

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

Μελέτη του παραγόμενου ρεύματος από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Η. Ζαφειρόπουλος

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

Αθήνα, Ιούλιος 2005



Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

124

Μέτρηση ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Η. Ζαφειρόπουλος

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4^η Ιουλίου 2005.

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

Αθήνα, Ιούλιος 2005

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.

Στην οικογένειά μου

"Το μυστικό της επιτυχίας είναι να ξέρεις κάτι που κανείς άλλος δεν ξέρει"

Αριστοτέλης Ωνάσης (1906-1975)

<u>Περίληψη</u>

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του παραγόμενου ρεύματος από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το υπάρχον Πρότυπο για την δοκιμή της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ορίζει τα όρια για τις τέσσερις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης για συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν μέσα από σειρές μετρήσεων για τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 της Schaffner, οι τιμές των παραμέτρων αυτών, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ήταν τοποθετημένος σε διάφορα υλικά στήριξης.

Επίσης έγινε στατιστική ανάλυση των μετρήσεων αυτών και βρέθηκε ότι η επαναληψιμότητα της γεννήτριας NSG-438 είναι αρκετά καλή. Μελετήθηκε η αβεβαιότητα που παρουσιάζει η μετρητική διάταξη ανάλογα με το που είναι τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Ακολούθως, μελετήθηκε η παράγωγος του εκφορτιζόμενου ρεύματος, παράμετρος η οποία θα συμπεριληφθεί στην επόμενη έκδοση του Προτύπου. Αποδείχθηκε ότι οι γεννήτριες νεότερης κατασκευής παρουσιάζουν μικρότερες μέγιστες τιμές της παραγώγου του ρεύματος και άρα έχουν ηπιότερη συμπεριφορά απέναντι στα δοκίμια.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση, με τη βοήθεια του προγράμματος Spice, για κύκλωμα το οποίο αποτελεί ηλεκτρικό ανάλογο του ανθρωπίνου σώματος. Διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος ανόδου t_r και το μέγιστο ρεύμα $I_{\rm max}$ καθορίζονται από τα ανώτερα μέρη του ανθρωπίνου σώματος (κεφάλι, στήθος, χέρια, κοιλιακή χώρα), ενώ οι παράμετροι που αφορούν την ουρά του ρεύματος (I_{30}, I_{60}) καθορίζονται από τα κάτω άκρα.

<u>Λέξεις κλειδιά</u>

Πρότυπο IEC 61000-4-2, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ανηχωϊκός θάλαμος, ρεύμα εκφόρτισης, αβεβαιότητα μετρήσεων, παράγωγος ρεύματος εκφόρτισης, επαναληψημότητα γεννητριών, προσομοίωση, πρόγραμμα Spice

<u>Abstract</u>

This diploma thesis attempts to investigate the produced current by electrostatic discharge generators. The present Standard for the electrostatic discharge defines the limits for the four parameters of the discharge current's waveform for a specific experimental setup. In the present study, these parameters, for Schaffner's generators NSG-433 and NSG-438, were derived by measurements, when the current transducer was mounted on different materials.

A statistical analysis was conducted and it was found that the repeatability of the NSG-438 generator was very good. Also the uncertainty of the experimental setup depending on the mounting of the current transducer was studied. The derivative of the discharge current, which will be a new parameter for the revised Standard was calculated. It was proved that the more recent generators have lower maximum derivative values for the current and consequently they have a softer behavior against the equipment under test.

Finally, a Spice simulation was carried out for the electrical equivalent of the human body. It was found out that the rise time t_r and the maximum current Imax are defined by the upper body parts(head, chest, arms,) while the parameters concerning the later parts of the discharge current(I₃₀, I₆₀) are depending from the lower body parts.

Key words

IEC Standard 61000-4-2, electrostatic discharge, current transducer, anechoic chamber, discharge current, measurement's uncertainty, discharge current's derivative, generator's repeatability, simulation, Spice program

			Σελίδα
ΠΕΡΙΕΧ	OMENA		i
ΠΡΟΛΟΙ	ΞΟΣ		1V
КЕФАЛ	AIO 1	Εισανωνή στην ηλεκτορστατική εκωόρτιση	
1.1	Πεοί ηλε	κτοομαγνητικής συμβατότητας	1
1.2	Η ηλεκτα	ροστατική εκφόρτιση (Electrostatic charge)	3
	1.2.1	Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	3
	1.2.2	Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	6
1.3	Ηλεκτρο	στατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και	7
	μέτρα πρ	ροστασίας	/
	1.3.1	Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	7
	1.3.2	Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού	8
1.4	Μοντέλα	ι για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	9
	1.4.1	Γενικά	9
	1.4.2	Αξιολόγηση του Human Body Model	11
КЕФАЛ	AIO 2	Πρότυπο ΙΕС 61000-4-2 και κυματομορφές	
2.1	Επισκόπ	ηση Προτύπου IEC 61000-4-2	13
2.2	Ορισμοί		13
2.3	Επίπεδα	δοκιμών	15
2.4	Εξοπλισμ	μός δοκιμών	16
	2.4.1	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	17
	2.4.2	Περιγραφή χώρου δοκιμών	18
	2.4.3	Διάταξη δοκιμών (test set-up)	19
2.5	Κυματομ	ιορφές και εξισώσεις	19
	2.5.1	Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	19
	2.5.2	Εξίσωση ρεύματος	20
КЕФАЛ	AIO 3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	
3.1	Σκοπός		28
3.2	Μέτρησι	η ρεύματος	28
3.3	Εξάρτησ	η της μορφής του ρεύματος από παραμέτρους του	29
	κυκλώμο	ιτος εκφόρτισης	
3.4	Ηλεκτρι	κό δίπολο και παραγόμενα πεδία	32
<u> </u>	3.4.1	Εξισώσεις μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου	32
3.5	Διάδοση	διαταραχών από ηλεκτροστατικές εκφόρτισείς μέσω	34
2.6	ομοαζον	ικών καλωδίων	25
3.6	Προβλημ	ιατα των ηλεκτροστατικών εκφορτισεών	35
3.1	Μεγιστη	παραγωγος ρευματος γεννητριων ηλεκτροστατικης	36
2.0	εκφορτισ	ξ	27
3.8	плектри 2 0 1	ω τοςο	5/
	3.ð.1 2.8.2	Ψαση εκκινησης Ουμαία αάστ	3/ 20
	3.0.2 3.2.2.1	ναμική φασή Μουτάλο Rompe Weizel	38 29
	3.0.2.1 3.8.2.2	Μουτέλο της γιουοστιβάδας	20 20
	383	Σωμπεράσματα και περιορισμοί	20 20
	5.0.5	Δυμποραυματά και περιορισμοι	59

КЕФАЛА	IO 4	Πειραματική διάταξη				
4.1	Εισαγωγή		42			
4.2	Ο εξοπλισ	Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων				
4.3	Περιγραφ	ρή πειραματικής διάταξης				
	4.3.1	Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)	44			
	4311	Γεννήτοια ηλεκτοοστατικών εκφοοτίσεων NSG-433	44			
	4312	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438	46			
	4 3 2	Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης	48			
	4.3.3	Βάσεις στήσιξης	49			
	4.3.4	Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συγνότητας	51			
	4.3.5	Εξασθενητής (attenuator)	52			
	4.3.6	Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B	52			
	4.3.7	Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)	54			
4.4	Ανασύνθε	ση ρεύματος	55			
	4.4.1	1ος τρόπος	55			
	4.4.2	2ος τρόπος	56			
кефала	10 5	Αναθεώοηση Ποοτύπου				
51	Εισανωνή		59			
52	Παράγωγα	ος ρεύματος	60			
5.3	Μετρήσει	ς για την παράγωγο του ρεύματος	61			
	1 (
КЕФАЛА	IO 6	Μετρήσεις και αβεβαιότητα				
6.1	Εισαγωγή	-Περί Αβεβαιότητας	67			
6.2	Σφάλμα κ	ται Αρεραιοτητα				
6.3	Μέτρηση	και πιθανότητες	69 70			
	6.3.1	Ορισμοι στατιστικών ορών	/0			
	0.3.2	Κατανομες τυχαιων μεταρλητων	/1			
	0.3.2.1	Κανονικη κατανομη	/1			
	0.3.2.2	Γραπεςοεισης κατανομη V στουομή Student	75			
	0.3.2.3	Katavoµi Suden Katavoµi Chi sayare (x^2)	74			
64	0.3.2.4 Επεξεοναι	κατανόμη Cin-square(x)	75			
0.4	6 4 1	Απόκτηση δεδομένων	70			
	642	Παρουσίαση δεδομένων	81			
	643	Στατιστική επεξεογασία δεδομένων	88			
6.5	Στατιστικ	ά τεστ σε εκφορτίσεις επαφής	91			
	6.5.1	T-test	92			
	6.5.1.1	Διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (άγνωστη	00			
	διασπορά)	92			
	6.5.1.2	Διάστημα εμπιστοσύνης της διαφοράς των μέσων τιμών	94			
	6.5.2	Z-test	95			
	6.5.2.1	Διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (γνωστή	95			
	διασπορά	σπορά)				
	6.5.3	χ ² -test	97			
6.6	Εκφορτίσ	εις αέρος	98			
6.7	Αβεβαιότ	ητα μετρήσεων	100			

Αβεραιοτητα μετρησεων 6.7.1 Υπολογισμός παραμέτρων

6.8	Συμπεράσματα	108
КЕФАЛА	IO 7 Προσομοίωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω του προγράμματος Spice	
7.1	Εισαγωγή	112
7.2	Εύρεση παραμέτρων ανθρωπίνου σώματος	112
7.3	Ισοδύναμο κύκλωμα εκφόρτισης	115
7.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	116
7.5	Συμπεράσματα	120
КЕФАЛА	ΙΟ 8 Η επόμενη μέρα	122

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

124

<u>Πρόλογος</u>

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Ζαφειρόπουλου Ιωάννη για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μέτρηση του ρεύματος, που παράγεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και έγιναν μετρήσεις που αφορούσαν τόσο το ίδιο το ρεύμα όσο και την παράγωγό του. Οι εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν εντός ανηχωϊκού θαλάμου, με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης στηριζόμενο σε βάσεις από διάφορα υλικά, οι οποίες διαχωρίζονταν από το έδαφος με μονωτικό υλικό. Οι εκφορτίσεις έγιναν για τάσεις ±4 kV και αφορούσαν εκφορτίσεις επαφής και αέρος. Στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων στο ΜΑΤLAB έγινε επεξεργασία των μετρήσεων, σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

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 IEC 61000-4-2, δίνονται ορισμοί διαφόρων σημαντικών όρων που περιέχονται σε αυτό και γίνεται σύγκριση διαφόρων εξισώσεων που έχουν σκοπό να προσεγγίσουν την κυματομορφή ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφονται τα προβλήματα που παρουσιάζει η μέτρηση του ρεύματος και τους τρόπους που αυτά αντιμετωπίζονται. Εν συνεχεία γίνεται αναφορά στον τρόπο που επηρεάζει το κύκλωμα εκφόρτισης την μορφή του ρεύματος. Επίσης, παρουσιάζονται στοιχεία από μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν σχετικά με το ηλεκτρικό τόξο και το πώς αυτό μοντελοποιείται, ενώ αναφέρονται εν συντομία οι εξισώσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που δημιουργούνται από το ρεύμα εκφόρτισης.

Στο **Κεφάλαιο 4** δίνεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων, καθώς και τον εργαστηριακό εξοπλισμό που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Επίσης γίνεται αναφορά στους δύο τρόπους με τους οποίους είναι δυνατή η ανακατασκευή του ρεύματος.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται αναφορά στην επικείμενη αναθεώρηση του Προτύπου IEC 6100-4-2, η οποία δίνει ιδιαίτερο βάρος στην παράγωγο του ρεύματος. Για αυτό το λόγο έγινε επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της παραγώγου του ρεύματος για τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αφορούν τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα και η στατιστική τους επεξεργασία. Διενεργούνται κάποια στατιστικά τεστ τα οποία καταδεικνύουν την ποιότητα και την υψηλή επαναληψημότητα της γεννήτριας NSG-438, ενώ δίνουν με πιθανότητα 95% τα περιθώρια θα που κυμαίνονται οι τιμές των παραμέτρων του ρεύματος σε μελλοντικές μετρήσεις. Το τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αφορά την αβεβαιότητα που παρουσιάζει η πειραματική διαδικασία.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται προσομοίωση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ανθρώπου με τη βοήθεια του προγράμματος Spice. Παρουσιάζονται τα ρεύματα που διαρρέουν το άτομο κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, η συνεισφορά στο συνολικό ρεύμα κάθε μέλους του σώματος και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την όλη διαδικασία.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** αναφερόμαστε στα μελλοντικά πειράματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν προκειμένου να αποκτήσουμε μια όσο γίνεται πιο ολοκληρωμένη εικόνα πάνω στο θέμα του παραγόμενου ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Θα ήταν μεγάλη παράληψη στο σημείο αυτό να μην ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ι. Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τις χρήσιμες συμβουλές του και την αμέριστη εμπιστοσύνη στο πρόσωπο μου.

V

Τον κ. Γεώργιο Π. Φώτη, Υποψήφιο Διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την βοήθεια, την καθοδήγηση, την υπομονή και τον χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα προσέφερε τη βοήθειά του και τις γνώσεις του συμβουλεύοντας με για καίρια θέματα που αφορούσαν τη διπλωματική μου εργασία.

Τους συναδέλφους μου κ.κ. Λεονάρδο Στεφάνου και Κωνσταντίνο Πιππή, με τους οποίους είχαμε αγαστή συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και ανταλλάξαμε χρήσιμες πληροφορίες.

Την κυρία Νικολέτα Χ. Ηλία υπεύθυνη του εργαστηρίου για την βοήθεια στην πραγματοποίηση του πειράματος και της χρήσης του εξοπλισμού.

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

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

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

1.1 Περί ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό την εξέταση της δυνατότητας αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε 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 IEEE [1]: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) είναι η ικανότητα μιας διάταξης μιας συσκευής ή ενός συστήματος, να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σε αυτό το περιβάλλουν.

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.

1

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 (Electrostatic Charge)

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

1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

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



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

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. 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 ΘΕΤΙΚΑ	ҮЛІКА ПОҮ ФОРТІZONTAI APNHTIKA			
Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάιλον Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο	Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξείδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο ΡVC TEFLON 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 σειρά Επιφάνεια επαφής Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών Βαθμός διαχωρισμού	Αγωγιμότητα των υλικών Σχετική υγρασία Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού

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

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

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

5

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. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

Η ηλεκτροστατική φόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις 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 η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή είναι επιβεβλημένη, 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 δευτερευόντων 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 μπορέσουν να εκτιμήσουν την 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 (HBM, MM, 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, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης 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 ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση V_{ESD} και L_S την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

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

$$(1.1)$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

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

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

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

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

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

Πίνακας 1.4:Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης[6]

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 κυματομορφών 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 παρθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν κάποιες τιμές για την διαστασιολόγηση των μερών του κυκλώματος. Η αντίσταση της επιδερμίδας R είναι περίπου 150Ω έως 1000Ω (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ), η ανθρώπινη χωρητικότητα βρίσκεται περίπου 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)

Κεφάλαιο 2

Πρότυπο IEC 61000-4-2 και κυματομορφές

2.1 Επισκόπηση Προτύπου ΙΕС 61000-4-2

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 αποτελεί το δεύτερο τμήμα (Section 2) του τετάρτου μέρους (Part 4) του Προτύπου IEC 1000:1995, το οποίο 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 [10].

Σε αυτό καθορίζονται:

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

Το Προτύπου βρίσκεται υπό αναθεώρηση την χρονική περίοδο που συντάσσεται η παρούσα διπλωματική και για αυτό το λόγο οι αναφορές θα γίνονται μόνο στο ήδη δημοσιευμένο Πρότυπο

2.2 Ορισμοί

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στην ορολογία που χρησιμοποιείται στο κεφάλαιο αυτό αλλά και σε άλλα μέρη της διπλωματικής εργασίας [10].

Υποβάθμιση λειτουργικότητας (Degradation of performance): Μια ανεπιθύμητη μεταβολή στον τρόπο λειτουργίας οποιασδήποτε συσκευής, εξοπλισμού ή συστήματος.

Αντιστατικά υλικά (Antistatic material): Υλικά που παρουσιάζουν ιδιότητες, οι οποίες ελαχιστοποιούν τη δημιουργία φορτίσεων, όταν αυτά τρίβονται ή διαχωρίζονται από άλλα ίδια ή παρόμοια υλικά.

Πυκνωτής αποθήκευσης ενέργειας (Energy store capacitor): Ο πυκνωτής της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που αναπαριστά την χωρητικότητα ενός ανθρωπίνου σώματος το οποίο έχει φορτιστεί με τιμή ίση με την τιμή της τάσης δοκιμής.

EUT (EYΔ): Equipment Under Test (Εξοπλισμός υπό δοκιμή)

Χρόνος συγκράτησης (Holding time): Το διάστημα πριν την εκφόρτιση στο οποίο η μείωση της τάσης δοκιμής (λόγο διαρροής) είναι μικρότερη του 10%.

Γείωση (Ground): Μια αγώγιμη σύνδεση, είτε ηθελημένη είτε τυχαία, με την οποία ένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή εξοπλισμός συνδέεται στη γη ή σε κάποιο αγώγιμο σώμα σχετικά μεγάλης έκτασης που παίζει το ρόλο της γης.

Εκφόρτιση μέσω επαφής (Contact discharge): Μέθοδος δοκιμής κατά την οποία το ηλεκτρόδιο της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (μύτη πιστολιού δοκιμών της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων) έρχεται σε επαφή με τον ΕΥΔ και η εκφόρτιση πραγματοποιείται από τον διακόπτη που βρίσκεται πάνω στην γεννήτρια.

Εκφόρτιση μέσω αέρα (Air discharge): Μέθοδος δοκιμής κατά την οποία το φορτισμένο ηλεκτρόδιο (μύτη πιστολιού δοκιμών) έρχεται σταδιακά σε όλο και πιο κοντινή απόσταση από τον ΕΥΔ και η εκφόρτιση γίνεται μέσω τόξου.

Κορυφή ρεύματος εκφόρτισης (Current peak): Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης.

Στόχος εκφόρτισης ή μετατροπέας ρεύματος (Pellegrini target ή current transducer): Ο στόχος πάνω στον οποίο γίνεται η ηλεκτροστατική εκφόρτιση και είναι υπεύθυνος για την μετατροπή του σήματος ρεύματος σε σήμα τάσης.

Χρόνος ανόδου t_r (Rise time t_r): Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής.

Ρεύμα στα 30 ns (I₃₀): Η τιμή του ρεύματος 30 ns μετά την χρονική στιγμή που παρουσιάζεται 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 το 10% της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκφόρτισης.

2.3 Επίπεδα δοκιμών

Στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις που διενεργούνται σύμφωνα με τις συνθήκες και τον εξοπλισμό που ορίζει το Πρότυπο τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής του ρεύματος είναι καθορισμένα και οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων γνωστές, με κάποια βέβαια περιθώρια απόκλισης. Στον Πίνακα 2.1 δίνονται τα επίπεδα δοκιμών.

Επίπεδο	Τάση δοκιμής(KV)			
Linitoo	Εκφόρτιση μέσω επαφής	Εκφόρτιση μέσω αέρα		
1	2	2		
2	4	4		
3	6	8		
4	8	15		

Πίνακας 2.1:Τάσεις δοκιμής [10]

Οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων κυριοτέρων παραμέτρων για το ρεύμα εκφόρτισης δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 2.2.

Επίπεδο	Ενδεικνυόμενη τάση	Κορυφή ρεύματος ±10%(Α)	Χρόνος ανόδου t _r (ns)	Ρεύμα (±30%)στα 30ns(A)	Ρεύμα (±30%)στα 60ns(A)
1	2	7.5	0.7 έως 1	4	2
2	4	15	0.7 έως 1	8	4
3	6	22.5	0.7 έως 1	12	6
4	8	30	0.7 έως 1	16	8

Πίνακας 2.2:Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής[10]

Οι τιμές αυτές για τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής ρεύματος (μέγιστο ρεύμα, χρόνος ανόδου, ρεύμα στα 30 ns, ρεύμα στα 60 ns) θα επαληθευτούν πειραματικά μόνο εάν ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούμε έχει εύρος ζώνης (bandwidth) μεγαλύτερο του 1GHz. Χρησιμοποίηση μικρότερου εύρους ζώνης έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μετρούμενης τιμής του χρόνου ανόδου και της μέγιστης τιμής [10].

2.4 Εξοπλισμός δοκιμών

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός [11] για την πραγματοποίηση δοκιμών ηλεκτροστατικών εκκενώσεων είναι ο ακόλουθος:

- Κλωβός Faraday για τοποθέτηση του εξοπλισμού μετρήσεων.
- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκκενώσεων (ESD generators).
- Παλμογράφος με εύρος τουλάχιστον 1 GHz.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Εξασθενητής.
- Ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχνα σήματα.

Εφόσον ο εξοπλισμός μας θα ανταποκρίνεται στην παραπάνω απαίτηση μπορούμε να προχωρήσουμε στην δοκιμή του εξοπλισμού. Στο σημείο αυτό προκύπτουν κάποια ερωτήματα πρακτικής φύσεως. Για παράδειγμα:

- 1. Σε ποια σημεία του ΕΥΔ πρέπει να εφαρμόσουμε τις εκφορτίσεις;
- 2. Πόσες φορές πρέπει να επαναληφθούν οι εκφορτίσεις αυτές;
- 3. Πρέπει να είναι εκφορτίσεις μέσω επαφής ή μέσω αέρα;
- 4. Τι επίπεδα τάσης πρέπει να εφαρμοστούν;

Είναι προφανές ότι οι απαντήσεις σε αυτές τις ερωτήσεις καθορίζονται κάθε φορά από τον ΕΥΔ. Μια λογική απάντηση στο πρώτο ερώτημα είναι ότι πρέπει να εφαρμοσθούν στα σημεία ή στις επιφάνειες στις οποίες ακουμπά το προσωπικό προκειμένου να χειριστεί τον εξοπλισμό (διακόπτες, λαβές, κουμπιά, υποδοχές, κ.τ.λ). Η τάση δοκιμής θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη (κατά έναν συντελεστή ασφάλειας) από την τάση στην οποία "φορτίζεται" ένας μέσος άνθρωπος κινούμενος στον χώρο λειτουργίας του εξοπλισμού. Εξετάζοντας κάθε περίπτωση καταλήγουμε στον τρόπο με τον οποίο θα εκτελέσουμε τις δοκιμές.

2.4.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Για να προσομοιωθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του όλου φαινομένου. Πολλά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για αυτό το σκοπό αυτό. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (εκκενώσεων) που περιγράφεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2 βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος της γεννήτριας είναι :

- Ο πυκνωτής ενταμίευσης (C_s).
- Το τροφοδοτικό υψηλής τάσης.
- Η αντίσταση φόρτισης (R_c) .
- Η αντίσταση εκφόρτισης (R_d) .
- Ο διακόπτης εκκένωσης που είναι τυπικά ένα ρελέ διακένου.

Το μοντέλο το οποίο ορίζει το διεθνές Πρότυπο είναι αυτό του Σχήματος 2.1.



Σχήμα 2.1:Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκκενώσεων.

Στο Σχήμα δεν έχει σχεδιαστεί η χωρητικότητα C_d , η οποία είναι κατανεμημένη μεταξύ του ΕΥΔ και της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την ηλεκτροστατική εκφόρτιση που συμβαίνει όταν ένα άτομο ακουμπά μια γειωμένη συσκευή. Η πηγή τάσης μέσω της R_c φορτίζει τον πυκνωτή C_s . Ο πυκνωτής με το κλείσιμο του διακόπτη που βρίσκεται στο δεξί μέρος του κυκλώματος εκφορτίζεται και μας δίνει την τυποποιημένη καμπύλη ρεύματος, η οποία παρουσιάζεται στην ακόλουθη παράγραφο.

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

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Τάση εκκένωσης: 200 V..15 kV εκφόρτιση αέρος
 200 V..8 kV επαφής
- Ηλεκτρόδια εκκενώσεων: επαφής / τοξοειδούς Πολικότητα: Θετική/ αρνητική
- Πυκνωτής εκκένωσης C_s=150 pF
- Αντίσταση εκκένωσης $R_d=330 \Omega$
- Αντίσταση φόρτισης R_c =50-100 MΩ
- Λειτουργία: μονές εκκενώσεις /συνεχείς εκκενώσεις (έως 20 Hz)

2.4.2 Περιγραφή χώρου δοκιμών

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

2.4.3 Διάταξη δοκιμών (test set-up)

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

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

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

2.5 Κυματομορφές και εξισώσεις

2.5.1 Κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Το Πρότυπο καθορίζει την μορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Το φαινόμενο της εκφόρτισης ολοκληρώνεται σε ένα χρονικό διάστημα περίπου 200 ns. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2.



Σχήμα 2.2: Κυματομορφή ρεύματος κατά τη διάρκεια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Ο παλμός σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.2 παρατηρούμε ότι παρουσιάζει δύο τοπικά μέγιστα Το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο είναι και ολικό, ονομάζεται «αρχική κορυφή» (Initial Peak) και προέρχεται από την εκφόρτιση του χεριού, ενώ η δεύτερη κορυφή προέρχεται από την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής προέρχεται είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns, ενώ το πλάτος του εξαρτάται από την τάση φόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκκενώσεων. Στο Σχήμα μπορούν να διακριθούν οι χρόνοι I₃₀ και I₆₀, οι οποίοι αποτελούν, μαζί με τον χρόνο ανόδου t_r και το ρεύμα κορυφής Ι_{max}, τις τέσσερις μετρήσιμες παραμέτρους.

2.5.2 Εξίσωση ρεύματος

Παρατηρώντας την κυματομορφή στο Σχήμα 2.2 βλέπουμε ότι αυτή θα μπορούσε να προέρχεται από μια διπλοεκθετική συνάρτηση. Η ακόλουθη εξίσωση με κατάλληλη αντικατάσταση των σταθερών A, B, t₁, t₂, σ₁, σ₂ μπορεί να αντιπροσωπεύει την κυματομορφή του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση [12]:

$$I_{ESD} = A \cdot e^{-((t-t_1)/\sigma_1)^2} + B \cdot t \cdot e^{-((t-t_2)/\sigma_2)^2}$$
(2.1)

Η εξίσωση αυτή έχει αμφισβητηθεί από κάποιούς ερευνητές [13],όπως θα δούμε και αργότερα. Για εκφορτίσεις στα 4kV οι παράμετροι έχουν τις εξής τιμές: A=13, B=0.4, t₁=5, t₂=10, σ_1 =1.414, σ_2 =35.35[12]. Στον Πίνακα 2.3 έχουμε κρατήσει σταθερά κάθε φορά τις πέντε από τις έξι παραμέτρους και συγκρίνουμε τις εξαγόμενες κυματομορφές. Με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab παίρνουμε τις 13 γραφικές που προκύπτουν. Ύστερα από εξέταση των γραφικών έχουμε για την κάθε σταθερά ότι:

Α: Επηρεάζει το πλάτος της κυματομορφής και ιδιαίτερα το πλάτος της πρώτης κορυφής. Αύξηση του προκαλεί αύξηση της τιμής του πλάτους και το αντίστροφο. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη αφού η παράμετρος **A** είναι το πλάτος της εκθετικής συνάρτησης (Σχήματα 2.3, 2.4, 2.5).

Β:Ισχύουν τα παραπάνω αλλά για την δεύτερη κορυφή (Σχήματα 2.3, 2.6, 2.7).

t₁: Επηρεάζει την εμφάνιση της αιχμής(peak) του ρεύματος. Αύξηση του δίνει την αιχμή δεξιότερα και με μεγαλύτερη τιμή (Σχήματα 2.3, 2.8, 2.9).

t₂: Επηρεάζει το πλάτος της δεύτερης κορυφής. Αύξηση του όρου δίνει μεγαλύτερο πλάτος και κάνει πιο αισθητή την παρουσία της δεύτερης εκθετικής συνάρτησης

$$\mathbf{B} \cdot t \cdot e^{-((t-t_2)/\sigma_2)^2}$$
 (Σχήματα 2.3, 2.10, 2.11).

