ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ 2014
5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

9 - 10 Μαΐου 2014, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα

Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης - μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από φορτισμένα ανθρώπινα σώματα

Παύλος Σ. Κατσιβέλης, Ιωάννης Α. Σταθόπουλος
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
e-mail: pavlos.katsivelis@gmail.com

Περίληψη

Η διατριβή εστιάζει στη μελέτη του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, στην ανάδειξη των λιγότερο φωτισμένων και φτωχότερα μετρημένων παραμέτρων του, μέσω πειραμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου - γειωμένου μετάλλου, στην κριτική και βελτίωση των μαθηματικών εκφράσεων για το ρεύμα εκφόρτισης, με αναφορά σε πειραματικά δεδομένα, με εφαρμογή μεθόδων, που αναπτύχθηκαν και στη σύνθεση παθητικών κυκλωμάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση, Ρεύμα Ηλεκτροστατικής Εφόρτισης Ανθρώπινου Σώματος, Χρόνος Ανόδου, Παράμετροι Ρεύματος Εκφόρτισης

Abstract

This thesis aims at studying the Electrostatic Discharge current, revealing its less studied aspects and measuring its poorly measured parameters. Real Human-to-Grounded Metal Electrostatic Discharge experiments were carried out to support this goal. The existing mathematical expressions concerning the electrostatic discharge current were then optimized with respect to the real experimental data, using method developed within this thesis. Passive Electrostatic Discharge current generating circuits, were designed, also, on the basis of the experimental findings.

Keywords: Electrostatic Discharge, Human Body Electrostatic Discharge Current, Rise Time, Discharge Current Parameters.

1. Εισαγωγή

Η παγκόσμια συζήτηση γύρω από την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα όπως αυτή εξειδικεύεται στο κομμάτι της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, έχει τη δυνατότητα να αναβαθμιστεί μέσω νέων μελετών σε μετρητική βάση καθώς ολοένα και πιο ακριβής εξοπλισμός με μεγαλύτερο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμος.

Την περίοδο που γράφτηκε η παρούσα διατριβή έγινε δυνατόν να γίνουν μετρήσεις του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που παρέχεται από αιχμηρό μεταλλικό αντικείμενο το οποίο κρατά στο χέρι του φορτισμένος άνθρωπος, με μετρητικό σύστημα μεγάλου εύρους ζώνης.

Μέσω των μετρήσεων αυτών μπορέσαμε να αποκαλύψουμε τους πολύ μικρούς χρόνους ανόδου που υπάρχουν στην κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς και ενδιαφέρουσες πληροφορίες για άλλες σημαντικές παραμέτρους.

Γιατί είναι απαραίτητη αυτή η εργασία; Το πρότυπο IEC 61000-4-2 [1] διευκρινίζει τις τιμές των παραμέτρων του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης τις οποίες πρέπει να πληρούν οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, έτσι ώστε να προσομοιώνουν ικανοποιητικά την εκφόρτιση που συμβαίνει στην πραγματική ζωή από τα ανθρώπινα σώματα. Κάποιες απαιτήσεις του προτύπου είναι παρωχημένες. Ο χρόνος ανόδου της κυματομορφής θεωρείται ενιαίος για όλα τα επίπεδα τάσης φόρτισης και τις ταχύτητες προσέγγισης του σημείου εκφόρτισης, και σε κάθε περίπτωση σημαντικά μεγαλύτερος από τα πειραματικά ευρήματα. Η δε εξίσωση του προτύπου για το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης θεωρείται χονδροκομμένα ότι εφαρμόζει σε όλα τα επίπεδα τάσης φόρτισης απλά με την διαφοροποίηση ενός πολλαπλασιαστικού παράγοντα. Στην πράξη όμως τα πειραματικά αποτελέσματα ενδεικνύουν διαφορές στην κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης [2-11]. Η απόσταση των τοπικών μεγίστων δεν είναι σταθερή. Η τιμή των τοπικών και του ολικού μεγίστου δεν είναι κοντά σε αυτήν που προδιαγράφει το πρότυπο παρά μόνο για συγκεκριμένα επίπεδα τάσης φόρτισης.

Ο στόχος λοιπόν των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επιτυγχάνεται μόνο πολύ συμβατικά και δεν προσομοιώνει όλες τις πτυχές ενός γεγονότος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης επακριβώς. Μάλιστα δεν προσεγγίζονται σωστά οι εκφράσεις αυτές της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης οι οποίες φαίνεται να δημιουργούν σοβαρά προβλήματα σε εξοπλισμό που υπόκειται σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση (πχ στην περίπτωση πολύ μικρών χρόνων ανόδου).

Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η ευρεία και συστηματική καταγραφή μετρήσεων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι το κομμάτι εκείνο του πεδίου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στο οποίο πρέπει να εστιάσει η επιστημονική κοινότητα ώστε νέες τιμές των παραμέτρων της εν λόγω ποσότητας ρεύματος να αποτελέσουν τη βάση για την όποια προσομοίωση τους, ειδικά την στιγμή την οποία είναι διαθέσιμος μετρητικός εξοπλισμός ικανός μετρήσει μεγάλο συχνοτικό περιεχόμενο.

Στην εργασία μας έγιναν μετρήσεις σε δεκάδες ανθρώπινα σώματα, με εξοπλισμό με μεγάλη, συγκριτικά με τους ευρέως χρησιμοποιούμενους, συχνοτική απόκριση, και έγινε καταγραφή του μήκους τόξου και μέτρησης της ταχύτητας προσέγγισης του στόχου από το φορτισμένο σώμα. Τις μετρήσεις επεξεργαστήκαμε με κανονική στατιστική επεξεργασία ώστε να βγουν χρήσιμα αποτελέσματα. Η εργασία προχώρησε στη μαθηματικοποίηση των ευρημάτων αυτών, στην παραγωγή νέων τιμών για τις παραμέτρους της εξίσωσης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τέλος, ενεργά και παθητικά κυκλώματα σχεδιάστηκαν στην βάση των πειραματικών αυτών αποτελεσμάτων ώστε να βοηθηθεί η μελλοντική διαδικασία κατασκευής γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στη βάση πιο «πραγματικών» δεδομένων.

Στην εργασία μας 75 άτομα συμμετείχαν στο πείραμά μας όπου φορτιζόμενα υπό διάφορες τάσεις εκφορτίζονταν, μέσω αιχμηρού μετάλλου, πάνω σε πρότυπο γειωμένο μεταλλικό στόχο.

2. Μετρήσεις

2.1 Μετρητικός εξοπλισμός

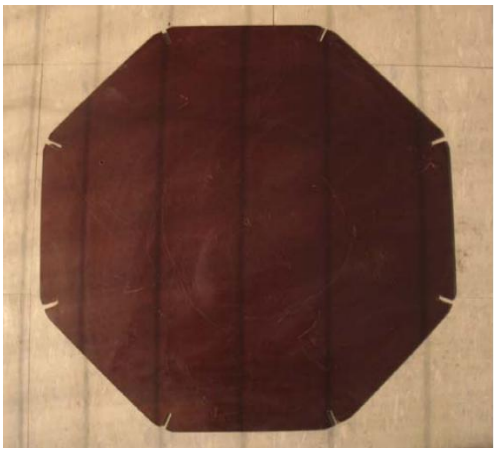
Στην καρδιά του μετρητικού εξοπλισμού βρίσκεται ο παλμογράφος LeCroy SDA 816 Zi (Σχήμα 1), με εύρος ζώνης 16 GHz και χρόνο ανόδου από το 10% στο 90%, 29 ps. Χρησιμοποιείται το καλώδιο Sucoflex 106, διακριβωμένο για υψίσυχνες εφαρμογές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Σχήμα 1: LeCroy SDA 816 Zi

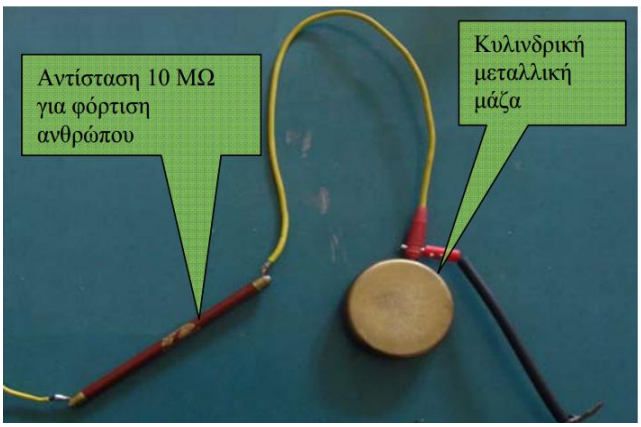
Σχήμα 2: Η DC γεννήτρια MJ20P700

Χρησιμοποιείται στη συνέχεια ο πρότυπος στόχος MD 103 της TESEQ πάνω στον οποίο εγχέεται το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από το ανθρώπινο σώμα.

