

# ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος και Ι. Α. Σταθόπουλος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο –  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
e-mail: pavlos.katsivelis@gmail.com

## Περίληψη

Οι μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, παραγομένου από ανθρώπινο σώμα, είναι εξαιρετικά σημαντικές για την αποκάλυψη των λιγότερο φωτισμένων πτυχών του φαινομένου αυτού, που, μόνο συμβατικά, θεωρούνται γνωστές σήμερα. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, αξιοποιούνται μετρήσεις ρεύματος εκφόρτισης ανθρώπου - μετάλλου, σε διάφορα επίπεδα τάσης, που διεξήχθησαν, με χρήση παλμογράφου ευρείας απόκρισης συχνοτήτων, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Στις μετρήσεις (φόρτιση και εκφόρτιση ανθρώπινου σώματος) έλαβαν μέρος δεκάδες φοιτητές, εκφορτιζόμενοι ένας προς έναν σε μέταλλο. Αντίστοιχα πειράματα γίνονται και από άλλους ερευνητές, ανά τον κόσμο, στην παρούσα φάση.

Είναι, λοιπόν, εξαιρετικά σημαντικό, λαμβάνοντας υπ' όψη την απαιτητικότητα των μετρήσεων, αυτές, να παρουσιάζονται συνοδευόμενες από πειστήρια για την αξιοπιστία τους. Προς τούτο, παρουσιάζουμε μια μέθοδο υπολογισμού των αβεβαιοτήτων, των συνδεομένων με τα μετρούμενα μεγέθη. Στην παρούσα εργασία εκτίθεται η μέθοδος υπολογισμού της αβεβαιότητας για τις τέσσερις παραμέτρους (μέγιστο ρεύμα, χρόνος ανόδου, ρεύμα στα 30 και 60ns) της καμπύλης του ρεύματος εκφόρτισης. Η συνολική αβεβαιότητα υπολογίζεται ως συνισταμένη δυο συνιστωσών [της αβεβαιότητας Τύπου Α ( $U_A$ ), και της αβεβαιότητας Τύπου Β ( $U_B$ )]. Η μεν αβεβαιότητα Τύπου Α  $U_A$  προσεγγίζεται ως συνισταμένη δύο παραμέτρων: της Επαναληψιμότητας ( $U_{A1}$ ) και της Αναπαραγωγιμότητας ( $U_{A2}$ ), η δε αβεβαιότητα  $U_B$  Τύπου Β, ως συνισταμένη όλων των διαθέσιμων πληροφοριών περί των πηγών αβεβαιότητας, όπως πιστοποιητικά διακρίβωσης, εμπειρία κλπ.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε μία παράμετρο παρουσιάζονται σε πίνακες. Οι, αφορώσες στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση ανθρώπου, αβεβαιότητες που υπολογίζονται συγκρίνονται, αφ' ενός μεν, με αυτές που προτείνονται στο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2, για εκφόρτιση ηλεκτροστατικών γεννητριών, αφ' ετέρου δε, με αυτές που έχει το Διαπιστευμένο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων για τη διακρίβωση των ηλεκτροστατικών γεννητριών.

*Λέξεις-Κλειδιά: αβεβαιότητα, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ρεύμα εκφόρτισης.*

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

# UNCERTAINTY ON THE ESTIMATION OF HUMAN ELECTROSTATIC DISCHARGE CURRENT

## Abstract

Measurements of the electrostatic discharge current, produced by the human body, play a very important role in revealing the less known aspects of the phenomenon, that are approached in a very conventional way, at the moment.

In the present work, real human-to-metal electrostatic discharge current measurements, under various charging voltage levels, are used. The relevant experiments were carried out in the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens, using a broadband oscilloscope. Dozens of students took part in our measurements (charging and discharging of a human body). As we speak, similar experiments are carried out in laboratories, in different places of the planet.

It is, therefore, very important, having in mind the pretentiousness of such measurements, to present them accompanied by evidence of their reliability.

To achieve this, we present a method of calculation of the uncertainties of the measured quantities. In the present work, a method for the calculation of the four ESD current parameters' (ESD maximum current, Rise Time, Current Value @ 30 ns and Current Value @ 60 ns) uncertainties is presented. The overall uncertainty is calculated as a resultant of two components: Uncertainty Type A ( $U_A$ ) and Uncertainty Type B ( $U_B$ ). Uncertainty Type A was approached as a resultant of two parameters: the Repeatability ( $U_{A1}$ ) and the Reproducibility ( $U_{A2}$ ). Uncertainty Type B ( $U_B$ ) is calculated as a resultant of all the available information concerning uncertainty sources, such calibration certificates, experience, etc..

