

# ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνοσ και Ι.Α. Σταθόπουλος

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων,  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,  
e-mail: fasimako@mail.ntua.gr, faniassim@yahoo.com

## Περίληψη

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί και η συμπεριφορά του είναι κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος), οπότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης, αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στον ιονισμό και, εν συνεχεία, στη διάσπαση του εδάφους.

Η εκτίμηση της κρίσιμης έντασης του πεδίου, πάνω από την οποία εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δοκιμών ηλεκτρικής διάσπασης, υπό υψηλή τάση, εδαφικών δειγμάτων τοποθετημένων σε διάταξη παραλλήλων πλακών και του προσδιορισμού της τάσης διάσπασης 50% ( $U_{50\%}$ ). Δεδομένου ότι, η τιμή της κρίσιμης τάσης διάσπασης προκύπτει από την επεξεργασία παλμογραφημάτων και η κρίσιμη ένταση ιονισμού υπολογίζεται στη συνέχεια, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα των μετρήσεων αυτές να πρέπει να συνοδεύονται από μία εκτίμηση της αβεβαιότητάς τους. Το γεγονός ότι, ο διατιθέμενος από το διαπιστευμένο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. και χρησιμοποιούμενος για τις ανάγκες των πειραμάτων εξοπλισμός, διακρίβώνεται σε ετήσια βάση καθώς και η δυνατότητα πραγματοποίησης διαδοχικών διασπάσεων εξασφαλίζει τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μεγεθών. Στην παρούσα εργασία αναλύονται οι παράγοντες συστηματικής αβεβαιότητας, γίνεται εκτίμηση της τυχαίας αβεβαιότητας βάσει των πειραματικών μετρήσεων, που σχετίζεται με τα μεγέθη της ηλεκτρικής διάσπασης δειγμάτων χώματος, και συγκεκριμένα με την τάση διάσπασης 50% ( $U_{50\%}$ ), την στιγμιαία τιμή της τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ) και το χρόνο διάσπασης ( $t_{break}$ ), υπολογίζεται η συνολική αβεβαιότητα κάθε μεγέθους και επισημαίνονται οι δυσκολίες στον υπολογισμό τους. Τέλος, γίνεται εκτίμηση της, σχετιζόμενης με την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού, αβεβαιότητας.

*Λέξεις -κλειδιά: αβεβαιότητα, ιονισμός εδάφους, τάση διάσπασης, κρίσιμη ένταση ιονισμού*

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνοσ, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

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

# UNCERTAINTY ON THE ESTIMATION OF THE SOIL CRITICAL IONIZATION GRADIENT

## Abstract

The behavior of a grounding system under impulse and surge currents differs from its steady state behavior. It has been observed that, when a high impulse current is injected into the grounding system, its impulse impedance drops due to the ionization phenomena developed into the soil around the grounding conductors. The critical parameter for the ionization phenomenon is the soil critical electric field, which corresponds to the electric field threshold above which the soil ionization occurs.

The determination of this critical gradient requires the conduction of high voltage breakdown experiments on soil samples. On that purpose impulse measurements have been carried out in soil samples placed in a parallel plate configuration. Based on the acquired oscillograms the 50% soil breakdown voltage ( $U_{50\%}$ ) as well as the soil ionization gradient is estimated. In order for the credibility and validity of these values to be assured, it is necessary the calculation of the uncertainty related to these values. The fact that the test equipment is calibrated on yearly basis and the number of measurements enables the calculation of the uncertainty associated not only with breakdown voltage and soil ionization gradient but also with other parameters of soil ionization phenomena. Therefore, aim of this work is the analysis of the components of systematic uncertainty and the estimation of the random uncertainty regarding the determination of the 50% breakdown voltage, the instantaneous breakdown voltage ( $U_{break}$ ) and the time to breakdown ( $t_{break}$ ). The total uncertainty of each parameter and the uncertainty of soil ionization gradient are calculated and conclusions as far as the importance of the estimation of uncertainty are drawn.