Η φόρτιση του ανθρώπινου σώματος έγινε μέσω της DC γεννήτριας MJ20P700 (Σχήμα 2). Η γεννήτρια φόρτιζε τον άνθρωπο οποίος πατούσε πάνω σε μονωτική βάση (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Επιδαπέδιο μονωτικό



Σχήμα 4: Αντίσταση φόρτισης και μεταλλική κυλινδρική μάζα

Η φόρτιση και εκφόρτιση του ανθρώπου γινόταν μέσω μιας αντίστασης που κατέληγε σε μια κυλινδρική μάζα (ανοιχτοκύκλωμα) (Σχήμα 4). Ο άνθρωπος αγγίζει τη μεταλλική βάση που βρίσκεται σε υψηλή τάση και μετά εκφορτίζεται στο στόχο μέσω της ειδικά προετοιμασμένης μεταλλικής ράβδου (Σχήμα 5).

Η υψηλή τάση στην οποία έχουμε φτάσει μέσω της γεννήτριας MJ20P700 μετράται άμεσα με το βολτόμετρο υψηλής τάσης (Σχήμα 6), ενώ η ίδια η γεννήτρια μας δίνει και ένα υποπολλαπλάσιο σήμα που μπορεί να μετρηθεί με βολτόμετρο χαμηλής τάσης. Μέσω

αυτών των δύο ενδείξεων λαμβάνουμε την τιμή της υψηλής τάσης στην οποία φορτιζόμαστε.

Σχήμα 5: Ράβδος φόρτισης – εκφόρτισης: α) φωτογραφία, β) σχηματική αναπαράσταση και τιμές μεγεθών της ράβδου

Σχήμα 6: Βολτόμετρο Χαμηλής και Υψηλής Τάσης

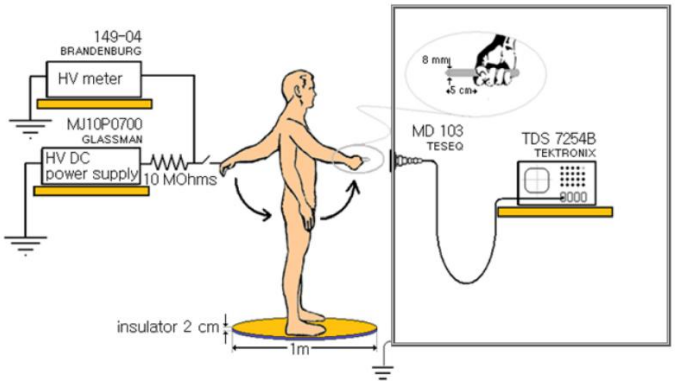
Για τον υπολογισμό του μήκους τόξου εκφόρτισης ESD καθώς και για τον προσδιορισμό της ταχύτητας προσέγγισης χρησιμοποιήθηκε ο ψηφιακός αισθητήρας PointGrey Research Dragonfly2. Ο ψηφιακός αισθητήρας μηχανή PointGrey Research Dragonfly2 έχει αισθητήρα 1/3" monochrome CC και ανάλυση 1024x768 pixels. Επιπρόσθετα για μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις φωτογραφίες που λήφθηκαν χρησιμοποιήθηκε μεγεθυντικός φωτογραφικός φακός Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor που ενσωματώθηκε στον αισθητήρα (Σχήμα 7).

Σχήμα 7: Ο ψηφιακός αισθητήρας PointGrey Research Dragonfly2, ο μεγεθυντικός φωτογραφικός φακός Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor, και η αποτύπωση του τόξου

2.2 Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του ανθρώπινου σώματος. Ο συμμετέχων στο πείραμα αφού τοποθετηθεί πάνω στο επιδαπέδιο μονωτικό ακουμπούσε σε σημείο (το οποίο βρίσκεται σε γνωστή τάση οποία –ταυτόχρονα- μετρούσαμε), για χρόνο ικανό να τον φορτίσει στην επιθυμητή τάση. Έπειτα έτεινε το χέρι στο οποίο κρατούσε τη μεταλλική ράβδο προς τον ειδικό στόχο και ακολουθώντας τις οδηγίες μας προσέγγιζε

«γρήγορα» το στόχο με ταχύτητα η οποία καταγραφόταν, δίνοντας μας τη δυνατότητα να κρατάμε τις μετρήσεις με την επιθυμητή ταχύτητα (γρήγορη προσέγγιση).



