ΔΟΚΙΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΤΡΩΣΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Π. Κ. Παπασταμάτης, Ε. Π. Νικολοπούλου, Ν. Χ. Ηλία,
Β. Θ. Κονταργύρη, Ι. Φ. Γκόνος και Ι. Α. Σταθόπουλος
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου
E-mail: ppapastamatis@central.ntua.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία, μετά από μία εισαγωγή στην έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ατρωσίας, καθώς και στον καθοριστικό ρόλο της στον σχεδιασμό και την παραγωγή ενός ηλεκτροτεχνικού/ηλεκτρονικού προϊόντος, παρουσιάζει μια συνοπτική ανάλυση των δοκιμών που απαιτούνται από την Οδηγία για την Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (2015/30/ΕΕ) και αφορούν στην ηλεκτρομαγνητική ατρωσία από μεταβατικά φαινόμενα. Ειδικότερα, αναλύονται τα Πρότυπα ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2, ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-4 και ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-5, τα οποία αναφέρονται σε δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, από γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα/ριπές και από υπερτάσεις–υπερεντάσεις, αντιστοίχως. Μελετώνται οι διαφορετικές διατάξεις δοκιμών, καθώς και τα είδη του απαραίτητου εξοπλισμού για τη βέλτιστη διεξαγωγή τους. Παρουσιάζεται η έννοια και η χρησιμότητα της διαδικασίας διακρίβωσης στις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας. Τέλος, με αφορμή τις τελευταίες αναθεωρήσεις των ανωτέρω Προτύπων, αναφορικά με τις μεθόδους υπολογισμού αβεβαιοτήτων, δίνονται για κάθε δοκιμή ατρωσίας χαρακτηριστικά παραδείγματα υπολογισμού της αβεβαιότητας. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της διεξαγωγής των συγκεκριμένων δοκιμών, από διαπιστευμένα εργαστήρια, καθώς και η αναγνώριση των κυριότερων παραγόντων, που επηρεάζουν αφ' ενός την αβεβαιότητα και αφ' ετέρου την επαναληψιμότητα των δοκιμών.

Λέξεις-Κλειδιά: αβεβαιότητα, ηλεκτρομαγνητική ατρωσία, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα, διακρίβωση, ιχνηλασιμότητα.

Abstract

This paper, after an introduction to electromagnetic compatibility and immunity, as well as its decisive role in designing and manufacturing an electrical/electronic product, presents a description of the test procedures, required by the Guide for the EMC Directive (2014/30/EU), regarding electromagnetic immunity to transient disturbances. Specifically, the Standards EN 61000-4-2, EN 61000-4-4, EN 61000-4-5, regarding immunity testing to electrostatic discharges, fast transients/bursts and surges, are analysed. The different test setups and equipment, as well as the concept and importance of the calibration procedure in immunity testing, are presented in detail. Finally, uncertainty budget examples, according to the recent revisions of the aforementioned Standards are given. Scope of this paper is the optimization of these procedures, carried out by accredited laboratories, as well as the identification of the factors affecting the uncertainty and repeatability of immunity tests.

Keywords: uncertainty, electromagnetic immunity, electromagnetic compatibility, transient phenomena, calibration, traceability

1. Εισαγωγή

Ηλεκτρομαγνητική ατρωσία, αντ. συμβατότητα (Electromagnetic Immunity, resp. Compatibility, EMI, resp. EMC), είναι ο τομέας της επιστήμης και της μηχανικής που ασχολείται με τον σχεδιασμό και τη λειτουργία εξοπλισμού με τέτοιο τρόπο, ώστε να τον καθιστά άτρωτο σε συγκεκριμένα ποσά ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, ενώ ταυτόχρονα οι παρεμβολές του να παραμένουν μέσα σε καθορισμένα όρια. Η σημασία των συγκεκριμένων ιδιοτήτων του εξοπλισμού επικυρώθηκε τις τελευταίες δεκαετίες με την καθιέρωση από τις αρμόδιες διεθνείς επιτροπές (IEC, CENELEC, CISPR, ETSI) Προτύπων, που ορίζουν τα επίπεδα των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς και τα επίπεδα ατρωσίας με τα οποία πρέπει να συμμορφώνεται ο προς παραγωγή εξοπλισμός, ώστε να επιτραπεί στον κατασκευαστή να προχωρήσει στη διάθεση του εξοπλισμού στην Ευρωπαϊκή αγορά.

Τα διεθνή αυτά Πρότυπα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

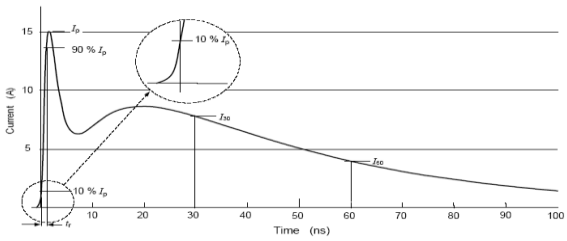
- Πρότυπα που καθορίζουν τα όρια εκπομπής παρεμβολών σε κρίσιμες φασματικές περιοχές ενδιαφέροντος, αναλόγως με το είδος και τη λειτουργία του εξοπλισμού.
- Πρότυπα που ορίζουν δοκιμές ατρωσίας, στις οποίες υποβάλλεται ο εξεταζόμενος εξοπλισμός.

Στη δεύτερη κατηγορία υπάγονται και μία σειρά Προτύπων που καθορίζουν δοκιμές ατρωσίας σε ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα, κατά τα οποία στιγμιαίες μεταβολές στην κατάσταση του συστήματος οδηγούν στη ραγδαία έγχυση ενέργειας και θορύβου. Τα Πρότυπα ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2, ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-4 και ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-5 αναφέρονται σε δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, από γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα/ριπές και από υπερτάσεις–υπερεντάσεις, αντιστοίχως. Μέσω αυτών των δοκιμών αναπαριστώνται φαινόμενα διαφορετικού εύρους ζώνης και επιπέδου ενέργειας. Στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων διεξάγεται έρευνα για τη βέλτιστη εφαρμογή των ανωτέρω Προτύπων (Κατσιβέλης κ.ά. 2010, Κατσιβέλης 2011, Κωνσταντίνου 2012, Παπασταμάτης 2013, Georgopoulos et al. 2016).

