

# ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΧΑΜΗΛΟΣΥΧΝΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Ιωάννης Ν. Ζτούπης, Ιωάννης Φ. Γκόνοσ και Ιωάννης Α. Σταθόπουλος  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, Τ.Κ. 15780  
e-mail: ztoup@central.ntua.gr

## Περίληψη

Μετρήσεις των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων παραγόμενα από εναέριες γραμμές μεταφοράς διεξάγονται προκειμένου να αξιολογηθεί η έκθεση στον γενικό πληθυσμό. Για κάθε μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι απαραίτητο να καθορισθούν οι πηγές της αβεβαιότητας της μέτρησης καθώς και να προσδιορισθεί η συνολική αβεβαιότητα μέτρησης. Το παρόν άρθρο ασχολείται με τα προβλήματα της εκτίμησης της αβεβαιότητας μέτρησης καθώς οι τεχνικές υπολογισμού της αβεβαιότητας μέτρησης που συνιστώνται σε πρότυπα και ερευνητικές μελέτες περιγράφονται ελάχιστα σε αυτά. Επίσης, στην εργασία αυτή, εκτιμάται η συνολική αβεβαιότητα μέτρησης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων βιομηχανικής συχνότητας κοντά σε εναέριες γραμμές μεταφοράς και σε ποικίλους χώρους μέτρησης λαμβάνοντας υπόψη για τον υπολογισμό της τις συνιστώσες αβεβαιότητας σχετικές με α) τα διαθέσιμα δεδομένα του οργάνου μέτρησης, β) τις διαδικασίες μέτρησης γ) τις περιβαλλοντικές συνθήκες και δ) τα χαρακτηριστικά της πηγής των πεδίων. Λεπτομερή παραδείγματα των μετρήσεων πεδίων βιομηχανικής συχνότητας και των αβεβαιότητων τους παρουσιάζονται εδώ από το διαπιστευμένο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

*Λέξεις-Κλειδιά:* ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων, γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, αβεβαιότητα της μέτρησης, πηγές αβεβαιότητας της μέτρησης

## Abstract

Measurements of electric and magnetic fields generated by overhead power lines are carried out in order to evaluate the exposure levels of the human body on the general public. For any electromagnetic field measurement, it is necessary to define the sources of measurement uncertainty as well as determine the total measurement uncertainty. This paper is concerned with the problems of measurement uncertainty estimation, as the measurement uncertainty budget calculation techniques recommended in standardizing documents and research studies are barely described. Furthermore, in this work the total uncertainty of power frequency field measurements near power lines in various measurement sites is assessed by considering the contributions that depend on a) the available equipment data, b) measurement procedures, c) environmental conditions and d) characteristics of the field source. Detailed application examples for power frequency field measurements and their uncertainty are presented here by the accredited High Voltage Laboratory of NTUA.

*Keywords:* extremely low-frequency electric and magnetic fields, high-voltage overhead lines, measurement uncertainty, sources of measurement uncertainty

---

I. N. Ζτούπης, I. Φ. Γκόνοσ και I. Α. Σταθόπουλος, ΕΜΠ  
Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης χαμηλόσυχνων πεδίων κάτω από γραμμές μεταφοράς

5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

## 1. Εισαγωγή

Σοβαρές ανησυχίες εκφράζονται από την κοινή γνώμη για τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Για τα πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων, η προσοχή εστιάζεται στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στις εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Επομένως, αρκετά εργαστήρια διεξάγουν μετρήσεις των εξαιρετικά χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που παράγονται από εναέριες γραμμές μεταφοράς στο γειτονικό τους περιβάλλον, προκειμένου να αξιολογήσουν την έκθεση του γενικού πληθυσμού (Maruveda et al 1998, Aradhya et al 2005, Sjoblom et al 2001, Li et al 2007). Οι διαδικασίες μέτρησης καθώς και τα χαρακτηριστικά των πεδιομετρητών καθορίζονται από διεθνή πρότυπα (IEC 61786:1998, IEC 62110:2009, IEEE 644-1994).

Κάθε μέτρηση, όπως αυτή των χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και άρα, εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Η εκτίμηση των αβεβαιοτήτων μέτρησης των χαμηλόσυχνων πεδίων είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα κατά την αξιολόγηση της συμμόρφωσης των επιπέδων έκθεσης με τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Όμως, ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας μέτρησης εμφανίζει αρκετά εμπόδια (Ztouris et al 2013). Συγκεκριμένα, τα προβλήματα όπως η δυσκολία της αναγνώρισης και της ποσοτικοποίησης των διαφορετικών συνιστωσών αβεβαιότητας, η μεγάλη τιμή της αβεβαιότητας σε σύνθετα περιβάλλοντα (π.χ. αντικείμενα ή γειτονικές γραμμές μεταφοράς στο χώρο μέτρησης) και η αδυναμία υπολογισμού της υπό συγκεκριμένες συνθήκες θα αναλυθούν στη παρούσα εργασία. Επίσης, θα εξεταστούν ξεχωριστά οι ανωτέρω δυσκολίες για την εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης πεδίων από γραμμές μεταφοράς, ανάλογα με το είδος του περιβάλλοντος μέτρησης.

