περίπτωση της ορθογώνιας κατανομής είναι √3 και στην περίπτωση της κατανομής μορφής U είναι √2.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δυο τύπων αβεβαιότητας. Σύμφωνα με το Πρότυπο [3] για εργαστήρια τα οποία διεξάγουν διακριβώσεις συνιστώνται τα ακόλουθα όρια αβεβαιότητας:

Χρόνος ανόδου t _r	$MU \leq 15\%$
Κορυφή του ρεύματος Ι _p	$MU \le 7\%$
Ρεύμα στα 30 ns I_{30}	$MU \leq 7\%$
Ρεύμα στα 60 ns I_{60}	$MU \leq 7\%$

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής θα παρουσιαστούν μετρήσεις κατά την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών που εκτός από τον έλεγχο των τεσσάρων παραμέτρων περιλαμβάνει και τον έλεγχο των αβεβαιοτήτων.

<u>Κεφάλαιο</u>

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, σχετικά με το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Δόθηκε έμφαση στην παρουσίαση διεθνούς βιβλιογραφίας που ασχολείται με μετρήσεις σε πραγματικά συμβάντα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, τόσο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όσο και του ανθρώπινου σώματος, καθώς και με τη μοντελοποίηση του φαινομένου.

Με τη βοήθεια των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται εύκολη η σύγκριση μεταξύ της πραγματικής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ανθρώπων ή μηχανών) και των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει ότι, εργασίες διάφορων ερευνητών καταλήγουν σε διαφορετικές τιμές για τα μεγέθη, που συμβατικά θεωρείται ότι χαρακτηρίζουν το φαινόμενο, από αυτές που έχουν καθιερωθεί [3]. Οι παράμετροι έχουν να κάνουν με την κυματομορφή του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και είναι [3]:

- *I_p*: Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης.
- *I*₃₀: Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 30 nsec μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή *I_p*·10%.
- *I*₆₀: Η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης 60 nsec μετά τη χρονική στιγμή που το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά την τιμή *I_p*·10%.
- t_r: Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή I_p·10% μέχρι τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει για πρώτη φορά την τιμή I_p·90%.

Επιπλέον, παρουσιάζονται μετρήσεις και άλλων παραμέτρων που έχουν σχέση με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, πλην των τεσσάρων βασικών, καθώς επίσης και ο μετρητικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος, παρουσιάζονται κυκλωματικά μοντέλα που έχουν προταθεί κατά καιρούς από ερευνητές για την προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

3.2 Προσομοιώσεις

Οι E. Okoniewska, M. A. Stuchly και M. Okoniewski στο άρθρο τους [11] προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν την επίδραση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο ανθρώπινο σώμα μέσω της τεχνικής FDTD (finite difference time domain method) και ενός ανισοτροπικού μοντέλου του σώματος. Η σχετική διάταξη αποτελείται από ένα ετερογενές μοντέλο ανθρώπου το δάχτυλο του οποίου δείχνει προς ένα παραλληλεπίπεδο υπό κατάλληλη γωνία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Σενάριο που αντιπροσωπεύει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση μεταξύ ενός απομονωμένου μεταλλικού αντικειμένου (γαλαζοπράσινο) και του ανθρώπινου σώματος ισταμένου επί του εδάφους. Η κόκκινη γραμμή παρουσιάζει την τοποθέτηση των υπολογιστικών ορίων. Το άτομο στέκεται κατά μήκος του z-άζονα και δείχνει προς την y-κατεύθυνση [11]

Το ανθρώπινο σώμα έχει ύψος 1,76 m και βάρος 76 kg. Ο υπολογιστικός χώρος που φαίνεται με κόκκινο στο Σχήμα 3.8 έχει διαστάσεις 126,36 cm ×135.54 cm ×210,06

cm. Το μεταλλικό κουτί έχει τις διαστάσεις 54 cm (πλάτος) ×18,36 cm (πάχος) ×167,94 cm (ύψος). Η απόσταση μεταξύ του δαχτύλου και του κουτιού είναι 10,8 mm.

Ένας κατάλληλα τροποποιημένος κώδικας FDTD χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί η έγχυση ρεύματος στα αγώγιμα αντικείμενα και να λάβει τη κατανομή του στη μόνιμη κατάσταση. Οι υπολογισμοί των συγγραφέων έδειξαν ότι, η χωρητικότητα του ανθρώπινου σώματος περιορίζει το φασματικό περιεχόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στα περισσότερα μέλη του σώματος σε συχνότητες δεκάδων MHz. Μόνο πολύ κοντά στο δάχτυλο, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η ηλεκτροστατική εκφόρτιση, κάποιο μέρος της ενέργειας εντοπίζεται στις υψηλότερες συχνότητες (μέχρι περίπου 1 GHz). Γενικά, ένα ανθρώπινο σώμα με τη κατανεμημένη του χωρητικότητα, λειτουργεί όπως ένα βαθυπερατό φίλτρο. Τέλος, απέδειξαν ότι, ακόμα και για παλμούς ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεγάλης, σχετικά, ενέργειας, τα ανθρώπινα όργανα και ιστοί δεν κινδυνεύουν από τα εκπεμπόμενα πεδία. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η ενέργεια που μεταφέρεται σε διάφορα μέρη του ανθρωπίνου σώματος.



Σχήμα 3.2: Μεταφερόμενη ενέργεια σε μέρη του ανθρωπίνου σώματος [11]

Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται το ρεύμα που ρέει σε διάφορα μέρη του ανθρωπίνου σώματος κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως και το συνολικό ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 3.3: Ρεύμα σε διάφορα μέρη του ανθρωπίνου σώματος κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, παρουσιάζεται επίσης και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (excitation) [11]

Οι ίδιοι ερευνητές παρατήρησαν ότι, οι επιμέρους ιστοί έχουν διαφορετική αγωγιμότητα και αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Πυκνότητα ρεύματος A/m^2 στο ανθρώπινο σώμα κατά τη διάρκεια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (το ανθρώπινο σώμα θεωρείται, εκάστοτε, σε τομή): (a) μέσα από το κέντρο του σώματος y=47 cm και t=37,1 ns, (b) μέσα από το κέντρο του σώματος x=61 cm και t=30,9ns (c) μέσα από τους γοφούς z=86 cm και t=31,2 ns (d) μέσα από το δεξί χέρι x=86,2 cm και t=35,6 ns (e) μέσα από τα γόνατα z=45 cm και t=33,9 ns [11]

Στο Σχήμα 3.5 μπορούμε να δούμε τη χωρική κατανομή της αποροφούμενης ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα, σε διάφορες τομές, στο τέλος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 3.5: Χωρική κατανομή της απορροφούμενης ακτινοβολίας από το ανθρώπινο σώμα, σε διάφορες τομές, στο τέλος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. (a) μέσα από το κέντρο του σώματος x=61,02 cm (b) μέσα από το δεζί χέρι x=86,2 cm (c) μέσα από το κέντρο του σώματος y=46,44 cm (d) μέσα από τους ώμους z=130,14 cm (e) μέσα από τον κορμό z=95,58 (f) μέσα από τα πόδια z=1,62 cm [11]

Άρθρο της **Concettina Buccella** [12] προτείνει ένα ηλεκτρικό ανάλογο με το οποίο προσομοιώνει τις εξισώσεις του Maxwell σε διαφορική μορφή και να αναλύσει το πρόβλημα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πάνω σε σύνθετα υλικά. Το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από αγωγιμότητες, αυτεπαγωγές, και χωρητικότητες, των
οποίων οι τιμές συσχετίζονται με τα φυσικά χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού. Δίνοντας τις εξής τιμές C=4 pF, R=20 Ω και L=10 nH, και για τάση V=500 V, η συγγραφέας υπολόγισε ότι I_p =7.8 A, t_r =0.35 ns. Το Σχήμα 3.6 δείχνει το χρησιμοποιηθέν κύκλωμα.



Σχήμα 3.6: Μοντέλο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε σύνθετο υλικό [12]

Η καταγραφείσα κυματομορφή φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Τυπικό ρεύμα εκφόρτισης, για V= 500 V, C= 4 pF, R= 20 Ω και L= 10 nH [12]

Οι Zhiyong Yuan. Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen και Rong Zeng αναφέρουν [13] ότι, οι περισσότερες γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχουν κατασκευαστεί για να ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές που αναφέρονται στο Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3], το οποίο διευκρινίζει λίγες από τις

παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος· υπενθυμίζεται ότι, αυτές είναι ο χρόνος ανόδου (*Rise Time*), η μέγιστη τιμή του ρεύματος (I_{max}), η τιμή του ρεύματος 30 nsec αφότου το ρεύμα έχει υπερβεί το 10% του I_{max} (I_{30}) και η τιμή του ρεύματος 60 nsec αφότου το ρεύμα έχει υπερβεί το 10% του I_{max} (I_{60}). Επίσης, αν και το HUMAN BODY MODEL διευκρινίζεται στο Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3], δεν ορίζεται ακόμα η μαθηματική περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος. Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να διαταράξει ένα ηλεκτρονικό σύστημα, όχι μόνο εξαιτίας του μεταβατικού ρεύματος εξ επαφής, αλλά και εξαιτίας του εκπεμπομένου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Παρόλα αυτά, το μεταβατικό αυτό πεδίο δεν προσδιορίζεται στο Πρότυπο [3] για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Επίσης, ένας σύνθετος μαθηματικός τύπος χρησιμοποιείται, συχνά, για την περιγραφή της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, αλλά δεν είναι κατάλληλος, επειδή η χρονική παράγωγος του δεν ανταποκρίνεται στη φυσική πραγματικότητα: όπως αναφέρουν οι ίδιοι ερευνητές και στο άρθρο τους [14] η τιμή της παραγώγου του ρεύματος για t=0 δεν είναι μηδέν.

Στο ίδιο άρθρο τους [14] αναφέρουν, επίσης, ότι, αν και οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παράγονται από διάφορους κατασκευαστές συμμορφώνονται με το Πρότυπο [2], ο υπό δοκιμή εξοπλισμός (EUT) μπορεί να περνάει ή όχι τη δοκιμή σε διαφορετικά επίπεδα τάσης εκφόρτισης ανάλογα με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που χρησιμοποιείται.

Στην πραγματικότητα, η κυματομορφή του ρεύματος συνεισφέρει λίγο στη διαταραχή που προκαλείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, καθώς σε πολλές περιπτώσεις, η μεταβατική παρεμβολή των πεδίων είναι η κυρίαρχη διαταραχή. Συνεχίζοντας, πάντα στο ίδιο άρθρο, αναφέρουν ότι, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες μαθηματικές περιγραφές, σύμφωνα με το Πρότυπο [3] όπως: μια τετραπλο-εκθετική συνάρτηση, μια γκαουσσιανή συνάρτηση, τη διωνυμική βηματική συνάρτηση, αλλά και μια σύνθετη μαθηματική περιγραφή, προερχόμενη από την πρότυπη μαθηματικές περιγραφές φαίνονται αντίστοιχα στις εξισώσεις (3.1) έως (3.4).

$$i(t) = 498 \left(e^{-t/1.4} - e^{[-t/1.3]} \right) + 148.5 \left(e^{[-t/23.37]} - e^{[-t/20]} \right)$$
(3.1)

$$i(t) = 13.25 \exp[-(t - 2/0.6)^{2}] + 391t \exp[-(t - 300/122.2)^{2}]$$
(3.2)

$$i(t) = 106.5(1 - \exp[-t/0.62])^8 \exp[-t/1.1] + 60.5(1 - \exp[-t/55]) \exp[-t/26]$$
(3.3)

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp[t/\tau_2] + \frac{i_2}{k_2} \frac{(t/\tau_3)^n}{1 + (t/\tau_3)^n} \exp[t/\tau_4]$$
(3.4)

Οι κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για καθεμία από τις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης για τις μαθηματικές περιγραφές 3.1 - 3.4 [14]

Επιπλέον, οι ίδιοι στο άρθρο τους [13] για την ανάλυση της επίδρασης της κυματομορφής της πηγής ρεύματος, παραγοντοποίησαν μια μαθηματική εξίσωση για να αναπαραστήσουν την κυματομορφή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτή η κυματομορφή του ρεύματος περιγράφεται ως μια εξαπλο-εκθετική συνάρτηση:

$$i(t) = I_o (1 - \exp[-t/\tau_1])^p \exp[-t/\tau_2] + I_1 (1 - \exp[-t/\tau_3])^q \exp[-t/\tau_4] + I_2 (1 - \exp[-t/\tau_5])^r \exp[-t/\tau_6]$$
(3.5)

με παραμέτρους, $I_0=31$, $\tau_1=0.4$, $\tau_2=3.708$, p=5.93, $I_1=100$, $\tau_3=30$, $\tau_4=10.91$, q=2, $I_2=10$, $\tau_5=10$, $\tau_6=74.76$, r=2.

Η κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης που έλαβαν στην περίπτωση μιας τέτοιας πηγής φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης [13]

Από το Σχήμα 3.9 προκύπτουν οι τιμές I_p =18.5 A, t_r =1 ns, I_{30ns} =6.5 A και I_{60ns} =2.7 A. Στην προσομοίωση FDTD, το πλέγμα είχε διαστάσεις 3 mm×3 mm×3 mm. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν έναν υπολογιστή Pentium 4 1.7 GHz, ο οποίος εκτελούσε τον κώδικα FDTD.

3.3 Μετρήσεις

Oι Huang Jiu-Sheng, Liu Fang, Deng Qi-Bin και Liu Pei-Zhu [15] αναφέρουν ότι, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι μια από τις πιο κοινές επιβλαβείς ηλεκτρομαγνητικές πηγές στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, αλλά η εξέταση του ηλεκτρομαγνητικού της πεδίου είναι πολύ δύσκολη, γιατί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι μια μεταβατική διαδικασία που διαρκεί πάρα πολύ λίγο χρόνο. Ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης είναι μικρότερος από 1 ns και η διάρκεια της εκφόρτισης μικρότερη από 1 μs. Σύμφωνα με τις μετρήσεις, τους το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση 10 cm από άνθρωπο που κρατά ένα μεταλλικό αντικείμενο με δυναμικό 2 kV το οποίο εκφορτίζεται στο έδαφος είναι Epp=410 V/m και το μαγνητικό πεδίο είναι Hpp=28 A/m σε απόσταση 3 cm από την εκφόρτιση. Επίσης, το εύρος (bandwidth) του πεδίου είναι εξαιρετικά μεγάλο, και κυμαίνεται από μερικά MHz έως πέραν του 1 GHz. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν μια μονοπολική κεραία μήκους 10 mm με εύρος ζώνης 12 GHz και μια βροχοειδή κεραία, με διάμετρο βρόχου 10 mm, η οποία ήταν προστατευμένη από το ηλεκτρικό πεδίο καθώς και ένα ψηφιακό παλμογράφο εύρους ζώνης 1.5 GHz. Με δεδομένο το εύρος ζώνης του χρησιμοποιηθέντος παλμογράφου συμπεραίνουμε ότι, οι μετρήσεις τους δεν πρέπει να ήταν πολύ ακριβείς, ιδίως η μέτρηση του χρόνου ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης. Οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου φαίνονται στα Σχήματα 3.10 και 3.11.