2. Πρότυπα διεξαγωγής δοκιμών Ηλεκτρομαγνητικής Ατρωσίας σε ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα

2.1 Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2

Το διεθνές αυτό Πρότυπο αναφέρεται στην ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (ESD) και καθορίζει τον τρόπο αναπαράστασης του φαινομένου καθώς και τη μεθοδολογία διεξαγωγής των αντίστοιχων δοκιμών. Το Πρότυπο προσδιορίζει ως πηγή της διαταραχής τις εκφορτίσεις του ανθρώπινου σώματος, ενώ οι δοκιμές προσομοιώνουν την κυματομορφή του εγχεομένου ρεύματος, διαρκούσης της λειτουργίας της ελεγχομένης συσκευής. Οι παράμετροι της κυματομορφής ρεύματος του Προτύπου παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 και στον Πίνακα 1.



Εικόνα 1: Κυματομορφή ρεύματος ESD στα 4kV

Πίνακας 1: Παράμετροι κυματομορφής ρεύματος

Επίπεδο	Ένδειξη τάσης kV	I_{max} (±15%) A	t_r (±25%) ns	I_{30ns} (±30%) A	I_{60ns} (±30%) A
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

2.1.1 Επίπεδα, διατάξεις και διεξαγωγή δοκιμών

Ο τρόπος εφαρμογής των παλμών, καθώς και τα επίπεδα τάσης αυτών (Πίνακας 2) εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της υπό δοκιμή συσκευής. Το Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2 ορίζει δύο τρόπους εκφόρτισης: την εκφόρτιση επαφής, η οποία εφαρμόζεται μόνο σε αγώγιμες επιφάνειες και την εκφόρτιση μέσω αέρα σε μονωτικές επιφάνειες (Πίνακας 3). Τα δοκίμια κατηγοριοποιούνται α) ανάλογα με τον τρόπο χρήσης του εξοπλισμού (επιτραπέζιος - επιδαπέδιος) και β) ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι γείωσης.

Πίνακας 2: Επίπεδα δοκιμών για εκφορτίσεις επαφής και αέρα.

Εκφορτίσεις επαφής		Εκφορτίσεις στον αέρα	
Επίπεδο	**Ένδειξη τάσης kV**	**Επίπεδο**	**Ένδειξη τάσης kV**
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	6
4	8	4	8
X	Ειδικό	X	Ειδικό

Πίνακας 3: Επιλογή τρόπου διεξαγωγής δοκιμών

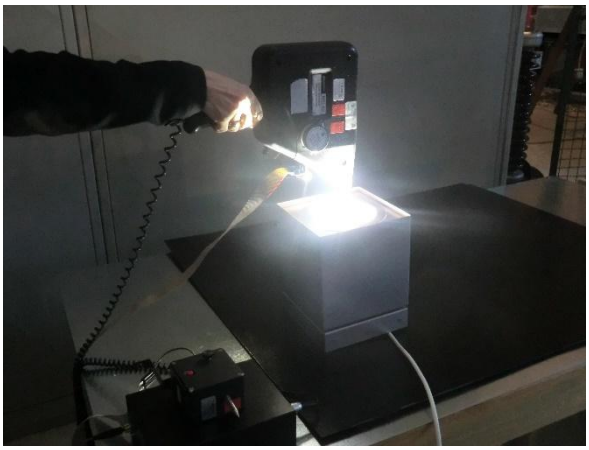
Περίπτωση	**Κέλυφος ακροδέκτη**	**Υλικό επικάλυψης**	**Εκκένωση αέρα στο:**	**Εκκένωση επαφής στο:**
1	Μεταλλικό	Κανένα	-	Κέλυφος
2	Μεταλλικό	Μονωτικό	Περίβλημα	Κέλυφος όταν είναι προσβάσιμο
3	Μεταλλικό	Μεταλλικό	-	Κέλυφος και περίβλημα
4	Μονωτικό	Κανένα	*	-
5	Μονωτικό	Μονωτικό	Περίβλημα	-
6	Μονωτικό	Μεταλλικό	-	Περίβλημα

2.1.2 Διάταξη δοκιμών

Στο δάπεδο του εργαστηρίου πρέπει να υπάρχει ένα επίπεδο αναφοράς εδάφους (Ground Reference Plane, GRP). Μπορεί να είναι ένα μεταλλικό φύλλο (συνηθέστερα χαλκός/αλουμίνιο ή και άλλα μεταλλικά υλικά) ελάχιστου πάχους 0.25mm όταν πρόκειται για χαλκό ή αλουμίνιο και 0.65mm όταν πρόκειται για άλλα μεταλλικά υλικά. Το GRP πρέπει να είναι γειωμένο και να επεκτείνεται πέραν του δοκιμίου ή του οριζοντίου επιπέδου σύζευξης (βλέπε ενότητα 2.1.3.1) κατά τουλάχιστον 0.5m σε όλες τις πλευρές.
Αφού το δοκίμιο συνδεθεί σύμφωνα με τις λειτουργικές του απαιτήσεις, πρέπει να τηρείται μια απόσταση τουλάχιστον 0.8m μεταξύ του δοκιμίου και των τοίχων του εργαστηρίου και οποιασδήποτε άλλης μεταλλικής κατασκευής. Το καλώδιο επιστροφής (εκφόρτισης) της γεννήτριας πρέπει να είναι ενωμένο στο GRP και σε απόσταση τουλάχιστον 0.2m απο άλλα αγώγιμα μέρη της διάταξης. Τα επίπεδα σύζευξης πρέπει να συνδέονται στο GRP μέσω ενός καλωδίου με αντιστάσεις 470 kΩ στις δύο άκρες του. Αυτές οι αντιστάσεις πρέπει να αντέχουν την τάση εκφόρτισης.

2.1.3 Διεξαγωγή δοκιμών

Η διεξαγωγή των δοκιμών, σύμφωνα με το Πρότυπο, εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των επιφανειών του δοκιμίου, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 3. Η τάση της δοκιμής αυξάνεται από το ελάχιστο ως το επιλεγμένο επίπεδο δοκιμής, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2, ώστε να προσδιορισθεί τυχόν κρίσιμο σημείο ή βλάβη.
Εφαρμόζονται δέκα τουλάχιστον μεμονωμένες εκκενώσεις σε προεπιλεγμένα σημεία του δοκιμίου με μεσοδιάστημα 1s, αν και είναι πιθανό να απαιτούνται μεγαλύτερα χρονικά μεσοδιαστήματα σε περιπτώσεις που πρέπει να καθοριστεί αν επήλθε βλάβη του συστήματος. Για λόγους επαναληψιμότητας της δοκιμής, η γεννήτρια ESD κρατείται κάθετη προς την επιφάνεια επί της οποίας εφαρμόζεται η εκκένωση.



Εικόνα 2: Άμεση εφαρμογή εκκενώσεων αέρα στο περίβλημα του δοκιμίου

Εικόνα 3: Άμεση εφαρμογή εκκενώσεων επαφής στο δοκίμιο

2.1.3.1 Έμμεση εφαρμογή της εκφόρτισης

Εκκενώσεις σε αντικείμενα που είναι τοποθετημένα ή εγκατεστημένα κοντά στο δοκίμιο προσομοιώνονται με εφαρμογή των εκκενώσεων επαφής της γεννήτριας ESD στο οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο σύζευξης.

