



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Διακρίβωση συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου και
ανάλυση μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας σε
μετασχηματιστές έντασης ρεύματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Ηρακλής Α. Παλιάτσος

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

**Διακρίβωση συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου και
ανάλυση μεθόδου αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας σε
μετασχηματιστές έντασης ρεύματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Ηρακλής Α. Παλιάτσος

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κ. Παπασταμάτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2019.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
τ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

.....

Ευάγγελος Ηρακλής, Α. Παλιάτσος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευάγγελος Ηρακλής, Α. Παλιάτσος, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά ασχολείται με τη μελέτη της διεξαγωγής διακρίβωσης του εξοπλισμού δοκιμών για δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και συμβατότητας (Electromagnetic Immunity, Electromagnetic Compatibility) σε εξοπλισμό φωτισμού και εξαρτήματά του, σύμφωνα με το διεθνές Πρότυπο CISPR 16-1-4. Η διπλωματική εργασία αυτή δύναται μελλοντικά να αποτελέσει τη βάση για τη συγγραφή μιας τεχνικής οδηγίας για τη διακρίβωση εξοπλισμού δοκιμών σύμφωνα με το παραπάνω Πρότυπο στα πλαίσια της διαπίστευσης του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας, των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, χρήσιμοι ορισμοί σχετικά με αυτές τις έννοιες και ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται μέρη του εξοπλισμού από τις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Στη συνέχεια, δίνεται ο ορισμός της διακρίβωσης και οι λόγοι που καθιστούν απαραίτητη τη διεξαγωγή της. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα πρότυπα EN 55015 και CISPR 16-1-4, πρότυπα στα οποία καθορίζονται λεπτομερώς οι παράμετροι και ο τρόπος διεξαγωγής των δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σε εξοπλισμό φωτισμού.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου διακρίβωσης του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου (Large Loop Antenna System) καθώς και της συνδεσμολογίας και του προγράμματος που αναπτύχθηκαν για την διεξαγωγή των δοκιμών. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής διακρίβωσης και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα, καθώς επίσης παρουσιάζεται και η μελέτη των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στη διαδικασία διακρίβωσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έπειτα, ασχολείται με την μελέτη μίας μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας σε μετασχηματιστές έντασης ρεύματος, η οποία επιτρέπει την χρήση μετασχηματιστών έντασης ρεύματος (current probes) σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου του μεταβατικού ρεύματος και του συνολικού φορτίου που μεταφέρθηκε κατά την διάρκεια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Επίσης, παρουσιάζονται η διάταξη και το πρόγραμμα σε MATLAB που χρειάζονται για την διεξαγωγή αυτής της διαδικασίας. Ακολούθως, μελετήθηκε ακόμη η τιμή του detrend που απαιτείται για κάθε επίπεδο φόρτισης των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, για την ακριβέστερη ανάκτηση της κυματομορφής του ρεύματος από τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, ατρωσία, δοκιμές ατρωσίας, διακρίβωση, πρόγραμμα LabVIEW, οδηγία διακρίβωσης, αβεβαιότητες, ηλεκτροστατική φόρτιση/εκφόρτιση (ESD), πρόγραμμα MATLAB, detrend.

Abstract

This thesis firstly, aims to study the calibration process of electromagnetic immunity and compatibility tests for lighting equipment according to the International Standard CISPR 16-1-4. This thesis may provide, in the future, the basis for the writing of a technical directive for the calibration of test equipment according to the above standard under the accreditation of High Voltage Laboratory.

Specifically, it presents the definitions of electromagnetic compatibility, electromagnetic immunity and electromagnetic disturbances as well as the way parts of the equipment are affected by electromagnetic disturbances. Furthermore, it clarifies the definition of the calibration and the reasons of its necessity. Additionally, Standards EN 55015 and CISPR 16-1-4 are analyzed, where the parameters and the test procedure of electromagnetic immunity tests on lighting equipment are presented in detail.

Following is a detailed presentation of the calibration method of the Large Loop Antenna System as well as the set up diagram and program developed for the tests. The results of the calibration test are then presented and the corresponding conclusions are drawn, as well as the study of the uncertainties involved in the calibration process.

The present thesis, then deals with the study of simple frequency response compensation method for current probe, which allows the use of current probes for time domain measurements such as transient current and total transferred load during electrostatic discharges. The equipment set up and the program which developed in MATLAB, needed to perform this process are also presented. Subsequently, the detrend value required for each electrostatic discharge level was further studied in order to recover more precisely the current waveform from the current probe.

Keywords: Electromagnetic compatibility, Electromagnetic disturbances, Immunity, Immunity tests, Calibration, LabVIEW program, calibration instruction, uncertainties, Electrostatic charge / discharge (ESD), MATLAB program, detrend.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Περιεχόμενα Εικόνων.....	12
Περιεχόμενα Σχημάτων	14
Περιεχόμενα Πινάκων	16
Πρόλογος	19
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	21
1.1 Χρήσιμοι Ορισμοί.....	22
1.2 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές	23
1.3 Τομείς της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC)	24
1.4 Τρόποι σύζευξης Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC).....	25
1.5 Αποφυγή διαταραχών στους δέκτες	29
1.6 Πρότυπα και Εφαρμογές τους	30
1.7 Ιστορική αναδρομή προτύπων	33
Κεφάλαιο 2: Η έννοια της διακρίβωσης.....	35
2.1 Ορισμός διακρίβωσης.....	35
2.2 Χαρακτηριστικά διακρίβωσης.....	38
2.3 Εύρος διακρίβωσης.....	39
2.4 Ακρίβεια και ανοχή διακρίβωσης.....	39
2.5 Λόγος ακριβείας	40
2.7 Αβεβαιότητα μέτρησης.....	41
Κεφάλαιο 3: Πρότυπα και ανάλυση της Large Loop Antenna	42
3.1 Πρότυπο EN 55015 [19].....	42
3.2 Μέθοδος μέτρησης εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών	45

3.3	Πρότυπο CISPR 16-1-4 [20]	45
3.4	Κατασκευή κεραίας μεγάλου βρόχου (LLA)	45
3.5	Κατασκευή ενός συστήματος LLA (Large Loop Antenna System – LLAS).....	49
3.6	Διακρίβωση κεραίας μεγάλου βρόχου (LLA)	50
3.7	Κατασκευή του διπόλου επαλήθευσης του LLAS	51
Κεφάλαιο 4: Διαδικασία διακρίβωσης του LLAS σύμφωνα με το πρότυπο IEC CISPR 16-1-4		
4.1	Εξοπλισμός	53
4.2	Ρυθμίσεις γεννήτριας.....	55
4.3	Ρυθμίσεις παλμογράφου	58
4.4	Συνδεσμολογία δοκιμής.....	60
4.5	Πρόγραμμα LabVIEW.....	62
4.6	Προγράμματα οδήγησης οργάνων.....	64
4.7	Ανάλυση προγράμματος διακρίβωσης του LLAS σε LabVIEW	64
4.8	Επεξήγηση λογικής ροής τους προγράμματος διακρίβωσης του LLAS	69
4.9	Επεξεργασία μετρήσεων.....	70
4.10	Υπολογισμός αβεβαιότητας	75
4.11	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	82
Κεφάλαιο 5: Δοκιμές Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης και Μετασχηματιστής έντασης ρεύματος.....		
5.1	Ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)	83
5.2	Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	83
5.3	Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	86
5.4	Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό.....	86

5.5	Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού.....	87
5.6	Το πρότυπο IEC 61000-4-2 [32].....	88
5.7	Μέθοδος αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας για μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με μετασχηματιστή έντασης ρεύματος [37]	90
5.8	Διαδικασίες για την αντιστάθμιση της απόκρισης συχνότητας.....	92
5.9	Σκοπός δοκιμής.....	94
5.10	Συνδεσμολογία δοκιμής	95
5.11	Εκτέλεση δοκιμής	98
5.12	Επεξεργασία μετρήσεων	99
5.13	Πρόγραμμα επεξεργασίας μετρήσεων σε MATLAB	99
5.14	Αποτελέσματα προγράμματος σε MATLAB.....	107
5.15	Τροποποιημένος κώδικας προγράμματος για αντίσταση καλωδίου.....	115
5.16	Συμπεράσματα δοκιμής.....	121
	Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα	122
	Κεφάλαιο 7: Η επόμενη μέρα	124
	Βιβλιογραφία.....	125

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 4-1: Γεννήτρια Rohde & Schwarz SMB 100A	53
Εικόνα 4-2: Παλμογράφος Tektronix MDO 3054	53
Εικόνα 4-3: Διάταξη Large Loop Antenna System.....	54
Εικόνα 4-4: Δίπολο επαλήθευσης Large Loop Antenna	54
Εικόνα 4-5: Γεννήτρια Rohde & Schwarz SMB 100A Microwave Signal Generator.....	55
Εικόνα 4-6: Πλήκτρα λειτουργιών	55
Εικόνα 4-7: Πλήκτρα ρύθμισης παραμέτρων.....	56
Εικόνα 4-8: Πλήκτρα οθόνης	56
Εικόνα 4-9: Είσοδος για σήματα εξωτερικής διαμόρφωσης.....	58
Εικόνα 4-10: Έξοδος για σήμα εσωτερικής LF διαμόρφωσης.....	58
Εικόνα 4-11: Έξοδος για RF σήμα.....	58
Εικόνα 4-12: Παλμογράφος Tektronix MDO 3054	58
Εικόνα 4-13: Πλήκτρα παλμογράφου Tektronix MDO 3054.....	59
Εικόνα 4-14: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στην έξοδο RF της γεννήτριας	60
Εικόνα 4-15: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στο δίπολο επαλήθευσης της LLA....	60
Εικόνα 4-16: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στην είσοδο RF του παλμογράφου ...	61
Εικόνα 4-17: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στον ομοαξονικό διακόπτη του LLAS	61
Εικόνα 4-18: Θύρα LAN γεννήτριας	61
Εικόνα 4-19: Θύρα LAN παλμογράφου (3).....	62
Εικόνα 4-20: Πρόγραμμα σε LabVIEW.....	64
Εικόνα 4-21: Αρχικοποίηση και απόδοση διευθύνσεων οργάνων	65

Εικόνα 4-22: Πίνακας τιμών συχνοτήτων γεννήτριας στο μπλοκ διάγραμμα (Block Diagram)	65
Εικόνα 4-23: Πίνακας τιμών συχνοτήτων γεννήτριας στον μπροστινό πίνακα (Front Panel) (οι τιμές φτάνουν έως $30E+6$)	65
Εικόνα 4-24: Εισαγωγή κεντρικής συχνότητας	66
Εικόνα 4-25: Ορισμός σταθερού επιπέδου σήματος RF	66
Εικόνα 4-26: Ενεργοποίηση RF σήματος εξόδου της γεννήτριας	66
Εικόνα 4-27: Ρύθμιση καναλιού RF	67
Εικόνα 4-28: Διαμόρφωση ανάλυσης εύρους ζώνης	67
Εικόνα 4-29: Διαμόρφωση δεικτών RF καναλιού	68
Εικόνα 4-30: Εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης	68
Εικόνα 4-31: Καταγραφή τιμών	69
Εικόνα 5-1: Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B Digital Phosphor Oscilloscope	95
Εικόνα 5-2: Μετασχηματιστής έντασης ρεύματος FCC F-65	96
Εικόνα 5-3: Στόχος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target) TESEQ MD 103	96
Εικόνα 5-4: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq / Schaffner NSG 433	96
Εικόνα 5-5: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq / Schaffner NSG 438	97
Εικόνα 5-6: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EM Test Dito	97
Εικόνα 5-7: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EMC Partner EXT-TRA3000 E	98
Εικόνα 5-8: Γραφικά αποτελέσματα προγράμματος MATLAB για την ηλεκτροστατική γεννήτρια NSG 438 στο επίπεδο τάσης 2 kV	109

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Συνιστώσες σχεδιασμού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ^[4]	24
Σχήμα 1-2: Τρόποι μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών ^[5]	26
Σχήμα 1-3: Παράδειγμα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μέσω αγωγών ^[5]	26
Σχήμα 1-4: Παράδειγμα κοινού τρόπου σύζευξης μέσω αγωγού ^[5]	27
Σχήμα 1-5: Παράδειγμα διαφορικού τρόπου σύζευξης μέσω αγωγού ^[5]	27
Σχήμα 1-6: Ισοδύναμο κύκλωμα ^[5]	28
Σχήμα 1-7: Χωρητικότητες που δημιουργούνται μεταξύ κυκλωμάτων ^[5]	28
Σχήμα 2-1: Διάγραμμα σφάλματος εύρους	36
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα σφάλματος μηδενισμού	36
Σχήμα 2-3: Διάγραμμα σφάλματος συνδυασμού εύρους και μηδενισμού	36
Σχήμα 2-4: Διάγραμμα σφάλματος ευθυγράμμισης	36
Σχήμα 2-5: Διάγραμμα για τον ρυθμό της ολίσθησης ένδειξης / τιμής μετρητικών οργάνων / προτύπων σχετικά με τα αυθαίρετα όρια ανοχής ^[15]	38
Σχήμα 2-6: Πυραμίδα Ιχνηλασιμότητας ^[15]	41
Σχήμα 3-1: Διάταξη δοκιμής CDN ^[19]	44
Σχήμα 3-2: Κεραία μεγάλου βρόχου (LLA) η οποία περιλαμβάνει δύο αντιδιαμετρικά σημεία ένωσης, τοποθετημένα συμμετρικά ως προς το probe ρεύματος ^[20]	46
Σχήμα 3-3: Κατασκευή ενός LLA slit ^[20]	47
Σχήμα 3-4: Παράδειγμα ενός LLA slit με χρήση PCB για να αποκτήσει άκαμπτη κατασκευή ^[20]	48
Σχήμα 3-5: Κατασκευή του μεταλλικού κουτιού που περιέχει τον αισθητήρα ρεύματος ^[20]	48
Σχήμα 3-6: Παράδειγμα που δείχνει τη δρομολόγηση διαφόρων καλωδίων από ένα δοκίμιο για την ελαχιστοποίηση της χωρητικής σύζευξης από τις επαφές στο LLAS ^[20]	49

Σχήμα 3-7: Το LLAS, το οποίο αποτελείται από τρεις αμοιβαία κάθετες Large Loop Antennas ^[20]	49
Σχήμα 3-8: Οι οκτώ θέσεις του διπόλου επαλήθευσης του LLAS κατά την διακρίβωση μίας LLA ^[20]	51
Σχήμα 3-9: Συντελεστής επικύρωσης για LLA διαμέτρου 2m ^[20]	51
Σχήμα 3-10: Κατασκευή του διπόλου επαλήθευσης του LLAS ^[20]	52
Σχήμα 5-1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο ^[3]	83
Σχήμα 5-2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής ^[31]	86
Σχήμα 5-3: Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2 ^[32]	90
Σχήμα 5-4: Σύνθετη αντίσταση μεταφοράς ενός ιδανικού μετασχηματιστή έντασης ρεύματος ^[37]	91
Σχήμα 5-5: Το αποτέλεσμα της DC αντιστάθμισης και της διαδικασίας detrend ^[37]	93
Σχήμα 5-6: Διαδικασία ανάπτυξης της συνάρτησης $H_{frc}(j\omega)$ χρησιμοποιώντας τη μιγαδική σύνθετη αντίσταση μεταφοράς ^[37]	94
Σχήμα 5-7: Διαδικασία αποσυνέλιξης κυματομορφής μετρημένης με τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος ^[37]	94
Σχήμα 5-8: Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της μέτρησης του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος και της άμεσης μέτρησης με τον στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ^[37]	95

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 3-1: Όρια εκπεμπόμενων διαταραχών στο εύρος συχνοτήτων 9kHz με 30MHz ^[19]	43
Πίνακας 3-2: Όρια τάσης ακροδέκτη κοινού τρόπου, μέθοδος δικτύου ζεύξης / απόζευξης CDN ^[19]	44
Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα 1 ^{ης} κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης.....	72
Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα 2 ^{ης} κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης.....	74
Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα 3 ^{ης} κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης.....	75
Πίνακας 4-4: Πίνακας υπολογισμού αβεβαιοτήτων.....	81
Πίνακας 5-1: Τριβοηλεκτρική σειρά	84
Πίνακας 5-2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης.....	84
Πίνακας 5-3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)	85
Πίνακας 5-4: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [32]	90
Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438.....	108
Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438.....	109
Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433.....	110
Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433.....	111
Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000.....	112
Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000.....	112

Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO	113
Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO	114
Πίνακας 5-13: Αποτελέσματα Detrend	114
Πίνακας 5-14: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438.....	115
Πίνακας 5-15: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438.....	115
Πίνακας 5-16: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433.....	116
Πίνακας 5-17: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433.....	116
Πίνακας 5-18: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000.....	116
Πίνακας 5-19: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000.....	117
Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO	117
Πίνακας 5-21: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO	117
Πίνακας 5-22: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 438	118
Πίνακας 5-23: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 438.....	118
Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 433	119

Πίνακας 5-25: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 433	119
Πίνακας 5-26: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας TRANSIENT 3000	119
Πίνακας 5-27: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας TRANSIENT 3000	120
Πίνακας 5-28: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας DITO	120
Πίνακας 5-29: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας DITO	121

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019 στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η διεξαγωγή της διακρίβωσης του εξοπλισμού δοκιμών σύμφωνα με το Πρότυπο CISPR 16-1-4 και η μελέτη της μεθόδου αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας σε μετασχηματιστές έντασης ρεύματος.

Αναλυτικά, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, καθώς και χρήσιμοι ορισμοί σχετικά με αυτές τις έννοιες. Ύστερα, περιγράφονται αναλυτικά οι πηγές των συγκεκριμένων διαταραχών, τα μέρη του εξοπλισμού που είναι ευαίσθητα σε αυτές καθώς και οι πιθανές συνέπειες στον τρόπο λειτουργίας του εκάστοτε εξοπλισμού. Τέλος, παρουσιάζεται η ανάγκη για τυποποίηση και πως αυτή δημιουργήθηκε μέσα από μία ιστορική αναδρομή.

Κεφάλαιο 2: παρουσιάζεται η έννοια της διακρίβωσης, η διαδικασία διεξαγωγής της και τα μεγέθη που τη χαρακτηρίζουν.

Κεφάλαιο 3: παρουσιάζονται τα πρότυπα EN 55015 και CISPR 16-1-4 και αναλύονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά καθώς και η διαδικασία διακρίβωσης του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου (Large Loop Antenna System).

Κεφάλαιο 4: παρουσιάζεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός και η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της διαδικασίας διακρίβωσης σύμφωνα με το Πρότυπο CISPR 16-1-4. Έπειτα περιγράφονται αναλυτικά οι ρυθμίσεις της γεννήτριας και του παλμογράφου που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της διακρίβωσης, ενώ στη συνέχεια αναλύεται το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον LabVIEW για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Τέλος, υπολογίζονται οι αβεβαιότητες που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη διαδικασία και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 5: παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι σχετικοί ορισμοί. Αναφέρονται οι τρόποι με τους οποίους δημιουργείται η ηλεκτροστατική φόρτιση και τα μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν προκειμένου να

προστατευθεί ο ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός. Επίσης, γίνεται αναφορά στο διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 και δίνονται ορισμοί διαφόρων σημαντικών όρων που περιέχονται σε αυτό. Στο Πρότυπο δίνονται ορισμοί για την τυπική κυματομορφή του ρεύματος, όπως και για τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής. Στη συνέχεια, αναλύεται μία μέθοδος αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας σε μετασχηματιστές έντασης ρεύματος, η συνδεσμολογία της μεθόδου και το σχετικό πρόγραμμα σε MATLAB για την επεξεργασία των μετρήσεων της διαδικασίας αυτής.

Κεφάλαιο 6: γίνεται ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας και συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές.

Κεφάλαιο 7: πραγματοποιείται παρουσίαση της επόμενης μέρας όπου γίνονται προτάσεις για βελτιώσεις σε επόμενες μελέτες.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συμπαράσταση και την ανεκτίμητη βοήθειά τους, όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα :

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη συνεργασία, την καθοδήγηση, τη βοήθεια που πρόθυμα μου παρείχε καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τον κ. Παναγιώτη Κ. Παπασταμάτη, υποψήφιο διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με ουσιαστική και αμφίδρομη επικοινωνία μέσα από ένα φιλικό κλίμα συνεργασίας που δημιουργήθηκε.

Το σύνολο του προσωπικού του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τη συνεργασία και την υποστήριξή του στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, επίσης γνωστή ως EMC (ElectroMagnetic Compratibility), είναι η αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού με το ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον και με άλλο εξοπλισμό. Όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Με τον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονικών συσκευών στην καθημερινή ζωή - τηλεοράσεις, πλυντήρια, κινητά τηλέφωνα, ATM, φωτιστικά - υπάρχει συνεπώς μεγάλο ενδεχόμενο οι συσκευές να προκαλούν παρεμβολές μεταξύ τους.

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές αποτελούν το σημαντικότερο πρόβλημα κατά τον σχεδιασμό κυκλωμάτων. Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (Electromagnetic Interference, EMI) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που ενδέχεται να υποβαθμίσει την επίδοση μιας διάταξης, μιας συσκευής ή να επιδράσει δυσμενώς σε ζώσα ή αδρανή ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι ένας ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μια μεταβολή στο ίδιο μέσο διάδοσης.

Η ανάγκη μείωσης του μεγέθους των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε συνδυασμό με την πρόοδο της τεχνολογίας οδηγούν στη δημιουργία συσκευών με μεγάλη πολυπλοκότητα και πλήθος κυκλωμάτων, τα οποία λειτουργούν σε στενή εγγύτητα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πιθανότητα εμφάνισης των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) να αυξάνεται. Συνεπώς, η μέριμνα για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των συσκευών κρίνεται απαραίτητη.

Ενώ η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) είναι ένα φαινόμενο (η εκπεμπόμενη ακτινοβολία και τα αποτελέσματά της), η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) είναι χαρακτηριστικό ή ιδιότητα του εξοπλισμού - να συμπεριφέρονται αποδεκτά στο περιβάλλον EMI.

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία, στο ίδιο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, διαφορετικών στοιχείων εξοπλισμού που χρησιμοποιούν ή ανταποκρίνονται σε ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και την αποφυγή τυχόν παρεμβολών. Ένας άλλος τρόπος να εκφράσουμε το νόημα της, είναι ότι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα είναι ο έλεγχος των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, έτσι ώστε να αποτρέπονται τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Κάθε ηλεκτρονικό σύστημα πρέπει να μην επηρεάζεται από εξωτερικές πηγές ηλεκτρομαγνητισμού, όπως επίσης να μην αποτελεί πηγή

ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που επηρεάζει αρνητικά κυκλώματα στο γειτονικό του περιβάλλον. Συνεπώς, κάθε σύστημα πρέπει να συμμορφώνεται σε συγκεκριμένα όρια ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας που καθορίζονται από εθνικά και διεθνή πρότυπα, και ορίζουν τα όρια εκπομπής και ανοχής των συσκευών σε ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές. Η συμμόρφωση με αυτά τα όρια καταδεικνύεται μέσω ορισμένων δοκιμών υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Ωστόσο, οι σχεδιαστές κυκλωμάτων οφείλουν να λαμβάνουν υπόψιν περισσότερες παραμέτρους πέραν της λειτουργίας του εξοπλισμού σε ιδανικές συνθήκες εργαστηρίου, τονίζοντας έτσι την ανάγκη ο εξοπλισμός να χαρακτηρίζεται ως ένα ηλεκτρομαγνητικά συμβατό σύστημα [1]. Το σύστημα αυτό διαθέτει τα εξής στοιχεία:

- δεν δημιουργεί παρεμβολές με κάποιο άλλο σύστημα
- δεν είναι ευαίσθητο στις εκπομπές άλλων συστημάτων
- δεν προκαλεί παρεμβολές με τον εαυτό του

1.1 Χρήσιμοι Ορισμοί

Στη συνέχεια δίνονται ορισμοί για την πληρέστερη και καλύτερη κατανόηση της έννοιας της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [2] [3].

- **Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή** (*Electromagnetic Interference*) είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί είτε να προκαλέσει μείωση της απόδοσης μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος, είτε να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωτική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή του ίδιου του μέσου διάδοσης.
- **Ηλεκτρομαγνητική ευαισθησία** (*Electromagnetic susceptibility*) είναι η αδυναμία μιας διάταξης, συσκευής ή συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της σε συνθήκες παρουσίας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής, δηλαδή η έλλειψη ατρωσίας.
- **Ατρωσία** (*Immunity*) είναι η ικανότητα μιας συσκευής να λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς τα κριτήρια επίδοσης που προδιαγράφονται για τη συσκευή, παρά την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής.
- **Ηλεκτρομαγνητικό Επίπεδο Συμβατότητας** (*Electromagnetic Compatibility Level*) είναι το διευκρινισμένο μέγιστο επίπεδο διαταραχής στο οποίο ενδέχεται να υποβληθεί μια συσκευή, ένας εξοπλισμός ή ένα σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες

συνθήκες. Στην πράξη, το ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο συμβατότητας δεν προσεγγίζει τις μέγιστες δυνατές τιμές, αλλά τείνει να το ξεπεράσει κατά μία μικρή πιθανότητα.

- **Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας** (*Electromagnetic Compatibility Margin*) είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μιας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.
- **Επίπεδο Ατρωσίας** (*Immunity level*) είναι το ανώτατο επίπεδο μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.
- **Όριο Ατρωσίας** (*Immunity Limit*) είναι το καθορισμένο επίπεδο ατρωσίας.
- **Περιθώριο Ατρωσίας** (*Immunity Margin*) είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μιας διάταξης συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.
- **Επίπεδο διαταραχής** (*Interference Level*) είναι το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μιας δοσμένης μορφής, μετρημένο σε συγκεκριμένες συνθήκες.
- **Όριο διαταραχής** (*Interference Limit*) είναι το μέγιστο επιτρεπτό ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο διαταραχής, μετρημένο σε συγκεκριμένες συνθήκες.

1.2 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ονομάζεται το μη επιθυμητό αποτέλεσμα που προκαλείται από τον θόρυβο σε ένα σύστημα, δηλαδή από ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο είναι παρόν σε ένα κύκλωμα πέραν του επιθυμητού σήματος. Επομένως, έχει ιδιαίτερη σημασία η προσπάθεια μείωσης του επιπέδου του θορύβου σε σημείο ώστε να μην αποτελεί παρεμβολή για το σύστημα.

Κύριο αίτιο των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι η διανομή ηλεκτρικής ισχύος, τα ράδιο κύματα, η ηλεκτροστατική εκφόρτιση και οι κεραυνοί.

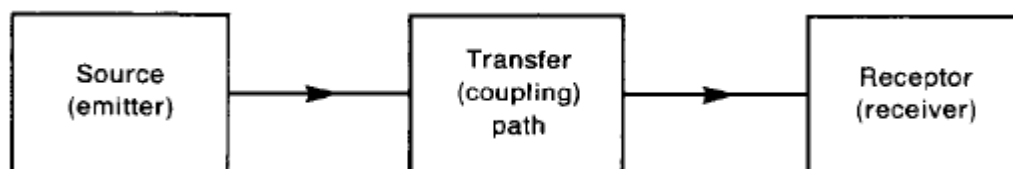
Στη διανομή ηλεκτρικής ισχύος, ένας μεγάλος αριθμός διαταραχών δημιουργείται από τις λειτουργίες κυκλωμάτων μεταγωγής. Σε περιοχές χαμηλών τάσεων, το άνοιγμα επαγωγικών κυκλωμάτων, όπως είναι τα πηνία επαφών, οι κινητήρες, οι σωληνοειδείς βαλβίδες, κλπ, παράγουν πολύ υψηλές τάσεις (μέχρι αρκετά kV) που περιέχουν υψηλής συχνότητας

αρμονικές (από δέκα ως εκατοντάδες MHz). Σε περιοχές μέσης και υψηλής τάσης, το άνοιγμα και το κλείσιμο των διακοπών παράγουν κύματα με ένα πολύ γρήγορο ρυθμό ανόδου (μερικά nsec). Αυτά τα κύματα είναι ιδιαίτερα επιβλαβή σε μικροεπεξεργαστικά συστήματα [1]. Τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται από συστήματα μακρινού ελέγχου, τηλεχειριστήρια, ραδιοεπικοινωνίες, τηλεοπτικές συσκευές, τα walkie-talkies, κλπ, αποτελούν πηγές διαταραχών της τάξης αρκετών V/m. Όλοι αυτοί οι εκπομποί διαταραχής χρησιμοποιούνται σήμερα όλο και περισσότερο και επομένως είναι απαραίτητο να παρέχεται στον ευαίσθητο εξοπλισμό αποτελεσματική προστασία.

Πολλές φορές μεταξύ ενός φορτισμένου σώματος και ενός ηλεκτρονικού εξοπλισμού αναπτύσσεται εκφόρτιση με έναν πολύ γρήγορο χρόνο ανόδου (αρκετά nsec), η οποία εισέρχεται στη συσκευή μέσω επαφής ή ακτινοβολίας, παράγοντας μια σημαντική διαταραχή. Οποιαδήποτε συσκευή ή φυσικό-ηλεκτρικό φαινόμενο εκπέμπει μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, είτε μέσω αγωγού είτε μέσω ακτινοβολίας, καλείται πηγή (source).

1.3 Τομείς της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC)

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αποτελείται από τους τομείς της παραγωγής, μετάδοσης και λήψης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Οι τομείς αυτοί επίσης, απαρτίζουν και τη βάση για κάθε σχεδιασμό ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.



Σχήμα 1-1: Συνιστώσες σχεδιασμού ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας^[4]

Η ανάλυση του σχεδιασμού ξεκινά από την πηγή η οποία παράγει την εκπομπή και αυτή μεταφέρεται σε ένα δέκτη μέσω ενός μονοπατιού σύζευξης ή μετάδοσης. Ο δέκτης επεξεργάζεται την ενέργεια και την οδηγεί σε επιθυμητή ή μη συμπεριφορά. Η μη επιθυμητή συμπεριφορά του δέκτη αποτελεί την παρεμβολή [4]. Μία πηγή ή ένας δέκτης μπορεί να λειτουργεί με δύο μοντέλα, το εκούσιο και το ακούσιο. Έχει τη δυνατότητα να συμπεριφέρεται και με τα δύο μοντέλα και εξαρτάται τόσο από το μονοπάτι σύζευξης όσο και από την πηγή ή το δέκτη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός AM ραδιοφωνικού πομπού η εκπομπή του οποίου λαμβάνεται από έναν ραδιοφωνικό δέκτη, που είναι συγχρονισμένος στη συχνότητα φέροντος του πομπού, η εκπομπή είναι ακούσια (ειδικότερα η εκπομπή είναι εκούσια αλλά το μονοπάτι σύζευξης όχι). Ωστόσο υπάρχουν παραδείγματα

εκπομπών των οποίων οι εκπομπές δεν εξυπηρετούν κανένα σκοπό, όπως οι εκπομπές από τι λάμπες φθορισμού. Συνήθως η μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας γίνεται μέσω ακούσιων μονοπατιών σύζευξης. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η ακούσια μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας θα προκαλέσει παρεμβολή. Σημαντικός παράγοντας στην εμφάνιση παρεμβολής είναι η επεξεργασία της ληφθείσας ενέργειας από το δέκτη.

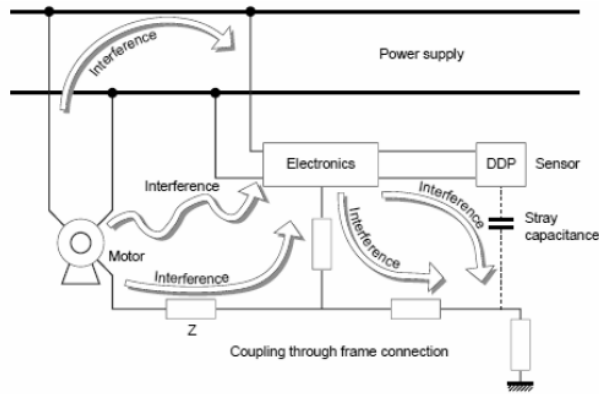
Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) μπορούν να αποφευχθούν με τους ακόλουθους τρόπους:

- Να περιοριστούν οι εκπομπές στο σημείο της πηγής
- Το μονοπάτι σύζευξης να είναι όσον το δυνατό μη αποτελεσματικό
- Ο δέκτης να γίνει λιγότερο ευαίσθητος στις εκπομπές

Ένα τυπικό ηλεκτρονικό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα υποσυστήματα τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους με καλώδια. Τα καλώδια αυτά έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν ή/και να λάβουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Σήματα παρεμβολών μπορούν να μεταφερθούν απευθείας ανάμεσα στα υποσυστήματα μέσω άμεσης επαγωγής σε αυτά τα καλώδια. Σε περίπτωση που τα υποσυστήματα είναι θωρακισμένα με μέταλλο, μπορεί να επαχθεί ρεύμα στις θωρακίσεις αυτές εξαιτίας εσωτερικών ή εξωτερικών σημάτων. Έπειτα, το συγκεκριμένο επαγόμενο ρεύμα μπορεί να ακτινοβολήσει στο εξωτερικό ή και στο εσωτερικό περιβάλλον. Πλέον συνηθίζεται σε συστήματα χαμηλού κόστους να μη χρησιμοποιούνται μεταλλικές θωρακίσεις αλλά κυρίως πλαστικές. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα αυτά είναι πλήρως εκτεθειμένα σε ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και επομένως μπορούν άμεσα να εκπέμπουν ή να γίνουν ευαίσθητα στις εκπομπές αυτές.

1.4 Τρόποι σύζευξης Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC)

Ο όρος σύζευξη αναφέρεται στη σύνδεση, τη μεταφορά ή τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από τον πομπό σε ευαίσθητες γειτονικές συσκευές. Στο Σχήμα 1-2 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, από έναν κινητήρα στην παροχή ισχύος και στα ηλεκτρονικά συστήματα και από τα ηλεκτρονικά συστήματα σε επιμέρους τμήματα του κυκλώματος και στο φορτίο.