Results are presented in separate matrices for each parameter. The Uncertainties (concerning the Electrostatic Discharge of the human body), calculated as mentioned above are compared not only to the ones included in the Standard EN 61000-4-2, that deals with the discharge of ESD generators, but, also, to the ones of the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens.

*Keywords: uncertainty, electrostatic discharge, electrostatic discharge current*

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

---

## 1. Εισαγωγή

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι ένα επιστημονικό πεδίο στο οποίο πολλές και εξεζητημένες μετρήσεις λαμβάνουν χώρα παγκοσμίως και πολύ περισσότερες αναμένονται στο μέλλον. Τα μεγέθη που πρέπει να μετρηθούν βρίσκονται πολλές φορές στα όρια των δυνατοτήτων του χρησιμοποιούμενου μετρητικού εξοπλισμού.

Σε ένα πείραμα μέτρησης ρεύματος εκφόρτισης ανθρώπου σε πραγματικό χρόνο, υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες αβεβαιότητας, όπως: ταχύτητα και ο τρόπος προσέγγισης του στόχου, η κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου, η μετρητική αλυσίδα στόχου-εξασθενητή-καλωδίου, το μονωτικό δάπεδο, οι κλιματικές συνθήκες κ.τ.λ.. Οι μετρήσεις είναι απαιτητικές και η ποιότητά τους πρέπει να είναι εξασφαλισμένη, ώστε η παράθεση επιστημονικών στοιχείων, νέων ευρημάτων, η αντιπαράθεση μεταξύ επιστημόνων ακόμα και οι προτάσεις προς αναθεώρηση του σχετικού Προτύπου EN 61000-4-2, να έχουν επαρκή επιστημονική βάση.

Μία ορισμένη μεθοδολογία υπολογισμού των αβεβαιοτήτων των μετρήσεων, που λαμβάνονται με μια μετρητική διάταξη, θεωρήθηκε απαραίτητη για να δώσει ένα μέτρο της ποιότητας των μετρήσεων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίστηκε στη μέθοδο υπολογισμού αβεβαιοτήτων του Προτύπου EN 61000-4-2 και της οδηγίας UKAS M3003. Περισσότερες λεπτομέρεις, σχετικά με την αβεβαιότητα σε μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, υπάρχουν στη διδακτορική διατριβή του Π.Σ. Κατσιβέλη.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η συνολική αβεβαιότητα είναι συνισταμένη δυο συνιστωσών: της αβεβαιότητας **Τύπου A** ( $U_A$ ) και της αβεβαιότητας **Τύπου B** ( $U_B$ ). Η αβεβαιότητα Τύπου A υπολογίζεται με χρήση σειρών μετρήσεων, ενώ η Τύπου B υπολογίζεται με τη χρήση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών, των σχετικών με τη μεταβλητότητα των μετρούμενων μεγεθών, όπως πιστοποιητικά διακρίβωσης, παλαιότερα δεδομένα μετρήσεων, προδιαγραφές μετρητικού εξοπλισμού, διαδικασία μέτρησης, εμπειρία του χειριστή, ικανότητα και υποκειμενική κρίση αυτού, κ.λπ..