Σχήμα 8: Διάταξη φόρτισης – εκφόρτισης

2.3 Πειραματικά αποτελέσματα

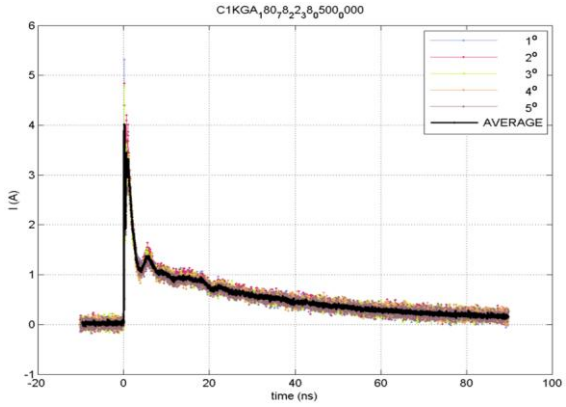
Πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες σειρές μετρήσεων Ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπινων σωμάτων υπό τάσεις φόρτισης 0.5 kV, 1 kV, 2 kV και 4 kV. Εβδομήντα πέντε άτομα πήραν μέρος στο πείραμά μας και πέντε αξιοποιήσιμες μετρήσεις από κάθε έναν/μια για κάθε επίπεδο τάσης αποθηκεύτηκαν για περαιτέρω επεξεργασία. Η μέση ταχύτητα των προσεγγίσεων ήταν πείπου στα 9 m/s.

Για την επεξεργασία του μεγάλου όγκου των μετρητικών δεδομένων αναπτύχθηκε κώδικας εισαγωγής, επεξεργασίας και παρουσίασης των αποτελεσμάτων (τιμών γραφημάτων κλπ).

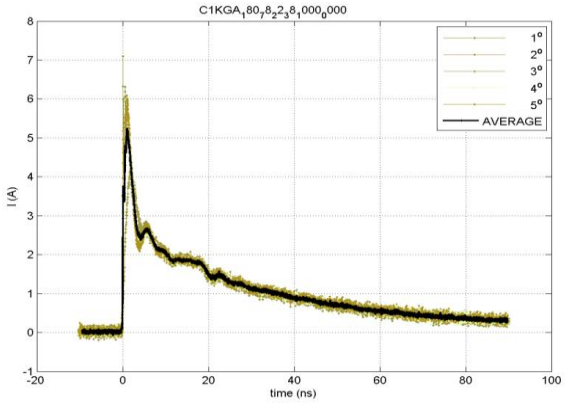
2.3.1 Παράδειγμα μετρήσεων ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Στο Σχήμα 9 φαίνεται η κυματομορφή ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ατόμου που πήρε μέρος στο πείραμά μας.

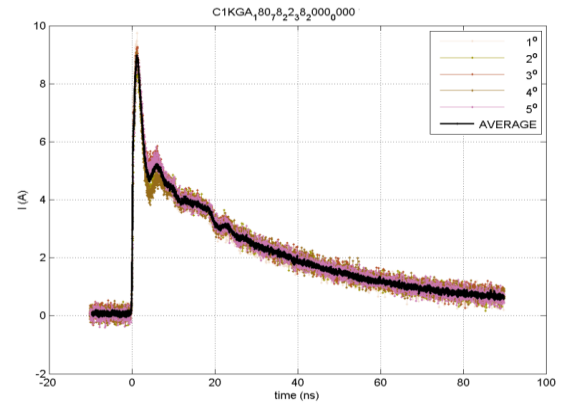
Τάση φόρτισης: 500 V



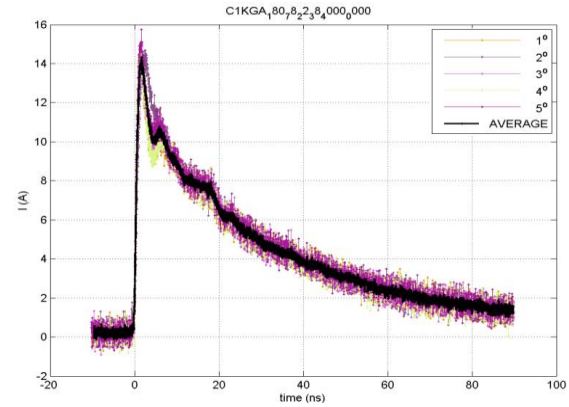
Τάση φόρτισης: 1000 V



Τάση φόρτισης: 2000 V



Τάση φόρτισης: 4000 V



Σχήμα 9: Κυματομορφές ρεύματος Ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ατόμου, φορτισμένου με τάσεις 500 V, 1000 V, 2000 V, 4000 V.

2.3.2 Μέγιστο ρεύματος Ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης.
Στον Πίνακα 1, φαίνονται οι οι μέσες τιμές των μέγιστων του ρεύματος εκφόρτισης ένταντι συγκεκριμένου επιπέδου τάσης φόρτισης. Στον ίδιο Πίνακα φαίνονται οι τιμές που καθορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2 για την ίδια παράμετρο.
Η συμπεριφορά του μέγιστου του ρεύματος εκφόρτισης προκύπτει άμεσα από τη φυσική του φαινομένου. Τα αποτελέσματα μας προσιδιάζουν αυτά άλλων ερευνητών, και βρίκσονται κοντά σε αυτά του IEC 61000-4-2 (βλ. και Πίνακα 2).