*Keywords: uncertainty, soil ionization, 50 % breakdown voltage, soil ionization gradient*

## 1. Εισαγωγή

Το έδαφος σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιόμορφα ημι-αγώγιμα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα, ή αέρας. Στο νερό και στα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται, κατά κύριο λόγο, η αγωγιμότητα του εδάφους, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξ αιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος) τότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης, αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους.

Μέχρι σήμερα δύο είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την περιγραφή του μηχανισμού διάσπασης του εδάφους: ο ένας είναι ο θερμικός μηχανισμός (Erler και Snowden (1983), Snowden και Erler (1983)) και ο άλλος είναι ο ιονισμός του εδάφους. Μεταξύ των δύο αυτών μηχανισμών επικρατών θεωρείται ο ιονισμός του εδάφους, σύμφωνα με τους Leadon et al (1983).

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνος, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβειότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

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

Ο μηχανισμός του ιονισμού του εδάφους είναι ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, λόγω της ανομοιομορφίας των κόκκων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους, είναι μικρότερη από την τιμή που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων (Mousa 1994). Πειραματικά αποτελέσματα των Petropoulos (1948), Liew και Darveniza (1974), Oettle (1983, 1986, 1988), και Wang et al. (2005) υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού.

Σημαντικός παράγοντας για τη μελέτη του ιονισμού είναι ο προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ( $E_0$ ). Προκειμένου να προσδιορισθεί το επίπεδο της τάσης, πάνω από την οποία εκδηλώνεται ιονισμός του εδάφους, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφορες προσεγγίσεις. Οι Bellaschi et al. (1941) και Armstrong (1953) υπολόγισαν το λόγο της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (=πηλίκο της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος) προς την αντίσταση μονίμου καταστάσεως ( $R_0$ ) και, στη συνέχεια, χάραξαν, για διάφορα επίπεδα τάσης, τη γραφική του λόγου προς το λογάριθμο του ρεύματος. Στη χαρακτηριστική, που προέκυψε, προσδιόρισαν το σημείο, στο οποίο ο λόγος της κρουστικής αντίστασης προς την αντίσταση μονίμου καταστάσεως ισούται με τη μονάδα και έλαβαν την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος ως την κρίσιμη τιμή πάνω από την οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός. Εν συνεχεία, δεδομένης της διάταξης των ηλεκτροδίων και χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm, προσδιόρισαν την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού ( $E_0$ ).

Στη μη γραμμικότητα της καμπύλης I-V βασίζεται και ο Πετρόπουλος (1948), ο οποίος επισημαίνει ότι, πάνω από ένα κρίσιμο επίπεδο επιβαλλόμενης τάσης, που αντιστοιχεί στην κρίσιμη τάση ιονισμού ( $V_0$ ), οι καμπύλες I-V παύουν να είναι γραμμικές.

Οι Loboda και Scuka (1996), για να προσδιορίσουν την κρίσιμη τάση ιονισμού, βασίστηκαν στην παρατήρηση ότι, η εκδήλωση μη γραμμικών φαινομένων σε δείγματα χώματος εκδηλώνεται ως χρονική υστέρηση μεταξύ της μέγιστης τιμής της κυματομορφής του ρεύματος και της μέγιστης τιμής της κυματομορφής της τάσης ( $\Delta t = t_{cl} - t_{cu}$ ). Η τάση, πέραν της οποίας το μέγιστο της τάσης και του ρεύματος δεν ταυτοχρονίζονται λαμβάνεται ως η κρίσιμη τάση έναρξης του ιονισμού και, για τον υπολογισμό της αντίστοιχης έντασης  $E_0$ , προσδιορίζεται η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, οπότε, με εφαρμογή του νόμου του Ohm, προκύπτει η τιμή της έντασης.

Οι Armstrong (1953), Nor (2006), Lima and Visacro (2008) and Lee et al. (2009) καθόρισαν την τάση έναρξης του ιονισμού ως το επίπεδο της τάσης πάνω από το οποίο η χαρακτηριστική της τάσης συναρτήσεως του ρεύματος σχηματίζει '8'.