## 2. Μεθοδολογία

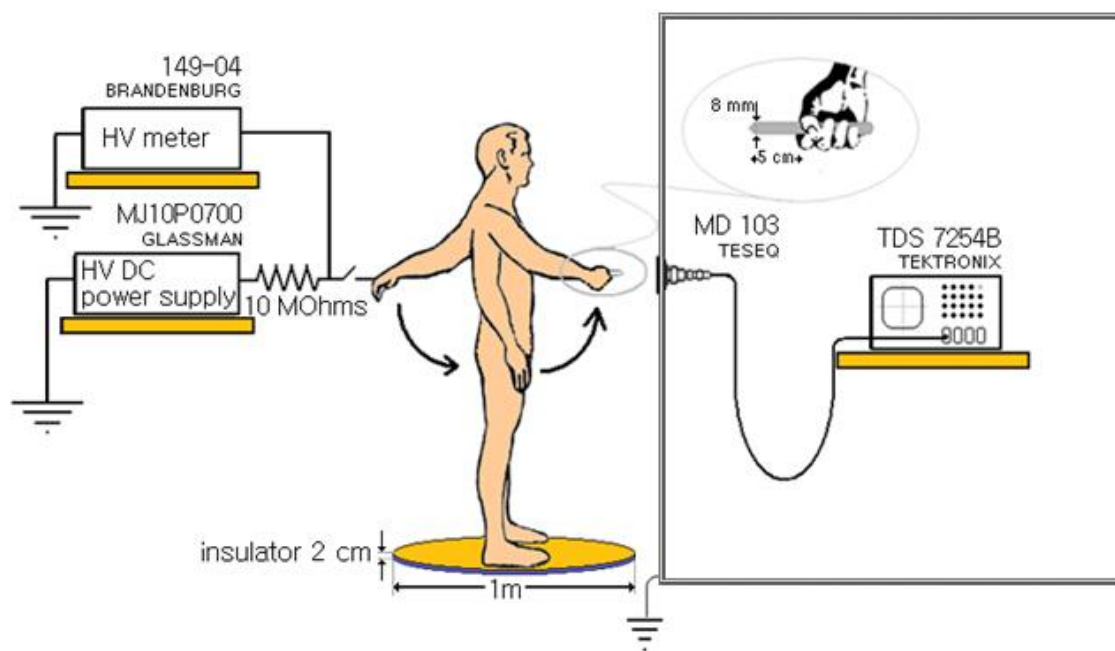
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων για τη λήψη των μετρήσεων, πρέπει να τονιστεί ότι δεν περιγράφεται στο Πρότυπο EN 61000-4-2. Το Πρότυπο περιγράφει εκφορτίσεις επαφής για ηλεκτροστατικές γεννήτριες. Ωστόσο καμία εκφόρτιση που λαμβάνει χώρα, στην πράξη, δεν είναι εκφόρτιση επαφής. Όλες οι εκφορτίσεις, ακόμα και αυτές που γίνονται μέσω γεννητριών εκφόρτισης, είναι εκφορτίσεις αέρος, καθώς, αν και ο ηλεκτρονόμος που διαθέτουν οι γεννήτριες αυτές είναι πολύ γρήγορος, δεν παύει να χρειάζεται ένα μικρό χρονικό διάστημα για να κλείσει. Έτσι, παρότι το “πιστόλι” (γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων) ακουμπά άμεσα στον στόχο, η εκφόρτιση δεν μπορεί να θεωρηθεί εκφόρτιση επαφής, καθώς προηγείται αυτής, εκφόρτιση αέρος στον ηλεκτρονόμο της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Επομένως, ο κάθε άνθρωπος που, στη διάρκεια του πειράματός μας, εκφορτίζεται μέσω του αέρα με τη δημιουργία τόξου (εκκένωση). Η ταχύτητα προσέγγισης του στόχου εκφόρτισης επιλέχθηκε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, ώστε να γίνεται πιο γρήγορα

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
**Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,**  
**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.**

η εκφόρτιση και να μειώνεται η αντίσταση του αέρα (η αντίσταση του τόξου εξαρτάται από την απόσταση, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας προσέγγισης του στόχου).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, για τη διεξαγωγή των μετρήσεων (Σχήμα 1), έχει ως εξής: αρχικά, το τροφοδοτικό υψηλής συνεχούς τάσης του εργαστηρίου ετίθετο υπό την εναλλασσομένη τάση 230 V/ 50 Hz του δικτύου της Δ.Ε.Η.. Στη συνέχεια, γινόταν η ρύθμιση της τιμής της συνεχούς τάσης εξόδου του τροφοδοτικού, με βοήθεια ενσωματωμένης μεταβλητής αντίστασης (ποτενσιόμετρο), στην επιθυμητή τιμή της. Η τιμή αυτή της τάσης καταγραφοταν, τόσο με τη βοήθεια ενός βολτομέτρου υψηλής τάσης, όσο και με τη βοήθεια ενός βολτομέτρου χαμηλής τάσης το οποίο μετρούσε σήμα  $0 \div 10$  V dc (ανάλογο με την τάση της γεννήτριας  $0 \div 20$  kV dc, μέσω ενσωματωμένου ωμικού καταμεριστή).



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη

Ο άνθρωπος που λάμβανε μέρος στο πείραμα (υποκείμενο πειράματος) έχοντας, προηγουμένως, εκφορτιστεί στη γείωση του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων (για να αποβάλει όλα τα φορτία του σώματος του), ερχόταν σε επαφή με κατάλληλη κυλινδρική επιφάνεια, συνδεδεμένη με το τροφοδοτικό μέσω αντίστασης τιμής 10 MΩ (για λόγους ασφάλειας του υποκειμένου), ώστε να φορτιστεί στην επιθυμητή τάση. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ο εκφορτιζόμενος πατούσε πάνω σε ένα μονωτικό υλικό κυλινδρικής μορφής για να μην έρχεται σε άμεση επαφή με τη γη. Ο χρόνος επαφής του υποκειμένου με την κυλινδρική επιφάνεια, για την επιτυχή φόρτισή του, έχει υπολογιστεί, ήδη, και αρκεί να είναι της τάξης του 1 s. Ωστόσο, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, η φόρτιση γινότανε για χρόνο περί τα 3 s. Η μέτρηση του χρόνου φόρτισης γινότανε με τη βοήθεια χρονομέτρου, με ακρίβεια μέτρησης δεκάτων του δευτερολέπτου.