Πίνακας 1
Μέση τιμή μεγίστων ρευμάτων

Τάση Φόρτισης [V]	Μέσες τιμές κορυφής ρεύματος [A]	Τυπική απόκλιση [A]	Κορυφές ρεύματος σύμφωνα με το [1] [A]*
500	3.575	0.63	-
1000	4.756	0.51	-
2000	8.125	0.66	7.5
4000	12.139	1.52	15.0

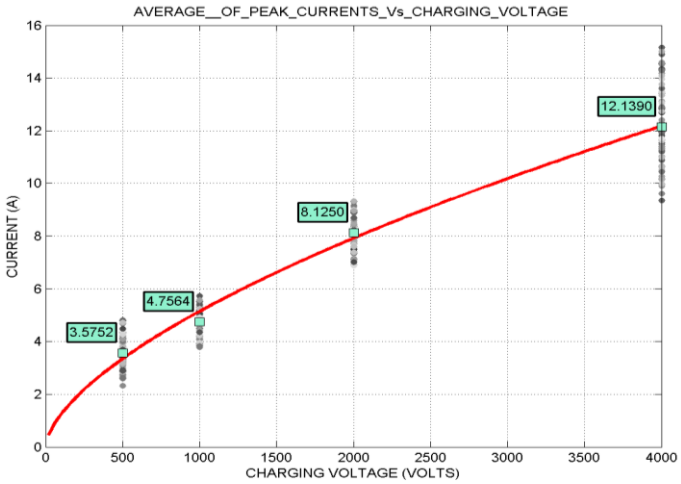
(3.75*Charging voltage [kV])

Πίνακας 2
Τιμές των παραμέτρων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης άλλων ερευνητών και τιμές του [1]

		Μέγιστο Ρεύμα (A)						*Χρόνος Ανόδου* (nsec)					
Τάση Φόρτισης		**200 V**	**600 V**	**1 kV**	**2 kV**	**4 kV**	**8 kV**	**200 V**	**600 V**	**1 kV**	**2 kV**	**4 kV**	**8 kV**
IEC 61000-4-2 [1]					7.5	15	30				0.8	0.8	0.8
Chundru, Pommerenke *et al.*[6]								0.3 to 2.1					
Huang *et al.* **[7]**				9.7						0.21			
Fujiwara, Taka [9] **6 GHz oscilloscope**	*Γρήγορη Προσέγγιση*					16	35					0.5	0.7
	Αργή Προσέγγιση					12	18					0.6	0.8
Fujiwara, Taka **[9]** **12 GHz oscilloscope**		~2	~4	~6		~18	~34						
Fujiwara, Taka [10]	*(Γρήγορη Προσέγγιση)*	1.4			10			0.25			0.9		
Barth, Richner [3] **500 MHz oscilloscope**								0.7 to 100 (not related with voltage levels)					
Barth *et al.* [4] **6 GHz oscilloscope**								0.1 to 100 (not related with voltage levels)					
Mori, Taka, Fujiwara[8]								~0.07					
Barth [5]								*"The measured subnanosecond Rise Times were ignored, and others "conveniently greater" were adopted by industry and Standards".*					

Στο Σχήμα 10 φαίνεται μια γραφική αναπαράσταση των μέγιστων των ρευμάτων

εκφόρτισης, έναντι της τάσης φόρτισης. Στον Πίνακα 3 φαίνονται κάποιες μαθηματικές εκφράσεις συσχετισμού των μετρούμενων τιμών των παραμέτρων έναντι της τάσης φόρτισης.



Σχήμα 10: Μέγιστα ρευμάτων εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης

Πίνακας 3

Μαθηματικές προσεγγίσεις της σχέσης βασικών παραμέτρων με την τάση φόρτισης

Μέγιστο Ρεύματος	$I_{ESD}(A) = 5.144 \cdot (V_{ESD}(kV))^{0.6215}$
Χρόνος Ανόδου	$t_r(n\sec) = 0.3975 \cdot (V_{ESD}(kV))$
I_{30}	$I_{30}(A) = 1.198 \cdot (V_{ESD}(kV))$
I_{60}	$I_{60}(A) = 0.54 \cdot (V_{ESD}(kV))$
Δεύτερο Μέγιστο Ρεύματος	$I_{2,ESD}(A) = 2.5630 \cdot (V_{ESD}(kV))$

2.3.3 Χρόνος ανόδου Ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης.