Οι Lee et al. (2009) και Nor et al. (2007) παρατήρησαν, επίσης, ότι, όταν εκδηλώνεται ιονισμός, τότε εμφανίζονται στην κυματομορφή του ρεύματος δύο κορυφές και θεώρησαν ως  $V_0$  την ελάχιστη τάση, που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη κυματομορφή του ρεύματος. Μία διαφορετική προσέγγιση ακολούθησαν οι Mousa (1994), Loboda and Scuka (1996) και Lima (2008) προκειμένου να προσδιορίσουν την κρίσιμη ένταση ιονισμού: η προσέγγισή τους βασίζεται στην παρατήρηση ότι, όταν εκδηλώνονται φαινόμενα του ιονισμού και διάσπασης, η σύνθετη αντίσταση του συστήματος γειώσης μειώνεται. Έχοντας κανείς στη διάθεσή του παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος, είναι δυνατό να υπολογίσει τη χρονικά μεταβαλλόμενη σύνθετη αντίσταση και να εντοπίσει την ελάχιστη Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνος, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

τιμή, που αυτή μπορεί να λάβει. Δεδομένης της τιμής αυτής και της γεωμετρίας του συστήματος γείωσης, καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της ακτίνας της περιοχής ιονισμού, και, στη συνέχεια, με εφαρμογή του νόμου του Ohm, προσδιορίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Οι Nor et al. (2007) πρότειναν, ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης έναρξης ιονισμού να γίνεται μέσω δοκιμών διάσπασης των δειγμάτων χώματος σε ομογενή πεδία, που δημιουργούνται από διατάξεις παραλλήλων πλακών. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή, για την εκτίμηση της τιμής της  $V_o$ , αρκεί ο προσδιορισμός της τάσης διάσπασης  $U_{50\%}$  σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο Πρότυπο IEC 60060-1 (2010). Εν συνεχεία, ο προσδιορισμός της  $E_o$  γίνεται μέσω του εύχρηστου τύπου:

$$E_o = \frac{U_{50\%}}{d} \quad (1)$$

όπου  $U_{50\%}$  είναι η τάση διάσπασης 50% και  $d$  η απόσταση μεταξύ των παραλλήλων πλακών.

Οι Liu et al (2003), προκειμένου να μελετήσουν τις φυσικές αρχές που διέπουν τον ιονισμό, πραγματοποίησαν πειράματα χρησιμοποιώντας ένα ημισφαιρικό δοχείο, όμοιο με αυτό που είχε χρησιμοποιήσει ο Πετρόπουλος, το οποίο γέμισαν, διαδοχικά, με εδαφικά δείγματα. Ένα ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε στο κέντρο του ημισφαιρικού δοχείου, ώστε να επιβληθεί η κρουστική τάση στο συγκεκριμένο δείγμα χώματος. Βασική υπόθεση για τον προσδιορισμό της τιμής της  $E_o$  είναι ότι η ζώνη ιονισμού κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο εντός μιας ακτίνας  $r_{ion}$ , πέραν της οποίας δεν εκδηλώνεται ιονισμός. Έτσι, το εδαφικό δείγμα 'χωρίζεται' σε δύο ζώνες: μία εντός της οποίας εκδηλώνεται ιονισμός και η τιμή της ειδικής αντίστασης λαμβάνει τιμή μικρότερη ( $\rho_{res}$ ) από την τιμή μόνιμης κατάστασης ( $\rho$ ), και μια δεύτερη ζώνη, στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί ιονισμός και, εντός της οποίας, η τιμή της ειδικής αντίστασης παραμένει σταθερή ( $\rho$ ). Υπολογίστηκε ότι, η  $\rho_{res}$  κυμαίνεται μεταξύ 3-8,3% της αρχικής τιμής της. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί, καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνητών, που έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη του ιονισμού.