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

Το υποκείμενο φόρτισης, από τη στιγμή που αρχίζει να μετράει ο χρόνος, έρχεται σε επαφή με την μεταλλική κυλινδρική επιφάνεια μέσω της ράβδου φόρτισης-εκφόρτισης. Μετά την παρέλευση των 3 s και, αφού η διαδικασία φόρτισης έχει, με επιτυχία, ολοκληρωθεί ο εκφορτιζόμενος είναι έτοιμος να εκφορτιστεί, ώστε να γίνει καταγραφή της κυματομορφής.

Για την καταγραφή της κυματομορφής, ένας παρατηρητής βρίσκεται στον κλωβό, όπου είναι τοποθετημένος ο παλμογράφος. Ακριβώς μετά την εκφόρτιση, η οθόνη του παλμογράφου καταγράφει το γράφημα του ρεύματος εκφόρτισης του ανθρώπινου σώματος και ο παρατηρητής που βρίσκεται μέσα στον κλωβό βλέπει στον παλμογράφο το γράφημα αυτό. Το ελάχιστο διάστημα δειγματοληψίας εξαρτάται από τις δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου παλμογράφου. Τα δείγματα αυτά αποθηκεύονται από τον παρατηρητή, για περαιτέρω επεξεργασία, στη συνέχεια.

Με το πέρας της εκφόρτισης του ανθρώπου, αυτός ακουμπάει στη μεταλλική πλάκα γείωσης, για να αποβληθούν, πλήρως, όσα φορτία έχουν παραμείνει στο σώμα του κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, και το πείραμα επαναλαμβάνεται εκ νέου.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μεθοδολογία (Σχήμα 2) για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της μέτρησης ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Συγκεκριμένα η Αβεβαιότητα Τύπου A προσεγγίστηκε ως συνισταμένη δύο παραμέτρων:

- Της **Επαναληψιμότητας** ( $U_{A1}$ ) (όταν ένας άνθρωπος επαναλαμβάνει Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις).
- Της **Αναπαραγωγιμότητας** ( $U_{A2}$ ) (όταν διαφορετικοί άνθρωποι εκτελούν Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις).

Η **Επαναληψιμότητα** και η **Αναπαραγωγιμότητα** υπολογίζονται όπως φαίνεται στις εξισώσεις (1) και (2) αντίστοιχα.

Επαναληψιμότητα:

$$U_{A1} = \frac{s_{A1}}{\sqrt{n_{A1}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{A1} \cdot (n_{A1} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{A1}} (x_i - x_m)^2} \quad (1)$$

$n_{A1}$  είναι το πλήθος των εκφορτίσεων,  $x_i$  είναι η μετρούμενη τιμή,  $x_m$  είναι η μέση τιμή των  $n_{A1}$  μετρήσεων, και  $s_{A1}$  είναι η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής.

Αναπαραγωγιμότητα:

$$U_{A2} = \frac{s_{A2}}{\sqrt{n_{A2}}} = \sqrt{\frac{1}{n_{A2} \cdot (n_{A2} - 1)} \sum_{i=1}^{n_{A2}} (y_i - y_m)^2} \quad (2)$$

$n_{A2}$  είναι ο αριθμός των ανθρώπων,  $y_i$  είναι η μετρούμενη τιμή,  $y_m$  είναι η μέση τιμή των  $n_{A2}$  μετρήσεων, και  $s_{A2}$  είναι η τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή.

Η Συνολική Αβεβαιότητα Τύπου A δίνεται από την εξίσωση (3).

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

$$U_A = \sqrt{U_{A_1}^2 + U_{A_2}^2} \quad (3)$$

Έχοντας υπολογίσει την Αβεβαιότητα Τύπου A, η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα υπολογίζεται ως συνδυασμός των αβεβαιοτήτων Τύπου A και Τύπου B.