2.1.3.1.1 Οριζόντιο επίπεδο σύζευξης κάτω από το δοκίμιο

Εφαρμόζονται τουλάχιστον δέκα εκκενώσεις στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης, σε σημεία πλησίον κάθε πλευράς του δοκιμίου (Εικόνα 4).
Η γεννήτρια ESD τοποθετείται κάθετα σε απόσταση 0.1m από το δοκίμιο, με το ηλεκτρόδιο εκφόρτισης (μύτη γεννήτριας) σε επαφή με το επίπεδο σύζευξης.

2.1.3.1.2 Κατακόρυφο επίπεδο σύζευξης

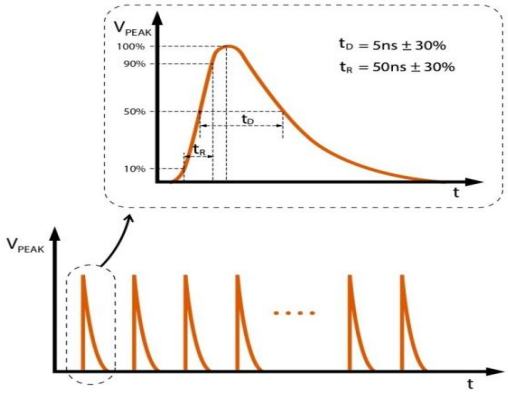
Εφαρμόζονται τουλάχιστον δέκα εκκενώσεις στο μέσον της κάθετης ακμής του επιπέδου σύζευξης (Εικόνα 5). Το επίπεδο σύζευξης, διαστάσεων 0.5m x 0.5m, τοποθετείται παράλληλα προς το δοκίμιο και σε απόσταση 0.1m από αυτό, ενώ οι εκκενώσεις εφαρμόζονται με τέτοιον τρόπο, ώστε να καλυφθούν πλήρως οι τέσσερις όψεις του δοκιμίου.

Εικόνα 4: Εκκενώσεις στο οριζόντιο επίπεδο σύζευξης

Εικόνα 5: Εκκενώσεις στο κάθετο επίπεδο σύζευξης

2.2 Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-4

Στο συγκεκριμένο Πρότυπο μελετάται η ατρωσία του ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα και απότομες εκφορτίσεις (EFT/B), όταν αυτά εφαρμόζονται στις θύρες τροφοδοσίας, σήματος, ελέγχου και γείωσης του εξοπλισμού. Τα EFT/B οφείλονται στους χειρισμούς διακοπτικών επαφών και αναπαριστάνονται με τις διαδοχικές ριπές παλμών τάσης 5ns/50ns με ρυθμό 5kHz ή 100kHz.



Εικόνα 6: Κυματομορφή τάσης EFT/B

Πίνακας 4: Επίπεδα δοκιμών EFT/B

Επίπεδο	Σε θύρες τροφοδοσίας		Σε θύρες δεδομένων, σήματος και ελέγχου	
	Μέγιστη τιμή τάσης kV	Ρυθμός επανάληψης kHz	Μέγιστη τιμή τάσης kV	Ρυθμός επανάληψης kHz
1	0.5	5 ή 100	1	0.5
2	1	5 ή 100	2	1
3	2	5 ή 100	3	2
4	4	5 ή 100	4	4
X	Ειδικό	Ειδικό	X	Ειδικό
Στις δοκιμές ο ρυθμός επανάληψης ορίζεται ως επί το πλείστον στα 5kHz, όμως τα 100kHz προσομοιώνουν καλύτερα τις πραγματικές διαταραχές				

2.2.1 Μέθοδοι σύζευξης

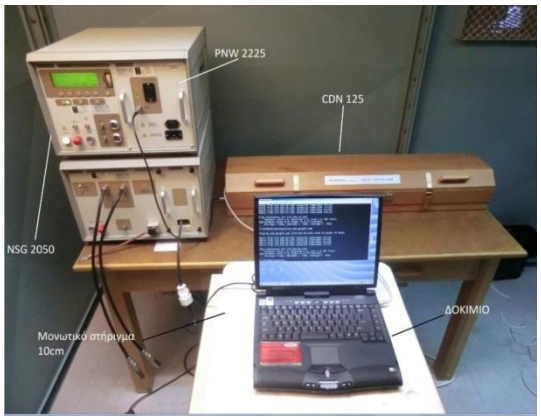
Οι μέθοδοι σύζευξης διαφέρουν ανάλογα με τη θύρα στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή.

- Στις θύρες τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται για τη χωρητική σύζευξη των παλμών σε όλες τις γραμμές ταυτόχρονα (common mode) πυκνωτές 33nF, ενώ για το τμήμα της απόζευξης (προστασίας του υπόλοιπου δικτύου από τους παλμούς δοκιμής) χρησιμοποιούνται πηνία με τιμή $L > 100\mu H$ συνοδευόμενα από φερρίτες.
- Στις θύρες δεδομένων, σήματος και ελέγχου η χωρητική σύζευξη επιτυγχάνεται με την χρήση της χωρητικής αρπάγης σύζευξης, η χωρητικότητα σύζευξης της οποίας εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της.

2.2.2 Διατάξεις και διεξαγωγή δοκιμών

Η διάταξη δοκιμών διαφοροποιείται ανάλογα με τη θύρα στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή.

Εικόνα 7: Διάταξη δοκιμών EFT/B σε θύρες τροφοδοσίας



Εικόνα 8: Διεξαγωγή δοκιμών EFT/B σε θύρες δεδομένων, σήματος και ελέγχου

2.2.2.1 Θύρες τροφοδοσίας

Η διεξαγωγή της δοκιμής σε αυτές τις θύρες πραγματοποιείται ως επί το πλείστον με την χρήση του δικτυώματος σύζευξης/απόζευξης (Coupling/Decoupling Network, CDN), το οποίο διασφαλίζει την προστασία του βοηθητικού εξοπλισμού και των δημόσιων δικτύων.
Τα δοκίμια, είτε επιδαπέδια είτε επιτραπέζια, τοποθετούνται πάνω σε ένα GRP, όπως αυτό χρησιμοποιείται και στις ως άνω δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και είναι μονωμένα από αυτό, με μονωτικό στήριγμα 0.1m ± 0.01m πάχους. Η γεννήτρια δοκιμών και το CDN είναι αφ' ενός τοποθετημένα επάνω και αφ' ετέρου συνδεδεμένα στο GRP.
Αφού το δοκίμιο συνδεθεί σύμφωνα με τις λειτουργικές του απαιτήσεις, ενώ τηρείται μια απόσταση τουλάχιστον 0.5m μεταξύ του δοκιμίου και οποιασδήποτε άλλης αγώγιμης κατασκευής, εκτός του GRP. Επίσης, το δοκίμιο γειώνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις εγκατάστασής του, χωρίς όμως να είναι επιτρεπτές επιπρόσθετες συνδέσεις γείωσης.
Όλα τα καλώδια του υπό εξέταση δοκιμίου τοποθετούνται πάνω στο προαναφερθέν μονωτικό στήριγμα. Τα καλώδια, τα οποία δεν υπόκεινται σε EFT/B δοκιμή, βρίσκονται όσον το δυνατόν πιο μακρυά από το καλώδιο τροφοδοσίας ώστε να αποφευχθεί η σύζευξη μεταξύ τους.