Σχήμα 3.10: Κυματομορφή του πεδίου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (2 kV, 10 cm, Epp=410 V/m) [15]



Σχήμα 3.11: Η κυματομορφή του μαγνητικού πεδίου (2 kV, 3 cm, Hpp=28 A/m) [15]

Σύμφωνα με τους Jesus L. Muiioz, Jonah Tan, Carlito Adriano, Erwin Roldan, και Jack Sadie [16], λόγω της φύσης του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (είναι πολύ γρήγορο και εμφανίζεται σποραδικά στη φύση), ο εντοπισμός του με ακρίβεια είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Ένα συμβάν ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πραγματοποιείται, κατά τους συγγραφείς του άρθρου, σε 100 ns ή λιγότερο και αυτό δημιουργεί μια απότομη έκρηξη ενέργειας, γνωστή, επίσης, ως ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (EMI). Η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 10 MHz και 2 GHz, σύμφωνα με τους συγγραφείς, και μπορεί να εντοπιστεί με ένα γρήγορο ψηφιακό παλμογράφο και μια βροχοειδή κεραία, η οποία, παρ' όλο που έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, εντοπίζει, αρκετά αποτελεσματικά, τα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η κεραία είναι κατασκευασμένη από ένα ομοαξονικό καλώδιο μήκους 2.5 m και ένα σύνδεσμο (connector) τύπου BNC. Ο βρόγος έχει διάμετρο 10 cm και η εν λόγω κεραία είναι τοποθετημένη κάθετα στην πηγή της ηλεκτροστατικής παρεμβολής για μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας. Κατασκευάζοντας, λοιπόν, μια τέτοια κεραία και χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, προσπάθησαν να αποδείξουν μια σχέση μεταξύ της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της πραγματικής αιχμής της τάσης της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στην εργασία τους αυτή χρησιμοποιούν ένα κύκλωμα παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, αντιστοίχων με τις παραγόμενες κατά τα τρία μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, χαρακτηριζόμενο ως Zapmaster Keytek 512 zapper. Διεπίστωσαν, λοιπόν, ότι, υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ των καταγραφόμενων τιμών από την κεραία και της τάσης φόρτισης του προσομοιωτή και για τα τρία μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Charged Device Model, Human Body Model, Machine Model). Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν ένα ψηφιακό παλμογράφο 500 MHz ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με την κεραία. Στο Σχήμα 3.12 φαίνονται οι καταγραφόμενες τιμές τάσης από την κεραία, όπως αυτές εμφανίστηκαν στον συνδεδεμένο με αυτήν παλμογράφο, έναντι της τάσης φόρτισης του προσομοιωτή, για τα τρία μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 3.12: Γραφικές παραστάσεις των ενδείζεων της βροχοειδούς κεραίας σε σχέση με το πλάτος της τάσης φόρτισης, για τα τρία μοντέλα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Ot Jiusheng Huang, Liu Suling, Wang Xiqin, Zhou Feng, Wang Kat Langfeng, Gaoyougan εισάγουν την έννοια του ρεύματος μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESDDC) [17]. Το εν λόγω ρεύμα "ρέει" μέσα στο χώρο προς όλα τα μέρη του υπό δοκιμή εξοπλισμού, όταν συμβαίνει μια εκφόρτιση και συνεισφέρει, και αυτό, στην αστοχία του εξοπλισμού πέραν του ρεύματος εκφόρτισης και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που εκπέμπεται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους έδειξαν, ότι το ρεύμα αυτό είναι ένα κύριο χαρακτηριστικό της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, πέραν του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του ρεύματος εκφόρτισης. Θεωρούν, λοιπόν, ότι, το γεγονός ότι, η κανονική λειτουργία του ίδιου υπό δοκιμή εξοπλισμού διαταράσσεται σε διαφορετικές τάσεις φόρτισης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οφείλεται, εκτός από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, στο ρεύμα μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν ένα παλμογράφο 4 GHz, 20 GS/s και ημικυκλικούς βροχοειδείς αισθητήρες (probes). Ύστερα από μετρήσεις διεπίστωσαν ότι, για το μοντέλο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης άνθρωπος - μέταλλο και τάση 1000 V, προκύπτουν οι τιμές $I_p=9.7$ A. και $t_r=0.21$ ns. Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται η κυματομορφή που κατέγραψαν η οποία συγκρίνεται με αυτή του προτύπου.



Σχήμα 3.13: Σύγκριση μεταζύ της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για πραγματική ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου μετάλλου και της αντίστοιχης του Προτύπου ΕΝ [17]

Η κυματομορφή του ρεύματος μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φάινεται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Κυματομορφή του ρεύματος μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [17]

Επίσης, παρατήρησαν ότι, η παράγωγος του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου ήταν 40 GA/s, 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του Προτύπου [3] που είναι 4.2 GA/s, για την ίδια τάση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό καταδεικνύει και τη μεγάλη ταχύτητα μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου. Τέλος, έφθασαν στο συμπέρασμα ότι, το ρεύμα μετατόπισης, το οποίο είναι αποτέλεσμα της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο, ίσως έχει μεγαλύτερη κορυφή από το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Δύο κυματομορφές ρεύματος στην ίδια ηλεκτροστατική εκφόρτιση συγκρίνοντα: το ρεύμα μετατόπισης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [17]

Οι Zhang Xijun, Ruan Xiaofen, Liu Shanghe και Wei Ming [18] μελετούν την επίδραση του ηλεκτρονόμου της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στη δοκιμή ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Χρησιμοποιώντας ένα γειωμένο μεταλλικό πλέγμα, για να περιορίσουν την επίδραση του πεδίου που δημιουργείται από τον ηλεκτρονόμο (θεωρούν ότι) βελτιώνουν την προσομοίωση τους, η οποία (πιστεύουν ότι) ανταποκρίνεται περισσότερο στο πραγματικό φαινόμενο και ότι τα πειραματικά τους αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας αυτό το πλέγμα, μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που εισάγεται από τη συμπεριφορά του εσωτερικού ηλεκτρονόμου της γεννήτριας, χωρίς να επηρεάζεται το πεδίο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, την οποία θεώρησαν συνυπεύθυνη για συμβάντα αποτυχίας δοκιμαζόμενου εξοπλισμού. Για να λάβουν ακριβείς μετρήσεις πραγματοποίησαν το πείραμα 10 φορές με και χωρίς πλέγμα. Οι μετρήσεις που έλαβαν φαίνονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2.

ESD voltage	T (A)		I (A)	t (ng)
(kV)	$I_p(\mathbf{A})$	$I_{30}(A)$	1 ₆₀ (A)	ι_r (IIS)
2	7.05	3.81	2.40	0.883
4	14.35	8.11	4.39	0.923
6	21.66	12.32	6.73	0.896
8	29.33	16.35	9.00	0.892

Πίνακας 3.1: Μετρούμενες τιμές παραμέτρων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χωρίς πλέγμα [18]

ESD voltage	I (A)			t (ns)
(kV)	$I_p(\mathbf{A})$	130 (11)		<i>v</i> _{<i>F</i>} (115)
2	7.06	3.48	2.65	0.894
4	14.08	8.36	3.85	0.896
6	21.99	12.46	5.74	0.911
8	28.65	15.80	8.86	0.896

Πίνακας 3.2: Μετρούμενες τιμές παραμέτρων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με πλέγμα [18]

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες παρατήρησαν ότι, οι παράμετροι του παραγομένου ρεύματος υπό της προστατευμένης και της μη προστατευμένης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές του Προτύπου ΕΝ 61000-4-2:2009 [3] και συμπέραναν ότι, το εν λόγω πλέγμα δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη μορφή του ρεύματος που προκαλείται από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Επίσης, παρατήρησαν ότι, οι κυματομορφές του μαγνητικού πεδίου, πριν και μετά την τοποθέτηση του πλέγματος, διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και ότι, στην περίπτωση της προστατευμένης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το πλάτος της κυματομορφής του μαγνητικού πεδίου μειώνεται, εξασθενεί γρηγορότερα μετά από 50 ns και μειώνεται στο μηδέν στα 100 ns, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.16. Στο πείραμά τους χρησιμοποίησαν μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ένα κλωβό Faraday, σε πλευρικό τοίχωμα του οποίου ήταν τοποθετημένος ο στόχος της εκφόρτισης, μια κεραία στο πίσω μέρος του κλωβού, τα καλώδια εξόδου και έναν παλμογράφο 1 GHz, ο οποίος βρίσκονταν μέσα στον κλωβό. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είχε τη δυνατότητα να παράγει τάση εύρους 0.2 kV÷30 kV. Σχηματικά η παραπάνω διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.16: Κυματομορφή μαγνητικού πεδίου a)) μη προστατευμένης και b) προστατευόμενης γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [18]



Σχήμα 3.17: Πειραματική διάταζη για τη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και πεδίου [18]

Οι P.Wilson και M.T.Ma [19] αναφέρουν ότι, έχει δοθεί πολλή σημασία στις κυματομορφές του ρεύματος εκφόρτισης και όχι στα εκπεμπόμενα πεδία, κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το λόγο αυτό, στο άρθρο τους χρησιμοποιούν ένα, σχετικά απλό, διπολικό μοντέλο για το ηλεκτρικό τόξο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, με σκοπό να προβλέψουν τα εκπεμπόμενα πεδία. Ο μετρητικός εξοπλισμός που γρησιμοποιούν αποτελείται από μια κεραία ευρέος φάσματος, για τη μέτρηση των πεδίων, συνδεδεμένη με ένα ψηφιακό παλμογράφο 1 GHz, και ένα υπολογιστή. Στη συνέχεια, οι μετρούμενες κυματομορφές του ρεύματος εφαρμόζονταν στο διπολικό μοντέλο, με σκοπό την πρόβλεψη των πεδίων. Οι μετρούμενες και προβλεφθείσες τιμές έδειξαν να συμφωνούν αρκετά. Ισχυρίζονται ότι, το πιο συνηθισμένο λάθος που γίνεται στη μέτρηση του πεδίου, είναι η έλλειψη απομόνωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κεραία, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πεδίου να μην λαμβάνει μόνο το πεδίο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης αλλά και το πεδίο που δημιουργείται από την ίδια τη γεννήτρια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για το λόγο αυτό, στο πείραμά τους θωράκισαν τη γεννήτρια.

Ο **Michael Mardiguian**, όμως, σε άρθρο του [20] - απάντηση στο άρθρο των P.Wilson και M.T.Ma [19] καθιστά σαφές ότι, πομπός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν είναι μόνο το ηλεκτρικό τόξο, αλλά ολόκληρο το κύκλωμα, αποτελούμενο από τη γεννήτρια, την κεφαλή εκφόρτισης, το στόχο και την ταινία γείωσης. Τούτο ισχύει και σε μια πραγματική εκφόρτιση, όπου ολόκληρη η δομή (χέρι, σώμα, κέλυφος του υπό δοκιμή εξοπλισμού) που φέρει το ρεύμα εκπέμπει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Κατά τον Jon Barth [21], τα υπάρχοντα Πρότυπα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι βασισμένα στις μετρήσεις που έγιναν 20 έτη πριν, με όργανα που, μετά βίας, θα θεωρούσαμε ακριβή σήμερα. Τα κυκλώματα που σχεδιάζονται, ακόμα και σήμερα, και αποτελούν ακόμα τη βάση του σημερινού εξοπλισμού δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι βασισμένα σε εκείνες τις μετρήσεις. Επιπλέον, καθώς τα ολοκληρωμένα κυκλώματα έγιναν πολυπλοκότερα, με περισσότερες συνδέσεις με τον εξωτερικό κόσμο, ο αριθμός των ακίδων (pins) που πρέπει να εξετασθούν έχει αυξηθεί. Η ορισμένη από το Πρότυπο [3] κυματομορφή του οργάνου δοκιμής άλλαξε για να προκαλείται η ελάχιστη παραμόρφωση σε αυτήν. Ο χρόνος ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης, που παρατηρήθηκε σε πραγματικά συμβάντα και ήταν μικρότερος από 1 ns, επιβραδύνθηκε συμβατικά στα 2÷10 ns για να αποτρέψει την ταλάντωση της κυματομορφής κατά τον έλεγχο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτές και άλλες υποθέσεις, που έγιναν τότε, αγνόησαν μερικές από τις πραγματικές παραμέτρους, που υπάρχουν στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Οι μετρήσεις των πραγματικών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, επίσης, αποκάλυψαν ότι, η υγρασία που υπάρχει στον αέρα έχει σημαντική επίδραση στο πλάτος του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (για δεδομένη τάση, όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας, τόσο αυξάνει η κορυφή του ρεύματος).

Οι **Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka** [22], με σκοπό να αποσαφηνίσουν τη συμπεριφορά των ρευμάτων εκφόρτισης των προερχομένων από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις χαμηλής τάσης, χρησιμοποίησαν ένα ψηφιακό παλμογράφο 6 GHz και μέτρησαν, μέσω ενός μετρητικού στοιχείου 50 Ω με σύνδεση τύπου SMA, τα ρεύματα εκφόρτισης τα προκαλούμενα από την επαφή ενός μεταλλικού στοιχείου που κρατάει ένας άνθρωπος, φορτισμένος με τάση που κυμαίνεται από 200 V έως 2000 V. Παρατήρησαν ότι, για τάσεις φόρτισης χαμηλότερες των 600 V, η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου παρέμενε σχεδόν σταθερή, ενώ για τάσεις μεγαλύτερες των 600 V μειωνόταν, κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από έναν εμπειρικό τύπο βασισμένο στο νόμο του Paschen:

$$E_s = \frac{V_c}{V_c - V_0} \times E_0, \qquad (3.6)$$

όπου $E_0 = 8.8425 \times 10^6 [V/m]$ και $V_0 = 376 [V]$

Σημειώνεται ότι, μια δοκιμή ατρωσίας σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3], πραγματοποιείται με εκφορτίσεις μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε εύρος τάσης από 2 kV έως 8 kV, παρόλο που η φόρτιση ενός ανθρώπου κυμαίνεται από λίγα Volt έως 10 kV. Στη συνέχεια με ένα ψηφιακό παλμογράφο 12 GHz μέτρησαν τα ρεύματα εκφόρτισης ενός φορτισμένου ανθρώπου υπό τάση που κυμαινόταν από 200 V έως 8000 V καλύπτοντας, έτσι, το εύρος που ορίζει η δοκιμή ατρωσίας [3] σε ένα πρότυπο στόχο, και έδειξαν την εξάρτηση του πεδίου από την τάση, για ένα μεγάλο εύρος της. Επίσης, διεπίστωσαν ότι η μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης, του μεταλλικού στοιχείου στο μετρητικό στοιχείο, δίνει ρεύμα εκφόρτισης μεγαλύτερης τιμής και βραχύτερο χρόνο ανόδου, για τάσεις άνω των 1000 V. Επίσης παρατήρησαν ότι, η ταχύτητα προσέγγισης δεν επηρεάζει τα ρεύματα εκφόρτισης για τάσεις κάτω από 1000 V, αν και, σύμφωνα με προηγούμενα άρθρα τους, τάση περίπου 800 V τα επηρέαζε σημαντικά, αποδίδοντάς το στο ότι τα ρεύματα εκφόρτισης, στα παλαιότερα άρθρα τους, μετρήθηκαν μέσω ενός πρότυπου στόχου εσωτερικής σύνθετης αντίστασης 1 Ω και όχι μέσω συνδέσμου αντίστασης 50 Ω (Pelegrini Target), όπως στο [22]. Σύμφωνα με τις μετρήσεις τους στην περίπτωση της ταχείας προσέγγισης και για τάση 4000 V προκύπτουν οι τιμές I_p =16 A, t_r =0.5 ns και για τάση 8000 V I_p =35 A, t_r =0.7 ns, ενώ στην περίπτωση της βραδείας προσέγγισης οι ίδιες παράμετροι παίρνουν τις τιμές I_p =12 A, t_r =0.6 ns και I_p =18 A, t_r =0.8 ns, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 3.18 φαίνεται η μετρητική διάταξη των Fujiwara και Taka η οποία αποτελείται από ένα ψηφιακό παλμογράφο 6 GHz, ένα ομοαξονικό καλώδιο 50 Ω, ένα μετρητικό στοιχείο τύπου SMA 50 Ω, μια πλάκα από αλουμίνιο, ένα ηλεκτρόδιο, του οποίου η αιχμή είχε σφαιρική απόληξη ακτίνας 4 mm και την τροφοδοσία συνεχούς τάσεως, η οποία φορτίζει το ανθρώπινο σώμα μέσω μιας αντίστασης 10 MΩ (η χρήση της αντίστασης επιβάλλεται για την ομαλή φόρτιση του ανθρώπινου σώματος). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.18 ο, ύψους 167 cm και βάρους 60 kg άνθρωπος, στέκεται πάνω σε πολυστυρόλιο. Στη συνέχεια χρησιμοποίησαν έναν πολύ πιο γρήγορο παλμογράφο (12 GHz), για να μετρήσουν τις παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, κάτι που τους έδωσε τη δυνατότητα να μετρήσουν με καλή ακρίβεια το χρόνο ανόδου του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 3.18: Μετρητική διάταζη για (a) το ρεύμα εκφόρτισης και (b) το υπολογιστικό του μοντέλο [22]

Στο Σχήμα 3.19 φαίνονται οι μετρούμενες κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης από 200 V έως 8000 V, καθώς και οι κυματομορφές των τάσεων εκφόρτισης που προέκυψαν από τις κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης.



Σχήμα 3.19: (a) Καταγεγραμμένες κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης και (b) εξαγόμενες κυματομορφές των τάσεων εκφόρτισης [22]

Στο Σχήμα 3.20 φαίνεται η εξάρτηση του πεδίου από την τάση φόρτισης. Οι γκρι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις που πραγματοποίησε ο Kawamata [23], ενώ η συνεχής γραμμή έχει υπολογισθεί με βάση το νόμο του Paschen.