Γνωρίζοντας την κατανομή της κάθε αβεβαιότητας, η Αβεβαιότητα Τύπου B υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (4), όπου  $U_{B_i}$  είναι η κατανομή κάθε πηγής αβεβαιότητας.

$$U_B = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_{B_i}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{s_{B_i}}{k_i}\right)^2} \quad (4)$$

$s_{B_i}$  είναι η μέγιστη αβεβαιότητα που εισάγει η πηγή  $i$ , και  $k_i$  είναι ο συντελεστής κάλυψης της αντίστοιχης κατανομής.

Η **Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα** ( $U_c$ ) υπολογίζεται όπως στην εξίσωση (5):

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (5)$$

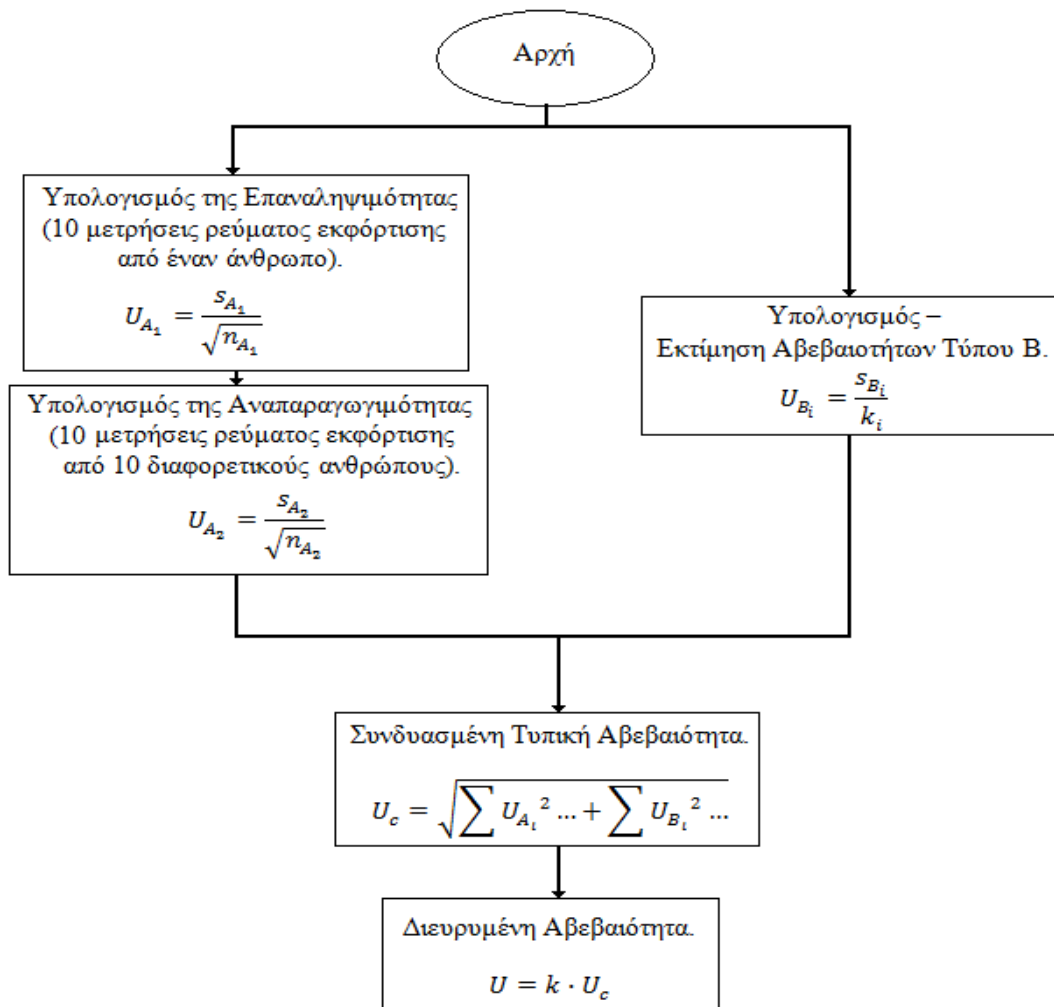
Η συνολική **Διευρυμένη Αβεβαιότητα** ( $U$ ) υπολογίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση (6):

$$U = k \cdot U_c \quad (6)$$

Για κάλυψη πιθανότητας 95%, ο πολλαπλασιαστής  $k$  λαμβάνει την τιμή  $k=2$ . (Η τιμή  $k=2$  είναι, στην ουσία, στρογγυλοποίηση της τιμής 1.96, που αντιστοιχεί σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%, κάνοντας χρήση συνήθων κανόνων στατιστικής)

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
**Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,**  
**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.**

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
 Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας υπολογισμού της αβεβαιότητας μίας παραμέτρου της κυματομορφής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης υπό δεδομένη τάση φόρτισης.

