

Υπολογισμός αβεβαιότητας στις διακριβώσεις γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Π.Σ. Κατσιβέλης Χ.Α. Χριστοδούλου Ι.Φ. Γκόνος Ι.Α. Σταθόπουλος

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή της μεθοδολογίας διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και του υπολογισμού των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων. Το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009, που αφορά στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση, ορίζει τα όρια για τις τέσσερις παραμέτρους της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης, για συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. Το Πρότυπο προσπαθώντας να αναβαθμίσει το επίπεδο αξιοπιστίας των διακριβώσεων, εισάγει κατευθυντήριες οδηγίες για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στη διακρίβωση, θέτοντας και τα αντίστοιχα όρια. Στην εργασία αυτή υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες τύπου Α και Β των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, και ελέγχθηκε κατά πόσον αυτές ευρίσκονται εντός των ως άνω ορίων.

Abstract

This paper describes the procedure followed for the calibration of electrostatic discharge current generators and the calculation of the corresponding uncertainties. The EN 61000-4-2:2009 Standard, which deals with the electrostatic discharge, sets the specifications for all four parameters of the electrostatic discharge current waveform when a specific experimental setup is considered. In an effort to achieve greater reliability, the Standard introduces the concept of the uncertainty of measurements, specifying their acceptable value range. To meet this requirement, uncertainties of both type A and B were calculated, and compared to the Standard's specifications.

1. Εισαγωγή

Το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009 αφορά στην ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Στο Πρότυπο καθορίζονται:

- Τα διάφορα επίπεδα δοκιμής.
- Η διαδικασία των δοκιμών.
- Ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός.
- Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.
- Η διαδικασία διακρίβωσης και ο υπολογισμός της αβεβαιότητας.

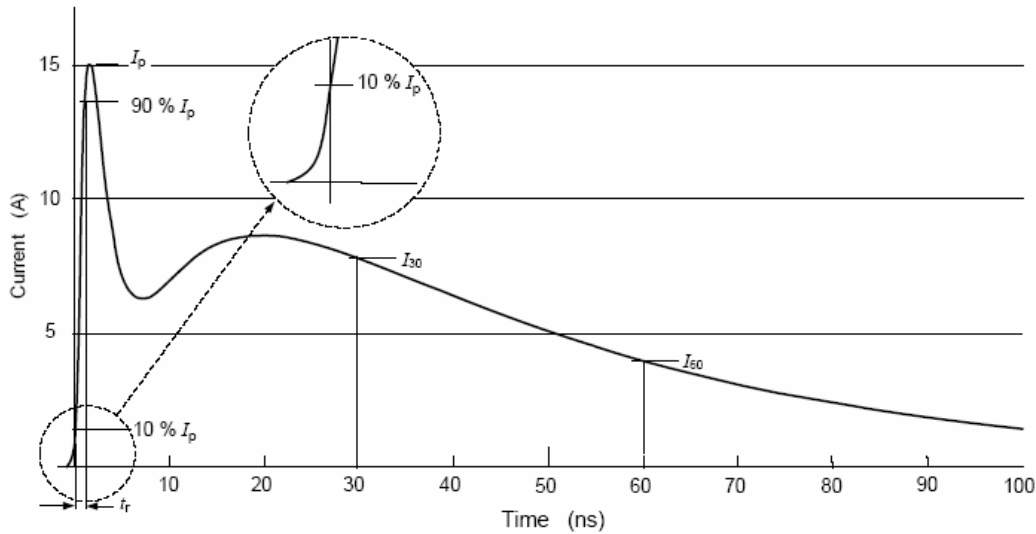
Η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009 (Σχήμα 1), μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Κατά τη διακρίβωση των γεννητριών, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009, πρέπει να ελέγχονται: α) η τάση φόρτισης της γεννήτριας και β) τα όρια των τεσσάρων βασικών παραμέτρων της κυματομορφής του ρεύματος:

Μέγιστο ρεύμα (I_p): Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή).

Χρόνος ανόδου (t_r): Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής του. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,6 ns και 1 ns.

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

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



Σχήμα 1: Ιδανική κυματομορφή του ρεύματος εκφόρτισης στα 4 kV

Στην τρέχουσα έκδοση του Προτύπου EN 61000-4-2:2009 έχουν γίνει αλλαγές στα περιθώρια απόκλισης, σε σχέση με την προηγούμενη έκδοσή του (ΕΛΟΤ EN 61000.04.02:1996). Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι τρέχουσες προδιαγραφές του ρεύματος εκφόρτισης καθώς και τα περιθώρια απόκλισής τους.