σ₁:Επηρεάζει την πρώτη κορυφή του ρεύματος. Αλλάζει τον ρυθμό di/dt.Αύξηση του έχει ως συνέπεια την μείωση της κλίσης .Τα πλάτη και των δύο κορυφών παραμένουν αναλλοίωτα ενώ οι χρονικές στιγμές που αυτά εμφανίζονται είναι ίδιες (Σχήματα 2.3, 2.12, 2.13).

σ₂:Επηρεάζει την δεύτερη κορυφή του ρεύματος. Αλλάζει περισσότερο τα χρονικά χαρακτηριστικά της καμπύλης. Παρατηρούμε ότι μείωση της μεταβλητής έχει ως συνέπεια την μείωση του χρόνου εμφάνισης του δεύτερου στην τάξη μεγίστου καθώς και γρηγορότερη απόσβεση της κυματομορφής. Μικρότερη επίδραση έχει στο πλάτος το οποίο βέβαια μειώνεται αλλά όχι με τόσο έντονο τρόπο (Σχήματα 2.3, 2.14, 2.15).

Αριθμός Γραφικής	А	В	t ₁	t ₂	σ_1	σ ₂
1	13	0,4	5	10	1.999396	1249.6225
2	5	0,4	5	10	1.999396	1249.6225
3	20	0,4	5	10	1.999396	1249.6225
4	13	0,1	5	10	1.999396	1249.6225
5	13	0,7	5	10	1.999396	1249.6225
6	13	0,4	1	10	1.999396	1249.6225
7	13	0,4	10	10	1.999396	1249.6225
8	13	0,4	5	20	1.999396	1249.6225
9	13	0,4	5	30	1.999396	1249.6225
10	13	0,4	5	10	15	1249.6225
11	13	0,4	5	10	40	1249.6225
12	13	0,4	5	10	1.999396	400
13	13	0,4	5	10	1.999396	100

Πίνακας 2.3:Πίνακας τιμών παραμέτρων των γραφικών παραστάσεων.





Σχήμα 2.4:Γραφική νούμερο 2



Σχήμα 2.5:Γραφική νούμερο 3



Σχήμα 2.6:Γραφική νούμερο 4



Σχήμα 2.7:Γραφική νούμερο 5



Σχήμα 2.8:Γραφική νούμερο 6







Σχήμα 2.10:Γραφική νούμερο 8



Σχήμα 2.11:Γραφική νούμερο 9






Σχήμα 2.13:Γραφική νούμερο 11



Σχήμα 2.14:Γραφική νούμερο 12



Σχήμα 2.15:Γραφική νούμερο 13

Παρότι η κυματομορφές από τη Σχέση 2.1 πλησιάζουν αρκετά την, ζητούμενη από το Πρότυπο, κυματομορφή υπάρχουν και άλλες προτεινόμενες εξισώσεις. Ο D. Pommerenke δημοσίευσε [13] την εξίσωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης η οποία φαίνεται στη Σχέση (2.2):

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}} + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_4}}$$
(2.2)

όπου οι k_l , k_2 δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$k_{1} = e^{-\frac{\tau_{1}}{\tau_{2}} \left(\frac{n\tau_{2}}{\tau_{1}}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

$$k_{2} = e^{-\frac{\tau_{3}}{\tau_{4}} \left(\frac{n\tau_{4}}{\tau_{3}}\right)^{\frac{1}{n}}}$$
(2.3)
(2.4)

Η τελική μορφή της συνάρτησης που δίνεται από την Σχέση 2.2 είναι:

$$i(t) = 73.1528 * \frac{t^3}{2.197 + t^3} * e^{\left(\frac{-t}{1.7}\right)} + 13.8788 * \frac{t^3}{216 + t^3} * e^{\left(\frac{-t}{58}\right)}$$
(2.5)



Σχήμα 2.16:Γραφική παράσταση συνάρτησης i(t)

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι, οι συγκεκριμένες τιμές στις παραμέτρους της συνάρτησης *i*(*t*) αφορούν τάσεις εκφόρτισης 5 kV. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η μορφή των γραφικών να προσεγγίζει, κατά το δυνατόν περισσότερο, το Πρότυπο. Συγκρίνοντας τις γραφικές των Σχημάτων 2.3 και 2.16 βλέπουμε ότι η γραφική του Σχήματος 2.16 έχει πιο ομαλό το τοπικό ελάχιστο που εντοπίζεται ανάμεσα στις δύο κορυφές και η διάρκεια του παλμού είναι μεγαλύτερη (περίπου 200 ns). Επίσης η συνάρτηση που την ορίζει (Σχέση 2.2) περιέχει περισσότερες παραμέτρους και κατά συνέπεια είναι σε θέση να αναπαραστήσει πιο πολύπλοκες γραφικές παραστάσεις, ενώ με τη βοήθεια τεχνικών βελτιστοποίησης (γενετικοί αλγόριθμοι κ.τ.λ) είναι δυνατόν να υπολογιστούν αυτοί οι παράμετροι από τις γραφικές παραστάσεις ή τις πειραματικές καμπύλες. Για αυτούς τους τρεις λόγους η δεύτερη συνάρτηση προσεγγίζει καλύτερα το Πρότυπο. Βέβαια η μορφή των παραπάνω σχέσεων δεν είναι οριστική, αλλά βρίσκονται διαρκώς υπό συζήτηση και ενδέχεται να οριστικοποιηθούν στην επόμενη έκδοση του Προτύπου ΙΕC 61000-4-2.

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

3.1 Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση ζητημάτων, που αφορούν την μέτρηση του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση, τα οποία έχουν διευκρινιστεί σε προηγούμενες μελέτες και των οποίων η γνώση είναι απαραίτητη για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

3.2 Μέτρηση ρεύματος

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα ταχέως εξελισσόμενο φαινόμενο με διάρκεια περίπου 200 ns. Είναι φανερό ότι το ρεύμα από την εκφόρτιση, το οποίο παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, θα έχει ένα φάσμα συχνοτήτων που θα εκτείνεται μέχρι κάποια GHz. Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 ορίζει ότι για την μέτρηση του ρεύματος είναι απαραίτητη η χρήση παλμογράφου εύρους τουλάχιστον 1 GHz. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι τα εξαρτήματα που αποτελούν την μετρητική διάταξη δεν παρουσιάζουν την ίδια απόκριση σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Ειδικά ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης MD 101 της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει ενίσχυση στα 2,6 GHz (6-8db) και έντονη απόσβεση στα 5,1 GHz [14].

Οι λύσεις στο πρόβλημα της ασύμμετρης ενίσχυσης-απόσβεσης στις διάφορες περιοχές του φάσματος είναι δύο. Η πρώτη λύση, που είναι και πιο απλή, στηρίζεται στην αντικατάσταση των εξαρτημάτων της μετρητικής διάταξης με άλλα που παρουσιάζουν ομοιόμορφη συμπεριφορά στο εύρος του φάσματος, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση των χαρακτηριστικών από τη συχνότητα. Μία τέτοια λύση θα επιβάρυνε το κόστος της διάταξης. Η δεύτερη λύση είναι αρκετά πιο πολύπλοκη. Χρησιμοποιεί την τεχνική του ανάποδου φιλτραρίσματος (inverse filtering). Το πρώτο βήμα σε αυτή την τεχνική είναι η εύρεση των χαρακτηριστικών, ως προς τη συχνότητα, της μετρητικής διάταξης (στόχος εκφόρτισης, καλώδιο, εξασθενητής). Εν συνεχεία ένας παλμός εκφόρτισης μετράται από τον παλμογράφο και μετασχηματίζεται στο πεδίο της συχνότητας. Το σύστημα στόχος-καλώδιο-

εξασθενητής λειτουργεί ως φίλτρο με χαρακτηριστική συνάρτηση μεταφοράς. Εφαρμόζοντας την ανάστροφη της συνάρτησης αυτής στο φάσμα του παλμού βρίσκουμε το πραγματικό φάσμα ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Απαραίτητη είναι η χρήση ενός παλμογράφου εύρους 6 GHz, ώστε να μην λειτουργεί ο ίδιος ως φίλτρο για τα υψίσυχνα σήματα. Ο τελικός παλμός μετασχηματίζεται στο πεδίο του χρόνου. Ο παλμός μπορεί να αναλυθεί για την εύρεση του χρόνου ανόδου, του μέγιστου ρεύματος και άλλων χαρακτηριστικών. Η προβλεπόμενη αβεβαιότητα για το μέγιστο ρεύμα στα 4 kV είναι περίπου 3,5 %.

3.3 Εξάρτηση της μορφής του ρεύματος από παραμέτρους του κυκλώματος εκφόρτισης

Η μορφή του ρεύματος που καθορίζει το Πρότυπο δίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι εσωτερικές επαγωγές και χωρητικότητες της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι αυτές που καθορίζουν την γενική μορφή του ρεύματος εκφόρτισης. Η παράσιτες χωρητικότητες καθορίζουν με περισσότερες λεπτομέρειες την μορφή του ρεύματος. Το Σχήμα 3.1 δείχνει την εκφόρτιση της γεννήτριας πάνω σε αντίσταση 50 Ω.



Σχήμα 3.1:Χωρητικότητες και επαγωγές που αναπτύσσονται κατά την εκφόρτιση γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Στο παραπάνω Σχήμα βλέπουμε ότι η γεννήτρια περιέχει έναν πυκνωτή C και σε σειρά με αυτόν μια αντίσταση R με τιμή 330 Ω. Ο πυκνωτής είναι γειωμένος μέσω

του καλωδίου τροφοδοσίας, ενώ η αντίσταση συνδέεται με την ακίδα εκφόρτισης μέσω ενώ κυκλώματος που χρησιμοποιείται ως διακόπτης. Η σύνδεση του πυκνωτή με τη γείωση έχει ως συνέπεια την αναπαράσταση του καλωδίου με μια αυτεπαγωγή L_R που είναι άμεση συνάρτηση του μήκους του. Στο εσωτερικό του διακοπτικού κυκλώματος περιέχεται μια επαγωγή L για να περιορίσει την άνοδο του ρεύματος. Ο πυκνωτής C φορτίζεται υπό την συνεχή τάση του τροφοδοτικού. Αυτό έχει ως συνέπεια της γειωμένης μεταλλικής πλάκας. Κατά την εκφόρτιση της, αποθηκευμένης στον πυκνωτή C, ενέργειας μέσω της αυτεπαγωγής L και της ακίδας παρουσιάζονται οι παράσιτες χωρητικότητες C_{t1} , C_{t2} και η αυτεπαγωγή L_t [15].

Για να μοντελοποιηθεί η διαδικασία της εκφόρτισης θεωρούμε δύο μεταβατικά και διαδοχικά φαινόμενα [15]. Το πρώτο φαινόμενο προκαλεί την πρώτη κορυφή και σε αυτό εμπλέκονται οι χωρητικότητες C και C_{t1}, C_{t2} . Το δεύτερο φαινόμενο είναι υπεύθυνο για την δεύτερη κορυφή που παρουσιάζει το ρεύμα και σε αυτό εμπλέκεται μόνο η χωρητικότητα C. Το Σχήμα 3.2 δείχνει πως μοντελοποιούνται αυτά το δύο φαινόμενα.



Σχήμα 3.2:Ηλεκτρικά ισοδύναμα για τα δύο στάδια της εκφόρτισης

Για το πρώτο κύκλωμα με χρήση του τελεστή Laplace έχουμε:

$$V_{A}(s) = \frac{1}{1 + sC_{t1}Z_{o}} \cdot \frac{1}{1 + sC_{t2}\left(sL_{t} + \frac{Z_{o}}{1 + sC_{t1}Z_{o}}\right)} \cdot \frac{Z_{o}}{Z_{A}(s)} \cdot \frac{V_{C}}{s}$$
(3.1)

όπου
$$Z_A(s) = \frac{1}{sC} + R + sL + \frac{\left(sL_t + \frac{Z_o}{1 + sC_{t1}Z_o}\right)\frac{1}{sC_{t2}}}{sL_t + \frac{Z_o}{1 + sC_{t1}Z_o} + \frac{1}{sC_{t2}}} + \frac{1}{sC_R}$$
(3.2)

η αντίσταση όπως φαίνεται από την πηγή τάσης. Η κυματομορφή της τάσης ρυθμίζεται κατά κύριο λόγο από την μεγιστοβάθμια μεταβλητή Laplace. Εφαρμόζοντας τον ανάστροφο μετασχηματισμό Laplace στο μεγιστοβάθμιο όρο του κλάσματος της Σχέσης 3.1 παίρνουμε:

$$u(t) = L^{-1}[V_A(s)] \cong \frac{1}{24} \cdot \frac{V_C}{LL_i C_{i1} C_{i2}} t^4$$
(3.3)

Από την Σχέση 3.3 είναι προφανές ότι η σταθερά του κυκλώματος που καθορίζει το χρόνο ανόδου εξαρτάται από τις παράσιτες χωρητικότητες C_{t1}, C_{t2} , την παράσιτη επαγωγή L_t και την επαγωγή L του διακοπτικού κυκλώματος [15]. Για το δεύτερο κύκλωμα έχουμε για τη τάση φορτίου:

$$V_B(s) = \frac{Z_o}{Z_B(s)} \cdot \frac{V_C}{s}$$
(3.4)

όπου
$$Z_B(s) = \frac{1}{sC} + R + sL + Z_o + sL_R$$
(3.5)

η αντίσταση όπως φαίνεται από την πηγή τάσης. Εάν $(R + Z_o)/2 > \sqrt{(L + L_R)/C}$ τότε για την τάση ισχύει:

$$u(t) = \frac{Z_o}{R + Z_o} \cdot \frac{V_C}{\sqrt{1 - \frac{L + L_R}{C} \left(\frac{2}{R + Z_o}\right)^2}} \cdot \left(e^{-\frac{t}{t_+}} - e^{-\frac{t}{t_-}}\right)$$
(3.6)

όπου
$$t_{\pm} = \frac{C(R+Z_o)}{2} \cdot \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{L+L_R}{C} \left(\frac{2}{R+Z_o}\right)^2} \right\}$$
 (3.7)

Аπό την Σχέση 3.6 είναι προφανές ότι η σταθερά του κυκλώματος που καθορίζει τη δεύτερη ανόδου του ρεύματος εξαρτάται από τη χωρητικότητα C, την αντίσταση R, την επαγωγή L του διακοπτικού κυκλώματος και την αυτεπαγωγή του καλωδίου γείωσης L_R [15]. Η συνολική κυματομορφή δίνεται από τον τύπο $u(t) = L^{-1}[V_A(s) + V_B(s)]$ (3.8)

3.4 Ηλεκτρικό δίπολο και παραγόμενα πεδία

Ο πρώτος σπινθήρας που θα υπάρξει κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παράγει μεγάλες τιμές στη μεταβολή του ρεύματος $\frac{\partial i(t)}{\partial t}$, όπου i(t) είναι το ρεύμα που παράγεται κατά την εκφόρτιση. Η μεταβολή του ρεύματος $\frac{\partial i(t)}{\partial t}$ παίζει σημαντικότατο ρόλο στα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο αρχικός αυτός σπινθήρας εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα του αντικειμένου που παράγει την εκφόρτιση, που στην περίπτωσή μας είναι η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Το μοντέλο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να περιγράψουμε την ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο [16]. Το σύστημα συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθεί είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος. Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα z, με το κέντρο του στην αρχή Ο του συστήματος συντεταγμένων. Τα σημειακά φορτία +q, -q προσομοιώνουν τις συνθήκες που επικρατούν ακριβώς πριν συμβεί η εκφόρτιση, τη στιγμή $t = 0^{-}$, όταν έχουμε την κατάσταση ενός ηλεκτροστατικού δίπολου. Αμέσως με την αρχή του φαινομένου, το δίπολο εκφορτίζεται διαμέσου του αγώγιμου δρόμου μήκους 2ℓ που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία. Έτσι γραμμικό ρεύμα, θεωρούμενο ως θετική κίνηση αρνητικών φορτίων (ή αρνητική θετικών φορτίων), χρονικά μεταβαλλόμενο θα αρχίσει να ρέει στον αγώγιμο δρόμο μήκους 2ℓ.

3.4.1 Εξισώσεις μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου

Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα z, με το κέντρο του στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων (σημείο Ο) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το κυλινδρικό λόγω της

συμμετρίας του προβλήματος. Το φορτίο +q βρίσκεται σε ύψος z, οπότε το είδωλό του βρίσκεται στο -z. Τα χρονομεταβλητά πεδία μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [17]. Η εκφόρτιση γίνεται πάνω στο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3 που παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.3:Ηλεκτρικό δίπολο ευρισκόμενο πάνω από επίπεδο

Οι αναλυτικές εξισώσεις για την ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου [16], Ε και Η αντιστοίχως είναι:

$$\vec{E} = E_{\rho} \cdot \vec{\alpha_{\rho}} + E_z \cdot \vec{\alpha_z}$$
(3.9)

$$E_{\rho} = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{\rho \cdot z}{R^2} \left(\frac{3 \cdot i(z, t - \frac{R}{c})}{c \cdot R^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right)$$
(3.10)

$$E_{z} = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{0}} \left[\left(\frac{3 \cdot z^{2}}{c \cdot R^{4}} \cdot \frac{1}{c \cdot R^{2}} \right) \cdot i(z, t - \frac{R}{c}) + \left(\frac{z^{2}}{c^{2} \cdot R^{3}} \cdot \frac{1}{c^{2} \cdot R} \right) \cdot \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] \quad (3.11)$$

$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{d}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\rho}{R} \left(\frac{i(z, t - \frac{R}{c})}{R^2} + \frac{1}{c \cdot R} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right)$$
(3.12)

33

όπου R είναι η απόσταση του σημείου εκφόρτισης από το σημείο παρατήρησης (ρ , φ , z), c η ταχύτητα του φωτός), d=2 ℓ το μήκος του αγώγιμου δρόμου που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία, ε₀ η διηλεκτρική σταθερά του κενού και a_z , a_p τα μοναδιαία διανύσματα στο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων ρ η προβολή του μήκους R πάνω στο επίπεδο xy.

3.5 Διάδοση διαταραχών από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέσω ομοαξονικών καλωδίων

Τα ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνται συχνά στη διασύνδεση διαφόρων ηλεκτρονικών συστημάτων. Ο κύριος λόγος για τη χρησιμοποίηση τους, είναι ότι προσφέρουν προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Για να είναι αποτελεσματική η προστασία πρέπει το μεταλλικό περίβλημα του καλωδίου να ενώνεται και στις δύο του πλευρές του καλωδίου με το περίβλημα των προστατευόμενων συστημάτων. Σε αυτή την περίπτωση το εσωτερικό του καλωδίου είναι απομονωμένο από το ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της πεπερασμένης αγωγιμότητας της θωράκισης αλλά και των διακένων που αυτή παρουσιάζει υπάρχει κάποια σύζευξη μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής περιοχής του καλωδίου [12]. Για αυτό μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε γειτνιάζουσα του καλωδίου περιοχή ή ακόμα και πάνω στο καλώδιο μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα σήματα στο εσωτερικό τα οποία μπορούν να οδηγήσουν στην καταστροφή ή την δυσλειτουργία των ηλεκτρονικών.

Ένας τρόπος για την αποφυγή αυτόν τον προβλημάτων είναι η χρήση οπτικών καλωδίων, τα οποία είναι κακοί αγωγοί για τα ρεύματα ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται η διάδοση του ηλεκτροστατικού σήματος από ένα σύστημα σε ένα άλλο. Το μειονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στην ανάγκη μετατροπής του ηλεκτρικού σήματος σε οπτικό και το ανάποδο. Εκτός από το αυξημένο κόστος πρόβλημα αποτελεί και η μεγάλη ευαισθησία της φωτοδιόδου, που είναι υπεύθυνη για την μετατροπή, σε ηλεκτροστατικά ρεύματα. Έτσι η χρήση οπτικού καλωδίου για την σύνδεση μειώνει τον κίνδυνο διάδοσης των ηλεκτροστατικών σημάτων σε άλλα μέρη του εξοπλισμού, αλλά είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη σε εξαρτήματα που πλήττονται άμεσα από παλμούς ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [12].

3.6 Προβλήματα των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων προσπαθούν να προσομοιώσουν τη μορφή του ρεύματος και του πεδίου που προκαλείται από την εκφόρτιση ενός ανθρώπου πάνω σε ένα κομμάτι μέταλλο. Οι παράμετροι που πρέπει να πληρούν οι γεννήτριες δίνονται στο Πρότυπο IEC 61000-4-2. Η κυριότερη απαίτηση αφορά την μορφή του ρεύματος. Παρά την σαφώς καθορισμένη διαδικασία έχουν αναφερθεί προβλήματα που αφορούν την πειραματική διαδικασία [18]. Μερικά από αυτά είναι:

- Τα αποτελέσματα των δοκιμών εξαρτώνται από τον κατασκευαστή των γεννητριών.
- Ακόμα και με την ίδια γεννήτρια η επαναληψιμότητα είναι κακή.
- Η δοκιμές που γίνονται για την ατρωσία του εξοπλισμού αφορούν την ηλεκτροστατική εκφόρτιση από άνθρωπο και για αυτό δεν είναι εγγυημένη η ατρωσία σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις από άλλους εξοπλισμούς.

Η αιτία των προβλημάτων δεν έχει προσδιοριστεί επακριβώς, μπορεί όμως να είναι μια από τις παρακάτω [18]:

- Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την διαταραχή, μπορεί να μην είναι αυτοί που καθορίζουν την σοβαρότητα της. Για παράδειγμα πολλοί εξοπλισμοί υπό δοκιμή είναι ευαίσθητοι στην μέγιστη παράγωγο του ρεύματος di/dt max.
- Μερικοί σημαντικοί παράμετροι μπορεί να μην έχουν μελετηθεί και θα πρέπει μελλοντικά να ληφθούν υπ'όψην. Τα μεταβατικά πεδία διαφέρουν από γεννήτρια σε γεννήτρια ακόμα και για παρόμοιες κυματομορφές ρεύματος, ενώ η θέση του καλωδίου γείωσης επηρεάζει τα αποτελέσματα του πειράματος.
- Οι μέθοδοι δοκιμής μπορεί να είναι ανεπαρκείς.
- Η πειραματική διάταξη (set-up) της δοκιμής μπορεί να είναι ανακριβής. Η μη γραμμικότητα των στοιχείων του μετρητικού κυκλώματος και το περιορισμένο εύρος του παλμογράφου επηρεάζουν την ακρίβεια σημαντικά.

3.7 Μέγιστη παράγωγος ρεύματος γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι μέγιστες τιμές της παραγώγου του ρεύματος έχουν συχνά ιδιαίτερη επιρροή στην σοβαρότητα ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης [18]. Το υπάρχον Πρότυπο προσδιορίζει έμμεσα μόνο το κατώτερο όριο για την παράγωγο $\frac{di}{dt}$, αφού προσδιορίζει το χρόνο ανόδου και την μέγιστη τιμή του ρεύματος. Για γεννήτριες που πληρούν το πρότυπο έχουν μετρηθεί τιμές παραγώγου από 4 $\frac{A}{ns \cdot kV}$ έως $12 \frac{A}{ns \cdot kV}$. Στο Σχήμα 3.4 φαίνονται τα ρεύματα και οι παράγωγοι τους για δύο διαφορετικές γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.



Σχήμα 3.4:Σύγκριση ρευμάτων και παραγώγων τους από δύο γεννήτριες για τάση 5kV

Η παράγωγος μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους

- 1. Граµµіќң πареµβολ́ң: Η τιµ́ң του µέγιστου ρεύµатоς каι του χρόνου ανόδου еπιτρέπει τον υπολογισµό το κατώτερου ορίου για την παράγωγο. Хρησιµοποιώντας το εύρος τιµών που δίνεται από το Πρότυπο για το χρόνο ανόδου (0,7-1 *ns*), την µέγιστη τιµ́ң του ρεύµατος (3,375 $\frac{A}{kV} \pm 10\%$) και υποθέτοντας γραµµική αύξηση του ρεύµατος βρίσκουµε τα εξής: $(di/dt)_{min}/kV = 2,7 A/(ns \cdot kV)$ και $(di/dt)_{max}/kV = 4,7 A/(ns \cdot kV)$
- 2. Απευθείας υπολογισμοί σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση: Με πειράματα που έγιναν από τον D.Pommerenke [18] βρέθηκαν: $I_{max} = 20,2A(4,04A/kV)$,

 $t_{rise} = \ln s$, $(di/dt)_{max}/kV = 3,92 A/(ns \cdot kV)$. Υποθέτοντας το ίδιο εύρος απόκλισης (± 20%) για χρόνο ανόδου και την παράγωγο του ρεύματος βρίσκουμε $(di/dt) = 4,7 A/(ns \cdot kV) \pm 20\%$

3.8 Ηλεκτρικό τόξο

Η διαδικασία δημιουργίας του ηλεκτρικού τόξου μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις. Την φάση εκκίνησης, που προηγείται της ροής ρεύματος και την ωμική φάση, αμέσως μετά τον σχηματισμό αγώγιμου καναλιού [19].

3.8.1 Φάση εκκίνησης

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση του ίδιου αντικειμένου, με την ίδια τάση μπορεί να δώσει διαφορετικές κυματομορφές ρεύματος. Οι αποκλίσεις οφείλονται στο διαφορετικό μήκος τόξου και όχι στην διαφορετική ταχύτητα προσέγγισης. Για το ίδιο αντικείμενο, μήκος τόξου, τάση, το ρεύμα εκφόρτισης είναι ανεξάρτητο από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, την ακτινοβολία UV και την ταχύτητα προσέγγισης. Για αυτό το λόγο μπορεί να ανακατασκευαστεί με αρκετά καλή ακρίβεια. Για ομογενή πεδία η τάση διάσπασης δίνεται από τον τύπο:

$$U = 25,4d + 6,64\sqrt{d} \tag{3.13}$$

όπου d, η απόσταση σε εκατοστά. Στις περισσότερες όμως ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις το μήκος του τόξου είναι μικρότερο από την τιμή που δίνει η Σχέση 3.13. Τη στιγμή που η απόσταση του κενού έχει τιμή μικρότερη από την κρίσιμη, οι συνθήκες είναι ικανές να προκαλέσουν την έναρξη του τόξου. Όμως λόγο μιας πιθανής έλλειψης ελεύθερων ηλεκτρονίων η ανάπτυξη του τόξου μπορεί να παρουσιάσει χρονική υστέρηση. Αν το αντικείμενο πλησιάσει κατά την διάρκεια αυτής της υστέρησης η απόσταση ανάπτυξης του τόξου είναι μικρότερη ενώ εξαιτίας της έντασης του φαινομένου ο χρόνος ολοκλήρωσης του είναι μειωμένος. Το πηλίκο της απόστασης στην οποία δημιουργήθηκε το τόξο για συγκεκριμένη τάση, προς την

τιμή που δίνει η Σχέση 3.13 ονομάζεται σχετικό μήκος τόξου $\left(d_{rel} = \frac{d_{real}}{d}\%\right)$ και

είναι αυτό υπεύθυνο για τις διαταραχές που προκαλούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και όχι η τάση εκφόρτισης. Για εκφορτίσεις από 1,5 kV έως 10 kV χρονική υστέρηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υγρασία. Σε υγρό περιβάλλον

τα ηλεκτρόνια προσκολλούνται στα πολωμένα μόρια του νερού και δημιουργούν στρώμα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου προκαλώντας έτσι μεγαλύτερα τόξα και μικρότερους χρόνους ανόδου.