### 3. Εφαρμογή – Σχολιασμός

Για να υπολογίσουμε την συνολική **Διευρυμένη Αβεβαιότητα** των μετρήσεων που ελήφθησαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, για μετρήσεις υπό τάση φόρτισης 2 kV, ακολουθούμε τη διαδικασία του Σχήματος 2.

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας για τις παραμέτρους  $I_{max}$ ,  $t_r$ ,  $I_{30}$ ,  $I_{60}$ , εκτίθεται στη συνέχεια. Είναι προφανές ότι, κάτω από την ίδια τάση φόρτισης, κρατώντας την ταχύτητα προσέγγισης σχεδόν σταθερή, οι τιμές των αβεβαιοτήτων είναι πολύ μικρές σχετικά με τις παραμέτρους ESD, ακόμα και αυτές που εξαρτώνται έντονα από τις ιδιότητες του τόξου ( $I_{max}$ ,  $t_r$ ). Φυσικά οι τιμές των αβεβαιοτήτων  $I_{30}$ ,  $I_{60}$  είναι πολύ χαμηλές επίσης.

Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ενός ανθρώπινου σώματος (για 10 επαναλήψεις)  
(Ύψος: 174 cm, Βάρος: 77 kgs)

	$I_p$ (A)	$t_r$ (ns)	$I_{30}$ (A)	$I_{60}$ (A)
1	8.065	0.673	2.160	1.041
2	7.106	0.764	2.147	0.967
3	7.913	0.918	2.232	1.042
4	7.599	0.722	2.322	1.115
5	8.118	0.739	2.147	0.965
6	7.517	0.756	2.212	1.069
7	6.790	0.830	2.236	0.904
8	7.269	0.827	2.239	0.909
9	8.022	0.672	2.297	1.051
10	7.034	0.799	2.363	0.911
Μέσες Τιμές	7.543	0.770	2.235	0.997
Τυπική Απόκλιση	0.479	0.076	0.074	0.076
Αβεβαιότητα Τύπου $A_1$	0.151	0.024	0.023	0.024
Σχετική Αβεβαιότητα Τύπου $A_1$ (%)	2.008	3.132	1.048	2.405

Πίνακας 2. Τιμές των παραμέτρων ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης δέκα εκφορτίσεων δέκα διαφορετικών ανθρώπων.

	Ύψος (cm)	Βάρος (kg)	$I_p$ (A)	$t_r$ (ns)	$I_{30}$ (A)	$I_{60}$ (A)
1	164	66	7.216	0.732	1.708	1.083
2	165	42	8.769	0.567	1.937	0.830
3	168	66	7.967	0.914	2.397	0.995
4	170	52	9.243	0.565	2.263	1.121
5	174	74	10.208	0.895	2.261	1.032
6	175	74	8.402	0.775	2.442	1.036
7	177	84	9.384	0.95	3.111	1.493
8	183	82	8.056	0.908	2.174	1.188
9	183	102	9.125	0.688	2.333	1.166
10	185	79	7.896	1.098	2.549	1.296
Μέσες Τιμές			8.627	0.799	2.318	1.124
Τυπική Απόκλιση			0.885	0.191	0.372	0.181
Αβεβαιότητα Τύπου $A_2$			0.280	0.060	0.118	0.057
Σχετική Αβεβαιότητα Τύπου $A_2$ (%)			3.246	7.559	5.082	5.080

Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012



Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία διατηρήθηκαν σταθερές, εντός των ορίων  $22 \pm 1$  °C και  $39 \pm 3$  % αντιστοίχως.

Η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα και η Διευρυμένη Αβεβαιότητα υπολογίζονται στους Πίνακες 3 έως 6 ως εξής: οι τιμές των πηγών αβεβαιότητας, αφού διαιρεθούν με τον αντίστοιχο διαιρέτη που αντιστοιχεί στην κατανομή τους, υψώνονται στο τετράγωνο. Η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων είναι η Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα, ενώ, αν τη διαιρέσουμε με τον αντίστοιχο διαιρέτη της κατανομής, λαμβάνουμε τη Διευρυμένη Αβεβαιότητα.