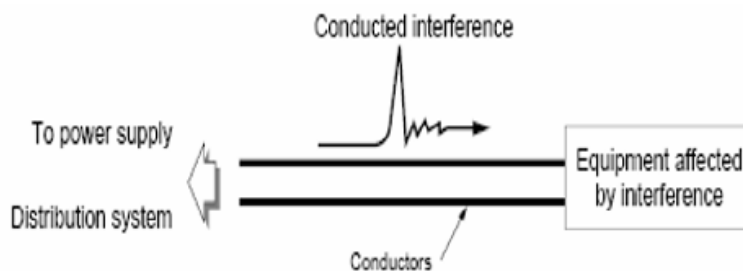
Σχήμα 1-2: Τρόποι μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών^[5]

Η σύζευξη εκφράζεται από τις τιμές του συντελεστή σύζευξης K , που έχει μονάδες dB. Ο συντελεστής αυτός δείχνει το βαθμό επίδρασης του πιθανού δέκτη από μια διαταραχή που μεταδίδει μια πηγή. Ο συντελεστής K είναι σημαντικός, όταν η μεταφορά των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι ανάλογη προς τη συχνότητα.

Γενικά, διακρίνονται τρεις διαφορετικοί τρόποι σύζευξης:

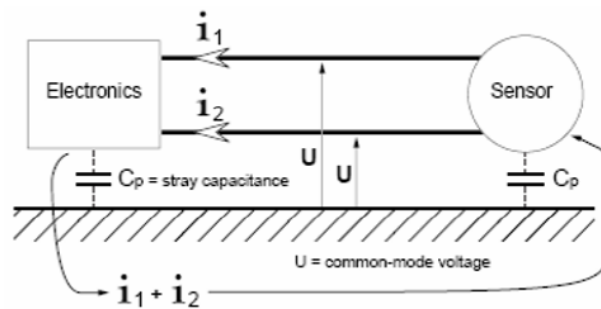
- Κοινός και διαφορικός τρόπος σύζευξης μέσω αγωγού.
- Κοινή σύζευξη εμπέδησης.
- Διαφορικός τρόπος σύζευξης μέσω ακτινοβολίας ή crosstalk.

Μια διαταραχή μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος ενός κυκλώματος δύο καλωδίων. Αυτός ο τύπος σύζευξης καλείται *αγωγή σύζευξη*. Επομένως, η διαταραχή σε αυτού του είδους τις περιπτώσεις, μπορεί να μεταδοθεί μέσω εσωτερικών γραμμών παροχής ισχύος ή συστημάτων διανομής, συρμάτων ελέγχου, γραμμών μεταφοράς δεδομένων, διαύλων, καλωδίων γείωσης, κατανεμημένων χωρητικοτήτων κ.α.. Ένα παράδειγμα σύζευξης σε αγωγό παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-3, όπου ένα σύστημα διανομής ισχύος επιδρά αρνητικά σε έναν ευαίσθητο εξοπλισμό. Υπάρχουν δύο τρόποι αγωγίμης σύζευξης. Ο κοινός και ο διαφορικός.



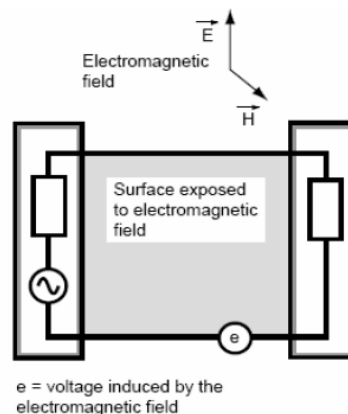
Σχήμα 1-3: Παράδειγμα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μέσω αγωγών^[5]

Ο κοινός τρόπος (common mode) σύζευξης μέσω αγωγού παράγει τάση ή ρεύμα διαταραχής κοινού τρόπου. Η τάση διαταραχής κοινού τρόπου, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 1-4, είναι η τάση των αγωγών με σημείο αναφοράς την γείωση και έχει επιπτώσεις σε όλους τους ενεργούς αγωγούς. Έτσι, στα ηλεκτρικά συστήματα οι δοκιμές σε διακόπτες κυκλωμάτων χαμηλής τάσης πραγματοποιούνται μεταξύ της γείωσης και όλων των φάσεων. Το ρεύμα common mode είναι το ρεύμα που διαρρέει όλους τους ενεργούς αγωγούς κατά την ίδια κατεύθυνση. Στο Σχήμα 1-4 παρατηρούμε ότι το ρεύμα επιστρέφει μέσω της κατανεμημένης χωρητικότητας. Ένα παράδειγμα ρεύματος common mode είναι το ρεύμα που δημιουργείται σε γραμμή χαμηλής τάσης από κεραυνικό ρεύμα. Οι διαταραχές κοινού τρόπου αποτελούν το κύριο πρόβλημα σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, γιατί η διαδρομή διάδοσης τους είναι δύσκολο να διαπιστωθεί.



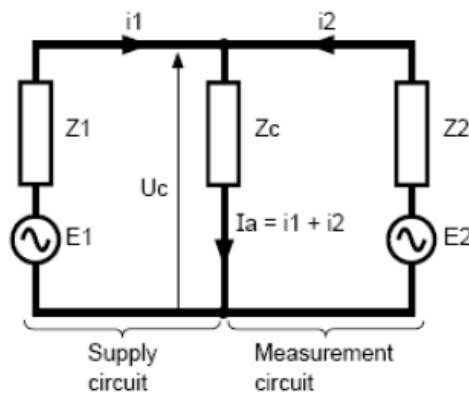
Σχήμα 1-4: Παράδειγμα κοινού τρόπου σύζευξης μέσω αγωγού^[5]

Στο διαφορικό τρόπο σύζευξης μέσω αγωγού, το ρεύμα διαδίδεται σε έναν από τους αγωγούς, περνάει μέσα από τον εξοπλισμό και επιστρέφει μέσω ενός άλλου αγωγού, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1-5. Έτσι, σε αυτόν τον τρόπο σύζευξης το ρεύμα και η τάση εντοπίζονται μεταξύ δύο φάσεων στα ηλεκτρικά συστήματα ή μεταξύ δύο καλωδίων που μεταφέρουν ευαίσθητα δεδομένα στα ηλεκτρονικά συστήματα.



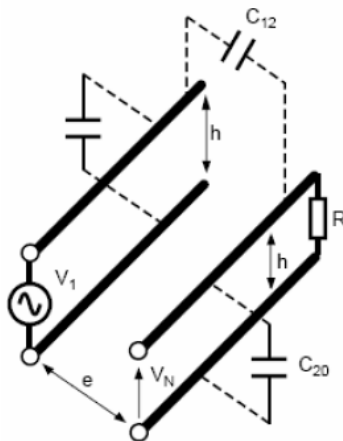
Σχήμα 1-5: Παράδειγμα διαφορικού τρόπου σύζευξης μέσω αγωγού^[5]

Ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να συζευχθεί με οποιαδήποτε μορφή αγωγού και να παράγει τάσεις κοινού ή/και διαφορικού τρόπου. Στην περίπτωση του διαφορικού τρόπου οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του αγωγού είναι πολύ σύνθετες. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορούν ούτε να λυθούν αναλυτικά, ούτε αριθμητικά. Εν τούτοις, ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους σύζευξης μπορεί να εκφραστεί αναλυτικά ως εξής: η σύζευξη μεταξύ του μαγνητικού μέρους του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του βρόχου μιας περιοχής A μπορεί να επιλυθεί με χρήση ισοδύναμου κυκλώματος, όπως αυτό του Σχήματος 1-6.



Σχήμα 1-6: Ισοδύναμο κύκλωμα^[5]

Στη σύζευξη μέσω ακτινοβολίας οι διαταραχές διαδίδονται μέσω του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα μέσω του αέρα. Ανάλογα με τη φύση της διαταραχής, εάν δηλαδή προκαλείται από αλλαγή του ρεύματος ή της τάσης, χωρίζεται σε δυο είδη : τη χωρητική και την επαγωγική σύζευξη. Υπάρχει πάντα μία μη μηδενική χωρητικότητα μεταξύ δύο ηλεκτρικών κυκλωμάτων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 1-7.



Σχήμα 1-7: Χωρητικότητες που δημιουργούνται μεταξύ κυκλωμάτων^[5]

Μια απότομη μεταβολή της τάσης στο ένα κύκλωμα δημιουργεί ένα πεδίο που για κοντινές αποστάσεις μπορεί να θεωρηθεί μόνο ηλεκτρικό. Αυτό το πεδίο επιδρά στο άλλο με αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσης. Αντίστοιχα, μια ραγδαία αλλαγή ρεύματος σε έναν αγωγό παράγει ένα πεδίο γύρω από τον αγωγό που μπορεί να θεωρηθεί μόνο μαγνητικό. Αυτό το πεδίο μπορεί να επιδράσει σε οποιοδήποτε ζεύγος αγωγών ή σε οποιοδήποτε βρόχο που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση, προκαλώντας τάση διαταραχής στα άκρα τους. Αυτή η σύζευξη ονομάζεται επαγωγική. Για τη δημιουργία του φαινομένου το ρεύμα θα πρέπει να είναι μεγάλο, πράγμα που συναντάμε συνήθως σε κυκλώματα ισχύος. Ακόμα, παρατηρείται ότι το ρεύμα αυξάνει με την αύξηση της τάσης στα άκρα του βρόχου. Χωρητική και επαγωγική σύζευξη έχουμε όταν οι αγωγοί βρίσκονται σε παράλληλη θέση ή όταν συνυπάρχουν σε κοντινή απόσταση. Η ηλεκτρομαγνητική διαταραχή αυξάνεται με την αύξηση του μήκους των παράλληλων αγωγών, με τη μείωση της απόστασης των δυο αγωγών και με την αύξηση της συχνότητας της διαταραχής. Για την εξάλειψη της χωρητικής και της επαγωγικής σύζευξης χρησιμοποιούνται συνεστραμμένα ζεύγη και θωρακισμένα καλώδια.

1.5 Αποφυγή διαταραχών στους δέκτες

Ως δέκτης ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών χαρακτηρίζεται ένας εξοπλισμός όταν μπορεί να επηρεαστεί από τέτοιου είδους διαταραχές. Ένας τέτοιος εξοπλισμός περιέχει ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία σε ένα απροσδόκητο εύρος συχνοτήτων δυσλειτουργούν εξαιτίας των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών [6]. Οι δυσλειτουργίες του εξοπλισμού μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες :

- α) Στις μόνιμες και μετρήσιμες.
- β) Στις τυχαίες και μη επαναλαμβανόμενες, που λαμβάνουν μέρος όταν εμφανίζεται η διαταραχή.
- γ) Στις τυχαίες και μη επαναλαμβανόμενες, που παραμένουν μετά την έκλειψη της διαταραχής.
- δ) Στη μόνιμη βλάβη του εξοπλισμού, όπου τα εξαρτήματα έχουν καταστραφεί.

Οι παραπάνω διακρίσεις χαρακτηρίζουν την διάρκεια του σφάλματος και όχι την κρισιμότητά του. Αρκετές δυσλειτουργίες μπορούν να είναι αποδεκτές για έναν περιορισμένο χρόνο, όπως η προσωρινή απώλεια μιας απεικόνισης, και άλλες όχι, όπως οι δυσλειτουργίες εξοπλισμών ασφαλείας.

Υπάρχουν πολλές λύσεις όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο ένας εξοπλισμός μπορεί να κατασκευαστεί προκειμένου να παρέχει αποτελεσματική και υψηλή ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές.

Ακόμα, προληπτικές δοκιμές πρέπει να γίνονται :

- Στον σχεδιασμό πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (λειτουργική διαχώριση, ενδοσυνδέσεις)
- Στην επιλογή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων
- Στην επιλογή και σχεδίαση προστατευτικού καλύμματος
- Στις ενδοσυνδέσεις της γείωσης
- Στην ενσυρμάτωση

Οι δοκιμές αυτές πρέπει να γίνονται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού διότι ανάλογα με τις επιλογές προκύπτουν διαφορετικά είδη εξοπλισμού που ενδέχεται να έχουν δυσλειτουργίες και το κόστος αποκατάστασης αυτών να είναι αρκετά υψηλό. Ο σχεδιαστής του τυπωμένου κυκλώματος πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένους κανόνες όσον αφορά τους λειτουργικούς διαχωρισμούς και τη διάταξη. Επίσης, η θέση των εξαρτημάτων μπορεί να μειώσει τις επιδράσεις της σύζευξης που προκαλούνται λόγω των κοντινών αποστάσεων. Για παράδειγμα, η ομαδοποίηση εξαρτημάτων που ανήκουν στην ίδια κατηγορία κυκλωμάτων (ψηφιακά, αναλογικά, κυκλώματα ισχύος) όσον αφορά την επιδεκτικότητά τους, μειώνει τις παρεμβολές.

Όταν όλοι οι σχεδιαστικοί και κατασκευαστικοί κανόνες ακολουθούνται, το σύστημα θα έχει παρουσιάσει ατρωσία στις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές του περιβάλλοντος για το οποίο κατασκευάστηκε. Όμως, αυτή η ατρωσία μπορεί να διαπιστωθεί μόνο από ακριβείς μετρήσεις που εκτιμούν την αποτελεσματικότητα των διαφόρων τεχνικών προστασίας.

1.6 Πρότυπα και Εφαρμογές τους

Στις μέρες μας, η χρήση πολλών ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών είναι κομμάτι της καθημερινότητάς μας. Συνεπώς, είναι αναγκαίος ο έλεγχος της συμπεριφοράς των συσκευών αυτών σε διάφορες συνθήκες με στόχο την ασφάλεια του χρήστη αλλά και την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας τους.

Οι διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης, σε μια προσπάθεια να θεσπίσουν δοκιμές για να πιστοποιήσουν την καλή και ασφαλή λειτουργία των συσκευών, όρισαν πρότυπα δοκιμών, με τα οποία θα πρέπει να συμμορφώνεται κάθε συσκευή που παράγεται και τελικά θα χρησιμοποιηθεί από κάποιον χρήστη. Ο χρήστης, μπορεί να βρίσκεται είτε σε περιβάλλον ελαφριάς βιομηχανίας, είτε σε περιβάλλον κατοικίας είτε σε εμπορικό περιβάλλον. Ο κατασκευαστής, θα πρέπει να παρέχει πιστοποιητικά συμμόρφωσης με κάποιους κανονισμούς στον αγοραστή ή χρήστη που θα εγγυώνται την ασφαλή και σωστή λειτουργία της, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Έχοντας ο χρήστης το εκάστοτε πιστοποιητικό δοκιμής, θα γνωρίζει ότι η συσκευή που διαθέτει ανταποκρίνεται σε αυτό για το οποίο έχει πιστοποιηθεί και ότι σε αυτή έχουν γίνει κάποιες δοκιμές (σειράς ή τύπου) με σκοπό τον έλεγχο αυτής [7].

Η πιστοποίηση και οι έλεγχοι γίνονται για χαρακτηριστικά τα οποία βρίσκονται μέσα στις τυπικές συνθήκες λειτουργίας της συσκευής ή σε συνθήκες λειτουργίας που μπορεί να βρεθεί η συσκευή που βρίσκονται πέρα από τις κανονικές, αλλά είναι πιθανές να συμβούν. Οι διεθνείς οργανισμοί τυποποίησης έχουν προσπαθήσει να προσαρμόσουν τις δοκιμές, έτσι ώστε να είναι εφαρμόσιμες σε μεγάλο εύρος δοκιμών. Θα ήταν δύσκολο να υπάρχει διαφορετική δοκιμή για κάθε συσκευή που κυκλοφορεί στην αγορά.

Τα πρότυπα που έχουν διατυπωθεί από τις διεθνείς επιτροπές εξασφαλίζουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα με την απαίτηση από τους σχεδιαστές εξοπλισμών να την λαμβάνουν υπόψιν τους σε κάθε βήμα της σχεδιαστικής διαδικασίας. Αποτελούνται συνήθως, από ένα κομμάτι αφιερωμένο στους ορισμούς των σχετικών τεχνικών όρων και συχνά καθορίζουν τις προϋποθέσεις για το σχεδιασμό και τη διαχείριση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), όπως επίσης [8]:

- Μεθόδους δοκιμής και συγκεκριμένο δοκιμαστικό εξοπλισμό
- Συγκεκριμένα όρια που πρέπει να τηρούνται
- Προδιαγραφές για δέκτες EMI μετρήσεων

Τα πρότυπα αυτά βρίσκονται σε διαρκή διαδικασία εξέλιξης και αναβάθμισης ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες της βιομηχανίας και της κοινωνίας. Οι πρώτοι κανονισμοί εκδόθηκαν από τη CISPR (International Special Committee on Radio Interference – Διεθνής Ειδική Επιτροπή σε θέματα Ραδιοπαρεμβολών) και καλύπτουν μόνο το μέγιστο αποδεκτό

επίπεδο ισχύος που θα μπορούσε να εκπέμπεται από τους διαφορετικούς τύπους εξοπλισμών, κυρίως για να προστατευτεί η ραδιομετάδοση και λήψη.

Εθνικές επιτροπές και η IEC (International Electrotechnical Commission – Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή) έχουν Πρότυπα που καλύπτουν όλες τις πτυχές της εκπομπής και της ευαισθησίας της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Η νέα σειρά προτύπων που δημιουργήθηκε από τη IEC περιλαμβάνει:

- 61000-1: Εφαρμογή, ορισμοί
- 61000-2: Περιβάλλον, επίπεδα συμβατότητας
- 61000-3: Όρια διαταραχής
- 61000-4: Τεχνικές δοκιμής και μέτρησης
- 61000-5: Οδηγίες εγκατάστασης και μείωσης
- 61000-6: Γενικά Πρότυπα

Η διάκριση των προτύπων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας γίνεται στις εξής κατηγορίες [9]:

Βασικά Πρότυπα

Περιγράφουν το φαινόμενο, παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του δοκιμαστικού εξοπλισμού και τις οδηγίες για τους τρόπους που πρέπει να διεξαχθούν οι δοκιμές. Βασικά πρότυπα, όπως το IEC 61000-4-x αποτελούν το χαμηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία προτύπων.

Γενικά Πρότυπα

Καθορίζουν επίπεδα δοκιμών για συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών, αναφερόμενα στα Βασικά Πρότυπα για γενικότερες πληροφορίες. Τα Γενικά Πρότυπα δίνουν ελάχιστες απαιτήσεις και βρίσκονται ψηλότερα στην ιεραρχία από τα Βασικά.

Πρότυπα Οικογενείας Προϊόντων

Χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων. Καθορίζουν επίπεδα δοκιμών και κριτήρια απόδοσης όπως για παράδειγμα το πρότυπο EN 61326 το οποίο αναφέρεται στις απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των δοκιμαστικών εξοπλισμών για εργαστηριακή χρήση.

Πρότυπα Προϊόντων

Αποτελούν τα πιο διαδεδομένα πρότυπα διότι προσφέρουν αυστηρές απαιτήσεις για ένα συγκεκριμένο προϊόν και ορίζουν ειδικές μεθόδους δοκιμών. Βρίσκονται στο υψηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία των προτύπων.

1.7 Ιστορική αναδρομή προτύπων

Από τις αρχές του 20ου αιώνα έχουν δημιουργηθεί διεθνή πρότυπα τα οποία ρυθμίζουν την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των συστημάτων. Οι πρώτοι κανονισμοί εκδόθηκαν από το CISPR (International Special Committee on Radio Interference – Διεθνής Ειδική Επιτροπή σε θέματα Ραδιοπαρεμβολών) για να προστατευτεί η ραδιομετάδοση και η λήψη αυτής, με αποτέλεσμα να περιέχουν περιορισμό μόνο για το μέγιστο αποδεκτό επίπεδο ισχύος που μπορεί να εκπέμπεται από τους διαφορετικούς τύπους εξοπλισμών [10]. Αργότερα, δημιουργήθηκε η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission, IEC) που είναι ένας παγκόσμιος οργανισμός τυποποίησης και περιλαμβάνει όλες τις Εθνικές Ηλεκτροτεχνικές Επιτροπές (IEC National Committees). Σκοπός της IEC είναι η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας και η δημιουργία προτύπων για την κάλυψη όλων των πτυχών της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας τόσο για την εκπομπή όσο και για την ευαισθησία των συστημάτων. Με αυτό τον τρόπο οι επίσημες αποφάσεις της IEC χαρακτηρίζονται από διεθνή ομοφωνία και αποδοχή. Για το λόγο αυτό δημοσιεύτηκαν τα ομώνυμα διεθνή πρότυπα της σειράς 61000, τα οποία έχουν τη μορφή προτάσεων και δεν είναι νομικώς δεσμευτικά.

Με την ενοποίηση της Ευρώπης και την πάροδο του χρόνου η σημασία της EMC αυξήθηκε, προκαλώντας αλλαγή στο τοπίο των πολιτικών προτύπων [11]. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο δημοσίευσε μια οδηγία (αναφορά 89/336/EK) το Μάιο του 1989 η οποία είχε θέμα την ενοποίηση της νομοθεσίας EMC των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, και το Δεκέμβριο του 2004 προχώρησε στην κατάργησή της και δημοσίευσε τη νέα οδηγία 2004/108/EK με την 2014/30/EE να αποτελεί την πλέον πρόσφατη έκδοση. Κάθε χώρα - μέλος είναι δεσμευμένη να το περιλάβει στην εθνική νομοθεσία της και να καταστήσει τη χρήση και την εφαρμογή της, υποχρεωτικές. Η συγκεκριμένη ευρωπαϊκή οδηγία δεν επιβάλλει μόνο τα όρια στις εκπεμπόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές, αλλά θέτει την ελάχιστη ατρωσία σε αυτές. Ακόμα, η οδηγία πρέπει να αναφέρεται στα πρότυπα που καθορίζουν τα μέγιστα επίπεδα διαταραχής.

Διάφορες τεχνικές επιτροπές, καθιερωμένες από την CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization – Ευρωπαϊκή Επιτροπή για Ηλεκτροτεχνική Τυποποίηση), συγκέντρωσαν τα υπάρχοντα πρότυπα που αντιστοιχούν στην εφαρμογή της οδηγίας και πρόσθεσαν τα πρότυπα που έλειπαν. Ορισμένα ειδικά πρότυπα EMC έχουν, επίσης, δημοσιευτεί από το ISO (International Organization for Standardization – Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης). Τα Πρότυπα EMC στη Βόρεια Αμερική εκδίδονται από το FCC (Federal Communications Commission – Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών), το ANSI (American National Standards Institute – Εθνικό Αμερικάνικο Ινστιτούτο Προτύπων) και το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers – Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών). Όσον αφορά τα στρατιωτικά πρότυπα για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, αυτά έχουν συνταχθεί στη σειρά GAM EG 13 [12, 13] στη Γαλλία και στη σειρά MIL-STD [13, 14] στις Η.Π.Α..

Στις μέρες μας, έχει υιοθετηθεί η οικογένεια προτύπων EN 61000 (European Norms 61000). Τα πρότυπα αυτά βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με τα πρότυπα IEC και είναι νομικώς δεσμευτικά για τις χώρες - μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πολλές χώρες βρίσκονται ή έχουν ήδη ολοκληρώσει τη διαδικασία υιοθέτησης προτύπων με νομική ισχύ βασισμένων σε αυτά της IEC, όπως για παράδειγμα τα Γερμανικά πρότυπα που σαν αναφορά είχαν τα VDE 0871 και VDE 0875, τώρα έχουν αντικατασταθεί από τα πρότυπα EN 55011 και EN 55022.

Κεφάλαιο 2: Η έννοια της διακρίβωσης

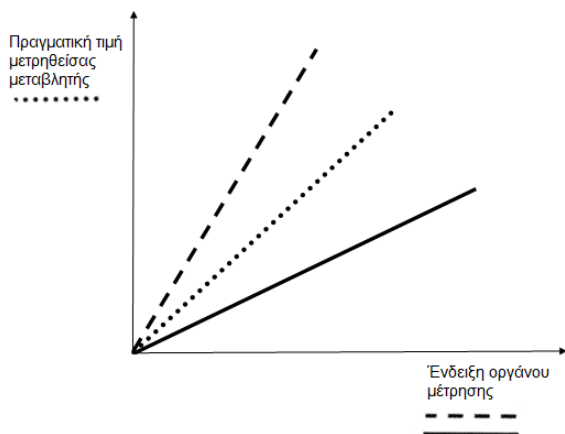
Είναι γνωστό ότι η ποιότητα των προϊόντων και των υπηρεσιών συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία των μετρήσεων και επομένως με την ποιότητα των μετρήσεων του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη τρέχουσα παραγωγική διαδικασία. Για το λόγο αυτό, σε πρότυπα σειρών προβλέπονται συγκεκριμένες απαιτήσεις σχετικά με τον έλεγχο, την συντήρηση και τη διακρίβωση του εξοπλισμού μετρήσεων και δοκιμών [15].

2.1 Ορισμός διακρίβωσης

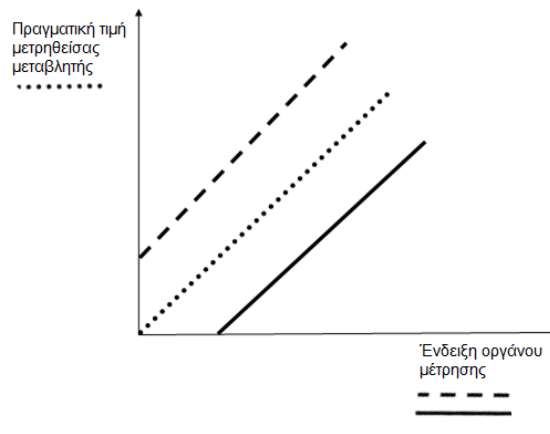
Διακρίβωση είναι η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων μιας συσκευής γνωστής ακριβείας, η οποία καλείται πρότυπη, και μιας άλλης συσκευής μέτρησης, η οποία είναι υπό έλεγχο, ώστε να ανιχνευθεί, να διορθωθεί αν χρειαστεί, και να πιστοποιηθεί η ακρίβεια της τελευταίας [13, 15, 16].

Όλες οι συσκευές μέτρησης απαιτούν διακρίβωση, ακόμη και οι καινούριες, διότι είναι αναγκαίο να επιβεβαιωθεί ότι αυτές παρέχουν ακριβή ένδειξη ή σήμα εξόδου όταν τίθενται σε λειτουργία. Πολλοί παράγοντες προκαλούν σφάλματα στα όργανα μέτρησης, παράγοντες όπως η σκόνη, το περιβάλλον, η παροχή ρεύματος, οι παρεμβολές σημάτων στην έξοδο, η αλλαγή χρήσης του οργάνου. Τα σφάλματα αναγνωρίζονται όταν εκτελείται η διακρίβωση, συγκρίνοντας ή εφαρμόζοντας ένα γνωστό σήμα στο υπό εξέταση όργανο. Το σφάλμα ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά μεταξύ μιας ένδειξης και της πραγματικής τιμής της μετρηθείσας μεταβλητής. Τα τυπικά σφάλματα, που συμβαίνουν, περιλαμβάνουν [13, 15, 17]:

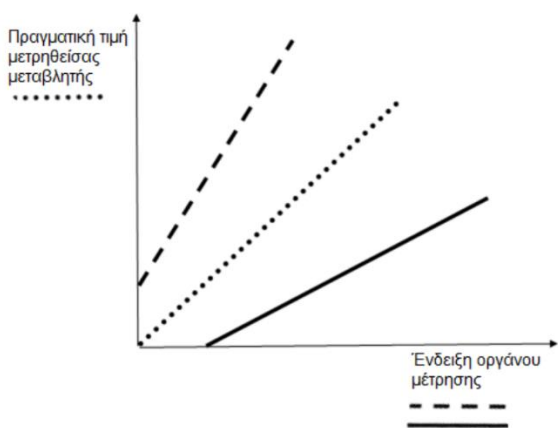
- Σφάλμα εύρους (Σχήμα 2-1)
- Σφάλμα μηδενισμού (Σχήμα 2-2)
- Σφάλμα συνδυασμού εύρους και μηδενισμού (Σχήμα 2-3)
- Σφάλμα ευθυγράμμισης (Σχήμα 2-4)



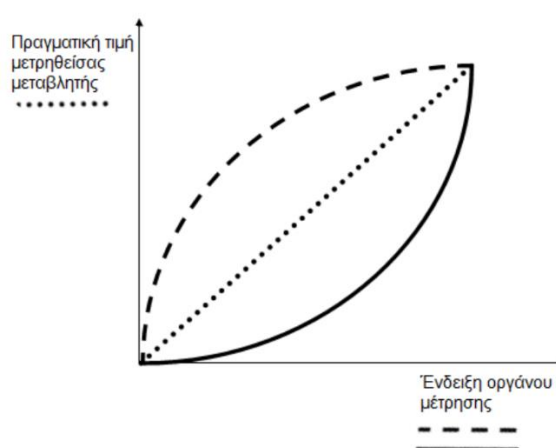
Σχήμα 2-1: Διάγραμμα σφάλματος εύρους



Σχήμα 2-2: Διάγραμμα σφάλματος μηδενισμού



Σχήμα 2-3: Διάγραμμα σφάλματος συνδυασμού εύρους και μηδενισμού



Σχήμα 2-4: Διάγραμμα σφάλματος ευθυγράμμισης

Τα σφάλματα εύρους και μηδενισμού διορθώνονται με τη διακρίβωση. Οι περισσότεροι κατασκευαστές εκδίδουν οδηγίες βάσει των οποίων πραγματοποιείται η ρύθμιση του μηδενός και του εύρους στα όργανα τους. Για τη ρύθμιση του μηδενός μετατοπίζεται παράλληλα η καμπύλη εισόδου - εξόδου. Για τη ρύθμιση του εύρους αλλάζει η γωνία της καμπύλης εισόδου - εξόδου. Το σφάλμα ευθυγράμμισης μπορεί να διορθωθεί μόνο αν το όργανο διαθέτει αντίστοιχη ρύθμιση κι εφόσον το μέγεθος της μη ευθυγράμμισης είναι αποδεκτό κι επιδέχεται διόρθωσης αλλιώς το όργανο αντικαθίσταται.

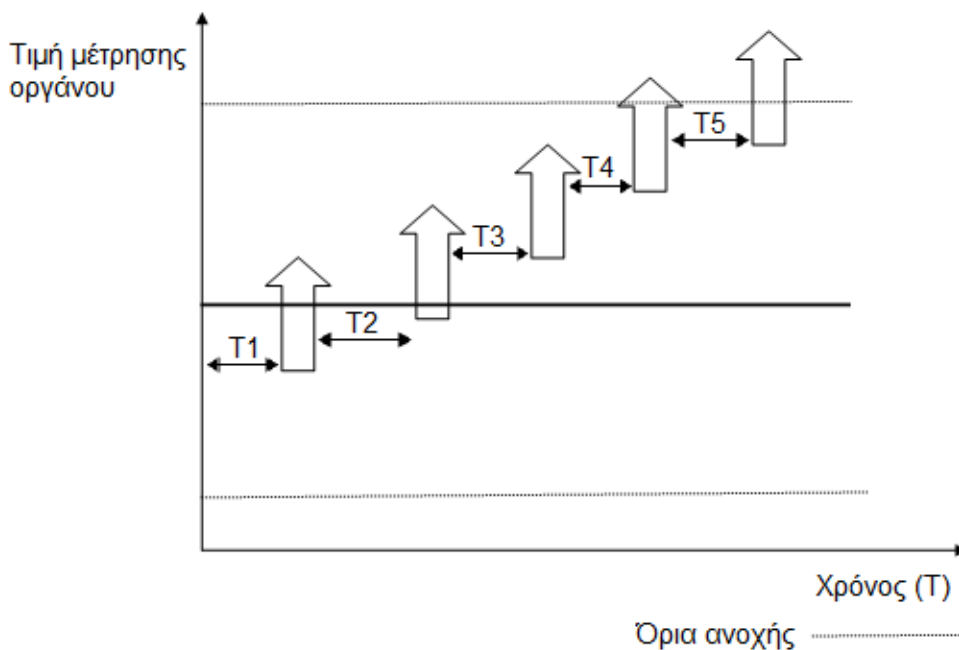
Για να ανιχνευθούν και να διορθωθούν τα σφάλματα εφαρμόζονται περιοδικές διακριβώσεις. Ακόμη και αν η πραγματοποίηση μιας διακριβωσης φανερώσει ότι το όργανο λειτουργεί σωστά και δεν απαιτείται καμία ρύθμιση, δεν θα πρέπει να παραληφθεί ο επόμενος προγραμματισμένος

έλεγχος. Άλλωστε για να εξασφαλίσουμε τη ποιότητα και την αξιοπιστία του συστήματος μας θα πρέπει να ανανεώνουμε συχνά τη πιστοποίηση του.

Η βασική λειτουργία του πλήθους των συσκευών μέτρησης βασίζεται στη μετατροπή κάποιας φυσικής παραμέτρου (π.χ. τάσης, αντίστασης, θερμοκρασίας) σε έναν αριθμό, ο οποίος αντιστοιχεί στη τιμή μέτρησης της παραμέτρου αυτής. Για να επιτευχθεί αυτό, τα ανεξάρτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα, που περιέχουν οι συσκευές, εκτελούν διάφορες συναρτήσεις έτσι ώστε να απεικονίσουν με ακρίβεια τη τιμή μιας παραμέτρου. Σε έναν κόσμο με ιδανικές συνθήκες, τα ηλεκτρονικά αυτά στοιχεία (πυκνωτές, αντιστάσεις, αυτεπαγωγές) θα διατηρούσαν αναλλοίωτη την αρχική τους αξία. Όμως η πραγματικότητα είναι ότι φθείρονται με το χρόνο, τη θερμοκρασία, τη μόλυνση, την υγρασία. Για αυτό άλλωστε και οι κατασκευαστές ορίζουν τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας που θα πρέπει να τηρούνται στο περιβάλλον όπου λειτουργούν οι συσκευές τους.