2.2.2.2 Θύρες δεδομένων, σήματος και ελέγχου

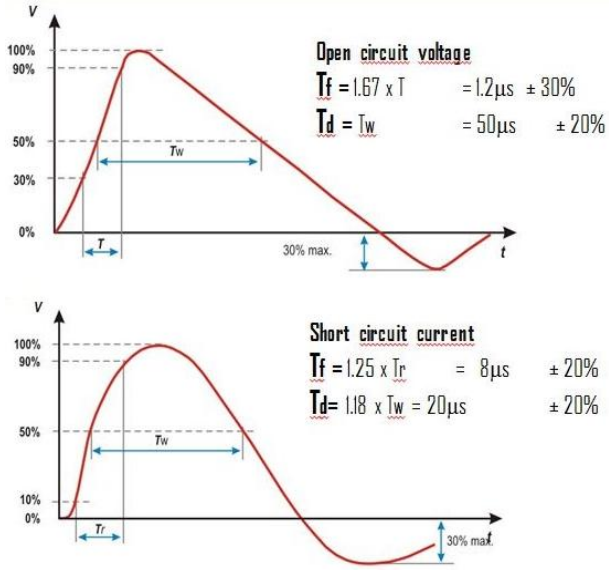
Όταν γίνεται χρήση της αρπάγης σύζευξης (coupling clamp), η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των πλακών σύζευξης και άλλων αγώγιμων επιφανειών, εκτός του GRP κάτω από την αρπάγη σύζευξης, πρέπει να είναι 0.5m.
Με την επιφύλαξη ότι δεν ορίζεται διαφορετικά από τις προδιαγραφές του εξοπλισμού, μεταξύ της συσκευής σύζευξης και του δοκιμίου πρέπει να είναι 0.5m ± 0.1m.

2.3 Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-5

Το συγκεκριμένο Πρότυπο μελετά την ατρωσία του ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε υπερτάσεις και υπερεντάσεις (Surges) που προκαλούνται λόγω:

- διακοπτικών μεταβατικών φαινομένων στο δίκτυο παροχής: Σε αυτά τα φαινόμενα εντάσσονται η σύνδεση/αποσύνδεση μεγάλων φορτίων στο δίκτυο (συστοιχίες πυκνωτών), η σύνδεση/αποσύνδεση μικρότερων φορτίων σε κοντινή απόσταση από τον εξοπλισμό ή στο δίκτυο διανομής, τα κυκλώματα συντονισμού διακοπτικών στοιχείων (θυρίστορ), καθώς και τα βραχυκυκλώματα/σφάλματα των συστημάτων γείωσης.
- κεραυνικών πληγμάτων: Στην κατηγορία των κεραυνικών πληγμάτων εντάσσονται τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα σε εξωτερικά κυκλώματα, τα έμμεσα κεραυνικά πλήγματα (επαγόμενες τάσεις/ρεύματα στους αγωγούς λόγω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων), καθώς και το κεραυνικό ρεύμα γείωσης από κοντινές κεραυνικές εκφορτίσεις.

Εδώ είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι οι συγκεκριμένες δοκιμές δεν μελετούν την αντοχή της μόνωσης του δοκιμίου σε υπερτάσεις, αλλά την ορθή λειτουργία του, όταν στην παροχή του εμφανιστούν διαταραχές υπέρτασης.
Τα συγκεκριμένα φαινόμενα μπορούν να προσομοιωθούν σύμφωνα με το Πρότυπο μέσω δύο γεννητριών συνδυασμού κυματομορφών τάσεως-ρεύματος 1.2μs/50μs-8μs/20μs και 10μs/700μs-5μs/320μs. Παρακάτω παρατίθενται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για την πρώτη γεννήτρια.



Εικόνα 9: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για δοκιμές υπερτάσεων-υπερεντάσεων

Πίνακας 5: Επίπεδα τάσης δοκιμών για δοκιμές υπερτάσεων

ΕΠΙΠΕΔΟ	ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ± 10% (line to line)	ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ± 10% (line to ground)
1	---	0.5 kV
2	0,5 kV	1 kV
3	1 kV	2 kV
4	2 kV	4 kV
X	Ειδικό	Ειδικό

Πίνακας 6: Επίπεδα τάσης δοκιμών για δοκιμές υπερεντάσεων

ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ± 10% (line to line)	ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΕΩΣ ± 10% (line to line)	ΡΕΥΜΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΕΩΣ ± 10% (line to ground)
0.5 kV	0.25 kA	41.7 A
1 kV	0.5 kA	83.3 A
2 kV	1 kA	166.7 A
4 kV	2 kA	333.3 A

2.3.1 Μέθοδοι σύζευξης

Για τη χωρητική σύζευξη των διαταραχών σε γραμμές τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται πυκνωτές 18μF (line to line) και ο συνδυασμός πυκνωτή 9 μF και αντίστασης 10Ω (line to ground).
Η χωρητική σύζευξη σε τηλεπικοινωνιακές γραμμές απαιτεί εκτενή μελέτη, λόγω των επιπτώσεων των πυκνωτών στην ταχεία μεταφορά δεδομένων. Το Πρότυπο προτείνει για την αντιμετώπιση της συγκεκριμένης ιδιομορφίας τη χρήση απαγωγέων υπέρτασης.