3.8.2 Ωμική φάση

Οι περισσότερες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις συμβαίνουν μεταξύ αντικειμένων που πλησιάζουν. Για αυτό το σχετικό μήκος του τόξου μπορεί να έχει τιμές έως και 10%. Σε κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ο χρόνος ανόδου εξαρτάται από την τιμή του πεδίου, της τάσης και του μήκους του τόξου. Η εξάρτηση αυτή διαφέρει σε κάθε γεννήτρια. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι τα ακόλουθα [19]:

- Bragniski
- Rompe and Weizel
- Toepler
- Μοντέλο της περιορισμένης διάχυσης-Renninger
- Μοντέλο της χιονοστιβάδας

Τα δύο κυριότερα μοντέλα είναι αυτό της χιονοστιβάδας και των Rompe and Weizel.

3.8.2.1 Μοντέλο Rompe-Weizel

Οι Rompe και Weizel χρησιμοποίησαν το ενεργειακό ισοζύγιο για να υπολογίσουν την στιγμιαία ωμική αντίσταση του τόξου. Υποθέτοντας ένα αγώγιμο κανάλι ανάλογο της ενέργειας η αντίσταση του τόξου μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση:

$$R(t) = \frac{d}{\sqrt{2a\int_{0}^{t} i(\xi)^{2} d\xi}}$$
(3.14)

όπου R η αντίσταση του τόξου (Ω), d το μήκος του τόξου (m), I το ρεύμα εκφόρτισης, α μια εμπειρική σταθερά που λαμβάνει συνήθως τιμή $a = (0,5-1) \times 10^{-4} m^2/V^2$.

3.8.2.2 Μοντέλο της χιονοστιβάδας

Χρησιμοποιώντας την θεωρία της χιονοστιβάδας προκύπτει ένα διαφορετικό μοντέλο για το ηλεκτρικό τόξο. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την κινητικότητα και των ιονισμό

των ηλεκτρονίων. Η αντίσταση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R(t) = \frac{d}{e\mu n_o \exp\left(\int_{0}^{t} a(\xi) \nu(\xi) d\xi\right)}$$
(3.15)

όπου ε το φορτίο του ηλεκτρονίου (A s), μ η κινητικότητα του ηλεκτρονίου (m²/V s), n_o ο αριθμός των ηλεκτρονίων κατά την εκκίνηση (1/m), α ο συντελεστής ιονισμού των ηλεκτρονίων (1/cm), υ η μεταφορική ταχύτητα του ηλεκτρονίου. Ο συντελεστής ιονισμού των ηλεκτρονίων α εξαρτάται από το ηλεκτρικό πεδίο και

$$\varepsilon i v \alpha \iota: a(E) = A \exp\left(\frac{-Bp}{E}\right)$$
(3.16)

όπου Ε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/cm), p η πίεση του αέρα(Torr) και A, B σταθερές με τιμές A=8 (cm⁻¹), B=247 (V Torr⁻¹ cm⁻¹). Η κινητικότητα θεωρείται ανεξάρτητη από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

3.8.3 Συμπεράσματα και περιορισμοί

Τα τυπικά αποτελέσματα της μοντελοποίησης του τόξου φαίνονται στα Σχήματα 3.5,3.6 για το ρεύμα και την παράγωγο του.



Σχήμα 3.5:Σύγκριση ρευμάτων για διάφορες τάσεις και μοντέλα για το ηλεκτρικό τόξο



Σχήμα 3.5:Σύγκριση παραγώγου ρευμάτων για διάφορες τάσεις και μοντέλα για το ηλεκτρικό τόζο

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρούμενες τιμές είναι τα ακόλουθα:

- Για κάθε τάση μέτρησης οι τιμές σχηματίζουν ευδιάκριτες ζώνες κάτι που υποδηλώνει ότι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν μεγάλη επαναληψιμότητα για το ίδιο αντικείμενο, την ίδια τάση και το ίδιο μήκος τόξου.
- Το σχετικό μήκος του τόξου επηρεάζει το πλάτος του ρεύματος μεγαλώνοντας το μέχρι επτά φορές. Για παράδειγμα στα 10 kV το I_{max} αυξάνει από 20 A για d_{rel} = 100% σε 140 A για d_{rel} = 22%.
- Για την ίδια τάση η παράγωγος μπορεί να διαφέρει μέχρι και δύο τάξεις μεγέθους. Για παράδειγμα στα 10 kV παρουσιάζεται διακύμανση από 8 A έως 1050 A για d_{rel} = 100 22%.
- Για d_{rel} = 100% το ρεύμα και η παράγωγός του εξαρτώνται ελάχιστα από την τάση.
- Τα μοντέλα της χιονοστιβάδας και των Rompe-Weizel μπορούν να αναπαράγουν αρκετά καλά την επιρροή του μήκους τόξου στο φαινόμενο.

40

- Για τόξα μικρού μήκους το μοντέλο της χιονοστιβάδας δίνει τιμές μικρότερες από τις μετρούμενες.
- Για d_{rel} = 100% το μοντέλο των Rompe-Weizel δίνει καλύτερα αποτελέσματα από αυτό της χιονοστιβάδας. Για υψηλότερες τάσεις οι τιμές που δίνει η προσομοίωση είναι μικρότερες από τις πειραματικές.



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 IEC 61000-4-2 ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκκενώσεων (ESD generator).
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Βάσεις στήριξης του ομοαξονικού προσαρμοστή.
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.
- Εξασθενητές (attenuators).
- Παλμογράφος TDS 7254B.
- Ανηχωϊκός θάλαμος.

4.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι παράλλήλα με την μέτρηση του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται. Στα Σχήματα του κεφαλαίου θα παρουσιάζεται το κομμάτι της πειραματικής διάταξης που αφορά την μέτρηση του ρεύματος.



Σχήμα 4.1:Η πειραματική διάταξη

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 εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με τις γεννήτριες NSG-438 και NSG-433 της εταιρίας Schaffner. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκκένωσης και να πάρουμε τις κυματομορφές του, χρησιμοποιούμε ομοαξονικά καλώδια, τα οποία μέσω του γειωμένου πίνακα βυσμάτων που διαθέτει ο ανηχωϊκός θάλαμος μεταφέρουν στο εξωτερικό του θαλάμου, με τη βοήθεια νέων ομοαξονικών, το σήμα. Επειδή το ρεύμα που δημιουργήται έχει μεγάλες τιμές (περίπου 3,5A/kV) πρέπει να εξασθενήσουμε τα αντίστοιχο σήμα πρωτού αυτό εισέλθει στον παλμογράφο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τον εξασθενητή της Tektronix (011-0059-03). Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 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 101 της Schaffner. Τέλος προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τυχαία σήματα, το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχωικό θάλαμο ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως 1 GHz.



Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

4.3.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες της εταιρείας Schaffner τη NSG-433 [20] και τη NSG-438 [21]. Η γεννήτρια NSG-433 χρησιμοποιήθηκε μόνο για μετρήσεις που αφορούν την παράγωγο του ρεύματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτές.

4.3.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.3 παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις 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 εκκένωσης. Η γεννήτρια NSG-433 περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκκενώσεων που πραγματοποιούνται.



Σχήμα 4.3:Η γεννήτρια NSG-433

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκκένωσης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή η οποία ονομάζεται προσαρμοστής εκκένωσης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκκένωσης καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκκενώσεων μέσω αέρα φαίνονται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Ακίδες για εκκενώσεις μέσω αέρα και επαφής για την γεννήτρια NSG-433

4.3.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με την γεννήτρια της εταιρείας Schaffner τη NSG-438. Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Ο χειρισμός της γεννήτριας γίνεται μέσω της οθόνης αφής (touch screen), η οποία βρίσκεται στο πίσω μέρος του πιστολιού εκφόρτισης. Στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά της μέρη



Σχήμα 4.5: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438

Η γεννήτρια αποτελείται από τα τρία βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.6 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)
- Το «πιστόλι» στο οποίο βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στην λαβή του πιστολιού βρίσκεται το 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 4.6:Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες

Όταν η γεννήτρια είναι έτοιμη για λειτουργία στην οθόνη αφής εμφανίζεται το μενού που φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Από την οθόνη αφής μπορούμε να επιλέξουμε δίαφορα στοιχεία, όπως την τιμή της τάσης εκφόρτισης που θέλουμε να κάνουμε, την λειτουργία της γεννήτριας σε θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -), καθώς και την πραγματοποίηση διαδοχικών εκφορτίσεων ή μιας μοναδικής (η επιλογή αυτή ισχύει για εκφορτίσεις επαφής). Επίσης στην οθόνη παρουσιάζονται ενδείξεις για την τάση, την πολικότητα, το είδος της εκφόρτισης αλλά και τον αύξων αριθμό της, μετρητής ο οποίος μπορεί να μηδενιστεί μέσο του Menu. Κατά την πραγματοποίηση εκφορτίσεων επαφής το μπουτον εκφόρτισης πιέζεται εφόσον η ακίδα έχει έλθει σε επαφή με το στόχο. Εν συνεχεία το μπουτόν απελευθερώνεται και πραγματοποιήται η εκφόρτιση. Στην περίπτωση των εκφορτίσεων αέρος, κρατώντας πατημένο το μπουτόν, το πιστόλι πλησιάζει το στόχο μέχρι να ακουμπήσουν.



Σχήμα 4.7:Το μενού της οθόνης αφής της NSG-438

Πυκνωτής εκκένωσης C_s	150 pF
Αντίσταση εκκένωσης R_d	330 Ω
Αντίσταση φόρτισης R_c	50 MΩ
Τάση εξόδου V ₀	200V-30
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική/αρνητική
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% V ₀)	>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
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240 VAC, 50-60 Hz
Κατανάλωση	25 VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40 °C
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%

Πίνακας 4.1:Τεχνικά χαρακτηριστικά NSG-438 [21]

4.3.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης είναι 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. Στη διάταξη χρησιμοποιήθηκε ο MD 101 της Schaffner. Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο του ομοαξονικού προσαρμοστή. Οι αντιστάσεις R_1, R_2 μετρήθηκαν και οι τιμές τους βρέθηκαν $R_1=2,005\Omega$ και $R_2=48,246\Omega$.



Σχήμα 4.8:Ηλεκτρικό ισοδύναμο MD 101

Στα Σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζεται ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 101.



Σχήμα 4.9: Εμπρόσθια όψη του ομοαξονικόυ προσαρμοστή MD 101



Σχήμα 4.10:Οπίσθια όψη του ομοαζονικόυ προσαρμοστή MD 101

4.3.3 Βάσεις στήριξης

Οι βάσεις στήριξης του στόχου εκφόρτισης-ομοαξονικού προσαρμοστή παίζουν σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της μέτρησης καθώς επηρεάζουν τις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος. Υπάρχουν τρεις βάσεις στήριξης.

 Ξύλινη βάση: Αποτελείται από ένα τετράγωνο κόντρα πλακέ πάνω στο οποίο υπαρχουν 60 οπές για την στήριξη του στόχου αλλά και των probe που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των πεδίων.



Σχήμα 4.11:Ξύλινη βάση στήριξης

2. Μεταλλική βάση: Αποτελείται από ένα αλουμινένιο τετράγωνο πλαίσιο διαστάσεων 1m x 1m με 7 οπές για την τοποθέτηση του στόχου εκφόρτισης.



Σχήμα 4.12:Μεταλλική βάση στήριξης

3. Μεταλλική βάση στον τοίχο του θαλάμου: Η βάση αυτή αποτελείται από έναν γειωμένο πίνακα, διαστάσεων 36 cm x 36 cm, τοποθετημένο στον τοίχο του ανοϊχοικού θαλάμου, ο οποίος παρέχει βύσματα στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά του θαλάμου ώστε να είναι δυνατή η λήψη σημάτων και εκτός θαλάμου.



Σχήμα 4.13:Μεταλλική βάση στον τοίχο του θαλάμου

4. Μεταλλική βάση: Αποτελείται από ένα αλουμινένιο τετράγωνο πλαίσιο διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m. Χρησιμοποιήθηκε μόνο για μετρήσεις που αφορούν την παράγωγο του ρεύματος εκφόρτισης.



Σχήμα 4.14:Μεταλλική βάση στήριξης

4.3.4 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας (RF, Radio Frequency). Από τα δύο ομοαξονικά

καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν το ένα καλώδιο συνδέει τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης με το βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχωϊκού θαλάμου και το άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο κανάλι του παλμογράφου.

4.3.5 Εξασθενητής (attenuator)

Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε την κυματομορφή του το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνέψει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2 GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Εξασθένηση 20 dB σημαίνει υποβίβαση του σήματος 10 φορές, εφ' όσον κατά τα γνωστά ισχύει $20dB = 20\log(\frac{U_2}{U_1})$. Ο εν λόγω εξασθενητής φαίνεται στο Σχήμα 4.15 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.15:Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03

4.3.6 Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Ο παλμογράφος αυτός, που είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix, 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 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. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το κάθε κανάλι του παλμογράφου αντέχει μέγιστη τιμή ρεύματος μέχρι 5 V (rms τιμή). Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16 ενώ μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 4.16:Ο παλμογράφος TDS 7254B

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	
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 4.2:Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B [22]



Σχήμα 4.17:Κομβία του παλμογράφου TDS 7254B

4.3.7 Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)

Προκειμένου να εξαλείψουμε τις παρεμβολές που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση στον εξοπλισμό καταγραφής (παλμογράφος), χρησιμοποιείται θωρακισμένος θάλαμος μεταβατικών διαταραχών. Ο παλμογράφος βρίσκεται στο θάλαμο ελέγχου (control room) διαστάσεων 3,2 x 2,5 x 3,3 m³. Ο θωρακισμένος θάλαμος του εργαστηρίου που θα χρησιμοποιηθεί στην πειραματική διάταξη είναι ο Lingren-Rayproof Series 81. Ο θάλαμος αυτός έχει διαστάσεις 3,5 x 6,5 x 3,3 m³, τα τοιχώματά του οποίου είναι κατασκευασμένα από φερρίτη (μαλακός σίδηρος), υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό τις παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (EMI- Electromagnetic Interferences). Ο θάλαμος αυτός αυτός αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως και 1 GHz.

4.4 Ανασύνθεση ρεύματος

4.4.1 1°ς τρόπος

Στον παλμογράφο, αυτό που μετράται είναι η τάση και όχι το ρεύμα που χρειάζεται να γνωρίζουμε προκειμένου να υπολογιστούν οι τέσσερις παράμετροι του, οπότε είναι αναγκαία η ανακατασκευή του ρεύματος μέσω της τάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.18 και το οποίο περιλαμβάνει την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, τον ομοαξονικό μετατροπέα και τον παλμογράφο. Στο Σχήμα 4.18 η R_L είναι η αντίσταση φόρτισης του ομοαξονικού προσαρμοστή, R_b η αντίσταση εκκένωσης και Z_0 η ονομαστική αντίσταση προσαρμογής του ομοαξονικού καλωδίου, η οποία είναι 50 Ω.



Σχήμα 4.18:Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση

Το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ESD} = \frac{C \cdot V_R}{Z_0}$$
(4.1)

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\mathrm{CT}} \cdot \mathbf{C}_{\mathrm{A}} \tag{4.2}$$

$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L}$$
(4.3)

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

του εξασθενητή αντίστοιχα. Επειδή ο εξασθενητής είναι 20 dB το σήμα εξασθενείται 10 φορές (C_A =10). 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 αντίσταση φόρτισης R_L είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού ηλεκτροδίου (δίσκου) και του εξωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και είναι ίση με 2.018 Ω. Η R_b είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού πλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και διαθερικού ηλεκτροδίου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και αποφεύγεται ο μέσος όρος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα της μέτρησης. Από την Σχέση 4.3 υπολογίζουμε την τιμή του C_{cr} :

 $C_{CT} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L} = \frac{2.005 + 48.246 + 50}{2.005} = 50.0004 \approx 50.$ Δεδομένου ότι έχουμε C_A=10 και Z_0=50, βρίσκουμε ότι 1 Volt στον παλμογράφο αντιστοιχεί σε ρεύμα εκφόρτισης 10 Α.

4.4.2 2^{ος} τρόπος

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της έντασης του ρεύματος, μέσω της ένδειξης τάσης του παλμογράφου, βασίζεται στη θεωρία δικτύων και συγκεκριμένα αφορά τα δίθυρα. Το Σχήμα 4.19 δίνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο της μετρητικής διάταξης συμπεριλαμβανομένου και του καλωδίου με τον εξασθενητή.



Σχήμα 4.19:Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης [23]

Το παραπάνω κύκλωμα με την μορφή διθύρων έρχεται στην μορφή του Σχήματος 4.20, όπου έχουμε τα δύο δίθυρα που μοντελοποιούν το στόχο εκφόρτισης και το καλώδιο με τον εξασθενητή.



Σχήμα 4.20:Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης με χρήση δίθυρων [23]

Για τον πίνακα του στόχου έχουμε:

$$P_{t \operatorname{arg}et} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_2 \cdot \Omega \\ \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{\Omega} & 1 + \frac{R_2}{R_1} \end{bmatrix}$$
(4.4)

ενώ για τον πίνακα του καλωδίου [23]:

$$P_{cable} = \begin{bmatrix} A^{"} & B^{"} \\ C^{"} & D^{"} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+d^{2}}{2 \cdot d} & \frac{25}{d} \cdot (1-d^{2}) \cdot \Omega \\ \frac{1-d^{2}}{100 \cdot d} \cdot \frac{1}{\Omega} & \frac{1+d^{2}}{2 \cdot d} \end{bmatrix}$$
(4.5)

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

εξασθένηση A=20dB έχουμε d = 0.1 ενώ για 30dB έχουμε d = 0.03162.

Οι Πίνακες των Σχέσεων 4.4 και 4.5 σχηματίζονται βασιζόμενοι στην Σχέση 4.6

$$\begin{bmatrix} Vin\\ Iin \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B\\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vout\\ Iout \end{bmatrix}$$
(4.6)

Για να βρούμε τον συνολικό πίνακα του κυκλώματος αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τους δύο πίνακες των Σχέσεων 4.4 και 4.5. Αντικαθιστώντας τις τιμές R_1 =2.018Ω, R_2 =48.964Ω και d = 0.1, έχουμε:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = P_{t \text{ arg } et} \cdot P_{cable} = \begin{bmatrix} A' \cdot A'' + B' \cdot C'' & A' \cdot B'' + B' \cdot D'' \\ C' \cdot A'' + D' \cdot C'' & C' \cdot B'' + D' \cdot D'' \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 252.3182 & 494.7682 \\ 5.003 & 250.2275 \end{bmatrix}$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο 4.6 βρίσκουμε για το ρεύμα της εκφόρτισης:

$$I_{ESD} = C \cdot Vout + D \cdot Iout \overset{\Sigma_{ZO} \mid \mu \alpha 4.15}{\Rightarrow} I_{ESD} = C \cdot Vout + D \cdot \frac{Vout}{Zo} = \left(C + \frac{D}{Zo}\right) Vout = \left(5.003 + \frac{250.2275}{50}\right) Vout \approx 10.0075 \cdot Vout$$

Παρατηρώντας τα δύο αποτελέσματα βλέπουμε ότι οι δύο τιμές διαφέρουν μόλις κατά 0,001. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι οι δύο τρόποι είναι ισοδύναμοι. Η διαφορά που προκύπτει αποδίδεται στο ότι στον δεύτερο τρόπο υπολογισμού λήφθηκε υπ'όψιν και το καλώδιο που χρησιμοποιείται για την μεταφορά του σήματος. Αυτό έγινε με την χρήση του πίνακα της Σχέσης 4.6. Για αυτό το λόγο, ο δεύτερος τρόπος είναι και ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού. Στην συνέχεια της διπλώματικής εργασίας θα χρησιμοποιούμε για την σταθερά μετασχηματισμού ρεύματος εκφόρτισης-τάση παλμογράφου C την τιμή 10.

Κεφάλαιο 5

Αναθεώρηση Προτύπου

5.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανάγκη για αναθεώρηση του Προτύπου IEC 6100-4-2, ώστε να αλλάξει ο τρόπος που το Πρότυπο καθορίζει τις κυματομορφές από δοκιμές ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Οι προτάσεις που έχουν γίνει, αποσκοπούν στον καθορισμό μίας πιο ρεαλιστικής καμπύλης ρεύματος εκφόρτισης για τις γεννήτριες που προσομοιώνουν ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.

Υπό την παρούσα έκδοση του Προτύπου, είναι δυνατόν ένα προϊόν που έχει περάσει το τεστ ανοσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του να αποτύχει να περάσει το τελικό τεστ, εξαιτίας των διαφορών στο ρεύμα που παράγεται από γεννήτριες διαφορετικών κατασκευαστών. Επίσης, μπορεί ένας εξοπλισμός που έχει περάσει επιτυχώς μία δοκιμή σε δεδομένη τάση εκφόρτισης να αποτύχει όταν δοκιμαστεί στην μισή από αυτήν τάση, με μία άλλη γεννήτρια εκφορτίσεων.

Το Πρότυπο καθορίζει το αρχικό μέγιστο της κυματομορφής και τον χρόνο ανόδου. Στην τωρινή έκδοση δεν καθορίζεται η παράγωγος μεταξύ των σημείων t_{10%} και t_{90%}. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται γεννήτριες, οι οποίες παρουσιάζουν ταλαντώσεις μεταξύ των δύο προαναφερθέντων σημείων σε δοκιμές. Η ενέργεια που περιέχεται στις ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας, μπορεί να προκαλέσει την αποτυχία του εξοπλισμού να περάσει το τεστ ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις από τη συγκεκριμένη γεννήτρια, ενώ ο ίδιος εξοπλισμός μπορεί να περάσει το τεστ όταν δοκιμαστεί από γεννήτρια που η κυματομορφή της δεν παρουσιάζει ταλαντώσεις ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη τάση εκφόρτισης [24].Ουσιαστικά λοιπόν η μορφή της παραγώγου του ρεύματος εκφόρτισης εκφράζει το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται το ρεύμα. Άρα γεννήτρια με διαφορετική παράγωγο σημαίνει ότι μπορεί να έχει καθοριστικό ρόλο για το αν θα περάσει ή όχι ένα δοκίμιο. Ο D.Pommerenke σε πρόσφατη δημοσίευσή του εκφράζει ότι εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος των παραγόμενων πεδίων από ηλεκτροστατική εκφόρτιση [25]. Η προσπάθεια στην αναθεώρηση του Προτύπου εστιάζεται στο περιορισμό της επιτρεπόμενης ταλάντωσης σε μια κυματομορφή. Για αυτό το λόγο καθορίζονται δυο νέες παράμετροι, η μέγιστη θετική παράγωγος D_p και η μέγιστη αρνητική παράγωγος D_n . Οι δύο αλλαγές που έχουν προταθεί αφορούν, την διαφοροποίηση στον τρόπο διεξαγωγής της δοκιμής και την αύξηση των δοκιμών ανά σημείο του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα θα εξασφαλίζει ότι όλοι οι εξοπλισμοί θα απέχουν 10 cm από αγώγιμη πλάκα, κατά την διάρκεια της δοκιμής, ενώ ο αριθμός των δοκιμών ανά σημείο του εξοπλισμού εξοπλισμού θα αυξηθεί από δέκα σε πενήντα.

5.2 Παράγωγος ρεύματος

Η μέγιστη τιμή της παραγώγου του ρεύματος που θα είναι επιτρεπτή σε μια κυματομορφή, βρίσκεται υπό εξέταση. Η τιμή θα βρίσκεται σε ένα διάστημα με κέντρο την τιμή των $4,2\frac{A}{ns*kV}$ και περιθώρια $\pm 30\%$. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η προτεινόμενη κυματομορφή εκφόρτισης με εστίαση στα πρώτα 10 ns.



Σχήμα 5.1:Προτεινόμενη κυματομορφή ρεύματος εκφόρτισης

Η παραπάνω κυματομορφή αφορά θετική εκφόρτιση 5 kV, μεταξύ ανθρώπου και μετάλλου (Human body model). Παρουσιάζει μέγιστο στα 20 A, ενώ έχει χρόνο ανόδου 1 ns. Για αυτό το λόγο η παράγωγος θα παρουσιάζει μέγιστο με τιμή περίπου 20 A/ns. Η αναθεωρημένη έκδοση θα καθορίζει επίσης και την μέγιστη αρνητική τιμή της παραγώγου D_n . Αυτό θα γίνεται μέσω του καθορισμού του λόγου D_p/D_n . Η τιμή του λόγου θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη του λόγου 3:1. Το μαθηματικό
μοντέλο που προτείνεται, δίνει για το I₃₀ και το I₆₀ τιμές ρεύματος εκτός των τιμών που καθορίζει το τωρινό Πρότυπο. Συγκεκριμένα υπολογίζονται τιμές 7 A και 2,5 A περίπου ενώ θα έπρεπε να είναι 10 A και 5 A αντίστοιχα. Για αυτό υπάρχουν σκέψεις για αλλαγή και των τιμών αυτών. Για να ευρεθούν οι παράμετροι του ρεύματος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν πέντε κυματομορφές, από τις οποίες θα υπολογιστούν πέντε τιμές για κάθε παράμετρο. Ο μέσος όρος των πέντε μετρήσεων θα αποτελεί την τιμή που θα πρέπει να συγκριθεί με την τιμή που δίνει το Πρότυπο. Ο λόγος που γίνεται η παραπάνω διαδικασία είναι ότι, η γεννήτρια περιέχει στο εσωτερικό της μηχανικά ρελέ, που χρησιμεύουν για την εκκίνηση του ηλεκτροστατικού παλμού και τα οποία προκαλούν κάθε φορά διαφορετικό ρεύμα εκφόρτισης [24]. Για αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται αρκετές κυματομορφές για τον υπολογισμό των παραμέτρων. Στο Σχήμα 5.2 που ακολουθεί φαίνεται η γραφική παράσταση για την παράγωγο του ρεύματος καθώς και το ολικό μέγιστο και ελάχιστο αυτής.



Σχήμα 5.2:Προτεινόμενη κυματομορφή της παραγώγου του ρεύματος εκφόρτισης

5.3 Μετρήσεις για την παράγωγο του ρεύματος

Από το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής, θα χρησιμοποιήσουμε τις ογδόντα μετρήσεις επαφής που έγιναν με τον στόχο εκφόρτισης τοποθετημένο σε μεταλλική βάση στήριξης. Οι μισές από τις μετρήσεις έγιναν με την γεννήτρια NSG-433 σε μεταλλική βάση στήριξης 1,5 x 1,5 m² και οι άλλες μισές με την γεννήτρια NSG-438 σε μεταλλική βάση 1 x 1 m². Για να καταφέρουμε να βρούμε την παράγωγο μιας μέτρησης πρέπει πρώτα να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης. Μετά την καταγραφή του ρεύματος από τον παλμογράφο τα δεδομένα της μέτρησης

αποθηκεύονται σε αρχείο της εφαρμογής excel. Εν συνεχεία γίνεται επεξεργασία στο αρχείο, ώστε σε αυτό να απομείνουν μόνο δύο στήλες τιμών. Η πρώτη που δίνει το χρόνο και η δεύτερη που δίνει τις τιμές του ρεύματος. Με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου Simulink, του προγράμματος Matlab υπολογίζουμε την παράγωγο σε κάθε χρονική στιγμή και αποθηκεύουμε τα αποτελέσματα. Στα Σχήματα 5.3, 5.4 δίνονται δυο τυπικές κυματομορφές των ρευμάτων εκφόρτισης και των παραγώγων αυτών, με τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, για τάση εκφόρτισης +4 kV.



Σχήμα 5.3:Σύγκριση τυπικών κυματομορφών ρεύματος για τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται ότι η γεννήτρια NSG-433 παράγει ρεύματα μεγαλύτερου πλάτους. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στην ίδια την γεννήτρια και αφετέρου στο ότι κατά την μέτρηση με την γεννήτρια NSG-433 χρησιμοποιήθηκε ως βάση στήριξης του στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μεταλλική βάση 1,5 x 1,5 m² αντί της μεταλλικής βάσης 1 x 1 m², με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με την γεννήτρια NSG-438.

Είναι προφανές από το Σχήμα 5.4 ότι η θετική παράγωγος του ρεύματος για την γεννήτρια NSG-433 είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για την γεννήτρια NSG-438. Το ίδιο ισχύει και για την αρνητική παράγωγο.