Σχήμα 3.20: Εξάρτηση του πεδίου κατάρρευσης E_s από την τάση φόρτισης [23]

Οι Fuliwara και Taka σε άλλο άρθρο τους [24] προσπαθούν να διευκρινίσουν την αρχική διαδικασία εκφόρτισης (ή, εναλλακτικά, τη διαδικασία σπινθήρα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων), με σκοπό να αποσαφηνίσουν το φαινόμενο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης φορτισμένων κινούμενων σωμάτων, η οποία προκαλεί βλάβη στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Για να το πετύχουν αυτό, μετράνε το ρεύμα εκφόρτισης που προκαλείται από την επαφή ενός μεταλλικού αντικειμένου που κρατάει ένας φορτισμένο άνθρωπος, σε ένα πρότυπο στόχο. Στη συνέχεια εφάρμοσαν τα πειραματικά αποτελέσματα σε δύο μαθηματικούς τύπους που έχουν προταθεί από τους Rompe-Weizel [25] και Toepler [26], οπότε και επαληθεύθηκε η πειραματική τους διαπίστωση, η οποία είναι ότι, στην αρχική φάση της διαδικασίας δημιουργίας σπινθήρα (δηλαδή πριν το ρεύμα εκφόρτισης λάβει τη μέγιστη τιμή του), η αγωγιμότητα του σπινθήρα αυξάνει με την αύξηση της τάσης. Πραγματοποίησαν το πείραμά τους 5 φορές για τις τάσεις 200 V και 2000 V και βρήκαν, όσον αφορά στη μεγάλη ταχύτητα προσέγγισης του μεταλλικού στοιχείου στο μετρητικό στοιχείο, ότι ισχύει $I_p=1.4$ A, $t_r=0.25$ ns και $I_p=10$ A, $t_r=0.9$ ns αντίστοιχα. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων φαίνονται στα Σγήματα 3.21 και 3.22. Η πειραματική διάταξη είναι η ίδια που χρησιμοποίησαν και στο άρθρο [22] και η οποία έχει ήδη προαναφερθεί (Σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.21: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για τάση 200 V [24]



Σχήμα 3.22: Κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης για τάση 2000 V [24]

3.4 Κυκλωματικά μοντέλα

3.4.1 Κυκλωματικό μοντέλο που προτείνεται στο Πρότυπο

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, που περιγράφεται στο Πρότυπο [3] βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model), στο Σχήμα, δε, 3.23 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα της: σύμφωνα με το [3], αποτελείται από μια αντίσταση φόρτισης R_c (50÷100 MΩ), έναν πυκνωτή ενταμίευσης ενέργειας C_s (150 pF ± 10%) και μία αντίσταση εκφόρτισης R_d που αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δέρματος (330 Ω±10%). Προσομοιώνεται, εδώ, η περίπτωση εκφόρτισης ανθρώπου σε μεταλλικό αντικείμενο, μέσω μιας μεταλλικής ράβδου, την οποία αυτός κρατά στο χέρι του. Γι' αυτό το λόγο όταν ένας άνθρωπος κρατάει ένα κομμάτι μετάλλου, το δέρμα επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα εκφόρτισης. Συνεπώς, όταν λάβει χώρα μία εκφόρτιση το τόξο θα προσπέσει στο μέταλλο και όχι στο δέρμα. Προφανώς R_d είναι η συνολική αντίσταση της επιδερμίδας και όχι μόνο της περιοχής κοντά στο σημείο της εκφόρτισης, γι' αυτήν, δε, επιλέχθηκε η τιμή των 330 Ω, ενώ η τιμή της χωρητικότητας C_s είναι αντιπροσωπευτική της ηλεκτροστατικής χωρητικότητας του ανθρωπίνου σώματος.



Σχήμα 3.23: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που ορίζει το Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3]

3.4.2 Κυκλωματικά μοντέλα βασισμένα στη γεωμετρία

Ο Greason [27] παρουσιάζει μια νέα τεχνική για την προσομοίωση της εκφόρτισης ενός ηλεκτροδίου με δεδομένη γεωμετρία. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση γίνεται κυκλωματικά, καθώς μια μεταβλητή πηγή συνεχούς ρεύματος (V_0) και ένα κύκλωμα RC τροφοδοτούν δύο μεταλλικές σφαίρες με διάκενο μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24. Το κύκλωμα αυτό προσομοιώνει την προσέγγιση δύο φορτισμένων σωμάτων. Ο έλεγχος των R, C, V_0 του κυκλώματος δίνει την ευκαιρία να μπορούν να μελετηθούν ταχύτητες προσέγγισης των δύο φορτισμένων σωμάτων, της τάξεως 1-100 cm/sec.



Σχήμα 3.24: Κύκλωμα προσομοίωσης της ταχύτητας προσέγγισης ενός ηλεκτροδίου [27]

Οι Amoruso, Helali και Lattarulo [28] "διαμελίζουν", για τους σκοπούς της έρευνάς τους, το ανθρώπινο σώμα σε 11 βασικά μέρη, τα οποία προσομοιώνονται με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά τους ανάλογα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3. Το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο προτείνεται και το οποίο αναπαριστά το ανθρώπινο σώμα είναι ένα κύκλωμα *RLC*. Το κύκλωμα αυτό επιλύεται μέσω του προγράμματος Spice,

οπότε υπολογίζεται το ρεύμα εκφόρτισης για διάφορες θέσεις του ανθρώπινου σώματος και για διάφορες ανθρώπινες κατατομές. Τα βασικά μέρη του ανθρωπίνου σώματος και πώς αυτά υλοποιούνται στο Pspice φαίνονται στο Σχήμα 3.25.

Στοιχείο	Χωρητικότητα (pF)	Επαγωγή (μΗ)	Αντίσταση (Ω)
Κνήμη	5.23	1.78	189
Μηρός	2.33	2.85	127
Κοιλιακή χώρα	0.97	0.02	46
Στήθος	1.52	0.022	55
Πήχης	1.87	0.078	196.5
Βραχίονας	2.48	0.064	159
Κεφάλι	4.03	0.023	58

Πίνακας 3.3: Ηλεκτρικές παράμετροι των βασικών μερών του ανθρωπίνου σώματος [28]



Σχήμα 3.25: a) Τα 11 βασικά μέρη του ανθρωπίνου σώματος, β) Κυκλωματική αναπαράσταση του ανθρωπίνου σώματος στο Pspice [28]

Οι Giannetti και Tellini [29] προσομοιώνουν το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω μιας ολοκληρωτικής μεθόδου για εκφορτίσεις αέρα. Τα ηλεκτρόδια και το διηλεκτρικό μοντελοποιούνται μέσω ενός δικτύου μη γραμμικών αντιστάσεων σχεδιασμένων στο Spice. Η ευκολία του προτεινόμενου μοντέλου έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να υπολογισθεί με σχετικά καλή ακρίβεια το ρεύμα εκφόρτισης, για διάφορες γεωμετρίες ηλεκτροδίων, χωρίς να χρειάζεται να είναι γνωστή η μεταξύ των ηλεκτροδίων χωρητικότητα.

3.4.3 Κυκλωματικό μοντέλο του Nobuo Murota

Στο Σχήμα 3.26 φαίνονται μοντελοποιημένα ηλεκτρικά μεγέθη που είναι παρόντα στη διάταξη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για την κατασκευή μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψη αυτά τα παράσιτα στοιχεία, γεγονός που καθιστά περίπλοκη την κατασκευή του ισοδυνάμου κυκλώματος της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 3.26: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας μιας δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. [30]

Στο Σχήμα 3.27 φαίνεται ένα πρώτο κυκλωματικό μοντέλο της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, το οποίο προτάθηκε από τον **Nobuo Murota** [30]. Οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος προσδιορίζονται μερικώς από το Πρότυπο και μερικώς από τον συγγραφέα, σε μία προσπάθεια μοντελοποίησης των παράσιτων στοιχείων που εμφανίζονται στη γεωμετρία ενός περιστατικού εκφόρτισης ανθρώπου

μετάλλου. Το πρώτο κυκλωματικό μοντέλο που προτάθηκε από τον Nobuo Murota φαίνεται στο Σχήμα 3.27, στο Σχήμα, δε, 3.28, φαίνεται μία παραλλαγή του αυτού.



Σχήμα 3.27: Κυκλωματικό μοντέλο 1 [30]



Σχήμα 3.28: Κυκλωματικό μοντέλο 2 [30]

Οι αποκρίσεις των δύο παραλλαγών του κυκλωματικού μοντέλου, για τάση φόρτισης +2 kV και +4 kV, έτσι όπως τις υπολόγισε ο Γ. Π. Φώτης στη διδακτορική του διατριβή [31], φαίνονται στο Σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29: Αποκρίσεις κυκλωματικών μοντέλων: α)Μοντέλο 1 και β)Μοντέλο 2 [31]

Με τη βοήθεια του προγράμματος Pspice, υλοποιήθηκαν από τον Γ. Π. Φώτη [31] τα δύο αυτά κυκλώματα και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τιμές τάσεων φόρτισης +2 kV και +4 kV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.30.



Σχήμα 3.30: Απόκριση του κυκλωματικού μοντέλου 1 για τάση φόρτισης: a) +2 kV και β) +4 kV [31]

Στο [31], όπου γίνεται εκτενέστερη ανάλυση και σχολιασμός, εκτίθενται συγκρίσεις του κυκλώματος αυτού και του παραγομένου ρεύματος με το αντίστοιχο κύκλωμα του Προτύπου [3] και χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με την ορθότητα και χρησιμότητα του κυκλώματος του Προτύπου [3], εν τέλει, δε, το [31] αποφαίνεται αρνητικά ως προς την ορθότητα του προτεινομένου από το Πρότυπο [3] κυκλώματος, και προτείνει την αναθεώρηση του πρότυπου κυκλώματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική διάταξη

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη, καθώς και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

4.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

Για την διεξαγωγή των δοκιμών που ορίζει το Πρότυπο ΕΝ 61000-4-2:2009 [3] ο εξοπλισμός

που χρησιμοποιήθηκε είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή.
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.
- Εξασθενητές (attenuators).
- Παλμογράφος TDS 7254B.
- Κλωβός Faraday.

4.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TDS 7254B, ο οποίος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από dc έως 2.5 GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με τις γεννήτριες NSG-438, NSG-433 της εταιρίας Schaffner και DITO της εταιρίας EMTEST. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε τις κυματομορφές του, χρησιμοποιούμε ομοαξονικά καλώδια που μεταφέρουν στο εσωτερικό του θαλάμου το σήμα. Επειδή το ρεύμα που δημιουργείται έχει μεγάλες

τιμές (περίπου 3.5 A/kV) πρέπει να εξασθενήσουμε τα αντίστοιχο σήμα προ της εισαγωγής του στον παλμογράφο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τον εξασθενητή της Tektronix (011-0059-03). Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8 ως Pellegrini target δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο ρεύμα κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 103 της Schaffner.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

4.3.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων της εταιρείας Schaffner την NSG-433 [32] και NSG-438 [33] και με την DITO της εταιρείας EMTEST [34]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτές.

4.3.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 [32], η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.2 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις της τάξης των ±18 kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο πιστόλι μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο, το οποίο δείχνει την τάση εκφόρτισης.



Σχήμα 4.2: Η γεννήτρια NSG-433 [32]

Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία, καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης. Η NSG-433 [32] χρησιμοποιεί μια συσκευή, η οποία ονομάζεται προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής, καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκφορτίσεων μέσω αέρα φαίνονται στο Σχήμα 4.3. Η γεννήτρια NSG-433 [32] περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκφορτίσεων, που πραγματοποιούνται.



Σχήμα 4.3: Ακίδες για εκφορτίσεις μέσω αέρα και επαφής για τη γεννήτρια NSG-433 [32]

4.3.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται η γεννήτρια NSG-438 [33] και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η οθόνη είναι οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής.



Σχήμα 4.4: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 [33] και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.5 και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και τον ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock).
- Η γεννήτρια στην οποία βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στην λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει σαν είσοδο του 100-250 Vac, 50-60 Hz, 1 A και δίνει στην βασική μονάδα 24 Vdc, 2.3 A.



Σχήμα 4.5: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες [33]

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δυο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433 [32] και NSG-438 [33], που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

	NSG-433	NSG-438
Πυκνωτής εκκένωσης <i>Cs</i>	$150 \text{ pF} \pm 10\%$	150 pF
Αντίσταση εκκένωσης <i>R</i>	$330 \ \Omega \pm 10\%$	330 Ω
Τάση φόρτισης V_{0}	2-18 kV για εκφορτίσεις στον αέρα 2-9 kV για εξ επαφής εκφορτίσεις	200 V-30 kV για εκφορτίσεις στον αέρα και για εκφορτίσεις εξ επαφής
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% V ₀)	>5 sec	>5 sec
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης (t _r)	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις ≤ 8 kV 0.7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις ≤ 8 kV 0.7 – 1 ns για εξ επαφής εκφορτίσεις
Μέγιστο ρεύματος	2 kV: 7.5A ±10% 4 kV: 15A ±10%	2 kV: 7.5A ±10% 4 kV: 15A ±10%
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240 Vac, 50- 60 Hz	100/120/220/240 Vac, 50- 60 Hz
Κατανάλωση	25 VA	25 VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40 °C	5-40 °C
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%	20%-80%

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-

433 [32] кал NSG-438 [33]

4.3.1.3 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων DITO [34] που φαίνεται στο Σχήμα 4.6 παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις έως ±16.5kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Η αλλαγή της πολικότητας, η ρύθμιση του επιπέδου τάσης, και όλες οι επιθυμητές ρυθμίσεις για τη διεξαγωγή της δοκιμής γίνονται με τα πλήκτρα που βρίσκονται πάνω στη γεννήτρια. Το μενού μέσα από το οποίο γίνονται όλες οι ρυθμίσεις φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.6: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας DITO [34]



Σχήμα 4.7: Οθόνη ΜΕΝΟ [34]

Η γεννήτρια Dito [34] συνίσταται βασικά από το καθεαυτό «πιστόλι». Η ακίδες για εκφόρτιση αέρος ή επαφής, είναι ξεχωριστές από το κύριο σώμα της γεννήτριας και εφαρμόζουν εύκολα σε αυτό. Για την τροφοδοσία της γεννήτριας χρησιμοποιείται η μπαταρία της γεννήτριας, η οποία βγαίνει και επαναφορτίζεται.

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO [34] που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Πυκνωτής εκκένωσης Cs	150 pF ± 10%
Αντίσταση εκκένωσης <i>R</i>	$330 \ \Omega \pm 10\%$
	500 V έως 10 kV για εκφορτίσεις
Τάση φόρτισης V_0	εξ'επαφής 500 V έως 16.5 kV για
	εκφορτίσεις στον αέρα
Πολικότητα	θετική/αρνητική
Χρόνος ανόδου	0.7 ns έως 1ns
Μένιστο οεύματος	2 kV: 7.5A ±10% 4 kV: 15A ±10% 6 kV:
	22.5A ±10% 8 kV: 30 A ±10%
Τροφοδοσία φορτιστή μπαταρίας	100V - 240V +/-10%; 50/60Hz
Θερμοκρασία λειτουργίας	5°C - 40°C
Υγρασία λειτουργίας	20% - 80%

Πίνακας 4.2:	Τεχνικά χαρακτηριστικά	γεννήτριας	ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DI	ТО
		[34]		

4.3.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [35] δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να μετρηθεί το ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε ο MD 103 της Schaffner [35]. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής, που χρησιμοποιήθηκε και στο Σχήμα 4.9 ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη.



Σχήμα 4.8: Ο ομοαζονικός προσαρμοστής TESEQ MD 103 [35]



Σχήμα 4.9: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη

4.3.3 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 μεταφοράσήματος υψηλής συχνότητας.

4.3.4 Εξασθενητής

Προκειμένου να μετρηθεί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνεύσει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο μπορεί επιπρόσθετα να χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD103 έχει ενσωματωμένο προσαρμοστή, σύμφωνα με το Πρότυπο [3]. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD101 απαιτεί τη χρήση του εν λόγω εξασθενητής, που φαίνεται στο Σχήμα 4.10:



Σχήμα 4.10: Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix

4.3.5 Παλμογράφος

Ο παλμογράφος μοντέλο TDS 7254B [36] είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix και λειτουργεί στα 2.5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [3] για παλμογράφο τουλάχιστον 1 GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024 x 768, 3.5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την

αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S [36] παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.11: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B [36]

Κανάλια Εισόδου	4
Εύρος ζώνης	2.5 GHz
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	130 ps
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	83 ps
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 2\% + (2\% \text{ x offset})$
Σύζευξη εισόδου	DC, GND
Αντίσταση εισόδου	$50 \ \Omega \pm 2.5\%$
Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω	2 mV/div έως 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	<1 VRMS για r < 100mV/div, <5 VRMS για r \ge 100mV/div
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch1	20 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch2	10 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch3	5 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch4	1 Gs/sec

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B [36]

<u>Κεφάλαιο</u> 5

Επαλήθευση γεννητριών

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διεξαγωγή της διαδικασίας για την επαλήθευση τριών γεννητριών. Κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών μας χρησιμοποιήθηκαν οι εξής γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων: NSG-438 [33] και NSG-433 [32] της Schaffner, και DITO της EMTEST [34]. Σκοπός μας ήταν ο έλεγχος των παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος που παράγει καθεμιά από τις παραπάνω γεννήτριες, κατά την επαλήθευσή τους, σύμφωνα με τα όρια που θέτει για αυτές το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [3].