Όμοια με τα προηγούμενα, τα μετρητικά αποτελέσματα του χρόνου ανόδου φαίνονται στον Πίνακα 4.

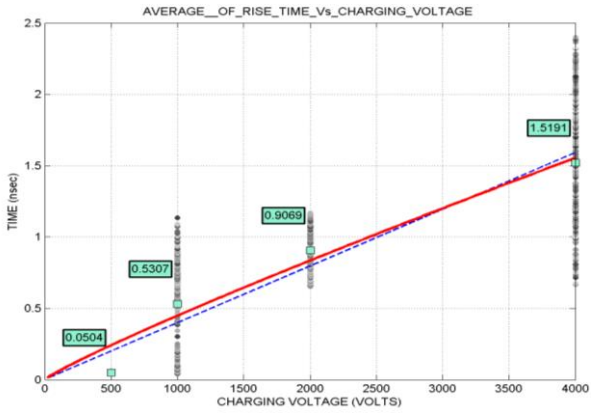
Στο Σχήμα 11 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση του Χρόνου ανόδου του ρεύματος εκφόρτισης των ατόμων που λάβαν μέρος στο πείραμά μας έναντι της τάσης φόρτισης.

Πίνακας 4

Μέσες τιμές χρόνου ανόδου

Τάση Φόρτισης [V]	Μέσες τιμές χρόνων ανόδου [nsec]	Τυπική απόκλιση [nsec]	Χρόνος ανόδου σύμφωνα με το [1] [nsec]
500	0.050	0.0067	-
1000	0.532	0.3074	-
2000	0.907	0.1312	0.8
4000	1.519	0.4421	0.8

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον ισχυρισμό μας ότι δεν υπάρχει ένας ενιαίος χρόνος ανόδου, όπως προκύπτει και από άλλες εργασίες (βλ. Πίνακα 2). Μια μαθηματική έφκραση της σχέσης Χρόνου Ανόδου τάσης φόρτισης βρίσκεται στον Πίνακα 3. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση των 500 V ο Χρόνος Ανόδου βρίσκεται κοντά στον χρόνο ανόδου του παλμογράφου μας πράγμα που σημαίνει ότι ο πραγματικός χρόνος ανόδου είναι χαμηλότερος από αυτόν που μετράμε.



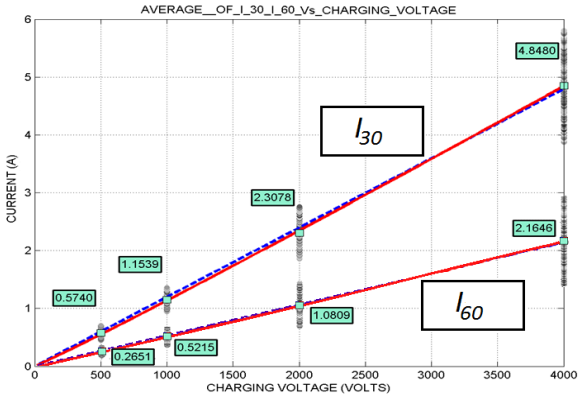
Σχήμα 11: Μέσες τιμές χρόνου ανόδου εκφόρτισης, έναντι τάσης φόρτισης.

2.3.4 Τιμές I_{30} και I_{60} του ρεύματος εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης.

Τα αποτελέσματά μας αποκαλύπτουν μια σχεδόν γραμμική συμπεριφορά των μεγεθών I_{30} και I_{60}, με μικρή όμως κλίση. Αυτό φαίνεται στους Πίνακες 5 και 6, και στο Σχήμα 12. Γραμμικές μαθηματικές προσεγγίσεις φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 5
Μέσες τιμές των παραμέτρων I_{30} και I_{60}

Τάση φόρτισης [V]	I_{30} Μέσες τιμές [A]	I_{30} Τυπική απόκλιση [A]	I_{30} σύμφωνα με το το [1] [A]	I_{60} Μέσες τιμές [A]	I_{60} Τυπική απόκλιση [A]	I_{60} σύμφωνα με το το [1] [A]
500	0.574	0.0648	-	0.265	0.0512	-
1000	1.154	0.1039	-	0.521	0.0823	-
2000	2.308	0.2317	4	1.081	0.1974	2
4000	4.848	0.4919	8	2.165	0.3855	4



Σχήμα 12: Μέσες τιμές των παραμέτρων I_{30} και I_{60} του ρεύματος εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης.