Πίνακας 1 Τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού ( $E_o$ ) (Ασημακοπούλου (2011))

Ερευνητής	$E_o$ (kV/m)	Ερευνητής	$E_o$ (kV/m)	Ερευνητής	$E_o$ (kV/m)
Towne	29-104	Bellaschi	271-307	Bellaschi	127-424
Liew	110-300	Dick	13-221	Geri	29,72-458,04
Asaoka	1040-1430	Norinder	327-360	Berger	497-537
Petropoulos	830	Armstrong	396-522	Flanagan	4050-12000
Dabkowski	720-810	Korsuncev	800-1200	Loboda	150-500
Oettle	600-1850	Loboda	680-900	Liu	328-516
Espel	800-1700	Lima	370-1440	Lee	1000-1650
Nor	550-900	He	341-991	Manna	560-1433

## 2. Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης 50% ( $U_{50\%}$ ) του εδαφικού δείγματος. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων υπό

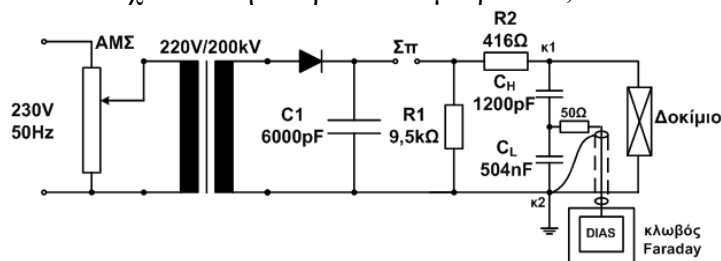
Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνος, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

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

κρουστική τάση χρησιμοποιήθηκε κρουστική γεννήτρια τάσης με μέγιστη τάση φόρτισης 200kV και ενέργεια 3kJ. Η γεννήτρια ελέγχεται από τράπεζα χειρισμών η οποία τροφοδοτείται από το δίκτυο των 230Vac / 50Hz μέσω ενός σταθεροποιητή τάσης (230V±0,1%). Η κρουστική τάση στη έξοδο της γεννήτριας, που επιβάλλεται στο δοκίμιο, μετράται με τη βοήθεια χωρητικού καταμεριστή (με λόγο 421:1). Το σήμα της τάσης καταγράφεται με το ψηφιακό καταγραφικό σύστημα Heafely DIAS 733, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο εντός κλωβού Faraday, με 50dB εξασθένιση σήματος για συχνότητες μέχρι 1GHz. Προκειμένου η τροφοδοσία του μετρητικού συστήματος καταγραφής κρουστικών τάσεων DIAS 733 να είναι απαλλαγμένη θορύβου χρησιμοποιείται μετασχηματιστή απομόνωσης.

Το εδαφικό δείγμα, αρχικά κοσκινίστηκε, ώστε να αφαιρεθούν ξένα υλικά (π.χ. πέτρες, κλαδιά). Στη συνέχεια, το χώμα ξηράνθηκε στο φούρνο στους 105°C για 48 ώρες. Για να αποκτήσει το εδαφικό δείγμα την επιθυμητή περιεκτικότητα, κατά βάρος, σε υγρασία, προσθέσαμε απιονισμένο νερό και ανακατεύαμε το μείγμα, ώστε τούτο να ομογενοποιηθεί. Κατόπιν κοκκομετρικής ανάλυσης (ΦΕΚ 1986) το εδαφικό δείγμα αποτελείται από άμμο σε ποσοστό 56%, ιλύ σε ποσοστό 37% και άργιλο σε ποσοστό 7%. Επίσης, το αρχικό δείγμα χώματος περιέχει τύρφη σε ποσοστό 50%, χαλκό (150mg/kg), ψευδάργυρο (500mg/kg), άζωτο (1,2%) και άνθρακα (37%).

Στη συνέχεια το εδαφικό δείγμα, τοποθετήθηκε, στη διάταξη παραλλήλων πλακών, η οποία αποτελείται από δύο χάλκινα ηλεκτρόδια διαμέτρου 19,2cm διακένου d=7cm.



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη παραλλήλων πλακών.

### 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) (IEC 60060-2).

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης συντίθεται, εν γένει, από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: στην αβεβαιότητα τύπου A και στην αβεβαιότητα τύπου B.

#### 3.1 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης τύπου A (random uncertainty)

Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς, προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνοσ, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

Για μικρό πλήθος μετρήσεων, η αβεβαιότητα τύπου A ( $U_r$ ) υπολογίζεται μέσω της σχέσης (IEC 60060-2, 2010):

$$U_r = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

όπου ο συντελεστής t Student επιλέγεται από πίνακες ανάλογα με το επίπεδο εμπιστοσύνης (π.χ. 95%) και το πλήθος των μετρήσεων ( $n$ ). Η τυπική απόκλιση δίδεται από τον τύπο (3)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (3)$$

όπου  $u_i$  είναι οι μετρούμενες τιμές και  $\bar{u}$  η μέση τιμή των μετρήσεων.