Σχήμα 5.4:Σύγκριση παραγώγων ρεύματος για τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438

Στο Σχήμα 5.5 που ακολουθεί δίνεται το πρόγραμμα του Simulink που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της παραγώγου.



Σχήμα 5.5:Πρόγραμμα Simulink για την επεξεργασία των μετρήσεων

	D _p (A/ns)	D _n (A/ns)		D _p (A/ns)	D _n (A/ns)
m1	33,41	28,66	m21	29,97	31,68
m2	30,61	23,2	m22	22,91	32,51
m3	32,6	26,32	m23	28,62	36,29
m4	31,19	23,77	m24	26,82	29,56
m5	28,59	22,35	m25	24,71	29,55
m6	32,97	28,16	m26	31,03	31,8
m7	30,49	19,93	m27	27,03	29,19
m8	30,57	20,21	m28	26,35	30,15
m9	30,57	20,22	m29	28,47	33,09
m10	32,3	32,98	m30	25,1	30,46
m11	35,62	30,43	m31	25,17	32,95
m12	31,94	24,68	m32	25,49	31,49
m13	35,64	28,2	m33	26,6	29,93
m14	30,11	21,47	m34	24,7	29,48
m15	36,48	33,22	m35	29,45	33,34
m16	31,82	22,95	m36	22,23	33,01
m17	29,32	23,12	m37	27,42	33,73
m18	27,66	16,19	m38	26,76	33,79
m19	39,8	23,77	m39	28,59	30,74
m20	35,96	17,6	m40	27,58	29,63

Στον Πίνακα 5.1 δίνονται για τις σαράντα μετρήσεις με τη γεννήτρια NSG-438 η μέγιστη τιμή της παραγώγου D_p και η ελάχιστη D_n .

Πίνακας 5.1:Μέγιστες και ελάχιστες τιμές παραγώγου για μετρήσεις σε μεταλλική βάση με τη γεννήτρια NSG-438 στα 4 kV

Στον Πίνακα 5.2 δίνονται για τις σαράντα μετρήσεις με τη γεννήτρια NSG-433 η μέγιστη τιμή της παραγώγου D_p και η ελάχιστη D_n .

	D _p (A/ns)	D _n (A/ns)		D _p (A/ns)	D _n (A/ns)
nl	161,23	84,06	n21	168,36	99,42
n2	141,85	74,98	n22	136,95	65,84
n3	149,59	75,72	n23	147,83	76,21
n4	165,6	78,79	n24	137,58	61,91
n5	176,15	90,9	n25	165,53	91,02
n6	173,98	85,55	n26	147,07	75,33
n7	121,6	52,36	n27	126,58	47,66
n8	151,91	71,48	n28	137,77	60,25
n9	142,03	66,02	n29	176,45	85,54
n10	156,15	69,88	n30	125,14	49,41
n11	126,45	54,86	n31	148,32	69,43
n12	194,96	94,36	n32	171,33	82,99
n13	172,64	88,67	n33	149,26	64,94
n14	171,29	97,44	n34	151,45	65,33
n15	159,7	87,15	n35	149,3	86,95
n16	134,28	66,27	n36	134,94	60,96
n17	159,69	72,97	n37	145,41	85,43
n18	135,8	55,68	n38	130,47	65,84
n19	145,9	67,58	n39	150,37	73,54
n20	174,2	95,88	n40	178,56	94,55

Πίνακας 5.2:Μέγιστες και ελάχιστες τιμές παραγώγου για μετρήσεις σε μεταλλική βάση με τη γεννήτρια NSG-433 στα 4 kV

Με την γεννήτρια NSG-438 για την μέγιστη τιμή της παραγώγου D_p , έχουμε μέση τιμή μ=29,57 και τυπική απόκλιση σ=3,88 ενώ για την ελάχιστη τιμή D_n , έχουμε μέση τιμή μ=27,99 και τυπική απόκλιση σ=5,12. Από τις παραπάνω τιμές προκύπτει ότι έχουμε περίπου ίδιες τιμές για μέγιστη αρνητική και μέγιστη θετική παράγωγος, ενώ έχουμε μέγιστη σχετική τιμή $\mu_{ozer} = \frac{29,57}{4} \approx 7,4 \frac{A}{ns^* kV}$. Με την γεννήτρια NSG-433 για την μέγιστη τιμή της παραγώγου D_p , έχουμε μέση τιμή μ=152,34 και τυπική απόκλιση σ=17,54 ενώ για την ελάχιστη τιμή D_n , έχουμε μέση τιμή μ=74,83 και τυπική απόκλιση σ=14,05. Από τις παραπάνω τιμές προκύπτει ότι έχουμε περίπου διαλάσιες τιμές για την ελάχιστη τιμή D_n , έχουμε μέση τιμή μ=74,83 και τυπική απόκλιση σ=14,05. Από τις παραπάνω τιμές προκύπτει ότι έχουμε περίπου διπλάσιες τιμές για τη μέγιστη θετική παράγωγος σε σχέση με την μέγιστη αρνητική παράγωγος, ενώ έχουμε μέγιστη σχετική τιμή $\mu_{oxer} = \frac{152,34}{4} \approx 38,09 \frac{A}{ns^*kV}$. Από τα συμπεράσματα αυτά είναι εμφανές ότι μετά την αναθεώρηση του Προτύπου, οι δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων δεν θα πληρούν τις προϋποθέσεις. Το πρόβλημα εντοπίζεται τόσο στην θετική όσο και στην αρνητική παράγωγος έχει τιμή πολύ

μεγαλύτερη από την αναμενόμενη των $4.2 \frac{A}{ns * kV}$.



Σχήμα 5.6:Μορφή ρεύματος ανόδου για την γεννήτρια NSG-438



Σχήμα 5.7:Μορφή ρεύματος ανόδου για την γεννήτρια NSG-433

Όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 5.8, 5.9 το ρεύμα ανόδου δεν είναι μια ευθεία γραμμή αλλά παρουσιάζει πολλά σημεία καμπής με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγώγου. Ειδικά στην περίπτωση της γεννήτριας NSG-433 παρατηρούμε ότι το ρεύμα κατά την διάρκεια του χρόνου ανόδου παρουσιάζει και αρνητική παράγωγο. Ουσιαστικά η παραγώγιση ενός σήματος οξύνει τις μεταβολές του. Είναι η αντίθετη διαδικασία από την ολοκλήρωση, όπου έχουμε εξομάλυνση (smoothing) των ανωμαλιών. Είναι προφανές ότι ο εξοπλισμός που θα περάσει τις δοκιμές με τις γεννήτριες εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438, θα μπορεί να περάσει δοκιμές που θα γίνουν από γεννήτριες των οποίων το ρεύμα δεν θα παρουσιάζει παράγωγο ρεύματος μεγαλύτερη από $4,2\frac{A}{ns^*kV}$. Επίσης, πρόβλημα αποτελεί και στις δύο περιπτώσεις η μεγάλη τιμή της αρνητικής παραγώγου D_n . Από τις δύο γεννήτριες, η NSG-433 παρουσιάζει την πιο μεγάλη απόκλιση από τα αναμενόμενα. Σε αυτό συμβάλει η ιδιομορφία που παρουσιάζει το ρεύμα κατά τον χρόνο ανόδου.

Κεφάλαιο 6

Μετρήσεις και αβεβαιότητα

6.1 Εισαγωγή-Περί Αβεβαιότητας

Η διαχρονικά αυξανόμενη σημασία της μέτρησης σε μια σειρά από κρίσιμους τομείς, όπως το εμπόριο, η βιομηγανία, η υγεία, η προστασία του περιβάλλοντος και αρκετοί άλλοι, είναι ο λόγος που γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη για εγκυρότητα και αξιοπιστία. Η διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση για αξιοπιστία στη μέτρηση είναι άμεση απόρροια της διείσδυσης της επιστήμης στη ζωή του ανθρώπου. Η ποιότητα της μέτρησης στο παρελθόν αποτελούσε περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη, παρά μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης μεθόδων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίηση της ποιότητας αυτής. Σήμερα έχει μεγάλη σημασία όχι μόνο να μετράνε σωστά τα όργανα που χρησιμοποιούμε, αλλά να είναι γνωστό και το 'πόσο' σωστά μετράνε. Οι διεργασίες γύρω από το θέμα της μέτρησης οδήγησαν, σε συνδυασμό με το υπάρχον ενιαίο σύστημα μέτρησης (SI), στην αποδοχή ενός *ενιαίου* **μηχανισμού ποσοτικής αποτίμησης της ποιότητας της μέτρησης**, δηλαδή της αβεβαιότητας [26]. Ορίζεται ως 'παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος [27]'.

Η αβεβαιότητα αποτελεί τον καταλληλότερο δείκτη αξιοπιστίας μιας μέτρησης και γενικότερα της αντίληψης που διαμορφώνουμε για τα μετρήσιμα μεγέθη, παραπέμποντας στα όρια της γνώσης και της άγνοιας μας για το φυσικό κόσμο που μας περιβάλλει [26]. Σε κάθε περίπτωση το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στην παρουσίαση του μέτρου ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα. Επισημαίνει στο μετρητή την πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, εφιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της γνώσης που μπορεί να έχει για το συγκεκριμένο μέγεθος. Δίνει μια ποσοτικοποιημένη εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού.

6.2 Σφάλμα και Αβεβαιότητα

Οι έννοιες του σφάλματος και της αβεβαιότητας συχνά συγχέονται. Ο όρος αβεβαιότητα είναι σχετικά πρόσφατος σε σχέση με τον όρο σφάλμα, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε επί μακρόν για να χαρακτηρίσει την απόκλιση μιας μέτρησης από την αληθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Ως σφάλμα ορίζεται " η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μια αληθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους [28]". Από τον παραπάνω ορισμό αυτό που πρέπει να τονιστεί, είναι η χρησιμοποίηση του αόριστου άρθρου 'μια'. Ο λόγος είναι ότι μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ποια είναι 'η αληθής' τιμή. Θεωρητικά, η αληθής τιμή θα μπορούσε να είναι το αποτέλεσμα μόνο μιας τέλειας ιδεατής μέτρησης. Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης χαρακτηριζόμενης από αμελητέα αβεβαιότητα μπορεί να αναφέρεται ως 'συμβατική αληθής τιμή [26]'.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι το σφάλμα δεν έχει ιδιαίτερη πρακτική χρησιμότητα αφού βασίζεται σε ντετερμινιστική θεώρηση των πραγμάτων. Η στοχαστικότητα είναι αυτή που επικρατεί στις μετρήσεις. Το σφάλμα αναφέρεται σε ένα σημείο (τιμή), ενώ η αβεβαιότητα σε ένα εύρος τιμών. Τα Σχήματα 6.1 και 6.2 βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των δύο εννοιών.



Σχήμα 6.1: Διαφορά σφάλματος και αβεβαιότητας



Σχήμα 6.2:Το σφάλμα και η αβεβαιότητα στη μέτρηση

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.

- Οι συνιστώσες Τύπου Α προκύπτουν από την (υπολογιζόμενη ή εκτιμούμενη) μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος. Επίσης συχνά απαραίτητη είναι η συμμεταβλητότητα (covariance).
- Οι συνιστώσες Τύπου Β, αν και δεν προκύπτουν από κάποια στατιστική επεξεργασία, παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας.
- Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από το άθροισμα όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενη με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων [27].

6.3 Μέτρηση και πιθανότητες

Με μια πρώτη ματιά οι δύο αυτές έννοιες μοιάζουν ασύνδετες. Όμως, όπως αναπτύχθηκε και παραπάνω το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένο, αλλά εξαρτάται από πολλές μη ελεγχόμενες επιδράσεις (ικανότητα του μετρολόγου, επίδραση των συνεχώς μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών, ασταθής συμπεριφορά του οργάνου ή του υπό μέτρηση μεγέθους κ.α). Για αυτούς τους λόγους το αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί ως στατιστική (στοχαστική) μεταβλητή. Έτσι είναι παράλειψη να αναφερόμαστε στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης χωρίς να αναφερόμαστε στις πιθανότητες σφάλματος κ.τ.λ.

6.3.1 Ορισμοί στατιστικών όρων

Παρακάτω ακολουθούν ορισμοί εννοιών απαραίτητων για την επεξεργασία των μετρήσεων που θα ακολουθήσει.

Τυχαία μεταβλητή (random variable): Η απεικόνιση X:Ω→R όταν $\{\omega \in \Omega: X(\omega) \le x\} \in \Im$ για κάθε x∈R, όπου ℑ το σύνολο των ενδεχομένων [30].

Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (probability distribution function): Μια τυχαία μεταβλητή X έχει ως συνάρτηση κατανομής πιθανότητας την $F(x)=P(X \le x)$ x \in R,όπου η $P(X \le x)$ δίνει την πιθανότητα η τυχαία μεταβλητή X να έχει τιμή μικρότερη του x [30].

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function): Η συνάρτηση f της τυχαίας μεταβλητής X που ικανοποιεί τις σχέσεις:

• $f(x) \ge 0$ gia ká $\theta \epsilon x \in \mathbb{R}$ (6.1)

•
$$F(x)=P[X \le x] \equiv \int_{-\infty}^{x} f(y) dy \ \gamma \tan \kappa \alpha \theta \varepsilon \ x \in R$$

Από τον παραπάνω ορισμού έχουμε την ισότητα [30]:

$$P[a < X \le b] = \int_{a}^{b} f(x) dx , a, b \in R (a < b)$$
(6.2)

Ανεξάρτητες μεταβλητές (independent variables): Οι μεταβλητές X, Y θεωρούνται ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές εάν η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων τους ισούται με το γινόμενο των αντίστοιχών κατανομών, δηλαδή [26]: f(x,y)=f(x)f(y) (6.3)

Αναμενόμενη τιμή (expectation): Μια μεταβλητή Χ έχει αναμενόμενη τιμή [26]:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$$
 (6.4)

Μεταβλητότητα (variance): Μια μεταβλητή X έχει μεταβλητότητα [26]: $V(x)=E(X-E(X))^2=E(X)^2-E^2(X)$ (6.5)

Τυπική αβεβαιότητα (standard deviation): Μια μεταβλητή Χ έχει τυπική αβεβαιότητα [26]:

$$\sigma_{\chi} = S(X) = \sqrt{V(X)} \tag{6.6}$$

70

6.3.2 Κατανομές τυχαίων μεταβλητών

Κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων, από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους, παρατηρήθηκε ότι αυτά δημιουργούν κάποιες κατανομές όταν παριστάνονταν γραφικά, οι οποίες είχαν αναλυτικό τρόπο περιγραφής. Ουσιαστικά η πιθανότητα εμφάνισης μιας συγκεκριμένης τιμής μπορεί να υπολογιστεί από μια εξίσωση. Μερικές από αυτές τις κατανομές είναι: η κανονική (Gaussian), η τραπεζοειδής, η Student (t-distribution), η Chi-square (x²), η διωνυμική, η αρνητική διωνυμική, η υπεργεωμετρική, η Poisson, η γάμα, η Weibull, η πολυωνυμική κ.α. Οι τέσσερις πρώτες είναι βαρύνουσας σημασίας, αφού έχουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των μετρήσεων.

6.3.2.1 Κανονική κατανομή

Η κανονική ή αλλιώς γκαουσιανή κατανομή είναι η πλέον σημαντική, αφού βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, όπως οι κοινωνικές επιστήμες, η οικονομία, η φυσική, η βιολογία και γενικά σε αρκετές εφαρμογές. Η θεωρητική θεμελίωση της σημασίας της κανονικής κατανομής προκύπτει από το *Kεντρικό Οριακό Θεώρημα* σύμφωνα με το οποίο αποτελεί την οριακή κατανομή στην οποία τείνει ο συνδυασμός ανεξαρτήτων και ομοιόμορφης κατανομής μεταβλητών, όταν ο αριθμός τους αυξάνεται διαρκώς [26]. Η βασική ιδέα του θεωρήματος είναι σχετικά απλή. Όσο περισσότερες παράμετροι επηρεάζουν την τιμή μιας μεταβλητής, τόσο πιο τυχαίες είναι οι τιμές που παίρνει η μεταβλητή. Η χρησιμότητα της κανονικής κατανομής στις μετρολογικές εφαρμογές, σχετίζεται με το ότι εάν μια ποσότητα μετράται πολλές φορές οι παράμετροι επιρροής οι οποίες επιδρούν στοχαστικά από μέτρηση σε μέτρηση θα παράγουν τυχαία σφάλματα, η κατανομή συχνοτήτων των οποίων μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κανονική κατανομή.

Εάν έχουμε n μετρήσεις x₁,x₂,...,x_n της μεταβλητής X, μ τη μέση τιμή της, σ τη τυπική απόκλιση και f(x) τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, τότε η κατανομή θα θεωρείται κανονική αν [30]:

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{\left(\chi - \mu\right)^2}{2\sigma^{\sigma}}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$
(6.7)

Στο Σχήμα 6.3 που ακολουθεί φαίνεται μία κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ένα.



Σχήμα 6.3: Κανονική κατανομή με $\mu=0$ και $\sigma=1$

Με σκοπό την τυποποίηση και τη διευκόλυνση των σχετικών υπολογισμών εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός $Z = (x - \mu)/\sigma$. Έτσι $dx = \sigma * dz$ και άρα

$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2\right) dx = \int_{-\infty}^{\frac{x_0-\mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) = \Phi\left(\frac{x_0-\mu}{\sigma}\right) (6.8)$$

όπου Φ η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της τυποποιημένης Κανονικής κατανομής N(0,1). Το Σχήμα 6.4 που ακολουθεί κάνει πιο κατανοητό τον λόγο που χρησιμοποιούμε τον παραπάνω μετασχηματισμό.



Σχήμα 6.4:Μετασχηματισμός κανονικής κατανομής με μέση τιμή μ και διακύμανση σ² σε κανονική κατανομή με μ=0 και σ=1

Eπομένως
$$P(a < X \le \beta) = F(\beta) - F(a) = \Phi\left(\frac{\beta - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \mu}{\sigma}\right)$$
 (6.9)

Μία σημαντική ιδιότητα της συνάρτησης Φ είναι η συμμετρία με τον άξονα των τεταγμένων. Έχουμε δηλαδή Φ(-x)=1-Φ(x). Έτσι αν θέλουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα p_k προκύπτει:

$$p_{k} = p(-k < z < k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\kappa}^{+\kappa} e^{-\frac{z^{2}}{2}} dz = \Phi(\kappa) - \Phi(-\kappa) = 2\Phi(\kappa) - 1$$
(6.10)

6.3.2.2 Τραπεζοειδής κατανομή

Η τραπεζοειδής κατανομή έχει ως υποπεριπτώσεις την ορθογώνια και την τριγωνική κατανομή. Οι τρεις αυτές συνήθως συμμετρικές κατανομές ανήκουν στην ίδια οικογένεια. Περιγράφουν μεγέθη για τα οποία γνωρίζουμε ότι η καλύτερη αναμενόμενη τιμή χ_e περιέχεται σε ένα διάστημα της μορφής $\chi_e \pm e$ με γραμμικά αυξανόμενη πιθανότητα, όσο απομακρυνόμαστε από τα άκρα του διαστήματος αυτού [26].

Δεδομένης της συμμετρίας, η αναμενόμενη τιμή είναι στο μέσο και υπολογίζεται ως:

$$E(X) = \chi_e = (\chi_a + \chi_b)/2$$
 (6.11)

Η τυπική απόκλιση σ υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma = \sqrt{[V(X)]} = \sqrt{E(X)^2} = \sqrt{\frac{e^2 + d^2}{6}}$$
(6.12)

Το Σχήμα 6.5 δίνει μια τυπική τραπεζοειδή κατανομή.



Σχήμα 6.5:Τυπική τραπεζοειδής κατανομή

Εάν d=0 έχουμε τριγωνική κατανομή και αν d=e έχουμε ορθογώνια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων κατανομών αποτελούν τα αποτελέσματα μετρήσεων με διάταξη δεδομένης ορθότητας ή προκαθορισμένης ανοχής (π.χ. βολτόμετρο με ορθότητα 0,1% ή ηλεκτρική αντίσταση μετάλλου 1%)

6.3.2.3 Κατανομή Student

Η πρακτική σημασία της έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται στις δοκιμές υποθέσεων και ειδικότερα όταν πρόκειται να αξιολογηθεί η συνάφεια διαφορετικών δειγμάτων. Η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων έχει ως εξής:

$$S_{\nu}(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)\sqrt{\pi\nu}} \left(1 + \frac{t}{\nu}\right)^{\frac{-(\nu+1)}{2}}$$
(6.13)

όπου Γ είναι η συνάρτηση gamma και ν ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας, οι οποίοι αποτελούν μέτρο της πληρότητας της διαθέσιμης γνώσης σχετικά με μια κατανομή. Το Σχήμα 6.6 δείχνει δυο κατανομές για διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 6.6:Σύγκριση δύο κατανομών student με v=3 και v=10, με την κανονική κατανομή

Η χρησιμότητα της είναι εμφανής όταν έχουμε μια κανονική κατανομή με τιμές x,s. Τότε αποδεικνύεται ότι η μεταβλητή $t = \frac{(\bar{x} - \mu)}{s / \sqrt{N}} = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\sigma}$ ακολουθεί μια κατανομή

Student v=N-1 βαθμούς ελευθερίας. Η εξάρτηση της κατανομής από τους βαθμούς ελευθερίας μπορεί να ερμηνευθεί ως εξάρτηση της ποιότητας της εκτίμησης του \bar{x} από το μέγεθος του δείγματος. Στο βαθμό που το πλήθος του δείγματος ελαττώνεται

η κατανομή Student απομακρύνεται από την κανονική κατανομή και η πιθανότητα να βρίσκεται η διαφορά x -μ σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μειώνεται [26].

6.3.2.4 Κατανομή Chi-square(x²)

Η κατανομή Chi-square μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης ενός μεγέθους. Είναι μια μη συμμετρική κατανομή που δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{x^{\frac{\nu}{2}-1}e^{\frac{-x}{2}}}{2^{\frac{\nu}{2}}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)}, x > 0$$
(6.14)

όπου ν οι βαθμοί ελευθερίας της στοχαστικής μεταβλητής. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται μια κατανομή Chi-square για διάφορους βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 6.7:Κατανομές Chi-square για τέσσερις βαθμούς ελευθερίας

Η κατανομή περιγράφει τη συμπεριφορά του αθροίσματος χ^2 των τετραγώνων ν τυπικών κανονικών κατανομών, όπου ν οι βαθμοί ελευθερίας του αθροίσματος $\chi^2 = \sum_{1}^{\nu} \left(\frac{\chi_i - \mu}{\sigma}\right)^2$. Η πιθανότερη τιμή της κατανομής είναι ίση με ν και η μεταβλητότητα της με 2ν. Εάν έχουμε ένα δείγμα μεγέθους N και τυπικής απόκλισης s μιας μεταβλητής, η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή τυπικής απόκλισης σ, η στοχαστική μεταβλητή $\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$ ακολουθεί με τη σειρά της κατανομή Chi-square v=N-1 βαθμών ελευθερίας [26]. Έτσι η πιθανότητα p(1< χ^2 <12)=p_{1,ν}-p_{12,ν} να

περιέχεται η μεταβλητή $\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$ σε ένα διάστημα (l₁,l₂) είναι ίση με την πιθανότητα p(vs²/l₂<σ²<vs²/l₁) να περιέχεται η μεταβλητότητα σ² στο διάστημα (vs²/l₁, vs²/l₂)

6.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις που ακολουθούν πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι εκφορτίσεις παρήχθησαν από την γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438 και είναι διακόσιες σαράντα (280) στο σύνολο τους. Οι εκατόν εξήντα (160) από αυτές αφορούν ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις επαφής και οι άλλες εκατόν είκοσι (120) ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρος. Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση γίνεται ανάλογα με τη θέση του στόχου εκφόρτισης. Υπάρχουν τέσσερις ομάδες μετρήσεων. Στην πρώτη ομάδα είναι οι μετρήσεις που έγιναν με το στόχο τοποθετημένο στην ορθογώνια ξύλινη βάση, στη δεύτερη οι μετρήσεις που έγιναν με το στόχο τοποθετημένο σε μεταλλική πλάκα διαστάσεων 1 m x 1 m, στην τρίτη κατηγορία οι μετρήσεις που έγιναν με το στόχο τοποθετημένο σε μεταλλική πλάκα διαστάσεων 36cm x 36cm στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου και τέλος στην τέταρτη οι μετρήσεις που έγιναν με το στόχο τοποθετημένο σε μεταλλική πλάκα διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m. Ο τελευταίος διαχωρισμός γίνεται βάσει των επιπέδων τάσης που γίνονται οι μετρήσεις. Υπάρχουν δύο επίπεδα τάσης φόρτισης +4 kV και -4 kV. Για να γίνεται εύκολα η διάκριση μεταξύ τον αρχείων ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Στην αρχή της ονομασίας ενός αρχείου μπαίνουν ανάλογα ένα ή δύο γράμματα. Έτσι αν η μέτρηση έγινε στη μεταλλική πλάκα 1 m x 1 m χρησιμοποιείται το γράμμα m (metal), εάν η μέτρηση έγινε στη μεταλλική πλάκα 1,5 m x 1,5 m χρησιμοποιούνται τα γράμματα bm (big metal), εάν έγινε στη ξύλινη βάση το γράμμα w (wood) και εάν έγινε στον τοίχο τα γράμματα wl (wall). Η ονομασία ολοκληρώνεται με έναν αριθμό από το ένα έως ογδόντα. Για τους αριθμούς ισχύει η εξής ομαδοποίηση:

- 1-20: Σημαίνει ότι πρόκειται για εκφόρτιση επαφής στα +4 kV.
- 21-40: Σημαίνει ότι πρόκειται για εκφόρτιση επαφής στα -4 kV.
- 41-60: Σημαίνει ότι πρόκειται για εκφόρτιση αέρος στα +4 kV.
- 61-80: Shmaínei óti pókeitai gia ekgóptish aéroc sta -4 kV.

Σύμφωνα και με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, με το οποίο ασχολείται η συγκεκριμένη εργασία, τα σημαντικά στοιχεία σε μια κυματομορφή ρεύματος είναι τα εξής:

- 1. Το μέγιστο ρεύμα (I_{max}).
- 2. Ο χρόνος ανόδου (t_r) .
- 3. To reúma sta 30 ns (I_{30}) .
- 4. Το ρεύμα στα 60 ns (I_{60}).

Στους πίνακες που θα ακολουθήσουν δίνονται για κάθε μέτρηση τα τέσσερα στοιχεία καθώς επίσης και οι χρόνοι που εμφανίζεται το 10% και 90% του μεγίστου.

6.4.1 Απόκτηση δεδομένων

Μετά την καταγραφή του ρεύματος από τον παλμογράφο τα δεδομένα της μέτρησης σώζονται σε αρχείο της εφαρμογής excel. Εν συνεχεία γίνεται επεξεργασία στο αρχείο, ώστε σε αυτό να απομείνουν μόνο δύο στήλες τιμών. Η πρώτη που δίνει το χρόνο και η δεύτερη που δίνει τις τιμές του ρεύματος. Το τροποποιημένο αρχείο αποθηκεύεται με μορφή notepad. Με την βοήθεια του προγράμματος matlab και του παρακάτω κώδικα γίνεται η γραφική παράσταση των δεδομένων που συλλέξαμε από το πείραμα.

🤼 C: \r	matlab\work\current.m 📃 🗖	\mathbf{X}
File Ec	dit View Text Debug Breakpoints Web Window Help	
🗅 🚅	ݢ 🔜 🕺 🛍 🛍 🕫 🖓 📕 🚛 🖨 🛠 🔁 🛠 🗐 🏥 🎼 🏭 Stack: Base	\mathbf{X}
1 -	clear all;	~
2 -	close all;	
3		
4		
5	%======= Current's graph as function of time ====================================	
6 -	figure(1)	
7		
8 -	load C:\matlab\work\ml6.txt;	
9 -	tl=10e+8*ml6(:,1);	
10 -	Il=10*ml6(:,2);	
11 -	pl=plot(tl,Il,'b:');	
12 -	grid	
13 -	hold on	
14 -	xlabel('time [ns]')	
15 -	ylabel('I [A]')	
16	%axis([0 200 -0.50 8])	
17 -	set (pl, 'LineWidth', 2)	
18		
19 -	title('I for the NSG-438 ESD generator')	
20		\sim
	script Ln 10 Col 10	ô

Από την γραφική παράσταση βρίσκονται οπτικά τα ζητούμενα μεγέθη. Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η γραφική μίας εκ των μετρήσεων .