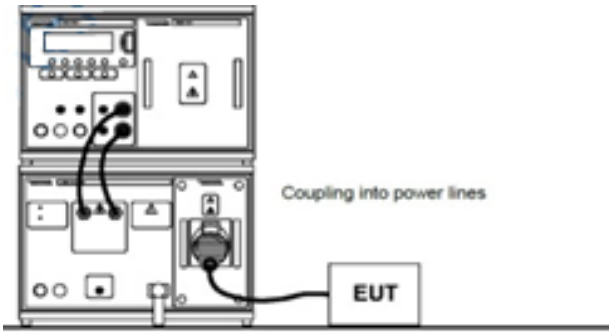
2.3.2 Διάταξη και διεξαγωγή δοκιμών

2.3.2.1 Θύρες τροφοδοσίας

Όπως και στο Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-4, η σύζευξη των παλμών και η απόζευξή τους από το βοηθητικό εξοπλισμό και το δίκτυο παροχής πραγματοποιείται με τη χρήση του κατάλληλου δικτυώματος σύζευξης/απόζευξης (CDN).
Το μήκος του καλωδίου σύνδεσης του CDN και της θύρας τροφοδοσίας του δοκιμίου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2m, ενώ ως GRP μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διάταξη που αναφέρθηκε στην περιγραφή των Προτύπων ΕΛΟΤ EN 61000-4-2 και ΕΛΟΤ EN 61000-4-4. Πραγματοποιούνται 5 κρούσεις υπό φασική γωνία 0°, 90°, 180° και 270° για θετική και αρνητική πολικότητα, αντίστοιχα.

2.3.2.2 Τηλεπικοινωνιακές θύρες

Η διεξαγωγή των συγκεκριμένων δοκιμών στηρίζεται ως επί το πλείστον στην επιλογή του κατάλληλου CDN για το είδος της γραμμής που εξετάζεται. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διαφοροποιηθούν οι περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται τα δύο είδη γεννητριών (αναφορικά με τις χρονικές παραμέτρους του επιβαλλομένου παλμού). Στο μεγαλύτερο ποσοστό των δοκιμών χρησιμοποιείται η γεννήτρια 1.2μs/50μs, ενώ σε δοκίμια,για τα οποία ο κατασκευαστής ορίζει ότι δύνανται να συνδεθούν με εξωτερικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μήκους πάνω από 300m (PSTN), χρησιμοποιείται η γεννήτρια 10μs/700μs, η οποία προσομοιώνει καλύτερα τις ζητούμενες διαταραχές.



Εικόνα 10: Διάταξη δοκιμών υπερτάσεων-υπερεντάσεων

Εικόνα 11: Διεξαγωγή δοκιμών υπερτάσεων-υπερεντάσεων

3. Διαδικασία διακρίβωσης

Διακρίβωση είναι η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων μιας συσκευής γνωστής ακριβείας, η οποία καλείται πρότυπη, και μιας άλλης συσκευής μέτρησης, η οποία είναι υπό έλεγχο, ώστε να ανιχνευθεί, να διορθωθεί αν χρειαστεί, και να πιστοποιηθεί η ακρίβεια της τελευταίας. Αποτελεί μέρος της διαπίστευσης, κατά το Πρότυπο ISO/IEC 17025: 2005, με την οποία πιστοποιείται ότι ένα εργαστήριο έχει τη δυνατότητα διεξαγωγής των παραπάνω δοκιμών.

Οι αναθεωρήσεις των Προτύπων, σχετικά με τη διαδικασία διακρίβωσης και τον τρόπο υπολογισμού των σχετικών αβεβαιοτήτων, ξεκίνησαν με την αναθεώρηση του Προτύπου ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-2 το 2009, η διαδικασία διακρίβωσης και υπολογισμού των αβεβαιοτήτων παρουσιάστηκε σε προηγούμενο συνέδριο Μετρολογίας (Κατσιβέλης κ.α. 2010), και συνεχίστηκε με τις αναθεωρήσεις των Προτύπων ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-4 και ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-5, το 2012 και 2014 αντίστοιχα.

3.1 Διακρίβωση γεννήτριας EFT/Burst σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-4

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία διακρίβωσης μίας γεννήτριας EFT/Burst κυματομορφής 5ns/50ns και συχνότητας 5kHz και 100kHz σε φορτίο 50Ω και 1000Ω. Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση των φορτίων αποσκοπεί στην καλύτερη προσομοίωση πραγματικών φορτίων δοκιμής. Η διαδικασία χωρίζεται σε δύο μέρη:

- Καταγραφή της παραγόμενης κυματομορφής τάσης στην έξοδο της γεννήτριας.
- Καταγραφή της παραγόμενης κυματομορφής τάσης στην έξοδο του δικτυώματος σύζευξης/απόζευξης (CDN). Σε αυτήν την περίπτωση η σύζευξη των παλμών από τη γεννήτρια γίνεται in common mode, δηλαδή σε όλες τις γραμμές ταυτόχρονα.

Ελέγχεται κατά πόσον οι παράμετροι της τάσεως, που παράγει η γεννήτρια, βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζει το Πρότυπο. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, η γεννήτρια παράγει κρούσεις σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-4.

Η τάση των παραγόμενων παρασίτων υποβιβάζεται:

α) για φορτίο 50Ω από έναν εξασθενητή με ιδανικό λόγο εξασθένησης 1000:1

β) για φορτίο 1000Ω από έναν εξασθενητή με ιδανικό λόγο εξασθένησης 2000:1

και οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου, σε ένα από τα δύο κανάλια του παλμογράφου με τερματική αντίσταση 50Ω, όπου και καταγράφεται η κυματομορφή της τάσης.

Εικόνα 12: Διάταξη διακρίβωσης στην έξοδο της γεννήτριας

Εικόνα 13: Διάταξη διακρίβωσης στην έξοδο του CDN

Αφού ολοκληρωθεί η καταγραφή όλων των απαραίτητων παραμέτρων πραγματοποιείται, λαμβάνοντας υπ'όψη την τιμή της αβεβαιότητας της κάθε παραμέτρου (βλέπε τελευταίο μέρος), σύγκριση με τα όρια που προβλέπονται από το Πρότυπο και παρατίθενται στον Πίνακα 7. Αν οι καταγραφείσες τιμές είναι αποδεκτές, η διαδικασία διακρίβωσης έχει διεξαχθεί επιτυχώς και ο εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιείται, για το χρονικό διάστημα ισχύος της διακρίβωσης, για τη διεξαγωγή δοκιμών σύμφωνα με το Πρότυπο.