Τέλος, τα πρότυπα που αφορούν τις μετρήσεις των χαμηλόσυχνων πεδίων προβλέπουν, μεταξύ άλλων, οδηγίες για το πώς οι πηγές αβεβαιότητας κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης και της μέτρησης θα πρέπει να συνδυαστούν για να καθοριστεί η συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης. Ακολουθώντας τα πρότυπα αυτά έχει προκύψει η τεχνική υπολογισμού της αβεβαιότητας που εφαρμόζεται από το διαπιστευμένο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (EYT) του ΕΜΠ στις μετρήσεις πεδίου βιομηχανικής συχνότητας κοντά σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και περιγράφεται αναλυτικά στην εργασία. Σύμφωνα με αυτήν για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας των μετρήσεων λαμβάνονται υπόψη οι συνιστώσες αβεβαιότητας σχετικές με α) τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης, β) τις διαδικασίες μέτρησης και γ) τις περιβαλλοντικές συνθήκες και δ) τα χαρακτηριστικά της πηγής των πεδίων.

## 2. Μετρήσεις χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων

### 2.1 Εξοπλισμός μετρήσεων

Ο εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Narda EFA-300 Field Analyzer το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61786 και IEEE 644-1994. Για την μέτρηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, το πεδιομετρο διαθέτει διακριβωμένους εξωτερικούς ιστροπικούς αισθητήρες (B-field 100 cm<sup>2</sup> probe και E-field module). Παράλληλα, το όργανο μέτρησης πεδίων χαμηλών συχνοτήτων είναι ειδικά σχεδιασμένο να λειτουργεί σε χαμηλό εύρος

συχνότητας από 5 Hz έως 32 kHz και να εκτελεί ιστροπικές μετρήσεις RMS και μέγιστης τιμής με αβεβαιότητα  $\pm 3\%$  (EFA-300 operating manual, 2002). Αυτή η τιμή της αβεβαιότητας περιλαμβάνει όλες τις μερικές αβεβαιότητες (απόλυτο σφάλμα, γραμμικότητα, απόκριση συχνότητας και ιστροπικότητα) καθώς και τις αποκλίσεις σχετικές με την θερμοκρασία και την υγρασία. Παρόλ' αυτά η αβεβαιότητα του οργάνου αυξάνει αν οι τιμές των μετρούμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων είναι μικρότερες από 5V/m και 40 nT, αντίστοιχα.

## 2.2 Διαδικασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις των χαμηλόσυχνων πεδίων πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας την διαδικασία μέτρησης των διεθνών προτύπων. Βάσει των προτύπων αυτών μετρήθηκε σε ύψος 1 m πάνω από το έδαφος το συνιστάμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (RMS) στην συχνότητα των 50 Hz με την χρήση του προαναφερθέντος διακριβωμένου οργάνου.

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε υπό μέτρηση σημείο ο αντίστοιχος αισθητήρας μέτρησης συνδέθηκε απ' ευθείας στο πεδιόμετρο, το οποίο κρατήθηκε από τον χειριστή περίπου στο ύψος του θώρακα. Αντίθετα, για τις μετρήσεις ηλεκτρικών πεδίων ο αντίστοιχος αισθητήρας μέτρησης τοποθετήθηκε πάνω σε τρίποδο και συνδέθηκε, μέσω οπτικής ίνας, με το απομακρυσμένο πεδιόμετρο (6-10m), για την αποφυγή των επιρροών του παρατηρητή, καθώς επίσης και άλλων που μπορεί να είναι κοντά στον αισθητήρα. Ο χρόνος απόκτησης της μετρούμενης τιμής για κάθε σημείο ορίστηκε 30sec. Πέντε τιμές ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου λαμβάνονταν σε κάθε θέση. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα σημεία ενδιαφέροντος.

Επίσης, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη γεινίαση αντικειμένων στους αισθητήρες πεδίου, γιατί η εκδήλωση σημαντικής πεδιακής διαταραχής είναι ικανή για την εισαγωγή ανεπιθύμητων σφαλμάτων στις μετρήσεις. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ηλεκτρικού πεδίου θα πρέπει η απόσταση μεταξύ του πεδιόμετρου και των προσωρινών αντικειμένων να είναι τουλάχιστον τρεις φορές το ύψος του αντικειμένου, προκειμένου να μετρηθεί το ομογενές πεδίο. Για τον ίδιο λόγο, στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου τα προσωρινά μαγνητικά υλικά ή οι μη μαγνητικοί αγωγοί θα πρέπει να βρίσκονται μακριά από το σημείο μέτρησης τουλάχιστον τρεις φορές της μέγιστης διάστασης του αντικειμένου. Ακόμη, και για τα δύο είδη μετρήσεων η απόσταση μεταξύ του πεδιόμετρου και των μόνιμων αντικειμένων θα πρέπει να είναι 1m ή μεγαλύτερη, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ακρίβεια της μέτρησης του διαταραγμένου πεδίου περίξ του αντικειμένου. Τέλος, το άτομο που χειρίζεται το όργανο μέτρησης θα πρέπει να διασφαλίζει ότι δεν στέκεται μεταξύ της πηγής του πεδίου και του αισθητήρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Τα σημεία μέτρησης επιλέχθηκαν, όσο αυτό ήταν δυνατό, σε άξονες που βρίσκονται κατά μήκος (longitudinal profile) και εγκάρσια (lateral profile) στη γραμμή μεταφοράς, ώστε να καλυφθούν οι πιο επιβαρημένες θέσεις έκθεσης στον υπό εξέταση χώρο. Πολλές φορές, όμως, τα σημεία μέτρησης παρέκλιναν από αυτούς τους άξονες εξαιτίας της μορφολογίας του εδάφους και των παρευρισκόμενων εμποδίων στην περιοχή. Υπό ευνοϊκές συνθήκες, οι μετρήσεις κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς λαμβάνονται σε τουλάχιστον πέντε σημειακές θέσεις που εκκινούν από σημείο στο μέσο του ανοίγματος (midspan) και επεκτείνονται και προς τις δύο κατευθύνσεις με διαδοχικά ισαπέχοντα επαυξημένα βήματα έως ότου καλυφθεί η συνολική