5.2 Παρουσίαση του αλγόριθμου

Κατά την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και σύμφωνα με το Πρότυπο [3], θα πρέπει να ελέγχονται και οι 4 παράμετροι (t_r , I_{max} , I_{30} , I_{60}). Η διαδικασία αυτή μπορεί να αυτοματοποιηθεί. Τα ζεύγη σημείων Ρεύματος – Χρόνου που λαμβάνονται, αποθηκεύονται και η κυματομορφή Ρεύματος – Χρόνου που αυτά συνιστούν μπορεί τώρα να σχεδιαστεί. Στο Σχήμα 5.1 εκτίθεται μια υλοποίηση με τη χρήση Matlab ενός αλγορίθμου για την αυτόματη αξιολόγηση των παραμέτρων της εκάστοτε κυματομορφής που ορίζει το Πρότυπο [3]. Η έξοδος του προγράμματος είναι η απόδοση τιμών σε κρίσιμες για την κυματομορφή παραμέτρους, και η αξιολόγηση των ανωτέρω.



Σχήμα 5.1: Ο Αλγόριθμος για την επαλήθευση των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε λαμβάνει, φορτώνοντας το αντίστοιχο αρχείο, μια σειρά από ζεύγη τιμών, χρόνου-ρεύματος, μια σειρά μετρήσεων δηλαδή, για την ορθότητα των παραμέτρων των οποίων πρέπει να αποφανθεί. Υπάρχει μέριμνα ώστε να έχουμε το χρόνο σε ns και το ρεύμα σε A.

Βρίσκεται το μέγιστο του ρεύματος από τις τιμές που δόθηκαν και ελέγχεται η συμβατότητα του με τις απαιτήσεις του Προτύπου [3].

Βρίσκεται το $I_{10\%}$ ως $I_{10\%}$ =10% I_{max} , και αντίστοιχα το $I_{90\%}$, καθώς και οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχούν τα ανωτέρω. Σε χρόνο 30 ns και 60 ns αργότερα από το $I_{10\%}$ βρίσκονται αντίστοιχα τα I_{30} ns και I_{60} ns. Στο σημείο αυτό αξιολογούνται οι παράμετροι I_{30} ns και I_{60} ns. Βρίσκεται ο χρόνος ανόδου ως $t_r = t_{190\%} - t_{110\%}$. Αξιολογείται ο χρόνος ανόδου βάσει των προδιαγραφών [3]. Ελέγχεται σύμφωνα με απαίτηση του Προτύπου [3] η συνθήκη, για t=2 ns÷ 60 ns, η κυματομορφή να είναι εντός των ορίων $65\% \cdot I(t) \div 135\% \cdot I(t)$.

Στον κώδικα περιλαμβάνεται επίσης χωρίο για τη δημιουργία του γραφήματος των τιμών που ελήφθησαν. Για μία εύκολη εποπτική θεώρηση της ορθότητας της μέτρησης, οι τελευταίες παρουσιάζονται στο γράφημα μαζί με το $65\% \cdot I(t)$ και το $135\% \cdot I(t)$, πράγμα που δίνει άμεσα μια εικόνα σε σχέση με το αν ικανοποιείται η απαίτηση η κυματομορφή να είναι εντός των τιμών $65\% \cdot I(t) \div 135\% \cdot I(t)$, όριο το οποίο προτρέπει το Πρότυπο [3] να ικανοποιείται.



Σχήμα 5.2: Πειραματικά δεδομένα, σε κοινό γράφημα με την ανοχή που προβλέπεται από το Πρότυπο

5.3 Μεθοδολογία

Καταγράψαμε το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης ± 2 kV, ± 4 kV, ± 6 kV και ± 8 kV και υπολογίσαμε τις παραμέτρους του οι οποίες πρέπει να είναι σύμφωνες με το πρότυπο EN 61000-4-2:2009 [3]. Πραγματοποιήθηκαν πέντε κρούσεις για κάθε επίπεδο τάσης, πλην των περιπτώσεων ± 4 kV που πραγματοποιήθηκαν δέκα κρούσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την καλύτερη εποπτεία του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, του οποίου η διάρκεια είναι μικρότερη από 200 nsec, οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με έμφαση, τόσο στη συνολική διάρκεια του φαινομένου (καταγράφοντας την συνολική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης), όσο και στην αρχή του φαινομένου, δηλαδή
μέχρι την αρχική κορυφή του ρεύματος. Αυτό επετεύχθη με την διεξαγωγή των μετρήσεων και για τις δύο ανωτέρω περιπτώσεις με διαφορετικές ρυθμίσεις δειγματοληψίας. Πιο συγκεκριμένα οι μεταβλητές του παλμογράφου στην περίπτωση της συνολικής κυματομορφής και της αρχής της φαίνονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.

Τάση	Υποδιαίρεση	Υποδιαίρεση	Δειγματοληψία
φόρτισης	χρόνου	τάσης	(Gs/div)
(kV)	(ns/div)	(mV/div)	
±2	10	200	20
±4	10	500	20
±6	10	500	20
±8	10	1000	20

Πίνακας 5.1: Ρυθμίσεις στον παλμογράφο (καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος από 0 έως 80 nsec)

Τάση	Υποδιαίρεση	Υποδιαίρεση	Δειγματοληψία
φόρτισης	χρόνου	τάσης	(Gs/div)
(kV)	(ps/div)	(mV/div)	
±2	500	200	20
±4	500	500	20
±6	500	500	20
±8	500	1000	20

Πίνακας 5.2: Ρυθμίσεις στον παλμογράφο (καταγραφή της κυματομορφής του ρεύματος από 0 έως 3 nsec)

Τα ζεύγη σημείων Ρεύματος – Χρόνου που λαμβάνονται, αποθηκεύονται σε ηλεκτρονική μορφή και σχεδιάζεται η κυματομορφή Ρεύματος – Χρόνου με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου υλοποιημένου σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Στη συνέχεια οι τέσσερις παράμετροι του ρεύματος (*t_r*, *I_{max}*, *I₃₀*, *I₆₀*) ελέγχονται αν βρίσκονται μέσα στα όρια που ορίζει το Πρότυπο [3]τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 2.1 που έχουμε παρουσιάσει.

5.4 Γραφικές παραστάσεις

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μια σειρά από γραφήματα που αφορούν το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης των τριών γεννητριών. Τα γραφήματα που προέκυψαν, για τα πρώτα 3 ns της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης καθώς και για τη συνολική διάρκεία της, ύστερα από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα Matlab για εκφορτίσεις επαφής για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 [32], NSG-438 [33] και DITO [34] υπό τάσεις ± 2 kV, ± 4 kV, ± 6 kV και ± 8 kV καθώς και τα αντίστοιχα παλμογραφήματά τους, είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 5.1: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 2 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.2: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 2 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.3: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -2 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.4: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -2 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.5.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.5.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.6.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.6.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.7.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.7.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.8.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.8.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.9: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 6 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.10: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 6 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.11: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -6 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.12: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -6 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.13: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 8 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.14: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης 8 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.15: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -8 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.16: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-433, Τάση φόρτισης -8 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.17: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 2 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.18: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 2 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.19: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -2 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.20: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -2 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.21.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.21.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.22.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.22.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.23.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.23.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.24.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.24.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την10η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.25: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 6 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.26: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεζεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 6 kV από 0 εως 80 ns)


Σχήμα 5.27: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -6 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.28: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -6 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.29: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 8 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.30: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης 8 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.31: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -8 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.32: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια NSG-438, Τάση φόρτισης -8 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.33: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 2 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.34: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 2 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.35: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -2 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.36: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -2 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.37.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.37.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.38.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.38.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.39.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.39.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την10η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.40.α: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.40.β: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 6η έως την 10η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -4 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.41: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 6 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.42: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 6 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.43: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -6 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.44: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -6 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.45: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 8 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.46: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης 8 kV από 0 εως 80 ns)



Σχήμα 5.47: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -8 kV από 0 εως 3 ns)



Σχήμα 5.48: Παλμογραφήματα σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων, για την 1η έως την 5η μέτρηση.(Γεννήτρια DITO, Τάση φόρτισης -8 kV από 0 εως 80 ns)

<u>Παρατηρήσεις</u>

Μπορούμε ότι λίγο μετά τα 2 ns και για περίπου 0.5 ns η κυματομορφή ξεπερνά τα όρια μέσα στα οποία το Πρότυπο [3] προτρέπει να είναι (±35% από την ιδανική κυματομορφή). Επίσης παρατηρούμε ότι η δεύτερη κορυφή του ρεύματος παρότι είναι μέσα στα όρια που προτρέπει το Πρότυπο [3] να είναι, δεν γίνεται αρκετά εμφανής.

5.5 Μετρήσεις για την επαλήθευση των γεννητριών NSG-433, NSG-438 και DITO σε τάσεις φόρτισης ±2kV, ±4kV, ±6kV, ±8kV

Για την επαλήθευση των γεννητριών έγιναν για κάθε γεννήτρια και για κάθε τάση φόρτισης πέντε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, πλύν της τάσης φόρτισης ±4 kV για την οποία έγιναν δέκα, και κατά συνέπεια πέντε και δέκα μετρήσεις του παραγόμενου ρεύματος εκφόρτισης αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 5.2 οι ίδιες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για την αρχή του φαινομένου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης(από 0 έως 3 ns) όσο και για τη συνολική διάρκειά του (από 0 έως 200 ns). Τα αποτελέσματα αυτά ήταν διαθέσιμα σε ηλεκτρονική μορφή. Από κάθε προκύπτουσα σειρά μέτρησης υπολογίσθηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα (I_{max} , t_r , I_{30} και I_{60}). Τα αποτελέσματα αυτά ήταν ορεύμα στους Πίνακες 5.3-5.14.

NSG-433 (Τάση φόρτισης +2 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$
1 ^η	8.1503	0.7245	3.6800	2.5383
2 ^η	8.1263	0.7372	3.6720	2.4080
3 ^η	8.3600	0.764	3.6630	2.4800
4^{η}	8.2081	0.7409	3.6800	2.6211
5 ^η	8.1200	0.7492	3.6720	2.5960
Μέση τιμή	8.1929	0.7431	3.6734	2.5286
Τυπική απόκλιση	0.0891	0.0131	0.0063	0.0775

Πίνακας 5.3.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 2

kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-433 (Τάση φόρτισης -2 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	<i>I</i> ₆₀ (A)
1 ^η	8.0000	0.7141	3.908	2.7080
2 ^η	8.1641	0.7081	3.7200	2.6093
3 ^η	7.9200	0.7085	3.7820	2.5160
4^{η}	7.7953	0.7115	3.8140	2.6280
5 ^η	7.9200	0.7132	3.800	2.4400
Μέση τιμή	7.9598	0.7118	3.8048	2.5802
Τυπική απόκλιση	0.1213	0.0024	0.0607	0.0929

Πίνακας 5.3.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -2

kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-433 (Τάση φόρτισης + 4kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	<i>I</i> ₆₀ (A)
1 ^η	15.3523	0.7331	7.1467	4.9733
2^{η}	15.3000	0.7290	7.2000	5.0000
3 ^η	15.5000	0.7576	6.8480	5.3280
4^{η}	15.7000	0.7655	6.8300	4.8000
5 ^η	15.3000	0.7349	7.2371	4.9629
6^{η}	15.5000	0.7358	6.8567	5.4000
7^{η}	15.5000	0.7227	7.0000	5.0650
8^{η}	15.5031	0.7364	7.1300	5.2950
9 ^η	16.1023	0.7292	6.9029	5.0057
10 ^η	15.5656	0.7446	6.9400	5.2000
Μέση τιμή	15.5323	0.7388	7.0091	5.1029
Τυπική απόκλιση	0.2232	0.0126	0.1481	0.1829

Πίνακας 5.4.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 4

NSG-433 (Τάση φόρτισης -4 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	<i>I</i> ₆₀ (A)
1^{η}	15.6000	0.7341	7.4860	5.0860
2^{η}	15.4000	0.7354	7.4050	5.1475
3^{η}	15.8000	0.7490	7.4057	4.3471
4 ^η	15.4023	0.7171	7.3000	4.1986
5 ^η	15.6000	0.7604	7.1000	4.7767
6^{η}	15.0547	0.7305	7.0100	4.6300
7^{η}	15.000	0.7066	7.3000	4.5900
8^{η}	15.4414	0.7390	7.6767	4.5000
9 ^η	15.6000	0.7436	7.0800	5.1900
10 ^η	15.2000	0.7508	7.4325	5.2000
Μέση τιμή	15.4098	0.7366	7.3195	4.7665
Τυπική απόκλιση	0.2449	0.0151	0.1961	0.3510

Πίνακας 5.4.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -4

kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-433 (Τάση φόρτισης +6 kV)				
α/α μέτρησης	Imax (A)	tr (ns)	I30 (A)	I60 (A)
1n	22.7000	0.7556	10.6062	7.7938
2ŋ	21.7516	0.7517	10.5867	7.6800
3ŋ	22.9000	0.7218	10.6800	7.4600
4ŋ	23.3000	0.7239	10.5950	7.79500
5n	22.5000	0.7373	10.5920	7.5920
Μέση τιμή	22.6303	0.7380	10.6119	7.6641
Τυπική απόκλιση	0.5128	0.0138	0.0346	0.1273

Πίνακας 5.5.α. Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 6

kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-433 (Τάση φόρτισης -6 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$
1 ^η	23.0000	0.7453	10.7700	8.0400
2 ^η	22.400	0.7294	10.5233	7.1000
3 ^η	23.0000	0.7208	10.8650	7.6050
4^{η}	22.6000	0.7313	10.7288	7.6712
5 ^η	22.2000	0.7300	10.5988	7.8050
Μέση τιμή	22.6400	0.7313	10.6971	7.6442
Τυπική απόκλιση	0.3200	0.0078	0.1219	0.3101

Πίνακας 5.5.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -6

NSG-433 (Τάση φόρτισης +8 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$
1 ^η	30.6000	0.7394	14.2900	9.7700
2 ^η	29.4156	0.7394	14.0000	10.0700
3 ^η	30.2312	0.7100	13.8133	10.1067
4^{η}	30.2000	0.7546	13.2600	10.3700
5 ^η	30.2000	0.7340	14.0000	10.3600
Μέση τιμή	30.1293	0.7354	13.8726	10.1353
Τυπική απόκλιση	0.3876	0.0144	0.3421	0.2209

Πίνακας 5.6.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 8

kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-433 (Τάση φόρτισης -8 kV)				
α/α μέτρησης	$I_{max}\left(\mathbf{A}\right)$	t_r (ns)	$I_{30}(\mathbf{A})$	<i>I</i> ₆₀ (A)
1 ^η	29.6000	0.7811	14.3200	10.0800
2 ^η	30.8000	0.7456	14.2000	10.1600
3 ^η	29.6109	0.7306	15.0000	10.2300
4^{η}	30.0000	0.7507	14.9400	10.0400
5^{η}	30.4078	0.7273	14.6900	10.1200
Μέση τιμή	30.0837	0.7470	14.6300	10.1260
Τυπική απόκλιση	0.4653	0.0191	0.3217	0.0656

Πίνακας 5.6.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -8

kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-438 (Τάση φόρτισης +2 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	<i>I</i> ₆₀ (A)
1 ^η	7.2800	0.9407	2.7360	2.0960
2^{η}	7.0469	0.8942	2.7136	2.0368
3 ^η	6.8800	0.8266	2.8800	2.1600
4^{η}	7.0478	0.9778	2.8112	2.2400
5^{η}	7.1297	0.9136	2.9600	2.2027
Μέση τιμή	7.0768	0.9105	2.8201	2.1471
Τυπική απόκλιση	0.1300	0.0505	0.0913	0.0730

Πίνακας 5.7.α. Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 2

NSG-438 (Τάση φόρτισης -2 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$
1 ^η	7.4400	0.9439	3.2608	2.0904
2 ^η	7.5787	0.9660	3.0800	2.1220
3 ^η	7.5200	0.9238	3.2370	2.1170
4^{η}	7.3600	0.9162	3.2053	2.1373
5 ^η	7.5513	0.9531	3.2152	2.2248
Μέση τιμή	7.4900	0.9406	3.1996	2.1383
Τυπική απόκλιση	0.0799	0.0184	0.0628	0.0458

Πίνακας 5.7.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -2

kV για τη γεννήτρια NSG-438

NSG-438 (Τάση φόρτισης + 4kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$
1 ^η	13.7383	0.8886	5.9680	4.4320
2 ^η	14.000	0.9192	5.8360	4.5280
3 ^η	14.2055	0.8774	5.9067	4.4000
4^{η}	14.0383	0.8703	5.6900	4.4067
5 ^η	14.4000	0.9200	5.9978	4.7956
6 ^η	14.4453	0.8477	6.2933	4.4000
7^{η}	14.4023	0.8709	5.8000	4.4000
8^{η}	13.8109	0.9535	5.7714	4.4000
9^{η}	14.4430	0.8641	5.8133	4.5867
10 ^η	14.1023	0.8595	5.7400	4.4000
Μέση τιμή	14.1585	0.8871	5.8816	4.4749
Τυπική απόκλιση	0.2497	0.0316	0.1653	0.1236

