

Διαδικασία επαλήθευσης εξοπλισμού και υπολογισμού αβεβαιότητας για μετρήσεις υψηλών τάσεων

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου, Γεώργιος Π. Φώτης, Ιωάννης Φ. Γκόνος, Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780
e-mail: Christ_fth@yahoo.gr, gfortis@gmail.com, igonos@ieee.com, stathop@power.ntua.gr

Περίληψη

Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση διαφόρων δοκιμών, πρέπει να επαληθεύεται πριν και μετά τη δοκιμή, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι λειτουργεί σωστά. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται διαδικασίες επαλήθευσης εξοπλισμού και υπολογισμού αβεβαιότητας για μετρήσεις υψηλών τάσεων, και συγκεκριμένα για την περίπτωση της γεννήτριας VLF, της γεννήτριας κρουστικών τάσεων και της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π..

1. Εισαγωγή

Πριν την πραγματοποίηση δοκιμών και ελέγχων σε ηλεκτρολογικό υλικό, είναι απαραίτητη η επαλήθευση του εξοπλισμού, που θα χρησιμοποιηθεί, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται, κάθε φορά, ότι λειτουργεί σωστά και σύμφωνα με τις απαιτήσεις, που ορίζει το αντίστοιχο Πρότυπο της δοκιμής. Η επαλήθευση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις που ο εξοπλισμός μεταφέρεται εκτός εργαστηρίου, οπότε και καταπονείται, τόσο κατά τη μεταφορά, όσο και κατά την έκθεσή του σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιότητας της συσκευής VLF, της γεννήτριας κρουστικών τάσεων και της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., καθώς και υπολογισμού αβεβαιότητας για τις διεξαγόμενες με τον παραπάνω εξοπλισμό μετρήσεις.

2. Η έννοια της διακρίβωσης και της επαλήθευσης

Με τον όρο **διακρίβωση** (calibration) εννοείται το σύνολο των ενεργειών, βάσει των οποίων αποκαθίσταται, κάτω από ορισμένες συνθήκες, μια σχέση ανάμεσα στις ποσοτικές ενδείξεις ενός οργάνου ή συστήματος μέτρησης και στις αντίστοιχες τιμές, όπως αυτές υλοποιούνται από τα αντίστοιχα Πρότυπα. Σκοπός της διακρίβωσης είναι:

- να αποκατασταθεί μια σχέση ανάμεσα στην ένδειξη του οργάνου και τη θεωρούμενη αληθή τιμή
- να υπολογιστεί η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις μετρήσεις [1].

Η διακρίβωση είναι μια διαδικασία ακριβής, που γίνεται από διαπιστευμένα εργαστήρια και ελέγχεται ένα πλήθος παραμέτρων. Είναι μια διαδικασία υψηλού κόστους και πραγματοποιείται, συνήθως, με χρήση ενός συστήματος αναφοράς.

Αντίθετα, η **επαλήθευση** (verification) είναι μια πιο γρήγορη και απλή διαδικασία, που γίνεται πριν από κάποια δοκιμή για να βεβαιωθούμε ότι ο εξοπλισμός λειτουργεί σωστά. Κατά την επαλήθευση γίνεται υπολογισμός της αβεβαιότητας με την οποία μετράται το

μέγεθος που ενδιαφέρει σε κάθε περίπτωση (για παράδειγμα: η τάση εξόδου της συσκευής VLF, η μέγιστη τιμή και οι χρόνοι μετώπου και ημίσειας εύρους στην περίπτωση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων, το ρεύμα εκφόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων).

3. Υπολογισμός αβεβαιοτήτων

Με τον όρο **αβεβαιότητα** προσδιορίζεται το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής από το όργανο (\pm), μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Οι αβεβαιότητες διακρίνονται σε τύπου Α και τύπου Β.

Η **αβεβαιότητα τύπου Α (random uncertainty, U_r)** υπολογίζεται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και, για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς, προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις : [2]

α) U_r για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ. 10)

Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση:

$$U_r = \frac{ts_r}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

όπου t ο συντελεστής Student (Student's factor), ανάλογα με το εκάστοτε επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level, P) και s_r η τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων.