απόσταση της γραμμής. Επίσης, οι μετρήσεις εγκάρσια στη γραμμή μεταφοράς κατά το πρότυπο της IEEE Std 644:1994 εκκινούν από τον άξονα συμμετρίας της γραμμής και επεκτείνονται και από τις δύο πλευρές της γραμμής σε εγκάρσια απόσταση τουλάχιστον 30m από τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής. Ακόμη, λαμβάνονται κάτω από τους αγωγούς τουλάχιστον πέντε μετρήσεις σε ισαπέχοντα διαστήματα.

### 2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν αρκετές γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και περιοχές μέτρησης με ξεχωριστά χαρακτηριστικά κάθε φορά. Διεξήχθησαν, δηλαδή, μετρήσεις σε διαφορετικά επίπεδα τάσεων (400 kV και 150 kV), διατάξεις των φάσεων (συμμετρική και βέλτιστη), γεωμετρικές διατάξεις των αγωγών, αποστάσεις των ανοιγμάτων και εδάφους – γης, με την ύπαρξη διαφόρων εμποδίων κάτω από αυτές (μικρή βλάστηση, δέντρα, στύλοι ΔΕΗ ή φωτισμού, φράχτες κτλ) και σε ποικίλα εδάφη (ομαλό, με κλίση και πλήρως ανομοιόμορφο).

Στη συνέχεια, επιλέγεται να παρουσιαστούν δύο περιπτώσεις – εφαρμογές μέτρησης χαμηλόσυχνων πεδίων με διαφορετικά χαρακτηριστικά:

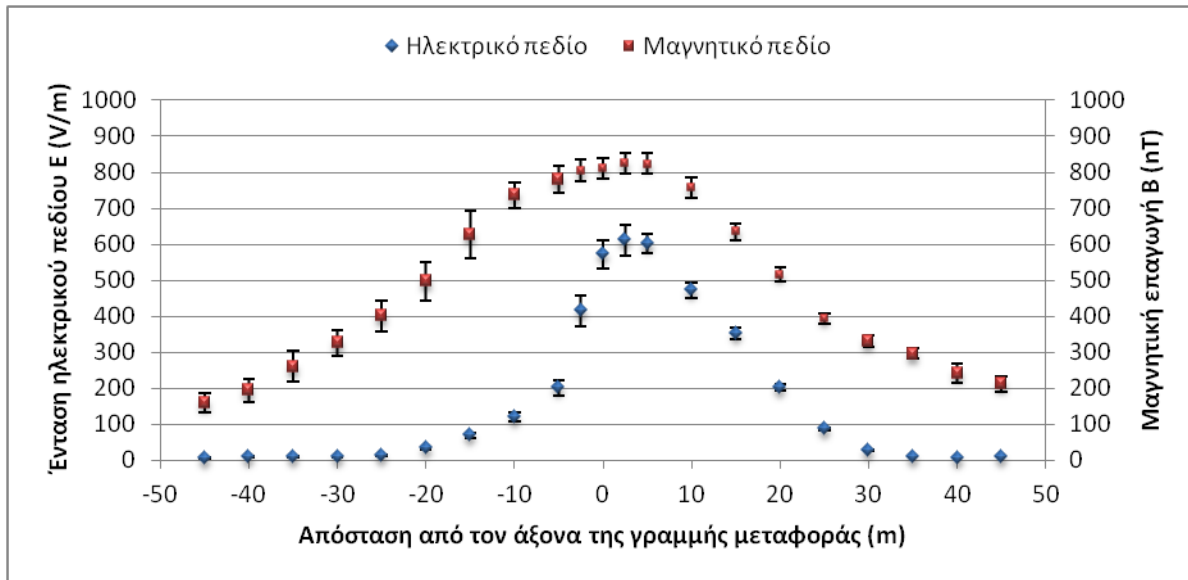
- Περίπτωση 1η : Μετρήσεις σε κατοικήσιμη περιοχή από την οποία διέρχεται γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης 150kV. Σε ορισμένες θέσεις μέτρησης τα αποτελέσματα συχνά επηρεάζονταν από τις κοντινές κατοικίες (π.χ. μεταλλικοί φράχτες των αυλών τους), τη μικρή βλάστηση, τους μεταλλικούς στύλους της ΔΕΗ ή φωτισμού και τα αυτοκίνητα.
- Περίπτωση 2η : Μετρήσεις σε χώρο που βρίσκεται κάτω από δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής τάσης 150kV. Δεν υπήρχαν αντικείμενα στην περιοχή παρά μόνο μικρή βλάστηση σε κάποια σημεία του χώρου μέτρησης.

Στα διαγράμματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των πεδίων (αφού έχουν εφαρμοστεί οι συντελεστές διόρθωσης του οργάνου) με τις υπολογισμένες αβεβαιότητες που διακρίνονται ως κάθετες γραμμές σφάλματος. Οι αβεβαιότητες αυτές αναπαριστούν την συνολική αβεβαιότητα (ανεπτυγμένη αβεβαιότητα) που θα υπολογιστεί στο επόμενο εδάφιο.