Πίνακας 5.8.α. Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 4

NSG-438 (Τάση φόρτισης - 4kV)				
α/α μέτρησης	$I_{max}(\mathbf{A})$	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}(\mathbf{A})$
1 ^η	14.4180	0.8832	6.1760	4.3140
2 ^η	14.0164	0.9102	6.4167	3.9333
3 ^η	14.2250	0.9188	6.6425	4.3000
4 ^η	14.2109	0.8742	6.5000	4.5000
5 ^η	14.6188	0.8709	6.0750	4.2167
6 ^η	14.4039	0.8348	6.4667	4.1833
7 ^η	14.6172	0.9035	6.1060	4.4880
8 ^η	14.8000	0.8967	6.5000	4.2025
9 ^η	15.0508	0.8971	6.3000	4.3000
10 ^η	15.0055	0.9666	6.2875	4.3000
Μέση τιμή	14.5366	0.8956	6.3470	4.2737

Τυπική απόκλιση	0.3275	0.0328	0.1790	0.1527

Πίνακας 5.8.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -4

kV	για	τη	γεννήτρια	NSG-438
----	-----	----	-----------	---------

NSG-438 (Τάση φόρτισης +6 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	<i>I</i> ₆₀ (A)
1 ^η	21.2023	0.8618	8.9975	6.7975
2 ^η	22.0578	0.9351	8.7312	6.6688
3 ^η	21.6000	0.8545	9.0986	7.2943
4^{η}	22.4352	0.9157	9.1000	6.9312
5 ^η	22.2000	0.8755	9.6557	6.9443
Μέση τιμή	21.8990	0.8885	9.1166	6.9272
Τυπική απόκλιση	0.4423	0.0315	0.3013	0.2091

Πίνακας 5.9.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 6

kV για τη γεννήτρια NSG-438

NSG-438 (Τάση φόρτισης -6 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$
1 ^η	21.8203	0.9657	9.4850	6.8850
2 ^η	21.8000	0.9045	9.2275	6.3900
3 ^η	22.4672	0.9456	9.3000	6.5163
4^{η}	22.2000	0.9474	9.3000	6.4514
5 ^η	22.2789	0.9191	9.0567	6.5000
Μέση τιμή	22.1132	0.9364	9.2738	6.5485
Τυπική απόκλιση	0.2624	0.0218	0.1380	0.1739

Πίνακας 5.9.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -6

kV για τη γεννήτρια NSG-438

NSG-438 (Τάση φόρτισης +8 kV)				
α/α μέτρησης	$I_{max}(\mathbf{A})$	t_r (ns)	$I_{30}(\mathbf{A})$	$I_{60}(A)$
1 ^η	30.0000	0.9254	12.8960	9.0000
2 ^η	30.0109	0.9184	11.9400	8.6200
3 ^η	29.2047	0.9458	11.8000	9.1650
4^{η}	30.0938	0.9235	12.2067	9.4200
5 ^η	30.0094	0.9158	13.0000	9.5050
Μέση τιμή	29.8637	0.9257	12.3685	9.1420
Τυπική απόκλιση	0.3313	0.0106	0.4919	0.3169

Πίνακας 5.10.α. Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 8

NSG-438 (Τάση φόρτισης -8 kV)				
α/α μέτρησης	$I_{max}(\mathbf{A})$	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}(A)$
1 ^η	30.0060	0.9028	13.1400	9.6600
2 ^η	30.8000	0.9590	13.4000	10.4867
3 ^η	30.1030	0.9176	13.0943	9.2829
4^{η}	30.4500	0.9492	13.1560	9.8000
5 ^η	30.8000	0.9545	13.0000	10.2000
Μέση τιμή	30.4318	0.9366	13.1580	9.8859
Τυπική απόκλιση	0.3349	0.0223	0.1326	0.4199

Πίνακας 5.10.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -8

kV για τη γεννήτρια NSG-438

DITO (Τάση φόρτισης +2 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}\left(\mathrm{A}\right)$
1 ^η	7.1684	0.7320	4.2773	2.4680
2 ^η	8.2000	0.6128	3.6320	2.4230
3 ^η	8.0884	0.7419	3.4688	2.3250
4 ^η	7.8806	0.8577	3.3954	2.5180
5 ^η	7.4800	0.8928	3.6667	2.2580
Μέση τιμή	7.7634	0.7674	3.6880	2.3984
Τυπική απόκλιση	0.3858	0.0997	0.3113	0.0947

Πίνακας 5.11.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 2

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης -2 kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$
1 ^η	7.4595	0.8686	3.7600	2.4560
2 ^η	7.4400	0.8641	3.5680	2.3280
3 ^η	7.6000	0.8863	3.9040	2.2580
4^{η}	6.9603	0.8585	3.7440	2.4760
5 ^η	7.0453	0.8622	3.4400	2.5120
Μέση τιμή	7.3010	0.8679	3.6832	2.4060
Τυπική απόκλιση	0.2511	0.0097	0.1617	0.0966

Πίνακας 5.11.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -2

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης + 4kV)				
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	$I_{60}(A)$
1 ^η	15.5891	0.8682	7.4533	4.4560
2 ^η	14.7055	0.8503	8.3000	4.2350
3 ^η	14.7805	0.8638	8.0533	4.5860
4^{η}	14.7523	0.8511	8.5400	4.6570
5 ^η	14.7563	0.8607	7.7067	4.6520
6 ^η	15.1000	0.8421	7.6700	4.2590
7^{η}	14.5000	0.8544	8.1500	4.4720
8 ^η	14.9227	0.8591	7.8133	4.7590
9 ^η	14.9148	0.8584	7.9400	4.3170
10 ^η	14.5000	0.8739	8.0000	4.7610
Μέση τιμή	14.8521	0.8582	7.9626	4.5154
Τυπική απόκλιση	0.3012	0.0088	0.3042	0.1877

Πίνακας 5.12.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 4

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης - 4kV)					
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	<i>I</i> ₆₀ (A)	
1 ^η	14.7000	0.8850	8.5300	4.5890	
2 ^η	14.7508	0.8430	7.8000	4.2570	
3 ^η	14.5016	0.8680	7.7800	4.8710	
4 ^η	14.9023	0.8590	7.8933	4.2580	
5 ^η	14.5188	0.8180	7.7600	4.7290	
6^{η}	14.5320	0.8680	8.4200	4.5730	
7 ^η	14.3000	0.8290	7.9100	4.2670	
8^{η}	14.5000	0.8760	7.8000	4.8610	
9 ^η	14.7102	0.8590	7.2000	4.9430	
10 ^η	14.5000	0.8380	8.0200	4.2730	
Μέση τιμή	14.5915	0.8543	7.9113	4.5621	
Τυπική απόκλιση	0.1632	0.0205	0.3499	0.2674	

Πίνακας 5.12.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -4

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης +6 kV)					
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(\mathbf{A})$	$I_{60}\left(\mathrm{A}\right)$	
1 ^η	21.5195	0.8834	12.6371	6.8450	
2 ^η	21.3438	0.8753	12.6480	6.9720	
3 ^η	20.9000	0.8595	12.6080	6.8240	
4 ^η	22.1281	0.8615	13.1700	6.6740	
5 ^η	21.3000	0.8528	12.7760	6.8190	
Μέση τιμή	21.4382	0.8665	12.7678	6.8268	

Τυπική απόκλιση	0.4001	0.0112	0.2092	0.0947

Πίνακας 5.13.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 6

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης -6 kV)							
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$			
1 ^η	21.6953	0.8569	11.6900	6.5380			
2 ^η	22.3141	0.8476	12.0400	6.5470			
3 ^η	21.5008	0.8531	13.1100	6.7820			
4 ^η	21.9039	0.8269	13.0400	6.8790			
5 ^η	21.9000	0.8471	10.1800	6.7160			
Μέση τιμή	21.8628	0.8463	12.0120	6.6920			
Τυπική απόκλιση	0.2705	0.0104	1.0699	0,1330			

Πίνακας 5.13.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -6

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης +8 kV)							
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$			
1 ^η	28.4187	0.8860	16.9600	6.5890			
2 ^η	28.4000	0.8812	16.7867	6.6570			
3 ^η	32.8047	0.9024	17.1600	6.5730			
4 ^η	34.1797	0.8750	17.6000	6.8740			
5 ^η	32.0500	0.8554	18.0000	6.9810			
Μέση τιμή	31.1706	0.8800	17.3013	6.7348			
Τυπική απόκλιση	2.3557	0.0153	0.4424	0.1634			

Πίνακας 5.14.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης 8

kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης -8 kV)							
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	$I_{60}\left(\mathbf{A}\right)$			
1 ^η	32.2359	0.9684	14.5200	6.8740			
2 ^η	31.8000	0.8544	16.5800	6.2590			
3 ^η	29.6937	0.7762	14.4000	6.5490			
4^{η}	30.2000	0.8111	15.6000	6.7820			
5 ^η	29.4953	0.8498	17.3400	6.9470			
Μέση τιμή	30.6849	0.8519	15.6880	6.6822			
Τυπική απόκλιση	1.1209	0.0648	1.1450	0.2505			

Πίνακας 5.14.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης για τάση φόρτισης -8

kV για τη γεννήτρια DITO

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όλες οι τιμές των παραμέτρων $(t_r, I_{max}, I_{30}, I_{60})$ βρίσκονται μέσα στα όρια που ορίζει το Πρότυπο [3] και τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 2.1 που έχουμε παρουσιάσει.

5.6 Εισαγωγή στην αβεβαιότητα των μετρήσεων

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν περιορίζεται σε καμία περίπτωση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αφού πρόκειται για μία στοχαστική μεταβλητή και η αποδιδόμενη τιμή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα, και αποκαλείται τότε τυπική αβεβαιότητα (standard uncertainty), είτε ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή, με μια ορισμένη στάθμη σιγουριάς ή εμπιστοσύνης, και αποκαλείται διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty).

Πρέπει να τονιστεί ότι, η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την ποιότητα μίας μέτρησης και πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμα της. Δεν αφορά άμεσα τα παρατηρούμενα μεγέθη, τα οποία είναι δεδομένα και ανεξάρτητα από τη δυνατότητα του παρατηρητή να τα προσεγγίσει. Η αβεβαιότητα αφορά πάντα μια συγκεκριμένη τιμή, όπως αυτή εκτιμήθηκε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με συγκεκριμένη διαδικασία, και χαρακτηρίζει τη γνώση που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Είναι επομένως δυνατόν, κάποιος άλλος να δώσει μια άλλη εκτίμηση τόσο για την τιμή του ίδιου μεγέθους όσο και για την αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή αυτή.

Στα φαινόμενα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ο υπολογισμός αβεβαιότητας είναι ένας κατάλογος των πιθανών πηγών λάθους με μια εκτίμηση των ορίων αβεβαιότητάς τους και της κατανομής πιθανότητας τους. Είναι πιθανό μερικές συνεισφορές αβεβαιότητας να μην είναι οι ίδιες σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης και θα πρέπει να ληφθεί μια απόφαση για την κατάλληλη διακοπή της. Ένας απλός υπολογισμός που καλύπτει όλη τη διάρκεια της μέτρησης μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την απαραίτητη. Εντούτοις, αυτό μπορεί να είναι προτιμότερο σε μερικές περιπτώσεις όπου δεν είναι απαραίτητο να δυσκολέψει υπερβολικά ο υπολογισμός και η παρουσίαση της διαδικασίας.

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: η αβεβαιότητα τύπου Α, που υπολογίζεται με στατιστικές μεθόδους, και η αβεβαιότητα τύπου Β, που υπολογίζεται με άλλα μέσα.
Η αβεβαιότητα τύπου Α προκύπτει από την τυπική απόκλιση (standard deviation) του αποτελέσματος, και υπολογίζονται από τον τύπο 2.2, που ξαναπαρουσιάζεται εδώ:

$$U_{C}(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} (u_{j} - \overline{u})^{2}}$$
(5.1)

Η αβεβαιότητα τύπου B, η οποία γενικά σχετίζεται με αστοχίες, απώλειες καλωδίου και μη γραμμικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, αν και δεν προκύπτει από κάποια στατιστική επεξεργασία, μπορεί να υπολογιστεί από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης, δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις, χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης ή απλά μέσα από την εμπειρία και τις επιστημονικές γνώσεις του μετρολόγου. Η αβεβαιότητα τύπου B προκύπτει από την εφαρμογή του διαιρέτη στην κατανομή πιθανότητας. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι 95%, η τιμή του συντελεστή k για την κανονική κατανομή είναι 2, στην περίπτωση της ορθογώνιας κατανομής είναι $\sqrt{3}$ και στην περίπτωση της κατανομής μορφής U είναι $\sqrt{2}$.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από το άθροισμα όλων των επιμέρους συνιστωσών.

Σύμφωνα με το Πρότυπο [3] για εργαστήρια τα οποία διεξάγουν διακριβώσεις συνιστώνται τα ακόλουθα όρια τελικής συνδυασμένης αβεβαιότητας:

Χρόνος ανόδου t _r	$MU \le 15\%$
Κορυφή του ρεύματος Ι _p	$MU \le 7\%$
Ρεύμα στα 30 ns I_{30}	$MU \leq 7\%$
Ρεύμα στα 60 ns I ₆₀	$MU \le 7\%$

5.7 Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου Α

Στους Πίνακες 5.15 – 5.17 φαίνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες τύπου Α για τις παραμέτρους I_{max} , t_r , I_{30} και I_{60} .

I	NSG-433 (Τάση φόρτισης + 4kV)					
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	I ₆₀ (A)		
1 ^η	15.3523	0.7331	7.1467	4.9733		
2 ^η	15.3000	0.7290	7.2000	5.0000		
3 ^η	15.5000	0.7576	6.8480	5.3280		
4 ^η	15.7000	0.7655	6.8300	4.8000		
5 ^η	15.3000	0.7349	7.2371	4.9629		
6 ^η	15.5000	0.7358	6.8567	5.4000		
7 ^η	15.5000	0.7227	7.0000	5.0650		
8 ^η	15.5031	0.7364	7.1300	5.2950		
9 ^η	16.1023	0.7292	6.9029	5.0057		
10 ^η	15.5656	0.7446	6.9400	5.2000		
Μέση τιμή	15.5323	0.7388	7.0091	5.1029		
Αβεβαιότητα τύπου Α	0.2353	0.0133	0.1561	0.1928		

Πίνακας 5.15.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητα

τύπου Α για τάση φόρτισης 4 kV για τη γεννήτρια NSG-433

	NSG-433 (Τάση φόρτισης -4 kV)					
α/α μέτρησης	$I_{max}(\mathbf{A})$	t_r (ns)	$I_{30}(A)$	<i>I</i> ₆₀ (A)		
1 ^η	15.6000	0.7341	7.4860	5.0860		
2 ^η	15.4000	0.7354	7.4050	5.1475		
3 ^η	15.8000	0.7490	7.4057	4.3471		
4 ^η	15.4023	0.7171	7.3000	4.1986		
5 ^η	15.6000	0.7604	7.1000	4.7767		
6 ^η	15.0547	0.7305	7.0100	4.6300		
7 ^η	15.000	0.7066	7.3000	4.5900		
8 ^η	15.4414	0.7390	7.6767	4.5000		
9 ^ŋ	15.6000	0.7436	7.0800	5.1900		
10 ^η	15.2000	0.7508	7.4325	5.2000		
Μέση τιμή	15.4098	0.7366	7.3195	4.7665		
Αβεβαιότητα τύπου Α	0.2581	0.0159	0.2068	0.3702		

Πίνακας 5.15.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητα τύπου Α για τάση φόρτισης -4 kV για τη γεννήτρια NSG-433

NSG-438 (Τάση φόρτισης + 4kV)						
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(\mathbf{A})$	$I_{60}(\mathbf{A})$		
1 ^η	13.7383	0.8886	5.9680	4.4320		
2 ^η	14.0000	0.9192	5.8360	4.5280		
3 ^η	14.2055	0.8774	5.9067	4.4000		
4 ^η	14.0383	0.8703	5.6900	4.4067		
5 ^η	14.4000	0.9200	5.9978	4.7956		
6 ^η	14.4453	0.8477	6.2933	4.4000		
7 ^η	14.4023	0.8709	5.8000	4.4000		
8^{η}	13.8109	0.9535	5.7714	4.4000		
9 ^ŋ	14.4430	0.8641	5.8133	4.5867		
10 ^η	14.1023	0.8595	5.7400	4.4000		
Μέση τιμή	14.1585	0.8871	5.8816	4.4749		
Αβεβαιότητα τύπου Α	0.2631	0.0333	0.1742	0.1302		

Πίνακας 5.16.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητα τύπου Α για τάση φόρτισης 4 kV για τη γεννήτρια NSG-438