β) U_r μεγάλο αριθμό μετρήσεων ($n \gg 10$)

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (που είναι και αυτό που ζητείται συνήθως) και για ένα δείγμα με περισσότερες από 10 μετρήσεις ($n \gg 10$), ο συντελεστής Student t μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή κάλυψης k . Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα

της μέσης τιμής είναι:
$$U_r = \frac{ks_r}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

γ) Χρησιμοποίηση προϋπάρχουσας γνώσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν υφίσταται προηγούμενη πληροφορία για τη συμπεριφορά του οργάνου ή της μεθόδου μέτρησης. Η πληροφορία, αυτή αφορά μια ήδη γνωστή τυπική απόκλιση s_r , η οποία υπολογίστηκε από μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παρόμοιου μεγέθους, σε παρόμοιες συνθήκες μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση του μικρού τρέχοντος δείγματος μετρήσεων, χρησιμοποιείται η παλαιότερα υπολογισμένη s_r και η αβεβαιότητα

λαμβάνεται ίση με:
$$U_r = \frac{ks_r}{\sqrt{n_2}} \quad (3)$$

Αβεβαιότητα τύπου Β (systematic uncertainty, U_s) έχουμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή, η αβεβαιότητα υπολογίζεται αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη πληροφορία, σχετικά με την πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, έτσι ώστε να οικοδομηθεί μια εικόνα για την πιθανή κατανομή των τιμών του μεγέθους. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατόν να προέρχονται από :

- πιστοποιητικά διακρίβωσης
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις
- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης
- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [1]

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου Β είναι [2]:

$$U_s = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (4)$$

όπου k ο συντελεστής κάλυψης, s_{sa} η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής και s_{sg} η τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής

Η ολική αβεβαιότητα u_{total} δίνεται από τη σχέση :

$$u_{total} = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (5)$$

Στις περιπτώσεις όπου η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους Y πραγματοποιείται έμμεσα, δηλαδή στη βάση απευθείας μετρήσεων μιας σειράς πρωτογενών μεγεθών X_i , $i=1,2,\dots,N$, η μετρούμενη τιμή y_i του Y προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών x_1, x_2, \dots, x_N των άμεσα μετρούμενων μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης $Y=M(X_1, X_2, \dots, X_N)$. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων [1]:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial M}{\partial x_i} \frac{\partial M}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (6)$$

όπου u_{x_i} είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους X_i και $u(x_i, x_j)$ είναι η συμμεταβλητότητα μεταξύ X_i και X_j . Συνήθως στις δοκιμές τα μεγέθη X_1, X_2, \dots, X_N θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή :

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 \quad (7)$$

4. Επαλήθευση της συσκευής VLF

Οι δοκιμές με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) είναι μία τεχνική που εφαρμόζεται σε καλώδια μέσης τάσης, για να διαπιστωθεί εάν η εγκατάσταση του καλωδίου έγινε με επιτυχία οπότε το καλώδιο μπορεί να ηλεκτρισθεί χωρίς πρόβλημα. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται μία τάση 2-3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής και συχνότητας συνήθως 0,1Hz μεταξύ αγωγού και μεταλλικής θωράκισης του καλωδίου για χρόνο 15-60min, ανάλογα με το Πρότυπο. Κριτήριο της επιτυχούς απόληξης της δοκιμής είναι η μη διάσπαση της μόνωσης. Οι συσκευές VLF που διατίθενται από τις διάφορες εταιρίες έχουν μικρό σχετικά όγκο και βάρος και μεταφέρονται εύκολα στον τόπο της δοκιμής [3].