Οι τιμές της τυχαίας αβεβαιότητας που προκύπτουν εκφράζονται στις μονάδες του αντίστοιχου φυσικού μεγέθους. Συνήθως, παρίσταται η ανάγκη έκφρασης αυτών των τιμών ως ποσοστό της μέσης τιμής. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιείται ο τύπος (4):

$$U_{r\%} = \frac{U_r}{\bar{u}} \cdot 100 \quad (4)$$

### 3.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης τύπου B (systematic uncertainty)

Για την εκτίμηση της αβεβαιότητας τύπου B ( $U_s$ ) χρησιμοποιείται κάθε διαθέσιμη για τον πειραματικό εξοπλισμό και την πειραματική διάταξη πληροφορία, η οποία προέρχεται από πιστοποιητικά διακρίβωσης, δεδομένα προηγούμενων μετρήσεων, χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης, εμπειρία και επιστημονική ανάλυση, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (Μαθιουλάκης (2004)).

Βάσει του πιστοποιητικού διακρίβωσης του ψηφιακού συστήματος καταγραφής κρουστικών τάσεων DIAS 733 η αβεβαιότητα για τη μέγιστη τιμή αποκομμένης κρουστικής τάσης είναι 0,6% και για την καταγραφή του χρόνου 1%, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

### 3.3 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Δεδομένων των παραμέτρων τυχαίας και συστηματικής αβεβαιότητας για επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο ή ίσο του 95%, υπολογίζεται η ολική αβεβαιότητα με τη βοήθεια του τύπου:

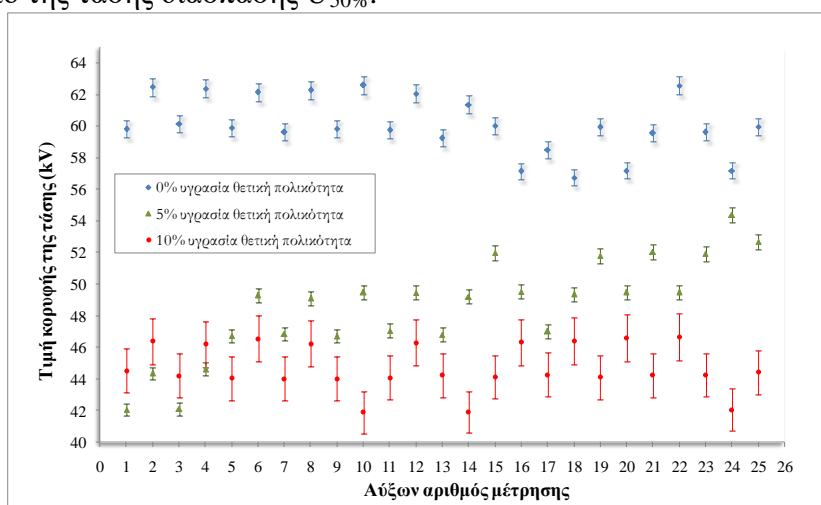
$$U = \sqrt{U_s^2 + U_r^2} \quad (5)$$

Πίνακας 2 Τιμές της τάσης διάσπασης  $U_{50\%}$ , για τα εδαφικά δείγματα με διάφορες περιεκτικότητες σε υγρασία.

Πολικότητα	Περιεκτικότητα σε υγρασία	$U_{50\%}$ (kV)	$U_r$ (%)	$U$ (%)
+	0%	62,92	0,67	0,90
	5%	51,37	3,09	3,14
	10%	46,85	0,68	0,91

Στο Σχήμα 2, που παρατίθεται στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο, μαζί με την αβεβαιότητά τους για το σύνολο των κρούσεων, που Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνο, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

πραγματοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυξομείωσης της τάσης για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης  $U_{50\%}$ .