Πίνακας 3. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο  $I_p$ .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (%)	Διαιρέτης*	$u_i$ (%)	$u_i^2$ (%) <sup>2</sup>	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	2.01	1	2.01	4.033	Πίνακας 1
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	3.25	1	3.25	10.536	Πίνακας 2
Τύπου Β	Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική 2	0.82	2	0.41	0.168	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Μετρητική αλυσίδα						
	Στόχου – εξασθενητή – καλωδίου	Κανονική 2	1.04	2	0.52	0.270	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Μη προσαρμογή αλυσίδας στον παλμογράφο.	Κατανομή U	1.08	$\sqrt{2}$	0.76	0.583	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	1.00	2	0.50	0.250	Εργαστηριακή εμπειρία
$U_c^2$						15.841	

\* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. EN 61000-4-2

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5) και (6), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα  $U_c = 3.980$  %
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για  $k=2$ )  $U = 7.960$  %

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
**Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,**  
**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.**

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
 Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Πίνακας 4. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο  $t_r$ .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (ps)	Διαιρέτης* $u_i$ (ps)	$u_i^2$ (ps) <sup>2</sup>	Πηγή	
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	24.12	1	24.12	581.627	Πίνακας 1
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	60.42	1	60.42	3650.888	Πίνακας 2
Τύπου Β	Ανάγνωση μέγιστης τιμής	Κανονική 2	50.00	2	25.00	625.000	Αβεβαιότητα μέγιστης τιμής 3%
	Ανάγνωση χρονικής στιγμής $I_{90}$	Ορθογωνική	25.00	$\sqrt{3}$	14.43	208.333	Sampling Rate παλμογράφου 20 Gs/s
	Ανάγνωση χρονικής στιγμής $I_{10}$	Ορθογωνική	25.00	$\sqrt{3}$	14.43	208.333	Sampling Rate παλμογράφου 20 Gs/s
	Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου	Κανονική 2	30.00	2	15.00	225.000	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Μη προσαρμογή αλυσίδας στον παλμογράφο.	Κανονική 2	30.00	2	15.00	225.000	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	25.00	2	12.5	156.250	Εργαστηριακή εμπειρία
					$U_c^2$	5880.432	
* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. EN 61000-4-2							

Ας σημειωθεί ότι, κατά τον υπολογισμό της παραμέτρου  $t_r$ , οι τιμές της συνεισφοράς της κάθε πηγής αβεβαιότητας δίνονται σε μονάδες χρόνου στα έγγραφα του εξοπλισμού. Έτσι η συνολική αβεβαιότητα υπολογίζεται σε ps. Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5) και (6), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα  $U_c = 76.684$  ps
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για  $k=2$ )  $U = 153.368$  ps

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
**Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,**  
**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**  
**Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.**

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
 Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Πίνακας 5. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο  $I_{30}$ .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (%)	Διαιρέτης*	$u_i$ (%)	$u_i^2$ (%) <sup>2</sup>	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	1.05	1	1.05	1.103	Πίνακας 1
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	5.08	1	5.08	25.806	Πίνακας 2
Τύπου Β	Αβεβαιότητα $I_p$	Κανονική 2	7.96	2	3.980	15.841	Πίνακας 3
	Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογωνική	0.17	$\sqrt{3}$	0.098	0.010	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	1.00	2	0.5	0.250	Εργαστηριακή εμπειρία
$U_c^2$						43.010	

\* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. EN 61000-4-2

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5) και (6), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα  $U_c = 6.558$  %
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για  $k=2$ )  $U = 13.116$  %

Πίνακας 6. Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα για την παράμετρο  $I_{60}$ .

	Συντελεστής Αβεβαιότητας	Κατανομή*	Τιμή (%)	Διαιρέτης*	$u_i$ (%)	$u_i^2$ (%) <sup>2</sup>	Πηγή
Τύπου Α	Επαναληψιμότητα	Κανονική 1	1.05	1	2.41	5.810	Πίνακας 1
	Αναπαραγωγιμότητα	Κανονική 1	5.08	1	5.08	25.806	Πίνακας 2
Τύπου Β	Αβεβαιότητα $I_p$	Κανονική 2	7.96	2	3.980	15.841	Πίνακας 3
	Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns	Ορθογωνική	0.17	$\sqrt{3}$	0.098	0.010	Πιστοποιητικό Διακρίβωσης
	Προσέγγιση στόχου	Κανονική 2	1.00	2	0.5	0.250	Εργαστηριακή εμπειρία
$U_c^2$						47.717	

\* Για τις κατανομές και τις αντίστοιχες τιμές των διαιρετών βλ. EN 61000-4-2

Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος  
 Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
 Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
 Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5) και (6), οι τιμές της Συνδυασμένης Τυπικής Αβεβαιότητας και της Διευρυμένης Αβεβαιότητας υπολογίζονται ως εξής:

- Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα  $U_c = 6.908 \%$
- Διευρυμένη Αβεβαιότητα (για  $k=2$ )  $U = 13.816 \%$

#### 4. Συμπεράσματα - συζήτηση

Οι αβεβαιότητες παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των μετρήσεων: εάν οι τιμές των αβεβαιοτήτων είναι αρκετά μεγάλες, η ποιότητα των μετρήσεων μπορεί να υποβαθμιστεί αρκετά, και να βλαφθεί η εγκυρότητα των παρατηρήσεων και συμπερασμάτων που βασίζονται σ' αυτές τις μετρήσεις.