Οι δοκιμές VLF γίνονται στον τόπο εγκατάστασης του καλωδίου, πάντα εκτός εργαστηρίου, για αυτό είναι απαραίτητη η επαλήθευση (verification) της συσκευής VLF, μετά τη μεταφορά της στο σημείο διεξαγωγής των δοκιμών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια αντίστοιχη διαδικασία επαλήθευσης. Από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. έχει αναπτυχθεί μια διαδικασία επαλήθευσης και προτείνεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60-2 [2], χρησιμοποιώντας μια απλή διάταξη αποτελούμενη από τη συσκευή VLF, έναν ωμικό καταμεριστή και ένα όργανο καταγραφής τάσης κατάλληλα διακριβωμένο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Το όργανο με το οποίο μετράται η τάση

μπορεί να είναι ένα πολύμετρο, το οποίο μετρά ενδεικνύμενη τιμή (rms value), ή ένας παλμογράφος, ο οποίος μας δίνει την κυματομορφή της τάσης VLF.

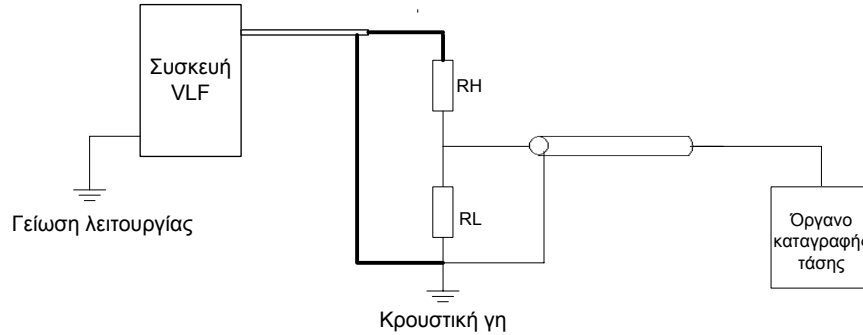
Η τάση εξόδου της συσκευής VLF ισούται με το γινόμενο του λόγου καταμερισμού κ επί τη μετρούμενη τάση στο πολύμετρο ή στον παλμογράφο :

$$U_{high} = \kappa U_{low} = \left(1 + \frac{R_H}{R_L}\right) \cdot U_{low} \quad (8)$$

όπου U_{high} : η τάση εξόδου της συσκευής VLF

κ : ο λόγος καταμερισμού

U_{low} : η μετρούμενη τάση με το πολύμετρο ή τον παλμογράφο



Σχήμα 1: Διάταξη για την επαλήθευση της συσκευής VLF

Σύμφωνα με τον νόμο διάδοσης αβεβαιοτήτων, η αβεβαιότητα με την οποία μετράται η

υψηλή τάση είναι: $u_{high} = \kappa U_{low} \sqrt{\frac{u_{\kappa}^2}{\kappa^2} + \frac{u_{U_{low}}^2}{U_{low}^2}}$ (9)

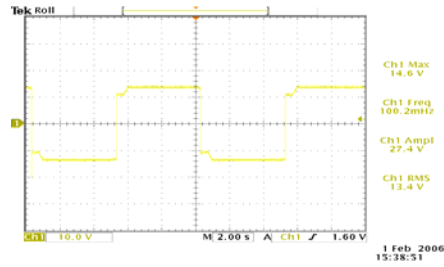
όπου u_{high} η αβεβαιότητα για την υψηλή τάση εξόδου της συσκευής VLF, u_{κ} η αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού κ και $u_{U_{low}}$ η αβεβαιότητα με την οποία μετράται η χαμηλή τάση στο όργανο

Η αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού κ είναι, σύμφωνα με το νόμο διάδοσης

αβεβαιοτήτων : $u_{\kappa} = \frac{R_H}{R_L} \sqrt{\frac{u_{R_H}^2}{R_H^2} + \frac{u_{R_L}^2}{R_L^2}}$ (10)

όπου u_{R_H} και u_{R_L} οι αβεβαιότητες, με τις οποίες μετρήθηκαν οι αντιστάσεις του καταμεριστή και οι οποίες προκύπτουν από το συνδυασμό των αβεβαιοτήτων τύπου A και τύπου B. Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται ύστερα από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των αντιστάσεων με ειδικό όργανο μέτρησης αντιστάσεων και κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, ενώ οι αβεβαιότητες τύπου B αφορούν το όργανο μέτρησης αντιστάσεων και προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά του οργάνου και τα πιστοποιητικά διακρίβωσης. Άλλος τρόπος για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας του λόγου καταμερισμού είναι η μέτρηση του με διακριβωμένο μετρητή σχέσης καταμερισμού (ratio meter) ή η σύγκρισή του με πρότυπο καταμεριστή (reference divider) και εφαρμογή της διαδικασίας που προβλέπει το Πρότυπο IEC 60-2 [2].