Σχήμα 6.8:Αναπαράσταση κυματομορφής ρεύματος με τη βοήθεια του Matlab

Εν συνεχεία εστιάζουμε στα σημεία της κυματομορφής που θέλουμε να αντλήσουμε πληροφορίες, χρησιμοποιώντας την δυνατότητα που μας προσφέρει το πρόγραμμα. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται σε πέντε βήματα.

 Εύρεση του I_{max}: Στην γραφική παράσταση εστιάζουμε στην κορυφή της κυματομορφής και αποθηκεύουμε την τιμή του μέγιστου ρεύματος. Το Σχήμα 6.9 που ακολουθεί δείχνει την τελική εστίαση στην κορυφή. Το γεγονός ότι παρουσιάζεται μία ευθεία γραμμή και όχι μία αιχμή οφείλεται στην δειγματοληψία. Η εστίαση έχει γίνει σε μεγάλο βαθμό και οι δύο διαδοχικές τιμές δειγματοληψίας (άκρα του οριζόντιου τμήματος) τυγχάνει να έχουν τη ίδια τιμή. Στο Σχήμα 6.9 το I_{max} είναι 13,74 και αντιστοιχεί σε χρόνο 1,1 ns.



Σχήμα 6.9: Εστίαση στην κορυφή της κυματομορφής ρεύματος

2. Εύρεση του t₁₀: Έχοντας ως δεδομένο την τιμή του I_{max} υπολογίζουμε το 10% αυτής, δηλαδή την τιμή I_{max}/10. Εστιάζοντας στο σημείο της κυματομορφής που έχει την συγκεκριμένη τιμή το ρεύμα, βρίσκουμε την χρονική στιγμή στην οποία αυτή αντιστοιχεί Η τιμή αυτή είναι ο χρόνος t_{10%} και μας είναι απαραίτητη για την εύρεση του χρόνου ανόδου t_r, που ορίζεται ως η διαφορά t_{90%}-t_{10%}. Στο Σχήμα 6.10 έχουμε I_{10%}=1,374 και t_{10%}=0,053 ns.



Σχήμα 6.10:Εστίαση στο 10% του ρεύματος κορυφής της κυματομορφής

3. Εύρεση του t_{90%}: Έχοντας ως δεδομένο την τιμή του I_{max} υπολογίζουμε το 90% αυτής, δηλαδή την τιμή 0,9*I_{max}. Εστιάζοντας στο σημείο της κυματομορφής όπου I_{90%}=12,366A βρίσκουμε την χρονική στιγμή στην οποία αυτή αντιστοιχεί. Η τιμή αυτή είναι ο χρόνος t_{90%}. Στο Σχήμα 6.11 έχουμε t_{90%}=0,692 ns.



Σχήμα 6.11:Εστίαση στο 90% του ρεύματος κορυφής της κυματομορφής

- 4. Εύρεση του t_r : Έχοντας ως δεδομένο τις τιμές $t_{90\%}$ και $t_{10\%}$ πραγματοποιούμε την αφαίρεση $t_{90\%}$ $t_{10\%}$ και βρίσκουμε τον χρόνο ανόδου. Στο παράδειγμα t_r =0,692-0,053=0,639 ns
- 5. Εύρεση του I₃₀: Έχοντας ως δεδομένο τον χρόνο t_{10%}, προσθέτουμε σε αυτόν 30 ns και προκύπτει ο συνολικός χρόνος. Εστιάζοντας στο συγκεκριμένο σημείο της κυματομορφής που εμφανίζεται ο χρόνος αυτός βρίσκουμε την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος, η οποία αποτελεί και το I₃₀. Στο Σχήμα 6.12 I₃₀=I(30+0,053)=I(30,053)=6,838 A.



Σχήμα 6.12:Εστίαση στο I₃₀

6. Εύρεση του I₆₀: Έχοντας ως δεδομένο τον χρόνο t_{10%}, προσθέτουμε σε αυτόν 60 ns και προκύπτει ο συνολικός χρόνος. Εστιάζοντας στο συγκεκριμένο σημείο της κυματομορφής που εμφανίζεται ο χρόνος αυτός βρίσκουμε την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος, η οποία αποτελεί και το I₆₀. Στο Σχήμα 6.13 I₆₀=I(60 +0,053)=I(60,053)=5,281 A.



Σχήμα 6.13:Εστίαση στο Ι₆₀

6.4.2 Παρουσίαση δεδομένων

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται ανά εικοσάδες και με τη βοήθεια του προγράμματος excel. Παρουσιάζονται ανά εικοσάδες στους δώδεκα πίνακες που ακολουθούν (Πίνακες 6.1-6.12). Στις δύο τελευταίες γραμμές κάθε πίνακα δίνεται η μέση τιμή (average) και η τυπική απόκλιση (standard deviation) των μετρήσεων.

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I _{90%} (ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
m1	14,74	0,110	0,806	0,696	6,739	4,912
m2	14,81	0,061	0,745	0,684	6,510	4,873
m3	14,57	0,088	0,784	0,696	6,667	4,973
m4	14,77	0,021	0,732	0,711	7,002	5,203
m5	14,32	0,123	0,789	0,666	6,640	4,955
m6	15,20	0,046	0,780	0,734	6,983	4,972
m7	14,56	0,092	0,781	0,689	6,485	4,721
m8	15,22	0,081	0,780	0,699	6,755	4,680
m9	15,20	0,085	0,801	0,716	6,497	5,004
m10	15,20	0,102	0,808	0,706	6,652	5,001
m11	15,00	0,062	0,740	0,678	6,423	4,634
m12	14,56	0,128	0,813	0,685	6,718	4,965
m13	14,79	0,047	0,742	0,695	6,730	4,791
m14	14,48	0,111	0,803	0,692	6,638	4,724
m15	15,05	0,064	0,781	0,717	6,560	5,244
m16	13,74	0,053	0,692	0,639	6,838	5,281
m17	14,73	0,057	0,723	0,666	6,491	5,016
m18	14,03	0,050	0,743	0,693	6,605	5,300
m19	14,70	0,085	0,730	0,645	6,588	5,251
m20	13,97	0,089	0,727	0,638	6,617	5,382
Average	14,68	0,078	0,765	0,687	6,657	4,994
stad.dev	0,42	0,029	0,035	0,026	0,156	0,226

Πίνακας 6.1: Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν
ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα $lx lm^2$ στ
α+4~kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
m21	-14,99	0,056	0,758	0,702	-6,792	-4,883
m22	-15,05	0,041	0,729	0,688	-6,636	-4,885
m23	-14,89	0,046	0,722	0,676	-6,691	-4,756
m24	-15,38	0,049	0,758	0,709	-6,825	-4,872
m25	-14,82	0,046	0,732	0,686	-6,562	-4,883
m26	-15,10	0,053	0,750	0,697	-6,735	-4,890
m27	-15,47	0,031	0,742	0,711	-6,773	-4,742
m28	-15,22	0,046	0,735	0,689	-6,738	-4,900
m29	-15,13	0,071	0,774	0,703	-6,850	-4,884
m30	-14,84	0,061	0,747	0,686	-6,762	-4,974
m31	-15,04	0,065	0,757	0,692	-6,731	-4,795
m32	-14,59	0,038	0,748	0,710	-6,784	-4,827
m33	-15,17	0,041	0,739	0,698	-6,845	-4,749
m34	-14,89	0,053	0,743	0,690	-6,696	-4,930
m35	-15,31	0,044	0,754	0,710	-6,700	-4,976
m36	-14,83	0,035	0,656	0,621	-6,352	-5,757
m37	-14,51	0,045	0,651	0,606	-6,657	-5,813
m38	-14,52	0,041	0,632	0,591	-7,100	-5,700
m39	-14,90	0,052	0,666	0,614	-6,700	-5,700
m40	-14,30	0,037	0,638	0,601	-6,500	-5,500
Average	-14,95	0,048	0,722	0,674	-6,721	-5,071
stad.dev	0,30	0,010	0,045	0,041	0,149	0,379

Πίνακας 6.2:Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα Ιx1m² στα -4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
m41	8,62	0,089	1,429	1,340	6,967	5,824
m42	9,90	0,059	0,791	0,732	7,527	5,764
m43	19,26	0,043	0,361	0,318	7,897	5,322
m44	24,11	0,059	0,307	0,248	7,933	5,237
m45	40,70	0,069	0,236	0,167	7,706	5,250
m46	40,70	0,068	0,265	0,197	7,695	5,314
m47	11,64	0,019	0,454	0,435	7,738	5,571
m48	8,32	0,047	1,158	1,111	7,316	6,141
m49	8,20	0,060	1,109	1,049	7,705	6,059
m50	31,31	0,059	0,280	0,221	7,899	5,675
m51	8,39	0,073	1,270	1,197	7,037	6,119
m52	24,12	0,051	0,307	0,256	7,780	5,605
m53	17,41	0,030	0,396	0,366	8,073	5,541
m54	23,70	0,084	0,315	0,231	7,715	5,072
m55	22,18	0,052	0,277	0,225	7,827	5,584
m56	35,40	0,072	0,262	0,190	7,716	5,134
m57	40,60	0,075	0,253	0,178	8,008	4,759
m58	11,05	0,127	0,587	0,460	7,975	5,778
m59	16,40	0,063	0,459	0,396	7,601	5,383
m60	22,66	0,082	0,313	0,231	7,802	5,399
Average	21,23	0,064	0,541	0,477	7,696	5,527
stad.dev	11,44	0,0223	0,386	0,384	0,294	0,362

Πίνακας 6.3: Μετρήσεις, εκφορτίσεων
αέρος, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα $lx lm^2$ στ
α +4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
m61	-22,66	0,082	0,313	0,231	-7,802	-5,399
m62	-14,88	0,048	0,506	0,458	-7,613	-5,505
m63	-8,32	0,007	1,095	1,088	-7,501	-5,818
m64	-10,80	0,008	0,506	0,498	-7,08	-5,532
m65	-13,18	0,021	0,436	0,415	-7,201	-5,404
m66	-16,32	0,059	0,401	0,342	-7,119	-5,559
m67	-12,32	0,049	0,504	0,455	-7,119	-5,559
m68	-11,04	0,010	0,459	0,449	-7,432	-5,376
m69	-10,48	0,016	0,538	0,522	-7,267	-5,453
m70	-16,24	0,049	0,442	0,393	-7,438	-5,242
m71	-9,28	0,009	0,980	0,971	-7,207	-5,680
m72	-16,24	0,072	0,366	0,294	-7,600	-5,440
m73	-12,40	0,104	0,480	0,376	-7,210	-5,360
m74	-9,68	0,014	0,699	0,685	-7,131	-5,589
m75	-24,31	0,005	0,286	0,281	-7,502	-4,975
m76	-16,20	0,034	0,378	0,344	-7,474	-5,311
m77	-10,83	0,002	0,526	0,524	-7,453	-5,641
m78	-8,10	0,079	0,460	0,381	-7,226	-5,454
m79	-8,10	0,054	0,490	0,436	-7,348	-5,401
m80	-8,40	0,034	0,300	0,266	-7,749	-5,305
Average	-12,99	0,038	0,508	0,470	-7,374	-5,450
stad day	4.61	0.030	0.205	0.219	0.216	0 1 7 9

<u>**Stau.ucv**</u> 4,01 0,030 0,205 0,219 0,216 0,179 Πίνακας 6.4:Μετρήσεις, εκφορτίσεων αέρος, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα $1x1m^2$ στα -4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
w1	9,90	0,048	0,752	0,704	5,282	5,700
w2	9,78	0,018	0,721	0,703	5,798	5,720
w3	9,66	0,030	0,727	0,697	5,544	5,772
w4	9,90	0,030	0,731	0,701	6,096	5,424
w5	10,26	0,018	0,743	0,725	5,962	5,722
w6	9,66	0,024	0,719	0,695	6,151	5,489
w7	10,02	0,030	0,736	0,706	5,700	5,856
w8	10,14	0,012	0,730	0,718	5,129	5,714
w9	9,90	0,047	0,741	0,694	5,232	5,940
w10	9,90	0,077	0,744	0,667	5,488	6,064
w11	9,60	0,041	0,793	0,752	5,700	5,580
w12	10,14	0,066	0,769	0,703	6,221	5,746
w13	10,02	0,030	0,736	0,706	6,180	5,940
w14	9,90	0,058	0,748	0,690	6,202	5,940
w15	9,90	0,044	0,764	0,720	6,247	5,872
w16	9,78	0,074	0,763	0,689	6,331	5,736
w17	10,02	0,044	0,731	0,687	6,113	5,714
w18	10,26	0,100	0,754	0,654	6,300	5,825
w19	10,26	0,024	0,750	0,726	6,449	5,609
w20	10,38	0,012	0,676	0,664	6,166	5,671
Average	9,97	0,041	0,741	0,700	5,915	5,752
stad.dev	0,22	0,024	0,024	0,023	0,402	0,158

Πίνακας 6.5: Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε ζύλινη βάση στα $+4 \ kV$

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
w21	-9,90	0,002	0,666	0,664	-6,362	-4,200
w22	-10,56	0,012	0,722	0,710	-6,300	-4,140
w23	-9,36	0,006	0,717	0,711	-6,247	-4,207
w24	-9,66	0,007	0,987	0,980	-6,145	-4,423
w25	-9,84	0,006	0,710	0,704	-6,232	-4,425
w26	-9,78	0,013	0,664	0,651	-6,313	-4,320
w27	-10,20	0,003	0,658	0,655	-6,180	-4,309
w28	-10,26	0,015	0,665	0,650	-6,180	-4,182
w29	-10,44	0,001	0,684	0,683	-6,299	-4,259
w30	-9,84	0,010	0,666	0,656	-6,420	-4,248
w31	-10,14	0,022	0,745	0,723	-6,367	-4,200
w32	-9,96	0,007	0,727	0,720	-6,368	-4,105
w33	-9,72	0,016	0,703	0,687	-6,360	-4,421
w34	-9,66	0,007	0,731	0,724	-6,368	-4,432
w35	-9,84	0,002	0,703	0,701	-6,242	-4,440
w36	-9,72	0,012	0,705	0,693	-6,330	-4,440
w37	-9,72	0,001	0,671	0,670	-6,301	-4,440
w38	-9,66	0,001	0,683	0,682	-6,358	-4,558
w39	-10,20	0,009	0,742	0,733	-6,431	-4,249
w40	-9,96	0,012	0,717	0,705	-6,209	-4,320
Average	-9,92	0,008	0,713	0,705	-6,301	-4,316
stad dev	0.30	0.006	0.070	0.070	0.082	0.125

stad.dev 0,30 0,006 0,070 0,070 0,082 0,125 Πίνακας 6.6:Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε ζύλινη βάση στα -4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
w41	9,90	0,077	0,743	0,666	5,968	4,500
w42	10,74	0,036	0,744	0,708	5,983	4,423
w43	27,10	0,002	0,181	0,179	6,096	5,704
w44	9,90	0,053	0,741	0,688	5,884	4,500
w45	9,78	0,038	0,718	0,680	5,940	4,666
w46	26,70	0,016	0,276	0,260	6,268	5,868
w47	27,10	0,018	0,185	0,167	6,136	5,500
w48	9,90	0,097	0,757	0,660	5,936	4,616
w49	9,78	0,083	0,732	0,649	6,040	4,699
w50	10,02	0,026	0,730	0,704	6,060	4,500
w51	27,10	0,025	0,192	0,167	6,200	5,250
w52	10,26	0,034	0,747	0,713	5,899	4,500
w53	10,14	0,011	0,716	0,705	6,033	4,286
w54	27,10	0,008	0,192	0,184	6,484	5,652
w55	10,26	0,105	0,598	0,493	6,060	4,620
w56	27,10	0,008	0,198	0,190	6,100	5,516
w57	27,10	0,014	0,185	0,171	6,528	5,528
w58	27,10	0,014	0,184	0,170	5,756	5,644
w59	27,10	0,006	0,182	0,176	6,275	5,876
w60	9,90	0,014	0,708	0,694	5,820	4,620
Average	17,70	0,034	0,485	0,451	6,073	5,023
stad.dev	8,68	0,032	0,270	0,252	0,201	0,571

Πίνακας 6.7: Μετρήσεις, εκφορτίσεων
αέρος, όταν ο στόχος είναι σε ζύλινη βάση στα $+4\,kV$

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
w61	-25,25	0,008	0,216	0,208	-6,463	-5,071
w62	-20,19	0,007	0,340	0,333	-6,600	-4,991
w63	-19,14	0,007	0,331	0,324	-6,113	-5,642
w64	-18,98	0,002	0,370	0,368	-5,985	-5,707
w65	-22,34	0,020	0,250	0,230	-6,318	-5,445
w66	-24,05	0,010	0,290	0,280	-6,450	-5,427
w67	-34,70	0,052	0,273	0,221	-6,596	-5,604
w68	-25,56	0,016	0,220	0,204	-6,151	-5,410
w69	-32,85	0,007	0,203	0,196	-6,403	-5,352
w70	-17,83	0,005	0,261	0,256	-6,380	-5,394
w71	-27,30	0,006	0,229	0,223	-6,617	-5,314
w72	-21,90	0,005	0,254	0,249	-6,500	-5,700
w73	-16,50	0,008	0,371	0,363	-6,900	-5,700
w74	-15,90	0,006	0,269	0,263	-6,500	-5,300
w75	-31,50	0,102	0,282	0,180	-6,696	-5,900
w76	-26,90	0,047	0,282	0,235	-6,512	-5,618
w77	-28,70	0,030	0,274	0,244	-6,840	-5,100
w78	-23,70	0,024	0,265	0,241	-6,396	-5,148
w79	-34,50	0,058	0,278	0,220	-6,984	-5,384
w80	-34,70	0,052	0,273	0,221	-6,596	-5,604
Average	-25,12	0,024	0,277	0,253	-6,500	-5,441
stad.dev	6,17	0,026	0,047	0,054	0,251	0,244

Πίνακας 6.8:Μετρήσεις, εκφορτίσεων αέρος, όταν ο στόχος είναι σε ζύλινη βάση στα -4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	$I_{30}(A)$	I60(A)
wl1	14,36	0,038	1,178	1,140	5,069	5,301
wl2	14,52	0,048	1,204	1,156	5,160	5,682
wl3	15,00	0,030	1,218	1,188	5,432	5,616
wl4	15,24	0,039	1,234	1,195	5,431	5,289
wl5	15,24	0,041	1,224	1,183	5,254	5,480
wl6	14,20	0,032	1,185	1,153	5,054	5,480
wl7	14,76	0,025	1,163	1,138	5,020	5,480
wl8	15,08	0,016	1,151	1,135	5,067	5,627
w19	14,92	0,024	1,179	1,155	5,342	5,499
wl10	15,00	0,007	1,168	1,161	5,005	5,640
wl11	14,92	0,020	1,211	1,191	5,144	5,688
wl12	13,48	0,045	1,219	1,174	5,080	5,480
wl13	15,16	0,002	1,186	1,184	4,998	5,635
wl14	14,60	0,038	1,229	1,191	5,030	5,610
wl15	14,92	0,010	1,170	1,160	5,080	5,640
wl16	15,48	0,021	1,219	1,198	5,097	5,577
wl17	15,08	0,001	1,173	1,172	5,158	5,561
wl18	14,76	0,010	1,150	1,140	5,232	5,568
wl19	15,00	0,051	1,207	1,156	5,000	5,679
wl20	14,92	0,044	1,222	1,178	4,920	5,640
Average	14,83	0,027	1,195	1,167	5,129	5,559
stad.dev	0,44	0,016	0,027	0,021	0,143	0,115

Πίνακας 6.9:Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου στα +4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
wl21	-14,56	0,023	1,204	1,181	-5,120	-5,422
wl22	-15,12	0,003	1,195	1,192	-5,200	-5,282
wl23	-15,44	0,003	1,180	1,177	-5,675	-5,280
wl24	-15,08	0,049	1,228	1,179	-4,440	-5,760
wl25	-15,24	0,081	1,285	1,204	-4,470	-5,880
wl26	-14,92	0,037	1,226	1,189	-4,360	-6,010
wl27	-14,84	0,037	1,192	1,155	-4,470	-6,120
wl28	-15,00	0,090	1,264	1,174	-4,424	-5,952
wl29	-14,36	0,029	1,213	1,184	-4,440	-5,960
wl30	-14,76	0,055	1,225	1,170	-4,324	-6,040
wl31	-14,68	0,052	1,243	1,191	-4,478	-6,082
wl32	-14,52	0,029	1,179	1,150	-4,530	-6,040
wl33	-14,76	0,080	1,230	1,150	-4,392	-6,040
wl34	-14,44	0,090	1,243	1,153	-4,504	-6,016
wl35	-13,72	0,112	1,208	1,096	-4,501	-5,870
wl36	-14,60	0,086	1,243	1,157	-4,418	-6,029
wl37	-14,52	0,036	1,209	1,173	-4,309	-5,902
wl38	-14,52	0,027	1,199	1,172	-4,258	-5,742
wl39	-14,52	0,063	1,215	1,152	-4,550	-5,859
wl40	-14,60	0,031	1,198	1,167	-4,415	-5,935
Average	-14,71	0,051	1,219	1,168	-4,564	-5,861
stad.dev	0,37	0,031	0,027	0,023	0,353	0,252

Πίνακας 6.10:Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου στα -4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	$I_{30}(A)$	I60(A)
wl41	12,80	0,185	0,576	0,391	5,230	6,170
wl42	40,40	0,086	0,270	0,184	5,200	6,572
wl43	12,74	0,094	0,519	0,425	5,508	6,468
wl44	16,76	0,090	0,234	0,144	5,138	6,557
wl45	17,96	0,055	0,182	0,127	5,077	6,755
wl46	17,96	0,085	0,199	0,114	5,375	6,696
wl47	15,73	0,086	0,307	0,221	5,435	6,223
wl48	32,49	0,080	0,272	0,192	5,280	6,583
wl49	24,73	0,097	0,312	0,215	5,113	6,527
w150	10,91	0,075	0,573	0,498	5,714	6,277
wl51	9,90	0,050	1,606	1,556	5,208	6,299
w152	7,92	0,091	1,865	1,774	5,594	6,583
w153	9,91	0,124	1,621	1,497	5,244	6,427
w154	25,69	0,110	0,395	0,285	4,979	6,698
w155	12,10	0,043	0,541	0,498	5,570	6,295
w156	7,95	0,140	1,832	1,692	5,488	6,249
w157	8,12	0,029	1,840	1,811	5,658	6,080
wl58	22,81	0,063	0,403	0,340	5,292	6,394
w159	8,10	0,086	1,822	1,736	6,089	6,178
w160	30,90	0,085	0,261	0,176	5,634	6,418
Average	17,29	0,088	0,7815	0,694	5,391	6,422
stad.dev	9,38	0,035	0,67303	0,673	0,268	0,196

Πίνακας 6.11:Μετρήσεις, εκφορτίσεων αέρος, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου στα +4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
wl61	-17,88	0,112	0,383	0,271	-4,990	-6,360
wl62	-17,88	0,058	0,278	0,220	-5,034	-6,474
wl63	-17,90	0,024	0,269	0,245	-5,160	-6,360
wl64	-17,88	0,107	0,298	0,191	-5,240	-6,514
wl65	-21,70	0,017	0,272	0,255	-5,266	-6,266
wl66	-21,90	0,059	0,368	0,309	-5,336	-6,382
wl67	-21,70	0,018	0,292	0,274	-5,136	-6,300
wl68	-29,70	0,036	0,272	0,236	-5,116	-6,372
wl69	-25,50	0,066	0,278	0,212	-5,032	-6,432
w170	-24,50	0,073	0,372	0,299	-5,300	-6,500
wl71	-18,70	0,035	0,351	0,316	-5,230	-6,230
wl72	-33,90	0,038	0,265	0,227	-5,024	-6,776
wl73	-18,10	0,035	0,357	0,322	-5,100	-6,300
wl74	-28,50	0,084	0,285	0,201	-5,236	-6,500
wl75	-31,10	0,105	0,282	0,177	-5,090	-6,500
wl76	-36,50	0,020	0,239	0,219	-4,700	-6,300
wl77	-27,10	0,034	0,277	0,243	-4,900	-6,632
wl78	-32,10	0,011	0,266	0,255	-5,078	-6,478
wl79	-18,90	0,005	0,284	0,279	-5,270	-6,500
w180	-19,70	0,016	0,372	0,356	-5,268	-6,532
Average	-24,06	0,048	0,303	0,255	-5,125	-6,435
stad.dev	6,10	0,034	0,045	0,048	0,155	0,133

Πίνακας 6.12:Μετρήσεις, εκφορτίσεων αέρος, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου στα -4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
bm1	14,56	0,036	0,718	0,682	6,876	5,332
bm2	14,23	0,043	0,738	0,695	6,725	5,143
bm3	14,65	0,041	0,694	0,653	6,776	6,058
bm4	14,55	0,041	0,745	0,704	6,576	5,538
bm5	14,14	0,034	0,709	0,675	6,543	5,085
bm6	14,80	0,048	0,745	0,697	6,649	5,137
bm7	14,32	0,063	0,773	0,710	6,801	5,645
bm8	14,41	0,037	0,723	0,686	7,059	5,175
bm9	15,00	0,072	0,775	0,703	6,802	5,66
bm10	14,83	0,057	0,76	0,703	6,575	5,473
bm11	14,81	0,047	0,746	0,699	6,685	5,782
bm12	14,42	0,048	0,746	0,698	7,147	5,369
bm13	14,83	0,061	0,736	0,675	6,983	5,777
bm14	15,00	0,053	0,776	0,723	6,594	5,277
bm15	14,16	0,073	0,797	0,724	6,8	5,33
bm16	14,23	0,037	0,714	0,677	6,895	5,395
bm17	14,22	0,025	0,716	0,691	6,318	5,406
bm18	15,34	0,081	0,768	0,687	6,64	5,366
bm19	15,03	0,043	0,737	0,694	6,782	5,655
bm20	14,58	0,036	0,711	0,675	6,81	5,965
Average	14,61	0,049	0,741	0,693	6,752	5,478
stad.dev	0,34	0,015	0,027	0,017	0,192	0,276

Πίνακας 6.13:Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα 1,5x1,5m² στα +4 kV

	I _{max} (A)	I _{10%} (ns)	I90%(ns)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I60(A)
bm21	-14,69	0,037	0,729	0,692	-7,521	-5,789
bm22	-15,42	0,041	0,756	0,715	-7,263	-5,852
bm23	-14,73	0,052	0,749	0,697	-7,301	-5,135
bm24	-14,75	0,057	0,746	0,689	-7,028	-5,665
bm25	-14,38	0,031	0,740	0,709	-7,341	-5,674
bm26	-14,7,	0,072	0,745	0,673	-7,206	-5,592
bm27	-15,00	0,061	0,769	0,708	-7,127	-5,539
bm28	-15,23	0,025	0,758	0,733	-6,962	-5,791
bm29	-14,52	0,070	0,763	0,693	-7,012	-5,208
bm30	-15,40	0,043	0,746	0,703	-7,025	-6,049
bm31	-14,80	0,057	0,746	0,689	-7,275	-5,511
bm32	-14,38	0,029	0,734	0,705	-7,395	-5,805
bm33	-14,37	0,061	0,797	0,736	-7,019	-5,604
bm34	-14,23	0,045	0,736	0,691	-7,483	-5,793
bm35	-14,80	0,063	0,760	0,697	-7,332	-5,963
bm36	-14,09	0,034	0,734	0,700	-7,170	-5,560
bm37	-14,40	0,051	0,725	0,674	-7,185	-5,763
bm38	-14,99	0,081	0,791	0,710	-6,791	-5,479
bm39	-14,67	0,023	0,719	0,696	-6,720	-6,061
bm40	-14,42	0,040	0,734	0,694	-6,865	-5,972
Average	-14,70	0,049	0,749	0,700	-7,151	-5,690
stad.dev	0.37	0.016	0.020	0.016	0.221	0.248

Πίνακας 6.14:Μετρήσεις, εκφορτίσεων επαφής, όταν ο στόχος είναι σε μεταλλική πλάκα 1,5x1,5m² στα -4 kV

6.4.3 Στατιστική επεξεργασία δεδομένων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται μια οπτική σύγκριση για τις μέσες τιμές των εξής μεγεθών της κυματομορφής: ρεύμα κορυφής, ρεύμα στα 30 ns και ρεύμα στα 60 ns. Ο χρόνος ανόδου επειδή έχει χρονική μονάδα μέτρησης δεν μπορεί να συμπεριληφθεί σε αυτά τα διαγράμματα τα οποία έχουν ως μονάδα στον άξονα το Ampere. Η γραφική παράσταση του χρόνου ανόδου γίνεται σε ξεχωριστό διάγραμμα.