Η μέθοδος υπολογισμού αβεβαιοτήτων που αναπτύχθηκε, έλαβε υπ' όψιν πηγές αβεβαιότητας, που μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα, ενώ οι παράμετροι που διατηρήθηκαν σταθερές (θερμοκρασία και υγρασία), θεωρήθηκε ότι, δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματά μας.

Οι τιμές των αβεβαιοτήτων που ευρέθησαν στην ανωτέρω εφαρμογή είναι περίπου διπλάσιες από τις ανεκτές από το Πρότυπο EN 61000-4-2, για τις αντίστοιχες παραμέτρους του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, καθώς οι τιμές εκείνες που ορίζει το Πρότυπο ορίζονται προς συμμόρφωση των γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες παράγουν εκφορτίσεις με πολύ πιο επαναλήψιμο τρόπο από αυτόν της πραγματικής εκφόρτισης ανθρώπου (Κατσιβέλης 2010). Οι τιμές μας με δεδομένο ότι, εν προκειμένω, έχουμε εκφόρτιση ανθρώπινου σώματος και όχι γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, είναι αρκετά χαμηλές και αυτό είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας των μετρήσεων που ελήφθησαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Τούτο, όμως, δεν σημαίνει ότι, η προσπάθεια για μείωσή τους δεν θα πρέπει να είναι διαρκής. Παλαιότερες εργαστηριακές μετρήσεις μπορεί να βοηθήσουν πολύ σε αυτό το σημείο. Καθώς ο αριθμός των γνωστών μετρήσεων θα μεγαλώνει (χρησιμοποιώντας το αυτό μετρητικό σύστημα, χωρίς σημαντικές αλλαγές), η τιμή της τυπικής απόκλισης (με την υπόθεση κανονικής κατανομής) θα μειώνεται. Έτσι, οι μετρούμενες τιμές θα δηλώνονται με μεγαλύτερη σιγουριά, καθώς η συνολική αβεβαιότητα θα μειώνεται αναλόγως.

Στο βαθμό που όλο και πιο «γρήγορες» μετρητικές συσκευές διατίθενται στην επιστημονική κοινότητα, και λιγότερο γνωστές πτυχές του φαινομένου φωτίζονται, απαιτούνται από τους ερευνητές αυστηρότερα όρια για τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αυτά τα νέα πειραματικά ευρήματα, που αποτελούν την επιστημονική βάση για τις αυστηρότερες απαιτήσεις, θα πρέπει να συνοδεύονται, πάντα, από υπολογισμό των αβεβαιοτήτων όπως αυτός που παρουσιάστηκε εδώ.

Με αφετηρία την παρούσα εργασία, προτείνεται η διερεύνηση της προοπτικής θέσπισης ανοχών, για τις αβεβαιότητες, στις μετρήσεις μεγεθών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Οι υπολογισμένες τιμές αβεβαιοτήτων, που παρουσιάζονται εδώ, μπορούν να συμβάλουν σ' αυτήν την κατεύθυνση. Βεβαίως, για να καταστεί εφικτός ο ορισμός συγκεκριμένων τιμών για τις ανοχές των αβεβαιοτήτων, είναι αναγκαία περαιτέρω διαβούλευση μεταξύ

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

των ερευνητών της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και αξιοποίηση των σχετικών εμπειριών τους.

### **Βιβλιογραφία**

European Standard EN 61000-4-2:2009: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test - Basic EMC Publication”.

UKAS M3003: “The expression of Uncertainty and Confidence in Measurement”, 2007

Παύλος Σ. Κατσιβέλης, “Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης”, Διδακτορική εργασία, Αθήνα, Νοέμβριος 2011.

Κατσιβέλης Π.Σ., Χριστοδούλου Χ.Α., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α : “Υπολογισμός αβεβαιότητας στις διακριβώσεις γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης”, 3<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Λάρνακα 5-6 Φεβρουαρίου 2010.

**Π. Σ. Κατσιβέλης, Ι. Φ. Γκόνος, Ι. Α. Σταθόπουλος**  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στη μέτρηση του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ανθρώπου.

4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου  
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

---