Τάση φόρτισης (kV)	Μέγιστη τιμή του ρεύματος (I_p) (A)	Χρόνος ανόδου (t_r) (ns)	Ρεύμα στα 30ns (I_{30}) (A)	Ρεύμα στα 60ns (I_{60}) (A)
±5%	±15%	±25%	±30%	±30%
2,0	7,5	0,8	4,0	2,0
4,0	15,0	0,8	8,0	4,0
6,0	22,5	0,8	12,0	6,0
8,0	30,0	0,8	16,0	8,0

Πίνακας 1: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής

Οι αλλαγές στις προδιαγραφές που πρέπει να πληροί η υπό εξέταση γεννήτρια αφορούν:

- στην ανοχή της πρώτης κορυφής του ρεύματος εκφόρτισης, η οποία αυξήθηκε (χαλάρωσε) από ±10% σε ±15%.
- τη διάρκεια του χρόνου ανόδου, που κυμαίνονταν από 0,7 έως 1ns, ενώ τώρα κυμαίνεται από 0,6 έως 1ns. Δηλαδή, από το παλιό $0,85 \pm 0,15$ ns, περάσαμε στο $0,80 \pm 0,20$ ns.
- στην υπόδειξη του Προτύπου του 2009 η κυματομορφή του ρεύματος να είναι εντός του $\pm 35\% \cdot I(t)$, για χρόνο από 2 ns έως 60 ns, όπου το $I(t)$, για τάση φόρτισης 4kV, δίνεται από την εξίσωση (1).

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

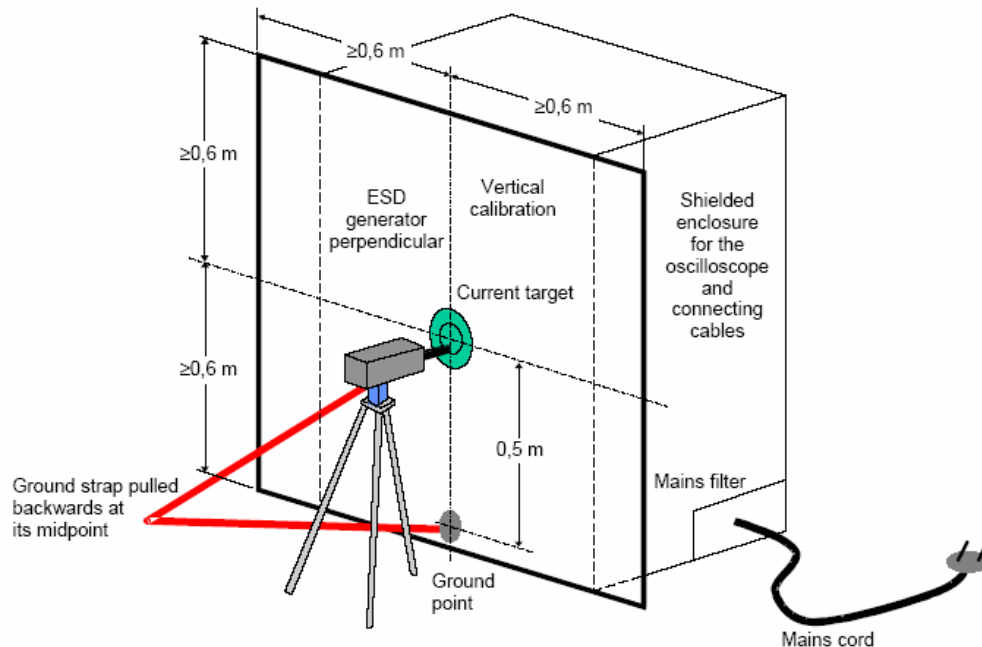
για τις εξής τιμές των χρονικών παραμέτρων τ_i ($i=1, 2, 3, 4$), των ρευμάτων I_1, I_2 και του εκθέτου n : $\tau_1=1,1$ ns; $\tau_2=2$ ns; $\tau_3=12$ ns; $\tau_4=37$ ns; $I_1=16,6$ A; $I_2=9,3$ A; $n=1,8$,

συναρτήσσει των οποίων οι παράμετροι k_1 και k_2 (για τις οποίες ισχύουν οι σχέσεις:

$$k_1 = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n \cdot \tau_2}{\tau_1} \right)^{\frac{1}{n}}} \text{ και } k_2 = e^{-\frac{\tau_3}{\tau_4} \left(\frac{n \cdot \tau_4}{\tau_3} \right)^{\frac{1}{n}}}$$

) λαμβάνουν τις τιμές $k_1=0,345511$ και $k_2=0,431547$.