2.3.5 Δεύτερο τοπικό μέγιστο του ρεύματος εκφόρτισης έναντι τάσης φόρτισης

Το Δεύτερο Μέγιστο, δίνεται μέσω της προτεινόμενης μαθηματικής έκφρασης του προτύπου. Τα αποτελέσματά μας φαίνονται στον πίνακα 6. Επιπλέον οι μετρήσεις μας έδειξαν ότι το δεύτερο τοπικό μέγιστο δεν εμφανίζεται σε χρόνο 20 nsec μετά την αρχή του φαινομένου, αλλά σίγουρα σε μικρότερο χρόνο (5 έως 7 nsec) ο οποίος δεν μένει σταθερός,

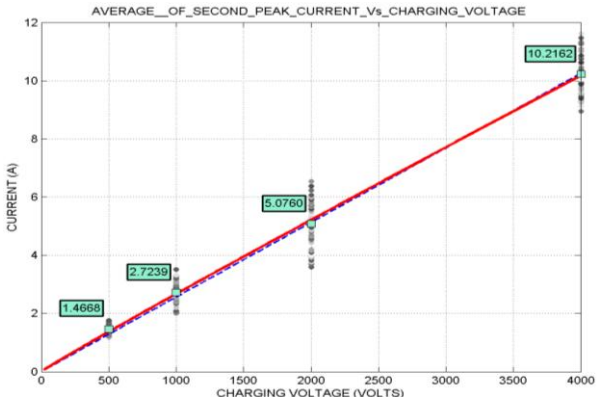
αντίθετα με τις επιταγές του προτύπου.

Πίνακας 6
Μέσες τιμές δεύτερου τοπικού μέγιστου του ρεύματος

Τάση Φόρτισης [V]	Μέσες τιμές Δεύτερου Μέγιστου [A]	Τυπική απόκλιση [A]	Μέγιστο Ρεύμα σύμφωνα με το [1] [A]*
500	1.467	0.1520	-
1000	2.724	0.3987	-
2000	5.076	0.7900	4.36
4000	10.216	0.7022	8.72

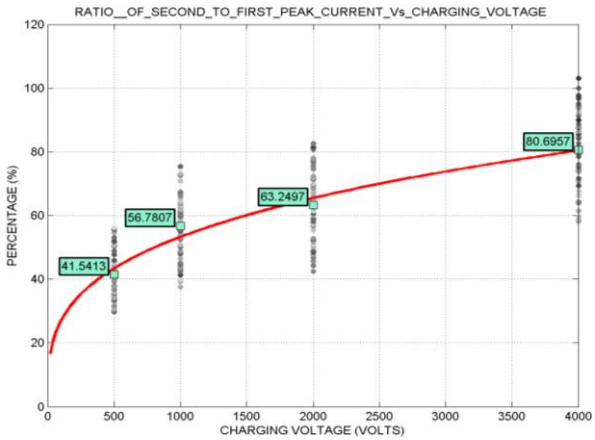
(2.18*Charging voltage [kV])

Στο Σχήμα 13, το πλάτος του Δεύτερου Μεγίστου απεικονίζεται έναντι της τάσης φόρτισης.



Σχήμα 13: Μέσες τιμές Δεύτερου Μεγίστου έναντι της τάσης φόρτισης.

Στο Σχήμα 14, φαίνεται ο λόγος του Δεύτερου Μεγίστου ως προς το πρώτο σε σχέση με την τάση φόρτισης. Ο λόγος των δύο τοπικών μεγίστων είναι χαρακτηριστικός για την μορφή της καμπύλης του ρεύματος εκφόρτισης καθώς το πρότυπο 61000-4-2 τον θεωρεί σταθερό. Οι μετρήσεις μας έδειξαν ότι ο λόγος αυτός δεν είναι σταθερός έναντι της τάσης φόρτισης άρα το και η μορφή του ρεύματος εκφόρτισης δεν είναι μια και ενιαία για όλα τα επίπεδα τάσης φόρτισης. Στην πραγματικότητα η μορφή του ρεύματος εκφόρτισης εξαρτάται από το επίπεδο τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Μέσοι λόγοι {Δεύτερο Μέγιστο / Πρώτο Μέγιστο} του ρεύματος εκφόρτισης έναντι της τάσης φόρτισης.