Σχήμα 6.14: Μέσες τιμές παραμέτρων για εκφορτίσεις επαφής, στα $+4 \, kV$



 Σχήμα 6.15: Μέσες τιμές παραμέτρων για εκφορτίσει
ς επαφής, στα -4 kV



 Σχήμα 6.16: Μέσες τιμές παραμέτρων για εκφορτίσεις
 αέρος, στα +4 kV



Σχήμα 6.17:Μέσες τιμές παραμέτρων για εκφορτίσεις αέρος, στα -4 kV



Σχήμα 6.18: Μέσες τιμές χρόνου ανόδου για διαφορετικές επιφάνειες και τρόπους εκφόρτισης

Στον Πίνακα 6.15 δίνεται συγκεντρωτικά η συμπεριφορά των εκφορτίσεων επαφής σε σχέση με το Πρότυπο IEC 6100-4-2 για εκφορτίσεις στα ± 4 kV.

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
metal 1x1 +4 kV	14,68	0,687	6,657	4,994
Απόκλιση από το Πρότυπο	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
metal 1x1 -4 kV	-14,95	0,674	-6,721	-5,071
Απόκλιση από το Πρότυπο	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
metal 1,5x1,5 +4 kV	14,61	0,693	6,752	5,478
Απόκλιση από το Πρότυπο	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι
metal 1,5x1,5 -4 kV	-14,7	0,7	-7,151	-5,690
Απόκλιση από το Πρότυπο	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι
wall +4 kV	14,83	1,167	5,129	5,559
Απόκλιση από το Πρότυπο	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι
wall -4 kV	-14,71	1,168	-4,564	-5,861
Απόκλιση από το Πρότυπο	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι
wood +4 kV	9,97	0,700	-5,915	-5,752
Απόκλιση από το Πρότυπο	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι
wood -4 kV	-9,92	0,705	-6,301	-4,316
Απόκλιση από το Πρότυπο	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι

Πίνακας 6.15: Πίνακας που δείχνει τη συμπεριφορά των μετρήσεων σε σχέση με το διεθνές Πρότυπο IEC 6100-4-2

6.5 Στατιστικά τεστ σε εκφορτίσεις επαφής

Το γενικότερο πρόβλημα που ενδιαφέρει τη μετρολογία είναι να προσεγγιστεί η πραγματική τιμή της μετρούμενης ποσότητας περιορισμένης έκτασης παρατηρήσεων. Δεδομένου ότι το αποτέλεσμα αντιμετωπίζεται ως στογαστική μεταβλητή, το πρόβλημα ανάγεται στην εκτίμηση των παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά της στοχαστικής μεταβλητής, όπως η αναμενόμενη τιμή και η τυπική απόκλιση της κατανομής [26]. Τα στατιστικά τεστ δεν επιδέχονται οριστικές και μονοσήμαντες απαντήσεις. Η όποια απάντηση έχει σχέση με το υιοθετούμενο επίπεδο εμπιστοσύνης. Η υπόθεση, της οποίας η ισχύς διερευνάται αναφέρεται και ως μηδενική υπόθεση ή αλλιώς υπόθεση H_0 . Η υπόθεση H_1 αποτελεί την εναλλακτική υπόθεση. Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω αν η H_0 απορρίπτεται βάσει ενός επιπέδου εμπιστοσύνης p, παραμένει η πιθανότητα αυτή να είναι αληθής. Η πιθανότητα να απορριφθεί εσφαλμένα μια υπόθεση είναι α=1-p. Το α αποκαλείται επίπεδο σημαντικότητας. Ο Πίνακας 6.16 ορίζει τα σφάλματα που μπορούν να προκύψουν από την παραπάνω διαδικασία [31].

กอา	Απόφαση				
<i>μ</i> πόφα		Αποδοχή της Η0	Αποδοχή της Η1		
ηθής ι	H0	Ορθή απόφαση	Σφάλμα Ι είδους		
AM	H1	Σφάλμα ΙΙ είδους	Ορθή απόφαση		

Πίνακας 6.16:Πίνακας Αποφάσεων – Σφαλμάτων

Οι συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθοι:

- n: Ο αριθμός των παρατηρήσεων
- α: Το επίπεδο σημαντικότητας
- ν: Οι βαθμοί ελευθερίας
- σ: Τυπική απόκλιση τυχαίας μεταβλητής
- s: Τυπική απόκλιση δείγματος
- μ: Μέση τιμή τυχαίας μεταβλητής
- x: Μέση τιμή δείγματος

6.5.1 T-test

Το τεστ αυτό που εμφανίζεται συχνότερα στην καθημερινή εργαστηριακή πρακτική χρησιμοποιείται όταν το ζητούμενο είναι η πιθανότερη τιμή μ της μεταβλητής και η μόνη διαθέσιμη πληροφορία είναι ένα δείγμα Ν τυχαίων και ανεξάρτητων μεταξύ τους τιμών. Το τεστ έχει βαρύνουσα σημασία όταν η μεταβλητή ακολουθεί την κανονική κατανομή. Δεχόμαστε ότι οι μεταβλητές, των μετρήσεων που πάρθηκαν για την διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, ακολουθούν κανονική κατανομή. Αυτή η a priori αποδοχή είναι βάσιμη εάν αναλογιστούμε ότι η κανονική κατανομή είναι αυτή που εμφανίζεται συχνότερα στις διαδικασίες μέτρησης μεγεθών που θεωρούνται σταθερά. Η αποδοχή αυτή δεν μπορεί να γίνει για τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις αέρος. Ο λόγος είναι ότι είναι αδύνατον να ικανοποιήσουμε την απαίτηση, να πραγματοποιούνται με τον ίδιο τρόπο οι μετρήσεις. Αυτό οφείλεται στο ηλεκτρικό τόξο που εκδηλώνεται σε διαφορετικές αποστάσεις από το στόχο, από μέτρηση σε μέτρηση. Έτσι τα τεστ θα γίνουν μόνο για τις εκφορτίσεις επαφής.

6.5.1.1 Διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (άγνωστη διασπορά)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν γνωρίζουμε την διασπορά σ² της τυχαίας μεταβλητής. Τα μόνα δεδομένα είναι η μέση τιμή \overline{x} , η τυπική απόκλιση s και το μέγεθος του δείγματος n. Η στοχαστική μεταβλητή $t = \frac{(\overline{x} - \mu)}{\sqrt[s]{n}}$ ακολουθεί κατανομή

Student με ν=n-1 βαθμούς ελευθερίας. Η πιθανότητα $p_{\alpha/2,\kappa}$, να περιέχεται η t στο διάστημα από $-t_{\alpha/2,\nu}$ έως $+t_{\alpha/2,\nu}$ λαμβάνεται συνήθως 95%. Ο άγνωστος $t_{\alpha/2,\nu}$ μπορεί να βρεθεί με τη βοήθεια των πινάκων της κατανομής Student [30]. Ισχύει η παρακάτω ανισότητα για την μεταβλητή t, σχετικά με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση:

$$-t_{a/2,\nu} < \frac{x-\mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} < +t_{a/2,\nu} \Leftrightarrow \overline{x} - t_{a/2,\nu} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \overline{x} + t_{a/2,\nu} \frac{s}{\sqrt{n}}$$
(6.15)

Εύρεση μέσης τιμής του μέγιστου ρεύματος (I_{max}) για εκφορτίσεις στην μεταλλική πλάκα στα +4 kV

Η αναμενόμενη μέση τιμή της μεταβλητής θα ανήκει σε ένα διάστημα εμπιστοσύνης το οποίο θα καθορίζεται από το επίπεδο εμπιστοσύνης που έχουμε επιλέξει. Όπως συνήθως, έτσι και εδώ θα πάρουμε επίπεδο σημαντικότητας α=1-0,95=0,05=5%

Δεδομένα: n=20, x = 14,682, s=0,423415, v=n-1=19 \Rightarrow $t_{a/2,v} = 2,093$ (6.15) $\Rightarrow 14,479 < \mu < 14,885$. Δηλαδή η μέση τιμή του μεγέθους 'πλάτος ρεύματος' είναι σε

Εύρεση μέσης τιμής του χρόνου ανόδου t_r για εκφορτίσεις στην μεταλλική πλάκα στα +4 kV

Δεδομένα: n=20, \bar{x} =0,68725, s=0,02592, v=n-1=19, α=5% \Rightarrow $t_{a/2,v}$ =2,093 ^(6.15) \Rightarrow 0,6748<μ<0,6997

Εύρεση μέσης τιμής του χρόνου I_{30} για εκφορτίσεις στην μεταλλική πλάκα στα +4 kV

Δεδομένα: n=20, \bar{x} = 6,6569, s=0,1559, v=n-1=19, α=5% \Rightarrow $t_{a/2,v}$ =2,093 ^(6.15) \Rightarrow 6,582<μ<6,732

Εύρεση μέσης τιμής του χρόνου I_{60} για εκφορτίσεις στην μεταλλική πλάκα στα +4 kV

Δεδομένα: n=20, \bar{x} = 4,9941, s=0,2225, v=n-1=19, α=5% \Rightarrow $t_{a/2,v}$ =2,093 $\stackrel{(6.15)}{\Rightarrow}$ 4,887<μ<5,101

Με αυτό τον τρόπο συμπληρώνεται ο παρακάτω πίνακας που αφορά της μέσες τιμές των μεγεθών.

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
metal 1,5x1,5 +4 kV	14,45<µ<14,77	0,685<µ<0,701	6,6600<µ<6,844	5,345<µ<5,611
metal 1,5x1,5 -4 kV	-14,88<µ<-14,52	0,692<µ<0,708	-7,045<µ<-7,257	-5,571<µ<-5,809
metal 1x1 +4 kV	14,48<µ<14,89	0,675<µ<0,700	6,582<µ<6,732	4,887<µ<5,101
metal 1x1 -4 kV	-15,09<µ<-14,80	0,654<µ<0,694	-6,793<µ<-6,650	-5,253<µ<-4,889
wall +4kV	14,62<µ<15,04	1,158<µ<1,177	5,060<µ<5,197	5,503<µ<5,614
wall -4 kV	-14,89<µ<-14,53	1,157<µ<1,179	-4,733<µ<-4,395	-5,982<µ<-5,740
wood +4 kV	9,86<µ<10,07	0,689<µ<0,711	5,722<µ<6,107	5,676<µ<5,828
wood -4 kV	-10,06<µ<-9,78	0,672<µ<0,739	-6,340<µ<-6,261	-4,376<µ<-4,256

Πίνακας 6.17: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τις μέσες τιμές με πιθανότητα 95%

6.5.1.2 Διάστημα εμπιστοσύνης της διαφοράς των μέσων τιμών

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, δεν γνωρίζουμε τις διασπορές σ_1^2 και σ_2^2 των τυχαίων μεταβλητών. Τα μόνα δεδομένα είναι οι μέσες τιμές \overline{x}_1 και \overline{x}_2 ,οι τυπικές αποκλίσεις s₁ και s₂ και το μέγεθος των δειγμάτων n₁ και n₂. Θα εξετάσουμε την συμπεριφορά της διαφοράς των μέσων τιμών ανάμεσα σε δείγματα που διαφέρουν μόνο ως προς την πολικότητα των εκφορτίσεων, δηλαδή θετικών και αρνητικών εκφορτίσεων. Επειδή μας ενδιαφέρει να δούμε αν το πιστόλι εκφόρτισης, πραγματοποιεί με τον ίδιο τρόπο τις θετικές και τις αρνητικές εκφορτίσεις, θα πάρουμε τις απόλυτες τιμές για τα αρνητικά μεγέθη. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε αν οι τέσσερις μεταβλητές, που εξετάζουμε σε κάθε κυματομορφή, είναι ίσες για θετικές και αρνητικές εκφορτίσεις. Η μεταβλητή $t = \frac{(\overline{x_1} - \overline{x_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$ ακολουθεί κατανομή

Student $\mu \varepsilon = \frac{\left\{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right\}^2}{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}$ $\beta \alpha \theta \mu o \dot{\upsilon} \varsigma = \varepsilon \lambda \varepsilon \upsilon \theta \varepsilon \rho i \alpha \varsigma.$ E\pi \vec{n} \vec{n} i \vec{n} i = n_2 = n(i \sigma \vec{n} i \vec{n} i))^2}{n_1 - 1}

πληθυσμοί μετρήσεων) $\Rightarrow v = (n-1) \left(\frac{\left(s_1^2 + s_2^2\right)^2}{s_1^4 + s_2^4} \right).$

Το διάστημα από $-t_{\alpha/2,\nu}$ έως $+t_{\alpha/2,\nu}$, ώστε η πιθανότητα να περιέχεται η t να είναι 95%, μπορεί να βρεθεί με τη βοήθεια των πινάκων της κατανομής Student[30]. Ισχύει για την t:

$$-t_{a/2,\nu} < t = \frac{\left(\overline{x_{1}} - \overline{x_{2}}\right) - \left(\mu_{1} - \mu_{2}\right)}{\sqrt{\frac{s_{1}^{2}}{n_{1}} + \frac{s_{2}^{2}}{n_{2}}}} < +t_{a/2,\nu} \Leftrightarrow$$

$$\overline{x_{1}} - \overline{x_{2}} - t_{a/2,\nu} \sqrt{\frac{s_{1}^{2}}{n_{1}} + \frac{s_{2}^{2}}{n_{2}}} < \mu_{1} - \mu_{2} < \overline{x_{1}} - \overline{x_{2}} + t_{a/2,\nu} \sqrt{\frac{s_{1}^{2}}{n_{1}} + \frac{s_{2}^{2}}{n_{2}}}$$
(6.16)

Για τη μεταλλική πλάκα έχουμε:

Imax: $s_1=0,423415, s_2=0,304732 \Rightarrow v \approx 35 \Rightarrow t_{\alpha/2,35}=2,03, \overline{x_1}=14,682, \overline{x_2}=14,9475$ ^(6.16) $\Rightarrow -0,452 < \mu_1 - \mu_2 < -0,079$ $t_r: s_1=0,025921, s_2=0,041333 \Rightarrow v \approx 32 \Rightarrow t_{\alpha/2,35}=2,037, \overline{x_1}=0,68725, \overline{x_2}=0,674$ ^(6.16) $\Rightarrow 0,0125 < \mu_1 - \mu_2 < 0,0140$ $I_{30}: s_1=0,1559, s_2=0,149466 \Rightarrow v \approx 38 \Rightarrow t_{\alpha/2,35}=2,025, \overline{x_1}=6,6569, \overline{x_2}=6,72145$ ^(6.16) $\Rightarrow -0,0904 < \mu_1 - \mu_2 < -0,0388$ $I_{60}: s_1=0,222533, s_2=0,378607 \Rightarrow v \approx 31 \Rightarrow t_{\alpha/2,35}=2,04, \overline{x_1}=4,9941, \overline{x_2}=5,0708$ ^(6.16) $\Rightarrow -0,0285 < \mu_1 - \mu_2 < -0,0185$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκουμε τα διαστήματα εμπιστοσύνης για τις εκφορτίσεις σε ξύλινη βάση και στον γειωμένο πίνακα στον τοίχο και δημιουργούμε τον Πίνακα 6.18.

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
metal 1,5x1,5	-0,32<µ<0,14	-0,018<µ<0,004	-0,532<µ<-0,266	-0,38<µ<-0,044
metal 1x1	-0,45 <k<-0,08< th=""><th>0,013<k<0,014< th=""><th>-0,090<k<-0,039< th=""><th>-0,135<k<-0,018< th=""></k<-0,018<></th></k<-0,039<></th></k<0,014<></th></k<-0,08<>	0,013 <k<0,014< th=""><th>-0,090<k<-0,039< th=""><th>-0,135<k<-0,018< th=""></k<-0,018<></th></k<-0,039<></th></k<0,014<>	-0,090 <k<-0,039< th=""><th>-0,135<k<-0,018< th=""></k<-0,018<></th></k<-0,039<>	-0,135 <k<-0,018< th=""></k<-0,018<>
wall	-0,08 <k<0,33< th=""><th>-0,004<k<-0,001< th=""><th>0,537<k<0,593< th=""><th>-0,319<k<-0,286< th=""></k<-0,286<></th></k<0,593<></th></k<-0,001<></th></k<0,33<>	-0,004 <k<-0,001< th=""><th>0,537<k<0,593< th=""><th>-0,319<k<-0,286< th=""></k<-0,286<></th></k<0,593<></th></k<-0,001<>	0,537 <k<0,593< th=""><th>-0,319<k<-0,286< th=""></k<-0,286<></th></k<0,593<>	-0,319 <k<-0,286< th=""></k<-0,286<>
wood	-0,01 <k<0,10< th=""><th>-0,006<k<-0,004< th=""><th>-0,554<k<-0,218< th=""><th>1,410<k<1,462< th=""></k<1,462<></th></k<-0,218<></th></k<-0,004<></th></k<0,10<>	-0,006 <k<-0,004< th=""><th>-0,554<k<-0,218< th=""><th>1,410<k<1,462< th=""></k<1,462<></th></k<-0,218<></th></k<-0,004<>	-0,554 <k<-0,218< th=""><th>1,410<k<1,462< th=""></k<1,462<></th></k<-0,218<>	1,410 <k<1,462< th=""></k<1,462<>

Πίνακας 6.18: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τη διαφορά $k = \mu_1 - \mu_2$ με πιθανότητα 95%

6.5.2 Z-test

Το τεστ αυτό χρησιμοποιείται όταν το ζητούμενο είναι η πιθανότερη τιμή μ της μεταβλητής και είναι γνωστή η τυπική απόκλιση της μεταβλητής, καθώς επίσης και ένα δείγμα Ν τυχαίων και ανεξάρτητων μεταξύ τους τιμών.

6.5.2.1 Διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (γνωστή διασπορά)

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι ουσιαστικά δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις απόλυτες τιμές των μετρούμενων μεγεθών για θετικές και αρνητικές εκφορτίσεις. Έτσι μπορούμε λαμβάνοντας την απόλυτη τιμή των μεγεθών να θεωρήσουμε ένα δείγμα με συνολικό πληθυσμό σαράντα μετρήσεων. Στις περιπτώσεις δειγμάτων N>30 θεωρείται ότι η τυπική απόκλιση s του δείγματος

συνιστά μια ικανοποιητική προσέγγιση της τυπικής απόκλισης σ της κατανομής [26]. Για το νέο δείγμα έχουμε τους ακόλουθους πίνακες.

	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
metal 1,5x1,5	14,65	0,35
metal 1x1	14,82	0,39
wall	14,77	0,41
wood	9,95	0,27

Πίνακας 6.19:Μέσες τιμές και αποκλίσεις της μέγιστης τιμής του ρεύματος σε δείγμα με n=40

	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
metal 1,5x1,5	0,696	0,017
metal 1x1	0,681	0,035
wall	1,168	0,022
wood	0,703	0,051

Πίνακας 6.20:Μέσες τιμές και αποκλίσεις του χρόνου ανόδου του ρεύματος σε δείγμα με n=40

	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
metal 1,5x1,5	6,951	0,288
metal 1x1	6,689	0,154
wall	4,846	0,390
wood	6,108	0,347

Πίνακας 6.21:Μέσες τιμές και αποκλίσεις του I_{30} σε δείγμα με n=40

	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
metal 1,5x1,5	5,584	0,280
metal 1x1	5,032	0,309
wall	5,710	0,246
wood	5,034	0,741

Πίνακας 6.22:Μέσες τιμές και αποκλίσεις του I_{60} σε δείγμα με n=40

Η τυχαία μεταβλητή $Z = \frac{\overline{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$ ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή

μηδέν και τυπική απόκλιση 0. Θέλουμε η πιθανότητα να περιέχεται η Z στο διάστημα από $-z_{\alpha/2}$ έως $+z_{\alpha/2}$ να είναι 95%. Η πιθανότητα υπολογίζεται ως εξής
$$Pz_{\alpha/2} = P(-z_{\alpha/2} < z < z_{\alpha/2}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-z_{\alpha/2}}^{+z_{\alpha/2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi(z_{\alpha/2}) - \Phi(-z_{\alpha/2}) = 2\Phi(z_{\alpha/2}) - 1 = 0,9$$

 $5 \Rightarrow \Phi(z_{\alpha/2}) = 0,975 \Rightarrow z_{\alpha/2} = 1,96$. Η τιμή του $z_{\alpha/2}$ βρέθηκε με τη βοήθεια των

πινάκων της κανονικής κατανομής [30].

Έτσι με πιθανότητα γ=1-α =95% έχουμε την ανισότητα

$$-z_{a_2} < \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma_{n}} < +z_{a_2} \Rightarrow \bar{x} - z_{a_2} \sigma_{n} < \mu < \bar{x} + z_{a_2} \sigma_{n}$$
(6.17)

Εφαρμόζοντας τη Σχέση 6.17 σε κάθε περίπτωση εκφόρτισης επαφής παίρνουμε τον Πίνακα 6.23 που ακολουθεί.

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
metal 1,5x1,5	14,54<µ<14,76	0,691<µ<0,701	6,862<µ<7,040	5,497<µ<5,671
metal 1x1	14,69<µ<14,94	0,670<µ<0,691	6,641<µ<6,737	4,937<µ<5,128
wall	14,65<µ<14,90	1,161<µ<1,175	4,725<µ<4,967	5,633<µ<5,786
wood	9,86<µ<10,03	0,687<µ<0,719	6,000<µ<6,215	4,804<µ<5,263

Πίνακας 6.23: Διαστήματα εμπιστοσύνης για τις μέσες τιμές με πιθανότητα 95% για δείγμα με n=40

6.5.3 χ^2 -test

Το τεστ αυτό χρησιμοποιείται όταν το ζητούμενο είναι η τυπική απόκλιση σ της μεταβλητής και ως πληροφορία έχουμε ένα δείγμα Ν τυχαίων και ανεξάρτητων μεταξύ τους τιμών.

Η τυχαία μεταβλητή $X = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2}$ ακολουθεί την κατανομή χ^2 με n-1 βαθμούς ελευθερίας. Θέλουμε η πιθανότητα να περιέχεται η X σε ένα διάστημα να είναι 95%. Το διάστημα αυτό είναι για πιθανότητα γ=1-α

$$X_{n-1,\frac{a}{2}}^{2} < \frac{(n-1)s^{2}}{\sigma^{2}} < X_{n-1,1-\frac{a}{2}}^{2} \Rightarrow \frac{(n-1)s^{2}}{X_{n-1,1-\frac{a}{2}}^{2}} < \sigma^{2} < \frac{(n-1)s^{2}}{X_{n-1,\frac{a}{2}}^{2}}$$
(6.18)

Εφαρμόζοντας τη Σχέση 6.18 σε κάθε περίπτωση εκφόρτισης επαφής παίρνουμε τον Πίνακα 6.24.

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
metal 1,5x1,5+4 kV	0,26<µ<0,50	0,013<µ<0,025	0,146<µ<0,280	0,210<µ<0,403
metal 1,5x1,5 -4 kV	0,28<µ<0,54	0,012<µ<0,023	0,168<µ<0,323	0,189<µ<0,362
metal 1x1+4 kV	0,32< o <0,61	0,020<σ<0,038	0,119<σ<0,228	0,172< o <0,330
metal 1x1 -4 kV	0,23< o <0,44	0,031<σ<0,060	0,113<σ<0,218	0,288< o <0,554
wall +4 kV	0,33< o <0,64	0,016< o <0,031	0,109< o <0,209	0,087<σ<0,168
wall -4 kV	0,28< o <0,54	0,017< o <0,034	0,268< o <0,516	0,192< 0 <0,368
wood +4 kV	0,17< o <0,32	0,017< o <0,034	0,306< o <0,587	0,120< o <0,231
wood -4 kV	0,23< o <0,44	0,053< o <0,102	0,062<σ<0,1204	0,095< o <0,183

Πίνακας 6.24:Διαστήματα εμπιστοσύνης για τις τυπικές αποκλίσεις με πιθανότητα 95%

6.6 Εκφορτίσεις αέρος

Για τις εκφορτίσεις αέρος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε τα στατιστικά τεστ γιατί η διαδικασία της εκφόρτισης είναι διαφορετική κάθε φορά. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά μήκη που αναπτύσσεται το ηλεκτρικό τόξο κατά την προσέγγιση της γεννήτριας στο στόχο. Για τις συγκεκριμένες μετρήσεις θα εφαρμοστεί η εξής διαδικασία : κάθε ομάδα μετρήσεων, που αποτελείται από είκοσι στοιχεία, θα χωριστεί σε δύο διαστήματα τέτοια ώστε σε κάθε διάστημα να περιέχονται ακριβώς δέκα από τις είκοσι μετρήσεις. Αυτό θα γίνει και για τις τέσσερις παραμέτρους (Imax, tr, I30, I60) σε κάθε μία από τις επιφάνειες στήριξης του στόχου (ξύλινη βάση, μεταλλική βάση, μεταλλική πλάκα διαστάσεων 36cm x 36cm στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου). Πρέπει να διευκρινιστεί ότι στις αρνητικές εκφορτίσεις επεξεργαζόμαστε τις απόλυτες τιμές των μετρήσεων, αφού αυτές αφορούν πλάτος. Όταν μια μέτρηση θα ανήκει στο σύνολο των μετρήσεων π.χ. με μεγαλύτερη τιμή παραμέτρου από τη δοσμένη τιμή σημαίνει ότι η απόλυτη τιμή της μέτρησης είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της δοσμένης παραμέτρου. Το πρόσημο πλην υποδηλώνει απλά ότι πρόκειται για αρνητική εκφόρτιση. Παρακάτω δίνονται οι τιμές που επιλέχθηκαν ώστε σε κάθε εικοσάδα να έχουμε δέκα μετρήσεις με τιμή παραμέτρου μικρότερη από την επιλεγμένη και αντίστοιχα δέκα με τιμή μεγαλύτερη.

metal +4 kV: I_{max} =20 A, t_r =0,.3 ns, I_{30} =7,72 A, I_{60} =5,55 A metal -4 kV: I_{max} =-12 A, t_r =0,43 ns, I_{30} =-7,4 A, I_{60} =-5,45 A wall +4 kV: I_{max} =15 A, t_r =0,35 ns, I_{30} =5,3 A, I_{60} = 6,42 A wall -4 kV: I_{max} =-21,.8 A, t_r =0,25 ns, I_{30} =-5,12 A, I_{60} =-6,45 A wood +4 kV: I_{max}=10,5 A, t_r=0,5 ns, I₃₀=6,05 A, I₆₀=4,67 A

wood -4 kV: I_{max}=-25 A, t_r=0,24 ns, I₃₀=-6,5 A, I₆₀=-5,42 A

Οι πίνακες που ακολουθούν δίνουν τις μετρήσεις που έχουν μεγαλύτερη τιμή, στην εκάστοτε εξεταζόμενη παράμετρο, από τη δοσμένη.