Με άλλα λόγια η φθορά των στοιχείων προκαλεί λανθασμένες και μη αξιόπιστες μετρήσεις. Η ένδειξη ενός μετρητικού οργάνου για μια ορισμένη τιμή μεγέθους δεν παραμένει η ίδια με το χρόνο, ακόμα και όταν οι συνθήκες μέτρησης δεν έχουν αλλάξει. Ανεξάρτητα από το πόσο σύγχρονα ή αυτοματοποιημένα είναι, όλα τα μετρητικά συστήματα μειονεκτούν όσον αφορά τη σταθερότητα της ένδειξης ή της μετρητικής τιμής τους. Οι λόγοι στους οποίους οφείλεται η ολίσθηση της τιμής, μπορούν να αναζητηθούν στην αρχή λειτουργίας, στον τρόπο κατασκευής του οργάνου και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή του οργάνου. Το μέγεθος της ολίσθησης για ένα συγκεκριμένο όργανο εξαρτάται από τη συχνότητα και τον τρόπο χρήσεως καθώς και από τον τρόπο αποθήκευσης του (μεταβολές θερμοκρασίας, καθαριότητα κ.λ.π.). Η ολίσθηση αυτή γίνεται σε μια ορισμένη κατεύθυνση και αποτελεί πλέον μια συστηματική απόκλιση από την αρχική κατάσταση του οργάνου. Αποκλίσεις τέτοιας φύσης δεν αποκαλύπτονται εάν το όργανο δεν συγκριθεί έστω και σε μια τιμή με ένα διακριβωμένο πρότυπο αντίστοιχης ή καλύτερα μικρότερης αβεβαιότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θεωρητική εκτίμηση της ολίσθησης είναι πάρα πολύ δύσκολη και μόνο με την πρακτική εμπειρία για συγκεκριμένα όργανα μπορούν να δοθούν αξιόπιστες τιμές για τη ποσοτική πρόβλεψή της.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2-5) φαίνεται ο ρυθμός ολίσθησης μιας ορισμένης τιμής μέτρησης ενός οργάνου σχετικά με κάποια αυθαίρετα όρια ανοχής. Το παράδειγμα αυτό παρουσιάζει μια συστηματική ολίσθηση με τάση να αυξηθεί η τιμή με το χρόνο.



Σχήμα 2-5: Διάγραμμα για τον ρυθμό της ολίσθησης ένδειξης / τιμής μετρητικών οργάνων / προτύπων σχετικά με τα αυθαίρετα όρια ανοχής^[15]

Όπως παρατηρείται, μετά από κάθε διακρίβωση αυξάνει η αβεβαιότητα των μετρήσεων λόγω της αυξανόμενης συστηματικής απόκλισης. Μετά την τρίτη διακρίβωση γίνονται πλέον αμφίβολες οι μετρήσεις. Οι τιμές έχουν φτάσει τα όρια της επιτρεπόμενης ανοχής. Προτείνεται να γίνει μια ρύθμιση της ένδειξης το αργότερο μετά το διάστημα T4 και αμέσως μετά από μια διακρίβωση.

Η αναπαραγωγιμότητα ενός οργάνου είναι η διαφορά μετρητικών αποτελεσμάτων σε μια ορισμένη τιμή όταν αλλάζει το περιβάλλον / ο τόπος, ο χρήστης και όταν οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις απέχουν μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ τους. Συχνά αναφέρουν τα εγχειρίδια χρήσης μετρητικών οργάνων μια τιμή για την αναπαραγωγιμότητά του. Η τιμή αυτή είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό της αρχικής περιόδου της επαναδιακρίβωσης.

2.2 Χαρακτηριστικά διακρίβωσης

Οι λόγοι οι οποίοι καθιστούν τη διακρίβωση εξοπλισμού αναγκαία προκύπτουν κυρίως από την ανάγκη παροχής απόδειξης αποδεκτής μέτρησης από ένα συγκεκριμένο όργανο μέτρησης και την ανάγκη αναγνώρισης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων μιας μέτρησης. Αλληλένδετες έννοιες με αυτήν της διακρίβωσης είναι η επαλήθευση, η ιχνηλασιμότητα και η αβεβαιότητα μέτρησης. Η κατανόηση αυτών των εννοιών οδηγεί στην αποσαφήνιση της έννοιας “ποιότητα μετρήσεων”.

Ενώ λοιπόν διακρίβωση ενός οργάνου μέτρησης είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων, οι οποίες προσδιορίζουν τις τιμές σφάλματός του, επαλήθευση του οργάνου θεωρείται η επιβεβαίωση μετά από εξέταση και η απόδειξη ότι υπάρχει συμμόρφωση του οργάνου με συγκεκριμένες απαιτήσεις

2.3 Εύρος διακρίβωσης

Τυπικά η διακρίβωση ενός οργάνου γίνεται σε πολλά σημεία στο εύρος της διακρίβωσής του. Το εύρος αυτό ορίζεται ως η περιοχή εντός της οποίας μια ποσότητα μπορεί να μετρηθεί. Τα όρια της περιοχής αυτής ορίζονται από τη μηδενική τιμή και το εύρος. Μηδενική είναι η χαμηλότερη τιμή και εύρος είναι η αλγεβρική διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής. Το εύρος διακρίβωσης μπορεί να διαφέρει από το εύρος που μπορεί να μετρήσει το όργανο. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα πομπό ηλεκτρικής πίεσης που έχει εύρος οργάνου 0 - 750 psig κι έξοδο 4 - 20 mA, αλλά ο μηχανικός έχει καθορίσει ότι θα διακριβωθεί για 0 - 300 psig = 4 - 20 mA. Τότε η μηδενική είσοδος είναι 0 psig και η μηδενική έξοδος 4 mA. Η απόσταση εισόδου, δηλαδή το εύρος, είναι 300 psig και εξόδου 16 mA.

2.4 Ακρίβεια και ανοχή διακρίβωσης

Ακρίβεια ενός οργάνου είναι ο λόγος του σφάλματος προς τη συνολική έξοδο σε ποσοστό επί τις εκατό (%). Ανοχή διακρίβωσης είναι η επιτρεπτή παρέκκλιση από μια συγκεκριμένη τιμή σε μονάδα μέτρησης ή σπανιότερα σε ποσοστό επί τις εκατό. Κάθε διακρίβωση θα πρέπει να πραγματοποιείται με μια ορισμένη ανοχή [13, 15].

Με αναφορά στο προηγούμενο παράδειγμα, στον πομπό πίεσης 0 - 16 mA και 0 - 300 psig και θεωρήσουμε ανοχή διακρίβωσης ± 2 psig, η ανοχή εξόδου θα είναι :

$$2\text{psig} \times 16\text{mA} / 300\text{psig} = 0.1067\text{ mA}$$

Άρα, θα πρέπει να δεχτούμε ότι η ανοχή θα είναι $\pm 0,1$ mA, γιατί αλλιώς το 0,11 mA θα υπερέβαινε την υπολογιζόμενη τιμή, ενώ, η ακρίβεια για αυτό το όργανο σύμφωνα με τον κατασκευαστή θα μπορούσε να είναι 0,25 %. Επομένως, η ανοχή διακρίβωσης δε θα πρέπει να στηρίζεται μόνο στις προδιαγραφές του κατασκευαστή, αλλά θα πρέπει να καθορίζεται από ένα συνδυασμό παραγόντων, όπως :

- Τις απαιτήσεις της διαδικασίας
- Τις ικανότητες του διατιθέμενου εξοπλισμού

- Την ανοχή του κατασκευαστή

Για παράδειγμα, αν η διαδικασία καθορίζει όρια ανοχής θερμοκρασίας ± 5 °C, αλλά για το διαθέσιμο εξοπλισμό καθορίζονται όρια $\pm 0,25$ °C και η ακρίβεια βάσει του κατασκευαστή είναι $\pm 0,25$ °C, τότε μια επιτρεπτή ανοχή διακρίβωσης θα ήταν ± 1 °C, έτσι ώστε να συμφωνεί και με λόγο ακριβείας ίσο με 4:1.

2.5 Λόγος ακριβείας

Ο λόγος ακριβείας χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της ακρίβειας του προτύπου με την ακρίβεια της υπό έλεγχο συσκευής. Ο λόγος ακρίβειας που συνήθως προτιμάται κατά τη διακρίβωση, αν και είναι δύσκολο να επιτευχθεί με την σημερινή τεχνολογία, είναι ο 4:1, δηλαδή το πρότυπο που χρησιμοποιείται είναι τέσσερις φορές πιο ακριβές από το όργανο που ελέγχεται. Με αυτόν τον τρόπο καλύπτεται το ενδεχόμενο να βρεθούν σφάλματα στη συσκευή και να μην έχουν ελεγχθεί από αυτό το πρότυπο υψηλής ακρίβειας.

Στο προηγούμενο παράδειγμα έγινε χρήση ενός εξοπλισμού με ανοχή $\pm 0,25$ °C. Έστω ότι βρέθηκε ο εξοπλισμός να κυμαίνεται εκτός ανοχής $\pm 0,5$ °C κατά τη διάρκεια προγραμματισμένης διακρίβωσης. Έχοντας λάβει υπόψη λόγο ακριβείας 4:1 και ανοχή διακρίβωσης ± 1 °C, δεν μπορεί να αμφισβητηθεί η διακρίβωση που εκτελέστηκε σε αυτόν τον εξοπλισμό. Στην περίπτωση όμως που αποδεικνυόταν ανοχή διακρίβωσης $\pm 0,25$ °C ή είχε χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός με ανοχή διακρίβωσης ± 1 °C, τότε θα υπήρχε αμφισβήτηση για το αποτέλεσμα της μέτρησης και η διακρίβωση θα έπρεπε να επαναληφθεί. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη επεξήγησης του όρου ιχνηλασιμότητα.

2.6 Ιχνηλασιμότητα

Ιχνηλασιμότητα είναι ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων/μετρήσεων με βάση εθνικά ή διεθνή πρότυπα, μέσω μιας αδιάσπαστης αλυσίδας συσχέτισης, δηλαδή συγκρίσεων. Έτσι δημιουργείται μια πυραμίδα ιχνηλασιμότητας, η οποία περιλαμβάνει ιεραρχικά : τα διεθνή πρότυπα, έπειτα τα εθνικά, τα πρότυπα του εργαστηρίου διακρίβωσης και τέλος τα όργανα εργασίας της βιομηχανίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6.

Αυτή η πυραμίδα ιχνηλασιμότητας δείχνει τη μεταφορά ακριβείας. Η ιχνηλασιμότητα, εκφρασμένη σαν ιεραρχία διακρίβωσης, σημαίνει πως, τελικά, η ένδειξη ενός οργάνου

μέτρησης μπορεί να συσχετιστεί με το εθνικό πρότυπο του μετρούμενου μεγέθους σε ένα ή περισσότερα στάδια.

Η ιχνηλασιμότητα επιτυγχάνεται εξασφαλίζοντας ότι τα πρότυπα που χρησιμοποιούμε διακρίβωνται περιοδικά από πρότυπα αναφοράς υψηλότερης ακρίβειας. Ο ρόλος του τεχνικού διακρίβωσης στη διατήρηση της ιχνηλασιμότητας είναι να εξασφαλίσει ότι ο εξοπλισμός προτύπου που χρησιμοποιεί έχει διακριβωθεί και δεν έχει παρέλθει ο χρόνος για τον επόμενο προγραμματισμένο έλεγχο. Στη τήρηση των χρονοδιαγραμμάτων βοηθάει πολύ το πιστοποιητικό διακρίβωσης, το οποίο παρέχεται από το εργαστήριο διακρίβωσης.



Σχήμα 2-6: Πυραμίδα Ιχνηλασιμότητας ^[15]

2.7 Αβεβαιότητα μέτρησης

Αβεβαιότητα μέτρησης είναι μια παράμετρος του αποτελέσματος μέτρησης που χαρακτηρίζει το διάστημα τιμών, μέσα στο οποίο εκτιμάται ότι βρίσκεται το μετρούμενο μέγεθος. Πρόκειται για μια ποσοτική μέτρηση της ισχύος της αλυσίδας της ιχνηλασιμότητας. Η ανάλυση της αβεβαιότητας πραγματοποιείται για να αξιολογηθούν και να αναγνωριστούν όλοι οι παράγοντες που σχετίζονται με τον εξοπλισμό της διακρίβωσης και με το υπό εξέταση όργανο και επηρεάζουν την ακρίβεια της διακρίβωσης. Οι τεχνικοί διακρίβωσης θα πρέπει να γνωρίζουν τους βασικούς παράγοντες για την ανάλυση της αβεβαιότητας, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς επίσης τον τρόπο με τον οποίο να συνδυάζουν πολλαπλές ακρίβειες του επιμέρους εξοπλισμού ώστε να υπολογίζουν μια συνολική ακρίβεια [13].

Κεφάλαιο 3: Πρότυπα και ανάλυση της Large Loop Antenna

Το 2012 η Ευρωπαϊκή Ένωση κατάφερε να επιτύχει την κατάργηση των λαμπτήρων πυρακτώσεως. Η πρόοδος στη μελέτη της φωτεινής ροής των λαμπτήρων LED αλλά και στην περαιτέρω ανάπτυξη των λαμπτήρων εκκένωσης χαμηλής και υψηλής πίεσης, έχει οδηγήσει σε ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μονάδων στη τεχνολογία φωτισμού [18].

Σχετικά με την σήμανση CE και τη δήλωση συμμόρφωσης για τον εξοπλισμό φωτισμού, κατά την εφαρμογή της οδηγίας για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), η εναρμόνιση των προτύπων σχετικών με την τεχνολογία φωτισμού εξασφάλισε επίσης την ύπαρξη ενιαίας αξιολόγησης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στη ζώνη της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

3.1 Πρότυπο EN 55015 [19]

Το συγκεκριμένο πρότυπο εφαρμόζεται σε κάθε εξοπλισμό φωτισμού και τα εξαρτήματά του. Εξαιρέσεις ισχύουν σε εξοπλισμό που λειτουργεί σε βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές ζώνες συχνοτήτων, σε τεχνολογίες φωτισμού αεροσκαφών και αεροδρομίων και σε άλλους ειδικά εξαιρούμενους εξοπλισμούς. Το πρότυπο αυτό, θέτει τα όρια και τις μεθόδους μέτρησης των χαρακτηριστικών ραδιοδιαταραχών ηλεκτρικών συσκευών φωτισμού και παρόμοιων συσκευών. Ειδικότερα, τα όρια αφορούν τα εξής μεγέθη [19]:

- Εύρη συχνοτήτων
- Απώλειες εισαγωγής
- Διαταραχές τάσης
- Εκπεμπόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές

Σχετικά με τις μετρήσεις των εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, αυτές διαχωρίζονται ανάλογα με το εύρος συχνοτήτων και συνεπώς οι μετρητικές διατάξεις διαφέρουν για το εύρος 9kHz με 30MHz και το εύρος 30MHz με 300MHz.

Για το εύρος 9kHz με 30MHz, τα όρια quasi-peak του μαγνητικού στοιχείου της έντασης του εκπεμπόμενου πεδίου διαταραχών μετρούνται ως ρεύμα σε κεραιές μεγάλου βρόχου των 2 , 3 ή 4 μέτρων γύρω από τον εξοπλισμό φωτισμού και δίνονται στον Πίνακα 3-1. Τα όρια για την κεραιά διαμέτρου 2m ισχύουν για εξοπλισμό που δεν υπερβαίνει τα 1,6 μέτρα, τα όρια για την κεραιά διαμέτρου 3m για εξοπλισμό από 1,6 μέτρα μέχρι 2,6 μέτρα και τα όρια της κεραιάς διαμέτρου 4m για εξοπλισμό που έχει μήκος μεταξύ 2,6 και 3,6 μέτρα.

Frequency range MHz	Limits for loop diameter dB(μA) ^a		
	2 m	3 m	4 m
9 kHz to 70 kHz	88	81	75
70 kHz to 150 kHz	88 to 58 ^b	81 to 51 ^b	75 to 45 ^b
150 kHz to 3,0 MHz	58 to 22 ^b	51 to 15 ^b	45 to 9 ^b
3,0 MHz to 30 MHz	22	15 to 16 ^c	9 to 12 ^c

^a At the transition frequency, the lower limit applies.

^b Decreasing linearly with the logarithm of the frequency. For electrodeless lamps and luminaires, the limit in the frequency range of 2,2 MHz to 3,0 MHz is 58 dB(μA) for 2 m, 51 dB(μA) for 3 m and 45 dB(μA) for 4 m loop diameter.

^c Increasing linearly with the logarithm of the frequency.

Πίνακας 3-1: Όρια εκπεμπόμενων διαταραχών στο εύρος συχνοτήτων 9kHz με 30MHz^[19]

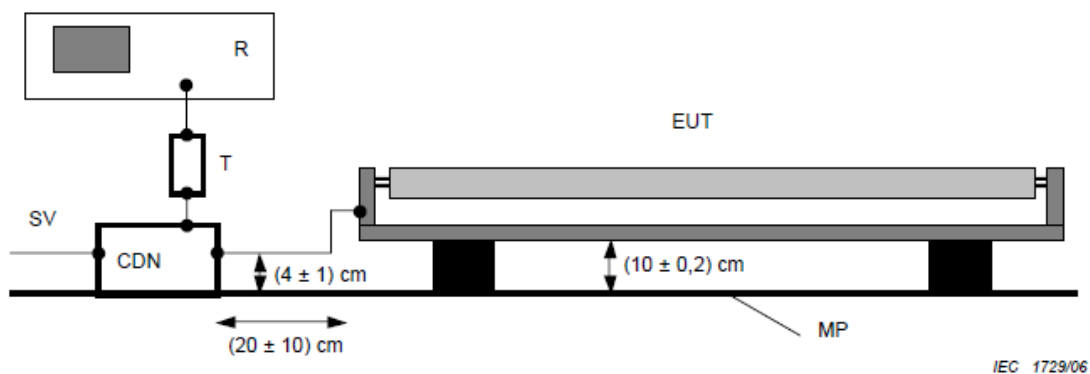
Για το εύρος 30MHz με 300MHz, οι δοκιμές μπορούν να διεξαχθούν με τον τρόπο που αναφέρεται στο Παράρτημα Β του συγκεκριμένου προτύπου.

Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των επαγόμενων εκπομπών ραδιοσυχνότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1. Ο εξοπλισμός φωτισμού τοποθετείται πάνω σε μία ή περισσότερες μη αγωγίμες βάσεις, με ύψος ($10 \pm 0,2$) cm, οι οποίες με τη σειρά τους τοποθετούνται πάνω σε μία γειωμένη μεταλλική πλάκα με διαστάσεις τουλάχιστον 20 εκατοστά μεγαλύτερες από τις διαστάσεις του εξοπλισμού φωτισμού.

Ο εξοπλισμός φωτισμού συνδέεται μέσω καλωδίου τροφοδοσίας μήκους (20 ± 10) cm στο κατάλληλο δίκτυο ζεύξης / απόζευξης (CDN-M2 ή CDN-M3, βλ. IEC 61000-4-6). Η απόσταση από το καλώδιο στη μεταλλική πλάκα θα πρέπει να είναι (4 ± 1) cm. Ένα μη αγωγίμο στήριγμα με ύψος (4 ± 1) cm θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Το δίκτυο ζεύξης / απόζευξης CDN τοποθετείται πάνω στη μεταλλική πλάκα.

Η έξοδος RF του CDN συνδέεται σε έναν μετρητικό δέκτη με ανιχνευτή quasi-peak μέσω ενός εξασθενητή 6 dB, 50 Ω (απαιτείται για την ελαχιστοποίηση τυχόν σφάλματος αναντιστοιχίας). Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα δίκτυα ζεύξης / απόζευξης CDN που συνδέονται με τον εξοπλισμό φωτισμού, οι μετρήσεις εκτελούνται χωριστά σε κάθε δίκτυο ζεύξης / απόζευξης CDN. Η έξοδος RF του δικτύου ζεύξης / απόζευξης CDN η οποία δεν είναι συνδεδεμένη με τον εξοπλισμό μέτρησης πρέπει να τερματίζεται στη θύρα μέτρησης με 50 Ω.

Η μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μη θωρακισμένο χώρο. Η απόσταση από οποιαδήποτε αγωγίμα μέρη πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 40 cm.



Components

R measuring receiver
 SV supply voltage
 MP earthed metal plate

CDN coupling-decoupling network
 EUT equipment under test
 T 6 dB, 50 Ω attenuator

Σχήμα 3-1: Διάταξη δοκιμής CDN^[19]

Η τάση στην έξοδο RF κάθε δικτύου ζεύξης / απόζευξης CDN μετράται ως συνάρτηση της συχνότητας με έναν δέκτη που έχει εύρος ζώνης 120 kHz και λειτουργία ανίχνευσης quasi-peak. Μέσα στο δίκτυο ζεύξης / απόζευξης CDN, το σήμα RF εξασθενεί από τον συντελεστή διαίρεσης τάσης του CDN και η τιμή αυτή πρέπει να προστεθεί στο αποτέλεσμα που υπολογίζεται από τον δέκτη. Επιπλέον, 6 dB προστίθενται στο αποτέλεσμα, λόγω των 6 dB εξασθένησης στην έξοδο RF του δικτύου ζεύξης / απόζευξης CDN.

Ο εξοπλισμός φωτισμού θεωρείται ότι συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της περιοχής συχνοτήτων 30 MHz έως 300 MHz της ενότητας 4.4.2 του παρόντος προτύπου εάν η μετρούμενη τάση ακροδεκτών κοινού τρόπου (common mode terminal voltage) σε κάθε καλώδιο δεν υπερβαίνει τα όρια που δίνονται στον Πίνακα 3-2.

Frequency range MHz	Quasi-peak limits dB(μV) [*]
30 to 100	64 to 54 ^{**}
100 to 230	54
230 to 300	61

^{*} At the transition frequency, the lower limit applies.
^{**} The limit decreases linearly with the logarithm of the frequency.

Πίνακας 3-2: Όρια τάσης ακροδέκτη κοινού τρόπου, μέθοδος δικτύου ζεύξης / απόζευξης CDN^[19]

3.2 Μέθοδος μέτρησης εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών

Το μαγνητικό στοιχείο πρέπει να μετρηθεί με τη διάταξη της βροχοκεραίας που περιγράφεται στο πρότυπο CISPR 16-1-4 [20] και στο οποίο θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Ο εξοπλισμός φωτισμού τοποθετείται στο κέντρο της κεραίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7.

Το επαγόμενο ρεύμα στη βροχοκεραία μετράται με probe ρεύματος (1 V/A) και τον εξοπλισμό που λαμβάνει το σήμα όπως καθορίζεται από το πρότυπο CISPR 16-1-4 [20]. Μέσω ενός ομοαξονικού διακόπτη, οι 3 πεδιακές διευθύνσεις μπορούν μετρηθούν κατά σειρά και κάθε τιμή πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις που έχουν δοθεί.

3.3 Πρότυπο CISPR 16-1-4 [20]

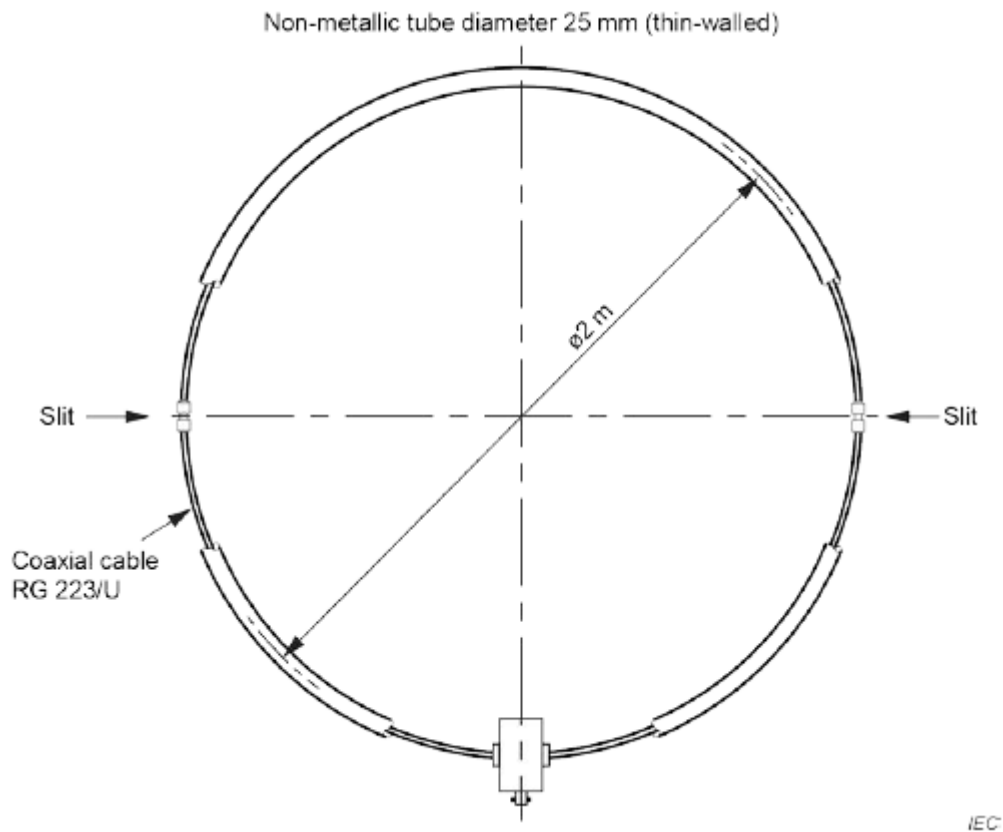
Το συγκεκριμένο πρότυπο ορίζει τις μεθόδους και τις προδιαγραφές για τον εξοπλισμό μέτρησης ραδιοδιαταραχών και ατρωσίας. Αναφέρεται κυρίως στα χαρακτηριστικά των κεραιών και στις θέσεις δοκιμών για την μέτρηση εκπεμπόμενων διαταραχών στο εύρος συχνοτήτων 9kHz με 18GHz. Οι κεραίες αυτές, οι οποίες είναι διακριβωμένες, πρέπει να μετρούν την ένταση του πεδίου λαμβάνοντας υπόψιν το διάγραμμα ακτινοβολίας τους καθώς και την αμοιβαία σύζευξη με το περιβάλλον τους. Επίσης, η κεραία και τα κυκλώματα που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτής και του δέκτη των μετρήσεων οφείλουν να μην επηρεάζουν αισθητά τα συνολικά χαρακτηριστικά του δέκτη [20].

Στο Παράρτημα C του προτύπου CISPR 16-1-4 παρέχονται πληροφορίες και δεδομένα σχετικά με τις μετρήσεις του επαγόμενου ρεύματος σε σύστημα κεραιών μεγάλου βρόχου (Large Loop Antenna System – LLAS) από το μαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται από έναν εξοπλισμό που υποβάλλεται σε δοκιμές (Equipment Under Test – EUT) στην περιοχή συχνοτήτων 9kHz έως 30MHz. Επίσης, σε αυτό το παράρτημα δίνεται μια περιγραφή του συστήματος των LLA (LLAS), καθώς και η μέθοδος επαλήθευσης κάθε βροχοκεραίας από τις οποίες συνίσταται το LLAS.

3.4 Κατασκευή κεραίας μεγάλου βρόχου (LLA)

Κάθε LLA του συστήματος των LLA (LLAS) είναι κατασκευασμένη από ομοαξονικό καλώδιο με αντίσταση ανά μονάδα επιφανείας μικρότερη από 10 mΩ/m στα 100kHz και λιγότερη από 1 mΩ/m στα 10MHz. Επιπλέον, η αντίσταση του εσωτερικού αγωγού κάθε LLA πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλή. Οι απαιτήσεις αυτές πληρούνται όταν χρησιμοποιείται για παράδειγμα ομοαξονικό καλώδιο διπλής θωράκισης RG-223/U.

Για να διατηρηθεί κάθε LLA στο κυκλικό της σχήμα και για να προστατευτεί το κατασκευαστικό άνοιγμα στο σημείο ένωσης της κεραίας, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 3-2, το καλώδιο εισάγεται σε έναν μη μεταλλικό σωλήνα λεπτού τοιχώματος, με εσωτερική διάμετρο περίπου 25mm. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μη μεταλλικές κατασκευές που εξυπηρετούν τους ίδιους σκοπούς.

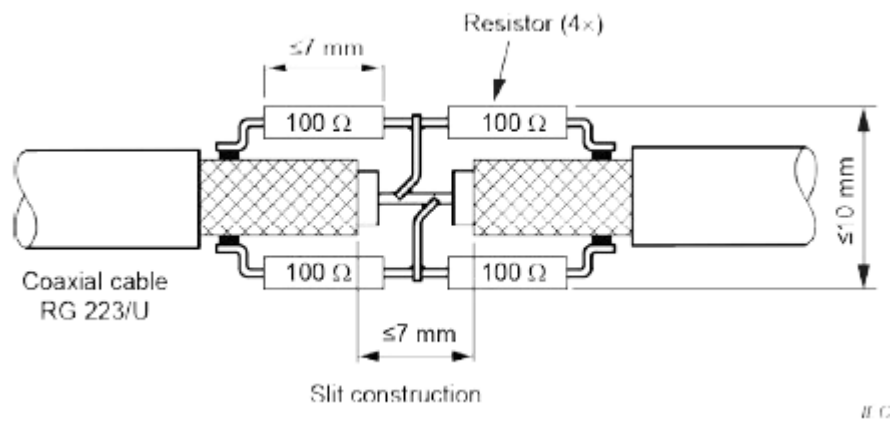


Σχήμα 3-2: Κεραία μεγάλου βρόχου (LLA) η οποία περιλαμβάνει δύο αντιδιαμετρικά σημεία ένωσης, τοποθετημένα συμμετρικά ως προς το probe ρεύματος^[20]

Η πρότυπη διάμετρος κάθε LLA ορίζεται ως $D = 2\text{ m}$. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητο, όπως για παράδειγμα στη περίπτωση ενός μεγάλου εξοπλισμού υπό έλεγχο (EUT), η διάμετρος D μπορεί να αυξηθεί. Ωστόσο, στην περιοχή συχνοτήτων μέχρι 30 MHz, η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος είναι 4 μέτρα. Περαιτέρω αύξηση της διαμέτρου μπορεί να οδηγήσει σε μη αναπαράξιμο συντονισμό της απόκρισης της LLA στο άκρο των υψηλών συχνοτήτων της περιοχής μέτρησης.

Αξίζει να επισημανθεί ότι αυξάνοντας τη διάμετρο της LLA αυξάνεται και η ευαισθησία της στο θόρυβο του περιβάλλοντος αναλογικά με τη διάμετρο και η ευαισθησία της στα επιθυμητά σήματα αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της διαμέτρου.

Κάθε LLA διαθέτει δύο αντίθετα σημεία ένωσης, τοποθετημένα συμμετρικά ως προς το μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (current probe) (Σχήμα 3-3). Ένα τέτοιο σημείο ένωσης, κατασκευασμένο στον εξωτερικό αγωγό του ομοαξονικού καλωδίου της κεραίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-4, πρέπει να έχει πλάτος μικρότερο από 7mm. Στο σημείο ένωσης δημιουργείται γέφυρα αντιστάσεων από δύο παράλληλα σύνολα των 100 Ω που αποτελούνται από αντιστάσεις σε σειρά. Το κέντρο κάθε κυκλώματος σειράς είναι συνδεδεμένο στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού καλωδίου της κεραίας.

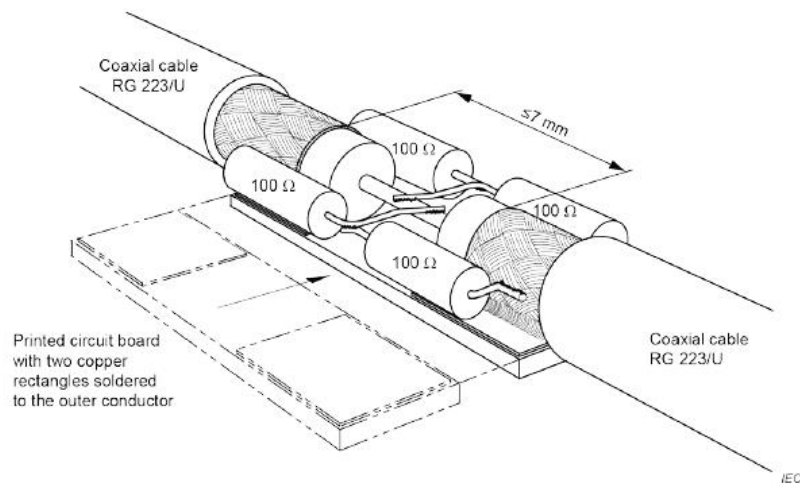


Σχήμα 3-3: Κατασκευή ενός LLA slit^[20]

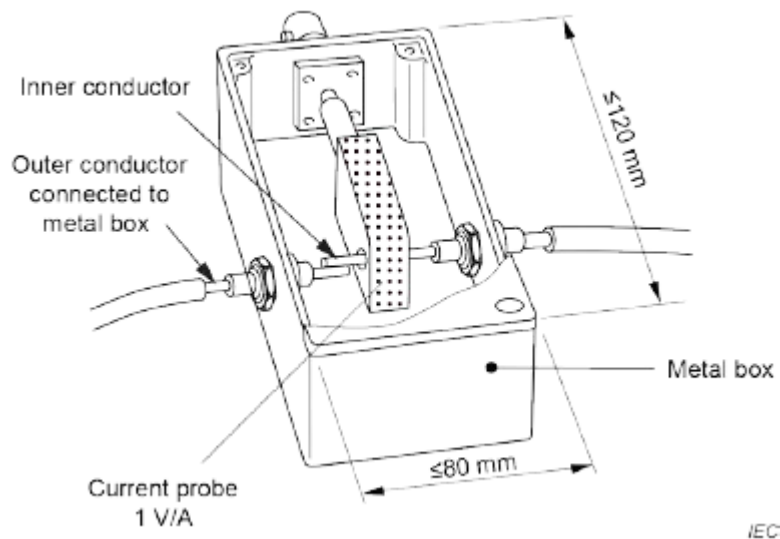
Σε κάθε πλευρά του slit, ο εξωτερικός αγωγός του ομοαξονικού καλωδίου της κεραίας μπορεί να ενωθεί σε ένα κομμάτι PCB (Printed Circuit Board) μέσω δύο χάλκινων ορθογωνίων, διαχωρισμένα τουλάχιστον κατά 5mm, για να αποκτήσει το slit μια άκαμπτη κατασκευή (Σχήμα 3-5).