3. Συμπερασματικά

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα που προέκυψαν από μετρήσεις πραγματικών περιστατικών Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης, οι οποίες έγιναν σε εκτεταμένο αριθμό ατόμων. Οι μετρήσεις/καταγραφές των σημαντικών παραμέτρων της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έγιναν με παλμογράφο ευρείας συχνοτικής απόκρισης. Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν την ανάγκη μιας πιο ρεαλιστικής προσέγγισης του φαινομένου στα αντίστοιχα θεωρητικά εγχειρίδια και Πρότυπα. Η έρευνά μας αποκάλυψε σημαντικά μικρότερους Χρόνους Ανόδου που μεταβάλλονται έναντι της τάσης φόρτισης, μόνιμα μικρότερες τιμές για τις παραμέτρους I_{30} και I_{60} (ανάλογες όμως, όντως, ανάλογα με την τάση φόρτισης), μεταβαλλόμενη μορφή της καμπύλης του ρεύματος εκφόρτισης (μέσω της θεώρησης του λόγου *{Δεύτερο Μέγιστο / Πρώτο Μέγιστο}*), καθώς και μεταβαλλόμενη χρονική στιγμή παρουσίασης του Δεύτερου τοπικού Μεγίστου, που αυξάνεται με την αύξηση της τάση φόρτισης. Μια σχέση μεταξύ του μήκους του τόξου και της τάσης φόρτισης, με τη χρήση δύο σεναρίων ταχύτητας προσέγγισης, μπορεί να βρεθεί στην διδακτορική διατριβή [12].

Για την αξιολόγηση της ποιότητας των μετρήσεων των πειραμάτων πραγματικών περιστατικών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης βλ. [12]. Στην διδακτορική διατριβή μπορούν να βρεθούν και μεθοδολογίες βελτιστοποίησης παραμέτρων μαθηματικών εκφράσεων ρεύματος (βλ. και [13]) καθώς επίσης και μεθοδολογία ανάπτυξης των ηλεκτρικών μοντέλων παραγωγής κυματομορφών ρεύματος εκφόρτισης (βλ. και [14]) τα οποία μπορούνα να παράξουν καμπύλες ρεύαμτος εκφόρτισης οι οποίες έχουν βρεθεί στα πειράματα μας, με τη δυνατότητα να κατασκευαστούν αντίστοιχα μοντέλα και για άλλα σύνολα πειραματικών ευρημάτων.

4. Βιβλιογραφία

[1] IEC 61000-4-2, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test - Basic EMC Publication, 2009.

[2] A.S. Podgorski, J. Dunn, and R. Yeo, "Study Of Picosecond Rise time in Human-Generated ESD", *in Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Aug. 12-16, 1991, New Jersey, pp. 263-264,.

[3] J. Barth and J. Richner "Correlation considerations: Real HBM to TLP and HBM testers", *Elsevier, Microelectronics Reliability*, 42, pp. 909-917, 2002.

[4] J. Barth, J. Richner, L.G. Henry, and M. Kelly, "Real HBM and MM waveform parameters", *Elsevier, Journal of Electrostatics*, 62, pp. 195-209, 2004

[5] J. Barth "Measurements of real ESD threats that have been ignored too long", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 8, No. 4, pp. 61- 63, 2005.

[6] R. Chundru, D. Pommerenke, K. Wang, T. Van Doren, F. Pio Centola, and 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, pp. 498-504, 2004.

[7] J Huang, L. Suling, W. Xiqin, Z. Feng, W., Langfeng, Gaoyougan "Intrinsic characterization of human metal ESD current, electromagnetic field and displacement current", *in Proc. of 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, pp. 518-520, 2006.

[8] I. Mori, Y. Taka, and O. Fujiwara, "Wideband Measurement of Discharge Current Caused by Air Discharge Through Hand-Held Metal Piece from Charged Human Body", *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 91, No. 9, pp. 54-61, 2008.

[9] O. Fujiwara and Y. Taka "Dependence of breakdown fields on charge voltages for human ESD", *in Proc. of Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 148-151, Singapore, 2008.

[10] O. Fujiwara and Y. Taka "Verification of spark resistance formula", *in Proc. of Asia Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 152-155, Singapore, 2008.

[11] B. Andersson, L. Fast, P. Holdstock and D. Pirici, "Charging of a person exiting a car seat", *Institute of Physics, Journal of Physics: Conference Series 142*, 2008.

[12] Παύλος Σ. Κατσιβέλης, «Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης» *Διδακτορική διατριβή, Αθήνα,ΕΜΠ, Νοέμβριος 2011.*

[13] P.K. Katsivelis, G.N. Psarros, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos. (2010, October). Estimation of Parameters for the Electrostatic Discharge Current Equation with Real Human Discharge Events Reference using Genetic Algorithms. *Institute of Physics Publishing, Measurement, Science and Technology*, Vol. 17, No. 10, pp.6, October 2010 (Paper No 10.1088/0957-0233/21/10/105703).

[14] Katsivelis P.K., Fotis G.P., Gonos I.F., Kousiouris T., Stathopulos I.A.: «Electrostatic Discharge Current Linear Approach and Circuit Design Method», Energies, Vol. 3, Issue 11, pp. 1728-1740, 2010, (doi:10.3390/en3111728).