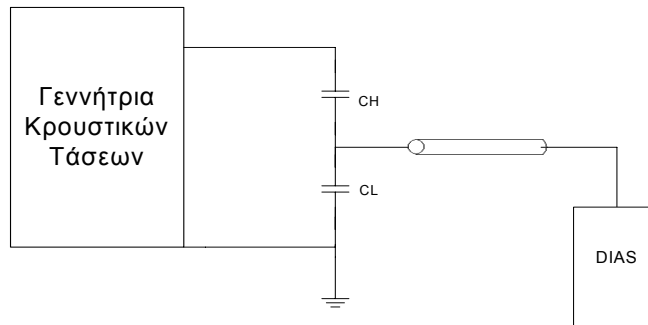
Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας με την οποία μετράται η χαμηλή τάση στον παλμογράφο (U_{low}), καταγράφηκε ένας αριθμός παλμογραφημάτων (στιγμιότυπων) της τάσης VLF (Σχήμα 2), από τη στατιστική επεξεργασία των οποίων υπολογίζεται η αβεβαιότητα τύπου A. Η αβεβαιότητα τύπου B προκύπτει από τα χαρακτηριστικά και τα πιστοποιητικά διακρίβωσης του οργάνου μέτρησης.



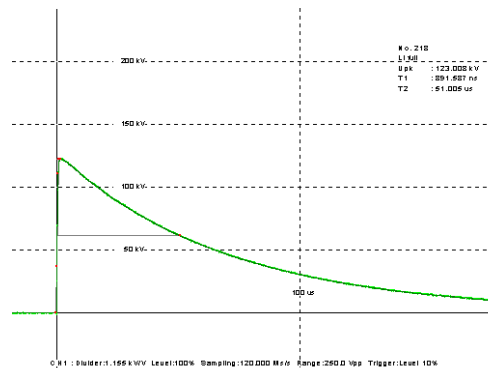
Σχήμα 2 : Παλμογράφημα VLF τάσης συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής

5. Επαλήθευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων

Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π διαθέτει γεννήτρια κρουστικών τάσεων, η οποία χρησιμοποιείται τόσο για ερευνητικούς - διδακτικούς σκοπούς όσο και για την πραγματοποίηση δοκιμών σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Η γεννήτρια είναι κατασκευής MICAFIL (TYPE SG31.16, NR60 H223). Είναι οκταβάθμια των 0,1μF ανά βαθμίδα, με δυνατότητα παραγωγής κρουστικών τάσεων 1,2/50 έως 1600kV και τάσεων ζεύξης 3...60/2500μs τιμής έως 1200kV. Για την επαλήθευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων χρησιμοποιήθηκε διάταξη αποτελούμενη από ένα χωρητικό καταμεριστή και το σύστημα DIAS (Digital Impulse Analyzing System) (Σχήμα 3). Το σύστημα DIAS είναι ένα ψηφιακό σύστημα για την καταγραφή, μέτρηση και ανάλυση κρουστικών τάσεων και ρευμάτων διαφόρων μορφών, το οποίο συνδέεται με τον καταμεριστή μέσω ομοαξονικού καλωδίου. Το DIAS καταγράφει τη μορφή, τη μέγιστη τιμή και τους χρόνους της κρουστικής τάσης (Σχήμα 4)