Ο μετασχηματιστής έντασης ρεύματος γύρω από τον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού καλωδίου της LLA, πρέπει να έχει ευαισθησία 1 V/A στην περιοχή συχνοτήτων από 9 kHz έως 10 MHz. Επίσης, η απώλεια εισαγωγής (insertion loss) του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος θα πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλή.

Ο εξωτερικός αγωγός του καλωδίου της LLA πρέπει να ενωθεί με το μεταλλικό κουτί που περιέχει το probe ρεύματος (Σχήμα 3-6). Οι μέγιστες διαστάσεις αυτού του κουτιού είναι: 80 mm πλάτος, 120 mm μήκος και ύψος 80 mm.

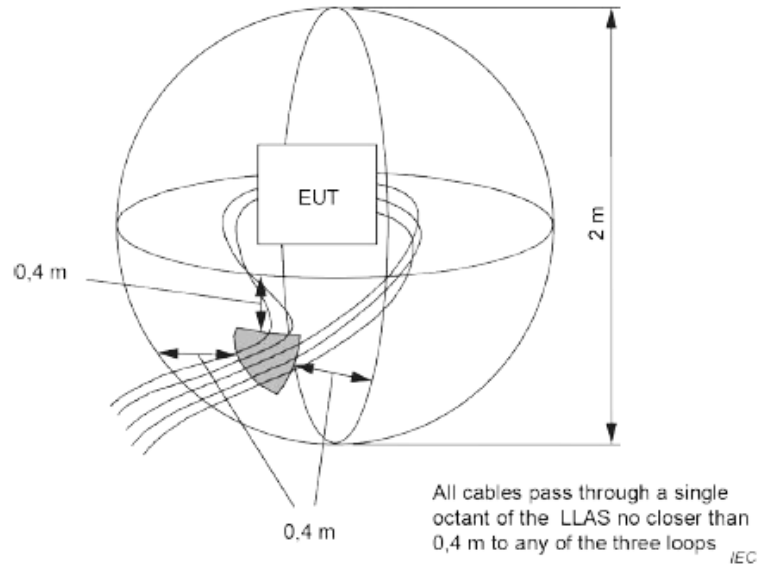


Σχήμα 3-4: Παράδειγμα ενός LLA slit με χρήση PCB για να αποκτήσει άκαμπτη κατασκευή^[20]



Σχήμα 3-5: Κατασκευή του μεταλλικού κουτιού που περιέχει τον αισθητήρα ρεύματος^[20]

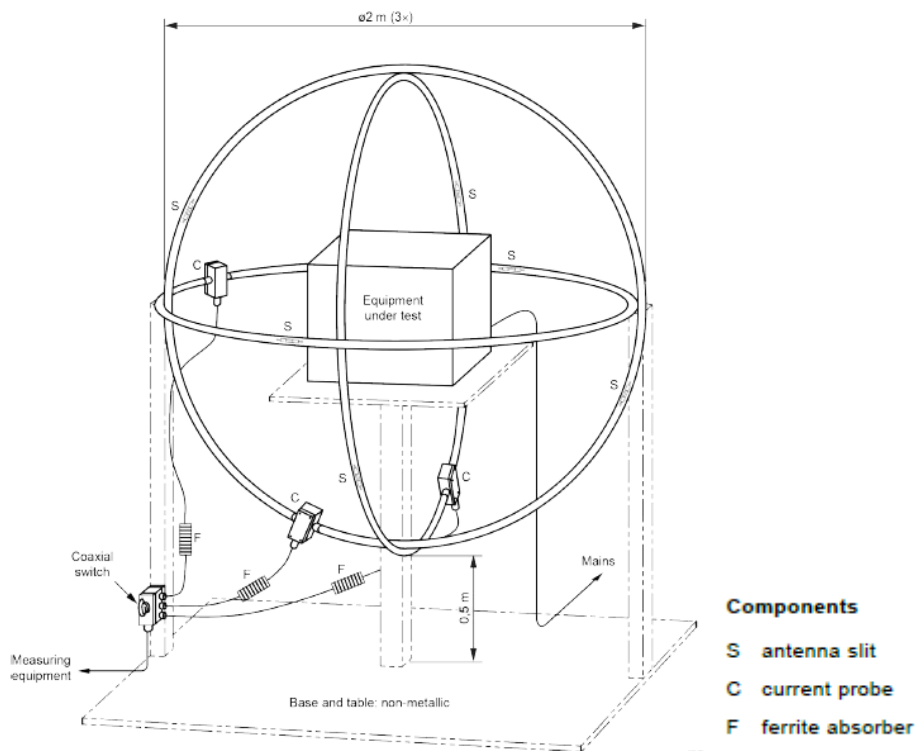
Για την αποφυγή της ανεπιθύμητης χωρητικής σύζευξης μεταξύ του δοκιμίου (EUT) και της LLA, η απόσταση μεταξύ του δοκιμίου και των στοιχείων κάθε LLA θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,10 φορές τη διάμετρο του βρόχου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις επαφές ενός δοκιμίου. Τα καλώδια πρέπει να δρομολογούνται μαζί και να αφήνουν τον όγκο του βρόχου από την ίδια περιοχή από τις οκτώ του LLAS, όχι λιγότερο από 0,4 m κοντά σε οποιοδήποτε LLA (Σχήμα 3-7).



Σχήμα 3-6: Παράδειγμα που δείχνει τη δρομολόγηση διαφόρων καλωδίων από ένα δοκίμιο για την ελαχιστοποίηση της χωρητικής σύζευξης από τις επαφές στο LLAS^[20]

3.5 Κατασκευή ενός συστήματος LLA (Large Loop Antenna System – LLAS)

Το LLAS (Σχήμα 3-7) αποτελείται από τρεις αμοιβαία κάθετες κεραίες μεγάλου βρόχου και στηρίζεται σε μια μη μεταλλική βάση.



Σχήμα 3-7: Το LLAS, το οποίο αποτελείται από τρεις αμοιβαία κάθετες Large Loop Antennas^[20]

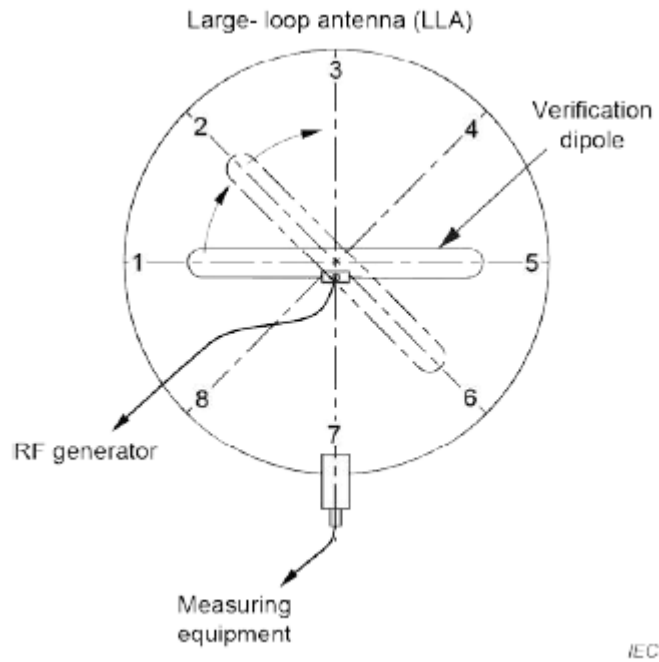
Ένα ομοαξονικό καλώδιο 50 Ω μεταξύ του probe ρεύματος κάθε LLA και του ομοαξονικού διακόπτη, και μεταξύ του διακόπτη αυτού και του εξοπλισμού μέτρησης, θα πρέπει να έχει επιφανειακή αντίσταση μεταφοράς μικρότερη από 10 mΩ/m στα 100 kHz και μικρότερη από 1 mΩ/m στα 10 MHz. Αυτή η απαίτηση ικανοποιείται όταν χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, ομοαξονικό καλώδιο διπλής θωράκισης RG-223/U.

Όλοι οι ακροδέκτες πρέπει να έχουν επιφανειακή αντίσταση μεταφοράς συγκρίσιμη με αυτή του ομοαξονικού καλωδίου. Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται για παράδειγμα όταν γίνεται χρήση ακροδεκτών BNC καλής ποιότητας. Επίσης, όλα τα καλώδια πρέπει να είναι εφοδιασμένα με απορροφητές από φερρίτη (ετικέτα F στο Σχήμα 3-7), παρέχοντας αντίσταση σειράς κοινού τρόπου (common mode) $R_s > 100 \Omega$ στα 10 MHz.

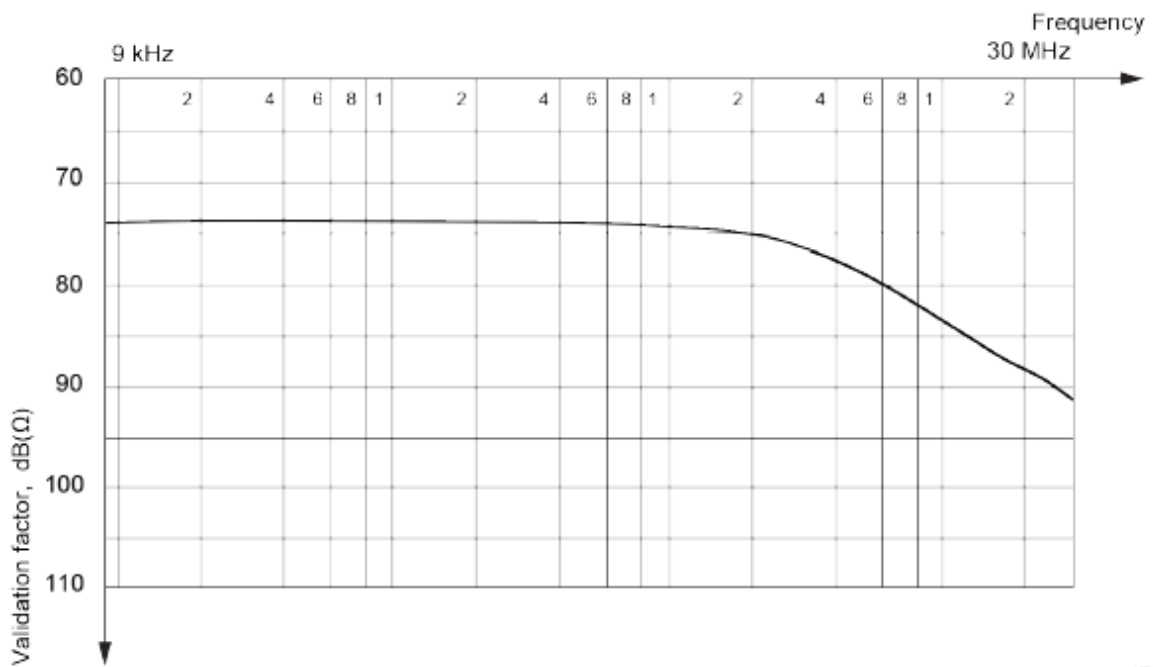
3.6 Διακρίβωση κεραίας μεγάλου βρόχου (LLA)

Η διακρίβωση και βαθμονόμηση κάθε LLA σε ένα LLAS πραγματοποιείται με τη μέτρηση του ρεύματος που προκαλείται εξ' επαγωγής στην LLA από το δίπολο επαλήθευσης συνδεδεμένο σε μια RF γεννήτρια 50 Ω. Το μαγνητικό πεδίο που εκπέμπεται από το δίπολο αυτό, επιτρέπει την επαλήθευση της ευαισθησίας μαγνητικού πεδίου μιας LLA. Το ηλεκτρικό πεδίο που εκπέμπεται από το δίπολο επαλήθευσης δείχνει ότι η ευαισθησία της LLA στο ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετά χαμηλή.

Το επαγόμενο ρεύμα μετράται ως συνάρτηση της συχνότητας στην περιοχή από 9 kHz έως 30 MHz στις οκτώ θέσεις του διπόλου επαλήθευσης του LLAS όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Κατά τη διάρκεια αυτής της μέτρησης, το δίπολο επαλήθευσης βρίσκεται στο επίπεδο της εκάστοτε LLA υπό δοκιμή. Σε κάθε μία από τις οκτώ θέσεις, ο συντελεστής επικύρωσης (validation factor) $[20 \lg(V_{go} / I_1)]$ εκφρασμένος σε dB(Ω) της τάσης ανοιχτού κυκλώματος της RF γεννήτριας (V_{go}) και του μετρούμενου ρεύματος (I_1), δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο από ± 2 dB από τον συντελεστή επικύρωσης που δίνεται στο Σχήμα 3-9. Ο συντελεστής επικύρωσης που δίνεται ισχύει για μία κυκλική LLA με την τυπική διάμετρο $D = 2m$.



Σχήμα 3-8: Οι οκτώ θέσεις του διπόλου επαλήθευσης του LLAS κατά την διακρίβωση μίας LLA^[20]



Σχήμα 3-9: Συντελεστής επικύρωσης για LLA διαμέτρου 2m^[20]

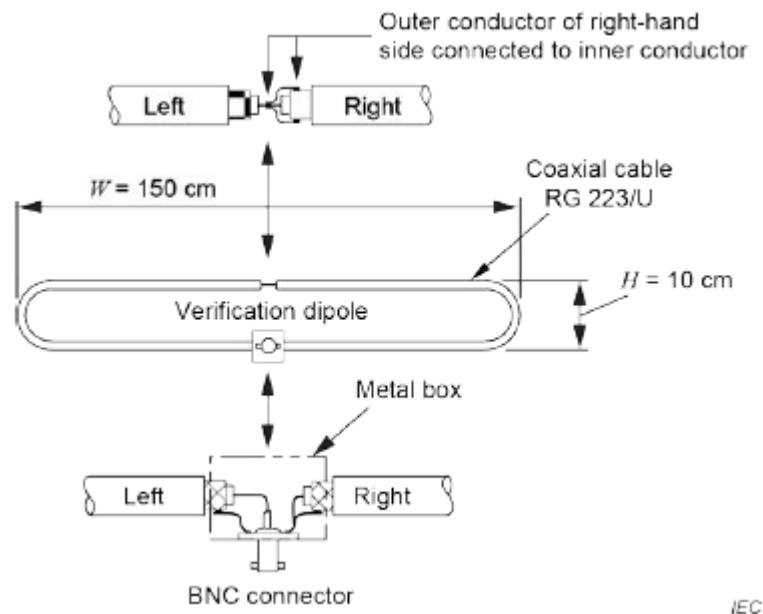
3.7 Κατασκευή του διπόλου επαλήθευσης του LLAS

Το δίπολο επαλήθευσης του LLAS, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-10, έχει σχεδιαστεί για να εκπέμπει ταυτόχρονα μια ένταση μαγνητικού πεδίου, H , η οποία πρόκειται να μετρηθεί από μια LLA, και μια ένταση ηλεκτρικού πεδίου, E , η οποία απορρίπτεται από μία LLA.

Το δίπολο επαλήθευσης του LLAS είναι κατασκευασμένο από ομοαξονικό καλώδιο RG-223 / U, πλάτους $W = 150 \text{ cm}$ και ύψους $H = 10 \text{ cm}$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-10.

Μια σχισμή στον εξωτερικό αγωγό του ομοαξονικού καλωδίου χωρίζει το δίπολο σε δύο μισά. Το μισό από αυτό το δίπολο, το εκ τα δεξιά μισό στο Σχήμα 3-10, βραχυκυκλώνεται κοντά στη σχισμή καθώς και κοντά στον σύνδεσμο. Βραχυκύκλωμα σημαίνει ότι ο εσωτερικός και ο εξωτερικός αγωγός του ομοαξονικού καλωδίου συνδέονται ηλεκτρικά. Αυτό το μισό του διπόλου είναι συνδεδεμένο με τη γείωση αναφοράς του BNC ακροδέκτη. Ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού καλώδιου, που σχηματίζει το αριστερό μισό του διπόλου στο Σχήμα 3-10, συνδέεται με το κεντρικό pin του ακροδέκτη BNC και ο εξωτερικός του αγωγός στη γείωση αναφοράς αυτού του ακροδέκτη BNC.

Χρησιμοποιείται ένα μικρό μεταλλικό κουτί ως περίβλημα των συνδέσεων κοντά στο βύσμα BNC. Ο εξωτερικός αγωγός των δύο μερών του ομοαξονικού καλωδίου και η γείωση αναφοράς του BNC συνδέονται σε αυτό το κουτί. Για να αποκτήσει μια άκαμπτη κατασκευή, το δίπολο υποστηρίζεται από μία μη αγώγιμη βάση.



Σχήμα 3-10: Κατασκευή του διπόλου επαλήθευσης του LLAS^[20]

Κεφάλαιο 4: Διαδικασία διακρίβωσης του LLAS σύμφωνα με το πρότυπο IEC CISPR 16-1-4

4.1 Εξοπλισμός

Για τη διακρίβωση σύμφωνα με το πρότυπο IEC CISPR 16-1-4 [20] χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

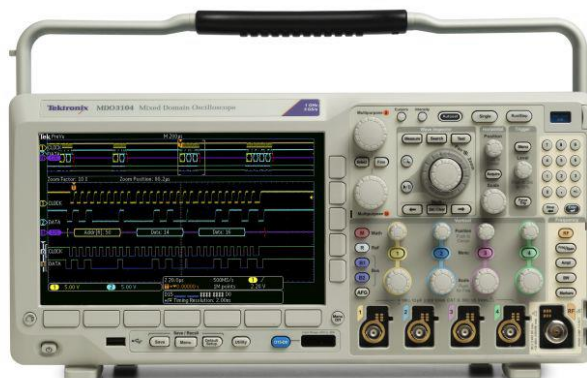
- Γεννήτρια Rohde & Schwarz SMB 100A Microwave Signal Generator



Εικόνα 4-1: Γεννήτρια Rohde & Schwarz SMB 100A

Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [21]:

- Εύρος συχνοτήτων: 9 kHz έως 6 GHz
 - Μέγιστη ισχύ εξόδου: +27 dBm
 - SSB (Single Side Band) phase noise: - 128 dBo (στα 1 GHz, με 20kHz offset)
 - Διαμόρφωση: AM / FM / φM / PM
- Παλμογράφος Tektronix MDO 3054 Mixed Domain Oscilloscope



Εικόνα 4-2: Παλμογράφος Tektronix MDO 3054

- Λειτουργία ως Spectrum Analyzer με εύρος συχνοτήτων [22]:
- Standard: 9 kHz - oscilloscope bandwidth
- Optional: 9 kHz - 3 GHz

- Διάταξη Large Loop Antenna System



Εικόνα 4-3: Διάταξη Large Loop Antenna System

- Δίπολο επαλήθευσης Large Loop Antenna Chase London SW14 7LY Serial No. 1021

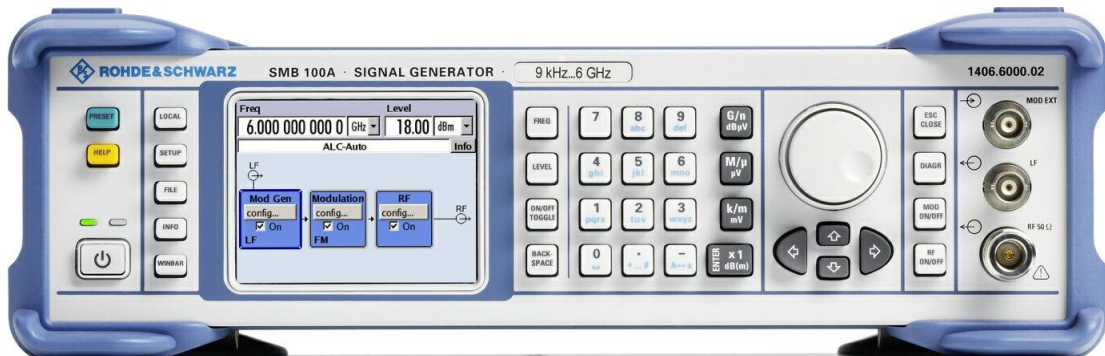


Εικόνα 4-4: Δίπολο επαλήθευσης Large Loop Antenna

- Laptop
- Λογισμικό National Instruments LabVIEW 2017

4.2 Ρυθμίσεις γεννήτριας

Η πρόσοψη της γεννήτριας Rohde & Schwarz SMB 100A Microwave Signal Generator είναι η ακόλουθη [23]:



Εικόνα 4-5: Γεννήτρια Rohde & Schwarz SMB 100A Microwave Signal Generator

1. Πλήκτρα λειτουργιών



Εικόνα 4-6: Πλήκτρα λειτουργιών

Τα πλήκτρα στα αριστερά της οθόνης αναγκάζουν τη γεννήτρια να επιστρέψει σε μια συγκεκριμένη κατάσταση του οργάνου και να παρέχει πληροφορίες σχετικά με το όργανο και τη βοήθεια.

- PRESET: Θέτει τη γεννήτρια σε μία καθορισμένη κατάσταση.
- LOCAL: Αλλάζει από τον απομακρυσμένο έλεγχο στον τοπικό (χειροκίνητο) έλεγχο.
- FILE: Ενεργοποιεί το menu για αποθήκευση ή φόρτωση αρχείων.
- INFO: Εμφανίζει μηνύματα κατάστασης, μηνύματα σφαλμάτων και προειδοποιήσεις.

- WINBAR: Κάνει εναλλαγή μεταξύ του διαγράμματος και των ενεργών menus.
- HELP: Εμφανίζει κείμενο βοήθειας.

2. Πλήκτρα ρύθμισης παραμέτρων



Εικόνα 4-7: Πλήκτρα ρύθμισης παραμέτρων

Αυτά τα πλήκτρα παρέχουν άμεση πρόσβαση στις ρυθμίσεις στην κεφαλίδα της οθόνης του οργάνου για τη γρήγορη ρύθμιση του σήματος RF.

- FREQ: Ενεργοποιεί την εισαγωγή συχνότητας.
- LEVEL: Ενεργοποιεί την εισαγωγή επιπέδου.
- ON/OFF TOGGLE:
 - I. Ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τα επισημασμένα στοιχεία ή ένα μπλοκ λειτουργιών.
 - II. Εναλλαγή μεταξύ δύο ή περισσότερων ρυθμίσεων, π.χ. στοιχεία των λιστών επιλογής. Στο τέλος, ο δρομέας ρυθμίζεται πάλι στην πρώτη εγγραφή.
- BACKSPACE: Διαγράφει το χαρακτήρα στα αριστερά του δρομέα.

3. Πλήκτρα οθόνης



Εικόνα 4-8: Πλήκτρα οθόνης

Τα πλήκτρα που βρίσκονται δεξιά από το περιστροφικό κουμπί ρυθμίζουν διάφορα παράθυρα στην οθόνη και ενεργοποιούν και απενεργοποιούν το σήμα RF και τη διαμόρφωση.

- **DIAGRAM:** Φέρνει το μπλοκ διάγραμμα στο προσκήνιο. Τα ενεργά μενού ελαχιστοποιούνται.
- **ESC:** Η λειτουργία αυτού του πλήκτρου εξαρτάται από την τρέχουσα θέση δρομέα.
 - Καλεί το επόμενο υψηλότερο πεδίο επιλογής.
 - Κλείνει το ανοικτό παράθυρο χωρίς να δέχεται νέες καταχωρήσεις. Διατηρεί την παλιά τιμή ή παράμετρο.
 - Στα κουτιά διαλόγου που περιέχουν κουμπί "Ακύρωση", ενεργοποιεί αυτό το κουμπί.
 - Κλείνει όλα τα είδη πλαισίων διαλόγου, εάν η λειτουργία επεξεργασίας δεν είναι ενεργή.
 - Κλείνει τη λειτουργία επεξεργασίας, εάν είναι ενεργή η λειτουργία αυτή.
 - Εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών πεδίων εισαγωγής ενός μενού.
 - Αλλαγή του δρομέα εισαγωγής από την οθόνη κεφαλίδας στο προηγούμενο ενεργό μενού ή στο προηγουμένως επισημασμένο μπλοκ στο μπλοκ διάγραμμα, εάν δεν υπάρχει ενεργό μενού.
- **MOD ON/OFF:** Ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τις διαμορφώσεις. Η ένδειξη "MOD OFF" εμφανίζεται στη γραμμή πληροφοριών της κεφαλίδας δίπλα στο πεδίο "Level".
- **RF ON/OFF:** Ενεργοποιεί και απενεργοποιεί το σήμα RF. Η ένδειξη "RF OFF" εμφανίζεται στην κεφαλίδα δίπλα στο πεδίο "Frequency".

4. Συνδέσεις στην πρόσοψη της γεννήτριας

Οι υποδοχές εξόδου RF και LF καθώς και μία υποδοχή για εξωτερικά σήματα διαμόρφωσης βρίσκονται στο μπροστινό μέρος της γεννήτριας.

- **MOD EXT:** Είσοδος για σήματα εξωτερικής διαμόρφωσης.



Εικόνα 4-9: Είσοδος για σήματα εξωτερικής διαμόρφωσης

- LF: Έξοδος για σήμα εσωτερικής LF διαμόρφωσης.



Εικόνα 4-10: Έξοδος για σήμα εσωτερικής LF διαμόρφωσης

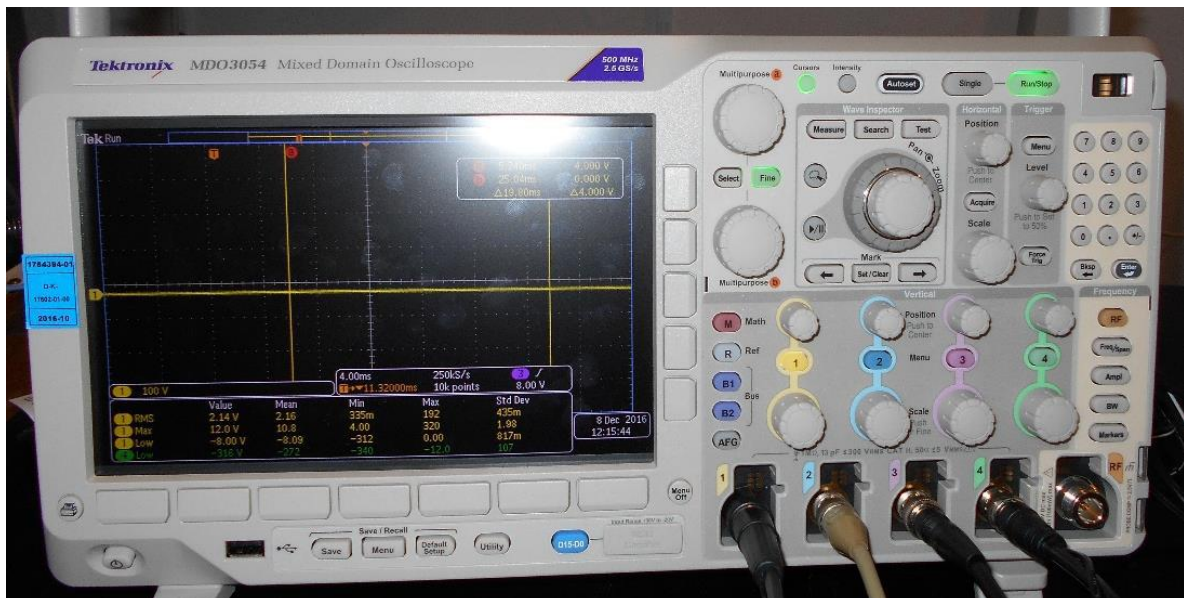
- RF 50 Ohm: Έξοδος για RF σήμα.



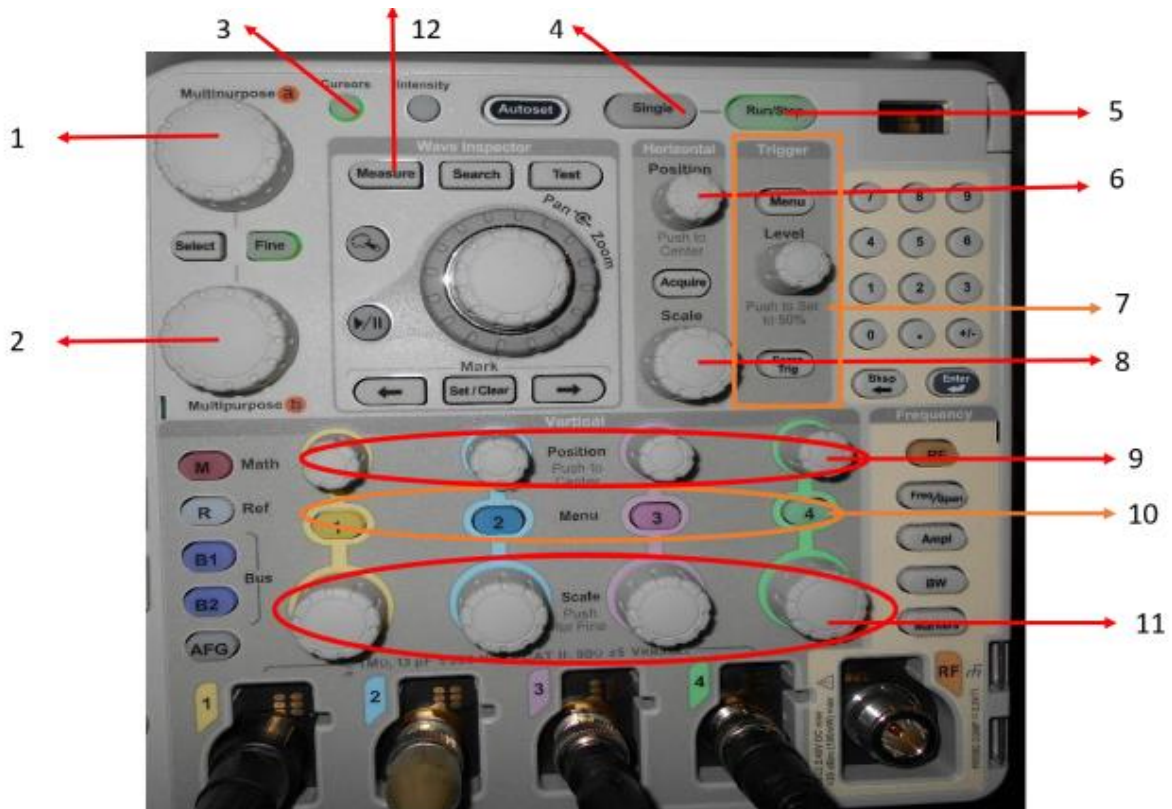
Εικόνα 4-11: Έξοδος για RF σήμα

4.3 Ρυθμίσεις παλμογράφου

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο MDO 3054 (Mixed Domain Oscilloscope) της Tektronix και διαθέτει τα ακόλουθα πλήκτρα [24]:



Εικόνα 4-12: Παλμογράφος Tektronix MDO 3054



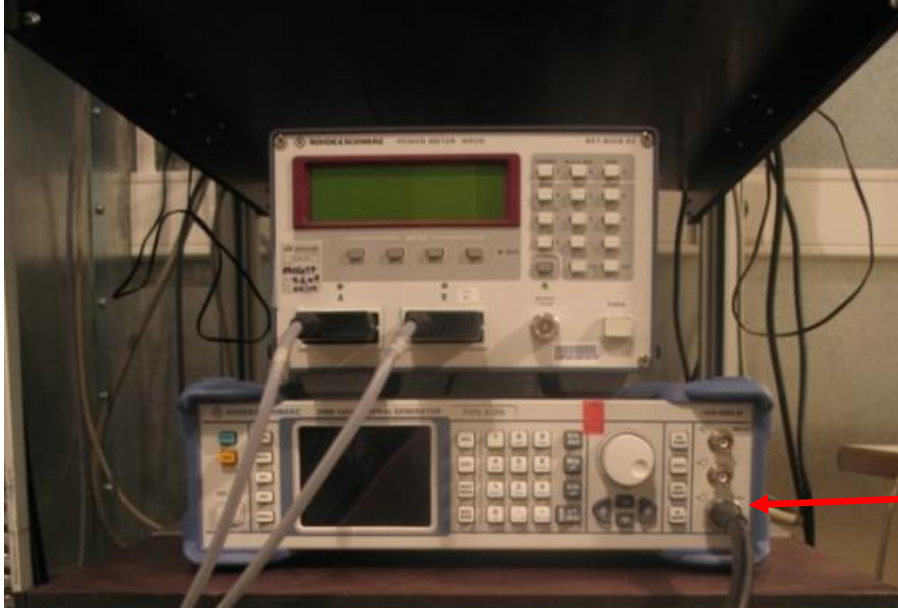
Εικόνα 4-13: Πλήκτρα παλμογράφου Tektronix MDO 3054

Η χρήση των αριθμημένων κομβίων στο πληκτρολόγιο του παλμογράφου της παραπάνω εικόνας είναι η ακόλουθη:

- 1) Κομβίο multipurpose a.
- 2) Κομβίο multipurpose b.
- 3) Κομβίο εμφάνιση κερσόρων.
- 4) Κομβίο single για την απεικόνιση ενός στιγμιότυπου.
- 5) Κομβίο για συνεχόμενη απεικόνιση των εισόδων των καναλιών.
- 6) Κομβίο ρύθμισης της θέσης της απεικόνισης ως προς το χρόνο (μετακίνηση της κυματομορφής αριστερά - δεξιά).
- 7) Μενού ρύθμισης του εξωτερικού σκανδαλισμού (external trigger).
- 8) Κομβίο ρύθμισης της κλίμακας του χρόνου (sec/div).
- 9) Κομβία ρύθμισης της θέση της απεικόνισης του κάθε καναλιού ως προς το μέγεθος που απεικονίζει (μετακίνηση της κυματομορφής πάνω - κάτω).
- 10) Κομβία επιλογής και εμφάνισης καναλιού.
- 11) Κομβία ρύθμισης της κλίμακας του απεικονιζόμενου μεγέθους των καναλιών (Volt/div).
- 12) Κομβίο measure.
- 13) Συνδέσεις στην πρόσοψη του παλμογράφου:
 - 1,2,3,4 : Αναλογικά κανάλια εισόδου.
 - RF : Ειδική είσοδος RF με τύπου N-connector.