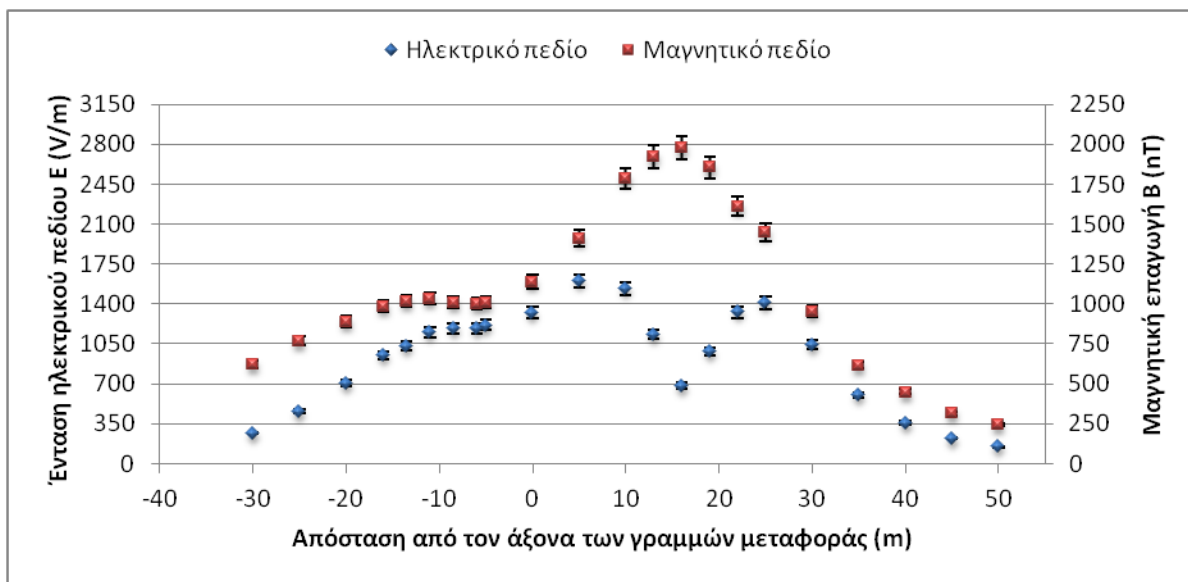
## 3. Αβεβαιότητα μετρήσεων χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων

### 3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο - Υπολογισμός αβεβαιοτήτων

Η αβεβαιότητα μέτρησης χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων πρέπει να υπολογισθεί ακολουθώντας διεθνείς οδηγίες (ISO GUM:1993, UKAS M3003:2007). Όμως, η εκτίμηση της είναι δύσκολη διαδικασία, λόγω του προβλήματος της αναγνώρισης και της ποσοτικοποίησης των διαφορετικών συνιστωσών αβεβαιότητας. Για τον προσδιορισμό των συνιστωσών αβεβαιότητας μπορούν να βρεθούν χρήσιμες υποδείξεις στα ήδη προαναφερθέντα πρότυπα και σε δημοσιευμένες εργασίες (Borsoero et al 2001, Vulevic´ et al 2010, Ztoupis et al 2013).



Διάγραμμα 1: Πλευρικό προφίλ μετρούμενων τιμών έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής AX25-AX26 (Περίπτωση 1<sup>η</sup>).



Διάγραμμα 2: Πλευρικό προφίλ μετρούμενων τιμών έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στα τμήματα των γραμμών μεταφοράς PA46 - PA47 και XA9 - XA10 (Περίπτωση 2<sup>η</sup>).

Οι συνιστώσες αβεβαιότητας διακρίνονται σε τύπου A και τύπου B. Οι τύπου A περιλαμβάνουν την επαναληψιμότητα (repeatability) των μετρήσεων, ενώ οι τύπου B χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες σχετίζονται με α) τα χαρακτηριστικά του πεδιομέτρου (π.χ. η διακρίβωση, η ευστάθεια, η ζώνη διέλευσης του οργάνου κτλ), β) την διαδικασία μέτρησης (ή

αλλιώς μεθοδολογία μέτρησης),  $\gamma$ ) τις συνθήκες μέτρησης (π.χ. η υγρασία, η θερμοκρασία κτλ) και τα χαρακτηριστικά της πηγής του πεδίου.

Έτσι, λοιπόν, η αβεβαιότητα τύπου A υπολογίζεται από την σχέση 1:

$$U_A = \frac{s_A}{\sqrt{n_A}} = \sqrt{\frac{1}{n_A \cdot (n_A - 1)} \sum_{i=1}^{n_A} (x_i - x_m)^2}, \quad (1)$$

όπου,  $n_A$  είναι ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων σε κάθε θέση μέτρησης,  $x_i$  είναι η μετρούμενη τιμή,  $x_m$  είναι η μέση τιμή των  $n_A$  μετρήσεων, και  $s_A$  είναι η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής.

Γνωρίζοντας την κατανομή που ακολουθεί κάθε πηγή αβεβαιότητας, η αβεβαιότητα τύπου B υπολογίζεται από την σχέση 2, όπου  $U_{B_i}$  η συμβολή κάθε πηγής αβεβαιότητας:

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

όπου,  $s_{B_i}$  είναι οριακή τιμή της πηγής  $i$ , και  $k_i$  ο συντελεστής κάλυψης της αντίστοιχης κατανομής.

Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα προκύπτει από τον συνδυασμό όλων των συνιστωσών αβεβαιότητας (τύπου A και τύπου B) όπως στην 3:

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}. \quad (3)$$

Η ανεπτυγμένη αβεβαιότητα υπολογίζεται από την σχέση 4:

$$U = k \cdot U_c. \quad (4)$$

Για πιθανότητα κάλυψης 95,45 % , ο συντελεστής κάλυψης θα είναι  $k = 2$ .

### 3.2 Αποτελέσματα αβεβαιοτήτων

Στην συγκεκριμένη εργασία, η αβεβαιότητα τύπου A κρίθηκε αμελητέα καθώς η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει σταθερή ενώ η μαγνητική επαγωγή (δηλ. το φορτίο της γραμμής) δεν μεταβαλλόταν αισθητά σε κάθε θέση μέτρησης. Επομένως, η συνολική αβεβαιότητα των μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής που εκτελέστηκαν εξαρτήθηκαν μόνο από τις συνιστώσες αβεβαιότητας τύπου B. Οι διαθέσιμες πληροφορίες που μας εξασφάλισαν την εκτίμηση της κάθε συνιστώσας αβεβαιότητας προήλθαν από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης και το εγχειρίδιο λειτουργίας του εξοπλισμού μέτρησης (Narda EFA-300) και από την εμπειρία ή τις υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου. Στην συνέχεια, παραθέτονται οι Πίνακες 1 και 2 στους οποίους δίνονται οι τιμές των συνιστωσών αβεβαιότητας βάση των συνθηκών που συναντήσαμε στις μετρήσεις. Παράλληλα, υπολογίζονται τα ακραία εύρη τιμών διευρυμένης αβεβαιότητας των μετρήσεων του ηλεκτρικού

και μαγνητικού πεδίου εντός των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές αβεβαιότητας που υπολογίστηκαν.

Οι μεγάλες τιμές της αβεβαιότητας οφείλονται στην δυσκολία εκτίμησης της κυρίως λόγω των δύσκολων συνθηκών που αντιμετωπίσαμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων και της εμπειρίας του μετρολόγου. Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, θα μπορούσε να είναι πολύ μεγαλύτερη εξαιτίας των μικρών τιμών των πεδίων και της ύπαρξης δευτερεύουσων πηγών ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν τα πεδία υποβάθρου. Όμως, δεν έχουμε ούτε τα δεδομένα για την αβεβαιότητα του οργάνου σε τέτοια επίπεδα τιμών ενώ είναι αδύνατο να εκτιμήσουμε με σχετικά καλή ακρίβεια τα πεδία υποβάθρου.

Η αβεβαιότητα μέτρησης υπολογίστηκε για όλους τους χώρους μέτρησης και βρέθηκε μεταξύ 3,60% έως 16,47% για τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου και 3,60% έως 11,21% για τις μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου. Από τους παρακάτω Πίνακες 1 και 2 οι ακόλουθες σημαντικές παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν:

- Η μέγιστη τιμή της αβεβαιότητας των πεδίων υποβάθρου προκύπτει όταν το επίπεδο από την γραμμή μεταφοράς πλησιάζει αυτό των πεδίων υποβάθρου (π.χ μετρήσεις κοντά σε γραμμές διανομής).
- Η τιμή της αβεβαιότητας εξαιτίας της κοντινής παρουσίας του χειριστή βασίζεται στα γνωστά πρότυπα. Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 5 m μεταξύ χειριστή και αισθητήρα η επίδραση της εγγύτητας έχει αμελητέο αντίκτυπο στην συνολική αβεβαιότητα.
- Η αβεβαιότητα του οργάνου λόγω θορύβου στις μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου κρίθηκε αμελητέα καθώς το πεδίο θορύβου είναι 0,14V/m και 0,8nT, αντίστοιχα.
- Οι τιμές των αβεβαιοτήτων λόγω της ανομοιομορφίας του πεδίου και σφαλμάτων θέσης και προσανατολισμού του αισθητήρα κρίνονται σχεδόν αμελητέες επειδή κάτω από τις γραμμές μεταφοράς το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι γενικά ομογενή.
- Ο μετρολόγος παίζει αποφασιστικό ρόλο στην εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας. Πολλές συνιστώσες αβεβαιότητας όπως ζητήματα εγγύτητας, πεδία υποβάθρου, σφάλματα θέσης και προσανατολισμού αισθητήρα προσδιορίζονται από τον χειριστή.

Παράλληλα με τους Πίνακες 1 και 2 μπορούμε να εξάγουμε ενδιαφέροντα συμπεράσματα ανάλογα με τον χώρο μέτρησης από τα παρακάτω Διαγράμματα 3 και 4 στα οποία απεικονίζονται πλέον ξεκάθαρα οι τιμές των αβεβαιοτήτων στις δύο εφαρμογές της 2ης παραγράφου.

#### *Κατοικημένες περιοχές*

Πέρα από την αβεβαιότητα που σχετίζεται με το όργανο μέτρησης, υπάρχουν πολλές άλλες πηγές που συμβάλλουν στην συνολική αβεβαιότητα στις κατοικημένες περιοχές. Στην περίπτωση των μετρήσεων κοντά σε γραμμή μεταφοράς, μεγάλες αβεβαιότητες εμφανίζονται όταν υπάρχουν άλλες πηγές πεδίου ή αντικείμενα. Ειδικότερα, στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου, η μέγιστη αβεβαιότητα εξαρτάται από την επίδραση των αντικειμένων που υπάρχουν κοντά σε κάποιες θέσεις μέτρησης όπως οι πυλώνες φωτισμού, φράχτες, δέντρα κτλ. Αντίθετα, στην περίπτωση του μαγνητικού πεδίου, η κυρίαρχη πηγή αβεβαιότητας αποτελούν τα πεδία υποβάθρου από κοντινές γραμμές διανομής. Επίσης, σημαντικό ρόλο μπορεί να παίξει και η ύπαρξη σιδηρομαγνητικών ή αγωγίμων αντικειμένων.