Σχήμα 3: Διάταξη για την επαλήθευση της γεννήτριας κρουστικών τάσεων



Σχήμα 4: Κυματομορφή κρουστικής τάσης καταγεγραμμένη από το σύστημα DIAS

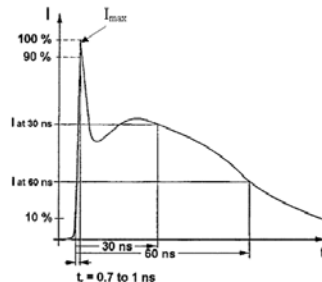
Έχοντας ρυθμίσει τη γεννήτρια σε συγκεκριμένη μέγιστη τιμή κρουστικής τάσης και συγκεκριμένους χρόνους μετώπου και ημίσεος εύρους, καταγράφονται μέσω του DIAS δέκα κυματομορφές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, το σύστημα DIAS εμφανίζει αριθμητικά, με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων, τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης και τους χρόνους μετώπου και ημίσεος εύρους. Από τη στατιστική επεξεργασία των καταγεγραμμένων τιμών σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60-2 (σχέση (1)) προκύπτει η αβεβαιότητα τύπου A.

Πηγές σφαλμάτων στην παραπάνω διάταξη αποτελούν ο χωρητικός καταμεριστής και το σύστημα DIAS. Η αβεβαιότητα για το χωρητικό καταμεριστή προκύπτει με μέτρηση του λόγου καταμερισμού με μετρητή σχέσης καταμερισμού (ratio meter) ή σύγκριση με πρότυπο καταμεριστή, ενώ η αβεβαιότητα για το σύστημα DIAS προκύπτει από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης του συστήματος. Να σημειωθεί ότι η αβεβαιότητα τύπου B που προέρχεται από το σύστημα DIAS είναι διαφορετική για τη μέγιστη τιμή και τους χρόνους της κρουστικής τάσης. Συνδυάζοντας τις αβεβαιότητες τύπου A και B (σχέση (5)) υπολογίζεται η ολική αβεβαιότητα για τη μέγιστη τιμή και τους χρόνους της κρουστικής τάσης.

Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί έναν γρήγορο και εύκολο τρόπο για να διαπιστωθεί κατά πόσον η κυματομορφή της κρουστικής τάσης που παράγει η γεννήτρια πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές για την πραγματοποίηση μιας δοκιμής. Η επαλήθευση είναι δυνατόν να γίνει και με τη χρήση ενός σπινθηριστή σφαιρών σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60-2 [2], αλλά στην περίπτωση αυτή γίνεται επαλήθευση μόνο για τη μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης, χωρίς να υπολογίζεται η αβεβαιότητα των χρόνων μετώπου και ημίσεος εύρους της κυματομορφής.

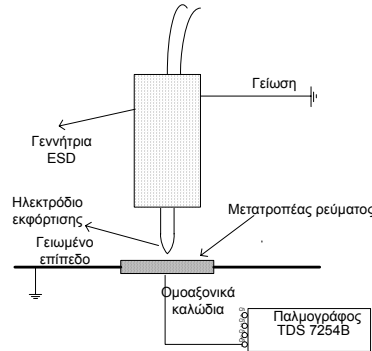
6. Επαλήθευση γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση δοκιμών ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [4]. Το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. διαθέτει γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων της εταιρίας Schaffner (NSG-438), η οποία παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30kV. Στο Σχήμα 5 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, που ορίζει το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [4].

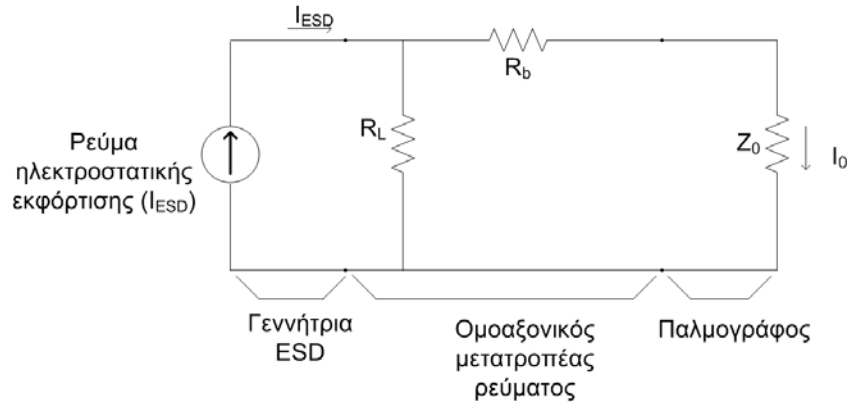


Σχήμα 5: : Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 [4]