4.4 Συνδεσμολογία δοκιμής

1. Στην έξοδο RF της γεννήτριας Rohde & Schwarz SMB 100A συνδέεται ομοαξονικό καλώδιο αντίστασης 50 Ω του οποίου η άλλη άκρη συνδέεται στο δίπολο επαλήθευσης της LLA.

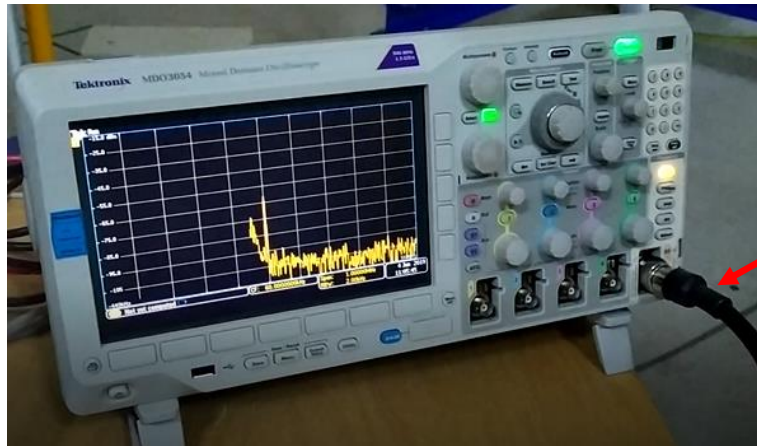


Εικόνα 4-14: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στην έξοδο RF της γεννήτριας

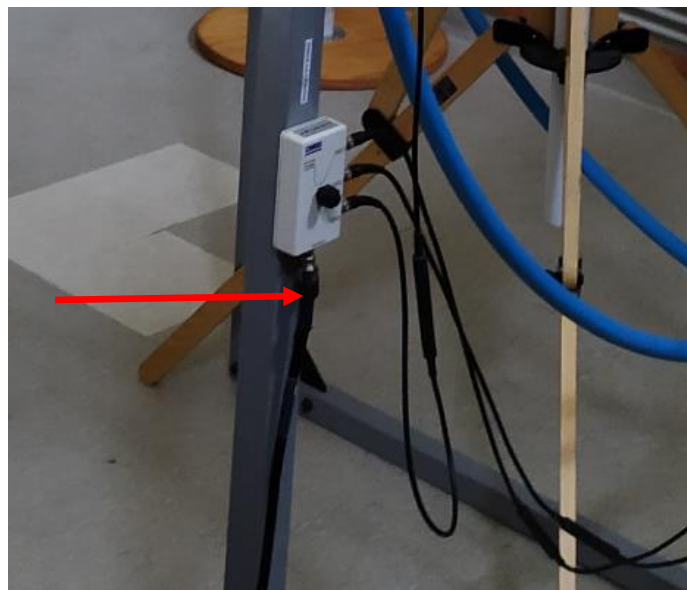


Εικόνα 4-15: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στο δίπολο επαλήθευσης της LLA

2. Η είσοδο RF του παλμογράφου Tektronix MDO 3054 συνδέεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω με τον ομοαξονικό διακόπτη του Large Loop Antenna System (LLAS).



Εικόνα 4-16: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στην είσοδο RF του παλμογράφου

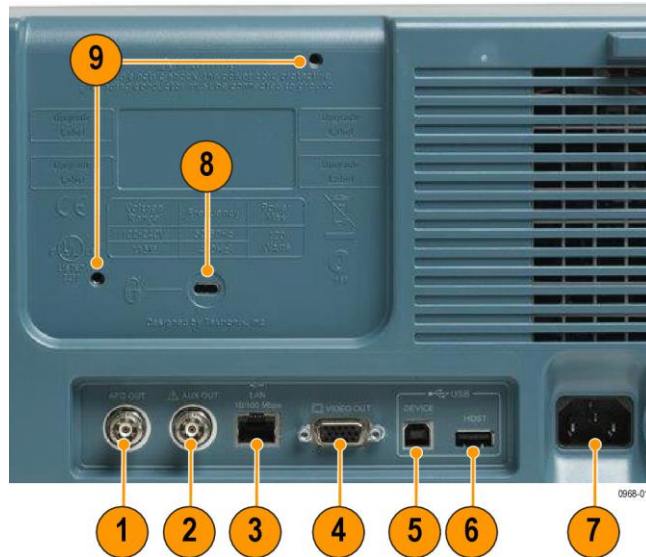


Εικόνα 4-17: Σύνδεση ομοαξονικού καλωδίου 50 Ω στον ομοαξονικό διακόπτη του LLAS

3. Η γεννήτρια Rohde & Schwarz SMB 100A και ο παλμογράφος Tektronix MDO 3054 συνδέονται μέσω των θυρών τους LAN με καλώδιο Ethernet σε ένα Hub και από εκεί στη αντίστοιχη θύρα του Laptop με σκοπό την επικοινωνία τους (απομακρυσμένο χειρισμό και επιστροφή αποτελεσμάτων) με αυτό.



Εικόνα 4-18: Θύρα LAN γεννήτριας



Εικόνα 4-19: Θύρα LAN παλμογράφου (3)

4.5 Πρόγραμμα LabVIEW

Το πρόγραμμα Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) είναι μια πλατφόρμα σχεδιασμού συστήματος και περιβάλλον ανάπτυξης για μια οπτική γλώσσα προγραμματισμού από την National Instruments [25]. Η γραφική γλώσσα ονομάζεται "G" ωστόσο δεν πρέπει να συγχέεται με τον κώδικα G. Το LabVIEW αρχικά κυκλοφόρησε για Apple Macintosh το 1986, και χρησιμοποιείται συνήθως για την απόκτηση δεδομένων, τον έλεγχο οργάνων και τον βιομηχανικό αυτοματισμό σε διάφορα λειτουργικά συστήματα (OSs), συμπεριλαμβανομένων των Microsoft Windows, διάφορες εκδόσεις Unix, Linux και macOS.

Η ροή εκτέλεσης καθορίζεται από τη δομή ενός γραφικού μπλοκ διαγράμματος (ο πηγαίος κώδικας LabVIEW) στον οποίο ο προγραμματιστής συνδέει διάφορους κόμβους λειτουργίας με καλώδια. Αυτά τα καλώδια μεταδίδουν μεταβλητές και οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να εκτελεστεί μόλις καταστούν διαθέσιμα όλα τα δεδομένα εισόδου. Δεδομένου ότι αυτό μπορεί να συμβαίνει για πολλαπλούς κόμβους ταυτόχρονα, το LabVIEW μπορεί να εκτελεστεί παράλληλα [26]. Το υλικό πολλαπλής επεξεργασίας και πολλαπλών νημάτων εκμεταλλεύεται αυτόματα τον ενσωματωμένο προγραμματιστή, ο οποίος πολλαπλασιάζει πολλαπλά στρώματα OS πάνω από τους κόμβους οι οποίοι είναι έτοιμοι για εκτέλεση.

Το LabVIEW ενσωματώνει τη δημιουργία διεπαφών χρήστη (που ονομάζονται μπροστινά πλαίσια) στον κύκλο ανάπτυξης. Τα προγράμματα-υπορουτίνες ονομάζονται εικονικά όργανα (VIs – Virtual instruments). Κάθε VI διαθέτει τρία στοιχεία: ένα μπλοκ διάγραμμα (block diagram), έναν μπροστινό πίνακα (front panel) και ένα παράθυρο σύνδεσης (connector

pane). Το τελευταίο χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύει το VI στα μπλοκ διαγράμματα άλλων VIs που καλούνται. Ο μπροστινός πίνακας κατασκευάζεται με συστήματα ελέγχου και δείκτες. Οι έλεγχοι είναι εισόδοι: επιτρέπουν σε έναν χρήστη να παρέχει πληροφορίες στο VI. Οι δείκτες είναι έξοδοι: υποδηλώνουν ή εμφανίζουν τα αποτελέσματα με βάση τις εισόδους που δίδονται στο VI. Το πίσω πλαίσιο, το οποίο είναι ένα μπλοκ διάγραμμα, περιέχει τον γραφικό πηγαίο κώδικα. Όλα τα αντικείμενα που τοποθετούνται στον μπροστινό πίνακα θα εμφανιστούν στο πίσω πλαίσιο ως τερματικά. Ο πίσω πίνακας περιλαμβάνει επίσης δομές και λειτουργίες οι οποίες εκτελούν διαδικασίες στους ελέγχους και παρέχουν δεδομένα στους δείκτες. Οι δομές και οι λειτουργίες βρίσκονται στην παλέτα λειτουργιών και μπορούν να τοποθετηθούν στον πίσω πίνακα. Οι συλλογικοί έλεγχοι, οι δείκτες, οι δομές και οι λειτουργίες αναφέρονται ως κόμβοι. Οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια, π.χ. δύο έλεγχοι και ένας δείκτης μπορούν να συνδεθούν με τη λειτουργία προσθήκης έτσι ώστε η ένδειξη να εμφανίζει το άθροισμα των δύο ελέγχων. Έτσι, ένα εικονικό όργανο μπορεί να εκτελεστεί είτε ως πρόγραμμα, με τον μπροστινό πίνακα να χρησιμεύει ως διεπαφή χρήστη, είτε όταν τοποθετείται ως κόμβος στο μπλοκ διάγραμμα, ο μπροστινός πίνακας ορίζει τις εισόδους και εξόδους του κόμβου μέσω του παραθύρου σύνδεσης. Αυτό συνεπάγεται ότι κάθε VI μπορεί εύκολα να δοκιμαστεί προτού ενσωματωθεί ως υπορουτίνα σε ένα μεγαλύτερο πρόγραμμα.

Η γραφική προσέγγιση επιτρέπει επίσης στους μη προγραμματιστές να δημιουργήσουν προγράμματα σέρνοντας και αποθέτοντας εικονικές αναπαραστάσεις του εργαστηριακού εξοπλισμού με τον οποίο είναι ήδη εξοικειωμένοι. Το περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW, με τα παραδείγματα και την τεκμηρίωση που περιλαμβάνονται, καθιστά απλή τη δημιουργία μικρών εφαρμογών. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα από τη μια πλευρά, αλλά υπάρχει επίσης ο κίνδυνος να υποτιμηθεί η εμπειρία που απαιτείται για τον προγραμματισμό G υψηλής ποιότητας. Για σύνθετους αλγορίθμους ή κώδικα μεγάλης κλίμακας, είναι σημαντικό ο προγραμματιστής να διαθέτει εκτεταμένη γνώση της ειδικής σύνταξης του περιβάλλοντος προγραμματισμού LabVIEW και της τοπολογίας της διαχείρισης μνήμης του. Τα πιο εξελιγμένα συστήματα ανάπτυξης LabVIEW προσφέρουν τη δυνατότητα δημιουργίας αυτόνομων εφαρμογών. Επιπλέον, είναι δυνατή η δημιουργία καταναμημένων εφαρμογών, οι οποίες επικοινωνούν με ένα μοντέλο πελάτη-εξυπηρετητή και έτσι είναι ευκολότερο να εφαρμοστούν λόγω της εγγενώς παράλληλης φύσης της γραφικής γλώσσας G.

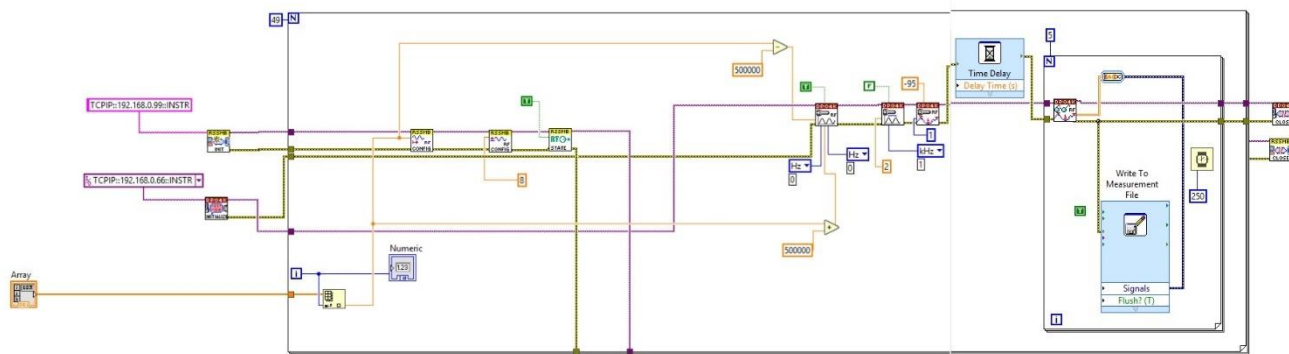
4.6 Προγράμματα οδήγησης οργάνων

Στο LabVIEW, ένα πρόγραμμα οδήγησης οργάνου είναι ένα σύνολο VIs που επικοινωνεί με το όργανο. Κάθε VI αντιστοιχεί σε μια προγραμματική λειτουργία, όπως η διαμόρφωση, η ανάγνωση, η εγγραφή και η ενεργοποίηση ενός οργάνου. Τα προγράμματα οδήγησης των οργάνων για το LabVIEW απλοποιούν τον έλεγχο οργάνων και μειώνουν τον χρόνο ανάπτυξης του προγράμματος δοκιμών, εξαλείφοντας την ανάγκη για γνώση των σύνθετων εντολών προγραμματισμού χαμηλού επιπέδου για κάθε όργανο.

Συνεπώς, έχοντας διαθέσιμα τα προγράμματα οδήγησης για το LabVIEW της γεννήτριας Rohde & Schwarz SMB 100A και του παλμογράφου Tektronix MDO 3054 είναι δυνατός ο απομακρυσμένος χειρισμός τους και η επιστροφή των τιμών των μεγεθών που καταγράφουν. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW το οποίο αναλύεται στη συνέχεια.

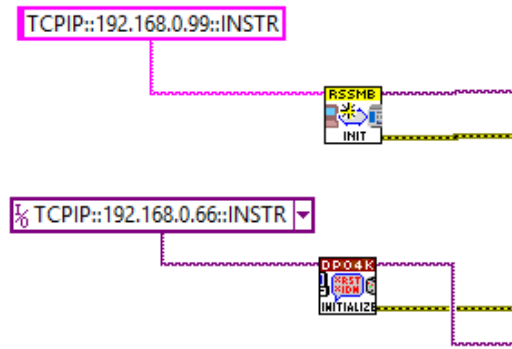
4.7 Ανάλυση προγράμματος διακρίβωσης του LLAS σε LabVIEW

Για τον απομακρυσμένο έλεγχο των οργάνων και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών που απαιτούνται για την λήψη των απαραίτητων μετρήσεων μέσω της γεννήτριας και του παλμογράφου με τελικό σκοπό τη διακρίβωση του Large Loop Antenna System (LLAS), αναπτύχθηκε το ακόλουθο πρόγραμμα:



Εικόνα 4-20: Πρόγραμμα σε LabVIEW

Αρχικά, γίνεται αρχικοποίηση (initialize) της γεννήτριας και του παλμογράφου μέσω των αντίστοιχων εντολών, καθώς και ορίζεται ως σταθερά η διεύθυνση IP για το κάθε όργανο στο δίκτυο που έχει δημιουργηθεί μεταξύ αυτών και του υπολογιστή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-21.

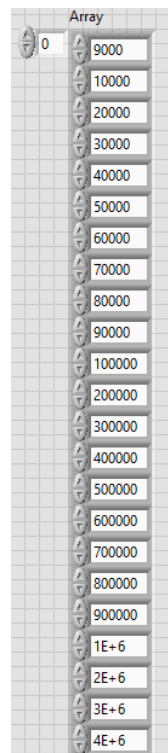


Εικόνα 4-21: Αρχικοποίηση και απόδοση διευθύνσεων οργάνων

Επίσης, εισάγεται στο πρόγραμμα ένας πίνακας στον οποίο έχουν καταχωρηθεί συγκεκριμένες τιμές συχνοτήτων οι οποίες εισάγονται ως είσοδος στη γεννήτρια (Εικόνα 4-22 και Εικόνα 4-23). Οι τιμές αυτές ορίζονται με βάση την διαδικασία διακρίβωσης του συστήματος των κεραιών μεγάλου βρόγχου και παίρνουν τιμές από 9 kHz έως 30 MHz αυξανόμενες λογαριθμικά. Συνεπώς, ορίζονται 49 τιμές.



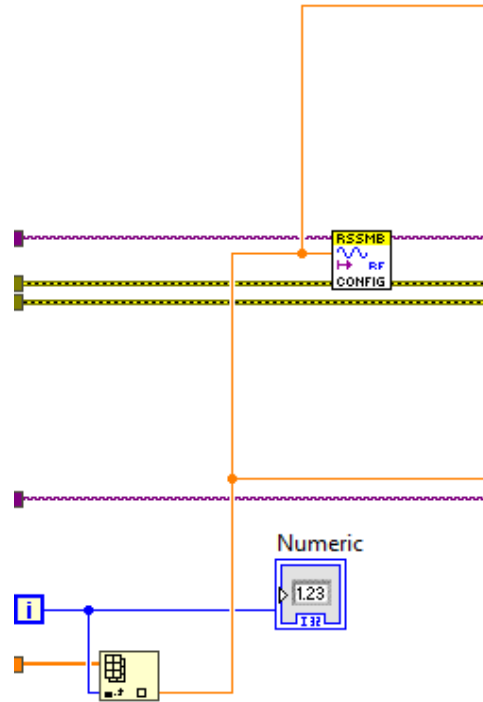
Εικόνα 4-22: Πίνακας τιμών συχνοτήτων γεννήτριας στο μπλοκ διάγραμμα (Block Diagram)



Εικόνα 4-23: Πίνακας τιμών συχνοτήτων γεννήτριας στον μπροστινό πίνακα (Front Panel) (οι τιμές φτάνουν έως 30E+6)

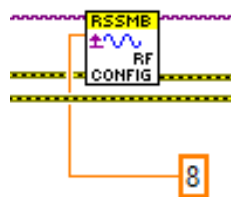
Στη συνέχεια, κατασκευάζεται μια επαναληπτική δομή For για την εκτέλεση 49 επαναλήψεων, μία επανάληψη για κάθε τιμή συχνότητας. Μέσα στο βρόχο, αρχικά, δίνονται οι εντολές για τις κατάλληλες ρυθμίσεις της γεννήτριας Rohde & Schwarz SMB 100A:

1. Εισαγωγή κεντρικής συχνότητας από τον πίνακα τιμών συχνοτήτων



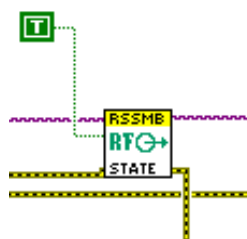
Εικόνα 4-24: Εισαγωγή κεντρικής συχνότητας

2. Ορίζεται σταθερό το επίπεδο του σήματος RF της γεννήτριας στην τιμή 8 dBm ($8 + 107 = 115$ dBμV).



Εικόνα 4-25: Ορισμός σταθερού επιπέδου σήματος RF.

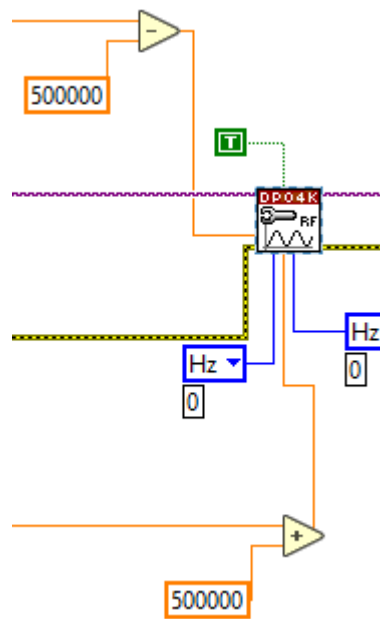
3. Ενεργοποιείται το RF σήμα εξόδου της γεννήτριας.



Εικόνα 4-26: Ενεργοποίηση RF σήματος εξόδου της γεννήτριας

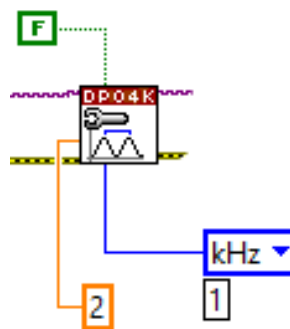
Έπειτα, μέσα στο βρόχο δίνονται οι εντολές και οι παράμετροι που απαιτούνται για την μέτρηση των μεγεθών που χρειάζονται να υπολογισθούν από τον παλμογράφο Tektronix MDO 3054 για την διαδικασία της διακρίβωσης των κεραιών μεγάλου βρόχου.

1. Ρυθμίζεται το κανάλι RF. Ορίζεται το εύρος συχνοτήτων για την ανάλυση του φάσματος στα 100 kHz θέτοντας ως αρχική συχνότητα τη κεντρική συχνότητα της γεννήτριας αφαιρώντας 50 kHz και ως τελική συχνότητα τη κεντρική συχνότητα της γεννήτριας προσθέτοντας 50 kHz, καθώς επίσης ενεργοποιείται η αυτόματη ανίχνευση σήματος RF.



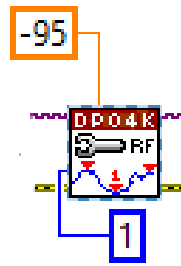
Εικόνα 4-27: Ρύθμιση καναλιού RF

2. Διαμόρφωση ανάλυσης εύρους ζώνης συχνοτήτων του RF καναλιού στη σταθερή τιμή των 2 kHz, καθώς και απενεργοποίηση της αυτόματης ανάλυσης.



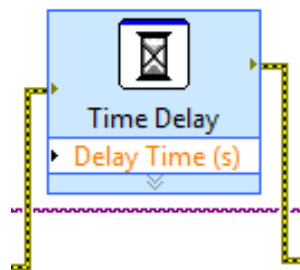
Εικόνα 4-28: Διαμόρφωση ανάλυσης εύρους ζώνης

3. Διαμόρφωση δεικτών του RF καναλιού. Ορίζεται το πλήθος δεικτών μεγίστων σε έναν και το κατώφλι μεγίστου στα -95 dBm.



Εικόνα 4-29: Διαμόρφωση δεικτών RF καναλιού

Μετά την ρύθμιση των παραμέτρων του παλμογράφου, εισάγεται μία χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 5 δευτερολέπτων. Η καθυστέρηση αυτή εισάγεται με στόχο να προσφέρει στον παλμογράφο το χρονικό περιθώριο για τον υπολογισμό των μετρούμενων μεγεθών.



Εικόνα 4-30: Εισαγωγή χρονικής καθυστέρησης

Ύστερα, δημιουργείται ένας εμφωλευμένος επαναληπτικός βρόχος με τη δομή For μέσα στον αρχικό βρόχο For. Αυτή η επαναληπτική δομή των 5 επαναλήψεων εισάγεται για την καταγραφή πέντε τιμών σε κάθε επίπεδο συχνοτήτων. Αρχικά υπάρχει η εντολή για ανάγνωση των τιμών που καταγράφουν οι δείκτες του παλμογράφου και στη συνέχεια η εντολή για αποθήκευση των τιμών αυτών σε αρχείο με καθορισμένη διεύθυνση και όνομα. Πριν την εκτέλεση της επόμενης επανάληψης, εισάγεται μία χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 250 χιλιοστών του δευτερολέπτου (ms) με σκοπό να καταγραφεί διαφορετική τιμή από τον παλμογράφο.

4.9 Επεξεργασία μετρήσεων

Για κάθε μία εκ των τριών κεραιών μεγάλου βρόχου (Large Loop Antenna) του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου (Large Loop Antenna System) εκτελούμε το πρόγραμμα σε LabVIEW οκτώ φορές, μία για κάθε θέση του διπόλου επαλήθευσης. Σε κάθε μία συχνότητα από 9 kHz έως 30 MHz, πραγματοποιούνται πέντε καταγραφές της ισχύος του σήματος στην εκάστοτε κεραία μεγάλου βρόχου σε μονάδες dBm και προσθέτοντας την τιμή 73, διότι η συνδεσμολογία πραγματοποιείται με καλώδια εσωτερικής αντίστασης 50 Ohm, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή σε dBμA. Στη συνέχεια, από αυτές τις πέντε τιμές υπολογίστηκε η μέση τιμή σε dBμA και η τυπική απόκλιση. Το επίπεδο του σήματος της γεννήτριας είναι 8 dBm. Η μετατροπή του σε dBμV γίνεται με την πρόσθεση της τιμής 107, συνεπώς το επίπεδο αυτό αντιστοιχεί σε 115 dBμV. Για τον υπολογισμό του συντελεστή επικύρωσης (validation factor) σε dBΩ για κάθε συχνότητα, αφαιρείται από την σταθερή τιμή του επιπέδου του σήματος της γεννήτριας 115 dBμV η αντίστοιχη μέση τιμή σε dBμA, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{dB}\Omega = \text{dB}\mu\text{V} - \text{dB}\mu\text{A}$$

Επίσης, σύμφωνα με την γραφική παράσταση του συντελεστή επικύρωσης του Σχήματος 3-9, υπολογίζεται ο συντελεστής διόρθωσης της κάθε μίας κεραιάς μεγάλου βρόχου εκ των τριών, για την συγκεκριμένη συχνότητα και θέση του διπόλου επαλήθευσης.

Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε μία κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης, για όλες τις συχνότητες.

1^η Κεραία

180°				
Συχνότητα [MHz]	Μέση τιμή ρεύματος [dBμA]	Τυπική απόκλιση ρεύματος [dBμA]	Συντελεστής επικύρωσης [dBΩ]	Συντελεστής διόρθωσης [dBΩ]
0.009	11.1307412	0.608011404	103.8692588	-29.72625218
0.01	11.03237	0.267778124	103.96763	-29.79962213
0.02	11.4310074	0.127406636	103.5689926	-29.59572381
0.03	11.4317904	0.070955323	103.5682096	-29.59494081
0.04	11.5340342	0.060256457	103.4659658	-29.55761004
0.05	11.5473612	0.030944839	103.4526388	-29.47937001
0.06	11.5470658	0.046856986	103.4529342	-29.47966541

0.07	11.5879426	0.025309431	103.4120574	-29.43878861
0.08	11.6031822	0.052024205	103.3968178	-29.35863598
0.09	11.5483262	0.044503672	103.4516738	-29.41349198
0.1	11.628309	0.023350726	103.371691	-29.33350918
0.2	11.5054848	0.030800704	103.4945152	-29.45633338
0.3	11.5889504	0.068415654	103.4110496	-29.24304173
0.4	11.6848878	0.05751562	103.3151122	-29.14710433
0.5	11.7221984	0.036076845	103.2778016	-29.10979373
0.6	11.8398132	0.030756445	103.1601868	-28.9272659
0.7	11.9175752	0.022880277	103.0824248	-28.78459087
0.8	11.9368606	0.015820079	103.0631394	-28.63547941
0.9	11.7942246	0.040694202	103.2057754	-28.71320238
1	11.8495018	0.028110966	103.1504982	-28.59301215
2	13.0923994	0.022376421	101.9076006	-26.63607123
3	11.7582086	0.059297894	103.2417914	-26.8018275
4	9.2804506	0.080048513	105.7195494	-28.04623795
5	6.9105836	0.029552028	108.0894164	-29.24767042
6	5.7053012	0.170629834	109.2946988	-29.21960527
7	5.2245148	0.129098494	109.7754852	-28.6617832
8	5.624945	0.154174543	109.375055	-27.28765756
9	5.5911726	0.136208057	109.4088274	-26.41264755
10	4.638727	0.163545712	110.361273	-26.65104983
11	3.2024554	0.060832489	111.7975446	-27.37327811
12	1.4692382	0.092444477	113.5307618	-28.45736502
13	0.3695206	0.201793818	114.6304794	-29.03777838
14	0.136873	0.217569879	114.863127	-28.62129569
15	0.2974412	0.091939396	114.7025588	-28.00633629
16	1.132318	0.12916045	113.867682	-26.71706828
17	1.3471876	0.132019081	113.6528124	-26.11272051
18	0.7028686	0.120444771	114.2971314	-26.36756133
19	-0.9373016	0.176668448	115.9373016	-27.74807942

20	-2.283403	0.143447508	117.283403	-28.70470264
21	-3.0320466	0.301909901	118.0320466	-29.19369412
22	-3.1272352	0.170851502	118.1272352	-29.02923061
23	-2.367923	0.356104927	117.367923	-27.94535326
24	-1.6834458	0.098216994	116.6834458	-27.00122394
25	-1.4298386	0.195917191	116.4298386	-26.4230516
26	-1.6707686	0.195500131	116.6707686	-26.33941645
27	-2.8106442	0.252181828	117.8106442	-27.15472691
28	-3.7419554	0.09501633	118.7419554	-27.76147296
29	-4.711444	0.220603735	119.711444	-28.40639641
30	-5.072612	0.309097729	120.072612	-28.6506919

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα 1^{ης} κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης

2^η Κεραία

180°				
Συχνότητα [MHz]	Μέση τιμή ρεύματος [dBμΑ]	Τοπική απόκλιση ρεύματος [dBμΑ]	Συντελεστής επικύρωσης [dBΩ]	Συντελεστής διόρθωσης [dBΩ]
0.009	11.1388726	0.506247872	103.8611274	-29.71812078
0.01	10.8332488	0.638670119	104.1667512	-29.99874333
0.02	11.388811	0.246227897	103.611189	-29.63792021
0.03	11.4162108	0.210865677	103.5837892	-29.61052041
0.04	11.4491164	0.056455215	103.5508836	-29.64252784
0.05	11.542801	0.032130683	103.457199	-29.48393021
0.06	11.4714448	0.020585567	103.5285552	-29.55528641
0.07	11.4662276	0.042986755	103.5337724	-29.56050361
0.08	11.5911468	0.04198152	103.4088532	-29.37067138
0.09	11.555063	0.020714302	103.444937	-29.40675518
0.1	11.554925	0.05503166	103.445075	-29.40689318
0.2	11.4900856	0.036465691	103.5099144	-29.47173258
0.3	11.5562616	0.046897851	103.4437384	-29.27573053
0.4	11.6057726	0.037089206	103.3942274	-29.22621953
0.5	11.6645996	0.024720446	103.3354004	-29.16739253

0.6	11.7848708	0.031360241	103.2151292	-28.9822083
0.7	11.8772638	0.04406645	103.1227362	-28.82490227
0.8	11.8574532	0.018546124	103.1425468	-28.71488681
0.9	11.747893	0.036504737	103.252107	-28.75953398
1	11.7748558	0.039036365	103.2251442	-28.66765815
2	13.0525192	0.045545339	101.9474808	-26.67595143
3	11.7748444	0.057427976	103.2251556	-26.7851917
4	9.3214004	0.060161154	105.6785996	-28.00528815
5	7.093625	0.049011285	107.906375	-29.06462902
6	5.8446154	0.056691637	109.1553846	-29.08029107
7	5.6139054	0.15694119	109.3860946	-28.2723926
8	5.9048216	0.123722508	109.0951784	-27.00778096
9	6.0648636	0.114415789	108.9351364	-25.93895655
10	5.3298586	0.172450788	109.6701414	-25.95991823
11	3.638997	0.084952106	111.361003	-26.93673651
12	2.2286192	0.051903726	112.7713808	-27.69798402
13	1.3863894	0.067949149	113.6136106	-28.02090958
14	1.0784134	0.129026871	113.9215866	-27.67975529
15	1.52554	0.045031458	113.47446	-26.77823749
16	2.2874284	0.112914966	112.7125716	-25.56195788
17	2.617627	0.12207766	112.382373	-24.84228111
18	2.2385878	0.141381132	112.7614122	-24.83184213
19	0.8859876	0.113666879	114.1140124	-25.92479022
20	-0.229773	0.040876345	115.229773	-26.65107264
21	-1.1406008	0.163472304	116.1406008	-27.30224832
22	-0.5874588	0.110233857	115.5874588	-26.48945421
23	-0.1627976	0.190588017	115.1627976	-25.74022786
24	0.7488876	0.03301948	114.2511124	-24.56889054
25	1.3784148	0.089514343	113.6215852	-23.6147982
26	1.5103454	0.025682212	113.4896546	-23.15830245
27	0.6385316	0.050443774	114.3614684	-23.70555111

28	-1.2239072	0.079046787	116.2239072	-25.24342476
29	-2.1769242	0.056498954	117.1769242	-25.87187661
30	-2.5291018	0.393616339	117.5291018	-26.1071817

Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα 2^{ης} κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης

3^η Κεραία

180°				
Συχνότητα [MHz]	Μέση τιμή ρεύματος [dBμΑ]	Τυπική απόκλιση ρεύματος [dBμΑ]	Συντελεστής επικύρωσης [dBΩ]	Συντελεστής διόρθωσης [dBΩ]
0.009	11.0110558	0.577185334	103.9889442	-29.84593758
0.01	11.7153456	0.723289101	103.2846544	-29.11664653
0.02	11.4624854	0.22919795	103.5375146	-29.56424581
0.03	11.55784	0.173818368	103.44216	-29.46889121
0.04	11.5496778	0.085312073	103.4503222	-29.54196644
0.05	11.5750336	0.062840255	103.4249664	-29.45169761
0.06	11.6345724	0.035131473	103.3654276	-29.39215881
0.07	11.6529748	0.027571365	103.3470252	-29.37375641
0.08	11.6664874	0.036770016	103.3335126	-29.29533078
0.09	11.6921118	0.036032143	103.3078882	-29.26970638
0.1	11.6641418	0.081337591	103.3358582	-29.29767638
0.2	11.6019598	0.068883369	103.3980402	-29.35985838
0.3	11.6776688	0.027516465	103.3223312	-29.15432333
0.4	11.8045838	0.068208978	103.1954162	-29.02740833
0.5	11.8022284	0.041483006	103.1977716	-29.02976373
0.6	11.9464872	0.042085273	103.0535128	-28.8205919
0.7	12.0007988	0.016723842	102.9992012	-28.70136727
0.8	11.9951322	0.05847767	103.0048678	-28.57720781
0.9	11.8741186	0.020279941	103.1258814	-28.63330838
1	11.9222628	0.059383385	103.0777372	-28.52025115
2	13.1750998	0.020443666	101.8249002	-26.55337083
3	11.9204902	0.035155302	103.0795098	-26.6395459
4	9.388894	0.013274851	105.611106	-27.93779455

5	7.1339736	0.059510481	107.8660264	-29.02428042
6	5.9549408	0.078148248	109.0450592	-28.96996567
7	5.6563462	0.122857976	109.3436538	-28.2299518
8	6.0013364	0.10728355	108.9986636	-26.91126616
9	6.2871734	0.075906528	108.7128266	-25.71664675
10	5.143422	0.115097006	109.856578	-26.14635483
11	3.5244292	0.092708487	111.4755708	-27.05130431
12	2.2112794	0.073799596	112.7887206	-27.71532382
13	1.3055876	0.035963741	113.6944124	-28.10171138
14	1.1893218	0.117745494	113.8106782	-27.56884689
15	1.741896	0.062113344	113.258104	-26.56188149
16	2.60934	0.063386634	112.39066	-25.24004628
17	2.6364336	0.067226374	112.3635664	-24.82347451
18	2.215361	0.091882062	112.784639	-24.85506893
19	1.2755996	0.121079858	113.7244004	-25.53517822
20	0.1407454	0.082404023	114.8592546	-26.28055424
21	-0.756395	0.244089239	115.756395	-26.91804252
22	-1.01497	0.152324022	116.01497	-26.91696541
23	-0.1784272	0.109193358	115.1784272	-25.75585746
24	0.6982072	0.086748244	114.3017928	-24.61957094
25	1.4186844	0.102287286	113.5813156	-23.5745286
26	1.2920992	0.073614174	113.7079008	-23.37654865
27	0.0823762	0.091330698	114.9176238	-24.26170651
28	-1.1176696	0.101960057	116.1176696	-25.13718716
29	-2.2923126	0.262333539	117.2923126	-25.98726501
30	-4.0733656	0.339759651	119.0733656	-27.6514455

Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα 3^{ης} κεραία στη θέση 180° του διπόλου επαλήθευσης

4.10 Υπολογισμός αβεβαιότητας

Κάθε μέτρηση, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και το αποτέλεσμά της εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. 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). Είναι φανερό ότι βασικό πρόβλημα της μετρολογίας είναι η εύρεση της «αληθινής» τιμής του μετρούμενου μεγέθους.