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
metal +4 kV	4,5,6,10,12,14,	1,2,3,7,8,9,11,	3,4,7,10,12,13,	1,2,7,8,9,10,11,
metai +4 Kv	15,16,17,20	13,18,19	15,17,18,20	12,15,18
motel A kV	1 ,2,5,6,7,10,	2,3,4,7,8,9,11,	1,2,3,8,10,12,	2,3,4,6,7,9,11,
metal -4 kV	12,13,15,16	14,17,19	15,16,17,20	14,17,18

Πίνακας 6.25: Αύζοντες αριθμοί εκφορτίσεων σε μεταλλική βάση με τιμή παραμέτρου μεγαλύτερη της δοσμένης

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
wall +4 kV	2,4,5,6,7,8,9,	1,3,10,11,12,	3,6,7,10,12,15,	2,3,4,5,6,8,9,
wan +4 kv	14,18,20	13,15,16,17,19	16,17,19,20	12,13,14
woll 4 kV	6,8,9,10,12,14,	1,5,6,7,10,11,	3,4,5,6,7,10,11,	2,4,10,12,14,15,
wan -4 KV	15,16,17,18	13,18,19,20	14,19,20	17,18,19,20

Πίνακας 6.26: Αύζοντες αριθμοί εκφορτίσεων σε γειωμένο πίνακα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου με τιμή παραμέτρου μεγαλύτερη της δοσμένης

	I _{max} (A)	t _r (ns)	I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)
wood +4 kV	2,3,6,7,11,14,	1,2,4,5,8,9,10,	3,6,7,10,11,14,	3,6,7,9,11,14,
woou +4 KV	16,17,18,19	12,13,20	15,16,17,19	16,17,18,19
wood AkV	1,7,8,9,11,15,	2,3,4,6,10,12,	2,7,11,12,13,15,	3,4,5,6,7,12,
WOUU -4 KV	16,17,19,20	13,14,17,18	16,17,19,20	13,15,16,20

Πίνακας 6.27: Αύζοντες αριθμοί εκφορτίσεων σε ζύλινη βάση με τιμή παραμέτρου μεγαλύτερη της δοσμένης

6.7 Αβεβαιότητα μετρήσεων

Το πρόβλημα της μέτρησης της αβεβαιότητας, έχει γίνει αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για την επιστημονική κοινότητα. Όλες η διαδικασίες που προϋποθέτουν μετρήσεις εμπεριέχουν το παραπάνω πρόβλημα. Στην μέτρηση του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση η μέτρηση της αβεβαιότητας αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους Υ πραγματοποιείται έμμεσα, δηλαδή στη βάση απευθείας μετρήσεων μιας σειράς πρωτογενών μεγεθών X_i , i=1,2,...N. Η μετρούμενη κάθε φορά τιμή y_i του Υ προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών $x_1, x_2, ..., x_N$ των πρωτογενών μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης Y=M($X_1, X_2, ..., X_N$) η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος [26]. Η συμβατική στοχαστική προσέγγιση της μέτρησης ορίζει ότι η εκτίμηση της αβεβαιότητας στο αποτέλεσμα προκύπτει από τις κατανομές των πρωτογενών μεγεθών. Η μέθοδος αυτή είναι ωστόσο πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί στις περισσότερες περιπτώσεις, δεδομένης της δυσκολίας σαφούς γνώσης των πρωτογενών κατανομών [26].

Η εναλλακτική λύση συνίσταται στην εφαρμογή του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων (law of error propagation). Ο νόμος αυτός προκύπτει από την ανάπτυξη σε πρώτης τάξεως σειρά Taylor της συνάρτησης M(Y) γύρω από το σημείο μέτρησης $y_e=M(x_{1e}, x_{2e}, ..., x_{Ne})$. Ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων έχει ως εξής:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial M}{\partial x_i} \frac{\partial M}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$
(6.19)

όπου u_{x_i} είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους X_i και u(χ_i,χ_j) είναι η συμμεταβλητότητα (covariance) μεταξύ Xi και X_j. Συνήθως, στις δοκιμές τα μεγέθη X₁, X₂, ..., X_N θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους οπότε, η Σχέση 6.19 γίνεται

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2$$
(6.20)

$$u_{y}^{2} = \sum_{i=1}^{N} u_{i}^{2}$$
(6.21)

όπου
$$u_i = \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right) u_{x_i}$$

Από τη στοχαστική ερμηνεία της μέτρησης απορρέει ότι είναι δύσκολο να ισχυριστούμε με απόλυτη βεβαιότητα ότι η τιμή ενός φυσικού μεγέθους περιέχεται σε ένα καθορισμένο διάστημα $\Delta x = (x - U_x, x + U_x)$. Αντίθετα, μπορούμε να γνωρίζουμε την πιθανότητα η τιμή αυτή να περιέχεται στο συγκεκριμένο διάστημα και να επιλέξουμε το διάστημα με τρόπο ώστε η πιθανότητα να είναι πολύ μεγάλη, στα όρια της σιγουριάς. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων f(x):

$$p = \int_{x-U_x}^{x+U_x} f(x) dx$$
 (6.22)

Το διάστημα $(x - U_x, x + U_x)$ εξαρτάται, επομένως όχι μόνο από τη συνάρτηση κατανομής, αλλά και από την επιθυμητή πιθανότητα κάλυψης. Η διευρυμένη αβεβαιότητα $U_x = k_p u_x$ υπολογίζεται ανάλογα με το πόσο σίγουρος επιθυμεί να είναι ο χρήστης της μέτρησης για το διάστημα κάλυψης, με την επιλογή της κατάλληλης τιμής του συντελεστή κάλυψης k_p [26].Η κάθε κατανομή έχει μία ξεχωριστή σχέση αντιστοιχίας πιθανότητας κάλυψης-συντελεστή κάλυψης. Ακολούθως δίνονται οι σχέσεις αυτές για συνήθεις κατανομές.

• Kavoviký:
$$p = \int_{x-U_x}^{x+U_x} N(x) dx = 2\Phi(k_p) - 1$$
 (6.23)

• Τραπεζοειδής:
$$(p < \frac{2d}{e+d})$$
: $k_p = \frac{\sqrt{6}(e+d)}{2\sqrt{e^2+d^2}}p$ (6.24)

• Τραπεζοειδής:
$$(p \ge \frac{2d}{e+d})$$
: $k_p = \frac{e - \sqrt{(1-p)(e^2 - d^2)}}{\sqrt{(e^2 + d^2)/6}}$ (6.25)

• Ορθογώνια:
$$k_p = \sqrt{3}p$$
 (6.26)

• Τριγωνική:
$$k_p = \sqrt{6} \left(1 - \sqrt{1 - p} \right)$$
 (6.27)

Για την εύρεση της αβεβαιότητας στις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις πρέπει να γίνει ανάλυση του ισοδυνάμου κυκλώματος και εύρεση των συνιστωσών που συνεισφέρουν σε αυτή. Στα Σχήματα 6.19 και 6.20 δίνονται, η αναπαράσταση της

μετρητικής διάταξης και το ηλεκτρικό ισοδύναμο αυτής για τη dc συνιστώσα αντίστοιχα.



Σχήμα 6.19: Μετρητική διάταξη του ρεύματος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση



Σχήμα 6.20:Ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα ρεύματος και του παλμογράφου για την dc συνιστώσα

Στο Σχήμα 6.20 οι R_{L} , R_{b} είναι οι αντιστάσεις του μετατροπέα ρεύματος (Current transducer) και η Z_{o} αντίσταση εισόδου του μετρητικού συστήματος. Τα ρεύματα I_{i} και I_{o} αποτελούν το ρεύμα εισόδου και εξόδου του συστήματος. Αν και το ρεύμα από ηλεκτροστατική εκφόρτιση έχει φάσμα συχνοτήτων μέχρι μερικά GHz θα χρησιμοποιηθεί το απλό ισοδύναμο για την dc συνιστώσα [29]. Το πλάτος του ρεύματος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$I = \frac{CV_R}{Z_o} \tag{6.28}$$

όπου Ι και V_R είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης και η τάση που μετράται από τον παλμογράφο εξαιτίας του ρεύματος εξόδου I_o , αντίστοιχα. Η Z_o έχει ονομαστική τιμή 50Ω. Η σταθερά C, που ονομάζεται παράγοντας μετασχηματισμού ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί από τη Σχέση 6.29 [29].

$$C = C_{CT}C_A \tag{6.29}$$

όπου C_{CT} και C_A είναι οι παράγοντες μετασχηματισμού του μετατροπέα ρεύματος και του εξασθενητή (attenuator).

Υποθέτοντας ότι η φυσικές ποσότητες είναι ασυσχέτιστες η συνολική αβεβαιότητα, u_c για το πλάτος του ρεύματος βάση του τύπου 6.20 είναι [29]:

$$u_{c}(I) = \left[S_{V_{R}}^{2}u_{V_{R}}^{2} + S_{C_{CT}}^{2}u_{C_{T}}^{2} + S_{C_{A}}^{2}u_{C_{A}}^{2} + u_{Display}^{2} + u_{mis}^{2} + u_{Re\,pMeas}^{2} + u_{Cable}^{2} + u_{time}^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(6.30)

όπου S ο συντελεστής ευαισθησίας και υπολογίζεται με χρήση των Σχέσεων 6.28 και 6.29 ως εξής

$$S_{V_R} \equiv \frac{\partial I}{\partial V_R} = \frac{C_{CT}C_A}{Z_o}$$
(6.31)

$$S_{C_{CT}} \equiv \frac{\partial I}{\partial C_{CT}} = \frac{C_A V_R}{Z_o}$$
(6.32)

$$S_{C_A} \equiv \frac{\partial I}{\partial C_A} = \frac{C_{CT} V_R}{Z_o}$$
(6.33)

Για τους άλλους συντελεστές της ισότητας έχουμε.

 u_{v_a} : Η αβεβαιότητα στην ένδειξη της τάσης στον παλμογράφο.

 $u_{c_{ct}}$: Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του παράγοντα μετασχηματισμού του μετατροπέα ρεύματος.

*u*_{*C_A*}: Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του παράγοντα μετασχηματισμού του εξασθενητή.

*u*_{Display}: Η αβεβαιότητα που οφείλεται στην διαφορά μεταξύ της τιμής τάσης που εμφανίζεται στην οθόνη της γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και της πραγματικής τιμής.

*u*_{mis}: Η αβεβαιότητα λόγω σφαλμάτων «κακής προσαρμογής» μεταξύ του καναλιού εισόδου του παλμογράφου και του μετατροπέα ρεύματος.

 $u_{\text{Re pMeas}}$: Η τυπική απόκλιση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων.

 $u_{\it Cable}$: Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την σύνδεση καλωδίου και αντάπτορα.

 u_{time} : Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ανακρίβεια της μέτρησης του διαφορικού χρόνου του παλμογράφου. Ο παράγοντας αυτός λαμβάνεται υπόψη μόνο στους υπολογισμούς για το I_{30} και I_{60} .

Στις αβεβαιότητες τύπου Α ανήκουν οι αβεβαιότητες $u_{\text{ReapMeas}}, u_{\text{Cable}}$ και u_{time} , ενώ στις αβεβαιότητες τύπου Β ανήκουν οι υπόλοιπες. Οι αβεβαιότητες $u_{C_{ct}}, u_{C_A}, u_{\text{Cable}}, u_{\text{RepMeas}}$ και u_{time} υπολογίζονται πειραματικά, ενώ οι λοιπές εκτιμούνται από τις προδιαγραφές των κατασκευαστών.

6.7.1 Υπολογισμός παραμέτρων

Για τους υπολογισμούς των παραμέτρων έχουμε:

1. $u_{\text{Re pMeas}}$: Ο υπολογισμός γίνεται διαιρώντας την τυπική απόκλιση του

δείγματος με την ρίζα του πληθυσμού, δηλαδή $u_{\text{Re pMeas}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$ (6.34)

- *u_{cable}* : Η τιμή του για ημι-άκαμπτο καλώδιο βρέθηκε από την υπάρχουσα βιβλιογραφία ίση με 2,31*10⁻³ [29].
- 3. u_{time} : Για τον υπολογισμό αυτής της αβεβαιότητα πρέπει για δέκα μετρήσεις να υπολογιστούν οι διαφορές I_{30} με $I_{30,2}$ και I_{60} με $I_{60,2}$ αφού η δειγματοληψία γίνεται ανά 0,1 ns. Από το μέσο όρο των δέκα μετρήσεων προκύπτουν οι $u_{time}(I_{30ns})$ και $u_{time}(I_{60ns})$ για τις τρεις περιπτώσεις στήριξης του στόχου.

I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)	I _{30.2} (A)	I _{60.2} (A)	$U_{time30} = I_{30.2} - I_{30} $	$U_{time60} = I_{60.2} - I_{60} $
7,521	5,789	6,908	5,317	0,613	0,472
7,263	5,852	6,667	5,178	0,596	0,674
7,301	5,135	6,780	6,013	0,521	0,878
7,028	5,665	6,575	5,514	0,453	0,151
7,341	5,674	6,569	5,107	0,772	0,567
7,206	5,592	6,620	5,175	0,586	0,417
7,127	5,539	6,802	5,466	0,325	0,073
6,962	5,791	7,058	5,202	0,096	0,589
7,012	5,208	6,637	5,618	0,375	0,410
7,025	6,049	6,453	5,420	0,572	0,629
Average				0,472	0,228

Πίνακας 6.28:Εύρεση u_{time30} και u_{time60} για στήριξη σε μεταλλική πλάκα 1,5x1,5 m^2

I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)	I _{30.2} (A)	I _{60.2} (A)	$U_{time30} = I_{30.2} - I_{30} $	$U_{time60} = I_{60.2} - I_{60} $
6,739	4,912	6,923	4,770	0,184	0,142
6,510	4,873	6,801	4,677	0,291	0,196
6,667	4,973	6,668	5,044	0,001	0,071
7,002	5,203	6,601	5,003	0,401	0,200
6,640	4,955	6,396	4,878	0,244	0,077
6,983	4,972	6,755	4,789	0,228	0,183
6,485	4,721	6,544	4,739	0,059	0,018
6,755	4,680	6,857	5,019	0,102	0,339
6,497	5,004	6,865	5,012	0,368	0,008
6,652	5,001	6,776	4,915	0,124	0,086
Average				0,200	0,132

Πίνακας 6.29:Εύρεση u_{time30} και u_{time60} για στήριζη σε μεταλλική πλάκα $lx lm^2$

I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)	I _{30.2} (A)	I _{60.2} (A)	$U_{time30} = I_{30.2} - I_{30} $	$U_{time60} = I_{60.2} - I_{60} $
5,282	5,700	5,455	5,882	0,173	0,182
5,798	5,720	5,842	5,743	0,044	0,023
5,544	5,772	5,736	5,856	0,192	0,084
6,096	5,424	6,348	5,628	0,252	0,204
5,962	5,722	6,082	5,623	0,120	0,099
6,151	5,489	6,060	5,489	0,091	0
5,700	5,856	5,856	5,736	0,156	0,120
5,129	5,714	5,220	5,834	0,091	0,120
5,232	5,940	5,340	5,940	0,108	0
5,488	6,064	5,368	6,032	0,120	0,032
Average				0,135	0,086

Πίνακας 6.30:Εύρεση $u_{time_{30}}$ και $u_{time_{60}}$ για στήριξη σε ζύλινη βάση

I ₃₀ (A)	I ₆₀ (A)	I _{30.2} (A)	I _{60.2} (A)	$U_{time30} = I_{30.2} - I_{30} $	$U_{time60} = I_{60.2} - I_{60} $
5,069	5,301	4,970	5,419	0,099	0,118
5,160	5,682	5,122	5,518	0,038	0,164
5,432	5,616	5,344	5,640	0,088	0,024
5,431	5,289	5,351	5,369	0,080	0,080
5,254	5,480	5,240	5,574	0,014	0,094
5,054	5,480	4,974	5,426	0,080	0,054
5,020	5,480	4,800	5,520	0,220	0,040
5,067	5,627	5,000	5,493	0,067	0,134
5,342	5,499	5,160	5,499	0,182	0
5,005	5,640	5,074	5,566	0,069	0,074
Average				0,094	0,078

Πίνακας 6.31:Εύρεση u_{time30} και u_{time60} για στήριζη σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου

Aπό τα παραπάνω προκύπτουν οι αβεβαιότητες $u_{time 30(metal)} = 2*10^{-1}$ και $u_{time 60(metal)} = 1,32*10^{-1}$ για στήριξη σε μεταλλική πλάκα $1 \times 1 \text{m}^2$,

 $u_{time30(metal)} = 4,72*10^{-1}$ και $u_{time60(metal)} = 2,28*10^{-1}$ για στήριξη σε μεταλλική πλάκα 1,5x1,5m², $u_{time30(wood)} = 1,35*10^{-1}$ και $u_{time60(woodl)} = 8,6*10^{-2}$ για στήριξη σε ξύλινη βάση και τέλος $u_{time30(metal)} = 9,5*10^{-2}$ και $u_{time60(metal)} = 7,8*10^{-2}$ για στήριξη σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου.

4. u_{V_R} : О катабкевабтіς тов ладиоура́фов оріζει την ακρίβεια στη μέτρηση та́бης στο 1,5 %. Ефо́бов он лара́μεтрон I_p, I₃₀, I₆₀ μετρώνται ало́ την ίδια ка́θε фора́ квµатоµорфі η αβεβαιότητα θα είναι ίδια και για τις τρεις. Ката́ την πραγµατοποίηση των μετρήσεων χρησιµοποιήθηκαν οριζόντιες αναλύσεις ало́ 200 mV/div έως 1 V/div. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα προκύπτει για 1V/div και άρα θα χρησιµοποιηθεί αυτή η τιµή. Θεωρούµε επίσης ότι έχουµε ορθογώνια κατανοµή κατά την μέτρηση ενδείξεων τάσης από τον παλµογράφο. Τέλος ο παλµογράφος που χρησιµοποιήθηκε έχει οθόνη που χωρίζεται σε οκτώ υποδιαιρέσεις (divisions). Έτσι προκύπτει ότι η αβεβαιότητα είναι : $u_{V_R} = \frac{1}{\sqrt{3}} (1V/div * 8div * 0.015) = 6,92 * 10^{-2}$

5.
$$u_{CT}$$
: Για τον μετατροπέα ρεύματος έχουμε R_L=2,018Ω και R_b=48,964Ω άρα
 $C_{CT} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L} = \frac{2,005 + 48,246 + 50}{2.005} = 50,0004 \approx 50$. Ανατρέχοντας
στην υπάρχουσα βιβλιογραφία σε περιπτώσεις για τον ίδιο στόχο [29], η
αβεβαιότητα είναι: $u_{CT} = 3,1*10^{-4}$.

6. u_{C_A} : Για τους εξασθενητές δεν υπάρχουν τα στοιχεία της κατασκευάστριας εταιρίας. Ωστόσο από παρόμοιους εξασθενητές των 20db βρέθηκε αβεβαιότητα $u_{C_A} = 1,51*10^{-3}$. Επίσης

$$20db = 20\log_{10}(\frac{output}{input}) \Longrightarrow 1 = \log_{10}(\frac{output}{input}) \Longrightarrow C_{A} = 10 .$$

7. u_{Display} : Η ψηφιακή οθόνη της γεννήτριας δείχνει την εκάστοτε τάση εκφόρτισης της. Ανατρέχοντας στα φυλλάδια του κατασκευαστή βρίσκουμε ότι ορίζεται η σχετική αβεβαιότητα για την ένδειξη της γεννήτριας u^{re}_{Display} ίση

με $u_{Display}^{re} = 5,5*10^{-4}$ [32]. Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τον εξής τύπο:

$$u_{Display} = u_{Display}^{re} * I \tag{6.35}$$

Επειδή θέλουμε την αβεβαιότητα για σύνολο μετρήσεων και όχι για μια μόνο μέτρηση θα χρησιμοποιήσουμε την μέση τιμή του ρεύματος στο εκάστοτε σύνολο.

8. u_{mis} : Από την υπάρχουσα βιβλιογραφία [29] βρίσκουμε ότι μια ενδεικτική τιμή για την σχετική αβεβαιότητα είναι $u_{mis}^{re} = 8,54*10^{-3}$. Η αβεβαιότητα δίνεται όπως και παραπάνω από τη Σχέση 6.35

Για τις ευαισθησίες έχουμε :

$$S_{V_R} = \frac{C_{CT}C_A}{Z_o} \approx \frac{50*10}{50} = 10$$

$$S_{C_{CT}} = \frac{C_A V_R}{Z_o} \stackrel{(6.28)}{=} \frac{C_A I Z_o}{Z_o C} \stackrel{(6.29)}{=} \frac{C_A I}{C_{CT} C_A} = \frac{I}{C_{CT}} = \frac{I}{50}$$

$$S_{C_A} = \frac{C_{CT}V_R}{Z_o} \stackrel{(6.28)}{=} \frac{C_{CT} I Z_o}{Z_o C} \stackrel{(6.29)}{=} \frac{C_{CT} I}{C_{CT} C_A} = \frac{I}{C_A} = \frac{I}{10}$$

Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει την αβεβαιότητα για κάθε εκφόρτιση επαφής αντικαθιστώντας στη Σχέση 6.30 τις Σχέσεις 6.31 έως 6.35. Η αβεβαιότητα για τις εκφορτίσεις αέρος δεν μπορεί να υπολογιστεί εξαιτίας του ηλεκτρικού τόξου το οποίο αναπτύσσεται σε διαφορετική κάθε φορά θέση και απόσταση. Δεν είναι δυνατό να ισχυριστούμε ότι εκτελέσαμε με τον ίδιο τρόπο δύο ηλεκτροστατικές εκκενώσεις αέρος και επομένως δεν μπορεί να εφαρμοστεί η παραπάνω ανάλυση.

	I _{max} (A)	$I_{30}(A)$	I ₆₀ (A)
metal 1,5x1,5 +4 kV	0,707309	0,720735	0,732707
metal 1,5x1,5 -4 kV	0,708198	0,721332	0,732325
metal 1x1 +4 kV	0,709665	0,723471	0,707528
metal 1x1 -4 kV	0,707022	0,723447	0,710875
wall +4 kV	0,710458	0,70043	0,698503
wall -4 kV	0,708279	0,703842	0,700474
wood +4 kV	0,698972	0,712493	0,700006
wood -4 kV	0,700357	0,707291	0,698914

Πίνακας 6.32: Αβεβαιότητα μετρήσεων για διάφορα υλικά στήριζης του στόχου

6.8 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που ακολουθούν προέρχονται από την επεξεργασία των δεδομένων στις ενότητες 6.4 και 6.5

- Imax: Από το Σχήμα 6.14 προκύπτει ότι για θετικές εκφορτίσεις επαφής το μέγιστο ρεύμα προέρχεται από εκφορτίσεις που γίνονται με το στόχο στερεωμένο σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου. Όταν ο στόχος βρίσκεται στην μεταλλική πλάκα έχουμε περίπου τα ίδια αποτελέσματα ως προς το μέγιστο του ρεύματος. Η μεγάλη διαφορά παρουσιάζεται όταν χρησιμοποιείται η ξύλινη βάση, όπου και εμφανίζεται μείωση του ρεύματος κορυφής. Από το Σχήμα 6.15 προκύπτει ότι τα μέγιστα αρνητικά ρεύματα εκφόρτισης δημιουργούνται όταν ο στόχος είναι στη μεταλλική βάση. Οι τιμές για εκφορτίσεις σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου είναι κατάτι μικρότερες. Η ξύλινη βάση είναι αυτή που επηρεάζει και πάλι το μέγιστο ρεύμα και συγκεκριμένα συνεισφέρει στη μείωση του. Από το Σχήμα 6.16 προκύπτει ότι κατά τις εκφορτίσεις αέρος η ξύλινη βάση δεν προκαλεί την ίδια μείωση στο μέγιστο ρεύμα όπως στις εκφορτίσεις επαφής. Λογική απόρροια της παραπάνω πρότασης είναι η ακόλουθη υπόθεση «Στις εκφορτίσεις επαφής το υλικό στήριξης του στόχου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μέγιστο ρεύμα, ενώ στις εκφορτίσεις αέρος το υλικό στήριξης είναι ήσσονος σημασίας για την διαμόρφωση του μέγιστου ρεύματος». Το Σχήμα 6.17 είναι ενδεικτικό για την τυχαιότητα που παρουσιάζουν οι εκφορτίσεις αέρος. Οι εκφορτίσεις παρουσιάζουν μια ιδιαίτερη αυξομείωση που μπορεί να δικαιολογηθεί από την τυχαιότητα εκδήλωσης του ηλεκτρικού τόξου ή από άλλους παράγοντες, όπως την αλλαγή των συνθηκών του πειράματος. Δεν είναι ασφαλές να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το μέγιστο ρεύμα για μεταλλική βάση στήριξης είναι μικρότερο από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Δεδομένου ότι, όπως θα δειχθεί και παρακάτω, η γεννήτρια εκφορτίσεων λειτουργεί συμμετρικά για θετικές και αρνητικές εκφορτίσεις το Σχήμα 6.16 καταρρίπτει μια τέτοια υπόθεση αφού στις θετικές εκφορτίσεις δεν παρουσιάζεται μια παρόμοια συμπεριφορά.
- Ι₃₀: Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.14 έως 6.17 βλέπουμε ότι Ι₃₀ παρουσιάζει μια σταθερή συμπεριφορά ως προς τα υλικά στήριξης του στόχου. Ανεξάρτητα από τον τύπο της εκφόρτισης (επαφής, αέρος, θετική, αρνητική)

η μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζεται στην περίπτωση της μεταλλικής βάσης και η μικρότερη στην περίπτωση της μεταλλικής πλάκας στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου.

- Ι₆₀: Παρατηρώντας τα Σχήματα 6.14 έως 6.17 βλέπουμε ότι Ι₆₀ παρουσιάζει μια παρόμοια με το Ι₃₀ συμπεριφορά. Εκτός από την περίπτωση των θετικών εκφορτίσεων επαφής, όπου παρατηρείται μια μικρή διαφοροποίηση, η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στην περίπτωση της μεταλλικής πλάκας στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου και η μικρότερη στην περίπτωση της ξύλινης βάσης. Το Ι₆₀ εξαρτάται επίσης από τη θέση, το μήκος και το σχήμα του καλωδίου γείωσης [14].
- t_r: Το πρώτο συμπέρασμα από το Σχήμα 6.18 είναι ότι ο χρόνος ανόδου για τις εκφορτίσεις επαφής είναι μεγαλύτερος από ότι για τις εκφορτίσεις αέρος. Το δεύτερο είναι ότι ο χρόνος ανόδου είναι μεγαλύτερος όταν ο στόχος είναι στο γειωμένο πίνακα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου, ενώ είναι ίδιος περίπου για τις δυο άλλες περιπτώσεις. Τέλος, ο χρόνος ανόδου στις θετικές εκφορτίσεις επαφής, για κάθε ένα από τα υλικά στήριξής, είναι ίδιος περίπου και για τις αρνητικές εκφορτίσεις επαφής. Αυτή η ισότητα δεν ισχύει στην περίπτωση των εκφορτίσεων αέρος.
- Στο Πίνακα 6.15 φαίνεται κατά πόσο οι εκφορτίσεις, ανάλογα με το υλικό στήριξης του στόχου, ικανοποιούν το διεθνές Πρότυπο. Οι μετρήσεις που έγιναν με τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης πάνω στις μεταλλικές βάσεις είναι σύμφωνες σε μεγάλο βαθμό με τις τιμές που ορίζει το Πρότυπο για τις τέσσερις παραμέτρους. Μια μικρή απόκλιση παρουσιάζεται για το I₆₀, η οποία όμως μπορεί να δικαιολογηθεί από την εξάρτηση της παραμέτρου αυτής από το σχήμα του καλωδίου γείωσης που όπως είναι κατανοητό δεν μπορεί να είναι το ίδιο σε κάθε μέτρηση. Τέλος οι μετρήσεις που έγιναν με το πρότυπο σε σχέση με τις μετρήσεις για το στόχο στο γειωμένο πίνακα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της μεταλλικής βάσης 1 x 1 m², η τιμή του χρόνου ανόδου t_r αν και δεν είναι μέσα στα περιθώρια που θέτει το Πρότυπο τα πλησιάζει. Ο ίδιος πίνακας δίνει στοιχεία για την σχέση θετικών και αρνητικών εκφορτίσεων.

 m^2 έχουμε τις τρεις παραμέτρους που αφορούν πλάτος να είναι μεγαλύτερες για αρνητικές εκφορτίσεις. Όπως θα διατυπωθεί και παρακάτω μεγαλύτερο I_{max} συνεπάγεται γενικά μικρότερο t_r. Βλέποντας ότι η παράμετρος t_r είναι μικρότερη για τις αρνητικές εκφορτίσεις μπορούμε να πούμε ότι οι αρνητικές εκφορτίσεις είναι πιο ισχυρές από τις θετικές. Για εκφορτίσεις σε μεταλλική πλάκα στον τοίχο του ανηχωϊκού θαλάμου υπερισχύουν οι θετικές εκφορτίσεις, σε μικρότερο βαθμό όμως σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Τέλος για την περίπτωση της ξύλινης βάσης δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ανάλογο συμπέρασμα αφού οι τιμές των μεγίστων των παραμέτρων παρουσιάζονται άλλοτε για θετικές και άλλοτε για αρνητικές εκφορτίσεις.