Για την επαλήθευση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων χρησιμοποιείται η διάταξη του Σχήματος 6, ενώ στο Σχήμα 7 φαίνεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο της διάταξης για την dc συνιστώσα της [5].



Σχήμα 6: Διάταξη μέτρησης του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης



Σχήμα 7: Ισοδύναμο κύκλωμα της μετρητικής διάταξης στην dc ανάλυση [5]

Το ρεύμα εκφόρτισης δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{ESD} = \frac{C \cdot V_{out}}{Z_0} \quad (11)$$

$$C = C_{CT} \cdot C_A \quad (12)$$

$$C_{CT} = \frac{I_{ESD}}{I_0} = \frac{R_L + R_b + Z_0}{R_L} \quad (13)$$

όπου I_{ESD} είναι το πλάτος του ρεύματος εκφόρτισης, V_{out} η μετρούμενη από τον παλμογράφο τάση εξαιτίας του ρεύματος I_0 (Σχήμα 7), C είναι ένας συντελεστής μετατροπής, ενώ C_{CT} και C_A είναι οι συντελεστές μετατροπής του ομοαξονικού προσαρμοστή και του εξασθενητή αντίστοιχα. Οι τιμές των R_L και R_b μπορούν να βρεθούν μετρώντας την dc αντίσταση του ομοαξονικού προσαρμοστή. Η αντίσταση φόρτισης R_L είναι η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού ηλεκτροδίου (δίσκου) και του εξωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και είναι ίση με $2,018 \pm 0,036 \Omega$. Η R_b είναι η αντίσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του εσωτερικού ηλεκτροδίου του ομοαξονικού προσαρμοστή και ισούται με $48,964 \pm 0,079 \Omega$. Για τον υπολογισμό αυτών των δύο τιμών (R_L και R_b) γίνονται 20 μετρήσεις και εξάγεται ο μέσος όρος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα της μέτρησης. Από την (13) υπολογίζεται η τιμή του C_{CT} όπου $C_{CT} = 50,0406 \approx 50$.

Δεδομένου ότι $C_A=10$ και $Z_0=50 \Omega$, προκύπτει ότι 1 V στον παλμογράφο αντιστοιχεί (περίπου) σε ρεύμα εκφόρτισης 10A, αφού:

$$(11) \Rightarrow I_{ESD} = 10,0081 \cdot V_{out} \quad (14)$$

Η συνολική αβεβαιότητα, u_c για το πλάτος του ρεύματος, προκύπτει από το συνδυασμό των αβεβαιοτήτων τύπου A και B, βάσει της (9) είναι [5]:

$$u_c(I) = \sqrt{u_{Re pMeas}^2 + u_{cable}^2 + u_{time}^2 + S_{CT}^2 u_{CT}^2 + S_{CA}^2 u_{CA}^2 + S_{VR}^2 u_{VR}^2 + u_{Display}^2 + u_{mis}^2} \quad (15)$$

όπου S είναι ο γενικός συμβολισμός για το συντελεστή ευαισθησίας. Οι ευαισθησίες S_{CT} , S_{CA} , S_{VR} προκύπτουν από τις (11) και (12) ως εξής:

$$S_{CT} \equiv \frac{\partial I}{\partial C_{CT}} = \frac{C_A V_R}{Z_o} \quad (16)$$

$$S_{CA} \equiv \frac{\partial I}{\partial C_A} = \frac{C_{CT} V_R}{Z_o} \quad (17)$$

$$S_{VR} \equiv \frac{\partial I}{\partial V_R} = \frac{C_{CT} C_A}{Z_o} \quad (18)$$

Οι αβεβαιότητες $u_{Re pMeas}$, u_{cable} , u_{time} , u_{CT} , u_{CA} υπολογίζονται πειραματικά, ενώ οι αβεβαιότητες u_{VR} , $u_{Display}$, u_{mis} προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά και τα πιστοποιητικά διακρίβωσης των οργάνων.