Για την μέτρηση αβεβαιοτήτων σε εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας απαιτείται να χρησιμοποιηθούν αποδεκτές μέθοδοι ανάλυσης, μέσω της εφαρμογής συγκεκριμένης διαδικασίας για τη μέτρηση. Ο υπολογισμός αβεβαιότητας είναι ένας κατάλογος των πιθανών πηγών λάθους με μια εκτίμηση των ορίων αβεβαιότητάς τους και της κατανομής πιθανότητας τους. Είναι πιθανό μερικές συνεισφορές αβεβαιότητας να μην είναι οι ίδιες σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης και θα πρέπει να ληφθεί μια απόφαση για την κατάλληλη διακοπή της.

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: οι αβεβαιότητες τύπου A, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και οι αβεβαιότητες τύπου B, που υπολογίζονται με άλλα μέσα. Οι συνιστώσες τύπου A προκύπτουν από τη μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος, ενώ είναι συχνά απαραίτητη και η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance). Οι συνιστώσες τύπου B, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση. Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων. [13]

Η αβεβαιότητα τύπου A [27] χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα χ μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ των n ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας X , κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση.

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.

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

- πιστοποιητικά διακρίβωσης,
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις,
- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση,
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης,
- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [13].

Ειδικότερα, για τη μελέτη και τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων κατά την διακρίβωση του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου (LLAS), παρέχονται συγκεκριμένες οδηγίες στο Πρότυπο EN 55016-4-2:2011/A2:2018. Στο πρότυπο αυτό, περιγράφεται μια συγκεκριμένη κατηγορία αβεβαιοτήτων, οι αβεβαιότητες στον εξοπλισμό μέτρησης που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [28].

Σύμφωνα με το πρότυπο, και λαμβάνοντας υπόψιν το κύκλωμα που χρειάστηκε για την εκτέλεση της διακρίβωσης του συστήματος των κεραιών μεγάλου βρόχου, τα στοιχεία που επιδρούν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων είναι τα εξής:

- **Ανάγνωση αναλυτή φάσματος (Spectrum Analyzer reading) $[V_r]$**

Οι μετρήσεις του αναλυτή φάσματος θα διαφέρουν για λόγους που περιλαμβάνουν την αστάθεια του συστήματος μέτρησης και σφάλματα παρεμβολής της κλίμακας μέτρησης.

Η εκτίμηση του V_r είναι η μέση τιμή πολλών αναγνώσεων (μέγεθος δείγματος μεγαλύτερο από 10) ενός σταθερού σήματος, με μια τυπική αβεβαιότητα που δίνεται από την πειραματική τυπική απόκλιση της μέσης τιμής ($k = 1$).

Στο συγκεκριμένο σύστημα, η αβεβαιότητα είναι $\pm 0,1$ dB.

- **Απόκλιση συντελεστή επικύρωσης (Validation factor deviation) $[\delta Z_{vf}]$**

Η απόδοση του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου επαληθεύεται χρησιμοποιώντας αποκρίσεις στην τυποποιημένη κεραία-balun σε διάφορες θέσεις μέσα στο σύστημα κεραιών μεγάλου βρόχου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τους θεωρητικούς συντελεστές επικύρωσης (Σχήμα 3-9), οι οποίοι καθορίζονται χρησιμοποιώντας ένα θεωρητικό μοντέλο της διάταξης διακρίβωσης του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου [26.1.3] και αποτελούν την αναφορά για την επαλήθευση του πραγματικού συντελεστή επικύρωσης του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο συντελεστής επικύρωσης αποτελεί επαλήθευση για τη συνολική απόδοση του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου και περιλαμβάνει όλες τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τη γεωμετρική κατασκευή του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου, τα ομοαξονικά καλώδια, τις αντιστάσεις τερματισμού, τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος 1 V/A , ανισορροπίες, ακόμα και την επίδραση του χώρου δοκιμής. Συνεπώς, η επαλήθευση του συντελεστή επικύρωσης αποτελεί μια συνδυασμένη επαλήθευση του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου και του χώρου δοκιμής του συστήματος αυτού.

Η απόκλιση του πραγματικού συντελεστή επικύρωσης σε σχέση με τον θεωρητικό συντελεστή επαλήθευσης είναι μικρότερη από $\pm 2 \text{ dB}$ [20]. Ως εκ τούτου, η πραγματική απόκλιση μπορεί άμεσα να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της αβεβαιότητας. Η εκτίμηση της διόρθωσης δZ_{rf} είναι μηδέν και η κατανομή πιθανότητας για τον συντελεστή επικύρωσης θεωρείται ότι είναι τριγωνική κατανομή ($k = \sqrt{6} = 2,45$).

- **Συχνотική παρεμβολή του συντελεστή επικύρωσης (Validation factor frequency interpolation) [δZ_{fi}]**

Όταν υπολογίζεται ένας συντελεστής μετατροπής με παρεμβολή μεταξύ συχνοτήτων στις οποίες είναι διαθέσιμα δεδομένα βαθμονόμησης, οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με αυτόν τον συντελεστή μετατροπής εξαρτώνται από το διάστημα συχνότητας μεταξύ των σημείων βαθμονόμησης και της μεταβλητότητας του συντελεστή μετατροπής με τη συχνότητα. Η απεικόνιση του βαθμονομημένου συντελεστή μετατροπής σε συνάρτηση με τη συχνότητα βοηθά στην απεικόνιση των αλλαγών του παράγοντα.

Η εκτίμηση της διόρθωσης δZ_{fi} είναι μηδέν, με ορθογώνια κατανομή πιθανότητας και με μισό πλάτος $0,1 \text{ dB}$.

- **Εμφανιζόμενο μέσο επίπεδο θορύβου (Displayed average noise level) [δV_{danl}]**

Η αβεβαιότητα αυτή είναι μια μέτρηση του θορύβου που παράγεται εσωτερικά από το όργανο. Με την είσοδο του σήματος RF 50 Ω να τερματίζεται σε φορτίο 50 Ω, το εμφανιζόμενο επίπεδο θορύβου μετράται σε αρκετές συχνότητες. Διεξάγεται ένας οπτικός έλεγχος για να εξασφαλιστεί ότι η μέτρηση δεν γίνεται υπό την παρουσία ψευδής (spurious) απόκρισης.

Στο συγκεκριμένο σύστημα, η αβεβαιότητα αυτή παρέχεται από πιστοποιητικά διακρίβωσης και είναι $\pm 0,15$ dB με $k = 2$.

- **Μέτρηση επιπέδου (Level measurement) [δV_{lm}]**

Στο συγκεκριμένο σύστημα, η αβεβαιότητα αυτή παρέχεται από πιστοποιητικά διακρίβωσης και είναι ± 2 dB με $k = 2$.

- **Στάθμη θορύβου συστήματος (System noise floor) [δV_{nf}]**

Η στάθμη θορύβου ενός συστήματος είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη λειτουργία του καθώς αποτελεί ένδειξη για το επίπεδο του ελάχιστου σήματος που μπορεί να αναλυθεί. Η στάθμη θορύβου μπορεί να οριστεί ως το μέτρο του σήματος που δημιουργείται από το άθροισμα όλων των πηγών θορύβου και των ανεπιθύμητων σημάτων εντός ενός συστήματος.

Στο συγκεκριμένο σύστημα, η αβεβαιότητα αυτή είναι $\pm 0,0$ dB.

- **Αναντιστοιχία: συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου – αναλυτή φάσματος (Mismatch: LLAS – Spectrum Analyzer) [$\delta M_{LLAS-SA}$]**

Γενικά η θύρα ενός εξοπλισμού θα είναι συνδεδεμένη την θύρα 1 ενός δίθυρου δικτύου του οποίου η θύρα 2 είναι τερματισμένη από έναν αναλυτή με συντελεστή ανάκλασης Γ_r . Το δίθυρο δίκτυο, το οποίο μπορεί να είναι ένα καλώδιο, ένας εξασθενητής, ένας εξασθενητής και ένα καλώδιο παράλληλα συνδεδεμένα, ή κάποιος άλλος συνδυασμός εξαρτημάτων, μπορεί να αναπαρασταθεί από τις S-παραμέτρους του. Τότε, η διόρθωση αναντιστοιχίας είναι:

$$\delta M = 20 \lg[(1 - \Gamma_e S_{11})(1 - \Gamma_r S_{22}) - S_{21}^2 \Gamma_e \Gamma_r]$$

όπου Γ_e είναι ο συντελεστής ανάκλασης που «βλέπει» προς τη θύρα εξόδου της κεραίας όταν είναι ρυθμισμένη για μέτρηση παρεμβολών. Όλες οι παράμετροι είναι με αναφορά τα 50 Ω.

Για μετρήσεις ακτινοβολούμενων διαταραχών κάτω από 1 GHz, μία κεραία με προδιαγραφές $s_{wr} \leq 2,0:1$, συνεπάγεται $|\Gamma_e| \leq 0,33$. Υποτίθεται επίσης, ότι η σύνδεση με τον αναλυτή φάσματος γίνεται με χρήση ενός καλά προσαρμοσμένου καλωδίου ($|S_{11}| \ll 1$, $|S_{22}| \ll 1$) αμελητέας εξασθένησης και ότι η εξασθένηση του αναλυτή φάσματος είναι 0 dB, για την οποία η ανοχή του προτύπου CISPR 16-1-1 για $s_{wr} \leq 2,0:1$, συνεπάγεται $|\Gamma_r| \leq 0,33$.

Στο σύστημα αυτό, η αβεβαιότητα της αναντιστοιχίας συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου – αναλυτή φάσματος, υπολογίζεται ως +0,7 / -0,8 dB.

- **Αναντιστοιχία: διπόλου επαλήθευσης – γεννήτριας σήματος (Mismatch: Verification dipole – Signal generator) [δM_{vd-sg}]**

Αντίστοιχα η αβεβαιότητα της αναντιστοιχίας διπόλου επαλήθευσης – γεννήτριας σήματος υπολογίζεται όπως η προηγούμενη αναντιστοιχία και έχει τιμή 0,5 dB.

- **Επαναληψιμότητα (Repeatability) [δR]**

Πρόκειται για την εγγύτητα (closeness of agreement) μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων του ίδιου μεγέθους κάτω από τις ίδιες συνθήκες μέτρησης:

- Ίδιος χειριστής
- Ίδια διαδικασία
- Ίδιο μετρητικό σύστημα
- Ίδια τοποθεσία
- Ίδιες συνθήκες χρήσης

Εκφράζει δηλαδή τη ικανότητα του οργάνου να δίνει «σταθερές» ενδείξεις.

Ο τύπος με τον οποίον υπολογίζεται είναι ο εξής:

$$\delta R = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

όπου,

σ : η τυπική απόκλιση

N: το πλήθος των μετρήσεων (N = 5)

Βρίσκοντας τη μέγιστη τυπική απόκλιση $\sigma = 2.4895819$

, υπολογίζουμε:

$$\delta R = 1,11 \text{ dB}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κατασκευάζεται ο ακόλουθος πίνακας αβεβαιοτήτων:

Στοιχεία Εισόδου	X_i	Αβεβαιότητα X_i [dB]	Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας	$c_{iu}(x_i)$ [dB]
Ανάγνωση αναλυτή φάσματος	V_r	$\pm 0,1$	$k = 1$	0,10
Απόκλιση συντελεστή επικύρωσης	δZ_{vf}	$\pm 2,0$	Τριγωνική	0,82
Συχνοτική παρεμβολή του συντελεστή επικύρωσης	δZ_{fi}	$\pm 0,1$	Ομοιόμορφη (ορθογώνια)	0,06
Εμφανιζόμενο μέσο επίπεδο θορύβου	δV_{danl}	$\pm 2,0$	$k = 2$	1,00
Μέτρηση επιπέδου	δV_{lm}	$\pm 0,15$	$k = 2$	0,075
Στάθμη θορύβου συστήματος	δV_{nf}	$\pm 0,0$		0,00
Αναντιστοιχία: συστήματος κεραίων μεγάλου βρόχου – αναλυτή φάσματος	$\delta M_{LLAS-SA}$	+0,7 / -0,8	Μορφής U	0,53
Αναντιστοιχία: διπόλου επαλήθευσης – γεννήτριας σήματος	δM_{vd-sg}	$\pm 0,5$	Μορφής U	0,35
Επαναληψιμότητα	δR	$\pm 1,11$	$k = 1$	1,11

Πίνακας 4-4: Πίνακας υπολογισμού αβεβαιοτήτων

Η συνολική αβεβαιότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$I = V_r + \delta Z_{vf} + \delta Z_{fi} + \delta V_{danl} + \delta V_{lm} + \delta V_{nf} + \delta M_{LLAS-SA} + \delta M_{vd-sg} + \delta R = 4,045 \text{ dB}$$

Η συνολική διευρυμένη αβεβαιότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$U(I) = 2 \times I = 8,09 \text{ dB}$$

4.11 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, για κάθε κεραία σε όλες τις μετρήσεις ανάλογα με τη συχνότητα και την θέση του διπόλου επαλήθευσης, υπολογίζεται και ένας συντελεστής διόρθωσης (correction factor). Αυτός ο συντελεστής διόρθωσης εκφράζει την απόκλιση στη λήψη του σήματος από την κεραία για τη συγκεκριμένη συχνότητα και θέση από τη πρότυπη τιμή του συντελεστή επικύρωσης που ορίζει το πρότυπο (Σχήμα 3-9). Συνεπώς, είναι απαραίτητο κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων με τις συγκεκριμένες κεραίες, στην τελική μέτρηση να λαμβάνεται υπόψιν ο αντίστοιχος συντελεστής διόρθωσης, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να κρίνεται ορθό.

Καθοριστική σημασία στην δοκιμή αυτή έχει το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον LabVIEW. Ο χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθώς μέσω του προγράμματος επιτυγχάνεται ο απομακρυσμένος έλεγχος των οργάνων και η αυτοματοποίηση των διαδικασιών που απαιτούνται για την λήψη των απαραίτητων μετρήσεων μέσω της γεννήτριας και του παλμογράφου, Με τον τρόπο αυτό παραλείπονται πολλές χειροκίνητες ρυθμίσεις των οργάνων που αυξάνουν τον χρόνο της δοκιμής.

Επίσης, μέσω αυτής της αυτοματοποιημένης διαδικασίας και της αποφυγής χειροκίνητων ρυθμίσεων, μειώνονται σε μεγάλο βαθμό και τα σφάλματα που οφείλονται σε ανθρώπινο παράγοντα.

Αξίζει να αναφερθεί επίσης, η σημασία της δοκιμής αυτής για το ίδιο το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το εργαστήριο μέσω αυτής της διαδικασίας διακρίβωσης, είναι σε θέση να ελέγξει και να διακριβώσει τον εξοπλισμό του, δηλαδή το σύστημα των κεραιών μεγάλου βρόχου. Αυτό συνεπάγεται την άμεση μείωση χρόνου αλλά και κόστους, καθώς η διαδικασία για την διακρίβωση του συγκεκριμένου συστήματος δεν ανατίθεται σε κάποιο άλλο εργαστήριο, γεγονός που θα σήμαινε χρηματικό κόστος καθώς και χρονική καθυστέρηση, διότι τα εργαστήρια αυτά βρίσκονται κυρίως σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες.

Κεφάλαιο 5: Δοκιμές Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης και Μετασχηματιστής έντασης ρεύματος

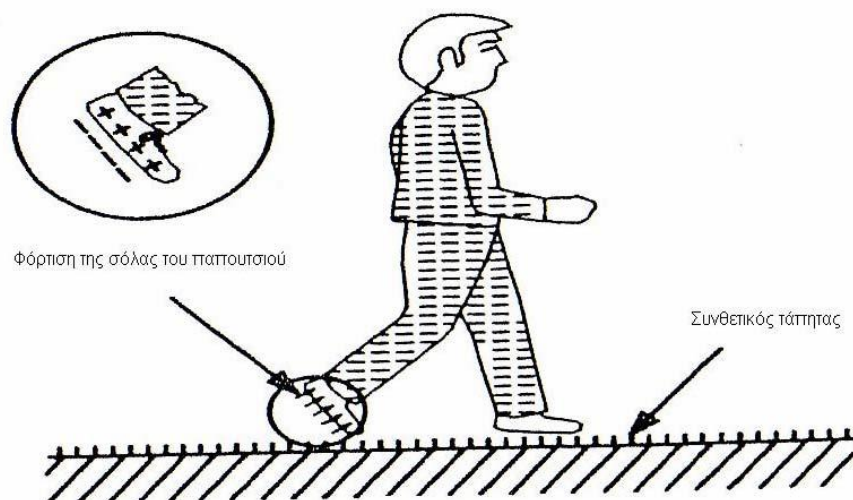
5.1 Ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος συμβαίνει όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό) συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [30, 31]. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η φόρτιση εξ επαγωγής.

5.2 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια φορτίζεται αρνητικά. Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές.

Στο Σχήμα 5-1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.



Σχήμα 5-1: Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο^[3]

Το αν ένα υλικό θα φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβηλεκτρική σειρά του Πίνακα 5-3 που ακολουθεί όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).

ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ	
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΘΕΤΙΚΑ	ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΑ
<p>Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάilon Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο Ατσάλι</p>	<p>Κερί γυαλισματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο, Χαλκός, Ασήμι Ανοξειδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλένιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης</p>

Πίνακας 5-1: Τριβηλεκτρική σειρά

Η σχετική θέση του υλικού στην τριβηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δυο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μπορούν να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση.

Η φόρτιση εξ επαφής είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου. Άλλοι τρόποι, όπως μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona είναι επίσης δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η απότομη μεταφορά αυτού του φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο όταν πρόκειται για αντίθετα φορτισμένα σώματα και όταν αυτά βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση λέγεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 5-2.

Συντελεστές παραγωγής της φόρτισης	Συντελεστές εκφόρτισης
<p>Σχετική θέση στην τριβηλεκτρική σειρά Επιφάνεια επαφής Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών Βαθμός διαχωρισμού</p>	<p>Αγωγιμότητα των υλικών Σχετική υγρασία Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού</p>

Πίνακας 5-2: Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και κυρίως από την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά πιο ήπιες μορφής. Αντίθετα όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλος χρόνος ανόδου). Επιβλαβής τάσεις μπορεί να δημιουργηθούν ακόμα και στο 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι:

- Εκρήξεις σε υπέρ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους.
- Ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.
- Βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια διαφόρων ανθρωπίνων ενεργειών φαίνονται στον Πίνακα 5-3. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		
	10%	40%	55%
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου	12	5	3
Κινήσεις ενός εργαζομένου στο γραφείο	6	0,8	0,4

Πίνακας 5-3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)

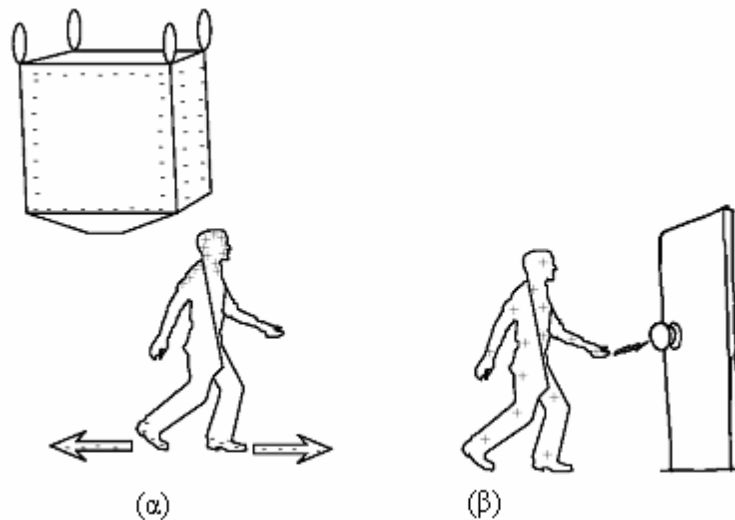
Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [32, 33] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

Η ηλεκτροστατική φόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία μπορεί να διαταράξει ή ακόμη και να καταστρέψει, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα τα οποία βρίσκονται κοντά σε αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από τα παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος.

5.3 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο [34], αλλά μπορεί να γίνει εξ επαγωγής. Συγκεκριμένα όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται δίπλα σε ένα φορτισμένο σώμα) τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγώγιμης σύνδεσης. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό ακολουθεί το Σχήμα 5-2 στο οποίο φαίνεται ένας άνθρωπος (πολύ καλός αγωγός) δίπλα σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία περιέχει ένα μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Τα αρνητικά με τα θετικά φορτία διαχωρίζονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου. Τελικά το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται θετικά αντίθετα από το γειτνιάζον αντικείμενο. Επομένως όταν ο άνθρωπος πλησιάσει με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2β.



Σχήμα 5-2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής^[31]

5.4 Επιπτώσεις της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως έχει προαναφερθεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη

διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους [31]. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να λάβουν χώρα:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

5.5 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματά τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν [31]. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού. Άρα για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου, είναι επιβεβλημένη η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή, με ένα αγώγιμο στρώμα.
- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [35] με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [36] ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να

αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των 107 Ω και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

Η προστασία των συσκευών από τις ηλεκτροστατικές φορτίσεις όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί μπορεί να γίνει με την λήψη των ακόλουθων μέτρων:

- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή δευτερευόντων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Για αυτό προκειμένου να είναι αποτελεσματικές πρέπει τα πλαίσια να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα ή έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μπουτόν, τα οποία διαπερνούν το πλαίσιο. Το μέγιστο δυναμικό το οποίο μπορεί να αναπτύξει ένα ανθρώπινο σώμα είναι 25 kV. Εάν ένα άτομο πλησιάσει κάποιο μέρος του σώματός του, το οποίο συνηθέστερα είναι το δάκτυλό του, πλησιέστερα από 1 cm, μακριά από το κύκλωμα, τότε δεν θα συμβεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εφόσον η διάσπαση του αέρα γίνεται στα 30 kV. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας κυκλωμάτων από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι η τοποθέτησή τους σε ένα αγωγίμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματά του.

5.6 Το πρότυπο IEC 61000-4-2 [32]

Το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [32] αποτελεί το δεύτερο τμήμα (Section 2) του τετάρτου μέρους (Part 4) του Προτύπου IEC 1000:1995, το οποίο πραγματεύεται την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το διεθνές αυτό Πρότυπο [32] σχετίζεται με την ατρωσία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών σε ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών

εκκενώσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης.

Σε αυτό καθορίζονται:

- Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος.
- Τα διάφορα επίπεδα τάσεων δοκιμής.
- Ο απαιτούμενος για τις δοκιμές εξοπλισμός.
- Η διαδικασία των δοκιμών.

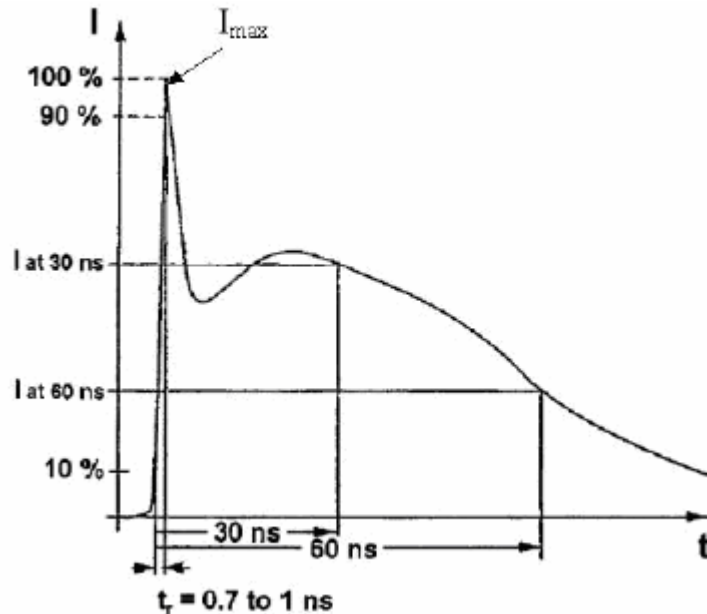
Το ρεύμα εκφόρτισης σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 5-3, μπορεί να χωρισθεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος, το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (initial peak) και προσομοιώνει την εκφόρτιση του χεριού, και το δεύτερο, που προσομοιώνει την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Η κυματομορφή του ρεύματος διαθέτει τέσσερις βασικές παραμέτρους οι οποίες είναι:

Μέγιστο ρεύμα (I_{max}): Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εκφόρτισης (αρχική κορυφή).

Χρόνος ανόδου (t_r): Ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να αυξηθεί από την τιμή του 10% της μέγιστης τιμής του, στο 90% της μέγιστης τιμής. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns.

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

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



Σχήμα 5-3: Κυματομορφή του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το πρότυπο IEC 61000-4-2^[32]

Οι αναμενόμενες τιμές καθώς και τα περιθώρια απόκλισης των τεσσάρων παραμέτρων για το ρεύμα εκφόρτισης δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5-4.

Επίπεδο	Ενδεικνυόμενη τάση (kV)	Κορυφή ρεύματος ±10% (A)	Χρόνος ανόδου t_r (ns)	Ρεύμα (±30%) στα 30ns (A)	Ρεύμα (±30%) στα 60ns (A)
1	2	7,5	0,7 έως 1	4	2
2	4	15	0,7 έως 1	8	4
3	6	22,5	0,7 έως 1	12	6
4	8	30	0,7 έως 1	16	8

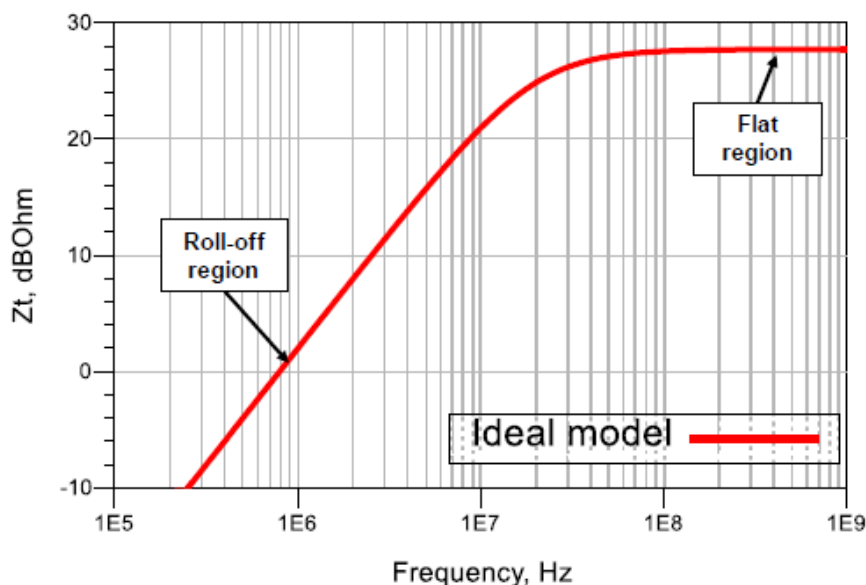
Πίνακας 5-4: Τυπικές τιμές παραμέτρων ρεύματος εκφόρτισης μέσω επαφής [32]

5.7 Μέθοδος αντιστάθμισης απόκρισης συχνότητας για μετρήσεις ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με μετασχηματιστή έντασης ρεύματος [37]

Οι μετασχηματιστές έντασης ρεύματος συναντώνται σε διάφορες μετρήσεις, όπως σε αυτές που προσπαθούν να εντοπίσουν πηγές ακτινοβολίας. Για την διευκόλυνση του υπολογισμού του ρεύματος σε σημεία διαφορετικών συχνοτήτων, συχνά παρέχεται από τον κατασκευαστή του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (Current Probe), η γραφική παράσταση της σύνθετης

αντίστασης μεταφοράς (Transfer Impedance). Καθώς οι μετασχηματιστές έντασης ρεύματος βασίζονται στην επαγωγική σύζευξη, η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς τους δεν είναι σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας. Η μη σταθερή σύνθετη αντίσταση μεταφοράς σχετικά με τη συχνότητα δεν αποτελεί πρόβλημα στις μετρήσεις στο πεδίο συχνοτήτων.

Εκτός από τις εφαρμογές στο πεδίο συχνοτήτων, οι μετασχηματιστές έντασης ρεύματος (current probes) συναντώνται συχνά στις μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπου χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κυματομορφής ενός μεταβατικού ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Για παράδειγμα, καταγράφοντας την κυματομορφή εκφόρτισης στο καλώδιο της γείωσης μια γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD) επιτρέπει να προσδιοριστεί εάν το μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης έχει εξαντληθεί. Στη περίπτωση που έχει εξαντληθεί, μία δευτερεύουσα ηλεκτροστατική εκφόρτιση ESD έχει πολύ λίγες πιθανότητες να συμβεί. Ωστόσο, εάν μόνο ένα μέρος του συνολικά αποθηκευμένου φορτίου έχει εξαντληθεί κατά την πρώτη εκφόρτιση, το υπολειπόμενο φορτίο (και η σχετική τάση) μπορεί να υποδεικνύει ότι υπάρχει πιθανότητα για δευτερεύον γεγονός ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ωστόσο, σε μια μέτρηση στο πεδίο του χρόνου, η μη σταθερή σύνθετη αντίσταση μεταφοράς θα είχε ως αποτέλεσμα σοβαρή παραμόρφωση της κυματομορφής, επηρεάζοντας ιδιαίτερα το τελευταίο μέρος της κυματομορφής, περιορίζοντας την ικανότητα εκτίμησης του συνολικού φορτίου που μεταφέρθηκε. Η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς ενός πραγματικού μετασχηματιστή έντασης ρεύματος μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική από αυτήν στο Σχήμα 5-4.



Σχήμα 5-4: Σύνθετη αντίσταση μεταφοράς ενός ιδανικού μετασχηματιστή έντασης ρεύματος^[37]

Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως π.χ. η απώλεια πυρήνα φερρίτη, η χωρητικότητα μεταξύ εξωτερικής θωράκισης και του πηνίου.

5.8 Διαδικασίες για την αντιστάθμιση της απόκρισης συχνότητας

Η αντιστάθμιση της απόκρισης της συχνότητας βασίζεται στη σύνθετη αντίσταση μεταφοράς.

Η συνάρτηση αντιστάθμισης απόκρισης της συχνότητας υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$H_{frc}(j\omega) = \frac{1}{Z_T(j\omega)} \cdot H_{LPF}(j\omega) \cdot H_{HPF}(j\omega)$$

όπου $Z_T(j\omega)$ είναι η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (current probe), είτε με βάση ένα μετρημένο σύνολο δεδομένων είτε με βάση ένα ισοδύναμο κύκλωμα.