Σημειώνεται ότι, αντίστοιχη υπόδειξη δεν υπήρχε στην προηγούμενη έκδοση του Προτύπου (1996).



Σχήμα 2: Διάταξη για τη διακρίβωση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Οι αλλαγές στις προδιαγραφές που αφορούν στη διαδικασία διακρίβωσης εντοπίζονται:

- στην αναλυτική περιγραφή της διακρίβωσης των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (Διαδικασία – Εξοπλισμός - Αβεβαιότητα),
- στην έννοια της αβεβαιότητας που εισάγεται. Το Πρότυπο του 2009, προσπαθώντας να επιτύχει υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας, προτείνει μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας και δίνει παράδειγμα υπολογισμού της,
- στο ότι ο παλμογράφος πρέπει να έχει εύρος συχνοτήτων τουλάχιστον 2GHz (έναντι απαιτήσεως 1GHz του παλιού Προτύπου),
- στην περιγραφή των απωλειών του συστήματος μέτρησης. Η τροποποίηση που έγινε είναι ότι, αντί να ζητείται προσδιορισμός των απωλειών του ομοαξονικού στόχου, πρέπει να προσδιορίζονται οι απώλειες της μετρητικής αλυσίδας που αποτελείται από το στόχο, τον εξασθενητή - ο οποίος, σε αντίθεση με την προηγούμενη έκδοση του Προτύπου (1996), είναι προσαρμοσμένος πάνω στο στόχο - και το ομοαξονικό καλώδιο. Έτσι, απλοποιείται ο χαρακτηρισμός του μετρητικού συστήματος, καθώς μόνον η μετρητική αλυσίδα και ο παλμογράφος χρειάζεται να χαρακτηρισθούν και όχι κάθε στοιχείο ξεχωριστά.
- στην περιγραφή της γειωμένης πλάκας. Η αλλαγή που έχει γίνει είναι ότι, η γειωμένη πλάκα περιγράφεται λεπτομερώς (ως προς το μέγεθος, τη θέση, κ.λπ.). Στο κέντρο της βρίσκεται τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη επαναληψιμότητα των μετρήσεων.
- στο ότι, κατά διαφοροποίηση έναντι της παλιάς έκδοσης του Προτύπου (1996), η γειωμένη μεταλλική επιφάνεια, στο κέντρο της οποίας βρίσκεται τοποθετημένος ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, δεν είναι σε οριζόντια διάταξη, αλλά σε κατακόρυφη και αυτό γιατί, με τον τρόπο αυτόν, εξασφαλίζεται η καλύτερη επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2, ο στόχος τοποθετείται στο κέντρο του επιπέδου, και το

σημείο γείωσης βρίσκεται σε κατακόρυφη απόσταση 0,5 m από το στόχο. Το καλώδιο της γείωσης είναι τραβηγμένο προς τα πίσω από το μέσο του, ώστε να σχηματίζει ένα ισοσκελές τρίγωνο.

- στο ότι, τέλος, η γεννήτρια στηρίζεται πάνω σε ένα τρίποδο και θα πρέπει να τροφοδοτείται με τον ίδιο τρόπο που θα τροφοδοτείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, καμία από τις παραπάνω λεπτομέρειες, σχετικά με τη διακρίβωση της γεννήτριας, δεν αναφερόταν στο προηγούμενο Πρότυπο (1996).