Αναλυτικά:

- $u_{Re pMeas}$: Η αβεβαιότητα τύπου A που προκύπτει από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των I_{max} , I_{30} , I_{60} , που καταγράφονται στον παλμογράφο.
- u_{cable} : Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την σύνδεση καλωδίου και προσαρμοστή. Η διαδικασία υπολογισμού της περιγράφεται αναλυτικά στο [5].
- u_{time} : Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ανακρίβεια της μέτρησης του διαφορικού χρόνου του παλμογράφου. Ο παράγων αυτός λαμβάνεται υπόψη μόνο στους υπολογισμούς για το I_{30} και I_{60} . Για τον υπολογισμό αυτής της αβεβαιότητας λαμβάνονται δέκα μετρήσεις και υπολογίζονται οι διαφορές $|I_{30,2} - I_{30}|$ και $|I_{60,2} - I_{60}|$. Από το μέσο όρο των δέκα μετρήσεων προκύπτουν οι $u_{time}(I_{30ns})$ και $u_{time}(I_{60ns})$.
- u_{CT} : Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του παράγοντα μετασχηματισμού του μετατροπέα ρεύματος. Η διαδικασία υπολογισμού της u_{CT} περιγράφεται αναλυτικά στο [5]. Ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία, προκύπτει ότι, η αβεβαιότητα σε παρόμοιες περιπτώσεις λαμβάνεται ίση με $u_{CT} = 3,1 * 10^{-4}$.
- u_{CA} : Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του παράγοντα μετασχηματισμού του εξασθενητή. Από τη βιβλιογραφία, και για παρόμοιους εξασθενητές των 20db, βρέθηκε αβεβαιότητα $u_{CA} = 1,51 * 10^{-3}$.

- u_{V_R} : Η αβεβαιότητα στην ένδειξη της τάσης στον παλμογράφο, η οποία προκύπτει από την οριζόμενη από τον κατασκευαστή ακρίβεια στη μέτρηση τάσης.
- $u_{Display}$: Η αβεβαιότητα που οφείλεται στην διαφορά μεταξύ της τιμής τάσης που εμφανίζεται στην οθόνη της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και της πραγματικής τιμής. Ανατρέχοντας στα φυλλάδια του κατασκευαστή βρίσκουμε ότι, η σχετική αβεβαιότητα για την ένδειξη της γεννήτριας $u_{Display}^{re}$ ορίζεται ίση με $u_{Display}^{re} = 5,5 * 10^{-4}$ [6]. Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τον εξής τύπο: $u_{Display} = u_{Display}^{re} * I$, όπου I η μέση τιμή του μετρούμενου ρεύματος.
- u_{mis} : Η αβεβαιότητα λόγω σφαλμάτων «κακής προσαρμογής» μεταξύ του διαύλου (καναλιού) εισόδου του παλμογράφου και του μετατροπέα ρεύματος. Από τη βιβλιογραφία [5] βρίσκουμε, ότι μια ενδεικτική τιμή για τη σχετική αβεβαιότητα είναι $u_{mis}^{re} = 8,54 * 10^{-3}$. Η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση $u_{mis} = u_{mis}^{re} * I$, όπου I η μέση τιμή του μετρούμενου ρεύματος.