Επίσης, προστίθενται αριθμητικά βαθυπερατά και υψιπερατά φίλτρα στη συνάρτηση αντιστάθμισης της συχνότητας. Η συνάρτηση μεταφοράς του υψιπερατού φίλτρου ορίζεται ως εξής:

$$H_{HPF}(j\omega) = \frac{j\omega C_{HPF} R_{HPF}}{1 + j\omega C_{HPF} R_{HPF}}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του βαθυπερατού φίλτρου ορίζεται ως εξής:

$$H_{LPF}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega C_{LPF} R_{LPF}}$$

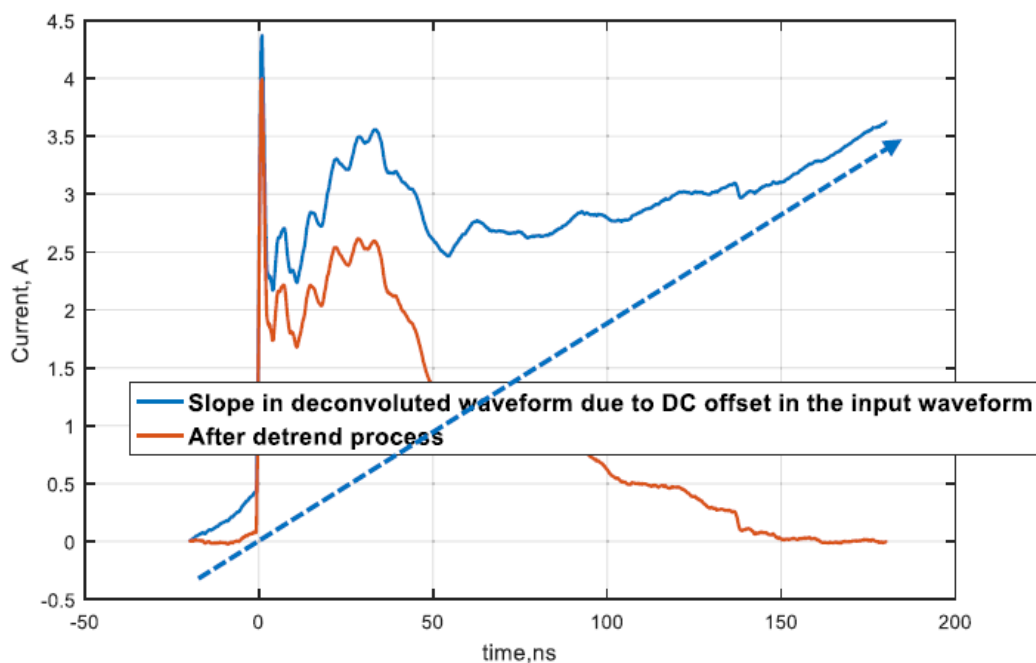
Το βαθυπερατό (Low Pass Filter) και το υψιπερατό φίλτρο (High Pass Filter) χρησιμοποιούνται εδώ για να αφαιρέσουν ανεπιθύμητα τμήματα συχνοτήτων. Ύστερα από μία συγκεκριμένη συχνότητα, η απόκριση συχνοτήτων του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος μπορεί να είναι άγνωστη, ή μπορεί να αποτελεί ταυτόχρονα συνάρτηση επαγωγικής και χωρητικής σύζευξης. Η χωρητική σύζευξη μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα συχνότητας πάνω από ένα συγκεκριμένο σημείο να μην είναι χρήσιμα. Για την αποφυγή λανθασμένης ερμηνείας ως χρήσιμων δεδομένων πάνω από μια ορισμένη συχνότητα, εισάγεται ένα βαθυπερατό φίλτρο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες λειτουργίες βαθυπερατού φίλτρου, ωστόσο πρέπει να δοθεί προσοχή για να αποφευχθεί η εισαγωγή overshoot.

Η DC αντιστάθμιση (offset) μπορεί να προκαλέσει μια κλίση στην κυματομορφή που έχει προκύψει μετά την αποσυνέλιξη καθώς όλοι οι παλμογράφοι παρουσιάζουν αντιστάθμιση

(offset). Σε περίπτωση που εμφανίζεται μόνο θόρυβος στη μέτρηση, και υπολογιστεί η μέση τιμή, η τιμή αυτή δεν είναι μηδέν. Συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 1% της τιμής πλήρους κλίμακας για τη συγκεκριμένη ρύθμιση Volts / Div.

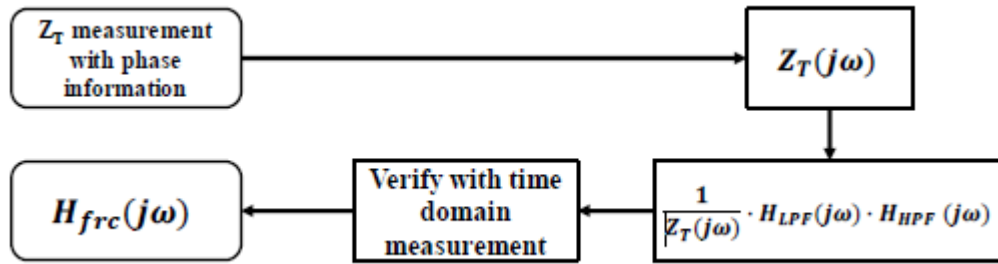
Η αποσυνέλιξη ενός διαφορικού συστήματος, όπως είναι ο μετασχηματιστής έντασης ρεύματος (current probe), ουσιαστικά αποτελεί μία ολοκλήρωση, η οποία οδηγεί στην συσσώρευση αντιστάθμισης (offset). Έτσι, η προαναφερθείσα αντιστάθμιση από το παλμογράφο θα οδηγούσε σε κλίση στη βάση της γραμμής. Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη μίας διαδικασίας detrend για την απαλλαγή από τη συσσώρευση αντιστάθμισης (offset).

Με την διαδικασία detrend αφαιρείται ή προστίθεται μια τιμή DC σε ολόκληρη την κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου, ώστε το τέλος της κυματομορφής, που έχει προκύψει μετά την συνέλιξη, να επιστρέφει στο μηδέν. Στο Σχήμα 5-5 φαίνεται το αποτέλεσμα της DC αντιστάθμισης και της διαδικασίας detrend.

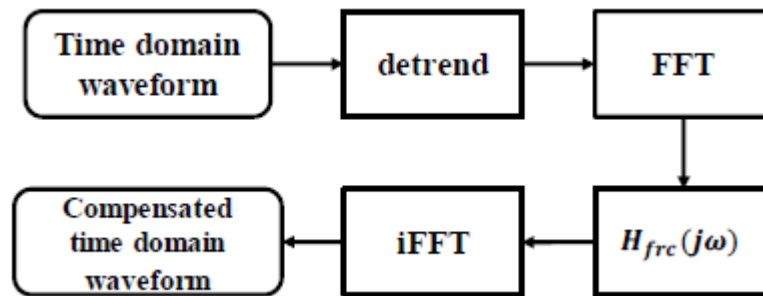


Σχήμα 5-5: Το αποτέλεσμα της DC αντιστάθμισης και της διαδικασίας detrend^[37]

Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για την ανάπτυξη της συνάρτησης απόκρισης συχνότητας $H_{frc}(j\omega)$. Αφού ληφθεί η συνάρτηση $H_{frc}(j\omega)$, μπορεί να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία των κυματομορφών που μετρήθηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην Σχήμα 5-7.



Σχήμα 5-6: Διαδικασία ανάπτυξης της συνάρτησης $H_{frc}(j\omega)$ χρησιμοποιώντας τη μιγαδική σύνθετη αντίσταση μεταφοράς^[37]



Σχήμα 5-7: Διαδικασία αποσυνέλιξης κυματομορφής μετρημένης με τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος^[37]

5.9 Σκοπός δοκιμής

Σε ορισμένες μετρήσεις ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι επιθυμητές μακριές κυματομορφές. Το συνολικό φορτίο που εκφορτίστηκε από μια γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά την εκφόρτιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η πιθανότητα εκδήλωσης δεύτερης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Αν το ρεύμα καταγραφεί, για παράδειγμα από έναν μετασχηματιστή έντασης ρεύματος στο καλώδιο γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, είναι δυνατή η εκτίμηση του φορτίου που μεταφέρθηκε. Σε περίπτωση που το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου έχει μεταφερθεί, από τον πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας που βρίσκεται στο εσωτερικό της ηλεκτροστατικής γεννήτριας, κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση, τότε οι εναπομένουσες τάσεις είναι χαμηλές και η πιθανότητα για μία δεύτερη ηλεκτροστατική εκφόρτιση επίσης χαμηλή.

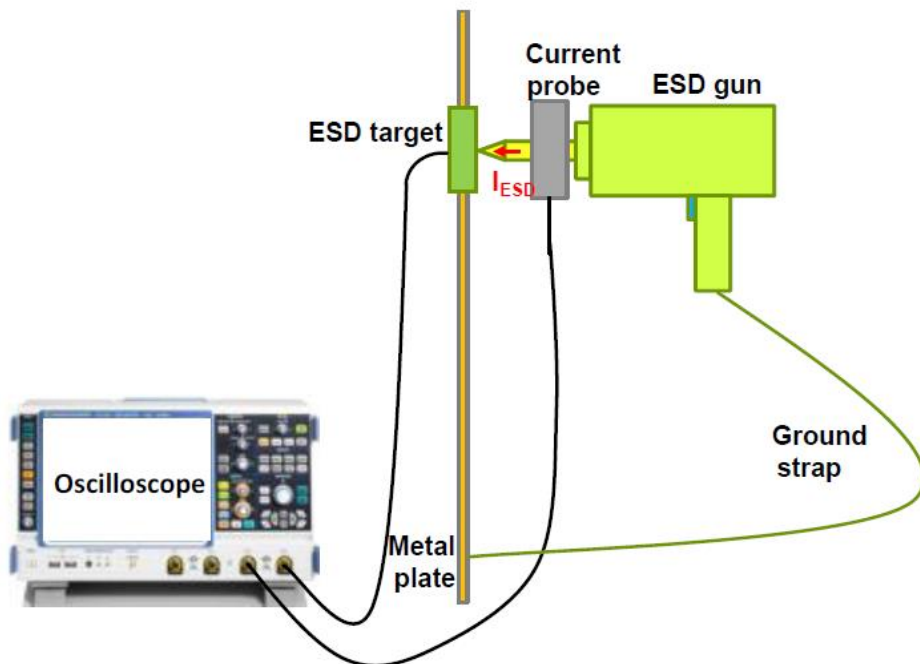
Ωστόσο, εάν μόνο ένα μικρό μέρος του συνολικού φορτίου έχει αφαιρεθεί, οι τάσεις παραμένουν υψηλές και μια δεύτερη ηλεκτροστατική εκφόρτιση μπορεί να συμβεί. Όταν ο κύριος παλμός ηλεκτροστατικής εκφόρτισης ακολουθείται από έναν μεταγενέστερο παλμό, αυτό αποτελεί ένδειξη για δευτερεύουσα ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Μια τέτοια εφαρμογή απαιτεί ανακατασκευή της κυματομορφής σε ένα χρονικό πλαίσιο περίπου 200ns.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέτρηση με τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (current probe) και η ανακατασκευή της κυματομορφής από τα δεδομένα μέτρησης.

5.10 Συνδεσμολογία δοκιμής

Στη συγκεκριμένη δοκιμή τα δεδομένα από τον στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target – Pellegrini) χρησιμοποιούνται ως δεδομένα αναφοράς και στη συνέχεια συγκρίνονται με τα διορθωμένα δεδομένα που έχουν μετρηθεί από τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος.

Το διάγραμμα της συνδεσμολογίας για την δοκιμή είναι το εξής:



Σχήμα 5-8: Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της μέτρησης του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος και της άμεσης μέτρησης με τον στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης^[37]

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη δοκιμή είναι ο ακόλουθος:

- Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B Digital Phosphor Oscilloscope



Εικόνα 5-1: Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B Digital Phosphor Oscilloscope

- Μετασχηματιστής έντασης ρεύματος FCC F-65 Current Monitor Probe



Εικόνα 5-2: Μετασχηματιστής έντασης ρεύματος FCC F-65

- Στόχος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target) TESEQ MD 103.



Εικόνα 5-3: Στόχος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target) TESEQ MD 103

- Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq / Schaffner NSG 433 ESD Simulator Gun [38]



Εικόνα 5-4: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq / Schaffner NSG 433

- Τάση εκκένωσης (αέρα): 2 - 18 kV
 - Τάση εκκένωσης (επαφή): 2 - 9 kV
 - Πολικότητα: Θετική ή αρνητική (επιλέξιμη)
 - Τρόποι λειτουργίας: Μεμονωμένη η επαναλαμβανόμενη εκκένωση
 - Test Finger: Συμμόρφωση με το πρότυπο IEC 801-2
 - Μέγιστη ενέργεια εκκένωσης: 47 mJ
 - Χρόνος ανόδου (αέρα): < 1 ns για τάσεις 8 kV
 - Χρόνος ανόδου (επαφή): 0.7 - 1 ns
 - Τροφοδοσία: AC power supply ή rechargeable battery pack
- Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq / Schaffner NSG 438 ESD Simulator [39]



Εικόνα 5-5: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης Teseq / Schaffner NSG 438

- Τάση εκκένωσης (αέρα): 200 V - 30 kV (με βήμα 100 V)
 - Τάση εκκένωσης (επαφή): 200 V - 30 kV (με βήμα 100 V)
 - Πολικότητα: Θετική / αρνητική / αυτόματη αλλαγή
 - Τρόποι λειτουργίας: Μεμονωμένη εκκένωση / επαναλαμβανόμενη εκκένωση / τυχαία εκκένωση (χρόνος / παλμός)
- Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EM Test Dito ESD Simulator [40]



Εικόνα 5-6: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EM Test Dito

- Τάση εκκένωσης (αέρα): 500 V – 16,5 kV (με βήμα 100 V)
 - Τάση εκκένωσης (επαφή): 500 V - 10 kV (με βήμα 100 V)
 - Πολικότητα: Θετική / αρνητική
 - Τρόποι λειτουργίας: Μεμονωμένη εκκένωση / συνεχής εκκένωση / απομακρυσμένος έλεγχος μέσω προγράμματος
- Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EMC Partner EXT-TRA3000 E (σύνδεση στη βασική μονάδα EMC Partner TRA3000) [41]



Εικόνα 5-7: Γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης EMC Partner EXT-TRA3000 E

5.11 Εκτέλεση δοκιμής

Για κάθε μία από τις τέσσερις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης πραγματοποιήθηκαν πέντε μετρήσεις σε κάθε επίπεδο τάσεων των 2 kV, 4 kV, 6 kV και 8 kV (όπως φαίνονται και στον Πίνακα 5-4) και τα αποτελέσματα των κυματομορφών που καταγράφηκαν από τον παλμογράφο αποθηκεύτηκαν σε υπολογιστή για την μετέπειτα επεξεργασία τους. Σε κάθε μέτρηση γινόταν καταγραφή των κυματομορφών στα δύο κανάλια του παλμογράφου. Το Κανάλι 1 ήταν συνδεδεμένο με το στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target) TESEQ MD 103, ενώ το Κανάλι 2 ήταν συνδεδεμένο με τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (current probe).

Ανάλογα με το επίπεδο τάσης της εκάστοτε δοκιμής, πραγματοποιούταν αλλαγή στη ρύθμιση Volts / div του παλμογράφου, με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση της κυματομορφής. Συνεπώς, για τις δοκιμές στο επίπεδο τάσης των:

- 2 kV επιλεγόταν η κλίμακα 100 mV / div.
- 4 kV επιλεγόταν η κλίμακα 200 mV / div.

- 6 kV επιλεγόταν η κλίμακα 500 mV / div.
- 8 kV επιλεγόταν η κλίμακα 500 mV / div.

5.12 Επεξεργασία μετρήσεων

Μετά την εκτέλεση των μετρήσεων για τις τέσσερις γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, για κάθε επίπεδο τάσης υπάρχουν πέντε μετρήσεις, κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από δύο αρχεία. Τα αρχεία αυτά είναι οι μετρήσεις από το Κανάλι 1 του παλμογράφου, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με το στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target) TESEQ MD 103, και από το Κανάλι 2 το οποίο ήταν συνδεδεμένο με τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (current probe). Το γεγονός ότι πραγματοποιείται μέτρηση από τα δύο κανάλια του παλμογράφου, καθιστά αναγκαία την ολίσθηση των τιμών του αρχείου που αποθηκεύεται από το Κανάλι 2 (μετασχηματιστής έντασης ρεύματος – current probe), με στόχο την επίτευξη κοινής «συμπεριφοράς» των δύο κυματομορφών.

Στη συνέχεια το αρχείο μετρήσεων από το Κανάλι 1 και το τροποποιημένο αρχείο μετρήσεων από το Κανάλι 2, εισάγονται ως είσοδοι σε ένα πρόγραμμα ανεπτυγμένο σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια, και από το οποίο υπολογίζονται οι απαιτούμενες τιμές.

5.13 Πρόγραμμα επεξεργασίας μετρήσεων σε MATLAB

Για την επεξεργασία των μετρήσεων από τις κυματομορφές που προέκυψαν από τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις σε κάθε επίπεδο τάσης και για κάθε γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αναπτύχθηκε πρόγραμμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB για την άμεση και αυτοματοποιημένη μέθοδο επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων αυτών. Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την τιμή του `detrend` που χρειάζεται σε κάθε επίπεδο τάσης ανάλογα και με την ρύθμιση Volts / div του παλμογράφου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το πρόγραμμα σε MATLAB.

Αρχικά το πρόγραμμα καλεί και φορτώνει αρχεία δεδομένων. Τα αρχεία αυτά περιέχουν τα δεδομένα του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος, την συνάρτηση μεταφοράς του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος, τις απώλειες καλωδίου καθώς και το βαθυπερατό φίλτρο που αποκόβει συχνότητες κάτω του 1 GHz.

```
clc;
```

```

close all;

clear all;

load('clamp.mat','ZZ_20M','cable_20M','time_pel');

load('6.mat','lowpass');

```

Στη συνέχεια καταχωρούνται στις αντίστοιχες μεταβλητές τα δεδομένα ρεύματος.

```

clamp_current_initial=xlsread('clamp_6_500mV_mod.csv','E1:E4000');

pelegrini_initial=xlsread('pele_6_500mV.csv','E1:E4000');

time2=(-79:3920)*50e-12;

timens=time2*10^9;

L=length(clamp_current_initial);

```

Έπειτα, οι τιμές των μεταβλητών ρεύματος πολλαπλασιάζονται επί δέκα, διότι στην είσοδο του παλμογράφου υπάρχει εξασθενητής (attenuator) της τάξεως των 20 dB.

```

clamp_current=clamp_current_initial*10;

pelegrini=pelegrini_initial*10;

```

Ο μετασχηματισμός Fourier για το ρεύμα εισόδου πραγματοποιείται με τις ακόλουθες εντολές:

```

fftcl=(fft(clamp_current,20000001)/(L/2));

```

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συνολική συνάρτηση μεταφοράς, η οποία προκύπτει από την συνέλιξη των υπόλοιπων συναρτήσεων:

```

H_cl=fftcl.*ZZ_20M.*ccable.*lowpass;

```

Για να υπολογιστεί το ρεύμα του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος από την αποσυνέλιξη, γίνεται αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier:

```

clamp_current_deconv=ifft(H_cl)*(L/2);

```

Ύστερα υπολογίζεται η απόκλιση (deviation) και υλοποιείται η διαδικασία detrend:

```

deviation=abs(mean(clamp_current_deconv(3920:4000)));

clamp_current_dtr=(ifft(fftcl)*(L/2))+1.69;

```

Έπειτα επαναλαμβάνεται μετασχηματισμός Fourier στο ρεύμα του μετασχηματιστή έντασης ρεύματος:

```
fftcl=(fft(clamp_current_dtr)/(L/2));  
H_cl=fftcl.*ZZ_20M.*ccable.*lowpass;  
clamp_current_deconv=ifft(H_cl)*(L/2);
```

Το ανακατασκευασμένο ρεύμα του μετασχηματιστή ένταση προκύπτει λαμβάνοντας τα πρώτα 4000 του πίνακα που προέκυψε από την αποσυνέλιξη και τα οποία περιέχουν στοιχεία:

```
clamp_current_reconstr=clamp_current_deconv(1:4000);
```

Ελέγχεται στη συνέχεια, η απόκλιση των σημείων ρεύματος μεταξύ των μετρήσεων από τον μετασχηματιστή ένταση ρεύματος και του στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης:

```
current_check=clamp_current_reconstr-pelegrini;  
deviation_final=abs(mean(current_check(3920:4000)));
```

Ύστερα, εμφανίζει ορισμένες κυματομορφές:

```
plot(time2,clamp_current_reconstr);  
  
hold on;  
  
plot (time2,pelegrini);  
  
hold off;
```

Για τον υπολογισμό και την εμφάνιση των ρευμάτων και των χαρακτηριστικών μεγεθών { Μέγιστο ρεύμα (I_{max}), Χρόνος ανόδου (t_r), Ρεύμα στα 30 ns (I_{30}), Ρεύμα στα 60 ns (I_{60}) και το φορτίο που μεταφέρθηκε} των κυματομορφών που μετρήθηκαν από τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος (current probe) και ορίζονται από το Πρότυπο IEC 61000-4-2, χρησιμοποιείται η υπολογιστική διαδικασία της γραμμικής παρεμβολής και οι εντολές είναι οι ακόλουθες.

Υπολογισμός φορτίου:

```
Charge=abs(trapz(clamp_current_reconstr,time2));
```

Υπολογισμός μέγιστου ρεύματος:

```
Ip=max(clamp_current_reconstr);
```

```
Ipdiv10=Ip/10;
```

```
Ip09=Ip*0.9;
```

Υπολογίζεται η χρονική στιγμή t που αντιστοιχεί στο I_{10} και πιο συγκεκριμένα το αμέσως μεγαλύτερο:

```
k=1;
```

```
while (clamp_current_reconstr(k)<Ipdiv10)
```

```
    k = k+1;
```

```
end
```

```
k10plus=k;
```

```
k10minus=k-1;
```

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η διαδικασία γραμμικής παρεμβολής για τον υπολογισμό του χρόνου που αντιστοιχεί I_{10} . Η ευθεία ορίζεται τα σημεία ($\text{timens}(k10minus)$, $\text{clamp_current_reconstr}(k10minus)$) και ($\text{timens}(k10plus)$, $\text{clamp_current_reconstr}(k10plus)$). Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το (time10amp , Ipdiv10) και η αντίστοιχη παράμετρος time10amp . Συνεπώς οι κατάλληλες εντολές είναι οι εξής:

```
klisil=(clamp_current_reconstr(k10plus) -  
clamp_current_reconstr(k10minus)) / (timens(k10plus) -  
timens(k10minus));
```

```
time10amp=timens(k10minus) + (Ipdiv10 -  
clamp_current_reconstr(k10minus))/klisil;
```

```
time30ns= time10amp + 30;
```

```
time60ns= time10amp + 60;
```

Εύρεση του I_{30} :

```
i=1;
```

```
while (timens(i)<time30ns)
```

```
    i=i+1;
```

```
end
```

```
i_30nsplus=i;
```

```
i_30nsminus=i-1;
```

Έπειτα, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή αντίστροφα, για τον υπολογισμό του ρεύματος που αντιστοιχεί στα 30 ns μετά το I_{10} . Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία ((timens(i_30nsminus) , clamp_current_reconstr (i_30nsminus)) και (timens(i_30nsplus) , clamp_current_reconstr (i_30nsplus)). Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το (time30ns , clamp_current_reconstr_30ns) και η αντίστοιχη παράμετρος clamp_current_reconstr_30ns. Συνεπώς οι κατάλληλες εντολές είναι οι εξής:

```
klisi2=(clamp_current_reconstr(i_30nsplus) -  
clamp_current_reconstr(i_30nsminus)) / (timens(i_30nsplus) -  
timens(i_30nsminus));  
  
clamp_current_reconstr_30ns= klisi2 * (time30ns-  
timens(i_30nsminus))+ clamp_current_reconstr(i_30nsminus);
```

Εύρεση του I_{60} :

```
i=1;  
  
while (timens(i)<time60ns)  
  
    i=i+1;  
  
end  
  
i_60nsplus=i;  
  
i_60nsminus=i-1;
```

Έπειτα, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή αντίστροφα, για τον υπολογισμό του ρεύματος που αντιστοιχεί στα 60 ns μετά το I_{10} . Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία ((timens(i_60nsminus) , clamp_current_reconstr (i_60nsminus)) και (timens(i_60nsplus) , clamp_current_reconstr (i_60nsplus)). Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το (time60ns , clamp_current_reconstr_60ns) και η αντίστοιχη παράμετρος clamp_current_reconstr_60ns. Συνεπώς οι κατάλληλες εντολές είναι οι εξής:

```
klisi3=(clamp_current_reconstr(i_60nsplus) -  
clamp_current_reconstr(i_60nsminus)) / (timens(i_60nsplus) -  
timens(i_60nsminus));  
  
clamp_current_reconstr_60ns= klisi3 * (time60ns-  
timens(i_60nsminus))+ clamp_current_reconstr(i_60nsminus);
```

Ύστερα, υπολογίζεται ο χρόνος ανόδου T_r , πρώτα υπολογίζεται όμως το I_{90} με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε το I_{10} .

```

k=1;

while (clamp_current_reconstr(k)<Ip09)

    k = k+1;

end

k90plus=k;

k90minus=k-1;

```

Έπειτα, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή αντίστροφα, για τον υπολογισμό του ρεύματος που αντιστοιχεί στο I_{90} . Η ευθεία ορίζεται από τα σημεία ($\text{timens}(k90\text{minus})$, $\text{clamp_current_reconstr}(k90\text{minus})$) και ($\text{timens}(k90\text{plus})$, $\text{clamp_current_reconstr}(k90\text{plus})$). Το σημείο ενδιαφέροντος είναι το ($\text{time}90\text{amp}$, I_{p09}) και η αντίστοιχη παράμετρος $\text{time}90\text{amp}$. Συνεπώς οι κατάλληλες εντολές είναι οι εξής:

```

klisi4=(clamp_current_reconstr(k90plus) -
clamp_current_reconstr(k90minus)) / (timens(k90plus) -
timens(k90minus));

time90amp=timens(k90minus) + (Ip09 -
clamp_current_reconstr(k90minus))/klisi4;

```

Ο χρόνος ανόδου είναι:

```

rise_time= time90amp - time10amp;

```

Τελικά, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών:

```

disp('-----')
disp('-----')

fprintf('deconv values\n');

fprintf('Imax = %g A\n',Ip);

fprintf('Rise time = %g ns\n',rise_time);

fprintf('I_30ns = %g A\n',clamp_current_reconstr_30ns);

fprintf('I_60ns = %g A\n',clamp_current_reconstr_60ns);

```



```

fprintf('Charge transfered = %g C\n',Charge);

disp('-----')
----- ')

```

Οι ίδιες διαδικασίες χρησιμοποιούνται και για τα αντίστοιχα μεγέθη τα οποία μετρήθηκαν μέσω του στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target) TESEQ MD 103.

```

Charge_i=abs(trapz(pelegrini,time2));

Ip_i=max(pelegrini);

Ipdiv10_i=Ip_i/10;

Ip09_i=Ip_i*0.9;

m=1;

while (pelegrini(m)<Ipdiv10_i)

    m = m+1;

end

m10plus=m;

m10minus=m-1;

klisi1_i=(pelegrini(m10plus) - pelegrini(m10minus)) /
(timens(m10plus) - timens(m10minus));

time10amp_i=timens(m10minus) + (Ipdiv10_i-
pelegrini(m10minus))/klisi1_i;

time30ns_i= time10amp_i + 30;

time60ns_i= time10amp_i + 60;

i=1;

while (timens(i)<time30ns)

    i=i+1;

end

```

```

i_30nsplus=i;

i_30nsminus=i-1;

klisi2_i=(pelegrini(i_30nsplus) - pelegrini(i_30nsminus)) /
(timens(i_30nsplus) - timens(i_30nsminus));

pelegrini_30ns= klisi2_i * (time30ns-timens(i_30nsminus))+
pelegrini(i_30nsminus);

i=1;

while (timens(i)<time60ns)

    i=i+1;

end

i_60nsplus=i;

i_60nsminus=i-1;

klisi3_i=(pelegrini(i_60nsplus) - pelegrini(i_60nsminus)) /
(timens(i_60nsplus) - timens(i_60nsminus));

pelegrini_60ns= klisi3_i * (time60ns-timens(i_60nsminus))+
pelegrini(i_60nsminus);

k=1;

while (clamp_current_reconstr(k)<Ip09)

    k = k+1;

end

k90plus=k;

k90minus=k-1;

klisi4_i=(pelegrini(k90plus) - pelegrini(k90minus)) /
(timens(k90plus) - timens(k90minus));

time90amp=timens(k90minus) + (Ip09_i - pelegrini(k90minus))/klisi4_i;

rise_time_i= time90amp - time10amp;

disp('-----
----- ')

```

```

fprintf('original values\n');

fprintf('Imax = %g A\n',Ip_i);

fprintf('Rise time = %g ns\n',rise_time_i);

fprintf('I_30ns = %g A\n',pelegrini_30ns);

fprintf('I_60ns = %g A\n',pelegrini_60ns);

fprintf('Charge transfered = %g C\n',Charge_i);

disp('-----
----- ')

```

Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα, για κάθε μέτρηση ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και δίνοντας ως είσοδο τα αντίστοιχα δεδομένα που έχουν μετρηθεί από τον παλμογράφο, δίνονται διάφορες τιμές detrend με κριτήριο ελέγχου η τιμή της απόκλισης (deviation) να γίνει μικρότερη από 0,005 ($< 5 \times 10^{-3}$).

Όταν επιτευχθεί αυτή η συνθήκη, καταγράφονται τα αποτελέσματα του προγράμματος.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

5.14 Αποτελέσματα προγράμματος σε MATLAB

Μετά την εκτέλεση του προγράμματος για όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τις δοκιμές, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Imax	Rise Time	I_30ns	I_60ns	Charge Transferred
NSG 438	2kV	1	0.4	6.84486	1.24052	3.27154	2.75247	2.94E-07
		2	0.34	6.66976	1.24433	3.20743	2.57147	2.69E-07
		3	0.37	6.85639	1.29122	3.13489	2.6888	2.70E-07
		4	0.43	6.68173	1.21059	3.69076	2.68537	2.68E-07
		5	0.34	6.67301	1.26569	3.11277	2.63798	2.65E-07
	4kV	1	0.86	13.4477	1.24059	7.05068	5.43094	5.54E-07
		2	0.88	13.7093	1.29422	7.07884	5.45561	5.49E-07
		3	0.84	13.7364	1.24926	7.03152	5.58872	5.85E-07

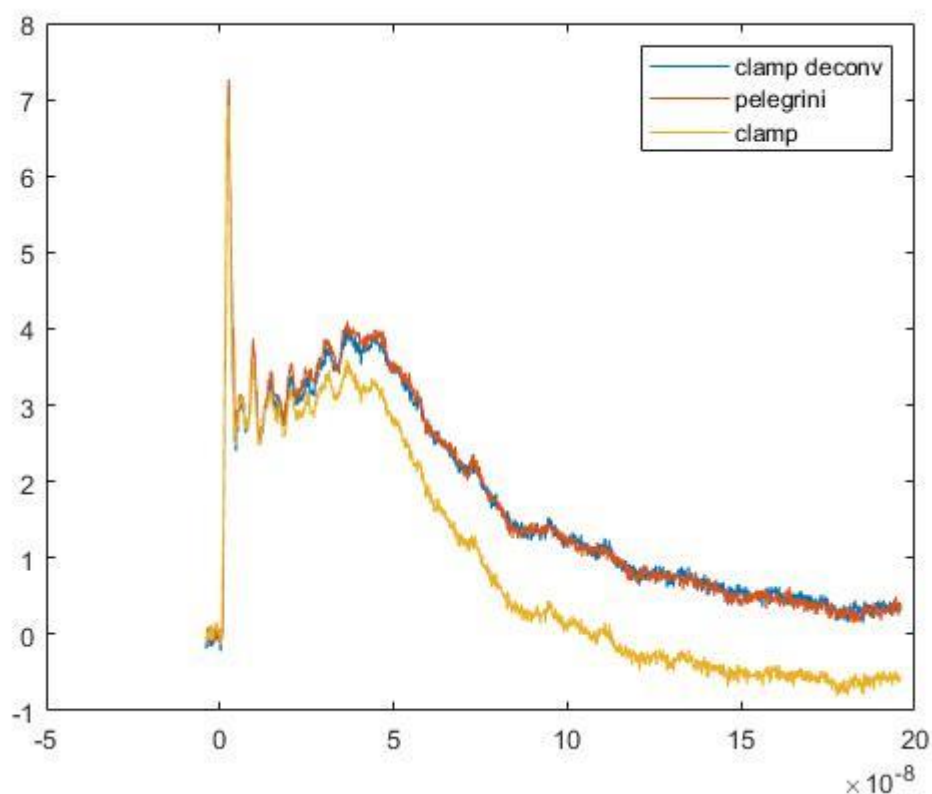
		4	0.76	13.7836	1.2018	6.51627	5.62084	5.54E-07
		5	0.86	13.4603	1.24169	7.0459	5.37746	5.57E-07
	6kV	1	1.14	20.476	1.20152	10.5483	8.40824	8.50E-07
		2	1.06	20.2998	1.22237	10.029	8.1283	8.74E-07
		3	1.25	20.1063	1.13429	10.6637	8.24439	7.51E-07
		4	1.06	20.1288	1.20362	10.1624	8.39829	8.49E-07
		5	1.11	20.2168	1.19386	10.1064	8.01508	8.16E-07
	8kV	1	1.4	26.513	1.15263	13.9068	10.9743	1.10E-06
		2	1.81	26.1901	1.16033	14.1427	11.4424	1.06E-06
		3	1.55	27.0415	1.20379	13.4252	11.1934	1.12E-06
		4	1.32	26.5737	1.15913	13.9613	10.7778	1.09E-06
		5	1.44	27.2819	1.30083	13.6651	11.0511	1.10E-06

Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
NSG 438	2kV	1	0.4	7.24	1.13259	3.40079	2.72073	2.63E-07
		2	0.34	7.36813	1.22915	3.52534	2.65343	2.85E-07
		3	0.37	7.575	1.29733	3.43783	2.831	2.81E-07
		4	0.43	7.26	1.19959	3.8305	2.72115	2.61E-07
		5	0.34	7.46016	1.36157	3.44075	2.84396	2.65E-07
	4kV	1	0.86	14.5972	1.22878	7.10107	5.43254	5.56E-07
		2	0.88	14.8463	1.28735	7.39445	5.45752	5.52E-07
		3	0.84	14.8609	0.724337	7.5055	5.49291	5.76E-07
		4	0.76	15.0956	1.25163	6.94225	5.87154	5.75E-07
		5	0.86	14.6	1.34508	7.2321	5.57256	5.82E-07
	6kV	1	1.14	22.8016	1.57187	11.1365	8.32	9.17E-07
		2	1.06	22.0781	1.11873	10.1849	8.15408	9.38E-07
		3	1.25	21.9	0.593618	10.8808	8.5847	7.80E-07
		4	1.06	22.4633	1.15873	11.2067	8.60729	7.69E-07

		5	1.11	22.1766	1.21253	10.7962	8.55502	9.15E-07
	8kV	1	1.4	29.4086	1.2544	15.0115	11.4202	1.22E-06
		2	1.81	29.1	1.03807	15.0513	11.489	1.09E-06
		3	1.55	31.018	1.25269	14.3207	11.6047	1.23E-06
		4	1.32	30.7383	1.2117	14.8107	11.3695	1.24E-06
		5	1.44	29.5047	1.17121	14.3998	12.0206	1.23E-06

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438



Εικόνα 5-8: Γραφικά αποτελέσματα προγράμματος MATLAB για την ηλεκτροστατική γεννήτρια NSG 438 στο επίπεδο τάσης 2 kV.