Πίνακας 7: Όρια παραμέτρων διακρίβωσης γεννήτριας EFT/Burst

					Φορτίο 50Ω			**Φορτίο 1000Ω**		
Επίπεδο τάσης	**Ρυθμός επανάληψης *f***	**Διάρκεια burst (5KHz)**	**Περίοδος burst (5KHz)**	**Διάρκεια burst (100KHz)**	**Τάση κορυφής *Up***	**Χρόνος ανόδου t_r**	**Διάρκεια παλμού t_d**	**Τάση κορυφής U_p**	**Χρόνος ανόδου t_r**	**Διάρκεια παλμού t_d**
[kV]	**[kHz]**	**[ms]**	**[ms]**	**[ms]**	**[V]**	**[ns]**	**[ns]**	**[V]**	**[ns]**	**[ns]**
0,25	5 ή 100	12-18	240-360	0,6-0,9	113 – 138	3,5 - 6,5	35 - 65	192 – 288	3,5 - 6,5	35 - 150
0,5	5 ή 100	12-18	240-360	0,6-0,9	225 – 275	3,5 - 6,5	35 - 65	384 – 576	3,5 - 6,5	35 - 150
1	5 ή 100	12-18	240-360	0,6-0,9	450 - 550	3,5 - 6,5	35 - 65	760 - 1140	3,5 - 6,5	35 - 150
2	5 ή 100	12-18	240-360	0,6-0,9	900 - 1100	3,5 - 6,5	35 - 65	1520 - 2280	3,5 - 6,5	35 - 150
4	5 ή 100	12-18	240-360	0,6-0,9	1800 - 2200	3,5 - 6,5	35 - 65	3040 - 4560	3,5 - 6,5	35 - 150

3.2 Διακρίβωση γεννήτριας Surge 1.2μs/50μs – 8μs/20μs σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-5

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η δοκιμή σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-5 προσομοιώνει υπερτάσεις και υπερεντάσεις που μπορεί να συζευχθούν στις θύρες ενός δοκιμίου. Κατά συνέπεια, μία γεννήτρια Surge πρέπει να παράγει με την απαραίτητη ακρίβεια κρουστικούς παλμούς τάσης μορφής 1.2μs/50μs και πλάτους 500V-4kV σε κατάσταση ανοικτοκύκλωσης, καθώς και κρουστικούς παλμούς ρεύματος μορφής 8μs/20μs και πλάτους έως και 2.2kA σε κατάσταση βραχυκυκλώματος. Η διαδικασία διακρίβωσης πραγματοποιείται και για τους 3 συνδυασμούς σύζευξης (L-N, L-PE, N-PE) διαδοχικά.

- Για την επαλήθευση των παραμέτρων της τάσης η γεννήτρια παράγει κρούσεις πάνω σε ένα διαφορικό καταμεριστή, σύμφωνα με την §6.1.2 του Προτύπου ΕΛΟΤ EN 61000-4-5. Η παραγόμενη τάση υποβιβάζεται μέσω του διαφορικού καταμεριστή (Attenuation ratio: 1000/1) και οδηγείται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου στο 1° κανάλι του παλμογράφου (βλέπε Εικόνα 14), όπου πραγματοποιείται η καταγραφή. Με την ίδια συνδεσμολογία επαληθεύεται και η γωνία εφαρμογής των παλμών (0°, 90°, 180°, 270°).

- Για την επαλήθευση των παραμέτρων του ρεύματος παράγονται κρούσεις με βραχυκυκλωμένους τους δύο υπό δοκιμή ακροδέκτες (L-N, L-PE, N-PE). Το κεραυνικό ρεύμα μετράται με την χρήση αμπεροτσιμπίδας, η οποία είναι συνδεμένη μέσω ομοαξονικού καλωδίου με το 1° κανάλι του παλμογράφου, όπου πραγματοποιείται η καταγραφή (βλέπε Εικόνα 15).

Εικόνα 14: Διάταξη διακρίβωσης κρουστικής τάσης

Εικόνα 15: Διάταξη διακρίβωσης κρουστικού ρεύματος

Μετά το πέρας της διακρίβωσης, λαμβάνοντας υπ'όψη την τιμή της αβεβαιότητας της κάθε παραμέτρου, συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις τιμές του παρακάτω Πίνακα 8. Τα όρια ανοχής των παραμέτρων εξαρτώνται από το ονομαστικό ρεύμα του CDN, όπως ορίζονται στο Πρότυπο. Αν οι τιμές των παραμέτρων της τάσης και του ρεύματος είναι εντός των ορίων, η γεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιείται, για το χρονικό διάστημα ισχύος της διακρίβωσης, για τη διεξαγωγή δοκιμών σύμφωνα με το Πρότυπο.

Πίνακας 8: Όρια παραμέτρων διακρίβωσης γεννήτριας Surge

		LINE – LINE (L – N)					LINE – GROUND (L – PE, N – PE)					
Επίπεδο τάσης	**Τάση κορυφής U_p**	**Χρόνος ανόδου t_r (V)**	**Διάρκεια παλμού t_d (V)**	**Ρεύμα κορυφής I_p**	**Χρόνος ανόδου tr (I)**	**Διάρκεια παλμού t_d (I)**	**Χρόνος ανόδου t_r (V)**	**Διάρκεια παλμού t_d (V)**	**Ρεύμα κορυφής I_p**	**Χρόνος ανόδου t_r (I)**	**Διάρκεια παλμού t_d (I)**	**Γωνία**
[kV]	**[V]**	**[μs]**	**[μs]**	**[A]**	**[μs]**	**[μs]**	**[μs]**	**[μs]**	**[A]**	**[μs]**	**[μs]**	**[°]**
0,5	450 - 550	0,84 - 1,56	35 - 60	225 – 275	6,4 - 9,6	16 - 24	0,84 - 1,56	20 - 60	37,53 - 45,87	1,75 - 3,25	17,5 - 32,5	350-10
1	900 - 1100	0,84 - 1,56	35 - 60	450 - 550	6,4 - 9,6	16 - 24	0,84 - 1,56	20 - 60	74,97 - 91,63	1,75 - 3,25	17,5 - 32,5	80 - 100
2	1800 - 2200	0,84 - 1,56	35 - 60	900 - 1100	6,4 - 9,6	16 - 24	0,84 - 1,56	20 - 60	150,03 - 183,37	1,75 - 3,25	17,5 - 32,5	170 - 190
4	3600 - 4400	0,84 - 1,56	35 - 60	1800 - 2200	6,4 - 9,6	16 - 24	0,84 - 1,56	20 - 60	299,97 - 366,63	1,75 - 3,25	17,5 - 32,5	260 - 280

4. Υπολογισμός Αβεβαιότητας

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας της διακρίβωσης και κατά συνέπεια και της δοκιμής ατρωσίας συνίσταται στον υπολογισμό των πηγών αβεβαιότητας τύπου Α και τύπου Β. Η κατηγοριοποίηση των πηγών γίνεται σύμφωνα με τον τρόπο εκτίμησής τους.

Πηγές αβεβαιότητας τύπου Α: Πηγές που εκτιμούνται μέσω στατιστικής ανάλυσης και διεξαγωγής πολλαπλών επαναλήψεων της μέτρησης.