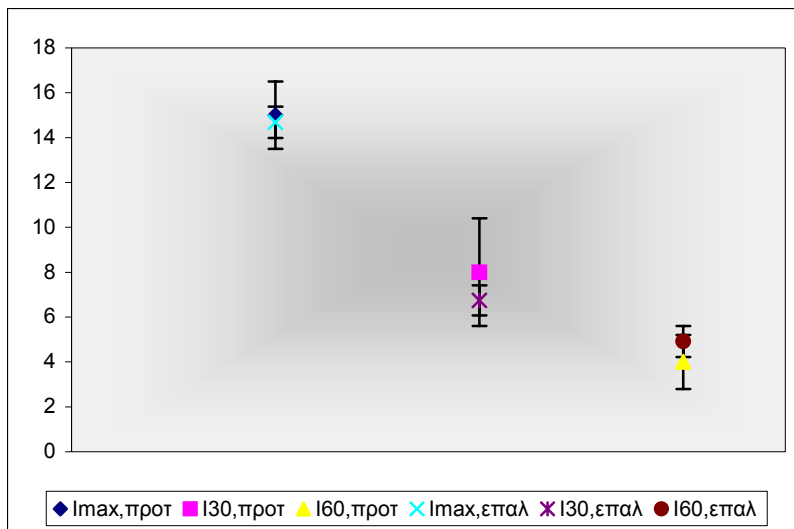
Αφού υπολογίζονται οι αβεβαιότητες για τις τιμές των ρευμάτων, στη συνέχεια ελέγχεται η συμφωνία με το Πρότυπο 61000-4-2 [4]. Παρατίθεται ενδεικτικά ο έλεγχος συμμόρφωσης με το Πρότυπο 61000-4-2, ακολουθώντας τις διαδικασίες που ορίζει το Παράρτημα Ε του ίδιου Προτύπου και το έγγραφο UKAS LAB34[7] (Πίνακες 1,2)

Πίνακας 1

Τιμές που ορίζει το Πρότυπο			
4kV	I_{max}	I_{30}	I_{60}
Ονομαστική	15A	8A	4A
Μέγιστη	13,5A	5,6A	2,8A
Ελάχιστη	16,5A	10,4A	5,2A
Ανοχή (%)	10%	30%	30%

Πίνακας 2

Τιμές που προκύπτουν από την επαλήθευση					
I_{max}	Αβεβ. 4,8%	I_{30}	Αβεβ. 10%	I_{60}	Αβεβ. 14%
14.68 A	15,387A	6,739A	7,413A	4,912A	5,599A
	13,973A		6,402A		4,22A



Σχήμα 8: Έλεγχος της συμμόρφωσης των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης με το Πρότυπο

Στο Σχήμα 8 φαίνεται ότι, για την περίπτωση του I_{max} και του I_{30} , η γεννήτρια είναι σε συμμόρφωση με το Πρότυπο (Case A [3]), ενώ για το I_{60} τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, η συμμόρφωση είναι η πιο πιθανή περίπτωση (Case B [3]).

7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιοτήτων για τρεις συσκευές του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Όπως τονίστηκε, η επαλήθευση είναι απαραίτητη, έτσι ώστε να ελέγχεται ότι ο εξοπλισμός λειτουργεί σωστά και να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της δοκιμής που πραγματοποιείται με τη χρήση του εξοπλισμού αυτού, ιδιαίτερα όταν αυτός μεταφέρεται εκτός Εργαστηρίου. Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., πέρα από τις προγραμματισμένες διακριβώσεις του εξοπλισμού του από ειδικά διαπιστευμένα εργαστήρια διακριβώσεων, διενεργεί επαληθεύσεις των οργάνων πάντοτε, πριν και μετά τη χρήση τους σε δοκιμές.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων
- [2] IEC 60-2, “Amendment 1: High Voltage Test Techniques”, 1994
- [3] IEC 60060-3, “High Voltage test techniques-Part 3: Definitions and requirements for on-site testing”, 2006
- [4] ΕΛΟΤ EN 61000-4-2: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Μέρος 4: Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων – Τμήμα 2: Δοκιμή απρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης – Βασικό δημοσίευμα EMC”, 1996
- [5] Kang T.W., Chung Y.C., Won S.H., Kim H.T., “On the uncertainty in the current waveform measurement of an ESD generator”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 42, no. 4, November 2000, pp. 405-413.
- [6] Schaffner: Safety for electronic equipment systems, Certificate No C040211A
- [7] UKAS, LAB34, “The Expression of Uncertainty in EMC Testing”, Edition 1, August 2002