2. Διακρίβωση ηλεκτροστατικών γεννητριών στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα υπάρχουν δέκα, τουλάχιστον, γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που, είτε διακρίβώνονται σε εργαστήρια του εξωτερικού, είτε δεν διακρίβώνονται καθόλου. Επομένως, μέχρι πρόσφατα, έως την διαπίστευση του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., δεν υπήρχε στην Ελλάδα κανένα διαπιστευμένο εργαστήριο διακρίβωσης, που να έχει την διακρίβωση ηλεκτροστατικών γεννητριών στο πεδίο διαπίστευσης του. Έτσι, δεν υπήρχε δυνατότητα για γρήγορη και αξιόπιστη διακρίβωση αυτών των γεννητριών. Η διακρίβωση απαιτούσε χρονικό διάστημα περί τον ένα μήνα, γεγονός που, είτε έκανε απαγορευτική τη διακρίβωση, είτε υποχρέωνε τα αντίστοιχα εργαστήρια δοκιμών στην αγορά δύο, τουλάχιστον, γεννητριών. Αυτό οδήγησε το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ να προχωρήσει, μετά τη διαπίστευσή του ως εργαστήριο δοκιμών, και στη διαπίστευσή του ως εργαστήριο διακρίβωσης γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Η διακρίβωση μιας γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι εξαιρετικά σημαντική για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας, της επαναληψιμότητας αλλά και της ιχνηλασιμότητας της δοκιμής. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη διακρίβωση, σύμφωνα με το Πρότυπο του 2009, είναι:

- παλμογράφος με επαρκές φάσμα συχνοτήτων (≥ 2 GHz),
- μετρητική αλυσίδα που περιλαμβάνει τον ομοαξονικό στόχο, τον εξασθενητή (με επαρκή ισχύ) και το ομοαξονικό καλώδιο,
- βολτόμετρο συνεχούς τάσεως, το οποίο είναι ικανό να μετρήσει τάση τουλάχιστον 15 kV,
- κατακόρυφο επίπεδο διακρίβωσης, με τον ομοαξονικό στόχο τοποθετημένο κατάλληλα, έτσι ώστε να απέχει τουλάχιστον 0,6 m από οποιαδήποτε κορυφή του επιπέδου.

Προβλήματα που έπρεπε να επιλυθούν, κατά τη διαπίστευση του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων (EYT), είχαν να κάνουν με την αναγκαστική διακρίβωση του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις διακρίβώσεις σε διαπιστευμένα εργαστήρια του εξωτερικού, καθώς μόνο ο παλμογράφος μπορούσε να διακριβωθεί στο EIM. Τα εργαστήρια διακρίβωσης στην Ελλάδα περιορίζονται στη διακρίβωση τάσης έως 1kV, ενώ το Πρότυπο απαιτεί συνεχή τάση τουλάχιστον 8kV για τις εκκενώσεις επαφής και 16kV για τις εκκενώσεις αέρα. Η μία εκ των τριών γεννητριών του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων μπορεί να φορτισθεί έως τα 32kV.

3. Ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων (Περιγραφή πειραματικής διάταξης)

Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. είναι διαπιστευμένο από το ΕΣΥΔ. Στο πεδίο διαπίστευσής του μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται: α) η διεξαγωγή δοκιμών ατρωσίας σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και β) η διακρίβωση γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για τη διεξαγωγή των διακρίβωσης, που ορίζει το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009, ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιείται, είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- παλμογράφος Tektronix / TDS 7254B,
- ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, με ενσωματωμένο εξασθενητή (attenuator) και κατάλληλο ομοαξονικό καλώδιο υψηλής συχνότητας Teseq / MD103,
- κλωβός Faraday,
- βολτόμετρο υψηλής τάσης Brandenburg / 149-04.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάστηκε η διάταξη, που προβλέπεται από το Πρότυπο, για τη διακρίβωση της γεννήτριας. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιείται είναι ο TDS 7254B της Tektronix, ο οποίος διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV με λειτουργικό σύστημα Windows 2000 για την αποθήκευση και επεξεργασία των μετρήσεων. Το εύρος ζώνης είναι 2,5 GHz, υπεκαλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η μέτρηση του εκχυόμενου ρεύματος κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση γίνεται μέσω κατάλληλου ομοαξονικού προσαρμοστή (Pellegrini target), που είναι ο απαραίτητος μετατροπέας ρεύματος (current transducer). Στο Εργαστήριο χρησιμοποιείται ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 103 της Teseq, που διαθέτει ενσωματωμένο εξασθενητή, σύμφωνα με το Πρότυπο, γιατί το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης έχει μεγάλες, σχετικά, τιμές (περίπου 3,5 A/kV) και, το αντίστοιχο σήμα πρέπει να έχει υποστεί εξασθένηση προ της εισαγωγής του στον παλμογράφο, ώστε να μην κινδυνεύσει από καταστροφή το αντίστοιχο κανάλι του παλμογράφου. 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 στο εσωτερικό του θαλάμου, όπου βρίσκεται ο παλμογράφος.