Σχήμα 2. Τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο με τη συνολική αβεβαιότητα.

Πέραν της τάσης διάσπασης  $U_{50\%}$ , η οποία καθορίζει την κρίσιμη ένταση έναρξης του ιονισμού, ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η τιμή της στιγμιαίας τάσης διάσπασης ( $U_{break}$ ) καθώς και η αντίστοιχη χρονική στιγμή ( $t_{break}$ ). Στον Πίνακα 3, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη, ταξινομημένα ανά επίπεδο συνεχούς τάσης φόρτισης ( $U_{-}$ ) της κρουστικής γεννήτριας, μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Πίνακας 3  $U_{break}$  σε kV,  $t_{break}$  σε  $\mu$ s

Μετρήσεις, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%.		Μετρήσεις, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%.				Μετρήσεις, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%.						
Συνεχής τάση φόρτισης ( $U_{-}$ ) της κρουστικής γεννήτριας												
$U_{-}=73,5kV$		$U_{-}=76,0kV$		$U_{-}=64,5kV$		$U_{-}=67,0kV$		$U_{-}=58,0kV$		$U_{-}=60,5kV$		
$U_{break}$	$t_{break}$	$U_{break}$	$t_{break}$	$U_{break}$	$t_{break}$	$U_{break}$	$t_{break}$	$U_{break}$	$t_{break}$	$U_{break}$	$t_{break}$	
59,3	3,3	61,2	3,3	48,4	4,0	50,8	4,2	41,5	4,4	43,8	4,1	
58,4	1,5	62,2	1,8	48,4	3,7	51,2	3,5	36,6	9,0	42,8	4,9	
58,8	3,9	61,2	2,4	47,6	5,3	51,1	4,1	39,1	6,7	44,3	3,9	
59,4	2,1	62,2	1,9	47,5	5,5	51,6	3,8			41,5	5,6	
		60,0	5,8	46,5	6,7					38,6	8,5	
		62,0	2,0							43,3	4,6	
		61,1	1,4							39,5	7,8	
		62,0	3,0							44,5	3,8	
										38,4	8,9	
$U_r$	0,74	1,73	0,64	1,16	0,53	0,48	0,98	1,51	6,08	5,71	1,89	1,57
$U_r$ (%)	1,25	64,73	1,04	43,27	1,03	12,46	2,05	30,04	15,57	85,35	4,51	27,07
$U_s$ (%)	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00	0,60	1,00
$U$ (%)	1,39	64,74	1,20	43,28	1,19	12,50	2,14	30,06	15,58	85,36	4,55	27,09

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνοϋ, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

### 3.4 Υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού ( $E_o$ ) και της αντίστοιχης αβεβαιότητας

Από την τιμή της τάσης διάσπασης 50% είναι δυνατός ο άμεσος υπολογισμός της κρίσιμης έντασης ιονισμού. Δεδομένης της αβεβαιότητας, τόσο της τάσης διάσπασης, όσο και του μήκους του διακένου, είναι εύκολος ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας της κρίσιμης έντασης διάσπασης. Θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι, στη βιβλιογραφία, μέχρι σήμερα, παρουσιάζονται οι τιμές της κρίσιμης έντασης ιονισμού, για διάφορες εδαφικά δείγματα, χωρίς, ωστόσο, να υπάρχει οποιαδήποτε ένδειξη για την τυπική απόκλιση ή την αβεβαιότητα αυτών των τιμών.

Η κρίσιμη ένταση  $E_o$  υπολογίζεται με τη βοήθεια του τύπου (1), όπου  $U_{50\%}$  είναι η τάση διάσπασης 50% και  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Η αβεβαιότητα της κρίσιμης πεδιακής έντασης ( $U_{E_o}$ ) υπολογίζεται από τον τύπο (6) βάσει του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων:

$$U_{E_o} = \frac{U_{50\%}}{d} \sqrt{\frac{U_{50\%}^2}{U_{50\%}^2} + \frac{U_d^2}{d^2}} \quad (6)$$

όπου  $U_{50\%}$  η τάση διάσπασης 50% σε kV,  $d$  η απόσταση μεταξύ των παράλληλων πλακών σε m,  $U_{U_{50\%}}$  η αβεβαιότητα της τάσης διάσπασης σε kV,  $U_d$  η αβεβαιότητα της απόστασης μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών σε m (0,002m εν προκειμένω).