Πίνακας 1: Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου.

Πηγή αβεβαιότητας	Τεχνική εκτίμησης	Τιμή αβεβαιότητας (%)	Κατανομή πιθανότητας	Διαιρέτης	Συντελεστής ευαισθησίας	Τυπική αβεβαιότητα (%)
<b>Πηγή του πεδίου</b>						
Ανομοιομορφία του πεδίου	Κρίση χειριστή	0	Κανονική	1	1	0
<b>Εξοπλισμός μέτρησης</b>						
Αβεβαιότητα διακρίβωσης	Πιστοποιητικό διακρίβωσης	1	Κανονική	2	1	0,5
Αβεβαιότητα του πεδιομέτρου	Εγχειρίδιο κατασκευαστή	3	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	1,73
Θόρυβος	Εγχειρίδιο κατασκευαστή	0	Κανονική	1	1	0
<b>Διαδικασία μέτρησης</b>						
Αβεβαιότητα λόγω της θέσης του αισθητήρα	Κρίση χειριστή	$\approx 0$	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
Αβεβαιότητα προσανατολισμού του αισθητήρα	Κρίση χειριστή	$\approx 0$	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
<b>Περιβαλλοντικές συνθήκες</b>						
Θερμοκρασία και υγρασία	Εγχειρίδιο κατασκευαστή	0	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
Επίδραση της εγγύτητας του παρατηρητή	Κρίση χειριστή	0-1	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0-0,58
Επίδραση της εγγύτητας των αντικειμένων	Κρίση χειριστή	0-10	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0-5,77
Πεδία υποβάθρου	Κρίση χειριστή	0-5	Κανονική	2	1	0-2,5
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα , $u_c = (\sum u_i^2)^{1/2}$ (%)						1,80-5,60
Ανεπτυγμένη αβεβαιότητα (Κανονική κατανομή) , $U_E = k \cdot u_c$ (για $k=2$ )						3,60-11,21

I. Ν. Ζτούπης, I. Φ. Γκόνοσ και I. Α. Σταθόπουλος, ΕΜΠ  
 Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης χαμηλόσυχνων πεδίων κάτω από γραμμές μεταφοράς

5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

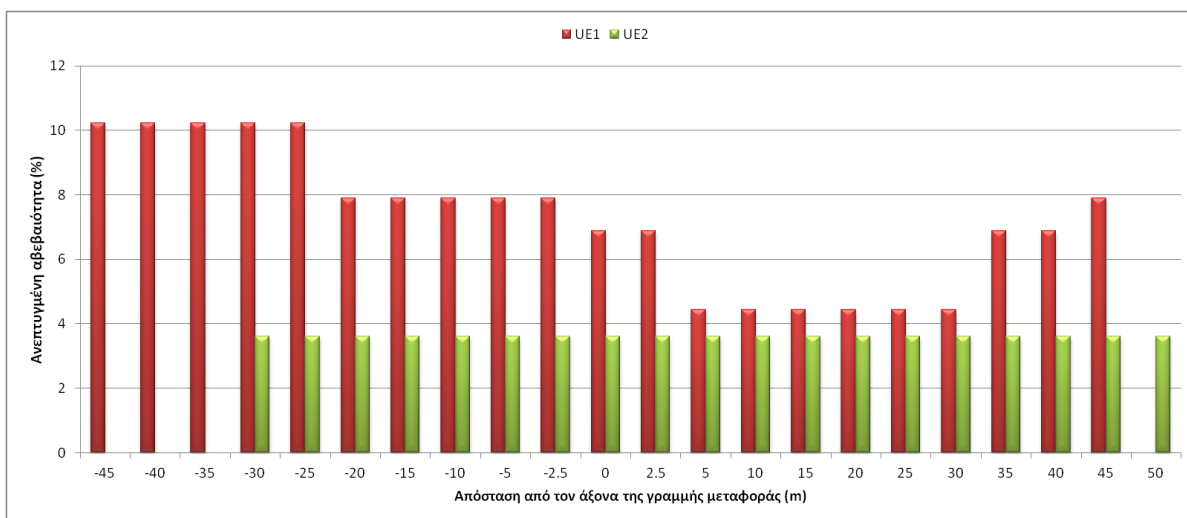


Πίνακας 2: Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης μαγνητικού πεδίου.