4. Αβεβαιότητα

Τέλος, το Πρότυπο του 2009, προσπαθώντας να αναβαθμίσει το επίπεδο αξιοπιστίας, εισάγει την έννοια της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης απαρτίζεται, γενικά, από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: Τις αβεβαιότητες Τύπου Α, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και τις αβεβαιότητες Τύπου Β, που υπολογίζονται με άλλα μέσα.

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

$$U_c(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (u_j - \bar{u})^2} \quad (2)$$

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

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δυο τύπων αβεβαιότητας.

Σύμφωνα με το Πρότυπο του 2009, για εργαστήρια τα οποία διεξάγουν διακριβώσεις συνιστώνται τα όρια αβεβαιότητας της δεύτερης στήλης του Πίνακα 2. Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ έχει επιτύχει σημαντικά μικρότερη αβεβαιότητα (Τρίτη στήλη πίνακα 2).

Παράμετρος	Όριο του Προτύπου του 2009	Αβεβαιότητα του ΕΥΤ
Χρόνος ανόδου t_r	$\leq 15\%$	$\leq 10\%$
Κορυφή του ρεύματος I_p	$\leq 7\%$	$\leq 5\%$
Ρεύμα στα 30 ns I_{30}	$\leq 7\%$	$\leq 5\%$
Ρεύμα στα 60 ns I_{60}	$\leq 7\%$	$\leq 5\%$

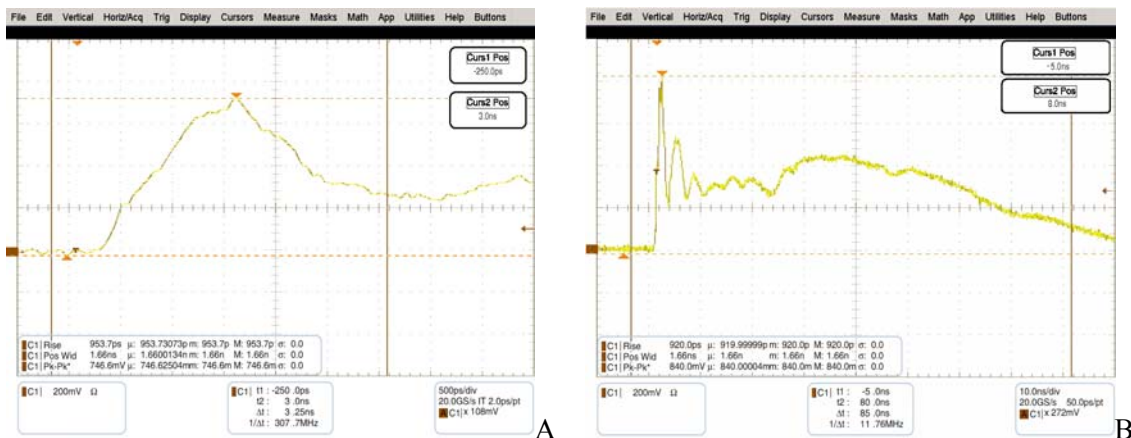
Πίνακας 2: Όρια αβεβαιότητας των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης.

5. Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν διακριβώσεις των γεννητριών: DITO της εταιρίας EMTEST και NSG-438, NSG-433 της εταιρίας Schaffner, που είναι διαθέσιμες στο Εργαστήριο. Καταγράψαμε το ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τάσεις φόρτισης ± 2 kV, ± 4 kV, ± 6 kV και ± 8 kV και υπολογίσαμε τις παραμέτρους του, οι οποίες πρέπει να είναι σύμφωνες με το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009.

Αρχικά καταγράφεται η τάση φόρτισης της κάθε γεννήτριας. Το σημαντικότερο σημείο σε αυτή τη μέτρηση είναι η επιλογή του βολτομέτρου υψηλής τάσης. Αυτό επιλέγεται με κριτήριο, αφενός, την υψηλή αντίσταση εισόδου (100 GΩ), ώστε να μην επηρεάζει το προς μέτρηση κύκλωμα, και, αφετέρου, τη δυνατότητα πραγματοποίησης όλων των μετρήσεων με χρήση της ίδιας κλίμακας τάσης.