Στον Πίνακα 4 παρατίθενται οι τιμές της τάσης διάσπασης (όπως έχουν, ήδη, καταγραφεί στον Πίνακα 2) και της κρίσιμης έντασης  $E_o$ , μαζί με τις τιμές των ολικών αβεβαιοτήτων, όπως υπολογίσθηκαν, από την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας.

Πίνακας 4 Τιμές της τάσης διάσπασης και της κρίσιμης έντασης, με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Πολικότητα	Περιεκτικότητα σε υγρασία	$U_{50\%} \pm U_{U_{50\%}}$ (kV)	$E_o \pm U_{E_o}$ (kV/m)
+	0%	62,92 ± 0,57	898,86 ± 26,93
	5%	51,37 ± 1,61	733,86 ± 31,15
	10%	46,85 ± 0,43	669,29 ± 20,07

#### 4. Συμπεράσματα

- Η τάση διάσπασης  $U_{50\%}$  παρουσιάζει τιμές αβεβαιότητας μικρότερες από 5% και, συνεπώς, παρουσιάζει καλύτερη επαναληψιμότητα, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες παραμέτρους.
- Τόσο η χρονική στιγμή της διάσπασης ( $t_{break}$ ), όσο και η στιγμιαία τάση διάσπασης  $U_{break}$  παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές αβεβαιοτήτων, για το σύνολο των εδαφικών δειγμάτων που εξετάσθηκαν. Η στιγμιαία τάση διάσπασης  $U_{break}$  έχει μικρότερη αβεβαιότητα από την  $t_{break}$ . Στα αποτελέσματα αυτά συμβάλλει, κατά κύριο λόγο, ο στοχαστικός χαρακτήρας του φαινομένου της διάσπασης, η κατανομή και συμπεριφορά του παγιδευμένου νερού μέσα στο χώμα (για τα δοκίμια με περιεκτικότητες σε υγρασία 5% και 10%) και το πλήθος των μετρήσεων που έχουν γίνει για κάθε επίπεδο τάσης, το οποίο, όμως, δεν είναι ίδιο για όλα τα επίπεδα τάσης, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνος, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους



Βέβαια, θα πρέπει κανείς να λάβει υπ' όψιν του το γεγονός ότι, αύξηση του αριθμού των κρούσεων σε κάθε επίπεδο τάσης, έχει ως αποτέλεσμα την καταπόνηση των δοκιμίων από τις αλληπάληλες κρούσεις (μεταξύ δύο κρούσεων μεσολαβεί διάστημα 2 min) και την αλλοίωση της σύνθεσής τους: αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό στα δείγματα υγρού χώματος, στα οποία η θερμότητα, που παράγεται από κάθε κρούση, θερμαίνει το δείγμα και οδηγεί στην εξάτμιση ποσότητας νερού. Η αντικατάσταση του δοκιμίου με καινούργιο δείγμα μετά από κάθε κρούση ως λύση κρίνεται μη αποδοτική, δεδομένου ότι, η κατανομή των κόκκων του χώματος στο νέο δείγμα δεν είναι ίδια με το προηγούμενο. Επιπλέον, η διαδικασία γίνεται χρονοβόρα.

- Η συστηματική αβεβαιότητα του εξοπλισμού επ' ουδενί μπορεί να αγνοηθεί, αντιθέτως προς ό,τι γινότανε, κατά κανόνα, μέχρι σήμερα, στη διεθνή βιβλιογραφία.
- Εν κατακλείδι, μπορεί να σημειωθεί ότι, η εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις ηλεκτρικής διάσπασης του εδάφους είναι απαραίτητη, ώστε να εξασφαλισθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας την αξιολόγηση, τόσο των μετρήσεων, όσο και της πειραματικής διαδικασίας, που εφαρμόζεται, και οδηγώντας, εφ' όσον προκύψει ανάγκη, σε τεκμηριωμένες προτάσεις βελτίωσης της πειραματικής διάταξης και της αντίστοιχης διαδικασίας.