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

όπου σ = τυπική απόκλιση, n = σύνολο μετρήσεων

Πηγές αβεβαιότητας τύπου Β: Πηγές που εκτιμούνται με την χρήση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών, των σχετικών με τη μεταβλητότητα των μετρούμενων μεγεθών, όπως πιστοποιητικά διακρίβωσης, παλαιότερα δεδομένα μετρήσεων, προδιαγραφές μετρητικού εξοπλισμού, διαδικασία μέτρησης, εμπειρία, ικανότητα και υποκειμενική κρίση του χειριστή, που διεξάγει τη μέτρηση.

4.1 Παράδειγμα εκτίμησης αβεβαιότητας της τάσης κορυφής 1 kV σε φορτίο 50 Ω κατά τη διεξαγωγή διακρίβωσης γεννήτριας EFT/B

Σχετικά με την εκτίμηση της αβεβαιότητας τα Πρότυπα, στις τελευταίες τους αναθεωρήσεις, παρουσιάζουν τους τύπους σύμφωνα με τους οποίους προτείνεται να γίνει η εκτίμηση. Για την περίπτωση της τάσης κορυφής V_P το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 61000-4-4 προτείνει την παρακάτω μεθοδολογία:

$$V_P = V_{PR} * A * (1 + \delta R + \delta V) / \left[1 - \left(\beta/_B\right)^2\right] \quad (2)$$

Όπου V_{PR} η ανάγνωση της κορυφής της τάσης, A η DC απόσβεση του εξασθενητή, δR η επαναληψιμότητα, δV η κάθετη ακρίβεια μέτρησης του παλμογράφου, B το -3dB εύρος ζώνης του μετρητικού συστήματος και β ένας συντελεστής με τιμή (7,0 ± 0,3 MHz).
Από τις παραπάνω πηγές αβεβαιότητας η επαναληψιμότητα δR αποτελεί πηγή τύπου Α, ενώ οι υπόλοιπες πηγές τύπου Β.
Για την εκτίμηση της δR απαιτείται ένα πλήθος επαναλήψεων της μέτρησης και η τιμή της υπολογίζεται από τον τύπο (1) .

Πίνακας 9: Αβεβαιότητα επαναληψιμότητας δR

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**μ**	**σ**	**U_A**
U_p [V]	1,056	1,051	1,058	1,065	1,061	1,058	0,005263	0,00235

Για την εκτίμηση των πηγών αβεβαιότητας τύπου Β γίνεται χρήση του Οδηγού για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων του UKAS, ο οποίος καθορίζει τις εκάστοτε κατανομές πιθανότητας.
Η πηγή Α στον τύπο (2) αναφέρεται στον εξασθενητή, ο οποίος ιδανικά έχει τιμή απόσβεσης 1000:1. Ο κατασκευαστής πιστοποιεί ότι υπάρχει σφάλμα 6,1 μονάδων (0,61%) στην τιμή απόσβεσης. Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω Πρότυπα η αβεβαιότητα ως προς τη μετρούμενη τάση υπολογίζεται:

Πίνακας 10: Αβεβαιότητα τιμής εξασθενητή

	Ιδανική Τιμή	**Πραγματική τιμή**	**Σφάλμα**	**Κατανομή**	**Συντελεστής. Κατανομής**	**u(x)**	**Συντελεστής Ευαισθησίας.**	**U_B=u(y)**
Εξασθενητής (A)	1000	993,9	6,1	Ορθογώνια	√3	3,52	1,058 V	3,724V

Ο συντελεστής ευαισθησίας c_A αποτελεί ένα συντελεστή μετατροπής της τιμής της αβεβαιότητας μίας παραμέτρου σε τιμή της μετρούμενης ποσότητας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι απαραίτητος για τη μετατροπή του αδιάστατου μεγέθους A σε Volt, που είναι η μονάδα μέτρησης της μετρούμενης τάσης. Ο συγκεκριμένος συντελεστής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_A = \frac{\partial V_P}{\partial A} = \frac{\partial [V_{PR} * A * (1 + \delta R + \delta V) / \left[1 - \left(\beta/_B\right)^2\right]]}{\partial A} \quad (3)$$

Για τους υπολογισμούς των συντελεστών χρησιμοποιούνται οι τιμές εκτίμησης των παραμέτρων, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 11. Για την τιμή εκτίμησης της V_{PR} χρησιμοποιείται η τιμή $\frac{\mu}{A}$, όπου μ είναι η μέση τιμή των 5 μετρήσεων που

πραγματοποιήθηκαν παραπάνω και A η τιμή εκτίμησης της DC απόσβεσης του εξασθενητή:

Πίνακας 11: Εκτίμηση τιμών των παραμέτρων αβεβαιότητας

V_{PR}	A	δR	δV	β	B
1,058 V	1000	0	0	7 MHz	400 MHz

Άρα ο τύπος (3) γίνεται:

$$C_A = \frac{\partial V_P}{\partial A} = V_{PR}(1 + \delta R + \delta V) / \left[1 - \left(\beta/_B\right)^2\right] \approx 1{,}058V \quad (4)$$

Ομοίως υπολογίζονται οι τιμές αβεβαιότητας U_B και για τις υπόλοιπες 5 παραμέτρους.

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας αβεβαιοτήτων

	Ιδανική Τιμή	Σφάλμα	Κατανομή	Συντελεστής Κατανομής	u(x)	Συντελεστής Ευαισθησίας.	U_i=u(y)
A	1000	6,1	Ορθογώνια	√3	3,52	1,058 V	3,724 V
V_{PR} (V)	1,058	0,0054	Ορθογώνια	√3	0,0031	1000	3,1 V
δR (V)	0	0,00235	Κανονική (k=1)	1	0,00235	1000	2,35V
δV (V)	0	0,02	Ορθογώνια	√3	0,012	1000	12V
β (MHz)	7	0,8	Ορθογώνια	√3	0,462	0,0925 V/MHz	0,04V
B (MHz)	400	30	Ορθογώνια	√3	17,32	-0,0016 V/MHz	0,028V

Τελικά η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι:

$u_c = \sqrt{\sum u(y)^2}$ = 13,15 V

και η διευρυμένη αβεβαιότητα (με συντελεστή κάλυψης κ=2 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%):

$U_c = 2 * u_c$= 26,30 V ή <u>2,49%</u> στα 1058V

4.2 Παράδειγμα εκτίμησης αβεβαιότητας της διάρκειας παλμού t_d της τάσης ανοικτοκύκλωσης πλάτους 1kV σε σύζευξη L-N κατά τη διεξαγωγή διακρίβωσης γεννήτριας Surge

Η εκτίμηση της αβεβαιότητας πραγματοποιείται σύμφωνα με τον τύπο (5):

$$T_W = (T_{WR} + \delta R) * [1 - \left(\beta/_B\right)^2] \quad (5)$$

Όπου T_{WR} η ανάγνωση των τιμών χρόνου ανόδου και καθόδου στο 50% του πλάτους της τάσης, δR η επαναληψιμότητα,, B το -3dB εύρος ζώνης του μετρητικού συστήματος και β ένας συντελεστής με τιμή (12,7 ± 1,4 kHz).