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
NSG 433	2kV	1	0.42	7.02835	1.05348	44.39474	3.25302	3.09E-07
		2	0.47	7.13056	1.10826	4.51901	3.33995	2.94E-07
		3	0.45	7.22036	1.07794	4.57528	3.30486	3.10E-07
		4	0.47	7.17252	1.09238	4.50397	3.1854	3.07E-07

		5	0.45	7.11015	1.09854	4.52974	3.32639	2.92E-07
	4kV	1	0.95	13.2251	1.06667	9.42691	6.71629	6.04E-07
		2	1	13.5568	1.09702	8.79787	6.86361	5.89E-07
		3	0.93	13.362	1.09477	8.98669	6.40999	6.10E-07
		4	0.95	13.3335	1.06415	8.49798	7.12864	6.53E-07
		5	0.98	14.2693	1.1167	9.01054	6.80605	5.77E-07
	6kV	1	1.26	19.5504	1.05803	13.08	9.94016	9.21E-07
		2	1.56	20.2703	1.10709	13.1212	9.92516	8.78E-07
		3	1.29	19.8633	1.05208	13.0227	10.0534	8.14E-07
		4	1.45	20.4	1.13835	13.1911	10.1184	1.02E-06
		5	1.38	19.9904	1.04451	13.2129	9.3487	8.36E-07
	8kV	1	1.91	27.1669	1.12954	17.2509	13.2802	1.20E-06
		2	1.88	26.7345	1.06101	17.0022	13.6637	1.13E-06
		3	1.9	26.5503	1.09706	17.9802	13.2507	1.16E-06
		4	1.84	27.2977	1.10089	17.0143	14.3095	1.23E-06
		5	2.02	26.8041	1.08277	18.7102	13.627	1.17E-06

Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I_{max}	Rise Time	I_{30ns}	I_{60ns}	Charge Transferred
NSG 433	2kV	1	0.42	8.26094	1.00611	4.72427	3.24803	3.16E-07
		2	0.47	8.61313	1.12467	4.64881	3.47821	3.04E-07
		3	0.45	8.55094	1.01565	4.78261	3.34778	3.00E-07
		4	0.47	8.39391	1.02397	4.70574	3.33737	3.01E-07
		5	0.45	8.64641	1.10885	4.7092	3.38339	3.15E-07
	4kV	1	0.95	16.28	0.955952	9.67455	6.67873	6.24E-07
		2	1	16.8366	1.08104	9.14366	6.95767	6.27E-07
		3	0.93	16.12	1.11625	9.31744	6.5963	6.32E-07
		4	0.95	16.0109	0.818004	8.95509	7.40036	6.35E-07
		5	0.98	17.0319	1.03731	9.33336	6.84571	6.67E-07

	6kV	1	1.26	23.8406	0.87493	13.9526	10.4485	1.04E-06
		2	1.56	24.5695	1.07656	13.7994	10.1212	8.41E-07
		3	1.29	23.8906	0.887401	13.9224	10.2569	9.66E-07
		4	1.45	24.0156	1.03752	13.8744	9.77095	9.11E-07
		5	1.38	24.4	1.11646	13.7893	10.2358	9.49E-07
	8kV	1	1.91	32.2625	0.863463	17.8976	13.8289	1.21E-06
		2	1.88	32.3109	1.06032	17.7752	13.7486	1.16E-06
		3	1.9	33	1.15633	18.503	13.189	1.20E-06
		4	1.84	32.4867	1.03277	18.2295	14.4436	1.21E-06
		5	2.02	32	1.10568	19.4308	13.7389	1.22E-06

Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
TRANSIENT 3000	2kV	1	0.56	8.18577	1.02791	3.75769	3.14862	2.47E-07
		2	0.52	7.26424	1.06342	3.61158	3.02025	2.48E-07
		3	0.58	7.38624	1.04261	3.73037	3.10356	2.28E-07
		4	0.49	7.34521	1.0542	3.66108	3.03705	2.57E-07
		5	0.42	7.16273	1.02766	3.47258	3.06464	2.46E-07
	4kV	1	1.12	14.2592	1.01161	7.28299	5.85459	4.60E-07
		2	0.97	14.9114	1.05948	6.9714	5.85441	4.96E-07
		3	0.87	13.7297	0.958276	6.47243	5.8832	4.59E-07
		4	0.94	14.7452	1.0098	7.05833	5.92801	4.45E-07
		5	0.85	13.7376	0.962534	7.00672	5.83178	4.91E-07
	6kV	1	1.23	21.212	1.05837	10.5202	8.57E+00	6.84E-07
		2	1.12	20.6361	0.938472	10.6586	8.84652	7.24E-07
		3	1.29	20.7576	0.94912	11.0718	8.73454	7.93E-07
		4	1.46	22.7761	0.974932	11.371	8.61904	8.48E-07
		5	1.28	21.3191	1.00028	9.69385	8.62558	7.66E-07
	8kV	1	1.31	28.094	0.994426	13.1364	11.3748	9.49E-07

		2	1.41	28.0708	0.964505	14.7313	11.4764	9.56E-07
		3	1.51	28.2122	0.995159	13.8204	11.1229	1.01E-06
		4	1.61	30.1942	1.03405	15.525	11.1013	1.01E-06
		5	1.42	28.3185	1.00541	13.6355	10.8229	1.02E-06

Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
TRANSIENT 3000	2kV	1	0.56	8.46E+00	1.0953	3.93946	3.31096	2.50E-07
		2	0.52	7.80578	0.568354	3.69349	3.02042	2.56E-07
		3	0.58	7.91125	0.764707	3.78065	3.10178	2.18E-07
		4	0.49	7.77531	1.0036	3.74537	3.00207	2.56E-07
		5	0.42	7.74	1.19433	3.48016	3.10229	2.86E-07
	4kV	1	1.12	15.3981	0.834786	7.18366	6.04329	4.93E-07
		2	0.97	15.84	1.0744	7.27861	6.16043	4.97E-07
		3	0.87	15.31	1.05748	6.96327	6.16695	4.98E-07
		4	0.94	15.7509	0.877819	7.55276	6.1564	5.18E-07
		5	0.85	15.2316	1.01006	7.30679	6.04001	5.16E-07
	6kV	1	1.23	22.6484	1.09285	10.8091	8.84346	7.97E-07
		2	1.12	22.8	0.736778	11.4145	8.9988	7.57E-07
		3	1.29	22.8078	0.974266	11.3934	9.19321	7.37E-07
		4	1.46	24.5453	1.10168	11.7956	9.66589	7.57E-07
		5	1.28	22.843	1.04317	10.4777	9.05388	7.95E-07
8kV	1	1.31	30.6813	0.792691	13.9919	11.6249	1.12E-06	
	2	1.41	30.4	2.7992	15.4535	12.0482	1.14E-06	
	3	1.51	30.125	1.04522	14.2112	11.4348	1.04E-06	
	4	1.61	32.8	1.09939	15.9118	11.623	1.02E-06	
	5	1.42	30.7477	1.11632	14.0145	11.6346	1.05E-06	

Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
DITO	2kV	1	0.4	6.86299	1.18367	4.27783	2.63053	2.59E-07
		2	0.42	6.94682	1.25132	4.18986	2.67252	2.92E-07
		3	0.39	6.69705	1.15848	4.08979	2.71548	2.65E-07
		4	0.4	6.45856	1.23315	4.1447	2.69337	2.87E-07
		5	0.37	7.25991	1.15916	4.04413	2.72299	2.95E-07
	4kV	1	0.93	13.9924	1.13509	8.68119	5.71037	5.69E-07
		2	0.84	13.6787	1.15578	8.52901	5.36031	5.68E-07
		3	0.88	13.767	1.20299	8.68633	5.49209	5.50E-07
		4	0.87	14.8951	1.1935	8.97014	5.54314	6.02E-07
		5	0.87	14.2944	1.14332	9.21919	5.60217	6.03E-07
	6kV	1	1.22	19.2991	1.17762	13.618	9.34E+00	9.34E-07
		2	1.17	21.1016	1.15944	13.745	8.30863	8.71E-07
		3	1.16	21.15	1.2031	13.9152	8.0815	9.17E-07
		4	1.17	20.9024	1.11615	13.9373	7.93857	8.80E-07
		5	1.11	20.8629	1.25994	13.9069	8.06876	8.89E-07
	8kV	1	1.48	27.7731	1.20242	18.8324	11.3027	1.23E-06
		2	1.56	28.0741	1.22879	18.7212	11.9615	1.12E-06
		3	1.55	27.8188	1.12435	18.7405	11.3847	1.28E-06
		4	1.54	28.1347	1.16802	18.9257	11.5885	1.28E-06
		5	1.48	27.624	1.1989	18.7866	11.1815	1.17E-06

Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα μετασηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
DITO	2kV	1	0.4	7.48E+00	1.22704	4.25427	2.66391	2.61E-07
		2	0.42	7.44	1.23918	4.2849	2.64862	3.00E-07

		3	0.39	7.38266	1.15226	4.2029	2.71807	2.87E-07
		4	0.4	6.90656	1.39272	4.19508	2.59823	2.82E-07
		5	0.37	7.58062	1.25454	4.254	2.82861	3.07E-07
	4kV	1	0.93	14.9209	1.37185	8.76834	5.61287	5.58E-07
		2	0.84	14.6925	1.13351	8.77072	5.5552	5.41E-07
		3	0.88	14.76	1.16668	9.04	5.52028	6.01E-07
		4	0.87	15.8197	1.13203	9.27463	5.56432	5.97E-07
		5	0.87	15.5509	1.18407	9.47972	5.49213	6.07E-07
	6kV	1	1.22	21.1719	1.15473	13.4989	9.38416	9.16E-07
		2	1.17	23.1	1.14384	14.2364	8.4264	8.44E-07
		3	1.16	22.8211	16.4403	14.3502	8.62925	8.55E-07
		4	1.17	23.4977	1.10087	14.2786	8.44168	8.56E-07
		5	1.11	22.0211	1.20707	14.3872	8.778	8.53E-07
	8kV	1	1.48	30.2	1.05904	19.228	11.1809	1.23E-06
		2	1.56	31.0773	1.22076	19.413	11.3002	1.22E-06
		3	1.55	30.3734	1.15593	18.7987	11.5875	1.25E-06
		4	1.54	31.2	1.39369	19.4212	11.5531	1.19E-06
		5	1.48	30.4	1.16916	19.1998	11.2116	1.23E-06

Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, υπολογίζεται η μέση τιμή του detrend για κάθε επίπεδο τάσης.

Επίπεδο Τάσης	Ρύθμιση Volts / div παλμογράφου	Μέση Τιμή Detrend
2 kV	100 mV / div	0.4345
4 kV	200 mV / div	0.9075
6 kV	500 mV / div	1.2385
8 kV	500 mV / div	1.597

Πίνακας 5-13: Αποτελέσματα Detrend

5.15 Τροποποιημένος κώδικας προγράμματος για αντίσταση καλωδίου

Σε μία τροποποίηση του κώδικα του προγράμματος σε MATLAB, αυξάνονται οι απώλειες του καλωδίου. Προστίθενται δηλαδή, οι εξής εντολές:

```
ccable=cable_20M;
ccable(2:20000001)=0.05+cable_20M(2:20000001);
```

Το τροποποιημένο αυτό πρόγραμμα εκτελέστηκε για ορισμένα επίπεδα και γεννήτριες ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
NSG 438	8kV	1	1.29	27.9182	1.16579	14.609	11.4044	1.14E-06
		2	1.69	27.6028	1.17185	14.8575	11.8154	1.11E+00
		3	1.43	28.4719	1.21919	14.0379	11.6251	1.16E-06
		4	1.2	27.9816	1.1766	14.6408	11.1937	1.14E-06
		5	1.32	28.7748	1.31549	14.316	11.4811	1.15E-06

Πίνακας 5-14: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
NSG 438	8kV	1	1.29	29.4086	1.203	14.9834	11.4611	1.22E-06
		2	1.69	29.1	1.05464	15.0008	11.4468	1.09E-06
		3	1.43	31.018	1.27356	14.265	11.5102	1.23E-06
		4	1.2	30.7383	1.23757	14.7143	11.446	1.24E-06
		5	1.32	29.5047	1.19007	14.3993	11.9651	1.23E-06

Πίνακας 5-15: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 438

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
NSG 433	6kV	1	1.12	20.6488	1.06773	13.6639	10.2903	9.63E-07

		2	1.42	21.385	1.11256	13.7256	10.268	9.17E-07
		3	1.14	20.9595	1.05932	13.646	10.4111	8.51E-07
		4	1.31	21.5281	1.14646	13.793	10.4327	1.06E-06
		5	1.25	21.0933	1.05062	13.8153	9.68382	8.73E-07

Πίνακας 5-16: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I_{max}	Rise Time	I_{30ns}	I_{60ns}	Charge Transferred
NSG 433	6kV	1	1.12	23.8406	0.887093	14.0331	10.4506	1.04E-06
		2	1.42	24.5695	1.08554	13.7995	10.1382	8.41E-07
		3	1.14	23.8906	0.896901	13.9597	10.2371	9.66E-07
		4	1.31	24.0156	1.04799	13.8423	9.76326	9.11E-07
		5	1.25	24.4	1.12564	13.7903	10.2672	9.49E-07

Πίνακας 5-17: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG 433

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I_{max}	Rise Time	I_{30ns}	I_{60ns}	Charge Transferred
TRANSIENT 3000	4kV	1	1.04	15.0022	1.01746	7.58909	6.04634	4.81E-07
		2	0.88	15.683	1.0654	7.25681	6.04963	5.19E-07
		3	0.78	14.4987	0.958613	6.74043	6.10378	4.81E-07
		4	0.84	15.4953	1.01442	7.3438	6.13903	4.66E-07
		5	0.77	14.4582	0.971853	7.3106	6.02203	5.14E-07

Πίνακας 5-18: Αποτελέσματα μετασχηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I_{max}	Rise Time	I_{30ns}	I_{60ns}	Charge Transferred
TRANSIENT 3000	4kV	1	1.04	15.3981	0.844732	7.17315	6.04373	4.93E-07
		2	0.88	15.84	1.0854	7.27393	6.16187	4.97E-07
		3	0.78	15.31	1.08017	6.96949	6.18018	4.98E-07

		4	0.84	15.7509	0.887233	7.57388	6.15329	5.18E-07
		5	0.77	15.2316	1.02447	7.29292	6.0193	5.16E-07

Πίνακας 5-19: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης TRANSIENT 3000

				Clamp Modulated				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
DITO	2kV	1	0.38	7.23315	1.19505	4.4975	2.70732	2.69E-07
		2	0.4	7.32035	1.26322	4.39913	2.77085	3.03E-07
		3	0.37	7.06409	1.1678	4.28654	2.81392	2.75E-07
		4	0.38	6.80388	1.24028	4.33795	2.79503	2.99E-07
		5	0.35	7.65176	1.16356	4.23903	2.80442	3.07E-07

Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα μετασηματιστή έντασης ρεύματος για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO

				Pellegrini				
Γεννήτρια Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης	Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	I _{max}	Rise Time	I _{30ns}	I _{60ns}	Charge Transferred
DITO	2kV	1	0.38	7.48E+00	1.2453	4.24395	2.67555	2.61E-07
		2	0.4	7.44	1.25686	4.27573	2.6542	3.00E-07
		3	0.37	7.38266	1.16831	4.2054	2.71889	2.87E-07
		4	0.38	6.90656	1.40973	4.19726	2.60743	2.82E-07
		5	0.35	7.58062	1.27169	4.24478	2.83611	3.07E-07

Πίνακας 5-21: Αποτελέσματα στόχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης για τη γεννήτρια ηλεκτροστατικής εκφόρτισης DITO

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον υπολογισμό της ποσοστιαίας μεταβολής των τιμών που υπολογίσθηκαν από τον μετασηματιστή έντασης ρεύματος συγκριτικά με τις τιμές που μετρήθηκαν από το στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, οι οποίες θεωρούνται ως τιμές αναφοράς.

NSG 438

Αρχικό πρόγραμμα:

	Clamp Modulated
--	------------------------

Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
8 kV	1	1.4	-9.8461	-8.11304	-7.35902	-3.90449	-1.02E+01
	2	1.81	-9.99966	11.77763	-6.03669	-0.40561	-2.80E+00
	3	1.55	-12.82	-3.9036	-6.25319	-3.54425	-9.60E+00
	4	1.32	-13.5486	-4.33853	-5.73504	-5.20427	-1.18E+01
	5	1.44	-7.53371	11.06719	-5.10215	-8.06532	-1.06E+01

Πίνακας 5-22: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 438

Τροποποιημένο πρόγραμμα (με απώλειες καλωδίου):

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
8 kV	1	1.29	-5.06791	-3.0931	-2.49877	-0.49472	-6.50E+00
	2	1.69	-5.14502	11.11374	-0.95528	3.220114	1.01E+08
	3	1.43	-8.20846	-4.26914	-1.59201	0.998245	-5.82E+00
	4	1.2	-8.96829	-4.92659	-0.49951	-2.20426	-8.17E+00
	5	1.32	-2.47384	10.53888	-0.5785	-4.0451	-6.83E+00

Πίνακας 5-23: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 438

NSG 433

Αρχικό πρόγραμμα:

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
6 kV	1	1.26	-17.9954	20.92739	-6.25403	-4.8652	-1.11E+01
	2	1.56	-17.4981	2.835885	-4.91471	-1.93692	4.44E+00

	3	1.29	-16.8573	18.55745	-6.46225	-1.98403	-1.57E+01
	4	1.45	-15.0552	9.718367	-4.9249	3.555949	1.15E+01
	5	1.38	-18.0721	-6.44448	-4.18005	-8.66664	-1.19E+01

Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 433

Τροποποιημένο πρόγραμμα (με απώλειες καλωδίου):

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
6 kV	1	1.12	-13.3881	20.3628	-2.63092	-1.53388	-7.09E+00
	2	1.42	-12.9612	2.489084	-0.53553	1.280306	9.07E+00
	3	1.14	-12.2688	18.10891	-2.24718	1.6997	-1.19E+01
	4	1.31	-10.3579	9.396082	-0.35615	6.856726	1.65E+01
	5	1.25	-13.552	-6.66465	0.181287	-5.68198	-7.96E+00

Πίνακας 5-25: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας NSG 433

TRANSIENT 3000

Αρχικό πρόγραμμα:

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
4 kV	1	1.12	-7.39637	21.18196	1.382721	-3.12247	-6.67E+00
	2	0.97	-5.86237	-1.38868	-4.22072	-4.96751	-1.26E-01
	3	0.87	-10.322	-9.38117	-7.04899	-4.60114	-7.79E+00
	4	0.94	-6.38503	15.0351	-6.54635	-3.7098	-1.40E+01
	5	0.85	-9.80856	-4.70527	-4.10673	-3.44751	-4.75E+00

Πίνακας 5-26: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας TRANSIENT 3000

Τροποποιημένο πρόγραμμα (με απώλειες καλωδίου):

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
4 kV	1	1.04	-2.5711	20.44767	5.798568	0.043185	-2.44E+00
	2	0.88	-0.99116	-1.84264	-0.23536	-1.82152	4.51E+00
	3	0.78	-5.29915	-11.2535	-3.28661	-1.23621	-3.51E+00
	4	0.84	-1.62276	14.33524	-3.03781	-0.23175	-9.99E+00
	5	0.77	-5.0776	-5.13602	0.242427	0.045354	-3.33E-01

Πίνακας 5-27: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας
TRANSIENT 3000

DITO

Αρχικό πρόγραμμα:

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
4 kV	1	0.4	-8.20E+00	-3.53452	0.553797	-1.25305	-1.01E+00
	2	0.42	-6.63E+00	0.97968	-2.21802	0.902357	-2.65E+00
	3	0.39	-9.29E+00	0.539809	-2.69124	-0.09529	-7.83E+00
	4	0.4	-6.49E+00	-11.4574	-1.20093	3.661724	1.97E+00
	5	0.37	-4.23E+00	-7.60279	-4.93347	-3.73399	-3.72E+00

Πίνακας 5-28: Αποτελέσματα αρχικού προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας DITO

Τροποποιημένο πρόγραμμα (με απώλειες καλωδίου):

			Clamp Modulated				
Επίπεδο	Αριθμός Κρούσης	Detrend	Μεταβολή I _{max} [%]	Μεταβολή Rise Time [%]	Μεταβολή I _{30ns} [%]	Μεταβολή I _{60ns} [%]	Μεταβολή Charge Transferred [%]
2 kV	1	0.38	-3.24E+00	-4.03517	5.974387	1.187419	2.89E+00

	2	0.4	-1.61E+00	0.506023	2.886057	4.394921	1.24E+00
	3	0.37	-4.32E+00	-0.04365	1.929424	3.495176	-4.18E+00
	4	0.38	-1.49E+00	-12.02	3.351949	7.194824	6.01E+00
	5	0.35	9.38E-01	-8.50286	-0.13546	-1.11738	1.08E-01

Πίνακας 5-29: Αποτελέσματα τροποποιημένου προγράμματος ηλεκτροστατικής γεννήτριας DITO

Από τις παραπάνω τιμές, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το τροποποιημένο πρόγραμμα, στο οποίο οι απώλειες καλωδίου εκτιμώνται μεγαλύτερες από ότι στο αρχικό πρόγραμμα, παράγει αποτελέσματα σχετικά με το μέγιστο ρεύμα I_{max} με λιγότερη απόκλιση από τις τιμές μέγιστου ρεύματος που μετρήθηκαν από τον στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτιση και αποτελούν τις τιμές αναφοράς. Συνεπώς, το τροποποιημένο πρόγραμμα προσφέρει μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.16 Συμπεράσματα δοκιμής

Με αυτή τη μέθοδο αντιστάθμισης της απόκρισης της συχνότητας προσφέρεται η δυνατότητα στους μηχανικούς να χρησιμοποιούν μετασχηματιστές έντασης ρεύματος (current probes) σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου και ειδικότερα σε μετρήσεις στις οποίες χρειάζεται να καταγράφεται το ρεύμα κατά τη διάρκεια φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

Ειδικότερα, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ακριβής απεικόνιση της κυματομορφής του ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, καθώς χωρίς την μέθοδο της αντιστάθμισης τα δεδομένα της «ουράς» της κυματομορφής του ρεύματος δεν ανταποκρίνονται στο πραγματικό ρεύμα και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διαδικασία του detrend, η τιμή του οποίου υπολογίζεται για κάθε επίπεδο φόρτισης.

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά μελετήθηκε η διαδικασία διεξαγωγής διακρίβωσης εξοπλισμού δοκιμών για δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σε εξοπλισμό φωτισμού με βάση το πρότυπο CISPR 16-1-4 [19]. Οι συγκεκριμένες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π και αποτελούν τη βάση για μελλοντική σύνταξη αναλυτικής τεχνικής οδηγίας για τη διεξαγωγή τους. Η επιλογή των περιπτώσεων και των διατάξεων που μελετήθηκαν βασίστηκε τόσο στο πρότυπο CISPR 16-1-4 όσο και σε πιστοποιητικά από διαπιστευμένα εργαστήρια διακρίβωσης του εξωτερικού.

Κατά την πειραματική διεξαγωγή της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η διακρίβωση παραμέτρων που παρουσιάζονται στο Πρότυπο και αφορούν τη διακρίβωση του συντελεστή επικύρωσης για κάθε μία από τις τρεις κεραίες μεγάλου βρόχου που απαρτίζουν το σύστημα κεραιών μεγάλου βρόχου. Μέσω αυτών των πειραματικών διατάξεων και μελετώντας διεξοδικά όχι μόνο το Πρότυπο αλλά και πιστοποιητικά διακρίβωσης διαπιστευμένων εργαστηρίων διακρίβωσης συντάχθηκε το κεφάλαιο για την μελέτη της δοκιμής αυτής. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μελέτη για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στα πλαίσια αυτής της διαδικασίας διακρίβωσης, όπως ορίζονται από το πρότυπο EN 55016-4-2:2011/A2:2018 [28].

Η σημασία της δοκιμής αυτής για το ίδιο το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου είναι ιδιαίτερα σημαντική. Το εργαστήριο μέσω αυτής της διαδικασίας διακρίβωσης, είναι σε θέση να ελέγξει και να διακριβώσει τον εξοπλισμό του, δηλαδή το σύστημα των κεραιών μεγάλου βρόχου. Αυτό συνεπάγεται την άμεση μείωση χρόνου αλλά και κόστους, καθώς η διαδικασία για την διακρίβωση του συγκεκριμένου συστήματος δεν ανατίθεται σε κάποιο άλλο εργαστήριο, γεγονός που θα σήμαινε χρηματικό κόστος καθώς και χρονική καθυστέρηση, διότι τα εργαστήρια αυτά βρίσκονται κυρίως σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες.

Στη συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε η διαδικασία με την οποία μπορεί να καταγραφεί το ρεύμα μιας δοκιμής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης από έναν μετασχηματιστή έντασης ρεύματος. Η σύνθετη αντίσταση μεταφοράς ενός μετασχηματιστή έντασης ρεύματος δεν είναι σταθερή μέσα στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του. Δεδομένου ότι βασίζεται στην επαγωγή, θα υποφέρει από μειωμένη ευαισθησία σε χαμηλότερες συχνότητες. Για το λόγο αυτό, ένας μετασχηματιστής έντασης ρεύματος δεν

μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου, καθώς μπορεί να προκαλέσει σοβαρή παραμόρφωση της κυματομορφής.

Αναλύθηκε, συνεπώς, μια διαδικασία απλής αντιστάθμισης της απόκρισης συχνότητας, η οποία επιτρέπει την χρήση μετασχηματιστών έντασης ρεύματος (current probes) σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου του μεταβατικού ρεύματος και του συνολικού φορτίου που μεταφέρθηκε κατά την διάρκεια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Μελετήθηκε ακόμη η τιμή του detrend που απαιτείται για κάθε επίπεδο φόρτισης των ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, για την ακριβέστερη ανάκτηση της κυματομορφής του ρεύματος από τον μετασχηματιστή έντασης ρεύματος.

Κεφάλαιο 7: Η επόμενη μέρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία αρχική προσέγγιση της διαδικασίας διακρίβωσης του συστήματος κεραιών μεγάλου βρόχου. Η εργασία αυτή δύναται να αποτελέσει τη βάση για τη συγγραφή μιας τεχνικής οδηγίας για τη διακρίβωση εξοπλισμού δοκιμών σύμφωνα με το Πρότυπο CISPR 16-1-4 στα πλαίσια της διαπίστευσης του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων κατά ISO 17025.

Ως μία πρόσθετη διαδικασία για την εξασφάλιση της ορθότητας της συγκεκριμένης διαδικασίας διακρίβωσης, το σύστημα κεραιών μεγάλου βρόχου που διαθέτει το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, μπορεί να συμμετάσχει σε διαδικασίες διεργαστηριακών δοκιμών για την σύγκριση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας διακρίβωσης. Σε μελλοντικές διπλωματικές εργασίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό λογισμικό πρόγραμμα για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας με άλλες εντολές και ροή προγράμματος, όπως επίσης και η μελέτη χρήσης ενός αυτοματοποιημένου μηχανισμού περιστροφής του διπόλου επαλήθευσης.

Η μέθοδος αντιστάθμισης της απόκρισης της συχνότητας που μελετήθηκε, θα χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές δοκιμές σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2 [32], με σκοπό να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές έντασης ρεύματος (current probes) σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου και να καταγραφεί το ρεύμα κατά τη διάρκεια φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, χωρίς τον στόχο ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (ESD target - Pellegrini target). Μελλοντικές εργασίες είναι δυνατόν να επικεντρωθούν στη μελέτη αβεβαιότητας της συγκεκριμένης μεθόδου.

Βιβλιογραφία

- [1] Henry W.OTT, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons Inc. Publication, August 2009.
- [2] Paul A. Chatterton, Michael A. Houlden, "Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό", Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [3] ANSI C63.14 – 1998, "Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC), Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD)".
- [4] Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons Inc. Publication, Second Edition, 2009.
- [5] Δεληπαλαδάκη Β. Φανή, "Διακρίβωση εξοπλισμού για δοκιμές ατρωσίας σε βυθίσεις, σύντομες διακοπές και διακυμάνσεις τάσης", Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος 2017, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [6] Tim Williams, "Measurement techniques and test methods: developments, costs and options", Elmac Services, ERA conference "EMC 94 - The Clock is Ticking - Countdown to Compliance", 24th February 1994, ERA Report 940092.
- [7] Ευθύμιος Θ. Τσαρούχης, "EMC Εξοπλισμού ηλεκτρικής ισχύος – Το πρότυπο EN 61000-04-05", Διπλωματική εργασία, Φεβρουάριος 2004, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [8] Dag Bjoerkloef, "EMC Standards and Their Application", 1999 Annual Reference, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.ce-mag.com/99ARG/EMCStandards61.html>
- [9] EMTEST "The structure of EMC standards", διαθέσιμο στη διεύθυνση: http://www.emtest.com/fr/what_is/standards.php
- [10] Κωνσταντίνος Ν. Ζακούλας, "Ανάπτυξη λογισμικού αυτοματοποίησης διαδικασιών διακρίβωσης εξοπλισμού ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας", Διπλωματική εργασία, Ιούλιος 2010, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [11] Donald R. Bush, "A Brief History of EMC Measurements", dBi Corp. (Winchester, KY), Compliance Engineering Conference, 1999.
- [12] Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 5: Surge Immunity Test.

- [13] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, “Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα”, Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων.
- [14] A United States Defense Standard, often called a military standard, «MILSTD», or «MIL-SPEC», is used to help achieve standardization objectives by the U.S. Department of Defense.
- [15] Σοφία Κ. Παπάζογλου, “Διακρίβωση Οργάνων και Συγκρότηση ενός Σύγχρονου Εργαστηρίου Διακρίβωσης Οργάνων”, Διπλωματική εργασία, Δεκέμβριος 2011, Τομέας Επικοινωνιών Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ.
- [16] ISO GUIDE 99:1993, “International vocabulary of basic and general terms in metrology”, International Organization for Standardization, 2nd edition, 1993.
- [17] ISO GUIDE 98:1993, “Guide to the expression of uncertainty in measurement”, International Organization for Standardization, 1st edition, 1993.
- [18] Schaffner “Electromagnetic compatibility of lighting equipment”, διαθέσιμο στη διεύθυνση:
https://www.schaffner.com/fileadmin/media/downloads/application_note/Schaffner_A_N_Lighting_equipment.pdf
- [19] European Norm (EN) 55015, Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment (CISPR 15:2013 + IS1:2013 + IS2:2013).
- [20] International Electrotechnical Commission (IEC) Comité international Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) 16-1-4, Edition 4.0 (2019-01), Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements.
- [21] Εγχειρίδιο προδιαγραφών γεννήτριας Rohde & Schwarz SMB 100A Microwave Signal Generator.
- [22] Εγχειρίδιο προδιαγραφών παλμογράφου Tektronix MDO 3054 Mixed Domain Oscilloscope.
- [23] Εγχειρίδιο λειτουργίας γεννήτριας Rohde & Schwarz SMB 100A Microwave Signal Generator.
- [24] Εγχειρίδιο λειτουργίας παλμογράφου Tektronix MDO 3054 Mixed Domain Oscilloscope.

- [25] Jeffrey Travis, (2006). LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun. Kring, Jim. (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. ISBN 0131856723. OCLC 67361308.
- [26] Bress, Thomas J. (2013). Effective LabVIEW Programming. [S.l.]: NTS Press. ISBN 1-934891-08-8.
- [27] IEC 60060-2, 1994, Amendment I High Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems, Annex H Procedure for estimating uncertainty in high voltage measurements.
- [28] European Norm (EN) 55016-4-2:2011/A2:2018 E, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty (CISPR 16-4-2:2011).
- [29] J.R. BERGERVOET, H. van VEEN, A Large-loop Antenna for Magnetic Field Measurements, Proceedings of the 8th International Zürich, Symposium on Electromagnetic Compatibility, March 1989, ETH Zentrum – IKT, 8092 Zürich, Switzerland, p. 29-34.
- [30] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [31] Theodore Dangelmayer, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [32] IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2008.
- [33] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Απρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα”, 2001
- [34] Paul Cartwright, “Electrostatic Hazards in the aerosol industry”, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp>
- [35] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.

- [36] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems” διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpaper/sfowler/esd97/esd97.htm>
- [37] Sen Yang, Jianchi Zhou, David Pommerenke, Dazhao Liu, “A simple frequency response compensation method for current probe measurements of ESD currents”, 2017.
- [38] “Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433”, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.
- [39] “Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438”, Instruments Schaffner.
- [40] “Instruction manual for the electrostatic discharge generator Dito”, EM Test.
- [41] Εγχειρίδιο λειτουργίας γεννήτριας TRA3000 της EMC Partner.