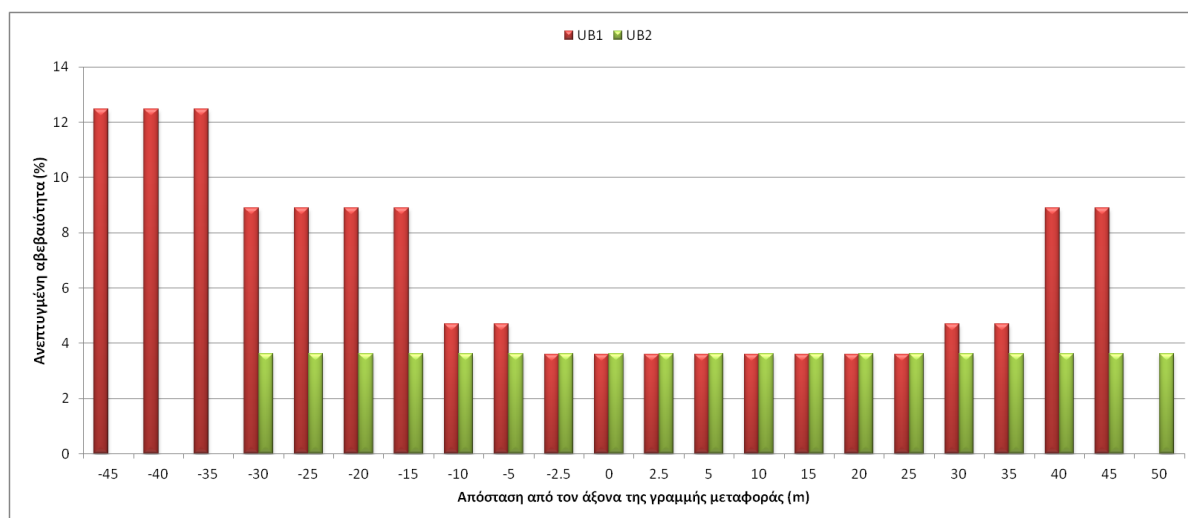
Πηγή αβεβαιότητας	Τεχνική εκτίμησης	Τιμή αβεβαιότητας (%)	Κατανομή πιθανότητας	Διαιρέτης	Συντελεστής ευαισθησίας	Τυπική αβεβαιότητα (%)
<b>Πηγή του πεδίου</b>						
Ανομοιομορφία του πεδίου	Κρίση χειριστή	0	Κανονική	1	1	0
<b>Εξοπλισμός μέτρησης</b>						
Αβεβαιότητα διακρίβωσης	Πιστοποιητικό διακρίβωσης	1	Κανονική	2	1	0,5
Αβεβαιότητα του πεδιομέτρου	Εγχειρίδιο κατασκευαστή	3	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	1,73
Θόρυβος	Εγχειρίδιο κατασκευαστή	0	Κανονική	1	1	0
<b>Διαδικασία μέτρησης</b>						
Αβεβαιότητα λόγω της θέσης του αισθητήρα	Κρίση χειριστή	$\approx 0$	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
Αβεβαιότητα προσανατολισμού του αισθητήρα	Κρίση χειριστή	$\approx 0$	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
<b>Περιβαλλοντικές συνθήκες</b>						
Θερμοκρασία και υγρασία	Εγχειρίδιο κατασκευαστή	0	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
Επίδραση της εγγύτητας του παρατηρητή	Κρίση χειριστή	0	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0
Επίδραση της εγγύτητας των αντικειμένων	Κρίση χειριστή	0-5	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	1	0-2,89
Πεδία υποβάθρου	Κρίση χειριστή	0-15	Κανονική	2	1	0-7,5
Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα, $u_c = (\sum u_i^2)^{1/2}$ (%)						1,80-8,24
Ανεπτυγμένη αβεβαιότητα (Κανονική κατανομή), $U_B = k \cdot u_c$ (για $k=2$ )						3,60-16,47

Ι. Ν. Ζτούπης, Ι. Φ. Γκόνοσ και Ι. Α. Σταθόπουλος, ΕΜΠ  
 Υπολογισμός αβεβαιότητας μέτρησης χαμηλόσυχνων πεδίων κάτω από γραμμές μεταφοράς

5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014



Διάγραμμα 3 : Συνολική αβεβαιότητα των μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου (Περιπτώσεις 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup>).



Διάγραμμα 4 : Συνολική αβεβαιότητα των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου (Περιπτώσεις 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup>).

Τα παραπάνω είναι εμφανή από τα διαγράμματα. Όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 3, η συνολική αβεβαιότητα (UE1) για το ηλεκτρικό πεδίο κυμαίνεται από 3,60 έως 10,23 %. Συγκεκριμένα, υψηλές αβεβαιότητες (υψηλότερες από 10%) παρατηρούνται για αρκετά μέτρα από 45m έως -2,5m μακριά από τον άξονα της γραμμής, επειδή οι θέσεις μέτρησης είναι κοντά σε κτίρια, πυλώνες φωτισμού και δέντρα. Επίσης, η εκτιμώμενη αβεβαιότητα αυξάνεται στην δεξιά μεριά του προφίλ λόγω κάποιου τρίμετρου φράχτη. Επιπροσθέτως, η συνολική αβεβαιότητα για το μαγνητικό πεδίο (UB1) κυμαίνεται από 3,60 έως 12,47 % (διάγραμμα 4). Η μέγιστη αβεβαιότητα εμφανίζεται λόγω της γραμμής μέσης τάσης. Επίσης, στην δεξιά μεριά του προφίλ η αβεβαιότητα επηρεάζεται από μία γραμμής χαμηλής τάσης.

#### *Ανοιχτές περιοχές (χωρίς αντικείμενα)*

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων χαμηλόσυχων πεδίων κυμαίνεται περίπου στα 10%, αν και σε ορισμένες περιοχές είναι μικρότερη. Σε αυτές υποτίθεται ότι δεν υπάρχουν άλλες γραμμές μεταφοράς ή αντικείμενα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση και η επιφάνεια του εδάφους είναι επίπεδη. Ειδικότερα, όπως σε αυτήν της περίπτωσης 2 όπου ο αριθμός των παραμέτρων που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων είναι μικρός. Η μόνη πηγή αβεβαιότητας σχετίζεται με αυτή του οργάνου και παραμένει σταθερή. Υπολογίστηκε ίση με 3,60 % και για το ηλεκτρικό και για το μαγνητικό πεδίο όπως διακρίνεται στα διαγράμματα 3 και 4.