Πραγματοποιούνται πέντε κρούσεις για κάθε επίπεδο τάσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι, για την καλύτερη εσοπτεία του φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, του οποίου η διάρκεια είναι μικρότερη από 200 nsec, οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιούνται με έμφαση, τόσο στη συνολική διάρκεια του φαινομένου (με καταγραφή της συνολικής κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης), όσο και στην αρχή του φαινομένου, δηλαδή μέχρι την αρχική κορυφή του ρεύματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διεξαγωγή των μετρήσεων και για τις δύο ανωτέρω περιπτώσεις με διαφορετικές ρυθμίσεις δειγματοληψίας. Η πρώτη ρύθμιση ήταν 10ns/div ενώ η δεύτερη 500ps/div. Στο Σχήμα 3 φαίνονται χαρακτηριστικές κυματομορφές του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.



Σχήμα 3: Κυματομορφές ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης +2kV.

A) Η αρχή της κυματομορφής, B) Ολόκληρη η κυματομορφή,

Η κυματομορφή της τάσης που καταγράφεται μετατρέπεται σε ρεύμα, με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Φώτη και άλλους (2005). Τα ζεύγη σημείων Χρόνου – Ρεύματος που λαμβάνονται, αποθηκεύονται σε ηλεκτρονική μορφή και σχεδιάζεται η κυματομορφή Χρόνου – Ρεύματος, με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου, υλοποιημένου σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab. Ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε δέχεται ως είσοδο τα ζεύγη τιμών Χρόνου – Ρεύματος, και υπολογίζει διαδοχικά: το I_p (μέγιστη τιμή ρεύματος), τις χρονικές στιγμές t_{10} , και t_{90} (οι οποίες αντιστοιχούν στις τιμές ρεύματος $I_p \cdot 10\%$, και $I_p \cdot 90\%$), το t_r (χρόνο ανόδου), έπειτα την τιμή ρεύματος που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή $t_{10} + 30ns$ (I_{30}), την τιμή ρεύματος που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή $t_{10} + 60ns$ (I_{60}). Στη συνέχεια, ελέγχεται κατά πόσον οι τέσσερις παράμετροι του ρεύματος (I_p , t_r , I_{30} , I_{60}) είναι εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο EN 61000-4-2:2009.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της αβεβαιότητας τύπου A για τις 4 παραμέτρους του ρεύματος της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και της τάσης φόρτισης (U_{dc}).

α/α μέτρησης	I_p (A)	t_r (ns)	I_{30} (A)	I_{60} (A)	U_{dc} (kV)
1η	14,7704	0,7233	8,3832	4,8752	3,968
2η	15,1696	0,7128	8,4089	4,5651	3,950
3η	14,9700	0,7039	8,7400	4,2128	3,949
4η	15,1751	0,6940	8,5504	4,4236	3,951
5η	15,1696	0,7466	8,5828	4,5323	3,953
Μέση τιμή (μ)	15,0509	0,7161	8,5331	4,5218	3,9542
Τυπική απόκλιση (s)	0,1795	0,0202	0,1445	0,2408	0,0079
Αβεβαιότητα τύπου A (s/√5)	0,0803	0,0090	0,0646	0,1077	0,0035
Αβεβαιότητα τύπου A (s/√5/μ*100%)	0,533%	1,261%	0,757%	2,382%	0,089%

Πίνακας 3: Τιμές των παραμέτρων του ρεύματος εκφόρτισης και της αβεβαιότητας τύπου A για τάση φόρτισης +4 kV της γεννήτριας Schaffner NSG433.

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας τύπου B, για καθένα, από τα προς διακρίβωση, μεγέθη λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράγοντες αβεβαιότητας (Παράρτημα E του ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009):