NSG-438 (Τάση φόρτισης - 4kV)						
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}\left(\mathrm{A}\right)$	$I_{60}\left(\mathrm{A}\right)$		
1 ^η	14.4180	0.8832	6.1760	4.3140		
2 ^η	14.0164	0.9102	6.4167	3.9333		
3 ^η	14.2250	0.9188	6.6425	4.3000		
4 ^η	14.2109	0.8742	6.5000	4.5000		
5 ^η	14.6188	0.8709	6.0750	4.2167		
6 ^η	14.4039	0.8348	6.4667	4.1833		
7 ^η	14.6172	0.9035	6.1060	4.4880		
8 ^η	14.8000	0.8967	6.5000	4.2025		
9 ^ŋ	15.0508	0.8971	6.3000	4.3000		
10 ^η	15.0055	0.9666	6.2875	4.3000		
Μέση τιμή	14.5366	0.8956	6.3470	4.2737		
Αβεβαιότητα τύπου Α	0.3451	0.0346	0.1886	0.1609		

Πίνακας 5.16.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητα τύπου Α για τάση φόρτισης -4 kV για τη γεννήτρια NSG-438

	DITO (Τάση φόρτισης + 4kV)						
α/α μέτρησης	$I_{max}(\mathbf{A})$	t_r (ns)	$I_{30}(\mathbf{A})$	$I_{60}(A)$			
1 ^η	15.5891	0.8682	7.4533	4.4560			
2 ^η	14.7055	0.8503	8.3000	4.2350			
3 ^η	14.7805	0.8638	8.0533	4.5860			
4 ^η	14.7523	0.8511	8.5400	4.6570			
5 ^η	14.7563	0.8607	7.7067	4.6520			
6 ^η	15.1000	0.8421	7.6700	4.2590			
7 ^η	14.5000	0.8544	8.1500	4.4720			
8 ^η	14.9227	0.8591	7.8133	4.7590			
9 ^η	14.9148	0.8584	7.9400	4.3170			
10 ^η	14.5000	0.8739	8.0000	4.7610			
Μέση τιμή	14.8521	0.8582	7.9626	4.5154			
Αβεβαιότητα τύπου Α	0.3174	0.0092	0.3206	0.1979			

Πίνακας 5.17.α: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητα τύπου Α για τάση φόρτισης 4 kV για τη γεννήτρια DITO

DITO (Τάση φόρτισης - 4kV)						
α/α μέτρησης	I_{max} (A)	t_r (ns)	$I_{30}(\mathbf{A})$	<i>I</i> ₆₀ (A)		
1 ^η	14.7000	0.8850	8.5300	4.5890		
2 ^η	14.7508	0.8430	7.8000	4.2570		
3 ^η	14.5016	0.8680	7.7800	4.8710		
4 ^η	14.9023	0.8590	7.8933	4.2580		
5 ^η	14.5188	0.8180	7.7600	4.7290		
6 ^η	14.5320	0.8680	8.4200	4.5730		
7 ^η	14.3000	0.8290	7.9100	4.2670		
8 ^η	14.5000	0.8760	7.8000	4.8610		
9 ^ŋ	14.7102	0.8590	7.2000	4.9430		
10 ^η	14.5000	0.8380	8.0200	4.2730		
Μέση τιμή	14.5915	0.8543	7.9113	4.5621		
Αβεβαιότητα τύπου Α	0.1720	0.0215	0.3688	0.2818		

Πίνακας 5.17.β: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητα

τύπου Α για τάση φόρτισης -4 kV για τη γεννήτρια DITO

5.8 Υπολογισμός αβεβαιότητας τύπου Β

Στους πίνακες 5.18 - 5.41 φαίνεται ο υπολογισμός της αβεβαιότητας τύπου Β για τις τρεις γεννήτριες που χρησιμοποιήσαμε για τάση φόρτισης ± 4 kV. Αξίζει να σημειωθεί ότι τις τιμές των συντελεστών που συμβάλλουν στην αβεβαιότητα τύπου Β, τις αντλήσαμε από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης και τα εγχειρίδια του εξοπλισμού που χρησιμοποιήσαμε, καθώς και από τους Πίνακες Ε.1, Ε.2 και Ε.3 του Προτύπου [3].

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$u_i(y)^2$
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου Ι ₉₀	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι ₁₀	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου- εξασθενητή-καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	4.2	4.2	17.6
			Άθροισμα	1583.6
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	39.8
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	79.6 (9.95%)		

Πίνακας 5.18: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t_r

της γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$\frac{u_i(y)^2}{(ps^2)}$
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720
Αστοχία: αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0740	0.074	0.0055
			Άθροισμα	0.1795
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4237
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8474 (5.65%)		

Πίνακας 5.19: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.19	Κανονική k = 2	0.8474	0.4237	0.1795
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0493	0.0493	0.00243
			Άθροισμα	0.1821
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4267
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8535 (5.690%)		

Πίνακας 5.20: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I₃₀ της γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.19	Κανονική k = 2	0.8474	0.4237	0.1795
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0609	0.0609	0.0037
			Άθροισμα	0.1834
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4282
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8565 (5.710%)		

Πίνακας 5.21: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₆₀ της

γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$\frac{u_i(y)^2}{(ps^2)}$
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου Ι ₉₀	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι ₁₀	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	5	5	25
			Άθροισμα	1591
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	39.8800
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	79.7 (9.97%)		

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720
Αστοχία: αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0810	0.0810	0.0066
			Άθροισμα	0.1743
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4174
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8349 (5.56%)		

Πίνακας 5.22: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t _r
της γεννήτριας NSG-433 στα -4 kV

Πίνακας 5.23: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της γεννήτριας NSG-433 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.23	Κανονική k = 2	0.8349	0.4174	0.1742
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0653	0.0653	0.0042
			Άθροισμα	0.1839
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4289
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8578 (5.718%)		

Πίνακας 5.24: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₃₀ της

γεννήτριας NSG-433 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.23	Κανονική k = 2	0.8349	0.4174	0.1742
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = $\sqrt{3}$	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.1170	0.1170	0.0137
			Άθροισμα	0.1934
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4397
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8795 (5.863%)		

Πίνακας 5.25: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₆₀ της

γεννήτριας NSG-433 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$\frac{u_i(y)^2}{(ps^2)}$
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου 190	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι10	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	10.53	10.53	110.88
			Άθροισμα	1676.88
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	40.94
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	81.89 (10.23%)		

Πίνακας 5.26: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t_r

της γεννήτριας NSG-438 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720
Αστοχία:αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0830	0.0830	0.0069
			Άθροισμα	0.1746
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4178
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8357 (5.57%)		

Πίνακας 5.27: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της

γεννήτριας NSG-438 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.27	Κανονική k = 2	0.8357	0.4178	0.1745
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0550	0.0550	0.0030
			Άθροισμα	0.1827
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4274
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8549 (5.699 %)		

Πίνακας 5.28: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₃₀ της

γεννήτριας NSG-438 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.27	Κανονική k = 2	0.8357	0.4178	0.1745
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = $\sqrt{3}$	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0411	0.0411	0.0016
			Άθροισμα	0.1813
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4257
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8515 (5.677 %)		

Πίνακας 5.29: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₆₀ της

γεννήτριας NSG-438 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$ \begin{array}{c} u_i(y)^2 \\ (ps^2) \end{array} $
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου 190	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι10	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	10.94	10.94	119.71
			Άθροισμα	1685.70
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	41.05
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	82.11 (10.26%)		

Πίνακας 5.30: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t_r

της γεννήτριας NSG-438 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720
Αστοχία: μετρητική αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.1090	0.1090	0.0119
			Άθροισμα	0.1796
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4237
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8475 (5.65%)		

Πίνακας 5.31: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της

γεννήτριας NSG-438 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.31	Κανονική k = 2	0.8475	0.4237	0.1795
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0596	0.0596	0.0035
			Άθροισμα	0.1832
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4280
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8560 (5.70 %)		

Πίνακας 5.32: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₃₀ της

γεννήτριας NSG-438 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.31	Κανονική k = 2	0.8475	0.4237	0.1795
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = $\sqrt{3}$	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0508	0.0508	0.0025
			Άθροισμα	0.1822
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4268
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8536 (5.69 %)		

Πίνακας 5.33: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₆₀ της

γεννήτριας NSG-438 στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$ \begin{array}{c} u_i(y)^2 \\ (ps^2) \end{array} $
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου 190	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι10	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	2.91	2.91	8.46
			Άθροισμα	1574.46
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	39.67
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	79.35 (9.91%)		

Πίνακας 5.34: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t_r

της γεννήτριας DITO στα 4 kV

Συντελεστής	υντελεστής Κατανομή Τιμή (Α)		u _i (y) (A)	$u_{i}(y)^{2}(A^{2})$	
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507	
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720	
Αστοχία: αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450	
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.1000	0.1000	0.0100	
			Άθροισμα	0.1777	
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4215	
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8430 (5.62%)			

Πίνακας 5.35: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της

γεννήτριας DITO στα 4 kV

Συντελεστής	Ουντελεστής Κατανομή		u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.35	Κανονική k = 2	0.8430	0.4215	0.1776
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.1013	0.1013	0.0102
			Άθροισμα	0.1899
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4357
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8715 (5.81 %)		

Πίνακας 5.36: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₃₀ της

γεννήτριας DITO στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.35	Κανονική k = 2	0.8430	0.4215	0.1776
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = $\sqrt{3}$	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0625	0.0625	0.0039
			Άθροισμα	0.1836
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4284
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8569 (5.71 %)		

Πίνακας 5.37: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₆₀ της

γεννήτριας DITO στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$u_i(y)^2$ (ps ²)
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου 190	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι10	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	6.79	6.79	46.22
			Άθροισμα	1612.22
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	40.15
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	80.30 (10.03%)		

Πίνακας 5.38: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t_r

της γεννήτριας DITO στα -4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720
Αστοχία: αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0543	0.0543	0.0029
			Άθροισμα	0.1706
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4230
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8260 (5.51%)		

Πίνακας 5.39: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της

γεννήτριας DITO στα -4 kV

Συντελεστής	ντελεστής Κατανομή		u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.39	Κανονική k = 2	0.8260	0.4130	0.1705
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.1166	0.1166	0.0136
			Άθροισμα	0.1933
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4396
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8793 (5.86 %)		

Πίνακας 5.40: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το Ι₃₀ της

γεννήτριας DITO στα -4 kV

Συντελεστής	Συντελεστής Κατανομή		u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα 5.39	Κανονική k = 2	0.8260	0.4130	0.1705
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = $\sqrt{3}$	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0891	0.0891	0.0079
			Άθροισμα	0.1876
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4331
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.866 (5.77%)		

Πίνακας 5.41: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I₆₀ της γεννήτριας DITO στα -4 kV

Τώρα είμαστε έτοιμοι να υπολογίσουμε την τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα η οποία είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δυο αβεβαιοτήτων. Στους Πίνακες 5.42 - 5.44 φαίνονται τα αποτελέσματα.

Τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα	I _{max} (A)	<i>t_r</i> (ps)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
MU στα 4 kV	0.8794 (5.86%)	80.70 (10.08%)	0.8676 (5.78%)	0.8779 (5.85%)
MU στα -4 kV	0.8738 (5.82%)	81.33 (10.16%)	0.8823 (5.88%)	0.9542 (6.36%)

Πίνακας 5.42: Τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα για τη γεννήτρια NSG-433

Τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα	I _{max} (A)	<i>t_r</i> (ps)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
MU στα 4 kV	0.8933 (5.95%)	88.40 (11.05%)	0.8724 (5.81%)	0.8613 (5.74%)
MU στα -4 kV	0.9150 (6.1%)	89.10 (11.13%)	0.8765 (5.84%)	0.8686 (5.79%)

Πίνακας 5.43: Τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα για τη γεννήτρια NSG-438

Τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα	I _{max} (A)	<i>t_r</i> (ps)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
MU στα 4 kV	0.9000 (6.00%)	79.88 (9.98%)	0.9285 (6.19%)	0.8794 (5.86%)
MU στα -4 kV	0.8437 (5.62%)	83.12 (10.39%)	0.9535 (6.35%)	0.9100 (6.07%)

Πίνακας 5.44: Τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα για τη γεννήτρια DITO

Τα όρια που ορίζει το Πρότυπο [3] για την τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι:

Χρόνος ανόδου t _r	$MU \le 15\%$
Κορυφή του ρεύματος Ι _p	$MU \leq 7\%$
Ρεύμα στα 30 ns I ₃₀	$MU \leq 7\%$
Ρεύμα στα 60 ns I_{60}	$MU \le 7\%$

Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι και οι τρεις γεννήτριες είναι εντός αυτών των ορίων.

Κεφάλαιο 6

Η επόμενη μέρα

6.1 Απολογισμός εργασίας και προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με την επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν στο κέντρο κατακόρυφου γειωμένου επιπέδου διακρίβωσης. Εκτός των τεσσάρων παραμέτρων (t_r , I_{max} , I_{30} , I_{60}) υπολογίστηκαν και οι αβεβαιότητες των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και ελέγχθηκε αν βρίσκονται εντός των ορίων που θέτει το Πρότυπο [3]. Επίσης ελέγχθηκε και η προτροπή του Προτύπου [3], η κυματομορφή του ρεύματος να είναι εντός του 65%·I(t) and 135%·I(t), για χρόνο από 2 ns έως 60 ns, όπου το I(t) δίνεται από την αναλυτικό τύπο που ορίζει το Πρότυπο [3]. Τέλος στο Παράρτημα παρουσιάζεται η τεχνική οδηγία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, σκοπός της οποίας είναι να περιγράψει τη διαδικασία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το Πρότυπο [3].

Η παρούσα διπλωματική εργασία κατέδειξε την χρησιμότητα των αλλαγών που έγιναν στο Πρότυπο [3], και κυρίως την εισαγωγή της αβεβαιότητας των μετρήσεων σαν μια παράμετρο την οποία πρέπει να πληρούν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, γεγονός που τις καθιστά πολύ πιο αξιόπιστες. Επίσης παρατηρήθηκε και για τις τρεις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, για κάποιες τάσεις φόρτισης για χρόνο λίγο μετά τα 2 ns και για περίπου 0.5 ns, ότι η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δεν βρίσκεται εντός του $\pm 35\% \cdot I(t)$. Καθίσταται λοιπόν φανερό ότι χρειάζεται περαιτέρω μελέτη τόσο σχετικά με τις παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης $(t_r, I_{max}, I_{30}, I_{60})$, αλλά και με τα χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρούν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έτσι ώστε να επιτευχθεί με το μεγαλύτερο δυνατό επίπεδο αξιοπιστίας.

<u>Παράρτημα</u>

ΟΔΗΓΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο Παράρτημα αυτό βρίσκεται η τεχνική οδηγία επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

1 ΣΚΟΠΟΣ

1.1 Σκοπός της Οδηγίας αυτής είναι να περιγράψει τη διαδικασία επαλήθευσης
 των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ
 61000-4-2:2009.

2 ΣΧΕΤΙΚΑ ΕΓΓΡΑΦΑ

- ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2:2009, Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα(EMC) Μέρος
 4-2: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.
- Εγχειρίδια λειτουργίας των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG
 433 και NSG 438 της SCHAFFNER και Dito της EM TEST.
- Εγχειρίδια λειτουργίας του παλμογράφου ΤΕΚΤRONIX TDS 7254B.
- Εγχειρίδια λειτουργίας του ομοαξονικού προσαρμοστή μέτρησης (Pellegrini Target) TESEQ MD 103.

3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

3.1 Σύμφωνα με το Πρότυπο το ρεύμα εκφόρτισης θα πρέπει να έχει την κυματομορφήπου φαίνεται στο Σχήμα Π.1.



Σχήμα Π.1: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4 kV

- 3.2 Τα τέσσερα βασικά μεγέθη που ορίζει το Πρότυπο είναι:
 - Το μέγιστο ρεύμα (I_{max}).
 - Ο χρόνος ανόδου (t_r), ο οποίος ισούται με τη διαφορά του χρόνου όπου το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά το 90% του I_{max} μείον το χρόνο όπου το ρεύμα λαμβάνει για πρώτη φορά το 10% του I_{max}.
 - Το ρεύμα σε χρόνο 30 ns από τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει τιμή ίση με 10% του μέγιστης τιμής του, I₃₀.
 - Το ρεύμα σε χρόνο 60 ns από τη στιγμή που το ρεύμα θα λάβει τιμή ίση με 10% του μέγιστης τιμής του, I₆₀.
- 3.3 Ελέγχεται αν οι παράμετροι του ρεύματος, που παράγει η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, η γεννήτρια παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις επαφής πάνω στον ομοαξονικό προσαρμοστή. Στον Πίνακα Π.1 φαίνονται τα όρια στα οποία πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων.

Αναγραφόμενη τάση (kV)	Μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης ±15% (A)	Χρόνος ανόδου t _r ±25% (ns)	Ρεύμα ±30% στα 30 ns (A)	Ρεύμα ±30% στα 60 ns (A)
2.0	7.5	0.8	4.0	2.0
4.0	15.0	0.8	8.0	4.0
6.0	22.5	0.8	12.0	6.0
8.0	30.0	0.8	16.0	8.0

Πίνακας Π.1: Παράμετροι της κυματομορφής της υπό εξέταση γεννήτριας

3.4 Το ρεύμα εκφόρτισης, μετατρέπεται σε τάση από τον ομοαξονικό προσαρμοστή, διέρχεται από εξασθενητή (attenuator) ο οποίος είναι ενσωματωμένος πάνω του και οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου υψηλής συχνότητας (RF) σε ένα από τα 4 κανάλια του παλμογράφου, οπότε η κυματομορφή του ρεύματος καταγράφεται.