- Από τον Πίνακα 6.17 βλέπουμε ότι τα διαστήματα, μέσα στα οποία θα βρίσκεται με πιθανότητα 95% η μέση τιμή κάθε παραμέτρου ενός δείγματος, είναι σχετικά μικρά και άρα αποτελούν μια καλή πρόβλεψη για μελλοντικές επαναλήψεις του πειράματος. Το μεγαλύτερο εύρος διαστημάτων παρουσιάζεται στο μέγιστο του ρεύματος κάθε κυματομορφής. Έτσι το I_{max} είναι η πιο ευμετάβλητη από τις τέσσερις παραμέτρους πράγμα που δείχνει ότι μια αλλαγή στον τρόπο εκτέλεσης του πειράματος ή των συνθηκών που υπάρχουν επηρεάζει κατά κύριο λόγο το I_{max}.
- Το κύριο συμπέρασμα από τον Πίνακα 6.18 είναι ότι οι παράμετροι που μετράμε είναι παραπλήσιες τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές εκφορτίσεις. Βλέπουμε ότι η διαφορά των μέσων όρων τείνει προς το μηδέν πράγμα που επιβεβαιώνει ότι η γεννήτρια δίνει σχεδόν συμμετρικές θετικές και αρνητικές κυματομορφές. Βέβαια οι όποιες διαφορές παρατηρούνται για τις τιμές των παραμέτρων αυτών σε αρνητικές ή θετικές εκφορτίσεις έχει να κάνει με την επαναληψιμότητα των εκφορτίσεων που δεν ίδια και την επαναληψιμότητα της γεννήτριας. Το ιδιαίτερα μεγάλο διάστημα στην περίπτωση της ξύλινης βάσης δεν αντιβαίνει σε όσα αναφέρθησαν παραπάνω. Επειδή το I₆₀ δεν εξαρτάται μόνο από την γεννήτρια, αλλά όπως διατυπώθηκε παραπάνω και από τη θέση, το μήκος και το σχήμα του καλωδίου γείωσης είναι πιθανό η μεταβολή κάποιων από αυτά κατά την διεξαγωγή της μιας ή της άλλης ομάδας μετρήσεων (θετικές ή αρνητικές) να προκάλεσε αυτή την απόκλιση.

- Ο Πίνακας 6.24 περιέχει εκτιμήσεις για την τυπική απόκλιση των δειγμάτων.
 Τα διαστήματα είναι ευρύτερα στην περίπτωση του I_{max}. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η πιο ευμετάβλητη παράμετρος είναι το I_{max}.
- Οι Πίνακες 6.25, 6.26, 6.27 δείχνουν το διαχωρισμό των μετρήσεων σε δύο ομάδες των δέκα ανάλογα με το αν μια μέτρηση έχει υψηλή ή χαμηλή τιμή σε μια μέτρηση. Παρατηρούμε ότι σε κάθε τύπο εκφόρτιση τα σύνολα του I_{max} και του t_r είναι σχεδόν συμπληρωματικά, κάτι που υποδηλώνει ότι γενικά ότι αν μια μέτρηση έχει υψηλό I_{max} θα έχει μικρό χρόνο ανόδου t_r. Εξετάζοντας τα αρχεία των μετρήσεων παρατηρούμε ότι οι τιμές που παίρνουν οι διάφορες παράμετροι δεν έχουν τιμές σε όλη την περιοχή τιμών από το μέγιστο μέχρι το ελάχιστο, αλλά σε κάποιες περιοχές του φάσματος. Γενικά είναι πολύ δύσκολο να εξαχθούν κάποια άλλα συμπεράσματα για τις εκφορτίσεις αέρος.
- Από τον Πίνακα 6.32 βλέπουμε ότι η αβεβαιότητα για τις τρεις παραμέτρους που αφορούν το ρεύμα εκφόρτισεις έχει παραπλήσιες τιμές. Στην περίπτωση του μέγιστου ρεύματος η τιμή αυτή είναι σχετικά μικρή εν αντιθέσει με τα I₃₀ και I₆₀ που η τιμή είναι σχετικά μεγάλη. Οι τρεις συνιστώσες που διαμορφώνουν σε μεγαλύτερο βαθμό την αβεβαιότητα είναι οι u_{V_R}, u_{time} και u_{mis}.
- Τα στατιστικά τεστ που έγιναν δείχνουν ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων που θα γίνουν μελλοντικά, μπορούν να προσδιοριστούν σε κάποια διαστήματα μικρού εύρους τιμών με μεγάλη πιθανότητα (95%). Γενικά το πείραμα παρουσιάζει, όσον αφορά τις εκφορτίσεις επαφής, μεγάλη σταθερότητα.

Κεφάλαιο 7

Προσομοίωση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μέσω του προγράμματος Spice

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία προσομοίωση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με τη βοήθεια του προγράμματος Spice, σύμφωνα με το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model).Επίσης καταδεικνύεται η συνεισφορά κάθε τμήματος του ανθρωπίνου σώματος στο συνολικό ρεύμα εκφόρτισης βάσει κυκλωματικής προσομοίωσης.

7.2 Εύρεση παραμέτρων ανθρωπίνου σώματος

Για να είναι εφικτή η εύρεση του ηλεκτρικού μοντέλου που θα αναπαριστά το ανθρώπινο σώμα είναι απαραίτητη η γνώση για την ηλεκτρική συμπεριφορά κάθε μέρους του. Το ανθρώπινο σώμα χωρίζεται σε οκτώ βιολογικά τμήματα. Αυτά είναι:

- 1. Κεφαλή
- 2. Στήθος
- 3. Κοιλιακή χώρα
- 4. Πήχης (τμήμα του χεριού από τον καρπό έως τον αγκώνα)
- 5. Βραχίονας (τμήμα του χεριού από τον αγκώνα έως την ωμοπλάτη)
- 6. Μηρός (τμήμα του ποδιού από την μέση έως το γόνατο)
- 7. Κνήμη (τμήμα του ποδιού από το γόνατο έως τον αστράγαλο)
- 8. Πέλμα

Προφανώς τα τμήματα 4 έως 8 θα παρουσιάζονται δύο φορές σε κάθε ηλεκτρικό μοντέλο λόγο της συμμετρίας. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων κάθε τμήματος πρέπει να γίνουν κάποιες παραδοχές, ώστε να είναι δυνατή η εύρεση της ζητούμενης τιμής. Οι παραδοχές αυτές βασίζονται σε ηλεκτρολογικές, βιολογικές και ιατρικές παρατηρήσεις [33].

 Κάθε βιολογικό στοιχείο θεωρείται ομογενές και ισοτροπικό. Για ένα φάσμα συχνοτήτων από 0,05 έως 1 GHz το βάθος διείσδυσης δεν υπερβαίνει στην τάξη μεγέθους τα μερικά εκατοστά. Παρόλα αυτά το δέρμα, ο εσωτερικός λιπώδης ιστός, οι μύες και οι επιφάνειες από τα κόκαλα θα θεωρούνται ως ένα και θα χαρακτηρίζονται από μία συγκεντρωτική ισοδύναμη μέση τιμή. Για την αντίσταση υψηλής συχνότητας R_i, σαν συνάρτηση της DC αντίστασης ισχύει η σχέση:

$$R_i \approx R_{oi} r_{oi} / 2\delta_i \tag{7.1}$$

Η DC αντίσταση δίνεται από τον την ακόλουθη σχέση $R_{oi} = l_i / [\sigma_i \pi r_{oi}^2]$ (7.2)

όπου l_i και r_{oi} , το μήκος και η ακτίνα του κυλίνδρου που αναπαριστά το ανατομικό στοιχείο i. Για τον συντελεστή διείσδυσης ισχύει:

$$\delta_i = \frac{1}{\sqrt{(\pi f \sigma_i \mu_o)}} \tag{7.3}$$

όπου f είναι η συχνότητα, σ_i η ισοδύναμη αγωγιμότητα και μ_o η διαπερατότητα του κενού. Κάνοντας χρήση των Σχέσεων 7.1, 7.2, 7.3 έχουμε την τελική σχέση για την αντίσταση του βιολογικού στοιχείου:

$$R_i = \frac{l_i}{2r_{oi}} \sqrt{\frac{f\mu_o}{\pi\sigma_i}}$$
(7.4)

• Οι αμοιβαίες επαγωγές και αυτεπαγωγές που σχετίζονται με το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει εκτός του κάθε στοιχείου αποτελούν όρους δευτέρας τάξης. Για αυτό ο όρος L_i , που αποτελεί την επαγωγή του στοιχείου i, σχετίζεται μόνο με το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο και συσχετίζεται με την αντίσταση του στοιχείου με την εξής σχέση: $L_i \approx R_i / \omega$ (7.5)

όπου, $ω = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα. Τελικά από τις Σχέσεις 7.4, 7.5

$$L_i = \frac{l_i}{2\pi r_{oi}} \sqrt{\frac{\mu_o}{\pi \sigma_i}}$$
(7.6)

 Η παραπάνω περιγραφή για την επαγωγή δεν χρησιμοποιείται για τα κάτω άκρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η ροή του ρεύματος συγκεντρώνεται σε επιφανειακές στενές ζώνες κατά μήκος των ποδιών. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί στην ακόλουθη σχέση:

$$L_{i} = \frac{k_{i}l_{i}^{2}}{c^{2}} \frac{2}{C_{eqi}}$$
(7.7)

Η παραπάνω σχέση είναι σύμφωνη με τον νόμο διάδοσης των κυμάτων με την ταχύτητα του φωτός c. Αντίθετα με την Σχέση 7.6, εδώ ο όρος L_i αποτελεί την εξωτερική επαγωγή του στοιχείου i. Η εσωτερική επαγωγή αγνοείται εξαιτίας των μικρών εγκάρσιων διαστάσεων των τμημάτων που είναι υπεύθυνα για την μεταφορά του ρεύματος. Ο παράγοντας $k_i \ge 1$ είναι αδιάστατος και χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπ'όψην η πυκνότητα κατανομής του ρεύματος. Για $k_i = 1$, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα κατά μήκος της επιφάνειας του στοιχείου i με χωρητικότητα C_{eqi} . Μια συνηθισμένη τιμή για την σταθερά είναι $k_i = 3$.

Τόσο η αντίσταση R_i, όσο και η επαγωγή L_i (που αφορά τα πάνω μέρη του σώματος) είναι συναρτήσεις του βάθους διείσδυσης. Αυτό σημαίνει ότι οι παραπάνω ποσότητες υπακούουν σε μη γραμμικούς νόμους. Για είναι δυνατόν να επιτευχθούν οι υπολογισμοί και να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα, οι παράμετροι θεωρούνται ανεξάρτητες από τη συχνότητα και υπολογίζονται για συχνότητα f = 400MHz.

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

Οι ευρισκόμενες τιμές για τις παραμέτρους συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1

Πίνακας 7.1:Ηλεκτρικές παράμετροι ανθρωπίνου σώματος [33]

Στον πίνακα δεν περιλαμβάνονται οι τιμές για το πέλμα, το οποίο μοντελοποιείται μόνο με τη χρήση αντίστασης και χωρητικότητας. Συγκεκριμένα ισχύει $R_o = 100M\Omega$ και $C_o = 50 pF$. Αξίζει να σημειωθεί η διαφορά που παρουσιάζουν στην τιμή της επαγωγής η κνήμη και ο μηρός εν συγκρίσει με τα άλλα μέλη του σώματος. Η διαφορά είναι δύο τάξεις μεγέθους και οφείλεται στο ότι ο υπολογισμός για τα δύο αυτά στοιχεία γίνεται με χρήση της Σχέσης 7.7. Συνέπεια αυτής της διαφοράς είναι ότι τα μέλη του σώματος πάνω από τους μηρούς είναι υπεύθυνα για την μορφή του μετώπου της κυματομορφής ενώ τα κατώτερα μέλη είναι υπεύθυνα για την μορφή της ουράς της κυματομορφής ρεύματος, εξαιτίας της μεγάλης επαγωγής που παρουσιάζουν.

7.3 Ισοδύναμο κύκλωμα εκφόρτισης

Για να είναι δυνατή η σωστή προσομοίωση της εκφόρτισης πρέπει να κατασκευάσουμε ένα όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Το κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη προσομοίωση δίνεται στο Σχήμα 7.1 που ακολουθεί. Η τάση που αναπτύσσεται στα πέλματα του ατόμου, συνήθως μέσω τριβής, είναι υπεύθυνη για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση που θα συμβεί. Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας εκφόρτισης αφορά την φόρτιση των πυκνωτών. Αφού φορτιστούν οι πυκνωτές, στο δεύτερο στάδιο αυτοί εκφορτίζονται και δίνουν αθροιστικά το ρεύμα εκφόρτισης. Η εκφόρτιση μπορεί να συμβεί από οποιαδήποτε σημείο του σώματος. Συνήθως τα άνω άκρα είναι τα πιο πιθανά για να κλείσει το κύκλωμα και να υπάρξει ρεύμα. Το κύκλωμα που θα εξεταστεί αφορά όρθιο άτομο και εκφόρτιση μέσω της παλάμης του, θεωρώντας ότι έχει έρθει σε επαφή με γειωμένο αντικείμενο. Οι διακόπτες που εμφανίζονται πριν από τις πηγές τάσης φροντίζουν ώστε, κατά την διάρκεια της εκφόρτισης αλλά και μετά να μην επιβάλλεται η συνεχής τάση. Η τάση είναι υπεύθυνη για την φόρτιση των πυκνωτών και όχι για την παροχή ισχύος κατά την διάρκεια της εκφόρτισης. Η εικόνα του σχήματος έχει παρθεί από το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος SPICE με το οποίο έγινε η προσομοίωση.



Σχήμα 7.1:Κυκλωματικό ισοδύναμο ανθρωπίνου σώματος [33]

7.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφορούν τα ρεύματα που διαρρέουν κάθε τμήμα του ανθρωπίνου σώματος. Η τιμή της τάσης φόρτισης στο Σχήμα 7.1 δεν επηρεάζει την μορφή των κυματομορφών ρεύματος αλλά μόνο την μέγιστη τιμή των κυκλοφορούντων ρευμάτων. Η εξάρτηση αυτή είναι γραμμική και οφείλεται στην γραμμική σχέση που συνδέει το φορτίο των πυκνωτών με την τάση φόρτισης τους: $Q = C \cdot V$ (7.8)

καθώς επίσης και στην γραμμική συμπεριφορά των στοιχείων του RLC κυκλώματος για συνεχή τάση.

Για να είναι κατανοητή κάθε αναφορά σε ρεύματα εκφόρτισης και συνεισφορά των μελών του ανθρωπίνου σώματος στο συνολικό ρεύμα παρατίθεται το Σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2:Ονομασία ρευμάτων που διαρρέουν το σώμα κατά την διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Από το Σχήμα 7.2 είναι προφανές ότι το αναφερόμενο και ως ρεύμα εκφόρτισης είναι το ρεύμα I_7 .



Σχήμα 7.3: Ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτιση
ς I_7 ανθρωπίνου σώματος για τάση +5kV



Σχήμα 7.4:Συνεισφορά πυκνωτή C₇ στο συνολικό ρεύμα

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζεται η συνεισφορά του πυκνωτή C_7 στο συνολικό ρεύμα. Το ρεύμα του πυκνωτή (πράσινο χρώμα) αθροιζόμενο με το ρεύμα του υπολοίπου κυκλώματος (μπλε) μας δίνει το συνολικό ρεύμα (κόκκινο). Παρατηρούμε ότι η πρώτη αιχμή του ρεύματος εκφόρτισης, η οποία ορίζει και τον χρόνο ανόδου t_r , οφείλεται στον πυκνωτή C_7 . Το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η χωρητικότητα που βρίσκεται εγγύτερα στο σημείο εκφόρτισης είναι αυτή που καθορίζει το μέτωπο του ρεύματος και κατά συνέπεια μείωση της χωρητικότητας του συνεπάγεται μείωση του μέγιστου ρεύματος αλλά και της μέγιστης τιμής της παραγώγου αυτού.



Σχήμα 7.5:Συνεισφορά κάτω άκρων στο συνολικό ρεύμα

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η συνεισφορά των κάτω άκρων στο συνολικό ρεύμα. Το ρεύμα στον κόμβο που ενώνονται οι αντιστάσεις R_3 , R_4 (μπλε χρώμα) αποτελεί την συνεισφορά των κάτω άκρων στο συνολικό ρεύμα. Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του ρεύματος από τα 10 ns της εκφόρτισης και μετά, η οποία ορίζει και τις παραμέτρους I₃₀ και I₆₀, καθορίζεται από τα κάτω άκρα. Αυτό οφείλεται στις υψηλές τιμές που έχουν οι χωρητικότητες των κάτω άκρων όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 7.1 και από την τιμή των 50 pF που δίνεται για την C_{o} .

Στο Σχήμα 7.6 που ακολουθεί φαίνεται η συνεισφορά των πυκνωτών του ανώτερου τμήματος του ανθρωπίνου σώματος (κεφάλι, χέρια, στήθος, κοιλιακή χώρα). Όπως γίνεται εμφανές ο πυκνωτής C₁₁ του κεφαλιού, επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό από τους υπόλοιπους πυκνωτές το ρεύμα..



Σχήμα 7.6:Συνεισφορά χωρητικοτήτων του άνω τμήματος του σώματος στο συνολικό ρεύμα εκφόρτισης

7.5 Συμπεράσματα

Η κυματομορφή του Σχήματος 7.3 είναι παραπλήσια με αυτή που ορίζει το Πρότυπο (Σχήμα 2.2). Για την παρούσα κυματομορφή βρέθηκαν I_{max} =14,05 A ($I_{max/kV}$ =2,81 A/kV), t_r=0,3 ns, I_{30} =6,6 ($I_{30/kV}$ =1,32) και I_{60} =4,1 ($I_{60/kV}$ =0,82). Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με αυτές που δίνονται από το Πρότυπο βλέπουμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μια καλή προσέγγιση. Η κυματομορφή που προτείνεται από το Πρότυπο μπορεί να ειπωθεί πως πράγματι αφορά ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου. Δεδομένου ότι τα ευμετάβλητα στοιχεία του κυκλώματος είναι οι χωρητικότητες και όχι οι αντιστάσεις ή οι επαγωγές (εκτός περιπτώσεων ασθενείας του ατόμου) η κυματομορφή του Σχήματος 7.3 μπορεί να χαρακτηρίζει αρκετές περιπτώσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ατόμου, όπως για παράδειγμα καθιστό άτομο, άτομο δίπλα σε τοίχο, άτομο που κρατά αντικείμενο και άλλες. Το γεγονός αυτό συμβαίνει γιατί η αλλαγή των τιμών που έχουν οι χωρητικότητες (μέσα σε ένα λογικό πλαίσιο), επηρεάζει σε μικρό βαθμό την μορφή της κυματομορφής. Συγκεκριμένα η περίπτωση το άτομο να βρίσκεται δίπλα σε τοίχο προκαλεί αλλαγές δευτέρας τάξης στις παραμέτρους του ρεύματος [33]. Ολοκληρώνοντας αξίζει να αναφερθεί ότι η διακοπτική μέθοδος, που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση αυτή είναι ιδανική για αντιμετώπιση εφαρμογών που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα κυρίως γιατί απαιτεί μειωμένη υπολογιστική προσπάθεια- ισχύ για μια λεπτομερή αναπαράσταση της περίπλοκης ηλεκτροστατικής φύσης του ανθρώπου.

Κεφάλαιο 8

Η επόμενη μέρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τη μελέτη του ρεύματος εκφόρτισης, όταν ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης στηριζόταν σε διαφορετικές ως προς το υλικό και τις διαστάσεις βάσεις. Κατόπιν εξετάστηκε αν οι κυματομορφές πληρούν τις προδιαγραφές του Προτύπου και αν όχι, το κατά πόσο αποκλίνουν από αυτό. Εν συνεχεία μελετήθηκε το ρεύμα εκφόρτισης από δύο διαφορετικές γεννήτριες, από όπου παρατηρήθηκε η μεταξύ τους απόκλιση. Επίσης λόγω της μελλοντικής αναθεώρησης του Προτύπου εξετάστηκε και η συμπεριφορά της παραγώγου του ρεύματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία κατέδειξε ότι οι γεννήτριες νεότερης κατασκευής παρουσιάζουν μικρότερες μέγιστες τιμές της παραγώγου του ρεύματος και άρα έχουν ηπιότερη συμπεριφορά απέναντι στα δοκίμια. Από την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της γεννήτριας NSG-438 υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες των παραμέτρων και τα διαστήματα εμπιστοσύνης αυτών, από όπου βρέθηκε ότι οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης ($I_{max}, t_r, I_{30}, I_{60}$) βρίσκονται σε στενότερα όρια από αυτά που ορίζει το Πρότυπο, γεγονός που αποδεικνύει την καλή επαναληψιμότητα της γεννήτριας. Τέλος έγινε κυκλωματική προσομοίωση του μοντέλου του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model) με τη βοήθεια του προγράμματος Spice όπου και διαπιστώθηκε ότι ο χρόνος ανόδου t_r και το μέγιστο ρεύμα I_{max} καθορίζονται από τα ανώτερα μέρη του ανθρωπίνου σώματος (κεφάλι, στήθος, χέρια, κοιλιακή χώρα), ενώ οι παράμετροι που αφορούν την ουρά του ρεύματος (I_{30}, I_{60}) καθορίζονται από τα κάτω άκρα.

Στο μέλλον θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση που έχει η θέση της γειωμένης πλάκας μεταλλικής πλάκας (οριζόντια ή κατακόρυφη). Επίσης χρήσιμο είναι να μελετηθεί η μεταβολή του ρεύματος εκφόρτισης, ανάλογα με τη γεωμετρική θέση του ομοαξονικού προσαρμοστή μέτρησης πάνω στη γειωμένη μεταλλική πλάκα. Το σχήμα του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας (ανοικτός ή κλειστός βρόγχος) είναι μια

παράμετρος η οποία επηρεάζει την ουρά του ρεύματος εκφόρτισης και χρήζει περαιτέρω μελέτης. Το υπάρχον Πρότυπο ορίζει το κύκλωμα καθώς και την κυματομορφή του ρεύματος, που θα πρέπει να παράγουν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Απουσιάζει όμως μια αναλυτική μαθηματική έκφραση για το ρεύμα εκφόρτισης η οποία θα ήταν χρήσιμο να υπάρχει για κυκλωματικές προσομοιώσεις. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης (γενετικοί αλγόριθμοι κ.τ.λ), ώστε να υπολογιστεί με ακρίβεια η εξίσωση που θα περιγράφει το ρεύμα εκφόρτισης.

<u>Βιβλιογραφία</u>

- Paul A. Chatterton Michael A. Houlden, "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [2] Theodore Dangelmayer, "ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control", Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [3] European Standard EN 61000-4-2: "Electromagnetic Compatibility (EMC), Part
 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test Basic Emc Publication", 2001.
- [4] ΕΛΟΤ ΕΝ 61000.06.01: "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και 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: <u>http://www.esdjournal.com/techpapr/sfowler/esd97/esd97.htm</u>.
- [8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, "Dielectric characteristics of materials-Electrostatic Discharge", November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <u>http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf</u>.
- [9] Martin Lutz, "The determination of the immunity to electrostatic discharge 'ESD' with transient 1000 generator", EMC Partner, Seminar 1999.
- [10] IEC 61000-4-2: "Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication", 2001.
- [11] Γεώργιος Π. Φώτης, "Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και ατρωσία εξοπλισμού ισχύος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση", Ενδιάμεση Κρίση του Υποψήφιου Διδάκτορα Γεωργίου Π. Φώτη, Ιούλιος 2004.

- [12] Steve Van den Berghe, Daniël De Zutter, "Study of ESD signal entry through coaxial cable shields", Journal of Electrostatics 44(1998), 10 April 1998.
- [13] Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Tom Van Doren, James L. Drewniak, Ashwin Shashindranath, "Numerical Modeling of Electrostatic Discharge Generators", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no.2, May 2003, pp. 258-271.
- [14] Kurt Hilty, Heinrich Ryser, Ulrich Herrmann "Calibration of Electrostatic Discharge Generators and Results of an International Comparison", IEEE Transactions on Instrumentation and Meusurement, vol 50,no.2, April 2001.
- [15] Osamu Fujiwara, Hideyuki Tanaka, Yukio Yamanaka "Equivalent Circuit Modeling of Discharge Current Injected in Contact with an ESD-gun", Electrical Engineering in Japan, Vol 149, No. 1, 2004.
- [16] P.F. Wilson and M.T. Ma, "Field radiated by electrostatic discharges", IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, Feb. 1991, pp. 10–18.
- [17] Roman Jobara, David Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, Martin Aidam "Computer Simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no.1, February 2000, pp. 54-65.]
- [18] David Pommerenke, Martin Aidam "ESD:Waveform calculation, Field and Current of Human and Simulator ESD", Journal of Electrostatics 38 (1996) 33-51.
- [19] David Pommerenke "ESD:Transient Fields, Arc Simulation and Rise Time limit", Journal of Electrostatics 36 (1995) 31-54.
- [20] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.
- [21] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438, Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.
- [22] Tektronix user manual, CSA7404B, "Communications Signal Analyzers TDS7704B, TDS7404B, TDS 7254B &TDS 7154B", Digital Phosphor Oscilloscopes 071-1226-01.
- [23] Jean Sroka, "Recalculation of the discharge current from the oscilloscope reading applied by the Schaffner Calibration Laboratory in Luterbach", Schaffner's Technical Document.

- [24] John H. Mayer, "Revised waveform drives ESD standards", Test & Measurement World, 2002, διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.reed-electronics.com/tmworld/article/CA197791.html.
- [25] R. Cundru, D. Pommerenke, K. Wang, T. V. Duren, F. P. Centola, J. S. Huang, "Characterization of Human Metal ESD Reference Discharge Event and Correlation of Generator Parameters to Failure Levels –Part I: Reference event", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 46, no. 4, November 2004, pp. 498-594.
- [26] Μανώλης Ε. Μαθιουδάκης, "Μέτρηση, Ποιότητα Μέτρησης και Αβεβαιότητα", Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων, Hellas Lab, Αθήνα 2004.
- [27] "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", International Organization for Standardization (ISO) and the International Committee on Weights and Measures (CIPM): Switzerland, 1993.
- [28] BIMP international vocabulary of basic and general terms in metrology(VIM), Γενέυη1993.
- [29] Tae-Weon Kang, Yeon-Choon Chung, Sung Ho Won, Hyo-Tae Kim, "On the Uncertainty in the Current Waveform Measurement of an ESD Generator", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol 42, no. 4, November 2000.
- [30] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, "Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική", έκδοση 3^η, Αθήνα, Οκτώβριος 1999.
- [31] Gopal.K.Kanji, "100 statistical tests", second edition, February 1999.
- [32] Schaffner: safety for electronic systems Certificate No C040211A.
- [33] Vitantonio Amoruso, Mohamed Helali, Francesco Lattarulo, "An Improved Model of Man for ESD Applications", Journal of Electrostatics 49 (2000) 225-244.