- Για το ρεύμα εκφόρτισης έχουμε αβεβαιότητα που οφείλεται (Πίνακας E.2 του ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009) στην:
 - Κάθετη ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου (η τιμή δίνεται από το πιστοποιητικό διακρίβωσης του παλμογράφου και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Μετρητική αλυσίδα στόχου – εξασθενητή - καλωδίου (η τιμή δίνεται από τα αντίστοιχα πιστοποιητικά διακρίβωσης και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Μη προσαρμογή της αλυσίδας «στόχου – εξασθενητή – καλωδίου» προς τον παλμογράφο (συνήθως δίνεται από τα εγχειρίδια του κατασκευαστή του εξοπλισμού και ακολουθεί κατανομή U).
 - Επαναληψιμότητα (αβεβαιότητα τύπου A, κανονική κατανομή, βλέπε Πίνακα 3).
- Για το χρόνο ανόδου έχουμε αβεβαιότητα που οφείλεται (Πίνακας E.1 του ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009) στην:
 - Ανάγνωση της μέγιστης τιμής (η τιμή έχει υπολογισθεί στο προηγούμενο βήμα και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Ανάγνωση του χρόνου I_{90} (από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή του παλμογράφου, ακολουθεί ορθογώνια κατανομή)
 - Ανάγνωση του χρόνου I_{10} (από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή του παλμογράφου, ακολουθεί ορθογώνια κατανομή)
 - Οριζόντια ανάγνωση της ένδειξης του παλμογράφου (η τιμή δίνεται από το πιστοποιητικό διακρίβωσης του παλμογράφου και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Μετρητική αλυσίδα «στόχου – εξασθενητή – καλωδίου» (η τιμή δίνεται από τα αντίστοιχα πιστοποιητικά διακρίβωσης και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Επαναληψιμότητα (αβεβαιότητα τύπου A, κανονική κατανομή, βλέπε Πίνακα 3)
- Για το I_{30} έχουμε αβεβαιότητα που οφείλεται (Πίνακας E.3 του ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009) στην:
 - Αβεβαιότητα υπολογισμού του I_p (η τιμή έχει υπολογισθεί σε προηγούμενο βήμα και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Ανάγνωση του ρεύματος στα 30 ns (από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή του παλμογράφου, ακολουθεί ορθογώνια κατανομή)
 - Επαναληψιμότητα (αβεβαιότητα τύπου A, κανονική κατανομή, βλέπε Πίνακα 3)

- Για το I_{60} έχουμε αβεβαιότητα που οφείλεται (Πίνακας Ε.3 του ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009) στην:
 - Αβεβαιότητα υπολογισμού του I_p (η τιμή έχει υπολογισθεί σε προηγούμενο βήμα και ακολουθεί κανονική κατανομή).
 - Ανάγνωση του ρεύματος στα 60 ns (από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή του παλμογράφου, ακολουθεί ορθογώνια κατανομή)
 - Επαναληψιμότητα (αβεβαιότητα τύπου A, κανονική κατανομή, βλέπε Πίνακα 3)
- Για την τάση φόρτισης έχουμε αβεβαιότητα που οφείλεται στο:
 - σφάλμα μέτρησης του οργάνου (από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή του οργάνου, ακολουθεί ορθογώνια κατανομή).
 - ολίσθηση οργάνου (από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης του οργάνου, ακολουθεί κανονική κατανομή)
 - μέγιστο σφάλμα της διακρίβωσης οργάνου (από το πιστοποιητικό διακρίβωσης του οργάνου, ακολουθεί κανονική κατανομή)
 - Επαναληψιμότητα (αβεβαιότητα τύπου A, κανονική κατανομή, βλέπε Πίνακα 3)

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας τύπου B, χρησιμοποιείται η σχέση (3):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (3)$$

όπου u_i η αβεβαιότητα που εισάγει στη μέτρηση κάθε ένας από τους παράγοντες αβεβαιότητας.

6. Απολογισμός εργασίας και προτάσεις

Η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με τη διακρίβωση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Αναπτύχθηκε μεθοδολογία για τη διακρίβωση των διαθέσιμων γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Εκτός των τεσσάρων παραμέτρων ρεύματος (I_p , t_r , I_{30} , I_{60}) και της τάσης φόρτισης της γεννήτριας υπολογίστηκαν και οι αβεβαιότητες των μετρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν, και ελέγχθηκε κατά πόσον ευρίσκονται εντός των ορίων που θέτει το Πρότυπο. Επίσης, αναπτύχθηκε λογισμικό για τον έλεγχο της συμμόρφωσης προς την υπόδειξη του Προτύπου, η κυματομορφή του ρεύματος να είναι εντός του $65\% \cdot I(t)$ και $135\% \cdot I(t)$, για χρόνο από 2 ns έως 60 ns, όπου το $I(t)$ δίνεται από την αναλυτικό τύπο που ορίζει το Πρότυπο.

7. Βιβλιογραφία

ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:2009 «Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 2: Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Βασικό δημοσίευμα EMC».

ΕΛΟΤ EN 61000-4-2:1996 «Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 2: Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Βασικό δημοσίευμα EMC».

Γ. Π. Φώτης, Ι. Φ. Γκόνο, Ν. Χ. Ηλία, Ι. Α. Σταθόπουλος: Μέτρηση ρεύματος και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά την επαλήθευση γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, Μετρολογία 2005.