Η τιμή της αβεβαιότητας προκύπτει από τις παρακάτω 5 μετρήσεις:

Πίνακας 13: Αβεβαιότητα επαναληψιμότητας δR

	1	2	3	4	5	μ	σ	U_A
T_W [μs]	44,74	44,77	43,41	45,09	44,93	44,59	0,67	0,299

Ο συντελεστής ευαισθησίας υπολογίζεται από τον τύπο (6) :

$$C_{\delta R} = \frac{\partial V_P}{\partial \delta R} = \frac{\partial[(T_{WR} + \delta R) * \left[1 - \left(\beta/_B\right)^2\right]]}{\partial \delta R} = 1 - \left(\beta/_B\right)^2 \quad (6)$$

Για τους υπολογισμούς των συντελεστών χρησιμοποιούνται οι τιμές εκτίμησης των παραμέτρων, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 14:

Πίνακας 14: Εκτίμηση τιμών των παραμέτρων αβεβαιότητας

T_{WR}	δR	β	B
44,59 μs	0	12,7 kHz	500 kHz

Άρα, από τον τύπο (6), έχουμε:

$$C_{\delta R} = 1 - \left({}^{12,7}/_{500}\right)^2 \approx 1 \qquad (7)$$

Ομοίως υπολογίζονται οι τιμές αβεβαιότητας και για τις υπόλοιπες 3 παραμέτρους.

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας αβεβαιοτήτων

	Ιδανική Τιμή	**Σφάλμα**	**Κατανομή**	**Συντελεστής Κατανομής**	**u(x)**	**Συντελεστής Ευαισθησίας**	**U_i=u(y)**
T_{WR} (μs)	44,59	0,0316	Ορθογώνια	√3	0,0182	1	0,0182 μs
δR (μs)	0	0,299	Κανονική (k=1)	1	0,299	1	0,299 μs
β (kHz)	12,7	1,4	Ορθογώνια	√3	0,81	-0,00453 μs/kHz	0,00367 μs
B (kHz)	500	50	Ορθογώνια	√3	28,9	0,000115 μs/kHz	0,00333 μs

Τελικά η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι:

$u_c = \sqrt{\sum u(y)^2}$ = 0,2996 μs

και η διευρυμένη αβεβαιότητα (με συντελεστή κάλυψης κ=2 για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%)::

$U_c = 2 * u_c$= 0,5992 μs ή <u>1,3437 %</u> στα 44,59 μs

5. Συμπεράσματα

Με τις τελευταίες αναθεωρήσεις τους τα Πρότυπα ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-4 και ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-5 παρέχουν στα διαπιστευμένα εργαστήρια διακριβώσεων έναν εύχρηστο τρόπο υπολογισμού των αβεβαιοτήτων των προς διακρίβωση παραμέτρων.

Οι συγκεκριμένες αλλαγές αποτελούν μέρος της προσπάθειας των ευρωπαϊκών και διεθνών επιτροπών για την καθιέρωση μίας πρότυπης μεθοδολογίας υπολογισμού αβεβαιοτήτων για όλες τις διαδικασίες διακρίβωσης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή δοκιμών ατρωσίας σύμφωνα με τη σειρά Προτύπων ΕΛΟΤ ΕΝ 61000-4-x. Αυτή η προσπάθεια αποσκοπεί στη βελτίωση της επαναληψιμότητας και της ιχνηλασιμότητας, οι οποίες με τη σειρά τους εξασφαλίζουν τη βέλτιστη ποιότητα των μετρήσεων και των δοκιμών. Όπως αποδεικνύεται από τα δύο παραδείγματα, που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4, τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού δοκιμών συνεισφέρουν με διαφορετική βαρύτητα στη συνολική τιμή της αβεβαιότητας. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της χρονικής παραμέτρου t_d η αβεβαιότητα της επαναληψιμότητας δR αποτελεί σχεδόν το 100% της συνολικής αβεβαιότητας, ενώ αντιθέτως, στην περίπτωση της παραμέτρου τάσης V_P τη μεγαλύτερη συνεισφορά παρέχει η κάθετη ακρίβεια μέτρησης του παλμογράφου. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η αναγνώριση των σημαντικότερων παραγόντων αβεβαιότητας, για κάθε μία παράμετρο των δοκιμών διακρίβωσης του πεδίου διαπίστευσης ενός εργαστήριου, ώστε να προσδιοριστεί κατά πόσον είναι αναγκαία, είτε η αύξηση του αριθμού των μετρήσεων, για τη μείωση της αβεβαιότητας της επαναληψιμότητας, είτε η αντικατάσταση του υπάρχοντος εξοπλισμού, για τη μείωση της συνεισφοράς των πηγών αβεβαιότητας τύπου Β.

Βιβλιογραφία

ΕΛΟΤ EN 61000.04.02 E2:2009, *"Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων- Δοκιμή ατρωσίας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης"*

ΕΛΟΤ EN 61000.04.04 E3:2012, *"Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων- Δοκιμή ατρωσίας για γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα/ριπές"*

ΕΛΟΤ EN 61000.04.05 E3:2014, *"Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Τεχνικές δοκιμών και μετρήσεων- Δοκιμή ατρωσίας από υπερτάσεις-υπερεντάσεις"*

Κατσιβέλης Π.Σ., *"Συμβολή στη μελέτη της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης"*, Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2011

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

Κωνσταντίνου Χ.Κ., *"Διακρίβωση εξοπλισμού και οδηγός διενέργειας δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας"*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2012

Παπασταμάτης Π.Κ., *"Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε τηλεπικοινωνιακές θύρες"*, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2013

American Association for Laboratory Accreditation: *"G104 – Guide for Estimation of Measurement Uncertainty in Testing"*, December 4, 2014

Em Test France, *"Immunity Test Surge"*

Georgopoulos M.F., Gonos I.F., Stathopulos I.A: *"Determination of a new formula for the electrical fast transient / burst waveform using genetic algorithm"* 9th Hellenic Conference on Artificial Intelligence (SETN2016), 18-20 May 2016, Thessaloniki, Greece

ISO/IEC 17025: 2005, *"General requirements for the competence of testing and calibration laboratories"*

UKAS M3003 Edition 3: *"The expression of Uncertainty and Confidence in Measurement"*, November 2012