3.5 Κατόπιν ελέγχεται, με τη βοήθεια ενός προγράμματος σε Matlab, αν οι τέσσερις προαναφερθείσες παράμετροι είναι εντός των ορίων.

3.6 Για την επαλήθευση είναι απαραίτητη η χρήση του κλωβού Faraday, ώστε ο παλμογράφος, ο οποίος βρίσκεται εντός του κλωβού, να μην επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές - διαταραχές.

4 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: την αβεβαιότητα Τύπου Α, η οποία χρειάζεται 10 τουλάχιστον μετρήσεις, που υπολογίζεται με στατιστικές μεθόδους και την αβεβαιότητα Τύπου Β, που υπολογίζεται με άλλα μέσα.

Η αβεβαιότητα τύπου Α προκύπτει από την τυπική απόκλιση (standard deviation) μιας σειράς δοκιμών. Συνήθως ακολουθεί την κανονική κατανομή ή την κατανομή Gauss. Υπολογίζεται από τον τύπο Π.2.

$$U_{C}(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n} (u_{j} - \overline{u})^{2}}$$
(II.1)

 Η αβεβαιότητα τύπου Β, η οποία γενικά σχετίζεται με αστοχίες, απώλειες καλωδίου και μη γραμμικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, αν και δεν προκύπτει από κάποια στατιστική επεξεργασία, μπορεί να υπολογιστεί από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης, δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις, χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης ή απλά μέσα από την εμπειρία και τις επιστημονικές γνώσεις του μετρολόγου. Η αβεβαιότητα τύπου Β προκύπτει από την εφαρμογή του διαιρέτη στην κατανομή πιθανότητας. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι 95%, η τιμή του συντελεστή k για την κανονική κατανομή είναι 2, στην περίπτωση της ορθογώνιας κατανομής είναι $\sqrt{3}$ και στην περίπτωση της μορφής U είναι $\sqrt{2}$.

Παρατίθεται παράδειγμα υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β. Αξίζει να σημειωθεί οτι οι τιμές των παραμέτρων που συντελούν στην αβεβαιότητα τύπου Β ελήφθησαν από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης του εξοπλισμού του εργαστηρίου και από τους πίνακες Ε.1, Ε.2 και Ε.3 του Προτύπου [3].

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$u_i(y)^2$
Ανάγνωση της μέγιστης τιμής	Κανονική k = 2	50	25	625
Ανάγνωση του χρόνου Ι ₉₀	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Ανάγνωση του χρόνου Ι ₁₀	Ορθογώνια διαιρέτης = 3	25	14	196
Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	36	18	324
Μετρητική αλυσίδα στόχου- εξασθενητή-καλωδίου	Κανονική k=2	30	15	225
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	4.2	4.2	17.6
			Άθροισμα	1583.6
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	39.8
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k=2	79.6 (9.95%)		

Πίνακας Π.2: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το χρόνο ανόδου t_r

της γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (ps)	u _i (y) (ps)	$\frac{u_i(y)^2}{(ps^2)}$
Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική k = 2	0.4800	0.2400	0.0507
Μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή- καλωδίου	Κανονική k = 2	0.5400	0.2700	0.0720
Αστοχία: αλυσίδα προς παλμογράφο	Μορφής U διαρέτης = √2	0.3000	0.2100	0.0450
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0740	0.074	0.0055
			Άθροισμα	0.1795
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4237
Διευρυμένη αβεβαιότητα	k = 2	0.8474 (5.65%)		

Πίνακας Π.3: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I_{max} της γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Συντελεστής	Κατανομή	Τιμή (Α)	u _i (y) (A)	$u_i(y)^2 (A^2)$
Αβεβαιότητα του Πίνακα Π.3	Κανονική k = 2	0.8474	0.4237	0.1795
Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογώνια k = √3	0.0255	0.0147	0.0002
Επαναληψιμότητα	Κανονική διαιρέτης = 1	0.0493	0.0493	0.00243
			Άθροισμα	0.1821
Συνδυασμένη αβεβαιότητα			Τετραγωνική ρίζα	0.4267
Διευρυμένη αβεβαιότητα	Κανονική k = 2	0.8535 (5.690%)		

Πίνακας Π.4: Πίνακας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου Β για το I₃₀ της γεννήτριας NSG-433 στα 4 kV

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του τετραγώνου του αθροίσματος των δυο τύπων αβεβαιοτήτων. Σύμφωνα με το Πρότυπο για εργαστήρια τα οποία διεξάγουν διακριβώσεις συνιστώνται τα ακόλουθα όρια τελικής συνδυασμένης αβεβαιότητας:

Χρόνος ανόδου t _r	$MU \leq 15\%$
Κορυφή του ρεύματος Ι _{max}	$MU \leq 7\%$
Ρεύμα στα 30 ns I_{30}	$MU \leq 7\%$
Ρεύμα στα 60 ns I_{60}	$MU \le 7\%$

5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

5.1 Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

5.1.1 Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έως και ±36 kV γι αυτό στο χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στο Σχήμα Π.2 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται. Πρέπει να σημειωθεί ότι διαθέτει οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής.



Σχήμα Π.2: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

5.1.2 Τα βασικά τμήματα ηλεκτροστατικής γεννήτριας είναι:

- Η βασική μονάδα (Σχήμα Π.2), η οποία περιλαμβάνει τη μπαταρία τροφοδοσίας, τη γεννήτρια, το ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock).
- Το «πιστόλι» στο οποίο βρίσκονται το κύκλωμα παραγωγής του παλμού, το ρελέ υψηλής τάσης, η ακίδα εκφόρτισης (αέρα ή επαφής), τα ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης, η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στη λαβή του πιστολιού βρίσκεται η σκανδάλη, η οποία ενεργοποιεί τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027), το οποίο έχει σαν είσοδο του 100-250
 Vac, 50- 60 Hz, 1 A και δίνει στη βασική μονάδα 24 Vdc, 2.3 A.

5.1.3 Πριν τη λειτουργία της γεννήτριας οφείλουμε να κάνουμε τους ακόλουθους ελέγχους προκειμένου να εξασφαλίσουμε την ορθή και ασφαλή της λειτουργία:

- Ελέγχουμε ότι όλα τα επιμέρους μέρη της γεννήτριας έχουν συναρμολογηθεί σωστά μεταξύ τους και ότι έχει βιδωθεί σωστά η βάση της ακίδας για εκφορτίσεις επαφής (μυτερή ακίδα) στο στέλεχος του πιστολιού.
- Συνδέουμε τους ακροδέκτες του μανδαλωτή (interlock) με τη βασική μονάδα και βεβαιωνόμαστε ότι οι βίδες είναι σφιγμένες.
- Συνδέουμε τη γείωση (πράσινο-κίτρινο καλώδιο) του πιστολιού με τη γείωση του κλωβού. Προσοχή: Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται η γεννήτρια αν δεν έχει συνδεθεί σε μια σταθερή γείωση.
- iv. Συνδέουμε το τροφοδοτικό με το δίκτυο.

5.1.4 Λειτουργικός έλεγχος

- Βεβαιωνόμαστε ότι ο διακόπτης επείγουσας ανάγκης (emergency power off switch) είναι τραβηγμένος προς τα έξω. Σε αυτή τη φάση η κόκκινη λυχνία της μπαταρίας (battery) ανάβει.
- Πατώντας το μπουτόν Power On στη βασική μονάδα η πράσινη λυχνία
 Power και η κόκκινη λυχνία interlock ανάβουν.
- Πιέζουμε το διακόπτη interlock reset. Η πράσινη Interlock λυχνία ανάβει και η κόκκινη High Voltage λυχνία αναβοσβήνει όσο γίνεται στα

πλαίσια του «αυτοελέγχου» (self test) μια «αυτοδιακρίβωση», η οποία διαρκεί ορισμένα δευτερόλεπτα και στην οθόνη αφής εμφανίζεται η ένδειξη "Calibration in progress" και είναι αναμμένες η πράσινη λυχνία power και το κόκκινο του battery.

- iv. Η γεννήτρια είναι έτοιμη προς λειτουργία. Στην οθόνη αφής εμφανίζεται το μενού που φαίνεται στο Σχήμα Π.3.
- ν. Στην οθόνη αφής μπορούμε να επιλέξουμε:
 - την πολικότητα [θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -)]
 - το είδος των εκφορτίσεων (επαφής ή αέρος)
 - την τιμή της τάσης εκφόρτισης
 - το ρυθμός εκφόρτισης (απλός παλμός "single" ή επαναλαμβανόμενος "repeated")
 - είδος εκφόρτισης (επαφής ή αέρα)
- vi. Για την επαλήθευση της γεννήτριας οι εκφορτίσεις είναι επαφής, η τάση στα 4 kV και ο παλμός απλός (single). Γι' αυτό το λόγο αφού ακουμπήσει το πιστόλι (με τη μυτερή ακίδα) στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης κατακόρυφα πατάμε το κουμπί εκφόρτισης (σκανδάλη). Επίσης, το καλώδιο της γείωσης του πιστολιού θα πρέπει να μη σχηματίζει βρόχο, αλλά να είναι όσο πιο ευθύγραμμο γίνεται. Το σχήμα του καλωδίου γείωσης επηρεάζει το ρεύμα στα 60 ns.
- vii. Όταν τελειώσουν οι δοκιμές για την επαλήθευση της ηλεκτροστατικής γεννήτριας πιέζουμε το Power On για να σβήσει η ένδειξη στην οθόνη αφής, οπότε ανάβει μόνο η λυχνία battery. Κατόπιν βγάζουμε την τροφοδοσία της γεννήτριας από την παροχή ρεύματος.



Σχήμα Π.3: Το μενού στην οθόνη αφής της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

5.2 Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

5.2.1 Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 (Σχήμα Π.4) παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις έως ±18kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο πιστόλι μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο, το οποίο δείχνει την τάση εκκένωσης.

52.2 Τα βασικά τμήματα ηλεκτροστατικής γεννήτριας είναι:

- Το τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή, ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκκενώσεων που πραγματοποιούνται. Επίσης, περιλαμβάνει καλώδιο γείωσης.
- Το «πιστόλι», στο οποίο βρίσκονται το κύκλωμα παραγωγής του παλμού και το καλώδιο γείωσης (πεπλατυσμένο καλώδιο). Στη λαβή του πιστολιού βρίσκεται η σκανδάλη, η οποία ενεργοποιεί τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, καθώς και το κομβίον με το οποίο ρυθμίζεται η τάση εκφόρτισης. Επί του πιστολιού υπάρχει ψηφιακή ένδειξη της τάσης εκφόρτισης. Περιλαμβάνει επίσης, τον διακόπτη

αλλαγής πολικότητας, ο οποίος για να ενεργοποιηθεί "τραβιέται" προς τα έξω και τοποθετείται το βέλος στο + ή το -.

 Τον προσαρμοστή εκκένωσης επαφής, ο οποίος προσαρμόζεται επί της ακίδας για εκφορτίσεις αέρος.

5.2.3 Πριν τη λειτουργία της γεννήτριας οφείλουμε να κάνουμε τους ακόλουθους ελέγχους προκειμένου να εξασφαλίσουμε την ορθή και ασφαλή της λειτουργία:

- Ελέγχουμε ότι όλα τα επιμέρους μέρη της γεννήτριας έχουν συναρμολογηθεί σωστά μεταξύ τους και ότι έχει τοποθετηθεί ο προσαρμοστής εκκένωσης επαφής στο στέλεχος του πιστολιού (επί της ακίδας για εκφορτίσεις αέρα). Το καλώδιο του προσαρμοστή εκκένωσης επαφής πρέπει να είναι συνδεδεμένοστο πιστόλι στην κατάλληλη υποδοχή.
- Συνδέουμε τη γείωση του τροφοδοτικού και τη γείωση του πιστολιού (πεπλατυσμένο καλώδιο) με τη γείωση του κλωβού. Προσοχή: Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται η γεννήτρια αν δεν έχει συνδεθεί σε μια σταθερή γείωση.
- *iii.* Συνδέουμε το τροφοδοτικό με το δίκτυο.

5.2.4 Λειτουργικός έλεγχος

- *i*. Πατάμε το μπουτόν Ι/Ο στο τροφοδοτικό.
- Ελέγχουμε ότι στο διακόπτη αλλαγής πολικότητας το βέλος είναι τοποθετημένο στο για να παραχθούν εκφορτίσεις θετικής πολικότητας..
- iii. Η γεννήτρια είναι έτοιμη προς λειτουργία.
- iv. Για την επαλήθευση της γεννήτριας οι εκφορτίσεις είναι επαφής και η τάση στα 4 kV. Γι' αυτό το λόγο αφού ακουμπήσει το πιστόλι (με τη μυτερή ακίδα) στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης κατακόρυφα πατάμε το κουμπί εκφόρτισης (σκανδάλη). Επίσης, το καλώδιο της γείωσης του πιστολιού θα πρέπει να μη σχηματίζει βρόχο, αλλά να είναι όσο πιο ευθύγραμμο γίνεται. Το σχήμα του καλωδίου γείωσης επηρεάζειτο ρεύμα στα 60 ns.
- Όταν τελειώσουν οι δοκιμές για την επαλήθευση του πιστολιού πιέζουμε
 το μπουτόν Ι/Ο στο τροφοδοτικό και κόβουμε την τροφοδοσία από το
 δίκτυο. Κατόπιν βγάζουμε την τροφοδοσία της γεννήτριας από την
 παροχή ρεύματος.



Σχήμα Π.4: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-433 και η μεταζύ τους συνδεσμολογία

5.3 Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων Dito

5.3.1 Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων Dito της EM TEST (Σχήμα Π.5) παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις έως ±16,5kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Η αλλαγή της πολικότητας, η ρύθμιση του επιπέδου τάσης, και όλες οι επιθυμητές ρυθμίσεις για τη διεξαγωγή της δοκιμής γίνονται με τα πλήκτρα που βρίσκονται πάνω στη γεννήτρια.



Σχήμα Π.5: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας Dito και η μεταξύ τους συνδεσμολογία 5.3.2 Βασικά τμήματα ηλεκτροστατικής γεννήτριας. Η γεννήτρια Dito συνίσταται βασικά από το καθεαυτό «πιστόλι». Η ακίδες για εκφόρτιση αέρος ή επαφής, είναι ξεχωριστές από το κύριο σώμα της γεννήτριας και εφαρμόζουν εύκολα σε αυτό. Στο Σχήμα Π.5 φαίνεται και το καλώδιο της γείωσης. Για την τροφοδοσία της γεννήτριας χρησιμοποιείται η μπαταρία της γεννήτριας, η οποία βγαίνει και επαναφορτίζεται.

5.3.3 Πριν τη λειτουργία της γεννήτριας οφείλουμε να κάνουμε τους ακόλουθους ελέγχους προκειμένου να εξασφαλίσουμε την ορθή και ασφαλή της λειτουργία:

- Ελέγχουμε ότι όλα τα επιμέρους μέρη της γεννήτριας έχουν συναρμολογηθεί σωστά μεταξύ τους. (Η μπαταρία είναι στη θέση της, έχει προσαρμοστεί σωστά η σωστή ακίδα εκφόρτισης και έχει προσαρμοστεί σωστά το καλώδιο γείωσης.)
- Συνδέουμε τη γείωση του πιστολιού (καλώδιο) με τη γείωση του κλωβού. Προσοχή: Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται η γεννήτρια αν δεν έχει συνδεθεί σε μια σταθερή γείωση.