## Ευχαριστίες

Αυτή η εργασία χρηματοδοτήθηκε από το Πρόγραμμα Βασικής Έρευνας (ΠΕΒΕ 2010).

## Βιβλιογραφία

Ασημακοπούλου, Φ.Η.: «Συμβολή στη μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, Νοέμβριος 2011.

Μαθιουλάκης, Μ.Ε.: «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Έκδοση Ελληνικής Ένωσης Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.

ΦΕΚ Β955 31 Δεκεμβρίου 1986, Προδιαγραφές και επί τόπου δοκιμές εδαφομηχανικής.

Armstrong, H.R.: "Grounding electrode characteristics from model tests," AIEE Trans., Vol. 72, No. 2, pp. 1301-1306, Jan. 1953.

Bellaschi, P.L.: "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds," Transactions of American Institute of Electrical Engineer, Vol. 60, pp. 123-128, Mar. 1941.

Erler, J.W., Snowden, D.P: "High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, pp. 4564-4567, Dec. 1983.

IEC 60060-1 ed3.0: High Voltage Test Techniques Part 1: Measuring Systems, 2010.

IEC 60060-2 ed2.0: High Voltage Test Techniques Part 2: Measuring Systems, 2010.

Leadon, R.E., Flanagan, T.M., Mallon, T.M., Denson R: "Effect of Ambient Gas on Arc Initiation Characteristics in Soil," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No. 6, pp. 4572-4576, Dec. 1983.

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνογ, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

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

- Lee, B.H., Park, G.H., Kim, H.G., Lee, K.S.: "Analysis of soil ionization under Impulse Currents," J. Elect. Eng. and Technol., Vol. 4, No. 1, pp. 98-105, 2009.
- Liew, A.C., Darveniza, M.: "Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths", Proc. IEE, Vol. 121, No 2, pp. 123-135, Feb. 1974.
- Lima, J.L.C., Visacro S.: "Experimental developments on soil ionization," in Proc. Int. Conf. Grounding and Earthing & 3rd Int. Conf. Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, pp. 174-179, Nov. 2008.
- Lima, J.L.C.: "Avaliacao experimental sobre o efeito de ionizacao do solo devido a injecao de correntes impulsivas," Μεταπτυχιακή Εργασία, Αύγουστος 2008.
- Liu, Y., Theethayi, N., Gonzalez, R.M., Thottappillil, R.: "The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results," in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. on EMC, Boston, USA, pp. 794-799.
- Loboda, M., Scuka, V.: "On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes in soil," 23rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Firenze (Italy), pp. 539-544, Sept. 1996.
- Mousa, A.M.: "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, pp. 1669-1677, Jul. 1994.
- Nor, N.M.: "Ionization gradient of low resistivity soil and liquids," in Proc. 17th Int. Zurich Symp. on EMC, pp. 409-412, 2006.
- Nor, N.M., Ramli, A.: "Effects of moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions," Europ. Trans. Electric. Power, Vol. 18, No. 5, pp. 461-475, Jun. 2007.
- Oettle, E.E.: "The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil," Transactions on the South African IEE, pp. 63-70, Dec. 1983.
- Oettle, E.E.: "A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 2020-2029, Oct. 1988.
- Oettle, E.E.: "Results of impulse tests done on practical electrodes at the National Electrical Engineering Research Institute's Outdoor High Voltage Laboratory," NEERI Internal report, Library No. I ELEK 267, Nov. 1986.
- Petropoulos, G.M.: "The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances," Journal IEE, Vol. 95, Part II, pp. 59-70, 1948.
- Snowden, D.P., Erler, J.W.: "Initiation of Electrical Breakdown of Soil by Water Vaporization," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No.6, pp. 4568- 4571, Dec. 1983.
- Wang, J., Liew, A.C., Darveniza, M.: "Extension of Dynamic model of Impulse Behavior of concentrated Grounds at High Currents," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, no. 3, pp. 2160-2165, Jul. 2005.

Φ.Η. Ασημακοπούλου, Ι.Φ. Γκόνος, Ι.Α. Σταθόπουλος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Αβεβαιότητα στον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους

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