#### *Ορεινές περιοχές*

Σε αυτές τις περιοχές, η συνολική αβεβαιότητα του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θέση μέτρησης καθώς μπορεί να συνυπάρχουν η μεγάλη κλίση του εδάφους και αρκετή βλάστηση. Αντίθετα, η συνολική αβεβαιότητα του μαγνητικού πεδίου παραμένει σχεδόν σταθερή. Όμως, αν το φορτίο της γραμμής είναι αρκετά μικρό (π.χ. παραγόμενο από αιολικό πάρκο τη στιγμή με μικρή ταχύτητα του ανέμου) τόσο ώστε να είναι μικρότερο από το δυναμικό εύρος του οργάνου, η αβεβαιότητα είναι υψηλότερη από αυτή που δίνεται από τον κατασκευαστή. Παρόλ' αυτά, αυτή η άγνωστη τιμή είναι μικρής σημασίας καθώς οι μετρούμενες τιμές του πεδίου είναι αρκετά μικρότερες από τα ασφαλή όρια.

#### **4. Συμπεράσματα**

Μετρήσεις χαμηλόσυχων πεδίων κοντά σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης διεξήχθησαν με σκοπό την αναγνώριση και την ποσοτικοποίηση των συνιστωσών αβεβαιότητας και κατόπιν τον υπολογισμό της συνολικής αβεβαιότητας. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός και ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία μέτρησης πετυχαίνοντας ικανοποιητική καταγραφή των τιμών των πεδίων και κρατώντας τις αβεβαιότητες σε χαμηλά σχετικά επίπεδα. Παρόλ' αυτά, αρκετές παράμετροι επηρέασαν την ακρίβεια των μετρήσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ανάλογα με τον χώρο διεξαγωγής των μετρήσεων. Επομένως, ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μία τεχνική υπολογισμού των αβεβαιοτήτων βασισμένη σε σχετικά πρότυπα και οδηγίες για κάθε χώρο μέτρησης μετά την αναγνώριση των συνιστωσών αβεβαιότητας.

Στην εργασία αυτή, ο υπολογισμός των αβεβαιοτήτων που περιγράφηκε έλαβε υπ' όψιν ορισμένες πηγές αβεβαιότητας τύπου Β όπως τα δεδομένα του οργάνου μέτρησης (εγχειρίδιο κατασκευαστή και πιστοποιητικό διακρίβωσης), οι περιβαλλοντικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά των πηγών του πεδίου και η διαδικασία μέτρησης του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων. Συνυπολογίζοντας όλες αυτές τις συνιστώσες αβεβαιότητας η τιμή της συνολικής αβεβαιότητας υπερέβησε το 10%, αν και η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Η παρουσία αντικειμένων στην εγγύτητα του αισθητήρα μέτρησης και η παρουσία των μαγνητικών πεδίων υποβάθρου συνέβαλαν περισσότερο στο αποτέλεσμα της αβεβαιότητας για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, αντίστοιχα. Τέλος, είναι ξεκάθαρο πως η συνολική αβεβαιότητα επηρεάζεται εξαιρετικά από την κρίση του χειριστή.

## Βιβλιογραφία

- B. Vulevic' and P. Osmokrovic', "*Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields*", Radiat. Prot. Dosim. 141(2), 173–177 (2010).
- C.-Y. Li, F.-C. Sung, F.-L. Chen, P.-C. Lee, M. Silva and G. Mezei, "*Extremely-low-frequency magnetic field exposure of children at schools near high voltage transmission lines*", Sci. Total Environ., 376, 151–159 (2007).
- EFA-300 EM Field Analyzer, "*Operating manual*", Narda Safety Test Solutions (2002).
- IEEE Std 644-1994, "*IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*", 1995.
- IEC 61786, "*Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements*", 1998.
- IEC 62110, "*Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure*", August 2009
- ISO GUM:1993, "*Guide to the expression of uncertainty in measurement*".
- I.N. Ζτούπης, I.Φ. Γκόνοϋ, I.A.Σταθόπουλοϋ, "Μετρήϋεις και υπολογιϋμοί ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εναέριων γραμμών μεταφοράϋ ηλεκτρικήϋ ενέργειασ", Σύνοδοϋ Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, Ενότητα ΣΤ: Ανάλυϋη Μετρήϋεων: ΣΤ1, 12-13 Δεκεμβρίου 2013.
- I.N. Ztoupis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, "*Uncertainty Evaluation in the Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Overhead Power Lines*", Radiat. Prot. Dosim., 157 (1), pp. 11-21, January, 2013.
- M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, and G. d'Amore, "*Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields*", Radiat. Prot. Dosim. 97(4), 363–368 (2001).
- P. Sarma Maruvada, A. Turgeon, D. L. Goulet and C. Cardinal, "*An experimental study of residential magnetic fields in the vicinity of transmission lines*", IEEE Trans. Power Del., 13, 1328–1334 (1998).
- R. Shivakumara Aradhya, R. Arunjothi, P. Rajendra and B. Krishna, "*Measurement of magnetic fields of electric power lines and substations*", Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2005), Beijing, China (paper A-29) (2005).
- T. Sjoblom, T. Keikko, S. Halinen, T. Kivela and L. Korpinen, "*Electric fields caused by transmission lines in Finland*", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore, India (paper 1–19) (2001).
- UKAS M3003:2007, "*The expression of uncertainty and confidence in measurement*".