5.3.4 Λειτουργικός έλεγχος

- Βάζουμε σε λειτουργία τη γεννήτρια πατώντας τη σκανδάλη εκφόρτισης. Η σκανδάλη μπορεί να θεωρείται αντίστοιχη του πλήκτρου ENTER, ή της εντολής BACK, για τους χειρισμούς και τις επιλογές που είναι διαθέσιμες στο MENU.
- Θέτοντας σε λειτουργία τη συσκευή εμφανίζεται η οθόνη του Σχήματος
 Π.6.
- iii. Πατώντας πάλι τη σκανδάλη εμφανίζεται η οθόνη του Σχήματος Π.7
- iv. Επιλέγουμε Easy Zap (F1), και εμφανίζεται η οθόνη του Σχήματος Π.8



Σχήμα Π.6: Οθόνη υποδοχής

Σχήμα Π.7: Οθόνη ΜΕΝU



Σχήμα Π.8: Οθόνη Easy ZAP

Σχήμα Π.9: Οθόνη Easy ZAP, επιλογή τάσης

- ν. Επιλέγουμε Start (F1) και τώρα, στην οθόνη που εμφανίζεται (Σχήμα Π.9), μπορούμε να επιλέξουμε το επίπεδο τάσης στο οποίο θα γίνει η εκφόρτιση. Επιλέγουμε Level:2 (4 kV). Με τα πλήκτρα -, +, επιλέγουμε την πολικότητα της τάσης (θετική).
- *vi.* Η γεννήτρια είναι έτοιμη προς λειτουργία.
- vii. Για την επαλήθευση της γεννήτριας οι εκφορτίσεις είναι επαφής και η τάση στα 4 kV. Γι' αυτό το λόγο αφού ακουμπήσει το πιστόλι (με τη μυτερή ακίδα) στον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης κατακόρυφα πατάμε το κουμπί εκφόρτισης (σκανδάλη). Επίσης, το καλώδιο της γείωσης του πιστολιού θα πρέπει να μη σχηματίζει βρόχο, αλλά να είναι όσο πιο ευθύγραμμο γίνεται. Το σχήμα του καλωδίου γείωσης επηρεάζει το ρεύμα στα 60 ns.
- νiii. Όταν τελειώσει η διαδικασία επαλήθευσης, πιέζουμε παρατεταμένα τη σκανδάλη της εκφόρτισης μέχρι να απενεργοοπιηθεί η γεννήτρια.

5.4 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target)

5.4.1 Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Για την επαλήθευση χρησιμοποιείται ο MD 103 της TESEQ, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π.10.



Σχήμα Π.10: Ο ομοαζονικός προσαρμοστής TESEQ MD 103

5.4.2 Προκειμένου να εξαλείψουμε τις παρεμβολές που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση στον εξοπλισμό καταγραφής (παλμογράφο) αλλά και για να υπάρχει η κατάλληλη γειωμένη επιφάνειας χρησιμοποιείται κλωβός Faraday σε κατακόρυφο τοίχωμα του οποίου έχει τοποθετηθεί ο ομοαξονικός προσαρμοστής(όπως προβλέπεται και από το Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2:2009). Ο κλωβός γειώνεται σε κοινό σημείο με τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

5.5 Παλμογράφος TDS 7254B

5.5.1 Ο παλμογράφος αυτός της Tektronix (Σχήμα Π.11), λειτουργεί στα 2.5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2:2009 για παλμογράφο τουλάχιστον 1 GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη ανάλυσης 1024 x 768, 3.5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την αποθήκευση των μετρήσεων. Επιπλέον, διαθέτει οθόνη αφής.

5.5.2 Για την επαλήθευση της γεννήτριας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιοδήποτε κανάλι. Η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στο κανάλι 1 του παλμογράφου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Π.11. Προσοχή: Λόγω του ότι το κάθε κανάλι του παλμογράφου αντέχει μέγιστη τιμή ρεύματος μέχρι 5 Vrms πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί και να χρησιμοποιείται πάντα εξασθενητής.



Σχήμα Π.11: Ο παλμογράφος TDS 7254B

5.5.3 Στο Σχήμα Π.12 φαίνονται τα κομβία του παλμογράφου, ορισμένα από τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών παλμών.



Σχήμα Π.12: Κομβία του παλμογράφου TDS 7254B

5.5.4 Λειτουργικός έλεγχος

- Ρυθμίζουμε την κλίμακα τάσης από το κομβίον που φαίνεται στο Σχήμα Π.12 στο κατάλληλο επίπεδο, ώστε ο παλμός που θα καταγραφεί να μην έχει κοπεί εν μέρει, αλλά να φαίνεται ολόκληρος επί της οθόνης του παλμογράφου. Για επαλήθευση στα 2 kV η κλίμακα είναι στα 200 mV/div, στα 4 kV και 6 kV στα 500 mV/div, ενώ στα 8 kV στα 1000 mV/div. Η ρύθμιση της κλίμακας για διαφορετικές τιμές μεταξύ 200 και 500 mV/div μπορεί να γίνει και από το μενού Vertical (της οθόνης αφής), επιλέγοντας Vertical Setup και κατόπιν από την επιλογή scale επιλέγουμε την επιθυμητή κλίμακα.
- ii. Ρυθμίζουμε το χρόνο από το κομβίον ρύθμισης κλίμακας (scale) που φαίνεται στο Σχήμα Π.12 στα 40 ns/div. Αυτό έχει να κάνει με την ανάλυση που θα καταγραφεί ο παλμός στην οθόνη του παλμογράφου (μεγάλο ή μικρό εύρος χρόνου).
- Στο μενού του Σχήματος Π.12 φροντίζουμε το coupling να είναι DC και να ανάβουν οι λυχνίες POS και NEG.
- iv. Η θέση των δρομέων (cursors) ρυθμίζει σε τι χρονική περίοδο θα καταγραφούν οι τιμές του ρεύματος. Επιλέγουμε από –1 ns (οριακά πριν το 0) έως 200 ns. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να γίνει από το μενού Cursors (της οθόνης αφής), επιλέγουμε cursors control και κατόπιν από την επιλογή ρυθμίζουμε τις τιμές του cursor 1 και cursor 2 σε –1 ns και 200 ns αντίστοιχα.
- ν. Πιέζουμε το πλήκτρο Advance και στο «παράθυρο» trigger type επιλέγουμε Edge.
- vi. Πιέζουμε το κομβίον Single.
- νii. Ο παλμογράφος είναι έτοιμος να καταγράψει το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Προσοχή: Λόγω του ότι η καταγραφόμενη από τον παλμογράφο κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης ενδέχεται να ξεπεράσει τα όρια στην οθόνη του παλμογράφου (δηλαδή να εμφανίσει την ένδειξη clipped δίπλα στην max τιμή του ρεύματος), πρέπει να φροντίζουμε να είμαστε στην κατάλληλη κλίμακα. Αν τυχόν εμφανιστεί η ένδειξη clipped θα πρέπει η μέτρηση να επαναληφθεί, γιατί οι τιμές που αποθηκεύονται είναι ελλιπείς.

5.5.5 Αποθήκευση των μετρούμενων τιμών
5.5.5.1 Με το που θα γίνει η εκφόρτιση από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων η κυματομορφή του ρεύματος που θα εμφανισθεί στην οθόνη του παλμογράφου θα είναι όπως αυτή στο Σχήμα Π.11.

5.5.5.2 Προκειμένου να αποθηκεύσουμε τις τιμές του ρεύματος εκφόρτισης σαν εικόνα, αλλά και σαν τιμές για την περαιτέρω επεξεργασία τους, κάνουμε τα ακόλουθα: από το μενού file επιλέγουμε το export setup. Από εδώ έχουμε δύο τρόπους να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα. Είτε σαν εικόνα (jpeg, είτε σαν δεδομένα (csv) με τα ονόματα metrisi.jpeg και metrisi.csv αντίστοιχα.

6 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

- **6.1** Η πραγματοποίηση της δοκιμής επαλήθευσης των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης συνίσταται στα ακόλουθα βήματα.
 - *i*. Συνδέουμε το στόχο στο κύκλωμα.
 - *ii.* Ελέγχουμε την κοινή γείωση.
 - *iii.* Ανοίγουμε και ρυθμίζουμε τον παλμογράφο (παράγραφος 5.5.4).
 - επιτελείται ο λειτουργικός έλεγχος που αντιστοιχεί στο υπό επαλήθευση
 «πιστόλι» παράγραφος 5.1.4 ή παράγραφος 5.2.4 ή παράγραφος 5.3.4).
 - ν. Πιέζουμε την σκανδάλη, και
 - vi. Καταγράφουμε την κυματομορφή σε μορφή csv (παράγραφος 5.5.5).

7 ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ – ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

7.1 Επειδή στον παλμογράφο μετράται η τάση και όχι το ρεύμα, είναι αναγκαία η ανασύνθεση του μέσω της τάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην DC ανάλυση, που φαίνεται στο Σχήμα Π.13. Περιλαμβάνει τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον ομοαξονικό μετατροπέα και τον παλμογράφο.



Σχήμα Π.13: Το ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην DC ανάλυση

7.2 Το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ESD} = \frac{C.V_R}{Z_0} \tag{\Pi.2}$$

$$C = C_{CT} \cdot C_A \tag{\Pi.3}$$

$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L}$$
(Π.4)

όπου I_{ESD} είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης, V_R η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση εξαιτίας του ρεύματος I_0 , C ο συνολικός συντελεστής μετατροπής, ενώ C_{CT} και C_A είναι οι συντελεστές μετατροπής του ομοαξονικού προσαρμοστή και του εξασθενητή αντίστοιχα. Επειδή ο εξασθενητής είναι 20 dB το σήμα εξασθενείται 10 φορές (C_A =10).

7.3 Στο Σχήμα Π.13 συμβολίζεται ως R_L η αντίσταση φορτίου (load resistance) του ομοαξονικού προσαρμοστή, ως R_b η αντίσταση προσαρμογής (backward matching resistance) του ομοαξονικού προσαρμοστή και Z_0 η ονομαστική αντίσταση προσαρμογής του ομοαξονικού καλωδίου, η οποία είναι 50 Ω. Οι τιμές των R_L και R_b μπορούν να βρεθούν μετρώντας την DC αντίσταση του ομοαξονικού προσαρμοστή. Παρ' όλο που οι τιμές αυτές υπάρχουν διαθέσιμες, κάτι τέτοιο πρέπει να αποφεύγεται, ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το περισσότερο ακριβείς. Η R_L είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού προσαρμοστή και είναι περίπου ίση με 2 Ω. Η R_b είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και ισούται περίπου με 48 Ω.

7.4 Τελικά με υπολογισμούς βρίσκεται ότι 1 Volt στον παλμογράφο αντιστοιχεί σε ρεύμα εκφόρτισης περί τα 10 A.

Σημείωση: Αν αντί του ενσωματωμένου εξασθενητή 20 db χρησιμοποιήσουμε κάποιον άλλο με διαφορετική εξασθένηση (π.χ. αν βάλουμε 2 εξασθενητές των 20 db εν σειρά τότε έχουμε εξασθένηση 40 db) πρέπει να υπολογίσουμε εκ νέου τον συντελεστή C_A από τη σχέση 20log C_A =X (db) όπου X ο αριθμός των db.

8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΕΥΡΕΣΗ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

8.1 Προκειμένου να βρούμε τις τιμές του μέγιστου ρεύματος (I_{max}), του χρόνου ανόδου (t_r), και των παραμέτρων I_{30} και I_{60} χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Matlab, αφού πρώτα κάνουμε τα ακόλουθα:

- i. Το αρχείο metrisi.csv το μετατρέπουμε σε αρχείο txt μέσω του προγράμματος Excel. Αφού το ανοίξουμε με το Excel διαγράφουμε τα πρώτα σχόλια του αρχείου και αντικαθιστούμε όλα τα κόμματα στους αριθμούς με κενό (space). Το αρχείο το σώζουμε σαν αρχείο txt οριοθετημένο με tab με το όνομα A.txt. Με αυτόν τον τρόπο το αρχείο μπορεί να διαβαστεί από το πρόγραμμα Matlab.
- ii. Τοποθετούμε το A.txt σε ένα φάκελο στον C: με την ονομασία current.
- Πατώντας F5 δημιουργείται το γράφημα που απεικονίζει το ρεύμα εκφόρτισης σε συνάρτηση με το χρόνο. Επίσης
 - Εντοπίζονται οι τιμές των κρίσιμων για την επαλήθευση μεγεθών $(I_{max}, t_r = t_{90\%} t_{10\%}, I_{30}, I_{60}).$
 - Ελέγχεται η συμβατότητα με τις προδιαγραφές.
 - Δίνεται κατάλογος με τις παραπάνω τιμές, το αποτέλεσμα της δοκιμής και, σε περίπτωση αποτυχίας, οι λόγοι της.

8.2 Αν οι 4 παράμετροι δεν είναι εντός ορίων το όργανο χρειάζεται διακρίβωση. Έπειτα καταγράφουμε τα αποτελέσματα στο αντίστοιχο αρχείο του Equal.

9 ΥΠΕΥΘΥΝΟΤΗΤΕΣ

9.1 Ο χειριστής, που πραγματοποιεί την επαλήθευση, είναι υπεύθυνος για την σωστή διεξαγωγή της και την μεταφορά των αποτελεσμάτων στο αντίστοιχο αρχείο του Equal.

9.2 Ο Τεχνικός Υπεύθυνος είναι υπεύθυνος για τη σύνταξη και αναθεώρηση της παρούσας Οδηγίας Εργασίας.

10 APXEIA

10.1 Με την ευθύνη του Τεχνικού Υπευθύνου, τηρούνται, για τουλάχιστον δέκα έτη, τα αρχεία της επαλήθευσης.

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] EN 61000-4-2:2009: "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part4 - 2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test", 2009.

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

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

[6] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, "Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development", Elsevier, 2003.

[7] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, "Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems" διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.esdjournal.com/techpapr/sfowler/esd97/esd97.htm.

[8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, "Dielectric characteristics of materials-Electrostatic Discharge", November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf.

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

[10] EN 61000.04.02:1996: "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part4: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test – Basic EMC Publication", 1996

[11] E. Okoniewska, M. A. Stuchly, M. Okoniewski "Interactions of Electrostatic Discharge With the Human Body", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, Vol. 52, No. 8, August 2004, pp 2030-2039.

[12] Concettina Buccella "Circuit network analog for ESD current strikes composite structures", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 38, No. 2, March 2002, pp 809-812.

[13] Zhiyong Yuan, Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen, Rong Zeng "Simulation and measurement of the transient field of indirect ESD", 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, February 2006, pp 634-637.

[14] Zhiyong Yuan, Tun Li, Jinliang He, Shuiming Chen, Weiyuan Chen, Rong Zeng *"New Mathematical Descriptions of ESD Current Waveform Based on the Polynomial of Pulse Function"*, IEEE transactions on electromagnetic compatibility 2006, Vol. 48, No. 3, February 2006, pp 589-591.

[15] Huang Jiu-sheng, Liu Fang, Deng Qi-bin, Liu Pei-zhu "An ultra wide band test system to test the transient electric fields and magnetic fields generated by electrostatic discharge (ESD)", ISAPE 2000 international symposium on antennas, propagation and EM theory, August 2000 Beijing, pp.626-629.

[16] Jesus L. Muiioz, Jonah Tan, Carlito Adriano, Erwin Roldan, Jack Sadie "Detecting ESD events using a loop antenna", Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, 2000 USA, pp 60-64.

[17] Jiusheng Huang, Liu Suling, Wang Xiqin, Zhou Feng, Wang, Langfeng, Gaoyougan "Intrinsic characterization of human metal ESD current, electromagnetic field and displacement current", Environmental Electromagnetics, The 2006 4th Asia-Pacific Conference, August 2006, pp 518-520.

[18] Zhang Xijun, Ruan Xiaofen, Liu Shanghe, Wei Ming "Study on the effects of relay switch of ESD simulator to ESD imminity test", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM', November 2003, pp 229-232.

[19] P.Wilson, M.T.Ma *"Fields Radiated by Electrostatic Discharges"*, IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, Vol. 33, February 1991, pp 10-18.

[20] Michael Mardiguian "Comments on fields radiated by electrostatic discharges",

IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 34, February 1992, pp 62.

[21] Jon Barth "*Measurements of real ESD threats that have been ignored too long*", IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol. 8, October 2005, pp 61-68.

[22] Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka "Dependence of breakdown fields on charge voltages for human ESD", 19thInternational Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 2008, pp 148-151.

[23] Ken Kawamata, Shigeki Minegishi, Akira Haga "Measurement of frequency *spectra of transient voltage due to micro gap discharge*", IEIC Technical Report, Vol. 104, No. 499, December 2004, pp 41-45.

[24] Osamu Fujiwara και Yoshinory Taka "Verification of spark resistance formula"

19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 2008, pp 152-155.

[25] R. Rompe and W. Weizel: "Uber das Toeplersche Funkengesetz", Z. Physik 122, 636 (1944–01).

[26] M. Toepler, "Zur Kenntnis der Gesetze der Gleit-funkenbildung", Ann. Physik 21, 12, 193 (1906).

[27] Greason W.D., "Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge", Journal of Electrostatics, Vol. 44, September 1998, pp 125-132.

[28] Amoruso V., Helali M., Lattarulo F., "*An improved model of man for ESD applications*", EOS/ESD Symposium, September 1999, pp335-343.

[29] Giannetti R., Tellini B., "Equivalent network modeling to simulate electrical discharges", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 4, July 2000, pp 971-976.
[30] Nobuo 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, October 1997, pp. 49-57.

[31] Γ.Π.Φώτης "ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΕΩΝ: ΤΟ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ", Διδακτορική διατριβή Οκτώβριος 2006 Αθήνα, σελ. 113-116.

[32] "Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433", Instruments Schaffner, Publ. 1303E.

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

[34] "Instruction manual for the electrostatic discharge generator DITO", EM TEST, dito_v100.doc

[35] Schaffner Company, Technical document and product information for the MD 103.

[36] CSA7000B Series & TDS7000B Series Instruments User Manual

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